



Wissenschaftliche Berichte | Scientific reports

Modelle und Qualifizierungskonzepte zur ressourceneffizienten Teilefertigung MoQuaRT

Nr. 001, 2021



Modelle und Qualifizierungskonzepte zur ressourceneffizienten Teilefertigung -MoQuaRT

Impressum

Herausgeber:

Hochschule Mittweida
University of Applied Sciences
Der Rektor
Prof. Dr. phil. Ludwig Hilmer
Der Prorektor Forschung
Prof. Dr.-Ing. Uwe Mahn

Redaktion dieser Ausgabe:

Hochschule Mittweida | Referat Forschung
University of Applied Sciences

Tagungsleiter oder Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Leif Goldhahn
Prof. Dr. rer. nat. Frank Köster
Prof. Dr.-Ing. Eckhard Wißuwa

Kontakt:

Hochschule Mittweida
University of Applied Sciences
Referat Forschung
Postfach 1457
D-09644 Mittweida

Tel.: +49 (0) 3727 / 58-1264
Fax: +49 (0) 3727 / 58-21264
forschung@hs-mittweida.de
www.forschung.hs-mittweida.de

ISSN 1437-7624

Erscheinungsweise:

Unregelmäßig

Auflage:

Belegexemplare sowie bestellte Druckexemplare

Druck:

Hochschuldruckerei Hochschule Mittweida

Förderung:



Die Hochschule wird mitfinanziert durch
Steuermittel auf der Grundlage des vom
Sächsischen Landtag beschlossenen
Haushaltes.



Europa fördert Sachsen.
ESF
Europäischer Sozialfonds



Diese Maßnahme wird mitfinanziert
durch Steuermittel auf der Grundlage des
vom Sächsischen Landtag beschlossenen
Haushaltes.

Titelseite: Foto: Hochschule Mittweida

Bildnachweise werden direkt am Foto bzw. im
jeweiligen Artikel aufgeführt.

Im Scientific Report gelten grammatikalisch
maskuline Personenbezeichnungen gleicher-
maßen für Personen jeglichen Geschlechts.

Die Scientific Reports/Wissenschaftliche Berichte
als Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule
Mittweida - University of Applied Sciences lösen
die bisherigen Scientific Reports mit allen Volume
I-III ab und erscheinen mit Nr.1, 1998 ab
November 1998 in neuem Layout und in neuer
Zählung.

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren
verantwortlich.

SCIENTIFIC REPORTS | WISSENSCHAFTLICHE BERICHTE

The main aspect of the Scientific Reports is to promote
the discussion of modern developments in research and
production and to stimulate the interdisciplinary
cooperation by information about conferences,
workshops, promotion of partnerships and statistical
information on annual work of the Hochschule
Mittweida (FH) University of Applied Sciences. This issue
will be published sporadically. Contributors are
requested to present results of current research,
transfer activities in the field of technology and applied
modern techniques to support the discussion among
engineers, mathematicians, experts in material science
and technology, business and economy and social work.

Die Scientific Reports der Hochschule Mittweida
sind online verfügbar unter:

www.forschung.hs-mittweida.de/

veroeffentlichungen/scientific-reports

Eine Veröffentlichung einzelner Beiträge erfolgt
entsprechend der Open Access Strategie der
Hochschule Mittweida auf dem Hochschul-
schriftenserver:

<https://monami.hs-mittweida.de>

Die DOI für diesen Scientific report lautet:

<https://doi.org/10.48446/opus-12080>

Inhaltlicher Abschlussbericht



Thema der Nachwuchsforschergruppe:

Modelle und Qualifizierungskonzepte zur ressourceneffizienten Teilefertigung

-MoQuaRT-

Projektlaufzeit: 01. Juli 2016 bis 30. September 2019

Zuwendungsempfänger

Hochschule Mittweida – University of Applied Sciences
Fakultät Ingenieurwissenschaften
Technikumplatz 17
09648 Mittweida



**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**
University of Applied Sciences

Involvierte Professuren:

Professur Produktionsinformatik

InnArbeit – Zentrum für innovative Arbeitsplanung und Arbeitswissenschaft

Prof. Dr.-Ing. Leif Goldhahn

Tel.: 03727 / 58 - 1530

E-Mail: goldhahn@hs-mittweida.de

Professur Verfahrenstechnik/Oberflächentechnik

Prof. Dr. rer. nat. Frank Köster

Tel.: 03727 / 58 - 1532

E-Mail: koester@hs-mittweida.de

Professur Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Eckhard Wißuwa

Tel.: 03727 / 58 – 1367

E-Mail: wissuwa@hs-mittweida.de

Bibliographische Beschreibung

Schlagworte

Arbeitsvorbereitung; Arbeitsplanung; Ressourceneffizienz; wissensbasiertes System; Entscheidungsunterstützung; Prozessketten, Qualifizierungskonzept, Fertigungstechnik, Zerspanung, Oberflächentechnik

Referat

Der vorliegende Abschlussbericht der Nachwuchsforschergruppe *Entwicklung innovativer Verfahrens- und Betriebsmittelmodelle sowie Qualifizierungskonzepte für die ressourceneffiziente Fertigung hochbeanspruchter Bauteile* - MoQuaRT fasst die gewonnenen Erkenntnisse zu den Themen Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz in der Produktion inhaltlich zusammen. Der Abschlussbericht beschreibt die Entwicklung eines Gesamtmodells welches die Ressourcenbestände und -verbräuche eines Fertigungssystems gesamtheitlich abbildet, wobei der Fokus auf der Einsparung von Energie und Material liegt. Dieses Gesamtmodell beinhaltet vier Teilmodelle.

Das erste Teilmodell befasst sich mit der Analyse und ressourcenorientierten Bewertung der spanenden Fertigung, am Beispiel des Fertigungsverfahrens Drehen aus technologischer Sicht.

Das zweite Teilmodell beschäftigt sich mit der Analyse und technologischen Betrachtung sowie der Bewertung nasschemischer Beschichtungsprozesse.

Eine gezielte Analyse, Planung und Bewertung der Ressourcenverbräuche und Wechselwirkungen zwischen den nasschemischen Beschichtungsprozessen und der spanenden Fertigung ist Gegenstand des dritten Teilmodells.

Die Qualifizierung von Mitarbeitern für den optimierten Ressourceneinsatz, basierend auf den Erkenntnissen der anderen Teilmodelle, thematisiert das Teilmodell.

Beteiligte Professoren:

Prof. Dr.-Ing. Leif Goldhahn (Professur Produktionsinformatik)

Prof. Dr.-Ing. Eckhard Wißuwa (Professur Fertigungstechnik)

Prof. Dr. rer. nat. Frank Köster (Professur Verfahrenstechnik/Oberflächentechnik)

Projektteam:

M.Eng. Robert Eckardt (Professur Produktionsinformatik)

Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Roch (Professur Produktionsinformatik)

Dipl.-Ing. (FH) Christina Pietschmann (Professur Produktionsinformatik)

Dipl.-Ing. (FH). Rico Krumbiegel (Professur Fertigungstechnik)

M.Eng. Rico Matthes (Professur Fertigungstechnik)

B.Eng. Philipp Hinkeldey (Professur Fertigungstechnik)

B.Eng. Florian Berger (Professur Fertigungstechnik)

M.Eng. Michael Markus (Professur Verfahrenstechnik/Oberflächentechnik)

Danksagung:

Gefördert vom:



Die Autoren danken dem Europäischen Sozialfonds (ESF) und dem Freistaat Sachsen für die Förderung der Nachwuchsforschergruppe *Entwicklung innovativer Verfahrens- und Betriebsmittelmodelle sowie Qualifizierungskonzepte für die ressourceneffiziente Fertigung hochbeanspruchter Bauteile – „MoQuaRT“* und dem Projektträger Sächsische Aufbaubank – Förderbank – (SAB).

Betreut von:



In der Nachwuchsforschergruppe arbeiten Nachwuchsforscher der Professuren Produktionsinformatik, Fertigungstechnik und Oberflächentechnik/Verfahrenstechnik der Hochschule Mittweida

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

	Seite
<i>Inhaltsverzeichnis</i>	<i>1</i>
<i>1 Motivation</i>	<i>1</i>
<i>2 Zielstellung und Überblick</i>	<i>4</i>
<i>3 Durchgeführter Lösungsweg</i>	<i>7</i>
<i>3.1 Allgemeines</i>	<i>7</i>
<i>3.2 Beschreibung angewandeter Methoden innerhalb des Lösungswegs</i>	<i>8</i>
<i>3.3 Grundsätzliches Vorgehen innerhalb des Lösungswegs</i>	<i>8</i>
<i>3.4 Beschreibung des Eingehens auf spezifische Anforderungen</i>	<i>11</i>
<i>3.5 Zeitliche Gliederung, Meilensteinplan</i>	<i>12</i>
<i>4 Weiterentwicklung, Untersuchung, Charakterisierung und ggf. Substitution spanender Fertigungsverfahren</i>	<i>14</i>
<i>4.1 Grundlagen</i>	<i>14</i>
4.1.1 Grundlegende Begriffsdefinitionen	<i>14</i>
4.1.2 Das Fertigungsverfahren Drehen	<i>14</i>
4.1.3 Werkzeugmaschine CTX Alpha 500 und Auswerteeinheit der Zerspanungskräfte.....	<i>15</i>
4.1.4 Werkzeuge	<i>16</i>
4.1.5 Allgemeines zum Kühlschmierstoff.....	<i>17</i>
4.1.6 Angewendete Kühlschmierstoffvarianten innerhalb der Untersuchungen	<i>18</i>
<i>4.2 Versuchsdurchführung</i>	<i>21</i>
4.2.1 Beschreibung der Versuche	<i>21</i>
4.2.2 Aus- und Bewertung der einzelnen Versuche.....	<i>23</i>
<i>4.3 Zwischenfazit und Zusammenfassung der Weiterentwicklung, Untersuchung, Charakterisierung und ggf. Substitution spanender Fertigungsverfahren</i>	<i>35</i>
<i>5 Entwicklung und Herstellung von Mikrostrukturen durch Laserbearbeitungsverfahren auf diskreten Werkzeugen. Untersuchung dieser neuen Werkzeuggeometrien im Hinblick auf die Ressourceneffizienz</i>	<i>38</i>
<i>5.1 Grundlagen</i>	<i>38</i>
5.1.1 Grundlegende Begriffsdefinitionen	<i>38</i>
5.1.2 Laserstrukturierung mittels Ultrakurzpulslaser	<i>39</i>
5.1.3 Das Fertigungsverfahren Drehen	<i>39</i>
5.1.4 Werkzeugmaschine CTX Alpha 500 und Auswerteeinheit der Zerspanungskräfte.....	<i>39</i>

5.1.5	Werkzeuge	40
5.1.6	Allgemeines zum Kühlschmierstoff.....	40
5.1.7	Angewendete Kühlschmierstoffvarianten innerhalb der Untersuchungen	41
5.2	Vorbereitung und Beschreibung der Versuche	41
5.2.1	Vorbereitung der Versuche.....	41
5.2.2	Beschreibung der Versuche	45
5.2.3	Aus- und Bewertung der Versuche	47
5.3	Zwischenfazit und Zusammenfassung zur Entwicklung und Herstellung von Mikrostrukturen durch Laserbearbeitungsverfahren auf diskreten Werkzeugen. Untersuchung dieser neuen Werkzeuggeometrien im Hinblick auf die Ressourceneffizienz.....	51
6	<i>Untersuchungen zur energieeffizienten spanenden Bearbeitung prismatischer Teile am Beispiel des Fräsens</i>	54
6.1	Einleitung	54
6.2	Grundlagen	55
6.2.1	Charakterisierung der Oberflächengrenzschicht	55
6.2.2	Probenwerkstoff	56
6.2.3	Zustand der Probe.....	56
6.2.4	Probengeometrie	57
6.2.5	Abfolge der durchzuführenden Analyseverfahren.....	57
6.3	Versuchsplanung.....	61
6.3.1	Variable Einflussgrößen	61
6.3.2	konstante Einflussgrößen.....	62
6.4	Auswertung der experimentellen Untersuchungen.....	62
6.4.1	Versuchsreihe V1	62
6.4.2	Versuchsreihe V2	68
6.4.3	Mikrohärteprüfung	70
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	72
6.6	Ausblick.....	73
7	<i>Weiterentwicklung, Untersuchung und Charakterisierung von gesundheitsverträglichen, ressourceneffizienten Alternativen zu Cr(VI)-erzeugten Hartchromschichten.....</i>	74
7.1	Ausgangspunkt.....	74
7.2	Bedarf Modellierung	75

7.2.1	Chemisch Nickel	76
7.2.2	Galvanisch Nickel	81
7.2.3	Hartverchromung.....	84
7.3	Ergebnisse und Konsequenzen der Modellanalyse	84
7.3.1	Galvanisch Ni-B-Dispersionsschicht	85
7.3.2	Chemisch Nickel-Phosphor-Bor-Dispersionsschicht	87
7.4	Zusammenfassung Berechnungsmodell nasschemische Beschichtung	98
8	<i>Erarbeitung ressourcenorientierter Teilmodelle für die Fertigung hochbeanspruchter Bauteile als Grundlage innovativer Verfahrens- und Betriebsmittelmodelle</i>	100
8.1	Modellbildung Maschinenmodell.....	100
8.2	Beschreibung, Aus- und Bewertung der durchgeführten Versuche.....	105
8.2.1	Herangehensweise zur Datenerfassung für die Berechnung der Gesamtleistung der Maschine inklusive ihrer Komponenten	105
8.2.2	Datenerfassung, -auswertung und Formelgenerierung Energiebedarfsprognose für die Drehmaschine EMCO Concept Turn 60.....	108
8.2.3	Datenerfassung, -auswertung und Formelgenerierung Energiebedarfsprognose für die Drehmaschine EMCO 120P	114
8.2.4	Integration der Funktionen in ein wissensbasiertes System.....	118
8.2.5	Berechnung der Leistungsdaten auf Komponentenebene der Maschinen	122
9	<i>Beitrag zur Erarbeitung innovativer Verfahrens- und Betriebsmittelmodelle (CAM-basiert) als Simulationsansatz ressourcenorientierter Qualifizierungskonzepte und deren Umsetzung in Virtual Reality</i>	128
9.1	Einleitung	128
9.2	Grundlagen zur Erstellung einer Maschinensimulation in VR	129
9.2.1	Benötigte Komponenten	129
9.2.2	Ablauf zur Erstellung	130
9.3	Modellaufbereitung in CAD	131
9.3.1	Werkstück	131
9.3.2	Werkzeuge	132
9.3.3	Entwicklung des Maschinen-Modells für die CNC-Drehmaschine Wabeco CC-D 100.....	132
9.4	Aufbereitung eines Demonstrators in CAMWorks	135
9.4.1	Allgemeine Vorgehensweise	135
9.4.2	NC-Programmierung des Demonstrators	137
9.4.3	Erkenntnisse aus der NC-Programmierung	138

9.5	Modell-Import und -Aufbereitung in VR.....	139
9.5.1	Modell-Import	139
9.5.2	Modell-Aufbereitung.....	140
9.6	Schnittstellenprogrammierung zwischen VR und CAM.....	141
9.6.1	Animation in IC.IDO mittels IDO.Script.....	141
9.6.2	Programmierung der Schnittstelle zur Konvertierung von NC-Programmen.....	143
9.7	Ergebnisse	150
9.8	Aufbau von Bedienhandlungen als Ansatz zur Mitarbeiterqualifikation.....	151
9.8.1	Aufbau der Szene in IC.IDO	151
9.8.2	Erstellung der Bedienfunktionen.....	152
9.8.3	Ergebnis	154
10	Entwicklung eines Qualifizierungskonzeptes	155
10.1	Ziel und Spezifikation des Qualifizierungskonzeptes zur ressourcenorientierten spanenden Fertigung.....	155
10.2	Vorgehen zur Entwicklung eines Qualifizierungskonzeptes	156
10.3	Entwicklungsphase 1: Definition Anwendungsbereich	157
10.4	Entwicklungsphase 2: Analyse Mitarbeiterkompetenz (Allgemein)	159
10.4.1	Grundlagen und Vorgehensweise	159
10.4.2	Spezifikation des Tätigkeitsbereichs der Zielgruppe	162
10.4.3	Tätigkeitsbeschreibung – Definition der Anforderungen an die Tätigkeit.....	162
10.4.4	Ableitung erforderlicher Kompetenzen.....	163
10.4.5	Erarbeitung Soll-Kompetenzprofil	165
10.5	Entwicklungsphase 3: Ableitung Qualifizierungskonzept.....	167
10.5.1	Definition, Aufbau und spezifische Anforderungen	167
10.5.2	Lernmethoden des Qualifizierungskonzeptes	170
10.5.3	Integrationskonzept als Basis des Qualifizierungskonzeptes	170
10.5.4	Umsetzung des Qualifizierungskonzeptes.....	172
11	Pilot-Qualifizierungskonzept MoQuaRT.....	174
11.1	Beschreibung Qualifizierungskonzept MoQuaRT.....	174
11.2	Auswertung der Anwendung des Qualifizierungskonzeptes	180
12	Entwickeltes Gesamtmodell MoQuaRT	182
13	Fazit und Forschungsbedarf.....	185
13.1	Fazit	185

13.2	Forschungsbedarf.....	186
13.3	Ausblick und Transfer am Beispiel virtueller Bedienhandlungen Trainingsfabrik 4.0.....	187
14	Literatur	191
15	Abkürzungsverzeichnis.....	201
16	Abbildungsverzeichnis.....	207
17	Tabellenverzeichnis.....	214
18	Anlagenverzeichnis.....	217

Motivation

Die Betrachtung und die nachfolgende Erhöhung der Ressourceneffizienz technischer Produkte über deren gesamten Lebenszyklus hinweg ist eine der zentralen Fragestellungen für fertigernde Unternehmen in Deutschland [2].

Die Forderungen an global agierende Produktionsbetriebe nach Produktvielfalt und -variabilität aber auch deren qualitätsgerechte flexible Herstellung bedingen hochkomplexe Produktionsprozesse sowie -strategien für die spanende Fertigung und Hartstoffbeschichtung gerade für hochbeanspruchte Bauteile.

Darüber hinaus rücken die weltweit progressiv wachsenden Energie- und Materialbedarfe, welche vor allem perspektivisch eine Rohstoffverknappung [3], [4] begünstigen, auch in den Fokus der Arbeitsvorbereitung der Unternehmen. Der Bedarf für die fundierte Analyse und nachhaltige Senkung von Ressourcenbedarfen und -verbräuchen hat sich aus ethischen, volkswirtschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Überlegungen in den letzten Jahren ergeben. Die Notwendigkeit, sowohl Energie- als auch Materialbedarfe nachhaltig zu reduzieren, ist zu einem anerkannten Ziel sowohl der Politik als auch der konsumierenden Gesellschaft geworden [5], [6]. Die Politik untersetzt dies, z. B. mit dem Programm zur Umsetzung der Energiewende im Einklang mit mehr Klimaschutz oder dem BMBF-Rahmenprogramm Forschung für Nachhaltige Entwicklungen [7].

Um der ineffizienten Nutzung von wertvollen Ressourcen zu begegnen müssen Lösungen gefunden werden, welche die Fertigungsprozesse nachhaltig gestalten, ohne dabei die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen negativ zu beeinflussen [8], [9], [10].

Einen technologischen Lösungsansatz bietet die Modellierung, Selektion und Applikation von alternativen Fertigungsverfahren aber auch die ressourcenorientierte Spezifikation des notwendigen Rohmaterials im Hinblick auf Geometrie sowie Dimensionierung.

MitarbeiterInnen der Arbeitsplanung nehmen maßgeblich Einfluss auf die Ressourceneffizienz der Fertigungsprozesse, z. B. durch die Auswahl von Fertigungsverfahren sowie -strategien, oder die Auswahl einer grundsätzlich geeigneten Ausgangsmaterialgeometrie [11].

Laut [2] und [12] verursachen vor allem die Menschen im Planungs- und Fertigungsprozess infolge:

- fehlenden Bewusstseins für Ressourcenbedarfe,
- mangelnden Wissens über Einsparpotentiale,
- unzureichender Prozessüberwachung aber auch
- fehlenden Wissens zu energieorientiertem Vorgehen, um den Produktionsprozess nachhaltig zu hinterfragen,

eine ineffiziente Nutzung der Ressourcen.

Diese Faktoren zeigen einerseits die Notwendigkeit der Sensibilisierung und Schulung der MitarbeiterInnen für das Thema einer ressourcenorientierten Teilefertigung. Andererseits unterstreichen sie die essentielle Bedeutung neuer Methoden zur Planung und Gestaltung geeigneter Fertigungsprozesse und der damit einhergehenden Material-, Energie- und Zeitersparnis. Die Vermittlung dieser Zusammenhänge erfordert ressourcenorientierte Qualifizierungskonzepte. Für diese Konzepte ist die systematische Analyse und Aufbereitung der Fähigkeiten, des Wissens und der Qualifikation der Mitarbeiter für ihren jeweiligen Tätigkeitsbereich notwendig.

Die Oberfläche von Bauteilen und deren sehr komplexe Fertigung beispielsweise an Tiefdruckformen, Tiefdruckleeves und Prägezyindern muss zur Aufgabengewährleistung einen hohen Verschleißschutz aufweisen. Der Fertigungsprozess erfordert zunächst eine spanende Bearbeitung und die nachfolgende galvanische Beschichtung. Dies ist jeweils durch den Einsatz unterschiedlicher Fertigungsverfahren sowie Verfahrensvarianten und -parameter möglich.

Um die Oberfläche dieser thermisch und mechanisch hoch belasteten Bauteile vor Verschleiß zu schützen, wird gegenwärtig mit klassischer Chrom VI- Beschichtung gearbeitet. Die Chrom (VI)- Beschichtung weist dabei neben der PFT- (Perfluorierte Tenside) und Cr(VI)- Problematik (gesundheitsgefährdende Stoffe), auch den Nachteil eines sehr schlechten Wirkungsgrades von nur 15 bis 20% auf. Der Umgang mit Cr(VI) beinhaltet ein hohes Gefährdungspotenzial für Mensch und Umwelt und findet sich daher auf der Liste von Gefahrstoffen wieder, deren Verbot auf Europaebene diskutiert wird. Eine interessante Alternative zur Cr(VI)- Beschichtung sind Nickel-Phosphor-Schichten. Diese bieten den zusätzlichen Vorteil,

dass sie in Kombination mit Dispersionsschichten (dem Einbau von Partikeln) aufgebracht werden können.

Nickel-Phosphor-Schichten können galvanisch (mit Strom) als auch außenstromlos realisiert werden. Die Badführung und die Prozessparameter unterscheiden sich dabei deutlich voneinander. Auch der Einsatz weiterer Oberflächenbeschichtungen wie etwa Kupfer als zusätzliche Haftschiicht oder Bronze als Hartschiicht sind dafür denkbar. In der Galvanotechnik muss dafür die Beschichtung von Musterteilen mit verschiedenen Verfahren und unterschiedlichen Materialien betrachtet werden, um bei einer den Anforderungen genügenden Qualität eine möglichst positive Ressourceneffizienz unter gleichzeitiger Vermeidung gesundheitsgefährdender Stoffe zu erreichen.

Zielstellung und Überblick

Innerhalb der interdisziplinären Nachwuchsforschergruppe MoQuaRT an der Fakultät Ingenieurwissenschaften der Hochschule Mittweida sollte aus geeigneten Modellen, die je nach Spezialisierungsgebiet der teilnehmenden Professuren entworfen wurden, ein Gesamtmodell entstehen, welches die Ressourcenbestände und -verbräuche eines Fertigungssystems geeignet abbilden kann (vgl. Abbildung 1).

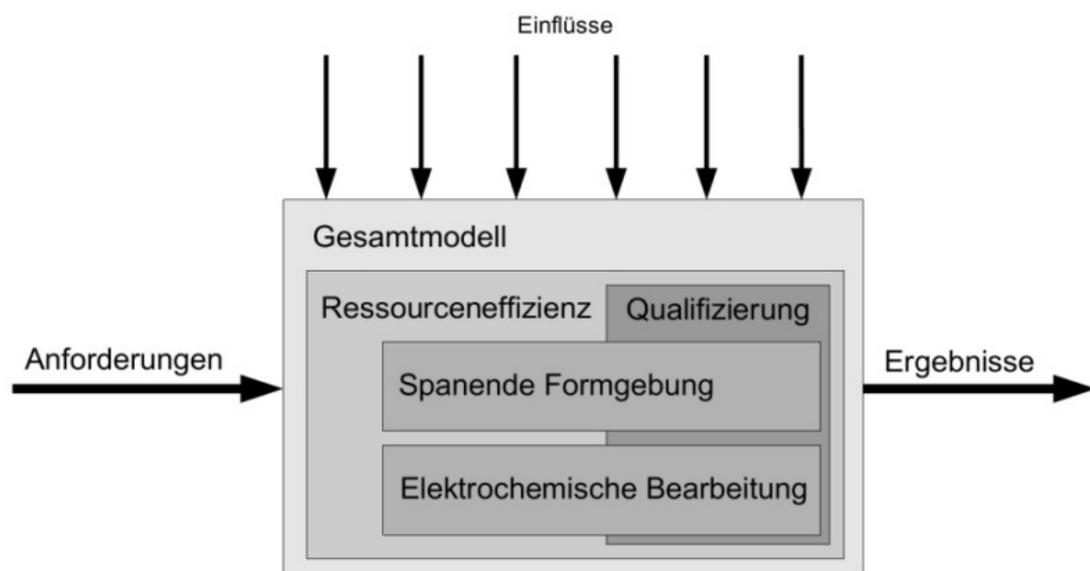


Abbildung 1: Gewählter Ansatz und grundsätzliches Zusammenwirken der Fachdisziplinen. Mittels gesamtheitlicher, realitätsnaher Modelle und entwickelter Verfahren ist es möglich, Ressourcenbedarfe und -verbräuche der Fertigungsbereiche zu analysieren.

Als exemplarische Anwendungsbereiche sind nach Projektende die sehr komplexen Fertigungen von Tiefdruckformen, Tiefdrucksleeves, Prägezyindern, verschleißbeanspruchten Wellen, Zahnwellen, Kolben, Zylindern und anderen ähnlichen mechanisch und/ oder thermisch hoch beanspruchten Bauteilen zu sehen. Die Oberfläche solcher Bauteile muss einen hohen Verschleißschutz aufweisen. Sie müssen zunächst spanend bearbeitet und nachfol-

gend galvanisch beschichtet werden. Dies ist jeweils durch den Einsatz unterschiedlicher Verfahren sowie Verfahrensvarianten und -parameter möglich und lässt sich nun mit Hilfe von vergleichenden Modellen beschreiben, welche in ein Gesamtmodell integriert werden.

Das zu entwickelnde Gesamtmodell gliedert sich in vier Teilmodelle:

1. Analyse und ressourcenorientierte Bewertung der spanenden Fertigung aus technologischer Sicht,
2. Analyse und technologische Betrachtung sowie Bewertung nasschemischer Beschichtungsprozesse
3. gezielte Analyse, Planung und Bewertung der Fertigungsprozesse mit ihren Ressourcenverbräuchen
4. Qualifizierung von Mitarbeitern für den optimierten Ressourceneinsatz bei diesen Verfahren sowie die Verbesserung der Ressourceneffizienz.

Um die einzelnen Teilmodelle zu erstellen, war die präzise Untersuchung der Fertigungsverfahren unter Beachtung der Anforderungen an das jeweilige Fertigteil (Referenzteil) sowie der prozessbestimmenden Parameter und Einflussgrößen erforderlich.

Auf Grundlage der verfügbaren Randbedingungen (zur Verfügung stehende Fertigungsmaschinen, Größe der galvanischen Bäder usw.) wurden geeignete Musterteile und Demonstratoren festgelegt. Die größten Effekte bzgl. einer Verbesserung der Ressourceneffizienz werden bei Serienteilen, die in großer Stückzahl gefertigt werden, erwartet. Aber auch ähnliche Bauteile, die zwar in kleinen Stückzahlen aber mit vergleichbaren Technologien wiederholt erzeugt werden, bieten Potenzial.

Innerhalb der spanenden Bearbeitung muss, zusätzlich zur Prüfung des Einsatzes unterschiedlicher Fertigungsverfahren, die Verwendung alternativer Rohstoffe bzw. Materialien, Schnittwerte und Schneidstoffe überprüft werden. Mit diesen Fertigungsprozessen bzw. deren Variationen lassen sich unterschiedliche Qualitäten von Oberflächen herstellen, die mit verschiedenen Ressourcenarten, -nutzungen und -verbräuchen einhergehen.

Aus den durchgeführten Versuchen wurden nachfolgend bewertende, vergleichende Modelle abgeleitet, die eine mehrkriterielle Zielfunktion zulassen. Darüber hinaus werden die Anforderungen an die Oberfläche der Bauteile für eine galvanisch abgeschiedene Hartchromschicht festgelegt. Diese Schicht wird technologisch und wirtschaftlich bedingt aus einem Cr(VI)- Elektrolyten galvanisch abgeschieden.

Die Qualität der erreichten Oberflächen (z. B. Haftung und Härte) war mittels zur Verfügung stehender Mess- und Prüftechnik zu evaluieren. Auch ergab sich daraus die experimentelle Überprüfung der Verschleißfestigkeit (z. B. mittels Kugeltestverfahren).

Durch die Verbindung zwischen spanender und galvanischer Bearbeitung müssen auch Wechselwirkungen zwischen den Teilmodellen erkannt und modelliert werden. Daher entstand ein ressourcentechnisch geprägtes Teilmodell, welches die beiden fertigungstechnisch geprägten Teilmodelle direkt aufgreift, deren Wechselwirkungen sowie Abhängigkeiten zueinander betrachtet und diese bzgl. der Ressourcenverbräuche analysiert. Das Modell sollte die wesentlichen Parameter bzgl. ihrer Wirkung auf die einzelnen Ressourcen herausstellen.

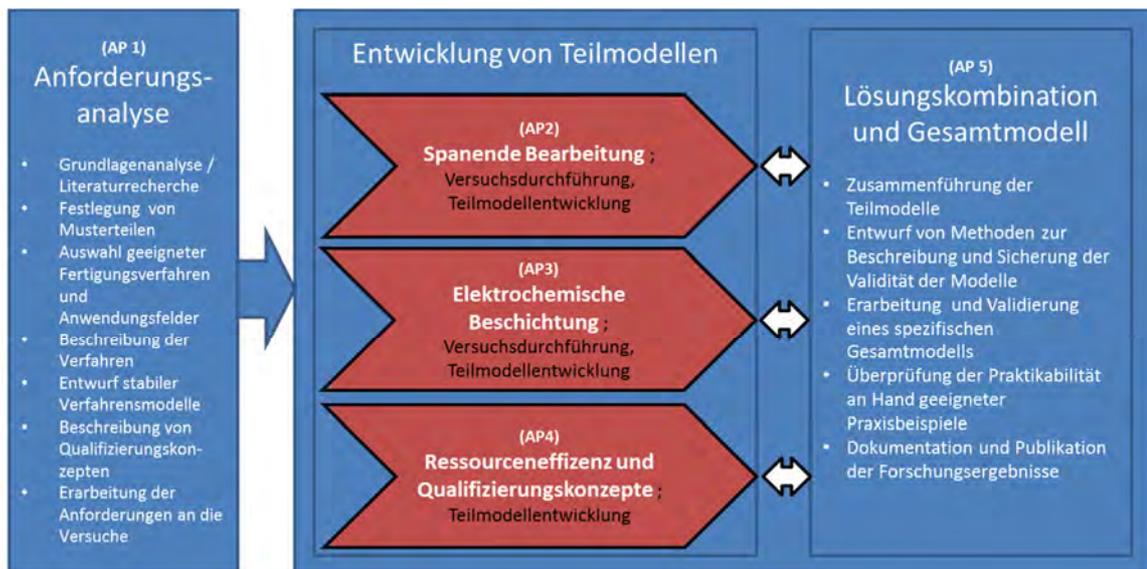
Darauf aufgesetzt wird ein weiteres Teilmodell, im Sinne eines planerischen Qualifizierungsmodells für MitarbeiterInnen. Die MitarbeiterInnen erkennen und variieren in einem sinnvollen Rahmen wesentliche Parameter sowie deren Einfluss auf die Ressourcenbilanz. Es wird damit die gezielte Qualifizierung der direkt handelnden Mitarbeiter sowohl in der Planung als auch in der Fertigung unterstützt.

Das Gesamtmodell bildet somit das Zusammenspiel der einzelnen Teilmodelle als bestmögliche Lösung zwischen fertigungstechnischen Erfordernissen und Grundbedingungen sowie der Forderung nach größtmöglicher Ressourceneffizienz ab.

Durchgeführter Lösungsweg

3.1 Allgemeines

Basierend auf einer gemeinsamen Anforderungsanalyse gestalteten die Professur Fertigungstechnik, die Professur Verfahrenstechnik und Oberflächentechnik sowie die Professur Produktionsinformatik die Untersuchungen ihrer fachspezifischen Verfahren zunächst unabhängig voneinander. Besondere Beachtung fanden die Anforderungen an das jeweilige Referenzteil sowie die prozessbestimmenden Parameter und Einflussgrößen. Die sich daraus ergebenden Teilmodelle wurden in einem späteren Schritt in ein Gesamtmodell überführt (vgl. Kapitel 12). Die Abbildung 2 veranschaulicht den grundsätzlich verfolgten Lösungsweg der Nachwuchsforschergruppe MoQuART zur Zielerreichung.



Legende: AP= Arbeitspaket

Abbildung 2: Allgemeine Aufgabenübersicht innerhalb der Nachwuchsforschergruppe MoQuART

3.2 Beschreibung angewendeter Methoden innerhalb des Lösungswegs

Die Nachwuchsforschergruppe nutzte die folgenden Methoden zur Realisierung der einzelnen Arbeitspakete:

- Recherchen in einschlägiger Fachliteratur wie Datenbanken, Büchern, Tagungsbänden usw.
- Konsultationen mit den jeweils betreuenden Professoren
- Regelmäßige Meetings zum Soll-/ Ist-Abgleich des Projektfortschritts
- Teilnahmen an themenbezogenen Weiterbildungen, Kolloquien und Messen

3.3 Grundsätzliches Vorgehen innerhalb des Lösungswegs

Innerhalb des ersten Arbeitspaktes, der *Anforderungsanalyse*, wurden von jeder der drei Professuren entsprechende grundlegende Analysen und Literaturstudien durchgeführt. Es sind weiterhin die Musterteile für die Versuchsdurchführung bestimmt worden. Dabei war es erforderlich, die entsprechenden Teile, deren Dimensionierung und Gestaltung (auch Konturen) (vgl. Abschnitt 4.2) innerhalb der Nachwuchsforschergruppe abzustimmen, damit eine mögliche Weiterbearbeitung der Musterteile realistisch wird. Ebenso erfolgte in diesem Arbeitspaket die Festlegung der Anwendungsfelder sowie die Auswahl und Beschreibung der geeigneten Fertigungsverfahren. Damit verbunden war die Beschreibung der Anforderungen an die Versuche bzw. ein grobes Vordenken dieser. Auch die ersten Grundlagen zur Erstellung und Gestaltung des Qualifizierungskonzeptes wurden innerhalb dieses Arbeitspaketes geschaffen.

Im zweiten Arbeitspaket, der *Versuchsdurchführung, Teilmodellentwicklung, Fokus spanende Bearbeitung* (vgl. Kapitel 4, 5 und 6) wurden die notwendigen physischen Zerspanungsversuche detailliert geplant, die Auswertungsvorschriften festgelegt und die Versuche entsprechend der erstellten Reglements durchgeführt, ausgewertet und dokumentiert. Darauf basierte die Ableitung eines Teilmodells für die spanende Fertigung.

Im Arbeitspaket drei *Versuchsdurchführung, Teilmodellentwicklung, Fokus nasschemische Beschichtung* (vgl. Kapitel 7) wurde die nasschemische Beschichtung näher untersucht. Dazu wurden die Versuche ebenfalls detailliert geplant die Auswertungsvorschriften festgelegt und die Versuche entsprechend der erstellten Reglemente im Becherglas-Maßstab durchgeführt, ausgewertet und dokumentiert. Weiterhin erfolgte die Schichtcharakterisierung und die Ableitung eines Teilmodells für das Fertigungsverfahren der nasschemischen Beschichtung.

Das vierte Arbeitspaket *Teilmodellentwicklung, Fokus Ressourceneffizienz sowie Qualifizierungskonzepte* (vgl. Kapitel 8, 9 und 10) diente zum einen der Auseinandersetzung mit den notwendigen Einflussgrößen und Restriktionen zur Modellerstellung, sowie der Ableitung von Zusammenhängen aus ressourcenspezifischer Sicht. Zum anderen wurden Zusammenhänge abgeleitet und dargestellt, die sich auf die Qualifizierung der Mitarbeiter beziehen. Zudem flossen die Ergebnisse der Arbeitspakete eins bis drei in die Modellentwicklung ein und die Versuchsergebnisse wurden dokumentiert.

Im fünften Arbeitspaket *Lösungskombination und Gesamtmodell* (vgl. Kapitel 12 und 13) erfolgte abschließend die Überführung der Teilmodelle in ein Gesamtmodell. Dazu wurden die Teillösungen zusammengeführt und die sich daraus ergebenden Nebeneffekte geprüft, näher betrachtet und bewertet. Das Gesamtmodell wurde durch interne Versuche, Diskussionen mit Fachexperten und pilothafte Applikationen validiert.

Darüber hinaus erfolgte in diesem Arbeitspaket die umfassende Dokumentation und auch eine kontinuierliche Publikation der Forschungsergebnisse in Form von schriftlichen Beiträgen, PowerPoint- oder Poster-Präsentationen. Folgende Veröffentlichungen sind dem Projekt zuzuordnen:

Schriftliche Publikationen

- Goldhahn, Leif; Pietschmann, Christina; Eckardt, Robert; Roch, Sebastian: Concepts for improving employee qualifications for resource-efficient chipping production. In: Human Interaction and Emerging Technologies. Bericht IHET International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies, 21- 24. August 2019, ISBN 978-3-030-25628-9, 2019, pp. 66-72; DOI: 10.1007/978-3-030-25629-6_11
- Goldhahn, Leif; Eckardt, Robert; Pietschmann, Christina; Roch, Sebastian: Competency Profiles as a Means of Employee Advancement for a Resource-Efficient Chipping Production. In: Advances in Manufacturing, Production Management and Process Control, Proceedings of the AHFE 2019, 24- 28. Juli 2019, Washington D.C., USA, pp.146-157; DOI: 10.1007/978-3-030-20494-5_14
- Goldhahn, Leif; Roch, Sebastian; Pietschmann, Christina; Eckardt, Robert: Mitarbeiterorientiertes Qualifizierungskonzept für die ressourcenorientierte spanende Fertigung. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.): Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten. Bericht zum 65. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 27. Februar – 1. März 2019, ISBN 978-3-936804-25-6, 2019, C.7.4 pp. 1-6;

- Goldhahn, Leif; Pietschmann, Christina; Eckardt, Robert; Roch, Sebastian: Qualifizierungskonzept für die ressourcenorientierte Teilefertigung. In: Digitalisierung in Industrie und Gesellschaft - Arbeiten und Leben im Umfeld der 4. Industriellen Revolution. Scientific Reports. 25. Interdisziplinäre Wissenschaftliche Konferenz Mittweida, ISSN 1437-7654, 2018, Nr. 3, S. 43 -47
- Goldhahn, Leif; Eckardt, Robert; Pietschmann, Christina: Process for the machine specific analysis and modelling of the technology based energetical demand forecasts. In: Monostori, László; Stephan, Gabor; Bachrathy, Dániel (Ed.): 8th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC), Procedia CIRP Volume 77, ISSN: 2212-8271, 2018, p. 405 – 408; <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.298>
- Goldhahn, Leif; Pietschmann, Christina: Energetische Modellierung von Fräsprozessen für die technologische Planung. In: Müller, Egon (Hrsg.): Arbeitswelten 4.0. Chancen, Herausforderungen, Lösungen. Tagungsband. TBI` 17. 09.-10. November 2017. Chemnitz: TU Chemnitz, IBF (ISSN 0947 – 2495) Sonderheft 23, 2017, S. 239 – 248
- Goldhahn, Leif; Wißuwa, Eckhard; Köster, Frank; Pietschmann, Christina; Roch, Sebastian; Markus, Michael; Krumbiegel, Rico; Seidenbusch, Kai; Eckardt, Robert: Grundlagen und Potentiale an eine ganzheitliche ressourceneffiziente Fertigung von rotationssymmetrischen beschichteten Bauteilen. In: 18. Nachwuchswissenschaftlerkonferenz (NWK) 31. Mai 2017 an der Hochschule Mittweida. Scientific Reports. ISSN 1437-7624, 2017, Nr. 1, S. 296 – 301
- Markus, Michael; Köster, Frank: Substitution von Hartchromschichten auf Basis von Nickel-Bor-Dispersionsschichten. In: 18. Nachwuchswissenschaftlerkonferenz (NWK) 31. Mai 2017 an der Hochschule Mittweida. Scientific Reports. ISSN 1437-7624, 2017, Nr. 1, S. 251- 256

Fachvorträge:

- Goldhahn, Leif; Eckardt, Robert; Pietschmann, Christina; Roch, Sebastian: Ressourceneffiziente Fertigung hochbeanspruchter Bauteile. In: Fachtagung Freie digitale Lehrkonzepte für die akademische Ausbildung im Maschinenbau, Dresden, 26.Septmber 2019
- Eckardt, Robert: Competency Profiles as a Means of Employee Advancement for a Resource-Efficient Chipping Production. 10th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2019), 28. Juli 2019, Washington D.C., USA
- Goldhahn, Leif; Eckardt, Robert: Personalentwicklung für eine ressourcenorientierte spanende Fertigung. Vortrag zur Intec - Internationale Fachmesse für Werkzeugmaschinen, Fertigungs- und Automatisierungstechnik. Leipzig, 05.02.2019

- Pietschmann, Christina; Eckardt, Robert: Ressourceneinsparung in der Teilefertigung – Ansätze in Planung, Technologie und Betriebsmittel. 5. Umwelt- und Technologietag. Coburg: Brose Fahrzeugteile GmbH & Co, 13.03.2018

Messestand:

- Intec 2019- Internationale Fachmesse für Werkzeugmaschinen, Fertigungs- und Automatisierungstechnik. Leipzig, 05.-08. Februar 2019

Nachwuchsforscher-Poster:

- Förderbekanntmachung MoQuaRT
- Poster 18. Nachwuchsforscherkonferenz
- Poster 19. Nachwuchsforscherkonferenz
- Poster Intec 2019
- Poster IHJET- Tagung

Durch die zielkonforme inhaltliche Abarbeitung aller gesetzten Schwerpunkte innerhalb der Arbeitspakete konnte das Nachwuchsforscher-Projekt am 30. September 2019 erfolgreich abgeschlossen werden.

3.4 Beschreibung des Eingehens auf spezifische Anforderungen

Den Nachwuchswissenschaftlern wurden neben der fachlichen Arbeit in speziellen Lehrveranstaltungen die Qualifizierungsbereiche Lehre, soziale Kompetenz und Projektmanagement zur Auswahl gestellt. Darüber hinaus wurden mit der Wahrnehmung entsprechenden Weiterbildungsangebote der AVS Meißen die didaktischen Qualitäten der Nachwuchswissenschaftler erfolgreich weiterentwickelt und die Nachwuchswissenschaftler konnten zielgerichtet in verschiedenen Praktika bzw. Seminaren eingesetzt werden um ihre Fachkenntnisse und ihre Forschungsergebnisse zu präsentieren.

Die Forderung und Förderung der wissenschaftlichen Arbeitsweise der Nachwuchsforscher erfolgte durch den Umgang mit relevanten experimentellen und theoretischen Methoden während der gesamten Projektlaufzeit. Zur umfassenden Qualifizierung der am Projekt involvierten Nachwuchswissenschaftler wurden von den betreuenden Professoren monatliche Fachgespräche und Diskussionen zur Weiterbildung auf projektrelevanten Themengebieten durchgeführt. Darüber hinaus präsentierten die Nachwuchswissenschaftler in regelmäßigen Abständen ihre Forschungsergebnisse im Rahmen von Fachvorträgen für Unternehmen des Freistaates Sachsen und für wissenschaftliche Institutionen, wodurch einerseits der Wissenstransfer und andererseits die persönliche soziale Entwicklung realisierbar wurden.

3.5 Zeitliche Gliederung, Meilensteinplan

In der nachfolgenden **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die zuvor genannten Arbeitspakete inklusive der zeitlichen Gliederung des Forschungsvorhabens sowie deren entsprechende Meilensteine hinterlegt.

In der Tabelle 1 ist der Vergleich des Soll- zum Ist- Stand der Bearbeitung der Projektinhalte nach dem Projektabschluss mit dem jeweiligen Arbeitsaufwand dokumentiert. Die Tabelle zeigt, dass alle Arbeitsinhalte inhaltsentsprechend bearbeitet wurden.

Tabelle 1: Arbeitsplan und zeitlicher Ist-Abgleich Projektumfang kumuliert

Nr.	Arbeitspaket / Arbeitseinheit	216		2017				2018				2019		
		III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III
1	Anforderungsanalyse													
1.1	Grundlagenanalyse /Literaturrecherche													
1.2	Festlegung Musterteile													
1.3	Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren und Anwendungsfelder													
1.4	Beschreibung der Verfahren													
1.5	Grundlagenschaffung Qualifizierungskonzepte													
1.6	Erarbeitung der Anforderungen an die Versuche													
MS 1	Arbeitspaket 1 abgeschlossen (01.02.2018)													
2	Versuchsdurchführung, Teilmodellentwicklung, Fokus: spanende Bearbeitung													
2.1	Erstellung einer Auswertungsvorschrift													
2.2	Erstellung spezifischer Versuchsplan													
2.3	Durchführung der Versuche													
2.4	Ableitung Teilmodell für zu betrachtende Fertigungsverfahren der spanenden Bearbeitung													
2.5	Dokumentation der Versuchsergebnisse													
MS 2	Arbeitspaket 2 abgeschlossen (30.09.2019)													
3	Versuchsdurchführung, Teilmodellentwicklung, Fokus: elektrochemische Beschichtung													
3.1	Erstellung einer Auswertungsvorschrift													
3.2	Erstellung spezifischer Versuchsplan													
3.3	Durchführung der Versuche im Becherglas-Maßstab													
3.4	Überführung vom Becherglas-Maßstab ins Technikum													
3.5	Ableitung Teilmodell für betrachtetes Fertigungsverfahren der galvanischen Beschichtung													
3.6	Schichtcharakterisierung													
3.7	Dokumentation der Versuchsergebnisse													
MS 3	Arbeitspaket 3 abgeschlossen (30.09.2019)													
4	Teilmodellentwicklung, Fokus: Ressourceneffizienz sowie Qualifizierungskonzepte													
4.1	Ermittlung notwendiger Restriktionen und Einflussgrößen													
4.2	Ableitung von Zusammenhängen (ressourcenspezifische Sicht)													
4.3	Ableitung von Zusammenhängen (Mitarbeiterqualifizierungskonzepte)													
4.4	Integration der Ergebnisse der Arbeitspakete 1-3 (Daten, Aufbau und Ablauf)													
4.5	Dokumentation der Versuchsergebnisse													
MS 4	Arbeitspaket 4 abgeschlossen (30.09.2019)													
5	Lösungskombination und Gesamtmodell													
5.1	Zusammenführung der Teillösungen und Untersuchung der Nebeneffekte													
5.2	Bewertung und Zusammenführung der Teilmodelle													
5.3	Erarbeitung spezifisches Gesamtmodell													
5.4	Validierung des Gesamtmodells													
5.5	Anwendungsempfehlung, Verfahren inkl. Konzept zur Sicherstellung der Verfahrensqualität													
5.6	Dokumentation und Publikation Forschungsergebnisse													
MS 5	Abschluss Forschungsprojekt (30.09.2019)													

4

Weiterentwicklung, Untersuchung, Charakterisierung und ggf. Substitution spanender Fertigungsverfahren

4.1 Grundlagen

4.1.1 Grundlegende Begriffsdefinitionen

Grundlegende Begriffsdefinitionen die in Sachen Ressourceneffizienz in Verbindung stehen sind zunächst definiert wurden. Dabei lag der Fokus auf bereits bestehende Normen sowie VDI-Richtlinien gehalten. So werden unter **Ressourcen** generell alle Mittel verstanden, die in einem Prozess genutzt werden können. Diese können sowohl materieller (Werkzeugmaschine, Werkzeuge, Werkstoffe) als auch immaterieller (Steuerung, Know-how) Art sein [13] Ressourcen waren in diesen Versuchen beispielsweise die Werkzeuge (Untersuchung des Verschleißverhaltens), Energie/Leistung (an der Werkzeugmaschine und im Zerspanprozess) und die Zeit (Schnittzeit der Bearbeitung). Weiterhin spielt der Begriff **Effizienz** eine große Rolle, der im Grunde genommen das Verhältnis oder eine andere quantitative Beziehung zwischen einer erzielten Leistung bzw. einem Ertrag an Dienstleistungen, Gütern oder Energie (Nutzen) und der eingesetzten Energie (Aufwand) beschreibt [14].

4.1.2 Das Fertigungsverfahren Drehen

Für die Untersuchung im Bereich der Fertigungstechnik ist das Fertigungsverfahren Drehen angewendet worden. Wie aus der DIN 8580 Einteilung der Fertigungsverfahren zu entnehmen ist, gehört das Fertigungsverfahren Drehen der Hauptgruppe des Trennens an. Dabei ist zu beachten, dass das Drehen dem Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide zuzuordnen ist, genau wie die Fertigungsverfahren Bohren und Fräsen.

„Das Drehen ist ein spanendes Fertigungsverfahren mit geschlossener, meist kreisförmiger Schnittbewegung und beliebiger, quer zur Schnittichtung liegender Vorschubbewegung. Die

Drehachse der Schnittbewegung ist werkstückgebunden, d.h., sie behält ihre Lage zum Werkstück unabhängig von der Vorschubbewegung bei. Beim Drehen führt in der Regel das Werkstück Abbildung 3 die umlaufende Schnittbewegung aus und das Werkzeug die erforderlichen Vorschub- und Zustellbewegungen.“ [15].

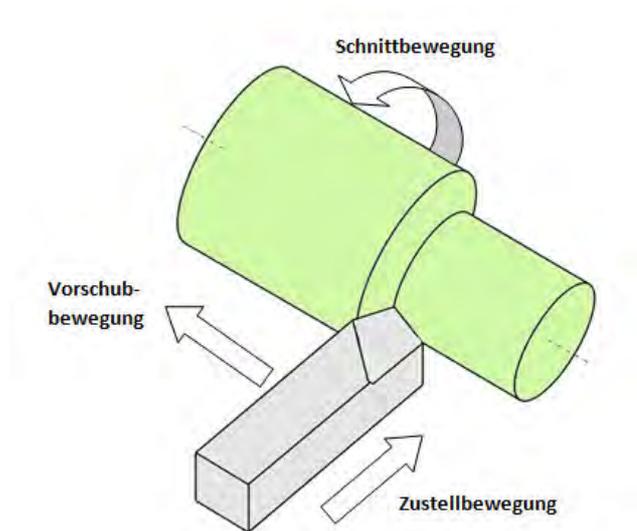


Abbildung 3: Arbeitsbewegungen beim Fertigungsverfahren Drehen

4.1.3 Werkzeugmaschine CTX Alpha 500 und Auswerteeinheit der Zerspanungskräfte

Für die Versuche innerhalb der Projektbearbeitung kommt die vorhandene CNC-Drehmaschine CTX Alpha 500 des Herstellers DMG Mori zum Einsatz Abbildung 4. Es handelt sich dabei um eine Schrägbettmaschine, welche sich aus einem modularen Baukastenprinzip zusammensetzt. Kundenwünsche können somit individuell, dem Baukastensystem entsprechend, umgesetzt werden. [16]

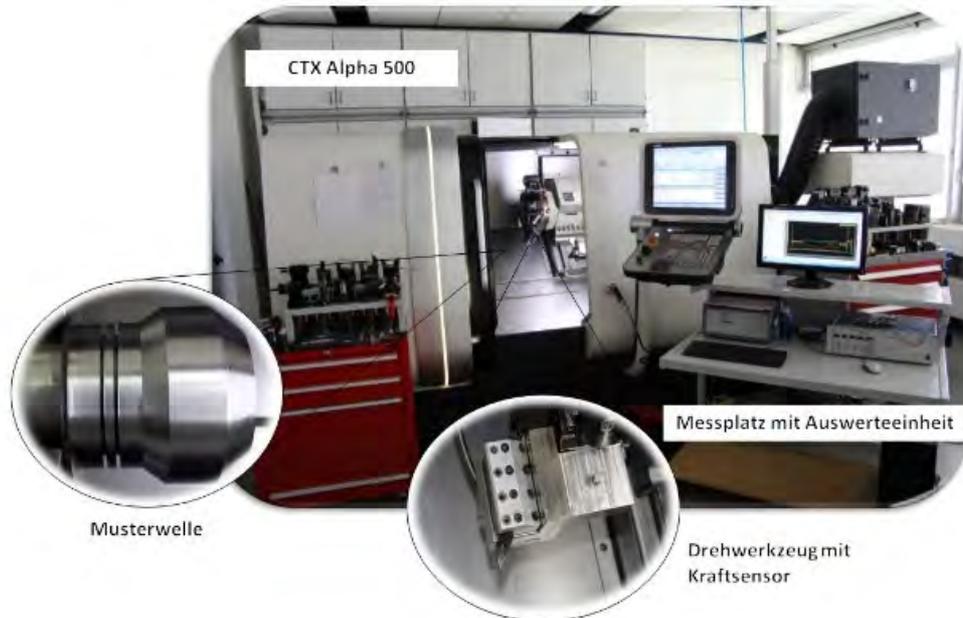


Abbildung 4: Werkzeugmaschine CTX Alpha 500

Weiterhin ist Abbildung 4 der Versuchsaufbau mit der räumlichen Anordnung der Messgeräte und Auswerteeinheit dargestellt. Die Aufnahme der Zerspankraftkomponenten (Schnitt-, Vorschub- und Passivkraft), die während der Bearbeitung entstehen, erfolgte mit einem 3-Komponenten-Dynamometer (Kistler Instrumente AG). Benötigt werden diese Kräfte um Ableitungen hinsichtlich der Schnittleistung sowie Wirkleistung ziehen zu können. Die für die Kraftmessung im 3-Komponenten-Dynamometer enthaltenen Sensoren verfügen über standardisierte Schnittstellen für den Einbau in die vorhandene Werkzeugmaschine. Dabei erfolgt die Kraftmessung piezoelektrisch über Quarzkristallplatten, auf deren Kristalloberflächen Ladungsunterschiede als Funktion einer anregenden Kraft entstehen. Die aufgenommenen Kraftwerte werden mit einem Ladungsverstärker und AC/DC-Wandler zum Computer übertragen. Dadurch ist mit Hilfe der Software *DIAdem* möglich, die Einstellungen bezüglich Messbereiche und Abtastraten definiert vorzunehmen/ einzustellen [17].

4.1.4 Werkzeuge

Unter dem Einfluss der erstellten Musterwelle (siehe Abbildung 5) mit der entsprechenden Kontur hat sich für die Versuche ergeben, dass das Werkstück mit einem bestimmten Drehwerkzeug bearbeitet werden muss, um alle Geometrien kollisionsfrei zu fertigen. Dabei hat sich bei der Auswahl des entsprechenden Werkzeughalters herauskristallisiert, dass ein positives Drehwerkzeug mit der Bezeichnung SVJBL2020K16 zum Einsatz kommt. Grund dafür ist der Einstellwinkel von 93° und der max. Eintauchwinkel von 50° .

Zum Einsatz für nachfolgende Versuchsdurchführungen sind die drei verschiedenen Wendeschneidplatten in Abbildung 5 verwendet worden.

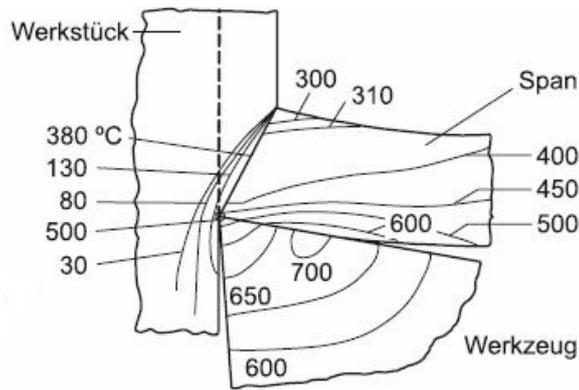
Werkzeughersteller	A	B	C
Wendeschnidplatte			
Bezeichnung (DIN ISO 1832)	VCMT160404	VBMT160404	
Schneidstoff	Hartmetall		
Beschichtung	TiCN+Al ₂ O ₃ +TiCN+TiN		TiN+TiCN+Al ₂ O ₃ +ZrCN
Anwendungsgruppe (DIN ISO 513)	P01-P30	P25 (P15-P35)	P20-P30
Schnittwerte			
v _c [m/min]	350-150 m/min	475-395 m/min	350-150 m/min
f [mm]	0,05-0,25 mm	0,07-0,25 mm	0,07-0,30 mm
a _p [mm]	0,50-2,50 mm	0,23-2,70 mm	0,30-3,0 mm
Klemmhalter (DIN 4983)	SVJCL2020K16	SVJBL2020K16	

Abbildung 5: Wendeschnidplatten der unterschiedlichen Anbieter

Es handelt sich dabei um Wendeschnidplatten mit der Bezeichnung VBMT160404 und VCMT160404 sowie VBMT160408 und VCMT160408, wobei der Unterschied hinsichtlich der Werkzeuggeometrie im Freiwinkel und Werkzeugeckenradius der Wendeschnidplatten sowie der jeweiligen Spanformgeometrie liegt. Was bedeutet, dass die VBMT-Platte einen Freiwinkel von 5° und die VCMT-Platte einen Freiwinkel von 7° besitzt. Somit bewirkt der 7° Freiwinkel, dass die Wendeschnidplatte scharfkantiger ist und die Zerspankraft reduziert wird.

4.1.5 Allgemeines zum Kühlschmierstoff

Die primären Aufgaben der Kühlschmierstoffe sind es, die Reibung an den Berührungstellen zwischen Werkstück und Werkzeug, sowie zwischen Werkzeug und entstandenem Span bei Zerspanvorgängen zu mindern und die Prozesswärme abzuführen. Im Prozess wird die zur Spanentstehung aufgebrauchte mechanische Energie in der Scher- und Reibzone fast vollständig in Wärme umgesetzt. Von daher ist der Ort der eigentlichen Spanbildung, die sog. Spanfläche von besonderer Bedeutung für die Kühlung und Schmierung. Hier treten je nach Bearbeitungsverfahren unterschiedlich hohe Temperaturen Abbildung 6 auf.



Werkstoff:	Stahl
Formänderungsfestigkeit:	$k_f = 850 \text{ N/mm}^2$
Schneidstoff:	HW-P20
Schnittgeschwindigkeit:	$v_c = 60 \text{ m/min}$
Spanungsdicke:	$h = 0,32 \text{ mm}$
Spanwinkel:	$\gamma_o = 10^\circ$

Abbildung 6: Temperaturverteilung in Werkstück, Span und Werkzeug

Die Folge dieser Belastungen sind Verschleißerscheinungen wie mechanischer Abrieb und Abscheren von Pressschweißungen, die im gesamten nutzbaren Schnittgeschwindigkeitsbereich auftreten, sowie Diffusionsvorgänge und Verzunderungen, die erst ab bestimmten Temperaturen in Erscheinung treten [18].

Insgesamt wirken die Kühlung und die Schmierung als Faktoren, durch die der Werkzeugverschleiß verringert, die Produktpräzision und -qualität erhöht und hohe Prozessgeschwindigkeiten prozesssicher durchgeführt werden können. Eine weitere wesentliche Aufgabe ist der Abtransport der bei der Bearbeitung entstehenden Späne. Neben den primären Aufgaben besitzt der Kühlschmierstoff auch Sekundäre. Dabei spielen der durch den Kühlschmierstoff (je nach Art des KSS) hervorgerufene Korrosionsschutz, sowie die Reinigung von Werkstück, Werkzeug und Maschine eine entscheidende Rolle. All diese Aufgaben werden bei der konventionellen Schmierung durch wassermischbare und nichtwassermischbare KSS abgedeckt.

4.1.6 Angewendete Kühlschmierstoffvarianten innerhalb der Untersuchungen

4.1.6.1 Konventionelle Nassbearbeitung

Um die Aufgaben der Kühlung, Reibungsverringerung und den Spänetransport im Zerspanprozess zu gewährleisten, kommt die konventionelle Überflutungsschmierung zum Einsatz. Diese ist in der Industrie am weitesten verbreitet und zeichnet sich durch eine drucklose Überspülung der Bearbeitungsstelle mit Volumenströmen von mehr als 2 l/min aus.

Jedoch birgt der Einsatz der Überflutungsschmierung auch negative Aspekte. Es ist dabei einerseits auf die Entstehung von Abfällen, wie Altöl, Altemulsion sowie Schlamm aus Feinmetallstäuben aus der Zerspanung hinzuweisen. Auch werden in einem erheblichen Maß Ressourcen (elektrischer Strom für die KSS-Pumpe) benötigt und gleichzeitig stellen die eingesetzten Inhaltsstoffe eine Gefahr für Umwelt bzw. Gesundheit der Mitarbeiter dar. Ein weiterer Punkt ist die Entsorgung von Kühlschmierstoffen, welche daher als nicht zu vernachlässigender Kostenfaktor hier Erwähnung findet [19], [20].

4.1.6.2 Minimalmengenschmierung

Die enorme Reduzierung der Schmierstoffmenge gegenüber den verwendeten Umlaufmengen herkömmlicher Kühlschmierstoffsysteme ist das wesentliche Merkmal der Minimalmengenschmierung. Bei dieser Kühlschmiertechnik werden die Werkzeuge mit geringsten Mengen eines Kühl- und/ oder Schmiermediums versorgt. Als Medien finden primär Öle aber auch Emulsionen, Wasser oder Luft Verwendung. Sie werden dem Werkzeug und/ oder der Zerspanstelle in geringsten Mengen ($< 50\text{ml/h}$) zugeführt. Dies erfolgt ohne oder unter Zuhilfenahme eines Transportmediums. Bei den sogenannten Airless-Systemen, wird das Werkzeug mittels einer Pumpe gezielt mit einem Medium, i.d.R. Öl, in Form einzelner schnell aufeinanderfolgender, fein dosierter Tröpfchen versorgt. Am besten eignen sich dabei Esteröle und Fettalkohole als eingesetzte Schmierstoffe, da diese ein gutes Schmiervermögen und eine hohe thermische Belastbarkeit aufweisen. Im zweiten Fall wird das Medium mit Hilfe von Druckluft in einer Düse zu feinsten Tröpfchen zerstäubt und als Aerosol der Bearbeitungsstelle zugeführt. Unter Minimalmengenschmierung versteht man i.d.R. die Zuführung des Kühlschmiermediums in Form eines Aerosols. Abhängig von Art und primärer Aufgabe des zugeführten Mediums kann hierbei zwischen einer Minimalmengenschmierung und einer Minimalmengenkühlung (MMK) unterschieden werden [21], [22].

Bei der Minimalmengenschmierung steht die gute Schmierwirkung durch den Einsatz von Ölen im Vordergrund. Ihre Aufgabe ist es, Reib- und Adhäsionsvorgänge zwischen Werkstück, Span und Werkzeug zu vermindern. Dabei spielt die Kühlwirkung des eingebrachten Öl-Luft-Gemisches aufgrund der geringen Wärmekapazität ($c_{p,\text{Öl}} = 1,92\text{kJ/kgK}$; $c_{p,\text{Luft}} = 1,04\text{kJ/kgK}$) nur eine untergeordnete Rolle. Im Vergleich zu Ölen werden Emulsionen oder Wasser wesentlich seltener als Medien für eine Minimalmengenschmierung eingesetzt. Sie finden i.d.R. nur dann Verwendung, wenn Werkzeug oder Bauteil stärker gekühlt werden müssen, als dies mit Ölen möglich ist. Der im Vergleich zu Ölen bei Emulsionen deutlich geringeren und der bei Wasser und Luft nicht vorhandenen Schmierwirkung bezeichnet man den Einsatz dieser Medien auch als Minimalmengenkühlung [23].

4.1.6.3 Trockenbearbeitung

Bei der Betrachtung der Ressourceneffizienz und der stetig steigenden Kosten der Kühlschmierstoffbereitstellung muss auch die Trockenbearbeitung als Alternative dargestellt werden. Durch den fehlenden Kühlschmierstoff sind verschiedene Anforderungen und Randbedingungen an dieses Verfahren zu definieren. Folgende Abbildung 7 zeigt diese schematisch.

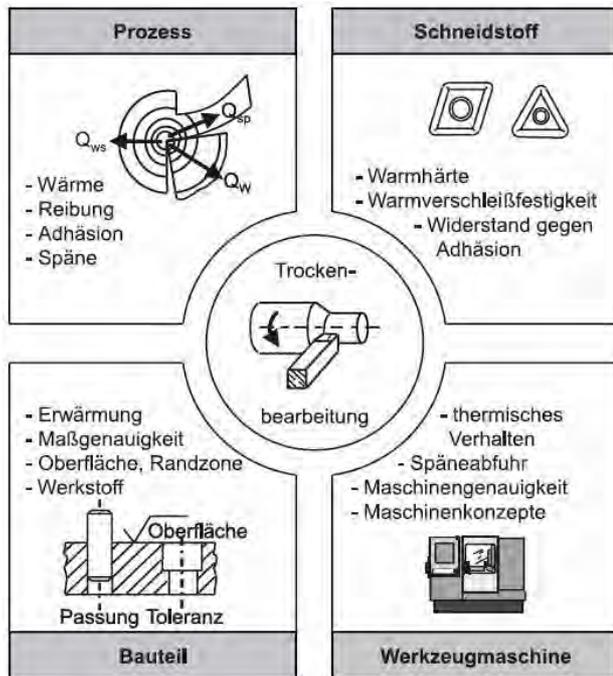


Abbildung 7: Anforderungen an die Trockenbearbeitung [24]

Da bei der Trockenbearbeitung die primären Kühlschmierstofffunktionen Kühlen, Schmieren und Späneabtransport entfallen, kommt es im Zerspanungsprozess zu stärkeren Reibungs- und Adhäsionsvorgängen zwischen den Wirkelementen des Werkzeuges und des Werkstoffes. Außerdem kommt es zu einer Steigerung der durch den Span, das Werkstück und das Werkzeug abzuführenden Wärmemenge und in ungünstigen Fällen zum Verbleib der abgetragenen heißen Späne im Arbeitsraum der Werkzeugmaschine. Daraus resultieren letztlich höhere thermische Belastungen für Werkzeug, Werkstück und Werkzeugmaschine, was sich nachteilig auf die Bauteil- und Maschinengenauigkeit und den Werkzeugverschleiß auswirken kann [24].

Jedoch erschließt sich aus dem Verzicht von Kühlschmierstoffen ein Potenzial im Hinblick auf die Ressourceneffizienz einer Werkzeugmaschine.

4.2 Versuchsdurchführung

4.2.1 Beschreibung der Versuche

Zur Durchführung der Versuche ist ein Musterteil (Abbildung 8) aus C45 ausgewählt wurden, dass diverse Formelemente enthält, die durch das Fertigungsverfahren Drehen hergestellt werden. Grund dafür ist, zu vergleichen wie sich die Zerspanung unter den verschiedenen Schnittbedingungen verändert, hinsichtlich Schnitt-, Vorschub- bzw. Passivkräfte sowie Wirk- und Gesamtleistung.

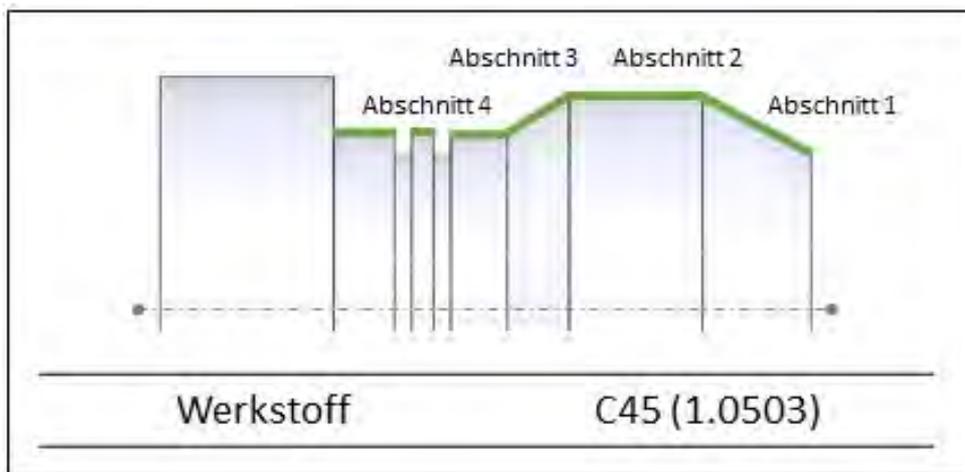


Abbildung 8: Musterwelle mit definierten Abschnitten

Die eingestellten Bearbeitungsparameter liegen im Bereich der Herstellerempfehlung (siehe Abbildung 9). Zur Anwendung der Versuche kam die bereits erwähnte CNC-Drehmaschine CTX Alpha 500 der Firma DMG Mori AG zum Einsatz. Die Aufnahme der Zerspankraftkomponenten, die während der Bearbeitung entstehen, erfolgte mit einem 3-Komponenten-Dynamometer (Kistler Instrumente AG). Der entstehende Werkzeugverschleiß wurde unter den Bedingungen einer Trockenbearbeitung in Form der Verschleißmarkenbreite beim Längsdrehen des Werkstoffes C45 ermittelt. Dabei kamen Werkzeuge der Hersteller A, B und C gemäß nachstehender Schnittwerte zum Einsatz:

- Vorschub $f = 0,16$ mm,
- Schnitttiefe $a_p = 1,00$ mm,
- Schnittgeschwindigkeit $v_c = 150$ m/min, 250 m/min und 350 m/min.

Während einer Gesamtlaufzeit von $t_c = 15$ min erfolgt nach 0,5 min, 5 min, 10 min sowie 15 min die Verschleißerfassung am Werkzeug. Die Versuche wurden dreimal wiederholt. Neben der Analyse des Verschleißverhaltens richtete sich der Fokus, auf die Wirk- und Gesamtleistung der Zerspanung, unter den ausgewählten Schnittwerten, anhand der vorliegenden

Musterteilkontur. Dabei sind die unterschiedlichen Anbieter und die in der heutigen Zeit am häufigsten angewendeten Kühlschmierstoffstrategien Trockenbearbeitung, Minimalmengenschmierung sowie konventionelle Nassbearbeitung getestet bzw. verglichen wurden. Deren einzelne Ergebnisse und Erkenntnisse wird in den Auswertungen sowie Bewertungen näher erläutert.

Darüber hinaus sind noch weitere Versuche durchgeführt worden, die sich mit der Zuführstrategie des Kühlschmierstoffs beschäftigt. Aufgrund der im Vorfeld getätigten Recherchen ist in der Werkzeugentwicklung die Zuführung von Kühlschmierstoff während der Zerspanung erweitert worden. Die Festlegung fiel auf den Vergleich der konventionellen Nassbearbeitung mit der zielgerichteten KSS-Zufuhr (über Span- und Freifläche), um eventuelle Vorzüge oder auch Unterschiede in deren Bearbeitungen festzustellen. In dieser Untersuchung ist allerdings nur das Längsdrehen zur Anwendung gekommen und nicht die für die Vorversuche erstellte Musterwellenkontur.



Abbildung 9: Zielgerichtete KSS-Zufuhr über Span- und Freifläche

Nachdem weitreichend die Untersuchungen abgeschlossen wurden sind, ergab sich die Überlegung, welche Versuche hinsichtlich des Energie- und Ressourcenverbrauchs noch durchgeführt werden können. Dabei wurde festgelegt, dass Zeitspanungsvolumen Q näher zu betrachten. Das Zeitspanungsvolumen Q steht in der Zerspanungstechnik als ein Kennwert der Produktivität. Abhängig ist diese Kenngröße vom Vorschub f , Schnittgeschwindigkeit v_c und der Schnitttiefe a_p . Um nun genaue Untersuchungen damit zu verbinden, wurde festgelegt, dass die Einflussgrößen Vorschub und Schnittgeschwindigkeit so zu variieren, dass dennoch das Zeitspanungsvolumen Q von $40 \text{ cm}^3/\text{min}$ konstant bleibt. D.h., das abgespannte Volumen pro Zeit bleibt gleich, nur mit unterschiedlich angewendetem Vorschub und Schnittgeschwindigkeit wird die Zerspanung durchgeführt, wobei die Schnitttiefe ebenfalls konstant bleibt. Deren Versuche sind ebenfalls mehrmals wiederholt wurden, um eine statistische Sicherheit der erzielten Ergebnisse zu gewährleisten. Ziel dieser unterschiedlichen

Versuche war es herauszufinden, mit welcher Schnittwertkombination die energieeffizienteste Bearbeitung erreicht werden kann und wie sich der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubs auf die Zerspanung auswirkt.

Zum Abschluss dieser umfangreichen Versuche und deren abgeschlossenen Erkenntnisse erfolgte noch ein Versuch bezüglich des sogenannten Prime Turning's durchgeführt. Prime Turning ist in der Fertigungstechnik durch den Werkzeughersteller Sandvik bekannt geworden und gewährleistet die Möglichkeit, das Abspannen bzw. das Bearbeiten von Konturen in allen Richtungen zu realisieren. Dies wird mithilfe von speziell entwickelten Wendeschneidplatten (kleiner Einstellwinkel, optimale Schneidennutzung) realisiert und verspricht Verbesserungen hinsichtlich der Produktivität und Standzeiten. Entwickelt wurden dafür zwei Typen (A und B), die sich in der Plattengeometrie und Anwendung unterscheiden [25]. Zu erwähnen ist für diesen Versuch allerdings, dass diese Bearbeitung nicht mit den genannten Wendeschneidplatten Typ A und B durchgeführt wurden, sondern mit den bereits vorhandenen. Dafür kam ein neutraler Werkzeughalter zum Einsatz, mit dem es möglich ist die Drehbearbeitung zum Futter hin und vom Futter weg zu realisieren. Augenmerk lag auf den entstehenden Kräften und Leistungen trotz entgegengesetzter Vorschubrichtung, wie sich der Energiebedarf bei diesen Schnittbedingungen verhält.

4.2.2 Aus- und Bewertung der einzelnen Versuche

4.2.2.1 Versuchsreihe 1 (Verschleiß und Vergleich der Anbieter A, B und C)

Nach dem die Wendeschneidplatten unter den gegebenen Bedingungen und einzelnen Zeitabständen eingesetzt wurden, weisen die Platten unabhängig vom Anbieter einen geringen Werkzeugverschleiß auf. Das bestätigt sich mit der maximalen gemessenen Verschleißmarkenbreite nach 15 min Bearbeitungszeit, die unterhalb von 0,2 mm lag. Dennoch resultieren aus der unterschiedlichen Werkzeug-Topografie bzw. Beschichtungssystemen Schwankungen des gemittelten Freiflächenverschleißes, die sich im Bereich zwischen 0,057 mm bis 0,150 mm befanden. Die Wendeschneidplatten des Anbieters B waren bei dieser Untersuchung am verschleißresistentesten. Dies zeigt sich anhand der Bilder 8 bis 10, in denen die Verschleißmarkenbreiten in Abhängigkeit der Schnittzeit dargestellt sind.

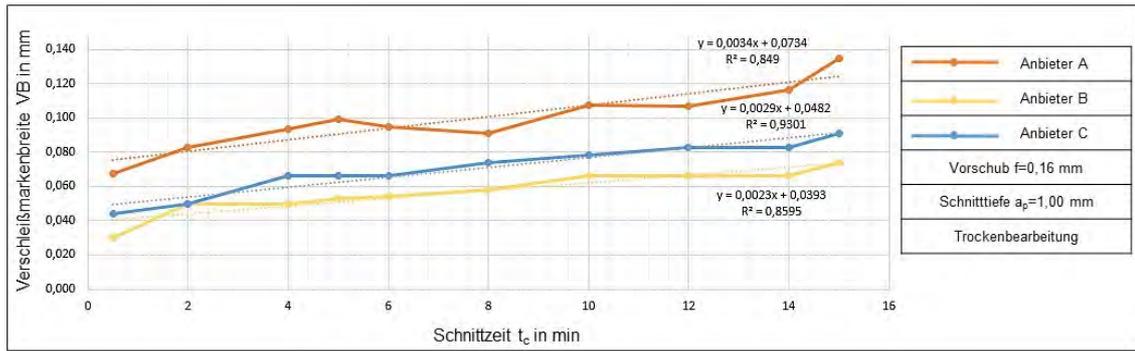


Abbildung 10: Ausbildung der Verschleißmarkenbreite bei $v_c= 150$ m/min

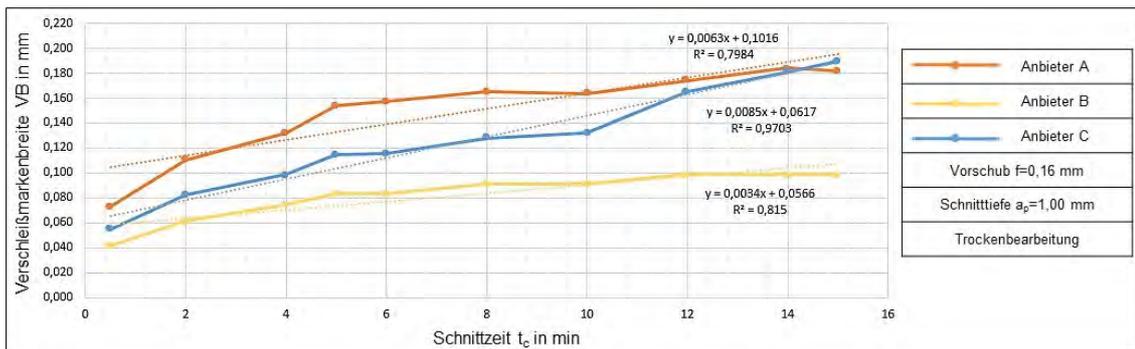


Abbildung 11: Ausbildung der Verschleißmarkenbreite bei $v_c= 250$ m/min

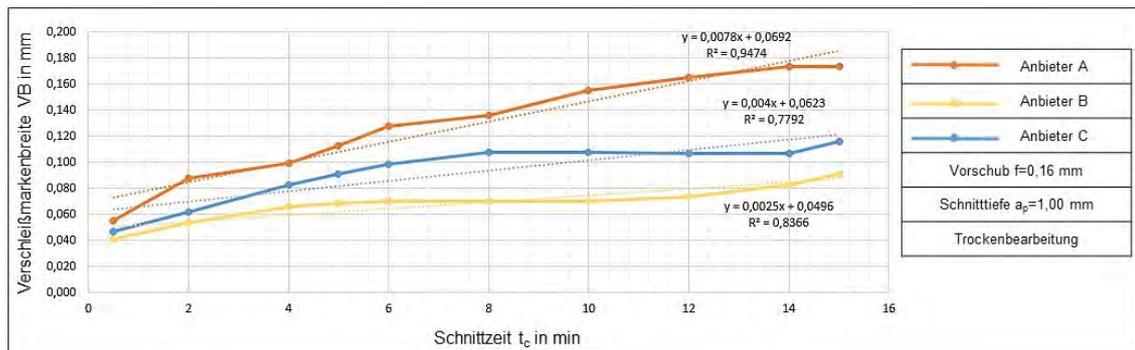
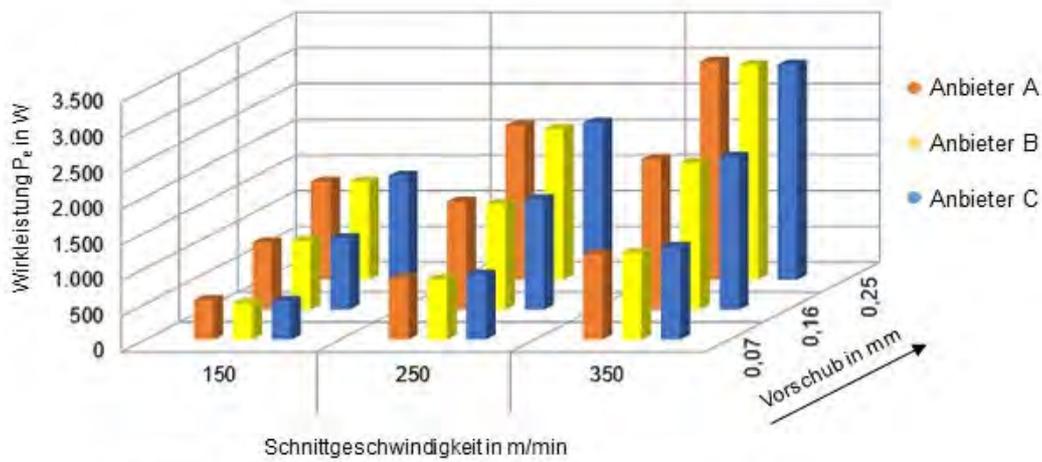


Abbildung 12: Ausbildung der Verschleißmarkenbreite bei $v_c= 350$ m/min

Deutliche Unterschiede sind in den Anstiegen der Verschleißentwicklung zu erkennen. Während beim Hersteller B der Verschleiß über alle drei Schnittgeschwindigkeiten relativ moderat ansteigt, nimmt die Verschleißmarkenbreite bei A und C stärker zu. Beispielsweise unterscheidet sich der Verschleiß bei einer Schnittgeschwindigkeit von 350 m/min und Bearbeitungszeit von 15 min im Vergleich zwischen Anbieter B und C um 0,091 mm. Gleiches gilt für Anbieter A, dessen Verschleiß bei diesen Versuchsbedingungen gegenüber C um 0,099 mm mehr zunahm. Der Verlauf der in den Bildern 8 bis 10 dargestellten Graphen, zeigt in den ersten 30 s einen starken Anstieg, der den Initialverschleiß darstellt. Durch lineare Regression der ermittelten Messwerte konnten Geradengleichungen erzeugt werden. Der Anstieg

dieser Gleichungen gibt den mittleren Verschleißzuwachs der Wendeschneidplatten im untersuchten Bereich wider. Aus der Betrachtung der Anstiege geht hervor, dass der Verschleiß pro Minute bei den Anbietern A und C, durchschnittlich um 0,002- 0,003 mm mehr zunimmt als bei der Wendeschneidplatte des Anbieters B. Basierend auf dem Regressionsmodell kann unter der Annahme der Modellgrenzen des stabilen Verschleißfortschrittes z.B. für Anbieter B eine Einsatzzeit der Wendeschneidplatte bis zum Erreichen der 0,2 mm Verschleißmarkenbreite von 69 min ($v_c=150$ m/min) postuliert werden. Die Wendeschneidplatte von Anbieter A könnte unter den gleichen Bedingungen nur 37 min eingesetzt werden. Unter dem Gesichtspunkt der Ressourceneffizienz erweist sich die Wendeschneidplatte des Anbieter B somit als ressourcenschonender.

Neben der Analyse des Verschleißverhaltens richtete sich der Fokus auf die Wirkleistung während der Zerspanung, der hier vorliegenden Musterteilkontur. Die in dieser Untersuchung angewendeten Schnittwerte und erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 13 dargestellt.



v_c in m/min	f in mm	Wirkleistung in W		
		- A	- B	- C
150	0,07	556,67	513,90	545,10
250		858,07	850,00	913,10
350		1.192,73	1.212,40	1.300,51
150	0,16	943,88	966,70	1.000,60
250		1.510,46	1.479,90	1.549,06
350		2.106,90	2.057,36	2.141,75
150	0,25	1.372,20	1.373,70	1.453,70
250		2.160,60	2.112,60	2.198,67
350		3.051,30	3.006,90	3.012,40

Abbildung 13: Wirkleistung der verschiedenen Anbieter

Ermittelt wurde die Wirkleistung P_e mit Hilfe der aufgenommenen Schnitt- und Vorschubkräfte anhand der Formel 1-1 [26].

$$P_e = P_c + P_f = F_c * v_c + F_f * v_f \quad (4-1)$$

Die erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 13 zusammengefasst und zeigen zum einen die Abhängigkeit der Wirkleistung von zunehmender Schnittgeschwindigkeit und zum anderen des ansteigenden Vorschubs. Deutlich ist zu erkennen, dass der größere Bedarf an Leistung mit der Zunahme des Vorschubs einhergeht. Vergleicht man die Werkzeuge der Hersteller untereinander ergeben sich geringe Unterschiede für die notwendige Zerspanungsleistung. Obwohl die Wendeschneidplatten letztendlich über verschiedene Geometrien und Topografie sowie Beschichtungssysteme verfügen, liegen die Abweichungen der minimalen und maximalen Wirkleistung unabhängig von Schnittgeschwindigkeit und Vorschub zwischen durchschnittlich 4-8%.

Während der Versuchsdurchführung erfolgte die Aufnahme der Gesamtleistung, die die Werkzeugmaschine benötigte. Anhand dieser ermittelten Leistungsdaten konnte in Bezug auf die Energiekosten eine Hochrechnung durchgeführt werden. Diese ergab bei einem angenommenen Strompreis von 17,2 Cent/kWh [27], dass die Kosten für eine Bearbeitung von 15 min letzten Endes um 0,01 € schwanken.

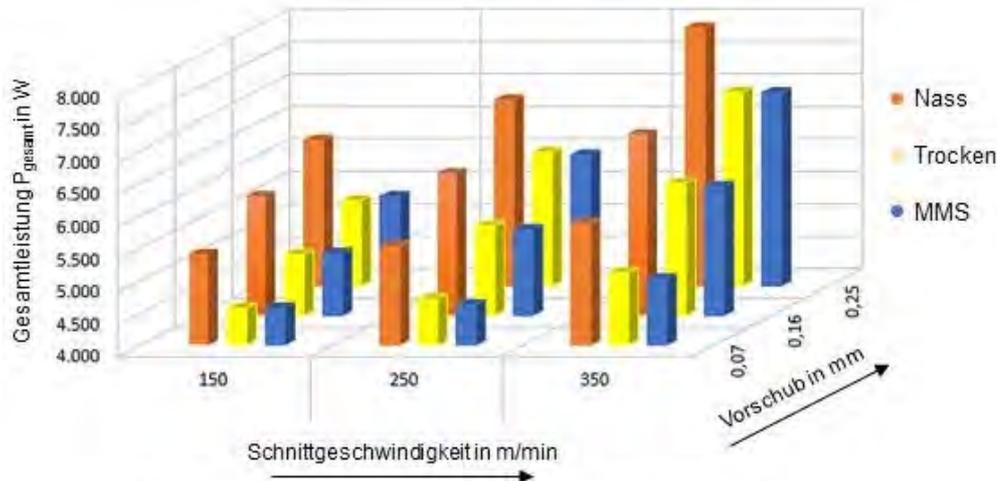
Weiterhin ist festzustellen, dass die Unterschiede bei der Bearbeitung hinsichtlich der benötigten Zerspanungsleistung nicht dominant groß sind.

4.2.2.2 Versuchsreihe 2 (Vergleich der KSS-Varianten)

In Anlehnung an die Versuchsreihe mit Drehwerkzeugen unterschiedlicher Anbieter folgten Untersuchungen bezüglich des Einsatzes verschiedener Kühlschmierstoffstrategien. Darin wurden die drei am häufigsten in der spanenden Bearbeitung zur Anwendung kommenden Zuführvarianten: Minimalmengenschmierung, konventionelle Nassbearbeitung und Trockenbearbeitung getestet. Es kamen für die Versuche, die in Abbildung 14 dargestellten Wendeschneidplatten des Anbieters A zur Anwendung. Für die Zerspanung der Musterwelle mittels konventioneller Nassbearbeitung wurde ein teilsynthetischer und wassermischbarer Kühlschmierstoff verwendet, welcher mit Hilfe eines Schlauchsystems an der Werkzeugaufnahme bei einem anliegenden Druck von 12 bar zur Wirkstelle geführt wurde. Bei Anwendung der Minimalmengenschmierung hingegen war ein externes MMS-System LUBRILEAN® Basic im Einsatz, dass die Werkzeugschneide mit einem synthetischen Universalschmierstoff auf Ester-Basis gekühlt.

Mit Hilfe dieser Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Nassbearbeitung gegenüber der Trockenbearbeitung sowie Minimalmengenschmierung ca. 12- 15 % mehr Gesamtleistung, unabhängig von den eingestellten Schnittwerten, über alle Bearbeitungen hinweg benötigt. Dies zeigt sich in der Abbildung 14, worin die Gesamtleistung in Abhängigkeit

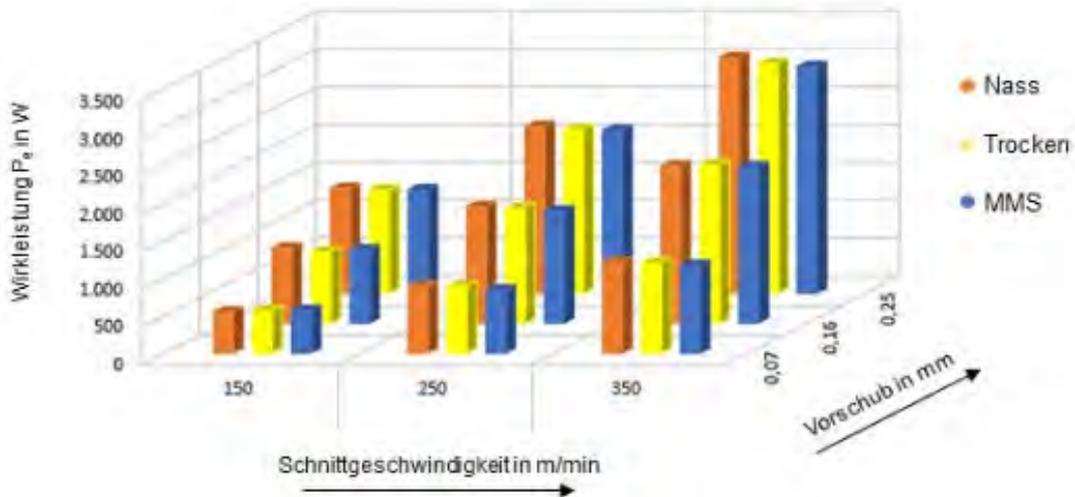
der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubs dargestellt ist. Der höhere Bedarf liegt allein an der integrierten Kühlschmierstoffpumpe, die ca. 800- 1.000 W Leistung benötigt. Vergleicht man die Trockenbearbeitung und Minimalmengenschmierung ergeben sich bei der MMS durchschnittlich 0,5- 1,2 % höhere Gesamtleistungen, welche auf das extern benötigte MMS-System zurückzuführen sind.



v_c in m/min	f in mm	Gesamtleistung in W		
		- Nass	Trocken	- MMS
150	0,07	5.401,23	4.567,89	4.568,68
250		5.519,17	4.620,34	4.707,36
350		5.866,98	5.014,29	5.113,31
150	0,16	5.839,86	4.956,79	4.941,87
250		6.194,77	5.320,44	5.381,29
350		6.793,57	5.984,31	6.033,00
150	0,25	6.240,99	5.374,85	5.315,07
250		6.863,82	6.017,72	6.057,38
350		7.974,15	6.973,04	6.986,23

Abbildung 14: Gesamtleistung der KSS-Varianten

Anders sieht es bei der aufgenommenen Wirkleistung aus in Abbildung 15, Abbildung 14 die zum Spanen des Materials benötigt wird. Darin sind wesentlich geringere Unterschiede zwischen den Kühlschmierstoffvarianten zu erkennen. Denn die Nassbearbeitung benötigt gegenüber der Trockenbearbeitung bzw. Minimalmengenschmierung nur ca. 1,0- 3,0 % mehr Wirkleistung. Deren Ursache noch weiter untersucht werden muss. Vergleicht man die Minimalmengenschmierung mit der Trockenbearbeitung, sind hier sehr geringe Abweichungen abzuleiten, wobei die Werte für die Trockenbearbeitung ca. 1,1 % höher liegen. Aus der Abbildung 14 und der Abbildung 15 geht weiterhin hervor, dass auch hier die Zunahme der Gesamt- und Wirkleistung in Abhängigkeit des Vorschubs größer ist, als mit ansteigender Schnittgeschwindigkeit. Dies lässt sich auf den größer werdenden Spanungsquerschnitt zurückführen.



v_c in m/min	f in mm	• Nass	• Trocken	• MMS
		Wirkleistung in W		
150	0,07	549,35	560,83	567,76
250		888,60	885,18	834,48
350		1.204,25	1.197,90	1.162,56
150	0,16	997,86	945,90	970,79
250		1.544,44	1.520,64	1.484,04
350		2.085,11	2.097,10	2.069,59
150	0,25	1.390,03	1.365,54	1.372,82
250		2.206,74	2.166,25	2.157,12
350		3.121,87	3.039,12	3.000,47

Abbildung 15: Wirkleistung der KSS-Varianten

Wie bereits in der ersten Versuchsreihe, erfolgte auch hier unter Einbeziehung der Gesamtleistung eine Hochrechnung hinsichtlich Energiekosten. Diese ergab einen durchschnittlich preislichen Unterschied von 0,04 € der Nassbearbeitung gegenüber der MMS und Trockenbearbeitung, bei einer Bearbeitungszeit von 15 min. Um nun die erzielten Ergebnisse bezüglich des Energiebedarfs genauer zu betrachten, wurden Daten für eine Bearbeitungszeit von 15 min interpoliert und erzielte dabei folgendes Ergebnis (siehe Abbildung 16).

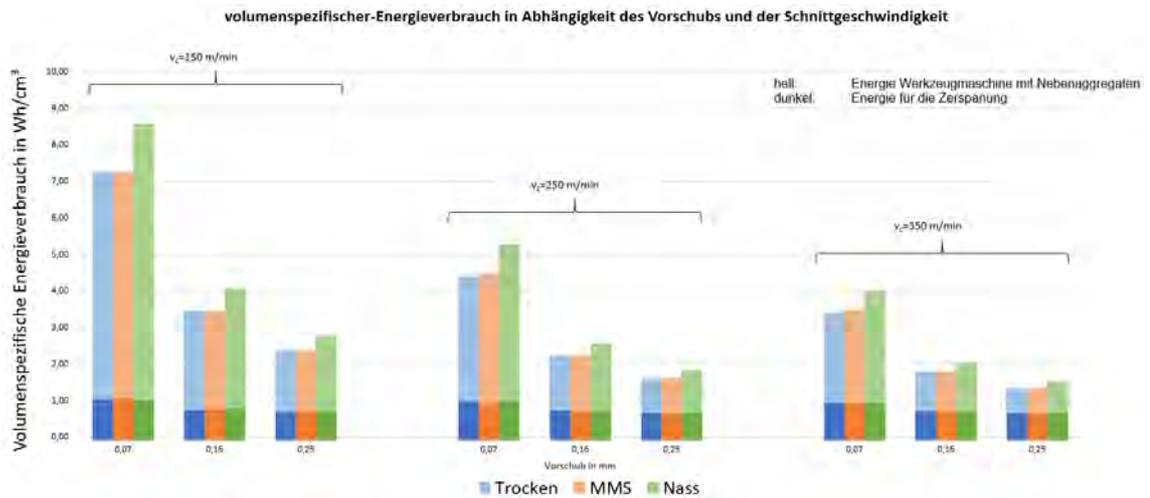


Abbildung 16: Energiebedarf bezogen auf das abgespannte Volumen

Der Energiebedarf pro abgespanntem Volumen mit steigenden Vorschub bzw. Schnittgeschwindigkeit sinkt. Gleichzeitig steigt die Produktivität im höheren Maße als der Energiebedarf. Deutlich wird das bspw. bei der Nassbearbeitung mit einem Vorschub von 0,07 mm. Die Produktivität steigt hier um das 2,3-fache an, wobei der Energiebedarf auch der Werkzeugmaschine um das 1,1-fache ansteigt. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass mit höheren Schnittwerten die energieeffizienteste Bearbeitung erreicht wird.

Nach dem diese Auswertungen der Bearbeitungen abgeschlossen sind, wurde noch einmal der zu bearbeitenden Musterwelle gewidmet, um die unterschiedlichen Formelemente näher zu betrachten. Dabei ergaben die Auswertungen der Versuchsreihen 1 und 2, dass das Kopierdrehen (Einwärts- und Auswärtskopieren) gegenüber dem Längsdrehen weniger Leistung benötigt. Als Kenngröße für den Energiebedarf ist hier das energiespezifische Zeitspannungsvolumen Q_{ZP} [$\text{cm}^3/\text{min} \cdot \text{kW}$] verwendet wurden. Dieser Wert entspricht dem in einer Zeiteinheit abzuspannenden Werkstoffvolumen bezogen auf die an der Schneide verfügbare Schnittleistung. [28]. Das nachfolgende Diagramm zeigt am Beispiel der KSS-Varianten, wie sich der Energiebedarf in Abhängigkeit der Schnittwerte und Abschnitte verhält (Abbildung 17).

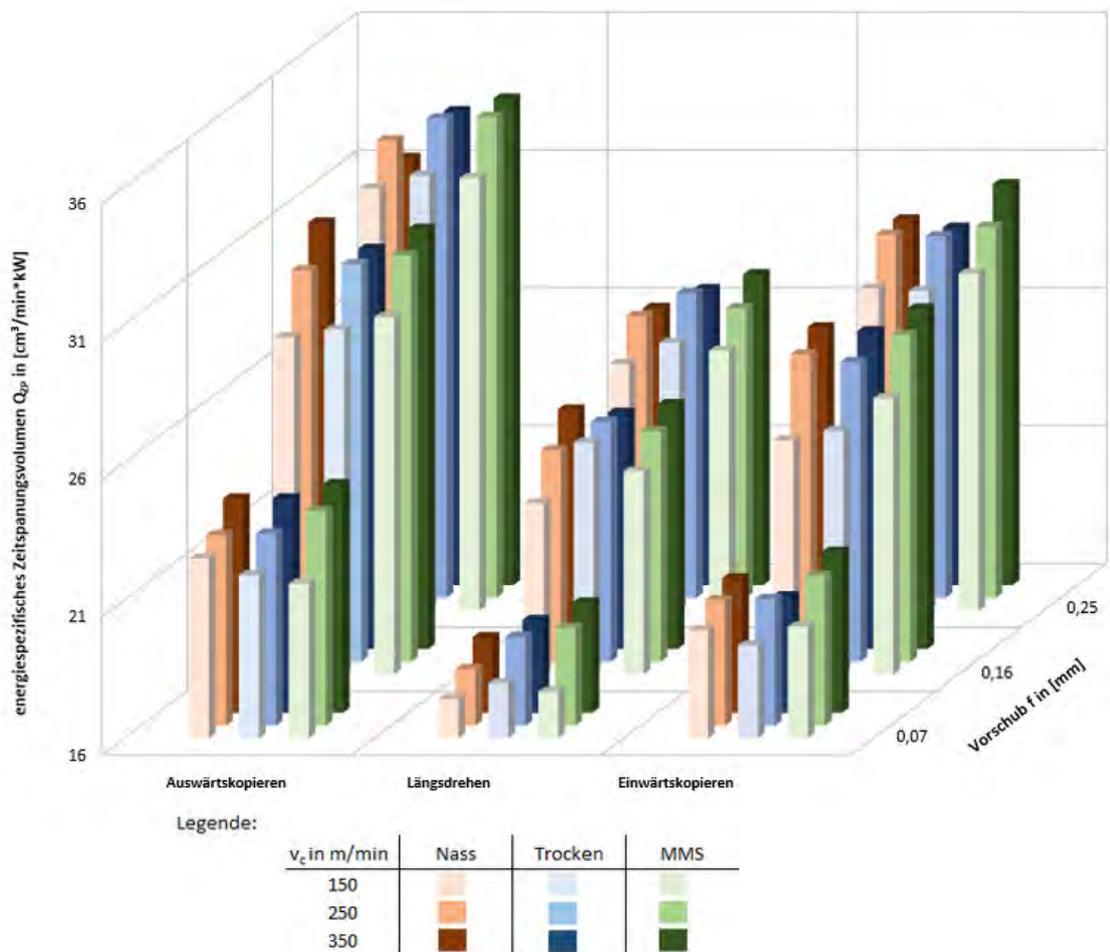


Abbildung 17: Vergleich der Abschnitte Musterwelle

4.2.2.3 Vergleich der konventionellen Nassbearbeitung und zielgerichteten KSS-Zufuhr

Aufgrund der ständigen Neuerungen und Werkzeugentwicklungen wurden in diesem Falle die zwei Varianten der Kühlschmierstoffzuführung untersucht. Dafür ist ein konventionelles Drehwerkzeug (Zuführung über Spanfläche) und ein Drehwerkzeug mit Zuführung zur Span- bzw. Freifläche verwendet wurden (Abbildung 18). Ziel war dabei, den benötigten Energiebedarf für die Zerspanung mit Hilfe der beiden Werkzeuge miteinander zu vergleichen. Dafür wurden während der Versuche die Kräfte und die Gesamtleistung aufgenommen. Diese Versuche sind insgesamt dreimal wiederholt, um eine statistische Sicherheit zu gewährleisten.

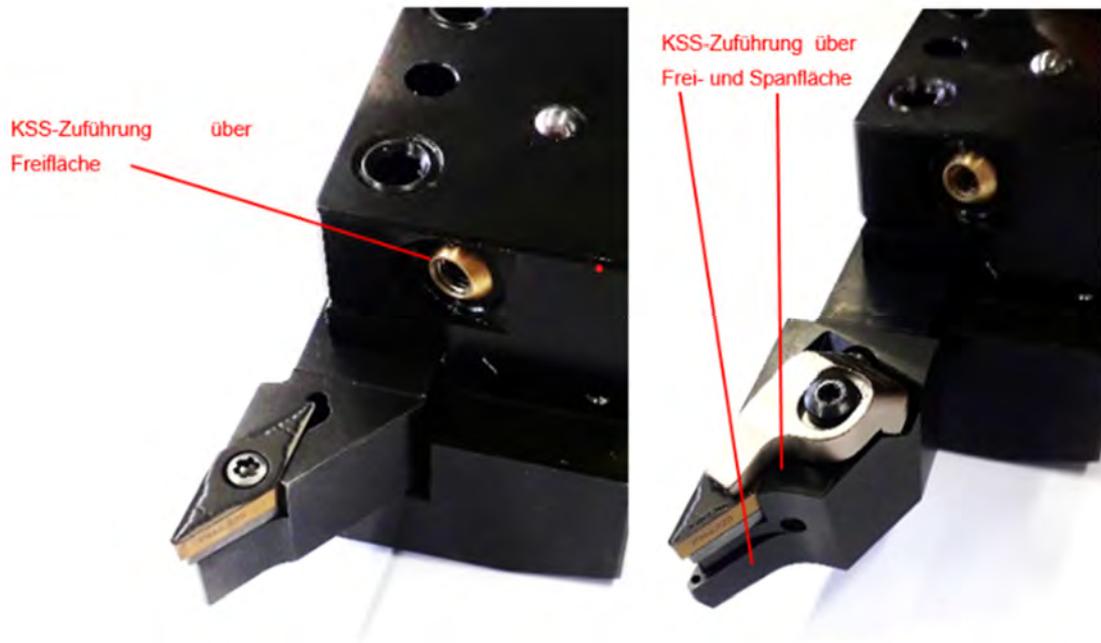


Abbildung 18: Drehwerkzeuge für KSS-Zuführung

Zu Beginn dieser Untersuchung sind die beiden Werkzeuge zunächst anhand der Trockenbearbeitung getestet wurden. Darin zeigt sich, dass hinsichtlich der Kräfte und Leistungen geringe Unterschiede entstanden (liegen im Bereich zwischen 1- 3%), die letzten Endes auf den entstehenden Verschleiß mit zunehmender Bearbeitungszeit zurückzuführen sind. Nach Auswertung der Einflüsse, konnte festgestellt werden, dass bspw. bei einem Vorschub von 0,16 mm je Verschleißzuwachs von 0,019 mm, die Schnittkräfte um ca. 15 N ansteigen. Anschließend sind die Versuche wiederholt wurden, nur mit Kühlschmierstoffzuführung. Daraus ergaben sich größere Unterschiede (siehe Abbildung 19. Hier geht die konventionelle Nassbearbeitung gegenüber zielgerichteter Zuführung als energieeffizienter hervor. Grund dafür ist, dass durch die Zuführung über die Freifläche, der Kühlschmierstoff aufgrund des Drucks und des Auftreffens auf die Schneide ein sogenanntes hydrostatisches Polster bildet, das sich auf das Werkzeug auswirkt. Dies hat zur Folge, dass die Bearbeitung mehr Kräfte und Energie für die Zerspanung benötigt.

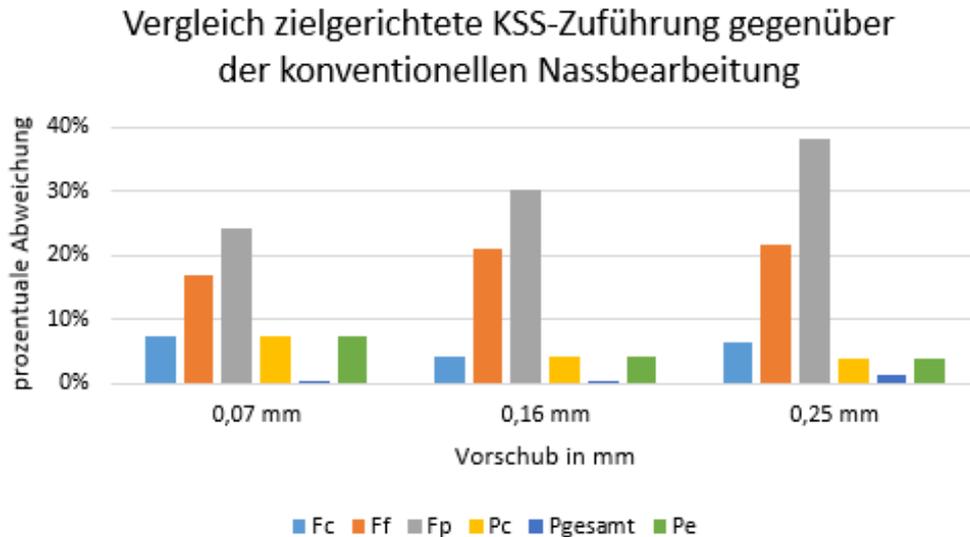


Abbildung 19: Ergebnisse der KSS-Zuführvariante

Somit kann in dieser Untersuchung festgehalten werden, dass die konventionelle Nassbearbeitung zwar weniger Kräfte und Energie benötigt, allerdings hinsichtlich des Werkzeugverschleiß einen Nachteil hat. Die Variante der zielgerichteten Zuführung hat den Vorteil, dass die Span- und Freifläche kontinuierlich gekühlt wird.

4.2.2.4 Versuche mit einem konstanten Zeitspannungsvolumen und der Einfluss des Vorschubs und der Schnittgeschwindigkeit auf den Energiebedarf

Wie im Vorfeld bereits erwähnt, wurden weitere Untersuchung hinsichtlich des Energiebedarfs durchgeführt. Dabei spielte das Zeitspannungsvolumen Q [cm^3/min] eine große Rolle, dass abhängig vom Vorschub, der Schnittgeschwindigkeit und der Schnitttiefe ist. Die Versuche sind dafür so gestaltet worden, dass die Schnitttiefe jeweils konstant bleibt, sich nur die Schnittgeschwindigkeit und der Vorschub ändert. Dafür wurden der größtmögliche Vorschub und die kleinste Schnittgeschwindigkeit, sowie der kleinstmögliche Vorschub und die größte Schnittgeschwindigkeit angewendet. Als dritte Schnittwertkombination wurde der mittlere Bereich der Schnittwerte spezifiziert, um dennoch das Zeitspannungsvolumen Q konstant zu halten. Daraus ergaben sich letztendlich folgende Versuchsbedingungen:

- Schnitttiefe $a_p = 1,0$ mm, Vorschub $f = 0,114$ mm, Schnittgeschwindigkeit $v_c = 350$ m/min,
- Schnitttiefe $a_p = 1,0$ mm, Vorschub $f = 0,16$ mm, Schnittgeschwindigkeit $v_c = 250$ m/min,
- Schnitttiefe $a_p = 1,0$ mm, Vorschub $f = 0,266$ mm, Schnittgeschwindigkeit $v_c = 150$ m/min.

Die Ergebnisse dieser Versuche sind in den nachfolgenden Abbildungen 21 und 22 zu sehen, in denen zwei Unterschiedliche Tendenzen zu erkennen sind. Denn in dem ersten Diagramm

ist der Einfluss von Vorschub und Schnittgeschwindigkeit bei gleicher Werkzeuggeometrie sichtbar. Darin wird deutlich, dass der Vorschub einen größeren Einfluss auf den Energiebedarf besitzt, als die Schnittgeschwindigkeit. Außerdem generiert ein größerer Vorschub einen geringeren Energiebedarf. Der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit hingegen ist genau entgegengesetzt. Hier generiert die kleinstmöglich gewählte Schnittgeschwindigkeit von 150 m/min, die energieeffizienteste Bearbeitung. In der zweiten Darstellung ist der Energiebedarf in Abhängigkeit der Schnittwerte dargestellt. Darin wird deutlich sichtbar, dass die Kombination aus größtem Vorschub (0,266 mm) und kleinster Schnittgeschwindigkeit (150 m/min) die Bearbeitung widerspiegelt, die den geringsten Energiebedarf, bei gleichem abgespannten Volumen pro Zeit, aufweist.

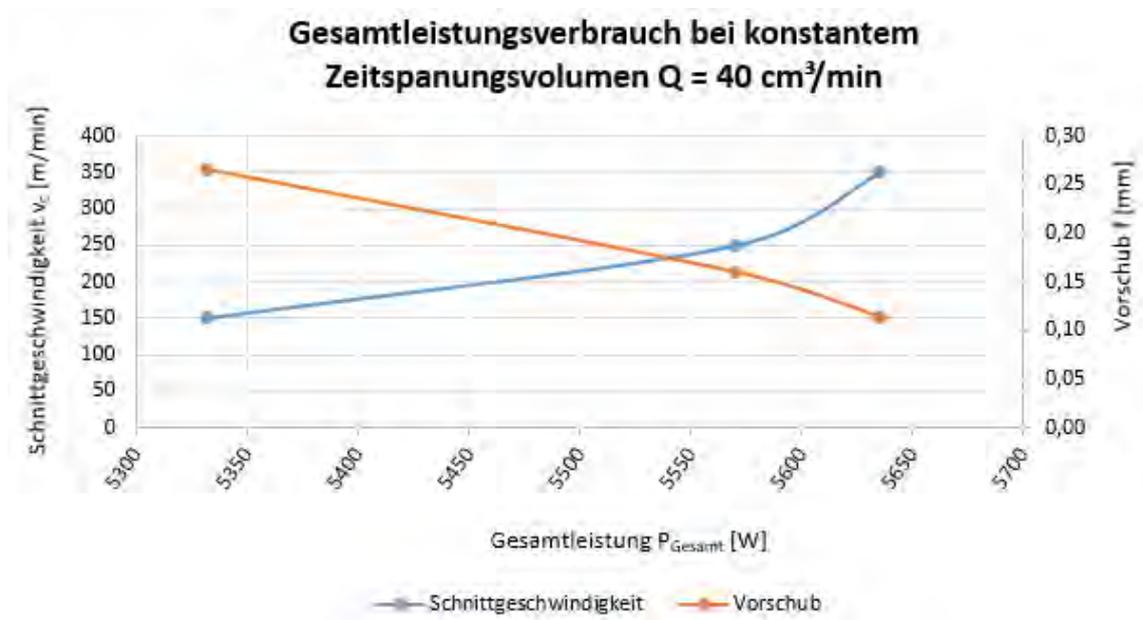


Abbildung 20: Gesamtleistungsbedarf bei konstantem Zeitspannvolumen

Vergleich der Versuche hinsichtlich konstanten Zeitspannvolumen Q

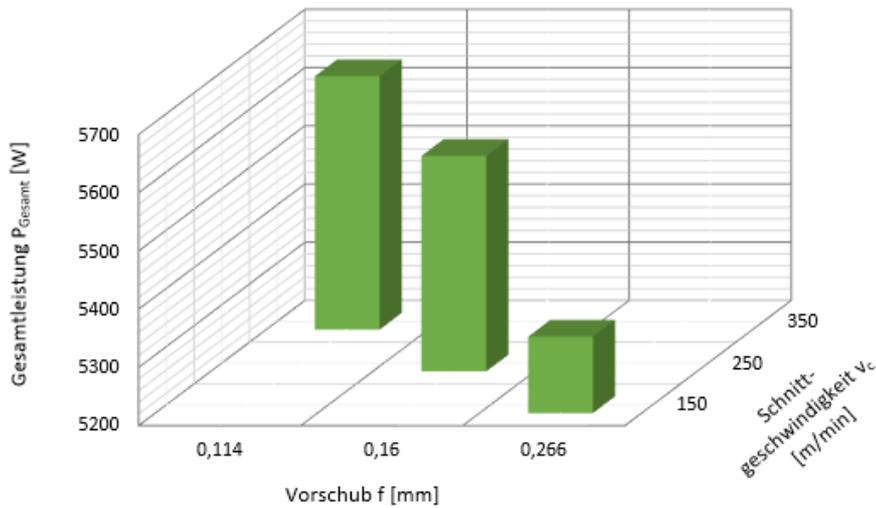


Abbildung 21: Versuchsvergleich bei konstantem Zeitspannvolumen

Abschließend sind hinsichtlich neuer Werkzeugtechnologien noch Untersuchungen erfolgt, die sich mit der Bearbeitungsrichtung beim Längsdrehen beschäftigen. Aufgrund der Technologie Prime Turning wurden die Versuche mit Hilfe der bereits angewendeten Schnittwerte sowie Wendeschneidplatten durchgeführt. Darin erfolgte die Längsbearbeitung von 100 mm Länge und einer Schnitttiefe von 1,00 mm. Die Versuche sind in diesem Falle ebenfalls mehrmals wiederholt wurden.

Die Bearbeitung erfolgte somit wie üblich, zum Dreibackenfutter hin und entgegengesetzt. Die Bearbeitungsbedingungen sind dadurch gleichgeblieben, nur das sich die Vorschubrichtung verändert hat. Auch hier sind die Bearbeitungskräfte und Leistungen zur Bewertung aufgenommen wurden. Zum Ergebnis dieser Versuche konnten keine gravierenden Unterschiede in den Zerspanungskräften und Leistungen festgestellt werden, obwohl eine unterschiedliche Bearbeitungsrichtung erfolgte. Die Abweichungen der erzielten Daten liegen unter 10%, was sich somit nicht ausschlaggebend auf die Energieeffizienz auswirkt. Beispielhafte prozentuale Unterschiede sind in der nachstehenden Tabelle 2 einsehbar. Hier sind die Versuche und deren Ergebnisse aufgezeigt, die nachweisen wie groß die Abweichungen der Kräfte und Leistungen der verschiedenen Bearbeitungen mit entgegengesetzter Vorschubrichtung sind.

Tabelle 2: Abweichungen der unterschiedlichen Bearbeitungen und deren Vorschubrichtung

Versuch	F _c	F _p	P _c	P _{ges}
f= 0,16 mm, v _c = 250 m/min	2,02%	12,05%	2,02%	-0,69%
f= 0,25 mm, v _c = 250 m/min	1,20%	6,74%	1,20%	0,18%
f= 0,16 mm, v _c = 350 m/min	2,10%	12,20%	2,40%	1,01%
f= 0,25 mm, v _c = 350 m/min	1,40%	7,10%	1,50%	0,30%

4.3 Zwischenfazit und Zusammenfassung der Weiterentwicklung, Untersuchung, Charakterisierung und ggf. Substitution spanender Fertigungsverfahren

Grundsätzlich konnten mit den durchgeführten Untersuchungen und deren erzielten Ergebnisse, Ableitungen getroffen werden, die zeigen mit welcher Methode es möglich ist den Energiebedarf im Zerspanungsprozess zu reduzieren. Die Betrachtung verschiedener Ressourcen stand dabei im Fokus der Bearbeitung.

Begonnen wurde mit dem Werkzeug. Durch variierende Einsatzdauern der untersuchten Wendeschneidplatten erfolgte eine Beschreibung des Verschleißverhaltens. Dabei nahm mit steigender Schnittgeschwindigkeit, welche sich in den angegebenen Anwendungsbereichen des Werkzeugherstellers befinden, der messbare Freiflächenverschleiß zu. Auch ein fortschreitender Verschleiß war dabei über die zunehmende Einsatzzeit des Werkzeuges festzustellen. Weiterhin konnten Unterschiede in der Verschleißentstehung der verschiedenen Wendeschneidplatten nachgewiesen werden. Daraus ist abzuleiten, dass die Beschichtungstechnologien und das Knowhow der Hersteller von unterschiedlicher Qualität sind. Dies zeigte sich deutlich nach der maximalen Einsatzzeit von 15 min.

Nach dem die VerschleißEinstellung erfolgte, rückte nun der Energiebedarf in den Vordergrund. Dazu wurde die Wendeschneidplatten anhand der erstellten Musterwelle und Herstellerempfehlungen (bezüglich der Schnittwerte) getestet. Dabei zeigte sich, dass es auch hier geringe Unterschiede sowohl in der Leistung für die Zerspanung, als auch für den gesamten Energiebedarf der Werkzeugmaschine, abhängig von Vorschub bzw. Schnittgeschwindigkeit gibt. Gravierend sind diese Unterschiede nicht, lediglich zwischen 4- 8% liegen die Unterschiede der Wirkleistung. Um dafür noch einen deutlichen Vergleich zu liefern, ist im Nachhinein anhand der ermittelten Gesamtleistungen eine Hochrechnung für Energiekosten durchgeführt worden. Daraus resultiert ein Strompreis für eine 15-minütige Bearbeitungszeit von 0,01 €. Somit konnte bezüglich der Energiekosten keine Wendeschneidplatte als priorisiert angesehen werden.

Anschließend erfolgte ein Überblick darüber, welchen Einfluss die Anwendungen verschiedener Kühlschmierstoffzuführungsstrategien (Trockenbearbeitung, Minimalmengenschmierung und konventionelle Nassbearbeitung) in Verbindung mit verschiedenen Schnittparametern auf die Ressourcen Leistungs- bzw. Energiebedarf haben. Dabei sind dieselben Versuche bzw. Schnittwerte angewendet worden. Der Vergleich zeigt, dass die Nassbearbeitung die energieintensivste Zerspanung ist. Denn deren Einsatz benötigt durchschnittlich, gegenüber den anderen zwei Varianten, 12-15 % mehr Energie, unabhängig welche Schnittwerte eingestellt wurden. Der höhere Bedarf lässt sich auf die integrierte Kühlschmierstoffpumpe der Werkzeugmaschine zurückzuführen, die ca. 800-1000 W aufnimmt. Ein gravierender Unterschied zwischen Trockenbearbeitung und Minimalmengenschmierung konnte nicht festgestellt werden.

Bezogen auf den eingestellten Verschleißzustand, wie in der Versuchsreihe 1 konnte bei der Betrachtung von Schnittkraft bzw. Schnittleistung kein Einfluss des Verschleißverhaltens auf die am Werkzeug gemessenen Schnittkräfte ermittelt werden. Jedoch stellten sich zu erwartende Effekte, wie eine Erhöhung der Schnittkraft bei zunehmendem Vorschub und eine Verringerung der Schnittkraft bei steigender Schnittgeschwindigkeit ein. Die aus der Schnittkraft resultierende Schnittleistung steigt bei zunehmender Schnittgeschwindigkeit. In dem Maße, in dem sich Schnittleistung erhöhte, stieg ebenfalls die an der Maschine gemessene Gesamtleistung. Durch den Vergleich der am Werkzeug wirkenden Leistung und der gemessenen Gesamtleistung war es für die untersuchten Versuchspunkte möglich, eine effiziente Variante darzustellen. Dabei stehen hohe Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe für eine effiziente Zerspanung bezüglich der aufzubringenden Leistung an Werkzeug und Maschine. Dem gegenüber steht jedoch immer der damit einhergehende höhere Verschleiß am Werkzeug.

Abschließend ist mit den Versuchen, das Zeitspanungsvolumens konstant zu halten, nochmals der Einfluss des Vorschubs und der Schnittgeschwindigkeit auf den Energiebedarf untersucht worden. Darin sind hohe und niedrige Schnittwerte miteinander verglichen worden, die einen unterschiedlichen Einfluss der Parameter widerspiegeln. Gezeigt hat sich dabei, dass bei gleicher Produktivität, ein hoher Vorschub und eine kleine Schnittgeschwindigkeit die effizienteste Zerspanung generieren. Ein hoher Vorschub generiert somit eine energieeffizientere Zerspanung.

Weiterführend werden innerhalb des Forschungsprojektes noch Untersuchungen stattfinden, die sich mit der Spanformgeometrie der Wendeschneidplatten beschäftigen. Darin soll

analysiert werden, welchen Einfluss verschiedenen Formen besitzen. Dazu werden eigenständig Spanformgeometrien auf die Wendeschneidplatten eingebracht. Diese sollen dann mit der Wiper-Geometrie und Standard Wendeschneidplatten eines Herstellers verglichen werden. Ziel soll sein herauszufinden welchen Einfluss diese Formen auf die Kräfte bzw. Leistungen in der Zerspanung besitzen und wie sich diese auf den Energieverbrauch auswirken.

5

Entwicklung und Herstellung von Mikrostrukturen durch Laserbearbeitungsverfahren auf diskreten Werkzeugen. Untersuchung dieser neuen Werkzeuggeometrien im Hinblick auf die Ressourceneffizienz

5.1 Grundlagen

5.1.1 Grundlegende Begriffsdefinitionen

Definitionen im Hinblick auf Ressourceneffizienz wurden innerhalb des Kapitels 4.1.1 Grundlegende Begriffsdefinitionen näher erläutert. Auf weiterführende Definitionen im Umgang von Mikrostrukturen auf diskreten Werkzeugen bei der spanenden Bearbeitung wird in Folgendem eingegangen.

Weiterhin wurden innerhalb des Projektes Begriffe im Umgang mit der Laserstrukturierung von Wendeschneidplatten definiert. Dabei ist eine funktionale Mikrostruktur auf spanenden Werkzeugen charakterisiert durch einzelne Formelemente, die durch ihre geometrische Form im Mikrometer-bereich sowie deren beschreibende Messgrößen definiert ist. Weiterhin ist sie bestimmt durch die Anordnung der Formelemente in einer Textur, welche durch ihre Ausmaße (Strukturgröße) und Ausrichtung (Orientierung) auf dem Schneidteil des Werkzeuges festgelegt ist. Funktionale Mikrostrukturen können durch das Herstellungsverfahren sich selbst organisieren oder werden definiert hergestellt. Eine Textur ist hingegen gekennzeichnet durch die Anordnung und Ausrichtung der Formelemente in der Textur, die flächigen Maße einer bestimmten Anzahl von Formelementen, den Aufbringungsort auf dem Schneidteil und die Ausrichtung auf dem Schneidteil [29].

5.1.2 Laserstrukturierung mittels Ultrakurzpulslaser

Innerhalb des Forschungsprojektes soll der Einfluss funktionaler Mikrostrukturen auf Wendeschneidplatten bei der spanenden Bearbeitung hinsichtlich der Energieeffizienz untersucht werden. Die Herstellung dieser Strukturen erfolgte mit dem Lasergerät „Duetto“. Dieses ist ein Nd:YAG Ultrakurzpulslaser der Firma Time-Bandwidth Products. Der Festkörperlaser kann sowohl im Pulsbetrieb wie auch im cw-Betrieb arbeiten. Für die Herstellung der Mikrostrukturen wird der Pulsbetrieb genutzt, um genügend Leistung zu erzeugen, damit das Material verdampft wird und die Wärmeeinflusszone dennoch minimal bleibt. Die Pulsdauern liegen dabei im ps-Bereich. Eine Besonderheit der Laseranlage „Duetto“ besteht dabei darin, im Burst Betrieb zu arbeiten. Dabei wird die Energie, die ein Einzelpuls besitzt, auf einen Burst aufgeteilt. Ein Burst kann dabei aus bis zu 8 Einzelpulsen bestehen. Der zeitliche Abstand zwischen den Pulsen im Burst beträgt 12 ns.

Die Eigenschaften des Lasers sind in folgendem aufgeführt:

- Wellenlänge $\lambda = 1064 \text{ nm}$
- Strahlradius $w_0 = 13,5 \text{ }\mu\text{m}$
- Pulsdauer $t = 10 \text{ ps}$
- Pulsabstand $t_p = 12,5 \text{ ns}$ → Pulswiederholfrequenz $f_p = 80 \text{ MHz}$
- Burstdauer $t_b = 10 \text{ }\mu\text{s}$ → Burstwiederholfrequenz $f_b = 100 \text{ kHz}$

Aufgrund des Strahlradius von $13,5 \text{ }\mu\text{m}$ wird ein Strahldurchmesser von $27 \text{ }\mu\text{m}$ erzeugt. Der Strahlradius begrenzt somit die Größe der Mikrostrukturen auf $27 \text{ }\mu\text{m}$.

5.1.3 Das Fertigungsverfahren Drehen

Das Fertigungsverfahren Drehen wird im Abschnitt 4.1.2 näher beschrieben und soll an dieser Stelle nur noch einmal genannt werden.

5.1.4 Werkzeugmaschine CTX Alpha 500 und Auswerteeinheit der Zerspanungskräfte

Auf die für die Versuche benutzte Werkzeugmaschine CTX Alpha 500 ist im Kapitel 4.1.3 Werkzeugmaschine CTX Alpha 500 und Auswerteeinheit der Zerspanungskräfte näher eingegangen wurden.

5.1.5 Werkzeuge

Zur Laserstrukturierung wird eine Wendeschneidplatte benötigt, welche vom Hersteller aus keine 3D-Geometrie aufweist. Dabei wurde sich für eine Wendeschneidplatte der Firma Sandvik mit der Kennung CNMA 12 04 04 – KR 3205 entschieden. Aus dieser Bezeichnung geht die Form der Wendeschneidplatte hervor. Sie ist eine so genannte C-Platte (rhombisch 80°) mit einem Freiwinkel von 0° und einer Schneidkantenlänge von 12 mm. Weiterhin besitzt sie eine Dicke von 4 mm und einen Eckenradius von 0,4 mm. Die Kennnummer 3205 beschreibt die interne Kennung des Werkstoffes der Wendeschneidplatte. Laut Herstellerangaben ist diese nur für kurzspanende Werkstoffe geeignet, soll aber nach Anpassung der folgenden Schnittwerte für Stahl benutzt werden:

- Schnitttiefe: 2,5 mm (0,2-5)
- Vorschub: 0,2 mm/r (0,1-0,3)
- Schnittgeschwindigkeit: 395 m/min (440-355)

Sowohl die Wendeschneidplatte wie auch das 3-Komponenten-Dynamometer begrenzen die Auswahl des Wendeschneidplattenhalters hinsichtlich der Geometrie. Auf der anderen Seite wird ein Wendeschneidplattenhalter benötigt, welcher eine Kühlschmierstoffzufuhr durch die Rückseite des Schaftes realisiert. Auf der anderen Seite soll dieser eine Kühlung der Span- und der Freifläche ermöglichen. Durch den Aufbau der DMG CTX Alpha 500 ist die Schneidrichtung des Halters nach links vorgegeben. Da die Wendeschneidplatten von der Firma Sandvik sind und die meisten Firmen interne Toleranzen zwischen Platte und Halter haben, bietet es sich an, einen Wendeschneidplattenhalter der Firma Sandvik auszuwählen. Aufgrund dieser Vorgaben wurde der Wendeschneidplattenhalter QS-PCLNL 2020-12C ausgewählt. Neben den schon vorher vorgestellten Eigenschaften, welche der Wendeschneidplattenhalter besitzen muss, hat dieser einen Einstellwinkel von 95° und die Spannung der Wendeschneidplatten wird über einen Kniehebel realisiert.

5.1.6 Allgemeines zum Kühlschmierstoff

Auf die Grundlagen zum Kühlschmierstoff wurde in Kapitel 2.1.6 Allgemeines zu Kühlschmierstoff Bezug genommen. Deshalb soll an dieser Stelle nicht noch einmal separat darauf eingegangen werden.

5.1.7 Angewendete Kühlschmierstoffvarianten innerhalb der Untersuchungen

5.1.7.1 Konventionelle Nassbearbeitung

Die konventionelle Nassbearbeitung, welche schon im Abschnitt 4.1.6.1 näher beschrieben wurde, fand auch bei den im weiteren Verlauf beschriebenen Versuchen Anwendung.

5.1.7.2 Trockenbearbeitung

Die Trockenbearbeitung wurde in Kapitel 4.1.6.3 Trockenbearbeitung näher erläutert. Eine weiterführende Bedeutung der Trockenbearbeitung im Umgang mit Mikrostrukturen ist in Folgendem dargestellt.

Bei der Trockenbearbeitung kommen den Mikrostrukturen eine weitere Bedeutung hinzu. Wie bei der konventionellen Nassbearbeitung, dienen die Mikrostrukturen auch hier als Reservoir für Schmutzpartikel, welche bei der spanenden Bearbeitung entstehen. Somit wird an dieser Stelle an Mehrkörperkontakt in der Reibzone vermieden, was eine Verminderung der Reibung und den damit verbundenen Kräften mit sich ziehen soll. Des Weiteren soll die Reibung schon allein durch die Mikrostruktur minimiert werden. Durch die Verringerung des Traganteils der Spanfläche wird auch die Reibfläche minimiert, wodurch die Reibung abnimmt.

5.2 Vorbereitung und Beschreibung der Versuche

5.2.1 Vorbereitung der Versuche

Die Vorbereitung der Versuche war innerhalb der Forschungsarbeit der wohl wichtigste Teil. Nach eingehender Literaturrecherche mussten die Mikrostrukturen erst im CAD-Programm SolidWorks modelliert werden. Dabei wurden als Erstes unterschiedliche Untersuchungen durchgeführt, um endgültige Strukturen herstellen zu können.

Zum einen wurde der Kühlschmierstoff auf seinen Kapillareffekt überprüft. Dabei wurde als erstes dessen Benetzungsfähigkeit auf einer unstrukturierten Wendeschneidplatte überprüft. Es wurde ein Tropfen auf die Oberfläche gegeben und der Benetzungswinkel qualitativ überprüft. Somit konnte sichergestellt werden, dass der Kühlschmierstoff in die Struktur eindringt und einen Kapillareffekt ermöglicht. Im nächsten Schritt wurden zwei Mäanderstrukturen auf die nicht strukturierten Wendeschneidplatten aufgebracht. Eine Erklärung der Mä-

anderstruktur und anderen Strukturen erfolgt im weiteren Verlauf des Berichtes. Die Mäanderstrukturen weisen unterschiedlich breite Gräben auf, welche sich durch die Tiefe der Gräben von Struktur eins und Struktur zwei unterscheiden. Dadurch sollte herausgefunden werden, welches Aspektverhältnis von Breite zu Tiefe den besten Kapillareffekt aufweist. Zur Überprüfung wurde ein 3D-Digitalmikroskop um 90° geneigt und die Wendeschneidplatte auf die Freifläche gelegt. Dadurch konnte die Wendeschneidplatte von der Seite betrachtet werden, sodass die Gräben nach oben zeigen. Nach Zugabe des Kühlschmierstoffes an die Eintrittsöffnung der Gräben wird dieser entgegen der Schwerkraft nach oben gezogen und weist somit einen Kapillareffekt auf. Um diesen qualitativ bewerten zu können, wurde der Versuchsaufbau durch das 3D-Digitalmikroskop als Video aufgenommen, um Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Aspektverhältnissen ziehen zu können. Dabei fiel auf, dass der Kühlschmierstoff am schnellsten die Gräben füllt bei einem Aspektverhältnis von eins und je kleiner der Graben war. Diese beiden Parameter wurden beim Modellieren der Strukturen berücksichtigt.

Um Aussagekraft darüber zu erhalten, welcher Parameter den größten Einfluss auf die Reibung und damit auf die Kräfte hat, sollten die Versuche mittels statistischer Versuchsplanung (DOE) durchgeführt werden. Dafür wurden als erstes drei Strukturen ausgewählt, welche untersucht werden sollten. Diese sind in Folgendem noch einmal aufgeführt:

Mäanderstruktur

Die Mäanderstruktur ist angelehnt an die Natur. Sie soll einen natürlichen Flusslauf nachahmen und damit den Kapillareffekt positiv beeinflussen. Der Kühlschmierstoff soll wie bei einem Fluss ständig durch die Struktur fließen und dabei Schmutzpartikel vom Reibkontakt weg transportieren. Dabei wird ständig neuer Kühlschmierstoff durch die Nassbearbeitung von außen hinzugeführt. Es muss gewährleistet werden, dass die Textur der Struktur größer ist, als die Breite des sich abrollenden Spans, damit der Kühlschmierstoff frei zufließen kann.

Der Querschnitt der Struktur ist eine konische Kurve. Dadurch, dass die Struktur zum Grund hin spitzer wird, soll der Kapillareffekt ebenfalls positiv beeinflusst werden. Dieser Effekt ist auf das Experiment mit den kommunizierenden Röhren zurück zu führen. Hierbei ist der Kapillareffekt bei der Röhre mit dem kleinsten Durchmesser am Stärksten.

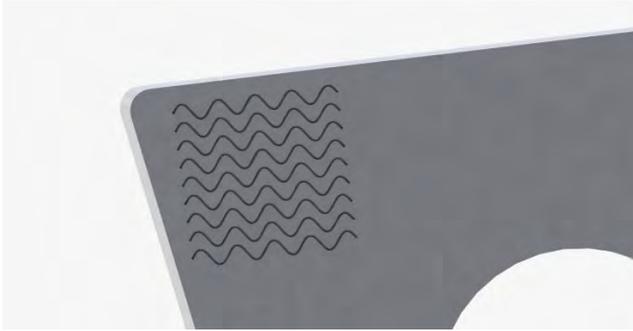


Abbildung 22: Darstellung der Mäanderstruktur

Dreieckstruktur

Die Dreieckstruktur ist angelehnt an die Mäanderstruktur. An dieser Stelle sind die Umkehrpunkte nicht abgerundet, sondern spitz. Dadurch wird zum einen der Kapillareffekt negativ beeinflusst, da der Übergang nicht fließend, sondern abrupt geschieht. Somit wird sich die Fließgeschwindigkeit des Kühlschmierstoffes verlangsamen. Dennoch können die Strukturen nun enger aneinandergesetzt werden. Damit wird der Traganteil der gesamten Fläche verringert, was zu einer Reibminderung bei der Trockenbearbeitung führen kann. Weiterhin kann der Traganteil für ein hydrostatisches Polster vergrößert werden, was die Reibminderung bei einer Nassbearbeitung begünstigt. Auch hier ist der Querschnitt der Struktur eine konische Kurve, welche von den Abmaßen her, der der Mäanderstruktur gleicht.



Abbildung 23: Darstellung der Dreieckstruktur

Kegelstruktur

Die Kegelstruktur weicht von den bisherigen Strukturen ab. Diese wurde in Anlehnung an eine andere Forschungsarbeit entwickelt. Dabei werden die Mikrostrukturen zur Reibminderung innerhalb von Gleitlagern benutzt und haben sich dort durchgesetzt [30]. Die Mikrostruktur besteht hierbei aus kleinen Kegeln, welche auf der Oberfläche der Wendschneidplatte abgebildet sind. Durch diese Kegel wird der Traganteil der Struktur auf ein Minimum

reduziert. Dies könnte auf der einen Seite eine erhöhte Reibminderung durch eine Verringerung des Traganteils mit sich ziehen und auf der anderen den Verschleiß der Struktur begünstigen. Dadurch könnte zwar die Reibung minimiert werden, aber nur für eine unbestimmte Zeit, wodurch die Standzeit der Wendeschneidplatte sinkt. Weiterhin könnte bei der Nassbearbeitung der Traganteil des hydrodynamischen Polsters auf ein Maximum gesteigert werden. Dies würde ebenfalls eine Reibminderung mit sich ziehen, jedoch unter einer höheren Standzeit, als bei der Trockenbearbeitung. Der Kühlschmierstoff verbessert die Reibungsminderung und nimmt über die Fläche gesehen Energie vom sich abrollenden Span auf. Dadurch sinkt der Verschleiß. Außerdem nimmt der Kühlschmierstoff Mikropartikel auf, weshalb wir lediglich einen Reibkontakt zwischen Struktur und Span haben. Ein Kapillareffekt ist an dieser Stelle nicht zu erwarten. Die Fläche wird lediglich geflutet und der Kühlschmierstoff verteilt sich auf der Fläche durch den von der Kühlung hervorgerufenen Druck.

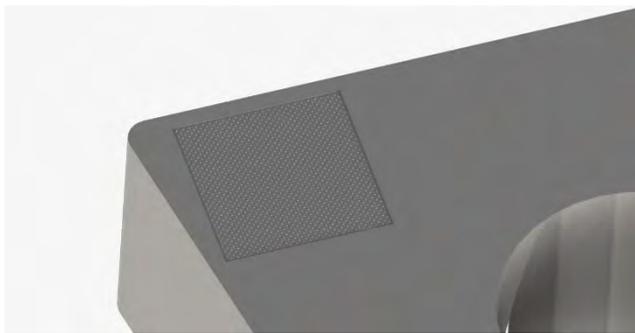


Abbildung 24: Darstellung der Kegelstruktur

Jede dieser Strukturen soll sich durch drei unterschiedliche Parameter unterscheiden. Somit erhält man einen 23-faktoriellen Versuchsplan. Die sich verändernden Parameter für die Mäander- und Dreieckstruktur sind:

- die Breite/Tiefe (Apektverhältnis),
- der Abstand zwischen den Strukturen und
- die Periodenanzahl.

Bei den Kegelstrukturen ändern sich die folgenden Parameter:

- der Radius des Kegels,
- die Höhe des Kegels und
- der Abstand der Kegel zueinander.

Die Textur der Strukturen soll dabei immer gleich groß bleiben, um diese auch außerhalb der DOE miteinander vergleichen zu können und somit die effektivste Struktur herausfinden zu können.

Mit Hilfe dieser Zielvorgaben konnten die Strukturen endgültig modelliert werden. Anschließend wurden aus den CAD-Dateien Programme erzeugt, welche in den Ultrakurzpulslaser eingelesen wurden. Nach der Einstellung der Parameter und der Ausrichtung der Wendschneidplatte konnten die Strukturen hergestellt werden. An die Herstellung der Wendschneidplatten schließt sich eine Reinigung im Ultraschallbad an, damit grobe Verschmutzungen und Schmelzreste beseitigt werden können. Um Fehler bei der Auswertung der Versuche, die durch geometrische Abweichungen entstehen könnten, ausschließen zu können, wurden die Strukturen alle mittels des 3D-Digitalmikroskopes nachgemessen. Dabei wurden je nach Strukturart folgende Parameter gemessen:

- Texturmessung (Abstand zur Haupt- und Nebenschneide, Länge, Breite und Texturwinkel zur Hauptschneide)
- Flächenmessung der Formelemente (Breite, Länge/Radius, Abstand zwischen den Formelementen in X- und Y-Richtung und Versatz der Formelemente in X- und Y-Richtung)
- Profilmessung (Tiefe, Winkel der Flanken des Formelementes, Rauigkeit qualitativ im Grund)

Bei einer zu großen Maßabweichung wurden die Strukturen noch einmal unter Anpassung der Parameter des Ultrakurzpulslasers neu gefertigt.

5.2.2 Beschreibung der Versuche

Bei der Durchführung der Versuche wurde als Werkstück eine Welle aus C45 zum Längsdrehen ausgewählt. Durch die Geometrie der Wendschneidplatte und der Tatsache, dass innerhalb der Versuchsreihe die Ressourceneffizienz zwischen den Strukturen bis hin zur handelsüblichen unstrukturierten Wendschneidplatte verglichen werden sollte, wurde eine einfache Geometrie ohne Formelemente gewählt. Dadurch wurden die Schnittbedingungen konstant gehalten. Weiterhin wurde festgelegt, dass die Schnittzeit pro Versuch eine Minute betragen soll, um die jeweiligen Parameter über einen bestimmten Zeitraum aufnehmen zu können und um aus dem Bereich des Initialverschleißes heraus zu kommen. Um dieses Kriterium einhalten zu können wurde aus der Schnittzeit und dem jeweiligen Durchmesser der Schnittweg berechnet, welcher innerhalb der einen Minute Schnittzeit zurückgelegt werden

musste. In dieser Zeit wurden die Schnittkraft, die Vorschubkraft und die Passivkraft mit Hilfe des 3-Komponenten-Dynamometers aufgenommen. Die Auswertung erfolgte mittels der Software DIAdem. Innerhalb dieser wurde unter Berücksichtigung der Schnittgeschwindigkeit auch die Schnittleistung ausgegeben. Die Gesamtleistung der Maschine wurde mithilfe eines PEL 103 Leistungs- und Energieregistriergerätes gemessen. Zur Auswertung der Versuche soll jedoch nur die Gesamtwirkleistung P_t , aller drei Phasen berücksichtigt werden. Die Gesamtwirkleistung ist die Leistung, welche tatsächlich zum Betreiben der Maschine genutzt wird und direkt Strom aus dem Stromnetz entnimmt. Eine Untersuchung der Blind- oder Scheinleistung soll nicht vorgenommen werden.

Für die Versuche wird, die im vorherigen vorgestellte Universaldrehmaschine DMG CTX Alpha 500 verwendet. Innerhalb der Versuchsreihe wurden die Strukturen sowohl während der Trockenbearbeitung wie auch der Nassbearbeitung getestet. Beide Bearbeitungsarten wurden ohne Späneförderer durchgeführt. Dieser schaltet sich in bestimmten Intervallen an und verfälscht somit das Ergebnis der Gesamtwirkungsenergie. Deshalb wird dieser immer nur am Ende eines Versuches angeschaltet, um die überschüssigen Späne zu entfernen. Ebenfalls soll bei der Nassbearbeitung auf die Zuführstrategie geachtet werden. Der Kühlschmierstoff soll dabei direkt auf die Spanfläche aufgebracht und durch den Kapillareffekt der Strukturen direkt unter den Span transportiert werden. Die Freifläche soll ebenfalls mit Kühlschmierstoff bestrahlt werden. Bei der Trockenbearbeitung wird lediglich die Kühlung ausgeschaltet. Um vergleichbare Werte zwischen den Bearbeitungsverfahren zu erhalten wurde die Gesamtwirkleistung der Kühlschmierstoffpumpe aufgenommen. Diese wurde anschließend aus den Betrachtungen herausgerechnet. Im nächsten Kapitel wird darauf noch einmal gesondert eingegangen. Während der Versuche wurden die Schnittbedingungen konstant gehalten, um mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung in der Auswertung vergleichbare Ergebnisse zu bekommen und festzustellen, welcher Parameter den größten Einfluss auf die Kräfte und Leistungen während der Zerspanung hat. Die Schnittparameter sind wie folgt gewählt wurden:

- Schnittgeschwindigkeit: 350 m/min
- Vorschub: 0,16 mm/r
- Schnitttiefe: 1 mm

Diese Werte haben sich aus der Herstellerempfehlung ergeben. Während der Durchführung der Versuche wurden zuerst alle Wendeschneidplatten mittels Trockenbearbeitung getestet.

Daran schlossen sich die mittels Nassbearbeitung an. Während der Versuche wurde die Spanentwicklung beobachtet. Hierbei wurde der Span unter Funkenflug während der Trockenbearbeitung in kurze Spiralspäne gebrochen. Das gleiche wurde bei der Nassbearbeitung nur ohne Funkenflug beobachtet. Dadurch konnte festgestellt werden, dass ein als positiv zu bewertender Zerspanvorgang durchgeführt wurden ist.

5.2.3 Aus- und Bewertung der Versuche

5.2.3.1 Trockenbearbeitung

Die Durchführung der Trockenbearbeitung wurde im letzten Kapitel näher erläutert. Innerhalb der Auswertung soll nicht näher auf die Kräfte eingegangen, sondern der Fokus auf die Gesamtwirkleistung gelegt werden. Um zu kontrollieren, wie groß die Ersparnis ist, wurde für die Trocken- und Nassbearbeitung jeweils ein Versuch mit einer unstrukturierten Referenzwendeschneidplatte durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in folgender Grafik für die Trockenbearbeitung zusammengefasst und aufgelistet:

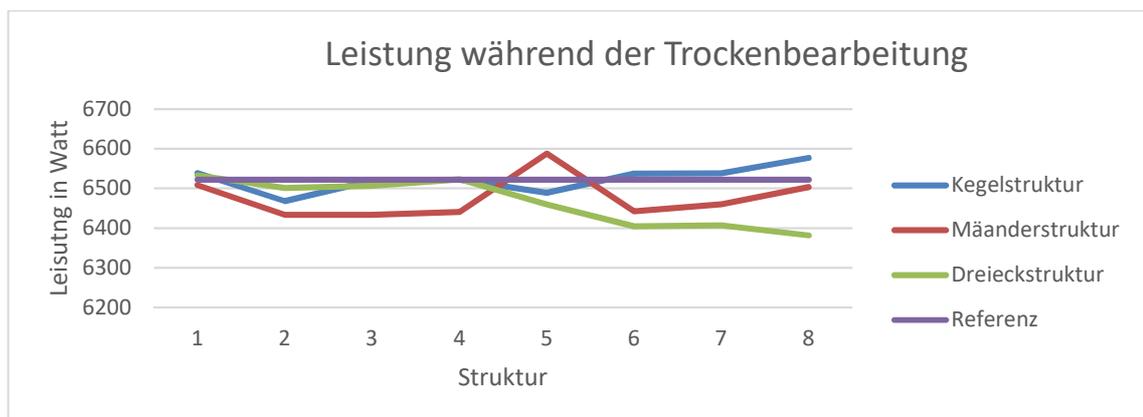


Abbildung 25: Leistung während der Trockenbearbeitung

Wie man anhand der Grafik erkennen kann, weichen nur zwei Werte weit von der Referenzstruktur ab. Bei der Kegelstruktur ist die geringste Abweichung zu erkennen. Diese verläuft um die Referenzstruktur herum, was darauf schließen lässt, dass diese Struktur keinen großen Einfluss auf die Gesamtwirkleistung während der Trockenbearbeitung hat. Bei der Dreieck- und Mäanderstruktur sind im Gegensatz zur Kegelstruktur Trends zu erkennen. Lediglich bei Struktur 5 der Mäanderstruktur ist eine deutliche Abweichung erkennbar. Man kann an dieser Stelle davon ausgehen, dass es sich dabei um einen Ausreißer handelt, da der Wert deutlich von den anderen abweicht. Die Struktur scheint alles in allem einen direkten Einfluss auf die Gesamtwirkleistung zu haben. Bei den Dreieckstrukturen bildet sich ebenfalls ein Trend ab. Während die Strukturen 1 bis 4 direkt um die Referenzstruktur schwanken, setzen sich die Strukturen 5 bis 8 in Bezug auf die Gesamtwirkleistung ab. Mit einer Wirkleistung

von 6.381 W ist die Struktur 8 der Dreieckstrukturen die, welche die niedrigste Leistung während des Zerspanvorganges aufbringt. Die Leistung während der Bearbeitung mit der Referenzplatte beträgt 6.522 W. Somit ergibt sich eine Differenz von 141 W. Bei einer Auslastung von 80 % im Dreischichtbetrieb, werden pro Tag rund 2,7 kWh weniger Strom verbraucht. Bei einem durchschnittlichen Energiepreis von 0,30 € pro Kilowattstunde und einem Arbeitsjahr von 250 Tagen würde die jährliche Ersparnis bei 677 kWh und somit 203 € liegen.

5.2.3.2 Nassbearbeitung

Bei der Nassbearbeitung wurde ebenfalls die Gesamtwirkleistung der Maschine aufgenommen. Im Gegensatz zur Trockenbearbeitung war diese jedoch deutlich erhöht, da während der Zerspanung die Kühlschmierstoffpumpe lief. Da die Pumpe mittels konstantem Druck den Kühlschmierstoff auf die Wendeschneidplatte aufbringt, kann man davon ausgehen, dass die benötigte Gesamtwirkleistung zum Betreiben der Pumpe konstant bleibt. Um die Nassbearbeitung mit der Trockenbearbeitung vergleichen zu können, wurde die Gesamtwirkleistung der Kühlschmierstoffpumpe gemessen und von der Gesamtwirkleistung der Maschine während der Bearbeitung abgezogen. Diese Werte für die Leistung der Kegelstruktur, der Mäanderstruktur, der Dreieckstruktur und der Referenz sind in folgendem Diagramm für die Nassbearbeitung abgebildet:

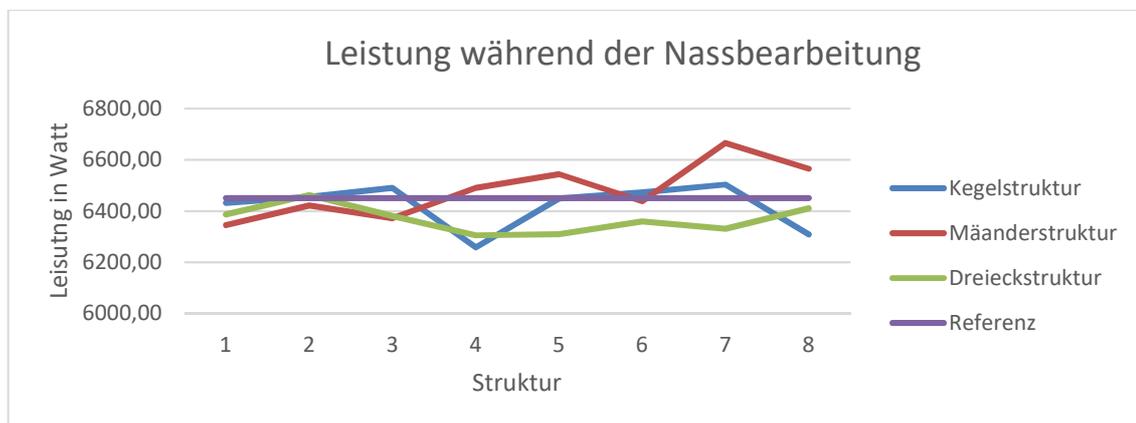


Abbildung 26: Leistung während der Nassbearbeitung

Alles in allem ist beim Vergleich der beiden Grafiken erkennbar, dass die Wirkleistung bei der Nassbearbeitung deutlich kleiner ist, als bei der Trockenbearbeitung. Dies lässt auf die Schmierwirkung des Kühlschmierstoffes schließen. Die Effekte die bei den verschiedenen Strukturen bei der Trocken- und Nassbearbeitung auftreten weichen voneinander ab. Dies erkennt man an den unterschiedlichen Verläufen der Graphen zwischen den Bearbeitungsverfahren. Dies lässt darauf schließen, dass die Annahme, dass durch den Kapillareffekt sich

der Kühlschmierstoff in den Strukturen verteilt und somit als hydrostatisches Polster dient, als möglich erweist. Dies ist jedoch nur eine Vermutung und es kann nicht direkt auf diesen Grund als Ursache geschlossen werden.

Wie man erkennen kann, ist bei der Kegelstruktur ein Trend erkennbar. Die Strukturen 1 bis 3 und die Strukturen 5 bis 7 bewegen sich um die Trendlinie herum. Sowohl die Struktur 4 wie auch die Struktur 8 sinken jedoch rapide ab. Hierbei kann man davon ausgehen, dass die Wechselwirkung zwischen den veränderten Parametern dafür sorgen, dass die benötigte Leistung an dieser Stelle sinkt. Bei der Mäanderstruktur ist kein Trend zu beobachten. Der Großteil der Ergebnisse liegt über der Referenz, was darauf schließen lässt, dass diese Struktur nicht für die Nassbearbeitung während der Zerspanung geeignet ist. Zum einen weichen die Werte nicht weit von der Referenz ab und wenn sie es tun, dann führen sie zu einem für uns negativen Ergebnis. Die Dreieckstrukturen weichen in einem fast konstanten Abstand von der Referenz ab. Hierbei ist davon auszugehen, dass diese Strukturen einen konstanten Einfluss auf die Gesamtwirkleistung haben. Die gewählte Größe der Strukturelemente scheint keinen großen Einfluss auf die Leistung zu haben. Mit einer Wirkleistung von 6.258 W ist die Struktur 4 der Kegelstrukturen die, welche die niedrigste Leistung während des Zerspanvorgangs aufbringt. Die Leistung während der Bearbeitung mit der Referenzplatte beträgt 6.451 W. Somit ergibt sich eine Differenz von 193 W. Bei einer Auslastung von 80 % im Dreischichtbetrieb, werden pro Tag rund 3,7 kWh Strom gespart. Bei einem durchschnittlichen Energiepreis von 0,30 € pro Kilowattstunde und einem Arbeitsjahr von 250 Tagen würde die jährliche Ersparnis bei 926 kWh und somit 278 € liegen.

5.2.3.3 Bewertung des Verschleißes

Die Bewertung der Wendeschneidplatten nach der Bearbeitung in Bezug auf den Verschleiß, soll lediglich auf qualitative Weise erfolgen. Dabei wurden sowohl vor wie auch nach der Zerspanung Aufnahmen unter dem Rasterelektronenmikroskop gemacht, um den Verschleiß sichtbar zu machen. In folgendem ist der Vergleich von einer Platte während der Trockenbearbeitung vor und nach der Zerspanung abgebildet:

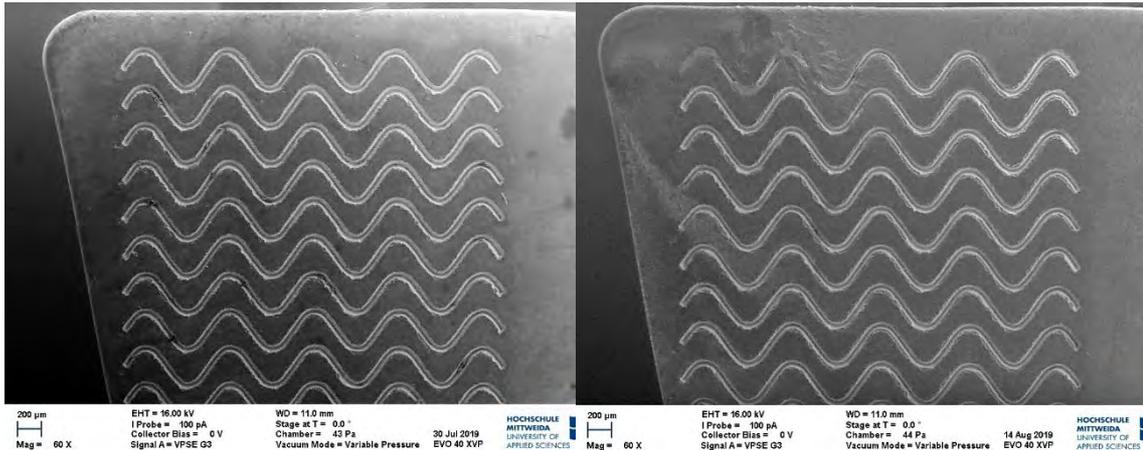


Abbildung 27: Wendeschneidplatte vor der Trockenbearbeitung

Abbildung 28: Wendeschneidplatte nach der Trockenbearbeitung

Wie man erkennen kann, hat sich nach der Bearbeitung die Wendeschneidplatte in einem fächerförmigen Bereich abgenutzt. Dieser Bereich fängt an der Schneidkante an und endet in der Mitte der Wendeschneidplatte. An dieser Stelle erkennt man, wie der Span vor dem Brechen verläuft. Außerdem sieht man, dass das obere Formelement durch Kaltverschweißung der Mikropartikel, welche während des Zerspanvorgangs entstehen, zu schmiedet. Aus diesem Grund ist ein einwandfreies Benutzen der Wendeschneidplatte nicht mehr gewährleistet. Schaut man sich die weiteren Strukturen an, erkennt man, dass dieses Phänomen bei allen Strukturen der Wendeschneidplatten auftritt. Man kann also davon ausgehen, dass die Strukturen nach einmaliger Verwendung nicht mehr verwendet werden können. Die Schnittzeit liegt hierbei bei einer Minute. Das bedeutet, dass das Zuschmieren der Strukturen schon bei einer sehr geringen Zeit auftritt und nicht unterdrückt werden kann. Da es nur das eine Formelement betrifft, kann man davon ausgehen, dass eine weitere Bearbeitung nicht weiter negativ beeinflusst wird, da nicht zu erwarten ist, dass die Strukturen in einem noch größeren Maße zu schmieren. Die Verschleißbetrachtung für die Nassbearbeitung ist in den folgenden Abbildungen dargestellt:



Abbildung 29: Wendeschneidplatte vor der Nassbearbeitung

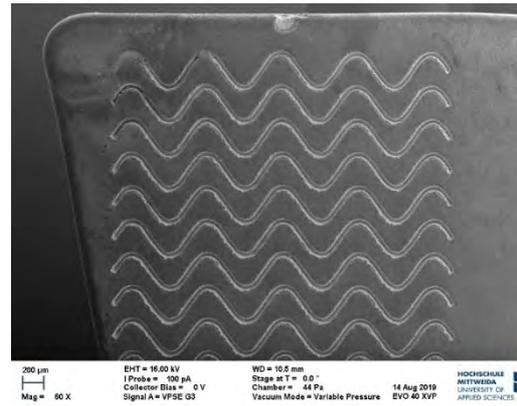


Abbildung 30: Wendeschneidplatte nach der Nassbearbeitung

Wie man hierbei erkennen kann ist der Bereich, über den der Span abrollt, viel geringer. Die abgenutzte Fläche ordnet sich in einem Viertelkreis um den Eckenradius der Schneide an. Auch bei der Nassbearbeitung ist ein Zuschmieren der Formelemente zu beobachten. Dieses geschieht jedoch in einem viel kleineren Bereich, als bei der Trockenbearbeitung. Durch die Benutzung von Kühlschmierstoff gleitet der Span besser über die Wendeschneidplatte. Auch die vermutliche Ausbildung eines hydrostatischen Polsters, indem der Kühlschmierstoff sich unter dem Span verteilt, sorgen für ein besseres Abrollen und verbessern die Gleiteigenschaften. Dies ist auch an der geringeren Leistung bei der Nassbearbeitung im Gegensatz zur Trockenbearbeitung zu erkennen. Bei einer Schnittzeit von einer Minute ist auch hier kein starker Verschleiß erkennbar. Alles in allem kann man davon ausgehen, dass sowohl bei der Trockenbearbeitung wie auch bei der Nassbearbeitung die Schnittzeit von einer Minute keinen großen Verschleiß mit sich zieht. Die Wendeschneidplatten können somit noch eine längere Zeit über benutzt werden.

5.3 Zwischenfazit und Zusammenfassung zur Entwicklung und Herstellung von Mikrostrukturen durch Laserbearbeitungsverfahren auf diskreten Werkzeugen. Untersuchung dieser neuen Werkzeuggeometrien im Hinblick auf die Ressourceneffizienz

Alles in allem konnte durch die Versuche nachgewiesen werden, welche Änderung eines bestimmten Parameters einen positiven Einfluss auf die Minimierung der Gesamtwirkleistung der Maschine hat. Dadurch konnten auch Wechselwirkungen zwischen den Parametern und deren Einfluss nachgewiesen werden. Schaut man sich die erhaltenen Werte genauer an, so

erkennt man das allein durch die Mikrostrukturen ein großes Einsparpotential vorhanden ist.

Jede Wendeschneidplatte wurde jedoch nur einmal auf ihre Gesamtwirkleistung untersucht. Um aussagekräftige Werte zu erhalten, müssten an dieser Stelle Langzeituntersuchungen durchgeführt werden. Mittels dieser Untersuchungen kann man die bereits getroffenen Annahmen untermauern und beweisen. Dabei kann man die Langzeituntersuchungen noch in zwei verschiedene Arten unterteilen. Zum einen könnte man die Versuche weiterführen, indem man diese mit den gleichen Strukturen immer wieder wiederholt. Aus den gewonnenen Ergebnissen kann der Mittelwert berechnet werden, um die Fehler- und Ausreißerrate zu minimieren. Weiterhin kann man Versuche durchführen, bei denen die Struktur gleichbleibt und die Schnittzeit variabel ist. Dadurch kann überprüft werden, wie sich die Gesamtwirkleistung in Abhängigkeit der Schnittzeit verändert. Außerdem können der Verschleiß der Wendeschneidplatte und der Mikrostrukturen besser bewertet werden. Eine mögliche Standzeit ist dadurch abschätzbar.

Innerhalb der Untersuchungen wurde die Gesamtwirkleistung der Trockenbearbeitung mit der der Nassbearbeitung verglichen. Dabei wurde die Leistung der Kühlschmierstoffpumpe aus den Betrachtungen heraus gerechnet. Schaut man sich die Gesamtwirkleistung der Maschine während der Nassbearbeitung mit der Kühlschmierstoffpumpe an, so stellt man fest, dass die Trockenbearbeitung sehr viel effizienter in Bezug auf die Leistung ist. Hierbei müsste ebenfalls ein Vergleich hinsichtlich des Verschleißes vorgenommen werden. Auf der einen Seite könnte die Leistung durch die Trockenbearbeitung eingespart werden, auf der anderen Seite kann es vorkommen, dass die Standzeit der Wendeschneidplatte dadurch erheblich gesenkt wird. Dabei muss abgeschätzt werden, welche Herangehensweise eine höhere Ressourceneffizienz mit sich bringt. Natürlich spielen hierbei noch andere Faktoren eine Rolle. Innerhalb der spanenden Fertigung müssen bestimmte Randbedingungen, wie zum Beispiel die Oberflächengüte eingehalten werden. Somit wäre zu prüfen, in wie weit die Oberflächengüte während der Trocken- oder Nassbearbeitung durch die Strukturen beeinflusst wird.

Während den Betrachtungen wurde nur die Leistung betrachtet, welche durch die Strukturen versucht wird einzusparen. Auf der anderen Seite müsste noch die Leistung berücksichtigt werden, welche aufgebracht wurde, um die Strukturen mittels Ultrakurzpulslaser überhaupt herstellen zu können. Dieser letzte Punkt soll lediglich eine Anregung für zukünftige Arbeiten in Bezug auf die Mikrostrukturierung innerhalb der spanenden Bearbeitung sein.

Alles in allem wurden in dieser Arbeit der konkrete Weg zur Herstellung der Mikrostrukturen bis hin zu deren Einsatz näher erläutert. Während den Versuchen konnte festgestellt werden, dass die Mikrostrukturen auf den Wendeschneidplatten sowohl einen positiven wie auch negativen Einfluss auf die Minimierung der Gesamtwirkleistung einer Drehmaschine haben können. Der Verschleiß der Platten bleibt dabei sehr überschaubar. Auf der einen Seite schmieren die Strukturen mit zunehmender Schnittzeit zu. Auf der anderen Seite sind keine großartigen Verschleißspuren auf den Wendeschneidplatten zu erkennen. Abschließend wurden im letzten Kapitel dieser Arbeit einzelne Punkte aufgezeigt, welche belegen, dass die Arbeit mit Mikrostrukturen in der drehenden Bearbeitung in Bezug auf die Ressourceneffizienz noch ein breites Feld an weiteren Untersuchungen liefert.

6

Untersuchungen zur energieeffizienten spanenden Bearbeitung prismatischer Teile am Beispiel des Frä- sens

6.1 Einleitung

Der stetige Fortschritt in der Fertigungstechnik hat zur Folge, dass die Berücksichtigung der fertigungsbedingten Einflüsse auf das Schwingungsverhalten nicht mehr nur von Oberflächenfaktoren, wie Rauheitswerten (meist R_z) oder Zugfestigkeiten bewertet werden sollte. Speziell die höher werdenden Fertigungsgenauigkeiten, größere Verschleißbeständigkeiten sowie die verschiedenen Beschichtungssysteme und Geometrien der Zerspanungswerkzeuge sind dabei Größen, welche zu einer intensiven Beeinflussung der Bauteilrandschicht beitragen. Hervorzuheben sind hierbei ebenfalls sehr hohe Schnittgeschwindigkeiten (High Speed Cutting (HSC)) und maximale Vorschübe, welche vor allem auf Grund ökonomischer Restriktionen heutzutage bei der industriellen Fertigung von dynamisch beanspruchten Bauteilen zum Einsatz kommen.

Leider ist festzustellen, dass einschlägige Literaturstellen nur sehr wenige Ergebnisse liefern, welche sich auf den Einfluss des Fertigungsverfahrens und der damit verbundenen Bearbeitungsparameter als Funktion der sich einstellenden Randschicht und somit des Bauteilverhaltens unter dynamischen Beanspruchungen auseinandersetzen [31].

Aus den aufgeführten Gründen, setzt sich dieses Forschungsprojekt mit dem Zusammenhang der Bearbeitungsparameter des Fräsprozesses und den sich einstellenden Eigenspannungen in der Bauteilrandschicht auseinander. Ziel ist es hierbei eindeutige Tendenzen zwischen dem Fräsprozess und den Spannungszuständen in der Oberflächengrenzschicht zu erkennen, um daraus eine Grundlage für fortführende Untersuchungen zu schaffen sowie Handlungsempfehlungen für die spanende Bearbeitung von dynamisch beanspruchten Bauteilen abzuleiten.

Um den dadurch gewonnenen Ergebnissen eine direkte praktische Relevanz zu verleihen, werden die experimentellen Untersuchungen an Werkstoffen durchgeführt, welche unter dynamischen Beanspruchungen im Motoren- und Turbinenbau zum Einsatz kommen.

6.2 Grundlagen

6.2.1 Charakterisierung der Oberflächengrenzschicht

Zur Veranschaulichung der Bauteilrandzone bzw. der Oberflächenbereiche, welche in diesem Forschungsprojekt im Mittelpunkt des Interesses stehen, dient die nachfolgende Abbildung 22. Diese stellt den prinzipiellen Aufbau der Grenzschicht eines Stahlwerkstoffes dar.

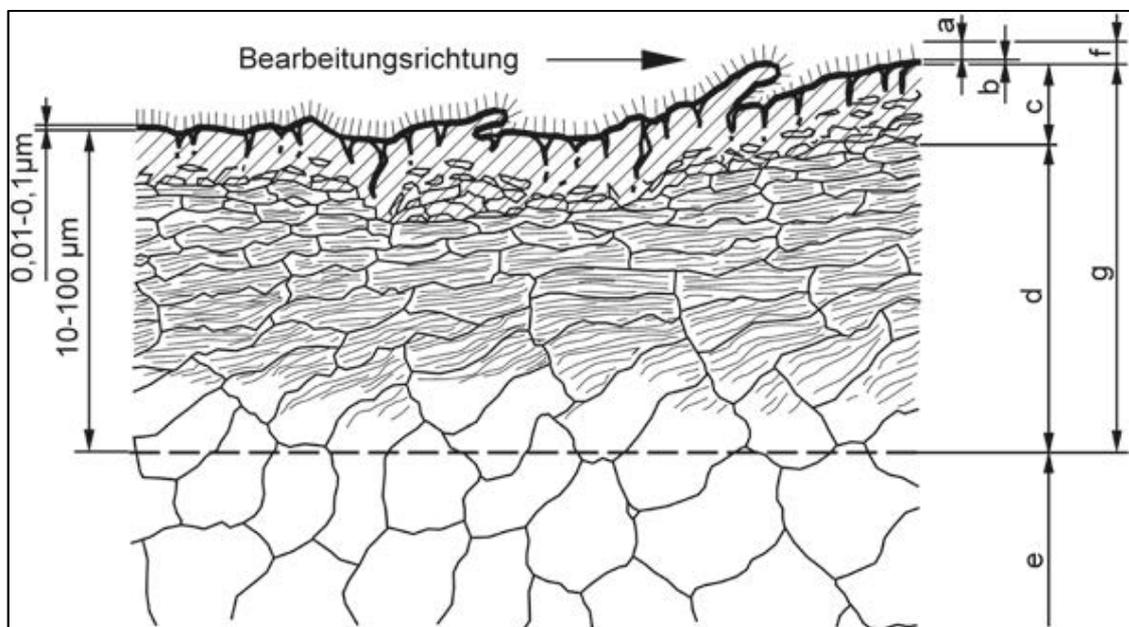


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Bauteilrandschicht nach [1]

Von innen nach außen kann im Allgemeinen zwischen dem Grundwerkstoff im ungestörten Metallgefüge (e), der inneren (g) sowie der äußeren Grenzschicht (f) unterschieden werden. Die innere Grenzschicht (g) ist dabei der Bereich, welcher für diese Forschungsthematik im Mittelpunkt des Interesses steht. Diese Zone wird stark vom Fertigungsverfahren sowie den dabei definierten Bearbeitungsparametern beeinflusst und in die Übergangszone (c) und das verformte Gefüge (d) unterteilt. Die innere Grenzschicht (g) weist dabei im Vergleich zum Grundgefüge (e), infolge der Verformungen durch den Bearbeitungsprozess, ein verändertes Gefüge, Eigenspannungen, Verfestigungen sowie eventuelle Texturinhomogenitäten auf. Aufgrund der Wechselwirkung des Werkstoffs mit dem Umgebungsmedium sowie eventuel-

len Schmierstoffen, besitzt die äußere Grenzschicht (f) meist eine vom Grundwerkstoff abweichende Zusammensetzung und kann aus Verunreinigungen, Fetten und Ölen (a), einer Oxidschicht sowie Absorptions- und Reaktionsschicht (b) bestehen [32, 33].

6.2.2 Probenwerkstoff

Aufgrund der eingangs genannten Tatsache, dass der Schwerpunkt des Forschungsprojekts auf die Analyse der Oberflächengrenzschicht von Bauteilen gerichtet ist, welche unter dynamischen Bedingungen zu Einsatz kommen, erfolgen Untersuchungen an dem in der nachfolgenden Tabelle 3 dargestellten unlegiertem Vergütungsstählen C45. Dieser findet vor allem bei schwingungsbeanspruchten Teilen im Motoren- und Schienenfahrzeugbau Anwendung und erfüllt somit das definierte Anforderungsprofil [34, 36].

Tabelle 3: Werkstoffkennwerte Vergütungsstahl C45 für d = 16 - 40 mm nach [34, 35]

Werkstoffbezeichnung	Chem. Zusammensetzung (Schmelzanalyse) in %	Streckgrenze Re in N/mm ²	Zugfestigkeit Rm in N/mm ²	Zustand
C45	0,42 - 0,50 C 0,17 - 0,37 Si 0,50 - 0,80 Mn < 0,040 P < 0,040 S	650	700 ... 800	+QT

6.2.3 Zustand der Probe

Bei der Herstellung der Proben ist darauf zu achten, dass diese vor dem zu bewertenden Fräsprozess einer Wärmebehandlung zu unterziehen sind, um den vergüteten Zustand zu erreichen. Als Referenzprobe dient dabei ein Exemplar, welches nach der Vergütung keine spanende Bearbeitung erfährt. Diese repräsentiert einen zusätzlichen Vergleich zu den zerspannten Bauteilen. Die sich anschließende Tabelle 4 beinhaltet die genaue Abfolge der Wärmebehandlungsschritte zum Vergüten der Proben.

Tabelle 4: Vorgehen beim Vergüten der Proben

Arbeitsschritte	Vergüten	
Härten	Temperatur T in °C	830
	Zeit t in min	30
	Schutzgas	Stickstoff (N ₂)
Abschrecken	Medium	Wasser
Anlassen	Temperatur T in °C	600
	Zeit t in min	60
Abkühlen	Medium	Luft

6.2.4 Probengeometrie

Bei der Probengeometrie für die Versuchsreihen V1 sowie V2 handelt es sich um eine einfache prismatische Probe mit den Abmessungen ($l \times b \times h$ in mm) $120 \times 40 \times 20$. Dabei werden die messtechnischen Untersuchungen an der Bauteiloberseite der Probe (gekennzeichnet in der nachfolgenden Abbildung 23) durchgeführt.

Die nachfolgende Abbildung 23 zeigt die grundlegende Bauteilgeometrie mit den Abmessungen ($l \times b \times h$ in mm) $120 \times 40 \times 20$ sowie der gekennzeichneten Oberfläche, auf welcher sowohl der Fräsprozess als auch die messtechnischen Untersuchungen stattfinden.

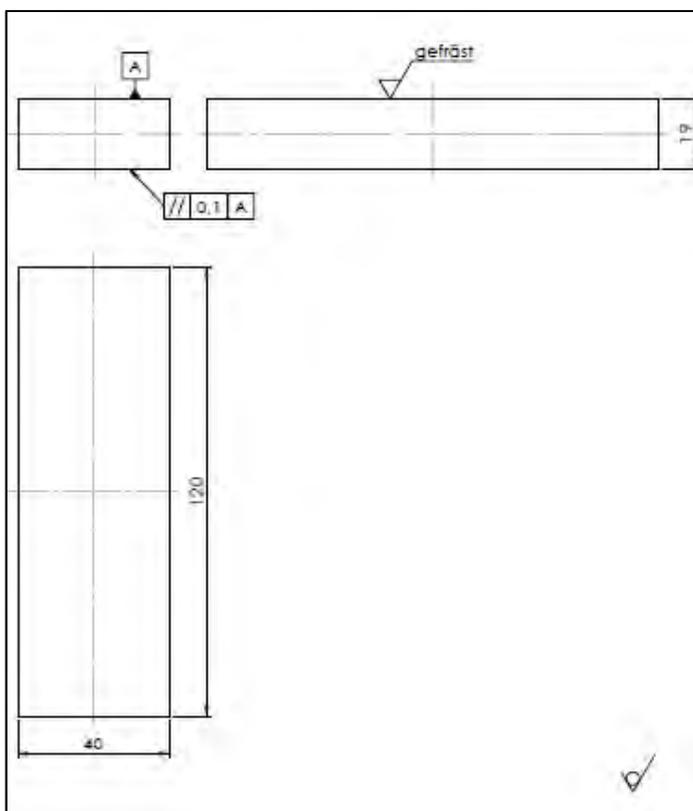


Abbildung 23: Probengeometrie

6.2.5 Abfolge der durchzuführenden Analyseverfahren

1. Eigenspannungsmessung: Die Messung der Eigenspannungen in der Oberflächengrenzschicht erfolgt mittels des Verfahrens der Bohrlochmethode. Dabei wird unter Zuhilfenahme eines Hartmetallfräsers (WC) schrittweise eine Bohrung in die zu analysierende Oberfläche der Probe gebohrt und die dabei entstehenden Dehnungen mittels einer Dehnmessrosette aufgenommen. Die in der Rosette befindlichen DMS sind um die zu fertigende Bohrung in den Winkeln von 0° , 45° und 90° zueinander versetzt angeordnet. Die nachfolgende Tabelle 5 listet die definierten Parameter der Eigenspannungsmessung auf. Es ist zu beachten, dass

hierbei zwei unterschiedliche Schrittweiten beim Bohrprozess zum Einsatz kommen. Da speziell der oberflächennahe Bereich bis 0,2 mm von großem Interesse ist, wird hierbei mit der kleinstmöglichen Schrittweite von 0,02 mm gebohrt und gemessen. Die Eigenspannungsmessung der oberflächenfernen Bereiche von 0,2 mm bis 0,6 mm erfolgt dann mit der erhöhten Schrittweite von 0,1 mm.

Tabelle 5: Definierte Werte der Eigenspannungsmessung

Parameter	Wert
Messvorrichtung	RS-200 Milling Guide (Vishay GmbH)
Bohrerdurchmesser D in mm	1,6
Schrittweite s in mm	bis t = 0,2mm: 0,02; von t = 0,2 mm bis 0,6 mm: 0,1
Bohrtiefe t in mm	0,6
Anzahl der Messungen pro Probe	mind. 1 (im Zweifelsfall 2 Messungen)

Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt den Versuchsaufbau des beschriebenen Analyseverfahrens. Dieser besteht aus den in Abbildung gekennzeichneten Bauteilen: 1. Turbine, 2. Messbrücke, 3. Verbindungskabel, 4. Probe, 5. HM-Bohrer, 6. Vorrichtungslatte/Messplatte, 7. Skala zur Einstellung der Bohrtiefe, 8. Niederhalter.



Abbildung 24: Versuchsaufbau der Eigenspannungsmessungen

2. Mikrohärteprüfung: Zur Bestimmung der Härtewerte im Mikrobereich findet das Härteprüfverfahren nach Vickers Anwendung. Hierfür wird der Gesamtprobe ein Teilstück aus der unmittelbaren Region der Eigenspannungsmessung entnommen, an welchem die Analyse stattfindet. Der Messvorgang erfolgt durch das Setzen von Härteeindrücken mittels eines Eindringkörpers in Form einer Diamantpyramide mit quadratischer Grundfläche und einem

Winkel von $\alpha = 136^\circ$ in die präparierte Fläche des Teilstücks. Im Anschluss werden die Diagonalen des jeweiligen Eindrucks, welcher nach der Rücknahme der Prüfkraft auf der Prüffläche entsteht, gemessen und anhand mathematischer Beziehungen der Härtewert der jeweiligen Phase errechnet. Dieses Prüfverfahren kommt jedoch nur an ausgewählten Proben zu Einsatz. Ausschlaggebend ist hierfür der Spannungszustand in den Randzonen der Proben. Weißen diese stark ambivalente Spannungsverläufe auf (z. B. starke Zugspannungen in Probe A und starke Druckspannungen in Probe B), werden Mikrohärteprüfungen, zur Erweiterung der wissenschaftlichen Aussagekraft, angeschlossen. In der nachfolgenden Tabelle 6 sind alle relevanten Parameter zur Mikrohärteprüfung zusammenfassend dargestellt. Die Abbildung 25 zeigt das Vorgehen bei der Mikrohärteprüfung in schematischer Form. Dieses Vorgehen richtet dich dabei nach der entsprechenden Normung für die Härteprüfung DIN EN ISO 6507 [37, 38].

Tabelle 6: Definierte Werte der Mikrohärteprüfung nach Vickers

Parameter	Wert
Härteprüfmaschine	HMV 2000 (Shimadzu GmbH)
Prüfkraft F in N	0,09807 (HV 001)
Abstand a in μm	25
Abstand b in μm	30
Abstand c in μm	10
Messtiefe t in mm	0,2
Anzahl der Messungen pro Probe	mind. 1 (im Zweifelsfall 2 Messungen)

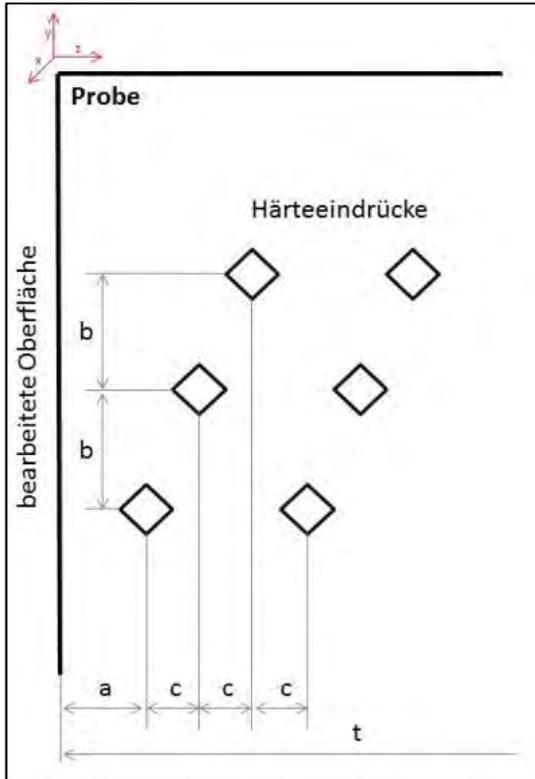


Abbildung 25: Schematische Darstellung zum Vorgehen der Mikrohärtprüfung

In der Abbildung 26 wird der Versuchsaufbau der Mikrohärtprüfung veranschaulicht. Dieser besteht aus den in der Abbildung beschrifteten Teilen: 1. Prüfkopf mit Vickers-Pyramide, 2. Probenhalter auf Probentisch, 3. Mikroskop zur Ausrichtung der Probe, 4. Probe, 5. Gegenhalter.

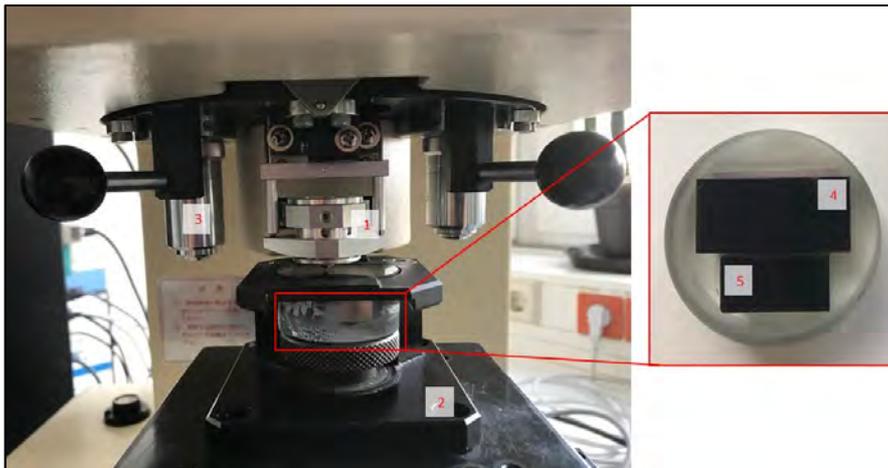


Abbildung 26: Versuchsaufbau der Mikrohärtprüfung

6.3 Versuchsplanung

6.3.1 Variable Einflussgrößen

Die variablen Einflussgrößen umfassen alle Parameter, deren Einwirkung auf die Zielgrößen mit den Analyseverfahren bewertet werden. Einschlägige Literaturstellen haben dabei gezeigt, dass eine Vielzahl an Faktoren, aus fertigungstechnischer Sicht, den Spannungszustand in der Bauteilrandzone beeinflussen [39, 40, 41, 42]. Aufgrund des begrenzten Umfangs des Forschungsprojekts, kann hierbei jedoch nur auf einen konzentrierten Teil dieser Parameter genauer eingegangen werden. Dabei handelt es sich sowohl um fertigungstechnische Parameter als auch geometrische Größen des Fräswerkzeugs. Die folgenden Tabelle 7 bis Tabelle 9 fassen die zu untersuchenden Einflussfaktoren sowie deren definierte Werte zusammen für die jeweilige Versuchsreihe zusammen.

Versuchsreihe V1: Diese bildet mit einem Probenumfang von 32 Proben zuzüglich einer Referenzprobe die größte Versuchsreihe und dient der Erkennung von Tendenzen zwischen den jeweiligen Einflussgrößen und den sich einstellenden Spannungszuständen.

Tabelle 7: Variable Einflussgrößen der Versuchsreihe V1

Einflussgröße	Wert	
Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min	160	220
Vorschub pro Zahn f_z in mm	0,3	0,5
Kühlung	KSS	trocken
Frässtrategie	Gleichlaufräsen	Gegenlaufräsen
Einstellwinkel K_r in °	45 (Fasbreite 0,5 mm)	28 (Radius 0,5 mm)

Versuchsreihe V2: In dieser Versuchsreihe erfolgt eine weitere Änderung der Schnittparameter. Auf der Basis der Untersuchungen V1 werden hierbei einzelne Proben mit erhöhten oder reduzierten Schnittwerten erneut gefertigt sowie die Spannungszustände gemessen. Ziel ist es dabei die aus V1 aufgestellten Tendenzen zu untermauern.

Der Probenumfang beträgt hierbei sechs Proben, bei welchen sich jeweils zur vorhergehenden Probe ein Parameter ändert. Hierbei wurde die Schnittgeschwindigkeit v_c um 25% und der Vorschub pro Zahn f_z um 5% gesteigert bzw. reduziert.

Tabelle 8: Einflussgrößen der Versuchsreihe V2

Probe	Parameterkombination
1FF	$V_c = 275 \text{ m/min}$; $f_z = 0,525 \text{ mm}$; ohne KSS; Gegenlaufräsen; $K_r = 28^\circ$
1EE	$V_c = 275 \text{ m/min}$; $f_z = 0,525 \text{ mm}$; ohne KSS; Gegenlaufräsen; $K_r = 45^\circ$
1CC	$V_c = 275 \text{ m/min}$; $f_z = 0,525 \text{ mm}$; ohne KSS; Gleichlaufräsen; $K_r = 45^\circ$
1Y	$V_c = 275 \text{ m/min}$; $f_z = 0,525 \text{ mm}$; mit KSS; Gleichlaufräsen; $K_r = 45^\circ$
1Q	$V_c = 275 \text{ m/min}$; $f_z = 0,285 \text{ mm}$; mit KSS; Gleichlaufräsen; $K_r = 45^\circ$
1A	$V_c = 120 \text{ m/min}$; $f_z = 0,285 \text{ mm}$; mit KSS; Gleichlaufräsen; $K_r = 45^\circ$

6.3.2 konstante Einflussgrößen

Bei den konstanten Parametern handelt es sich um die Größen, welche neben den variablen Einflussgrößen ebenfalls den Spannungszustand in der Oberflächengrenzschicht beeinflussen können, jedoch für die folgenden Untersuchungen nicht im Mittelpunkt des Interesses stehen. Diesen Parametern werden demzufolge für die gesamte Versuchsreihe die in der Tabelle 7 aufgeführten Werte zugeordnet.

Tabelle 9: konstante Einflussgrößen aller Versuchsreihen

Parameter	Wert
Werkzeugdurchmesser DWZ in mm	52
Zähnezahl z	4
Teilung	Gleich geteilt
Schneidstoff	HC, PVD-TiAlN beschichtet (LCPK10M)
Spanwinkel γ_0 in $^\circ$	-7
Neigungswinkel λ_s in $^\circ$	20
Schnitttiefe a_p in mm	1
Arbeitseingriff a_e in mm	20
Topografie der Wendeschneidplatten	

6.4 Auswertung der experimentellen Untersuchungen

6.4.1 Versuchsreihe V1

Nach der Auswertung dieser Versuchsreihe V1 lassen sich bereits einige Korrelationen der einzelnen Einflussparameter auf den Spannungszustand in der Oberflächengrenzschicht erkennen. Dabei wurden die Eigenspannungsverläufe der Proben untereinander sowie mit der

Referenzprobe verglichen. In der nachfolgenden Aufzählung wird auf die jeweiligen Einflussgrößen und deren Auswirkungen eingegangen.

- **Schnittgeschwindigkeit v_c :** Bei der Untersuchung der Schnittgeschwindigkeit zeichnet sich keine klare Tendenz zum Spannungszustand der Bauteilrandzone ab. Es lässt sich mit steigender Schnittgeschwindigkeit eine leichte Verschiebung der Spannungswerte in Richtung des Zugbereiches bzw. zu höheren Spannungswerten erahnen, jedoch kann diese These nicht eindeutig belegt werden.
- **Vorschub pro Zahn f_z :** Der Einfluss des Vorschubs verhält sich identisch zum Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Eigenspannungen in der Oberflächengrenzschicht. Aus den Auswertungen der Messwerte lässt sich zwar mit steigendem Vorschub ein leichter Trend zu höheren Eigenspannungen erahnen, jedoch zeichnet sich auch hierbei keine klare Tendenz ab.
- **Kühlung:** Beim Einfluss der Kühlung kann eine erste Aussage getroffen werden. Aufgrund der hohen thermischen Belastungen bei der Trockenbearbeitung, stellen sich dabei im Vergleich zum Einsatz von KSS vorwiegend höhere Spannungswerte ein. Diese These deckt sich ebenfalls mit den Rechercheergebnissen aus der Literatur, welche besagen, dass eine hohe thermische Belastung zu thermisch induzierten Spannungen im Bauteil führen, welche sich in der Bauteilrandzone als Zugspannungen ausbilden.
- **Frässtrategie:** Der Vergleich des Gegen- zu Gleichlaufräsen zeigt wiederum keine klar zu belegende Tendenz der Eigenspannungswerte. Somit kann davon ausgegangen werden, dass dieser Parameter keine eindeutige Beeinflussung der Spannungszustände hervorruft und in der Bewertung dieser vernachlässigt werden kann.
- **Einstellwinkel K_r :** Hierbei zeichnet sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Größe des Einstellwinkels und den sich einstellenden Eigenspannungen ab. In fast allen Gegenüberstellungen der Spannungsverläufe der einzelnen Proben zeigte sich, dass beim Einsatz des größeren Einstellwinkels ($K_r = 45^\circ$) der Spannungsverlauf im oberflächennahen Bereich höhere Spannungswerte annimmt bzw. in Richtung des Zugspannungsbereiches tendiert.

Aus den gewonnenen Ergebnissen der aufgeführten Einzelparameter werden im Folgenden ausgewählte Kombinationen dieser miteinander verglichen, wodurch die Aussagekraft der jeweiligen Einflüsse erweitert wird. Dabei erfolgte der Vergleich an Proben, deren Fertigungsparameter bis auf die kombinierten Werte identisch sind.

- **Schnittgeschwindigkeit v_c und Vorschub pro Zahn f_z :** Hierbei erfolgt der Vergleich zwischen den Proben, welche mit einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 160$ m/min und einem Vorschub pro Zahn $f_z = 0,3$ mm und den Proben, welche mit der Schnittgeschwindigkeit $v_c = 220$ m/min und dem Vorschub pro Zahn $f_z = 0,5$ mm. Wie auch schon im Falle der Einzelparameter zeichnet sich ebenfalls in der Kombination keine Tendenz bzw. kein klarer Zusammenhang dieser Parameter zum sich einstellenden Spannungszustand ab. Exemplarisch hierzu dienen die nachfolgenden Abbildung 27 bis Abbildung 29 der Veranschaulichung der hier getroffenen Aussage. Dabei ist zu erkennen, dass der Tiefenverlauf der Kombination der geringen Schnittwerte (blauer Kurvenverlauf) im oberen Diagramm unterhalb des Tiefenverlaufs der hohen Schnittparameter (roter Kurvenverlauf) liegt. Im mittleren Diagramm erfolgt eine Verschiebung der Tiefenverläufe auf ein annähernd gleiches Niveau, wohingegen im unteren Diagramm eine konträre Verschiebung der Tiefenverläufe im Vergleich zum linken Diagramm zu erkennen ist. Die angegebenen Grenzen basieren dabei auf den Auswertungen der Referenzprobe und spiegeln den Bereich wieder, in welchem die Eigenspannungen der unbearbeiteten Probe im vergüteten Zustand verlaufen.

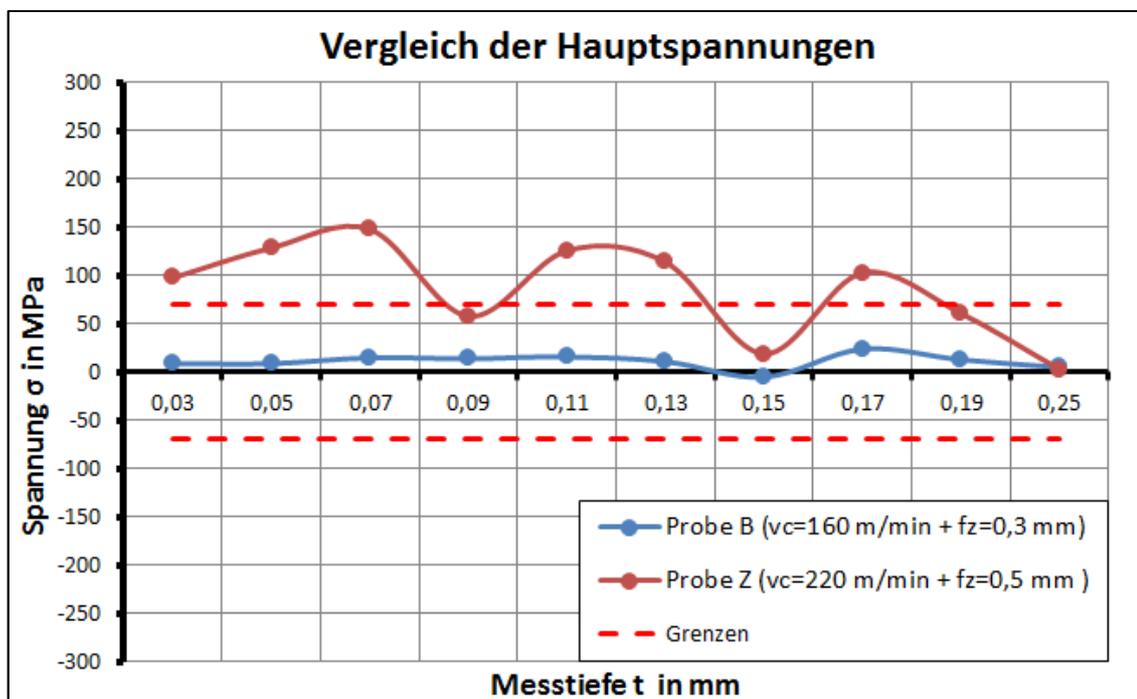


Abbildung 27: Eigenspannungsverläufe im Kombinationsvergleich v_c und f_z Proben B und Z

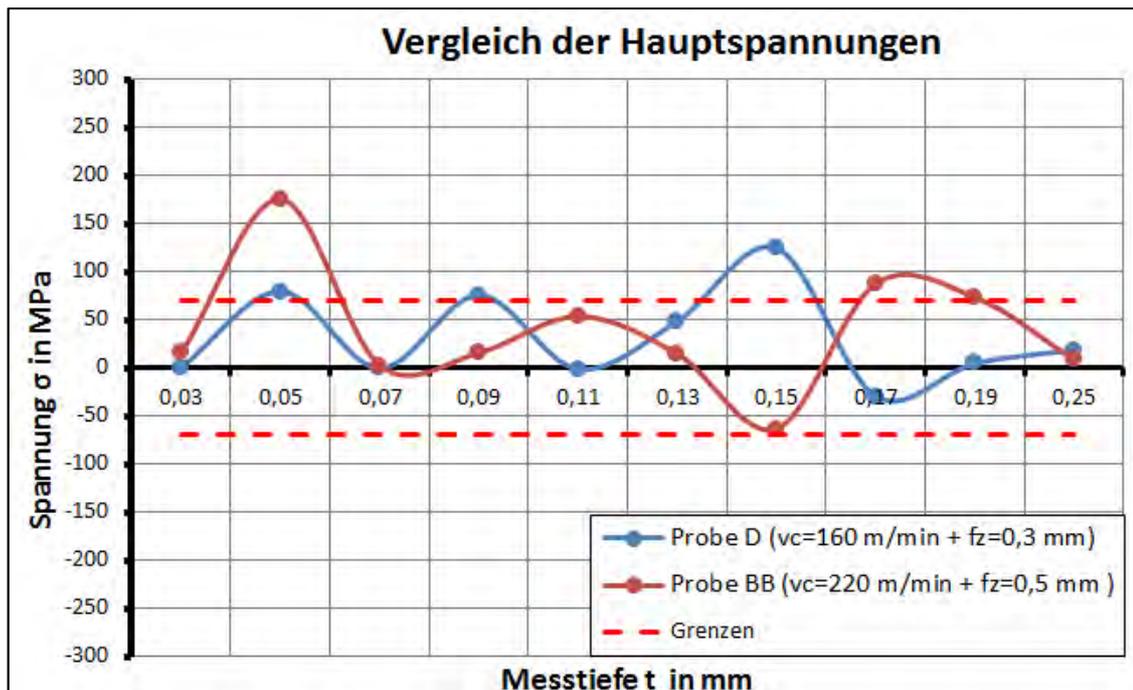


Abbildung 28: Eigenspannungsverläufe im Kombinationsvergleich v_c und f_z Proben D und BB

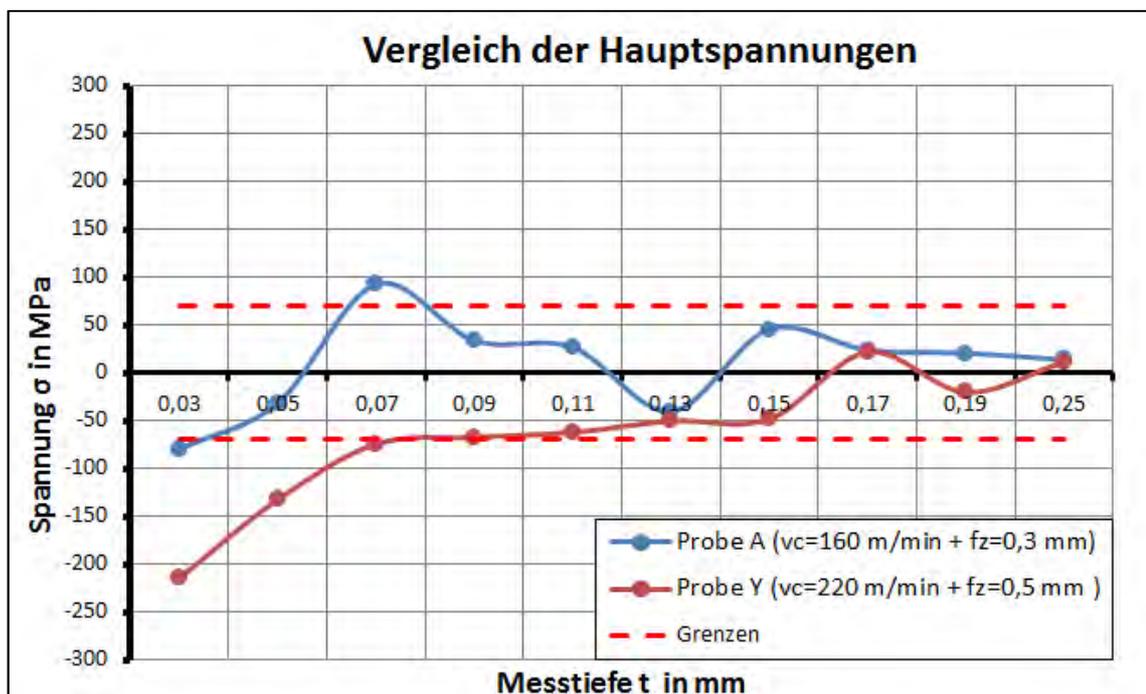


Abbildung 29: Eigenspannungsverläufe im Kombinationsvergleich v_c und f_z Proben A und Y

- Kombination Kühlschmierstoff und Einstellwinkel K_r :** Die Vergleiche dieser Kombination erfolgten analog der vorangestellten Auswertungen aus Schnittgeschwindigkeit und Vorschub pro Zahn. Dabei wurden die Proben, welche unter der Einwirkung von KSS sowie mit dem Einstellwinkel $K_r = 45^\circ$ gefertigt wurden, mit den Proben der Trockenbearbeitung bei einem Werkzeugeinstellwinkel von $K_r = 28^\circ$ miteinander verglichen. Die

aufgestellten Thesen aus der Auswertung der Einzelparameter kann hierbei untermauert werden. Wie in der nachfolgenden Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 32 ersichtlich, tendieren die Eigenspannungsverläufe der Kombination aus KSS und $K_r = 45^\circ$ (blaue Kurven) in allen drei Diagrammen zu niedrigeren Spannungswerten als die Verläufe der Vergleichsproben (rote Kurven). Speziell im oberflächennahen Bereich der ersten drei Messpunkte ist diese Niveaushiftung bei allen verglichenen Proben zu erkennen.

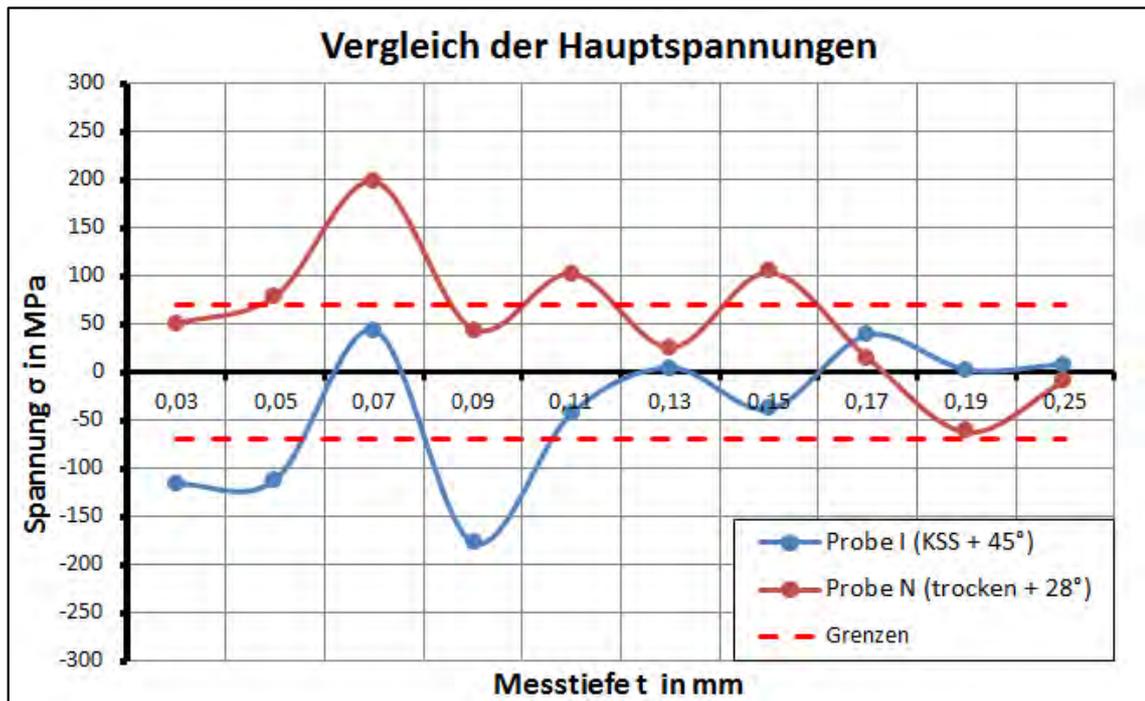


Abbildung 30: Eigenspannungsverläufe im Kombinationsvergleich Kühlung & K_r Proben I und N

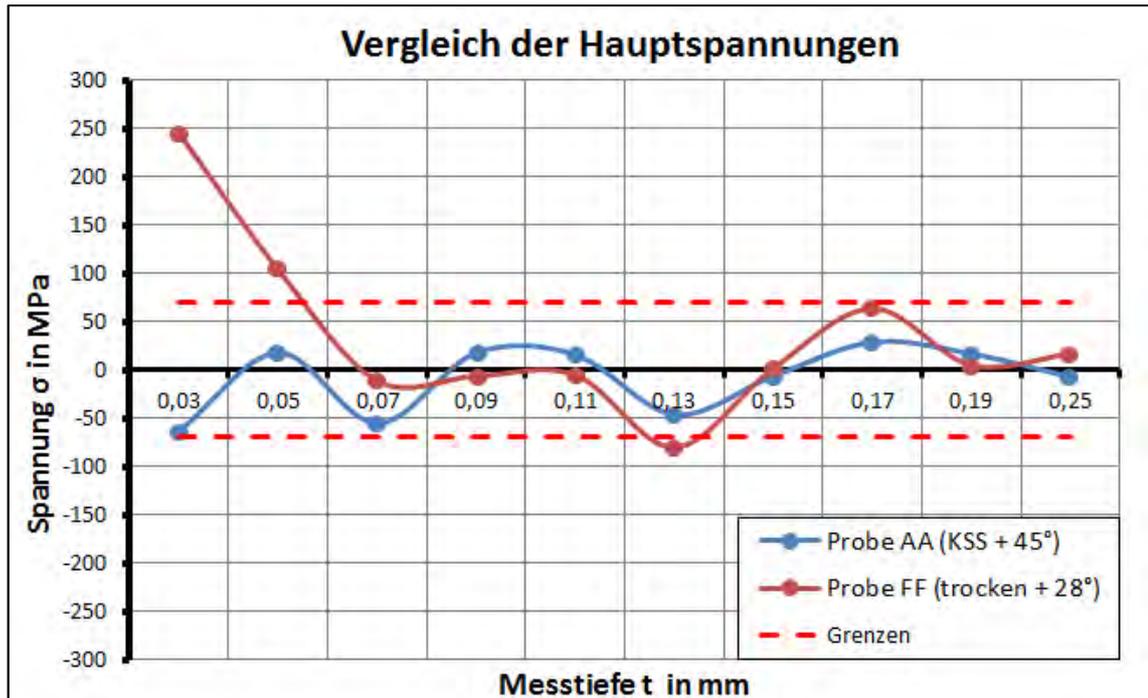


Abbildung 31: Eigenspannungsverläufe Kombinationsvergleich Kühlung & K_r Proben AA und FF

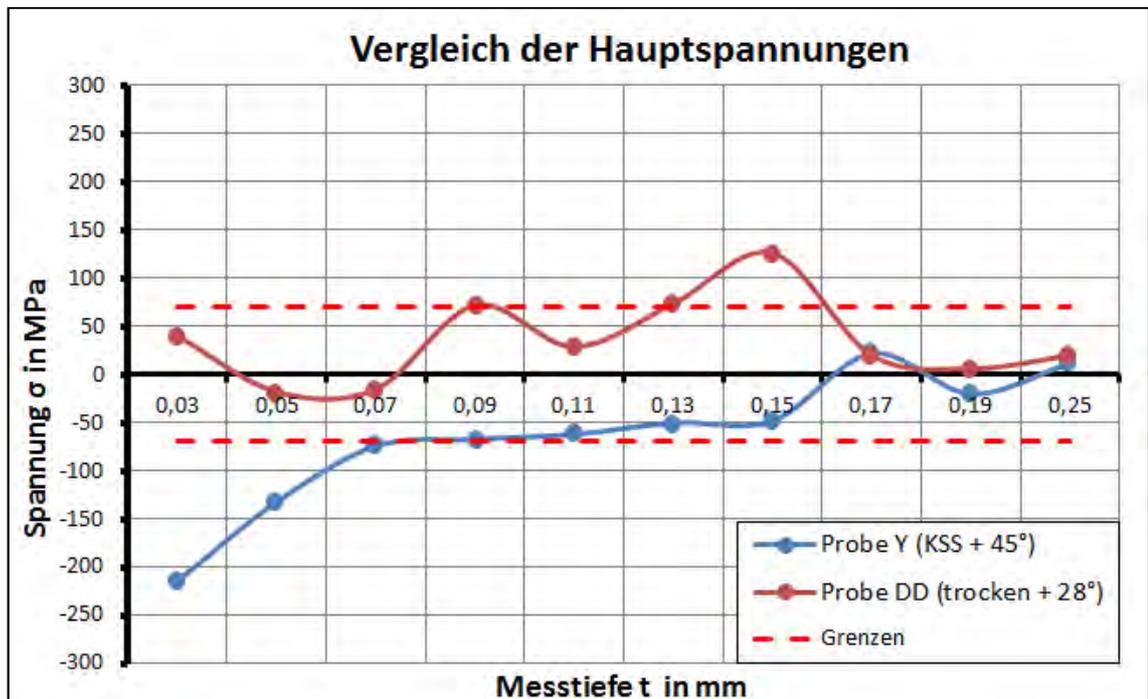


Abbildung 32: Eigenspannungsverläufe Kombinationsvergleich Kühlung & K_r Proben Y und DD

Trotz der teilweise eindeutigen Ergebnisse speziell beim Einfluss der Kühlung sowie des Einstellwinkels wurden alle Parameter in der nachfolgenden Versuchsreihe V2 erneut untersucht. Hierbei lag der Fokus darauf, weitere Ergebnisse der Parameter zu sammeln, welche keine klaren Tendenzen aufweisen, um deren Einfluss eindeutiger zu beurteilen.

6.4.2 Versuchsreihe V2

Die aus der Versuchsreihe V2 gewonnenen Ergebnisse untermauern die Erkenntnisse aus den Untersuchungen V1. Dabei zeigt sich, dass selbst eine Erhöhung bzw. Reduzierung der Schnittwerte v_c sowie f_z keinen signifikanten Veränderungen des Spannungszustands hervorrufen oder konträr zu den getroffenen Annahmen aus der Versuchsreihe V1 verlaufen (Abbildung 36 und Abbildung 37). Hinzukommend lässt sich auch in diesen Untersuchungen keine signifikante Unterscheidung der sich einstellenden Spannungszustände zwischen den gleich- und gegenlauf gefrästen Proben feststellen (Abbildung 34). Dem gegenüber stehen die Parameter der Kühlung sowie des Einstellwinkels K_r , welche auch in dieser Versuchsdurchführung erneut den bereits genannten Trend aus V1 aufweisen (Abbildung 33 und Abbildung 35). Hierbei stellt ebenfalls eine Verschiebung der Tiefenverläufe, speziell im oberflächennahen Bereich, zu niedrigeren Spannungswerten beim Einsatz von KSS sowie beim Verwenden des Wendeschneidplatten mit einem Einstellwinkel von $K_r = 45^\circ$ ein.

Die nachfolgenden Diagramme in der Abbildung 8 zeigen die ausgewerteten Tiefenverläufe aus den Untersuchungen V2. Dabei ist der zu vergleichende bzw. zu bewertende Faktor, welcher jeweils in den Legenden der Diagramme angegeben ist, der einzige Parameter, in welcher sich die Fertigung der jeweiligen Proben unterscheidet.

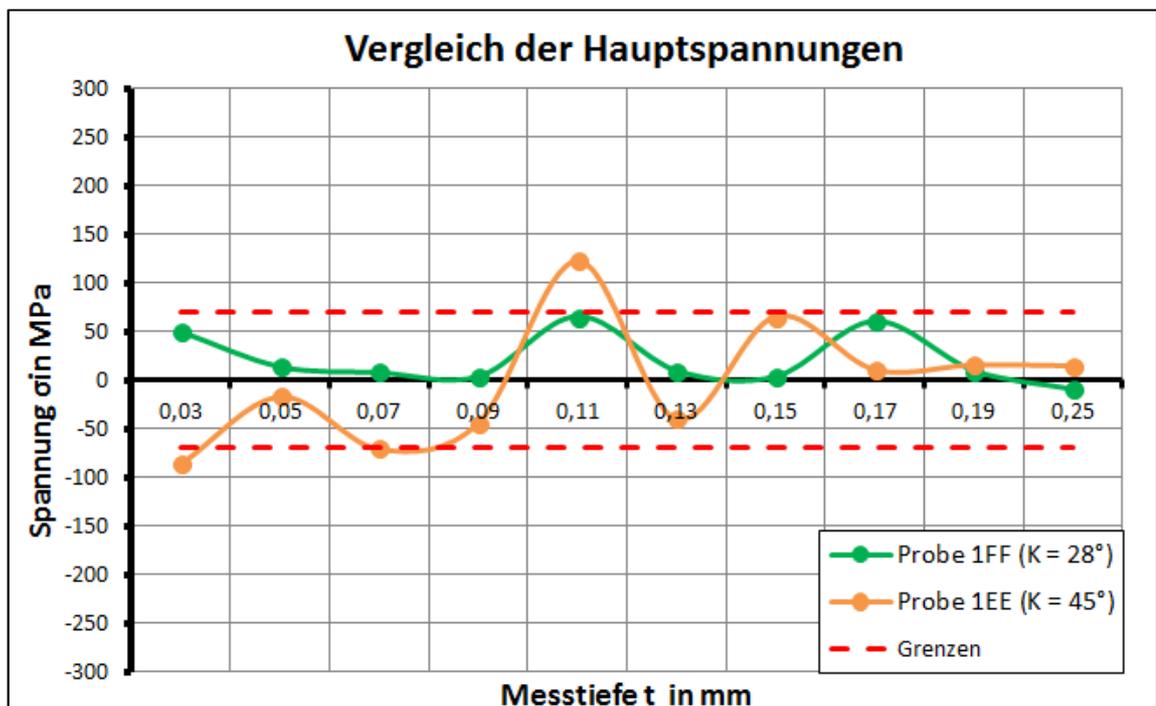


Abbildung 33: Ausgewerteten Tiefenverläufe Probe 1FF und 1EE

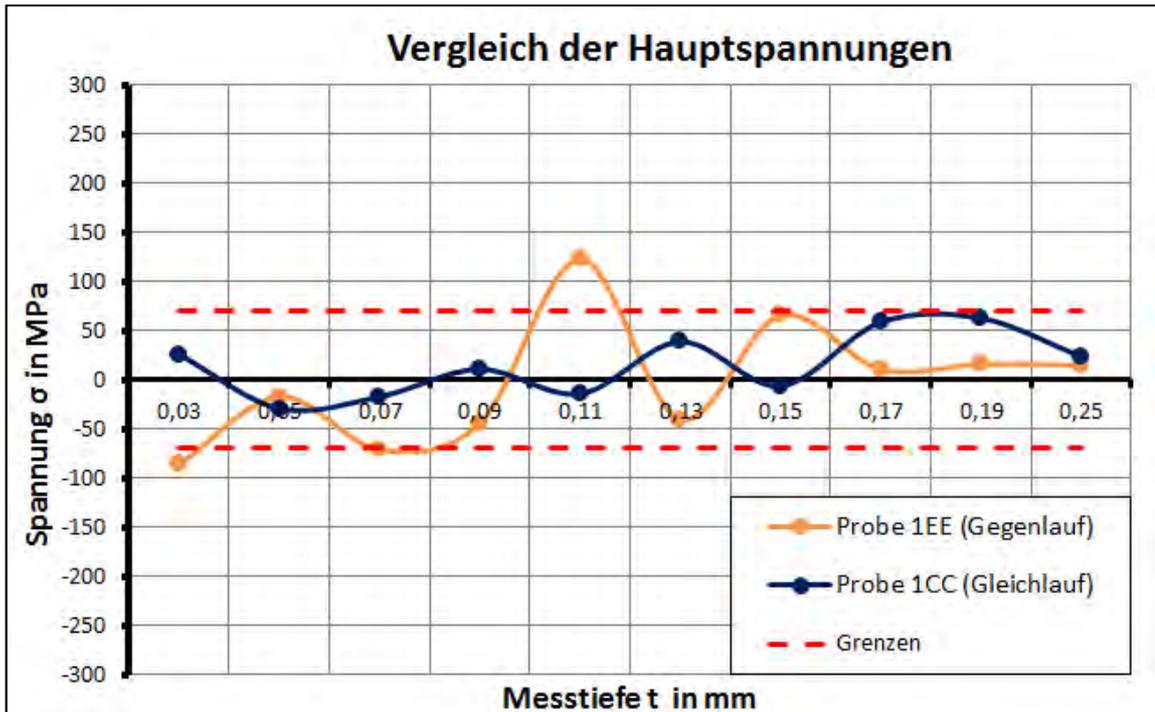


Abbildung 34: Ausgewerteten Tiefenverläufe Probe 1EE und 1CC

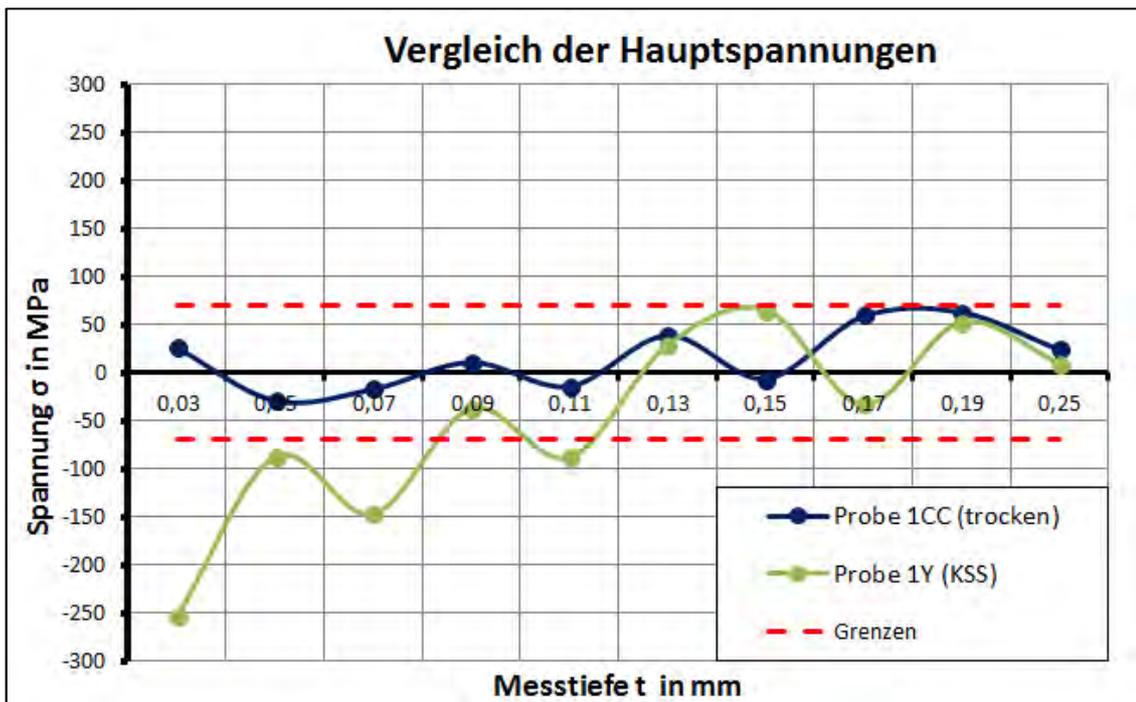


Abbildung 35: Ausgewerteten Tiefenverläufe Probe 1CC und 1Y

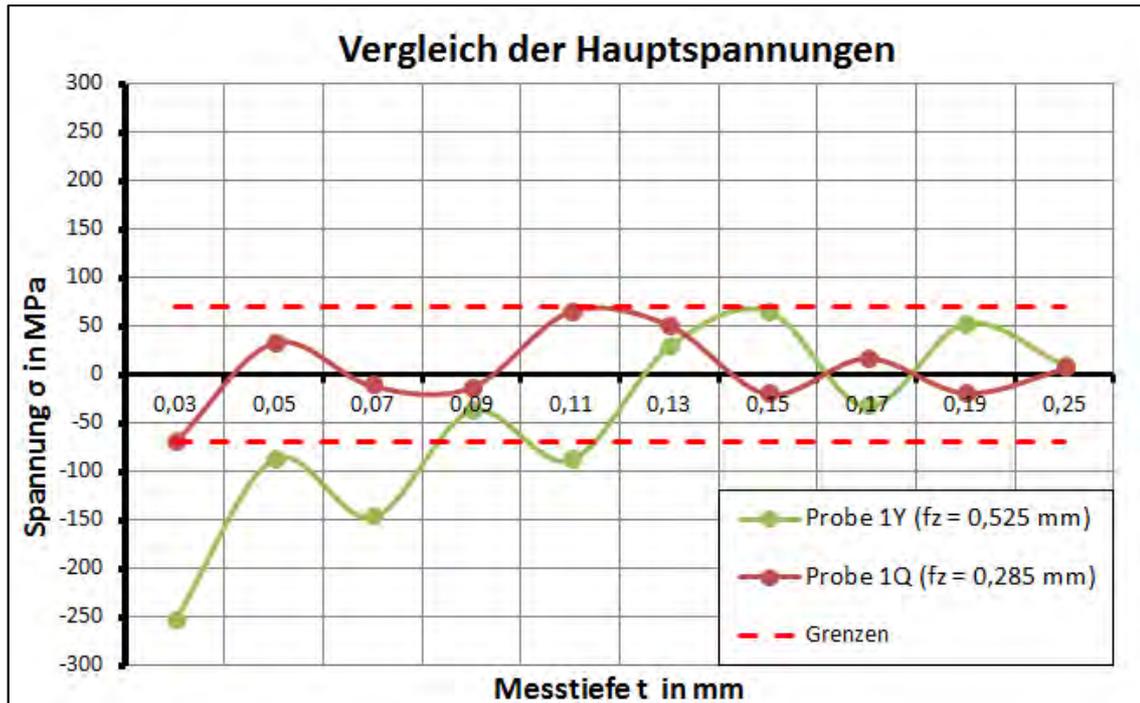


Abbildung 36: Ausgewerteten Tiefenverläufe Probe 1Y und 1Q

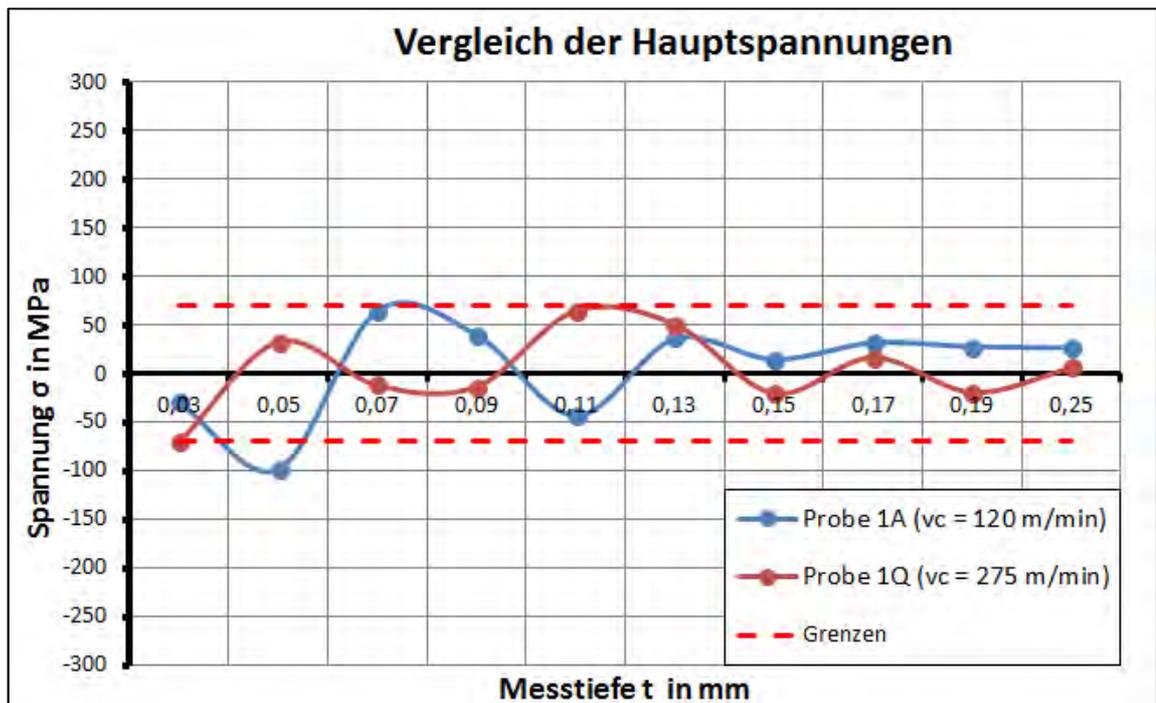


Abbildung 37: Ausgewerteten Tiefenverläufe Probe 1A und 1Q

6.4.3 Mikrohärteprüfung

Die Mikrohärteprüfung wurde ausschließlich an den Proben durchgeführt, deren Eigenspannungszustände stark voneinander abweichen, um die Auswirkung dieser Extremzustände auf die Härte des Werkstoffs im Randbereich bewerten zu können. Diese Prüfung fand an den Proben statt, welche bereits unter der Versuchsreihe V1 (Abbildung 30 bis Abbildung 32)

und unter V2 in der Abbildung 35 hinsichtlich ihrer Eigenspannungsverläufe ausgewertet wurden. Hinzukommend erfolgte die Mikrohärtprüfung ebenfalls an der Referenzprobe GG, um den Vergleich der Härtewerte zum Ausgangsgefüge (Vergütungsgefüge) ziehen zu können.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Fräsbearbeitung eine geringe Erhöhung der Mikrohärtigkeit im Randbereich bis zu einer Tiefe von $t = 0,15$ mm hervorruft. Durchschnittlich beträgt der Zuwachs der Mikrohärtewerte über die genannte Messtiefe ca. 14%. Dabei ist ebenfalls zu erkennen, dass alle gemessenen Proben ähnliche sowie annähernd konstante Tiefenverläufe der Mikrohärtigkeit aufweisen und somit kein Zusammenhang zu den ausgewerteten Spannungsverläufen besteht. Hinzukommend wird aus den Auswertungen ersichtlich, dass sich die Härtewerte der einzelnen Proben nach dem Überschreiten der Tiefe von $t = 0,15$ mm bis zur maximalen Messtiefe von $t = 0,2$ mm zu den Härtewerten der Referenzprobe angleichen. In diesem Bereich ist keine Erhöhung sowie Reduzierung der Mikrohärtigkeit zur Vergleichsprobe erkennbar. Die Abbildung 38 und Abbildung 39 veranschaulichen jeweils die beschriebenen Erkenntnisse. Dabei handelt es sich um die ausgewerteten Tiefenverläufe der Proben Y und DD der Versuchsreihe V1 sowie die Proben 1Y sowie 1CC aus der Versuchsreihe V2. Dabei wird aus der Versuchsreihe V1 (Abbildung 30 bis Abbildung 32) und Abbildung 35 ersichtlich, dass die Eigenspannungsverläufe der jeweiligen Proben stark voneinander abweichen. Diese Niveauverschiebung ist in den Verläufen der Mikrohärtewerte nicht zu erkennen.

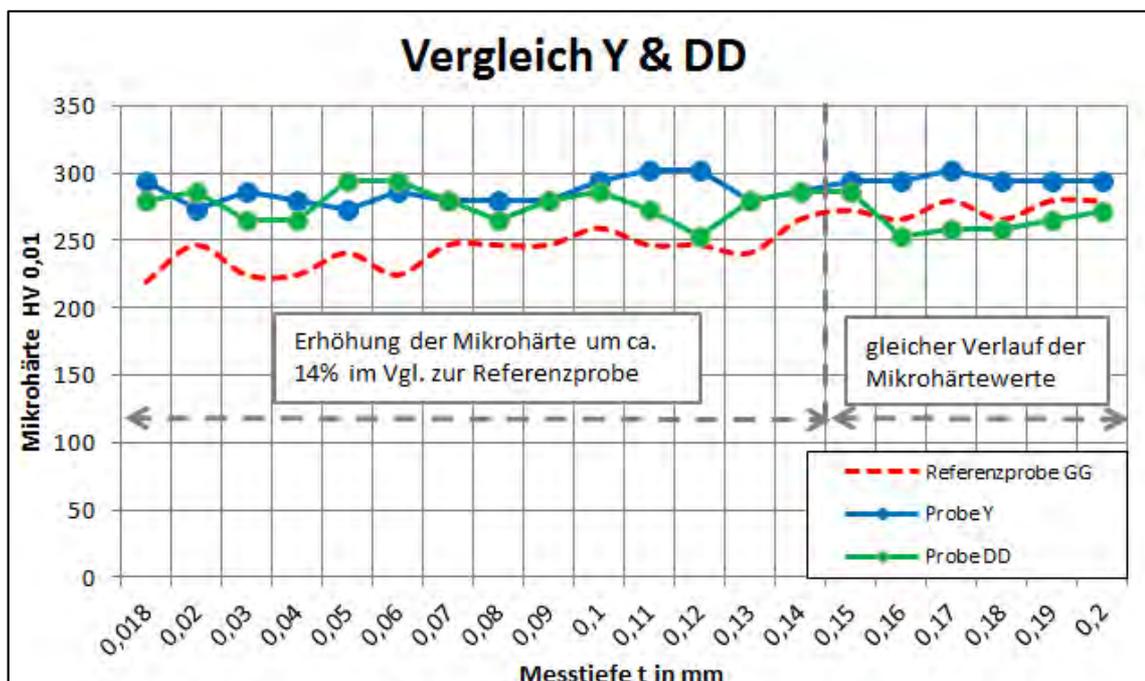


Abbildung 38: Darstellung der Mikrohärteverläufe Proben Y und DD

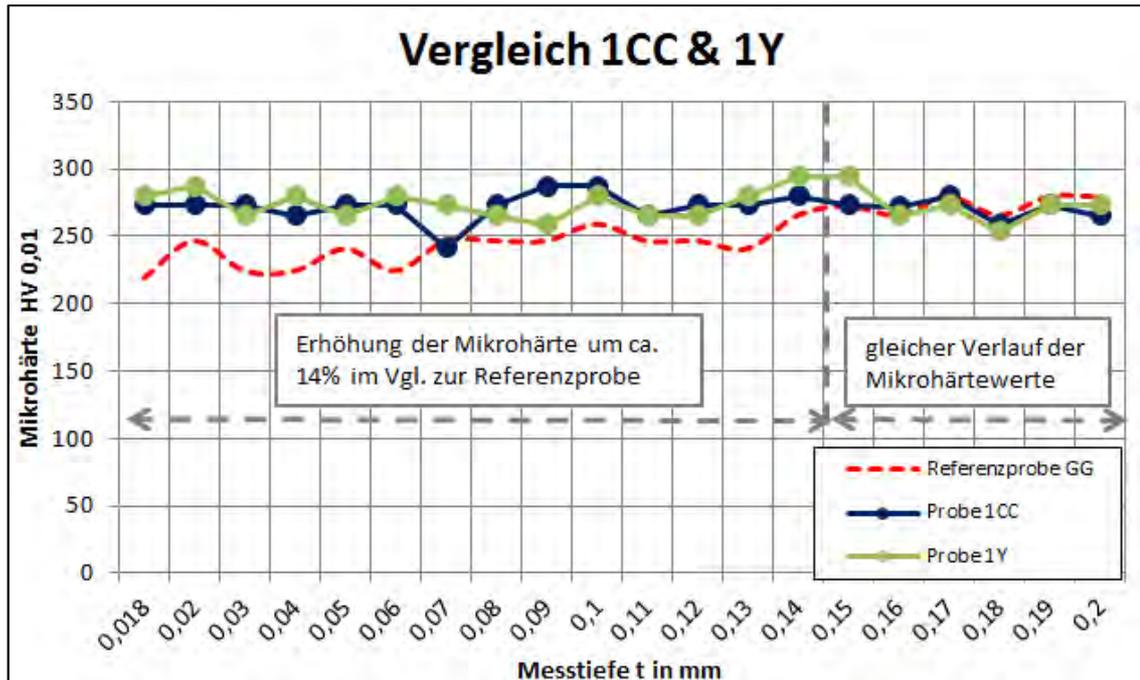


Abbildung 39: Darstellung der Mikrohärteverläufe Proben CC und Y

6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Aus den durchgeführten Untersuchungen konnten erste Erkenntnisse bezüglich der Zusammenhänge zwischen der Bearbeitung des Stirnfräsens und den sich einstellenden Eigenspannungszuständen in der Oberflächengrenzschicht des unlegierten Vergütungsstahls C45 gewonnen werden.

Hierbei ist zu erwähnen, dass der Fräsprozess generell in das Spannungssystem des Werkstoffs eingreift und diese Beeinflussung mit dem verwendeten Eigenspannungsmessverfahren hinlänglich gemessen werden kann. Hinzukommend wird aus den Versuchsdurchführungen ersichtlich, dass sich aus der Veränderung der Schnittwerte der Schnittgeschwindigkeit v_c sowie des Vorschubs f_z , sowohl die Erhöhung als auch Reduzierung, keine eindeutigen Tendenzen erkennen lassen. Anders verhält es sich beim Einsatz von KSS bzw. der Trockenbearbeitung sowie bei der Variation des Einstellwinkels der Wendeschneidplatten. Hierbei zeigt sich, dass wohl der Einsatz von Kühlschmierstoff als auch die Verwendung des größeren Einstellwinkels von $K_r = 45^\circ$ eine deutliche Verschiebung der Spannungswerte in den Druckbereich nach sich ziehen. Die Kombination aus der Nassbearbeitung und dem Einsatz des Einstellwinkels $K_r = 45^\circ$ vergleichend zur Trockenbearbeitung mit einem Einstellwinkel $K_r = 28^\circ$, bei sonst gleichen Schnittparametern, verstärkt diesen Effekt enorm. Diesen Erkenntnissen gegenüber konnte keine eindeutige Schnittparameterkombination lokalisiert werden,

welche reproduzierbar zu einer signifikanten Verschiebung der Spannungswerte in den Zugbereich geführt hat.

Die Abschließende Mikrohärteprüfung gab Aufschluss über die Zusammenhänge der Eigenspannungszustände und den Härteverläufen im oberflächennahen Bereich bis zu einer Tiefe von $t = 0,2$ mm an Proben mit stark abweichenden Spannungszuständen. Dabei zeigt sich anhand der Ergebnisse, dass die sich einstellenden ambivalenten Spannungszustände keinen signifikanten Unterschied in den Mikrohärteverläufen der Proben untereinander hervorrufen. Jedoch ist hierbei zu erkennen, dass der Fräsprozess generell das Niveau der Mikrohärtewerte im Vergleich zur unbearbeiteten Referenzprobe bis zu einer Messtiefe von $t = 0,15$ mm um ca. 14% anhebt. Nach dem Überschreiten dieser Messtiefe gleichen sich die Mikrohärtewerte der Proben sowie der Referenzprobe bis zum Erreichen der maximalen Messtiefe von $t = 0,2$ mm an.

6.6 Ausblick

Im Folgenden soll der Ausblick für mögliche sich anschließende Untersuchungen in diesem Forschungsprojekt gegeben werden, welche auf der Grundlage der in diesem Abschlussbericht beschriebenen Erkenntnisse durchgeführt werden können. Diese beziehen sich auf folgende Punkte:

- Untersuchung weiterer Faktoren/Parameter auf deren Einfluss auf die Spannungszustände in der Oberflächengrenzschicht, wie z. B. die Bauteildicke
- Durchführung von Standzeitversuchen zur Bewertung der Auswirkung des Werkzeugverschleißes auf den Spannungszustand im Bereich vom arbeitsscharfen Zustand bis hin zur maximalen Verschleißmarkenbreite
- Durchführung von umfassenden Schwingungsuntersuchungen zur Bewertung der Dauerfestigkeit ausgewählte Spannungszustände
- Adaption dieses Vorgehens auf die umfassenden Untersuchungen neuartiger Aluminiumwerkstoffe aus dem Bereich der Elektromobilität zur Erweiterung des wissenschaftlichen Hintergrunds hinsichtlich ökonomischer Gesichtspunkte

7

Weiterentwicklung, Untersuchung und Charakterisierung von gesundheitsverträglichen, ressourceneffizienten Alternativen zu Cr(VI)-erzeugten Hartchromschichten

7.1 Ausgangspunkt

Die Summe B aller einfließenden Ressourcen soll das Minimum zum Nutzen N der Beschichtung ergeben.

$$B/N \rightarrow \text{Min} \quad (7-1)$$

Daraus resultierend, ist die Summe aller einfließenden Ressourcen zu ermitteln. Mathematisch lässt sich das durch Gleichung (7-2) darstellen.

$$B = \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\eta_{bi}} - \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{\eta_{ri}} \quad (7-2)$$

Mit dem Formelzeichen B als Summe der benötigten Ressourcen, b_i als der zum jeweiligen Prozessschritt i gehörige Ressourcenbedarf und r_i , die durch Nutzung von Rückgewinnungsprozessen in anderen Prozessschritten nutzbaren Ressourcen. Die zu beachtenden Wirkungsgrade η ermöglichen es, theoretisch ermittelte Prozessbeschreibungen mit realen Messwerten zu verknüpfen. Dabei ist für den jeweiligen experimentell bestimmten Bedarf, der Wert eins anzusetzen. Für theoretische Bedarfsermittlungen, ist der Faktor durch experimentelle Überprüfungen als Quotient aus Rechenwert und Messwert zu bestimmen. Ziel ist es, Berechnungsmodelle für die Einzelprozessschritte zu entwickeln deren Wirkungsgrad gegen eins geht.

Für eine mathematisch korrekte Summation ist es nötig, den Faktor Ressourcenbedarf auf eine Bilanzierungsgröße umzurechnen. Dafür eignet sich die in der Physik übliche Bilanzierungsgröße Energie. Wie das im Einzelnen zu bewerkstelligen ist, wird in den folgenden Abschnitten anhand der jeweiligen Ressourcen gezeigt.

Der Nutzen N der Beschichtung muss für den jeweiligen Anwendungsfall ermittelt werden. Als Mindestschichtdicke ist die Schichtdicke anzunehmen, die nötig ist, alle Anforderungen an die Funktionstüchtigkeit eines Bauteils zu erfüllen. So ist zum Beispiel meist die geforderte Mindestschichtdicke für Hartchromschichten das Resultat aus den Anforderung Korrosions- und Verschleißschutz. Diese Werte sind im Wesentlichen durch die Konstruktion vorgegeben und demnach bauteilspezifisch. Das Konzept befasst sich ausschließlich mit den fertigungsprozessspezifischen Betrachtungen. Dennoch ist es für eine Vergleichbarkeit notwendig, den jeweiligen Bedarf anteilig auf geeignete Größe zu normieren. Dafür ist die Masse der abgeschiedenen Schicht geeignet.

Das in dieser Modellierung angewendete Vorgehen bietet die Möglichkeit, je nach Komplexität der Betrachtung, in der Genauigkeit der Vorhersagen an jegliche Bedürfnisse angepasst zu werden. Dabei ist mit steigender Komplexität des Modelles eine Verringerung der Fehler verbunden. Weiterhin ist das Modell, je nach Komplexität als Werkzeug, zur Beurteilung von Optimierungsmaßnahmen geeignet.

7.2 Bedarf Modellierung

Der Beschichtungsprozess besteht aus i Teilprozessen, welche zu identifizieren sind. Im Allgemeinen Fall können Beschichtungsprozesse in Vorbehandlung, Beschichtung und Nachbehandlung untergliedert werden. Damit lässt sich der Bedarf von Beschichtungsprozessen allgemein nach der Formel (7-3) mit den Indizes B für Beschichtung, V für Vorbehandlung und N für Nachbehandlung beschreiben.

$$B = \frac{b_V}{\eta_{bV}} + \frac{b_B}{\eta_{bB}} + \frac{b_N}{\eta_{bN}} - \left(\frac{r_V}{\eta_V} + \frac{r_B}{\eta_B} + \frac{r_N}{\eta_N} \right) \quad (7-3)$$

Daraus können bereits mit dieser geringen Aufschlüssung und Komplexität erste Vergleiche der Effektivität von einzelnen Hauptprozessschritten zweier oder mehrerer Prozesse verglichen werden.

Eine weitere Untersuchung der drei Untergliederungspunkte ist abhängig vom jeweiligen Beschichtungsverfahren. Im Bereich der nasschemischen Beschichtung wird in diesem Konzept davon ausgegangen, dass Vorbehandlung und Nachbehandlung nur geringfügige prozessabhängige Unterschiede aufweisen. Auch die Vorbehandlung und Nachbehandlung kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen, z. B. Vorbehandlung: nasschemisch, mechanisch oder

auch mit Hilfe von Plasma. Diese Prozessschritte werden nicht weiter aufgegliedert. Die Modellierung des eigentlichen Beschichtungsprozesses wird am Beispiel von Hartverchromung und chemischer sowie galvanischer Vernickelung im Folgenden beschrieben.

7.2.1 Chemisch Nickel

Der Bedarf in diesem Prozess setzt sich aus dem im Elektrolyt befindlichen Chemikalien b_{BCj} , der nötigen Elektrolyttemperatur b_{BT} , der Badbewegung b_{BB} , der Wasseraufbereitung b_{BA} sowie Elektrolytpflege (Regeneration im Prozess) b_{BP} und dem Warentransport b_{BH} zusammen.

7.2.1.1 Chemikalienbedarf

Der Faktor b_{BC} wird an dieser Stelle über den Preis der Chemikalien ermittelt. Dieser sollte in einem funktionierenden Wirtschaftssystem alle möglichen Ressourcen (Arbeitskraft, Anlagenabschreibung, Rohstoffabbau, Rohstofftransport, Prozessenergien usw.), die bis zu diesem Zeitpunkt in das Produkt eingeflossen sind enthalten. Um eine Unterbewertung zu vermeiden, wird an dieser Stelle der aktuelle Strompreis in €/kWh empfohlen. In Gleichung (7-4) wird das für eine Chemikalie für 100 €/kg deren Bedarf bei 100 kg liegt und einem Strompreis (Privatkunde 2018) von 0,25 €/kWh dargestellt.

$$\frac{100 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 100 \text{ kg} \cdot 3600}{0,25 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 1000} = 144.000 \text{ J} \quad (7-4)$$

Das lässt sich auf die allgemeine Gleichung (7-5) zurückführen. Bei Flüssigkeiten ist das Vorgehen äquivalent mittels Volumenangaben in Liter.

$$\frac{\text{Chemikalienpreis in } \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot \text{Chemikalienbedarf in kg} \cdot 3600}{\text{Strompreis in } \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 1000} = b_{BC1} \text{ in J} \quad (7-5)$$

Wichtig bei der Bestimmung des Chemikalienverbrauchs ist, dass nicht nur die für die Beschichtung nötige Nachdosierungsmenge der Chemie (Nickelsulfat, Natriumphosphit) betrachtet wird, sondern auch der Anteil des Neuansatzes. Dieser kann nach Formel (7-6) ermittelt werden.

$$\frac{m(\text{Schicht})}{m_E(\text{Ni}^+) \cdot \text{Max}(\text{MTO})} \cdot \sum_{i=1}^l b_{BCi} + m(\text{Schicht}) \cdot (b_{BCN} + b_{BCH}) = b_{BC} \quad (7-6)$$

Die Masse $m(\text{Schicht})$ entspricht der abgeschiedenen Nickelschicht. Der Wert $m_E(\text{Ni}^+)$ ist die Masse der bei einem Neuansatz dem Elektrolyten zugegeben Nickelionen (z. B. $5 \frac{g}{l} \cdot \text{Behältervolumen}$). Das Maximum des für den Elektrolyt zu erwartenden Badalters (Metal Turn Over) fließt durch $\text{Max}(MTO)$ in die Gleichung ein und hat je nach Elektrolytzusammensetzung üblicherweise einen Wert zwischen 10 und 12.

Das Potenzial diesen Wert zu präzisieren, würde eine Modellierung des Prozesses der Chemikalienerzeugung inklusive Rohstoffabbau und Anlagenbetrachtung erfordern. Das ist ein Ansatz, das Modell zu erweitern.

7.2.1.2 Elektrolyttemperatur

Die Elektrolyttemperatur ist eine prozessabhängige Größe. Die zum Erreichen und Halten der Temperatur benötigte Energie lässt sich mit Hilfe des in Gleichung (7-7) dargestellten Ansatzes ermitteln.

$$Q(T, t) + \dot{Q}(T) \cdot t = P \cdot t \quad (7-7)$$

Die Wärmebilanz bestehend aus der im Elektrolyt durch die Temperatur enthaltenen thermischen Energie (Wärme) $Q(T, t)$ als Funktion der Temperatur und der Zeit (Aufheizprozess), dem über die Behälteroberfläche abgegebene Energie $\dot{Q}(T)$ als Funktion der Temperatur und der durch die Heizung zugeführten Energie $P \cdot t$.

Die Wärme Q kann durch Formel (7-8) auf die das für die Beschichtung nötige bzw. anlagenbedingte Elektrolytvolumen angepasst werden.

$$Q(T, t) = c \cdot V(l, br, h) \cdot \rho \cdot \Delta T(t) \quad (7-8)$$

Wobei c die Wärmekapazität des Elektrolyts (in erster Näherung Wasser mit $4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) ist. V ist das Elektrolytvolumen. Im Falle eines quaderförmigen Behälters beschrieben durch das Produkt aus Länge l , Breite br und Höhe h . Das Formelzeichen ρ steht für die Dichte des Elektrolyts (in erster Näherung unabhängig von der Temperatur für Wasser $1.000 \text{ kg}/\text{m}^3$). Hinter $\Delta T(t)$ verbirgt sich die zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt vorhandene Temperaturdifferenz der Elektrolyttemperatur zur Ausgangstemperatur T_0 (Umgebungstemperatur).

Der Wärmeverluststrom $\dot{Q}(T)$ lässt sich theoretisch vereinfacht über die Verkettung der folgenden Formeln (7-9) und (7-10) ermitteln.

$$\dot{Q}(T) = \left(\sum_{k=1}^m \frac{A_k}{k_k} + \alpha \cdot A_d \right) \cdot \Delta T = \tilde{k} \cdot \Delta T \quad (7-9)$$

$$k_k = \left(\frac{\lambda_{kw}}{d_{kw}} + \frac{\lambda_{kd}}{d_{kd}} \right) \quad (7-10)$$

In den Gleichungen ist A_k die Fläche der jeweiligen Behälterwand und A_d die Fläche der Behälteröffnung, falls kein Deckel vorhanden ist. Das Formelzeichen α steht für den Wärmeübergang (in erster Näherung Wasser zu bewegter Luft mit $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) der an der Grenzfläche des Elektrolyts zur Luft an der Behälteröffnung ohne Deckel entsteht. Die k_k Werte werden durch die Wärmewiderstandswerte λ der Behälterwandung und bestehenden Behälterdämmung sowie den dazugehörigen Wand- bzw. Dämmungsstärken ermittelt.

Durch Einsetzen von Formel (7-8) und (7-9) in (7-7) und Lösen der Differenzialgleichung ergibt sich die Formel (7-11) als Verlauf der Temperatur in Abhängigkeit der Aufheizzeit t .

$$T = T_0 + \frac{P}{\tilde{k}} \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{\tilde{k}}{V \cdot c \cdot \rho} t \right)} \right) \quad (7-11)$$

Die Umsetzung der Formeln in einem Programm ist beispielhaft in Abbildung 40 dargestellt. Die grau hinterlegten Felder sind mit Formeln versehen. Alle anderen Felder sind frei wählbare Parameter, um das Modell an die realen Begebenheiten (Bauform, Heizleistung usw.) anzupassen.

Weiterentwicklung, Untersuchung und Charakterisierung von gesundheitsverträglichen, ressourceneffizienten Alternativen zu Cr(VI)-erzeugten Hartchromschichten

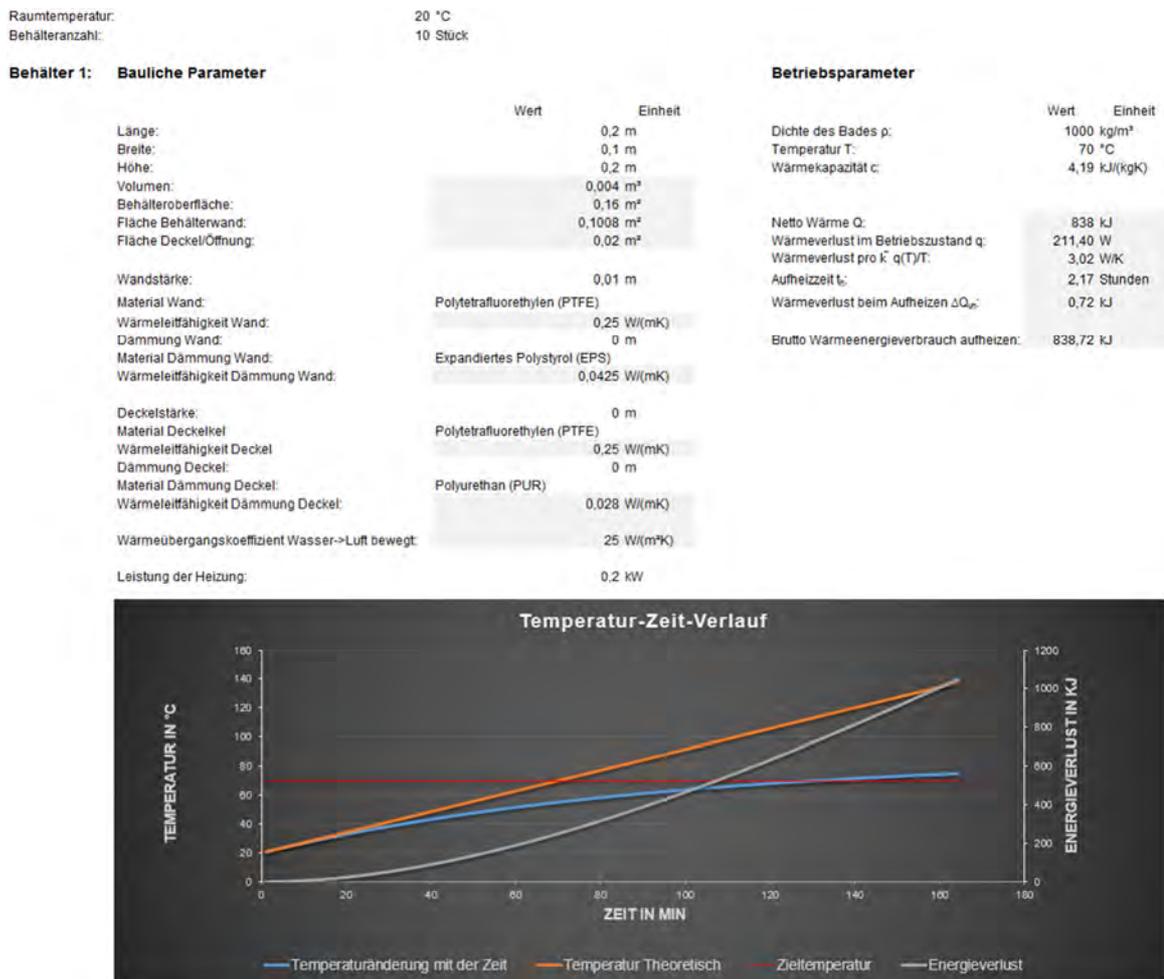


Abbildung 40: Programm zur Realisierung der Teilmodells "Elektrolyterwärmung"

Aufgrund der hier angewendeten Modelltiefe können bereits an diesem Teilmodell folgende Informationen ermittelt werden.

1. Reicht die installierte Heizleistung, um die Betriebstemperatur zu erreichen?
2. Welchen Einfluss hat eine Wärmedämmung des Behälters?
3. Wie wirkt sich die Installation eines Deckels für den Behälter aus?
4. Wann muss die Heizung eingeschaltet werden, um die Betriebstemperatur zu Schichtbeginn erreicht zu haben?
5. Welchen Effekt bringt die Erhöhung der Heizleistung?

Die in der Abbildung 40 dargestellten Kurvenverläufe und Einstellwerte entsprechen einem Versuchsaufbau der Hochschule Mittweida. Die mit der Simulation erzielten Werte müssen mit dem Faktor $\eta_{bBH} = 0,97$ korrigiert werden, um die Messwerte zu erreichen. Das liegt zu einem großen Teil in der für die Berechnung genutzten Heizleistung. Die Herstellerangabe von 200 W entspricht der Anschlussleistung. Gemessen wurde jedoch die Anschlussleistung.

Die für das Aufheizen benötigte Energie muss je nach Schichtbetrieb und Anlagenauslastung (Elektrolytabkühlung bei Produktionspausen) ebenfalls anteilig auf die abgeschiedenen Schichtmasse umgelegt werden. Der im Betriebszustand vorhandene statische Wärmestrom wird durch die Multiplikation mit der Taktzeit und Normierung auf die betrachtete Schichtmasse bilanzierbar.

Eine weitere Präzisierung dieses Teilmodells, ist die Betrachtung der vom Bauteilvolumen im Beschichtungsprozess aufgenommenen Wärme. Dafür kann Formel 8 mit dem Volumen $V(\text{Bauteil})$, der Wärmekapazität $c(\text{Substratwerkstoff})$, der Dichte $\rho(\text{Substratwerkstoff})$ und der Temperaturdifferenz ($\Delta T = T_{\text{Elektrolyt}} - T_{\text{Bauteil}}$) genutzt werden.

7.2.1.3 Die Wasseraufbereitung

Die Wasseraufbereitung besteht bei diesem Beschichtungsprozess aus zwei verschiedenen Prozessen. Erstens wird DI-Wasser für einen Neuanatz des Elektrolyten sowie für den Ausgleich von Verdunstungsverlusten und Spülprozesse nötig. Dies wird über Ionentauscher oder Umkehrosmose aus Trinkwasser gewonnen. Der zweite Prozess besteht in der Aufarbeitung des „verbrauchten“ Elektrolyten, sprich der Abwasserbehandlung. Der häufige Neuanatz liegt darin begründet, dass durch die permanente Nachdosierung der Verbrauchsmikalien die Baddichte im Elektrolyten ansteigt. Der Dichteanstieg beeinflusst die Abscheidereaktion negativ und dadurch wird die Standzeit des Elektrolyten, im Vergleich zum Hartchromelektrolyten, stark reduziert. Anschließend muss der Elektrolyt entweder extern entsorgt werden (Kosten der Entsorgung mit Formel (7-5) bilanzierbar) oder es findet eine interne Aufarbeitung im Unternehmen statt. Dafür ist die Wasserrückgewinnung durch einen Vakuumverdampfer ein mögliches Verfahren. Das über Verdampfung rückgewonnene Wasser, kann dem Prozess zugeführt werden. Der abfallende Schlamm wird dann extern über ein Entsorgungsfachunternehmen entsorgt.

Die, für den Prozess der Frischwasseraufbereitung benötigte Energie, welche zu betrachten ist und in die Bilanzierung mit einfließen sollte, kann in zwei Kategorien aufgeschlüsselt werden. Der Verbrauch der elektrischen Energie für Pumpen, welcher je nach Anlagentyp variiert und individuell bestimmt werden muss. Außerdem muss die beladenen Ionentauscher regelmäßig regeneriert werden. Dafür sind Chemikalien notwendig, die erworben und aufbereitet werden müssen. Die dafür anfallenden Kosten können nach Formel 5 auf das Modell angepasst werden. Laut Literatur ist der Energiebedarf geringer als bei der Vakuumverdampfung.

Für die Wasseraufbereitung durch Vakuumverdampfer mit Wärmepumpentechnik ist je nach Anlage und Verdampfungstemperatur ein Energiebedarf von 0,15 kWh/l bis 0,2 kWh/l anzusetzen. Ein angemessener Bilanzierungswert errechnet sich demnach mittels Formel (7-12).

$$\frac{m(\text{Schicht})}{m_E(\text{Ni}^+) \cdot \text{Max}(\text{MTO})} \cdot \sum_{i=1}^l V_N(\text{H}_2\text{O}) = b_{BA} \quad (7-12)$$

Ein weiterer Energiebedarf resultiert aus Elektromotoren, die für den Betrieb der Anlage notwendig sind. Der Warentransport erfolgt über ein Transportsystem, welches je nach Konstruktion einen anlagenspezifischen Verbrauch elektrischer Energie verursacht. Diese ist für einen kompletten Anlagendurchlauf zu ermitteln und durch die Anzahl der Produkte (oder aufgebrauchte Schichtmasse pro Durchlauf) zu dividieren.

7.2.1.4 Die Elektrolytbewegung

Die Konvektion erfolgt durch Pumpen (Luftindüsung sowie Elektrolytbewegung). Diese erzeugen je nach Installation, Pumpendimensionierung und Regelmechanismus ebenfalls anlagenspezifische Energieverbräuche/Kosten/Auslastung. Diese sind ebenfalls auf die Bezugsgröße zu normieren.

7.2.2 Galvanisch Nickel

Der Bedarf in diesem Prozess setzt sich aus dem im Elektrolyt befindlichen Chemikalien b_{BCj} , der nötigen Elektrolyttemperatur b_{BT} , der Badbewegung b_{BB} , der Wasseraufbereitung b_{BA} , Elektrolytpflege (Filterung im Prozess) b_{BP} , dem Warentransport b_{BH} sowie der Gleichstromversorgung b_{BG} und der löslichen Nickelanode b_{BE} zusammen.

Im Gegensatz zum chemisch Nickelprozess werden hier nicht die Chemikalien für den Elektrolytneuanfang betrachtet, da die Standzeiten galvanischer Elektrolyte sehr lang sein können und demnach einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Bedarf eines einzelnen Produktes haben. Dennoch ist es gelegentlich notwendig, dem Elektrolyten Additive zuzugeben. Für die Bilanzierung ist dieser Bedarf, nach den bereits vorgestellten Gleichungen zu ermitteln.

7.2.2.1 Die Gleichstromquelle

Der Gleichrichter hat bei galvanischen Prozessen einen erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf des Prozesses. Der Gleichrichter prägt den jeweiligen Elektroden (Werkstück und Nickelelektrode) das Potenzial auf, welches für die Schichtbildungsreaktion, der Reduktion

von Metallionen, auf der Werkstoffoberfläche notwendig ist. Theoretisch lässt sich die dafür aufgewendete Arbeit und damit der eingesetzte Energieaufwand nach Formel (7-13) ermitteln.

$$W_{el} = \Delta U \cdot Q \quad (7-13)$$

Dabei ist ΔU die benötigte Potenzialdifferenz und entspricht der anzulegenden elektrischen Spannung. Die Ladung Q lässt sich mit Hilfe des Faraday'schen Gesetzes aus der benötigten Schichtmasse m durch Formel (7-14) bestimmen. F die Faraday-Konstante hat den Wert $96485,33289 \frac{A \cdot s}{mol}$. Weiterhin gehen die molare Masse M und die Ladungszahl z , der zu reduzierenden Metallionen, in die Gleichung ein.

$$Q = \frac{m \cdot z \cdot F}{M} \quad (7-14)$$

Das für den Prozess benötigte Potenzial kann nach Gleichung (7-15) in die Einzelkomponenten E_{EMK} (Elektromotorische Kraft), η_D (Durchtrittsüberspannung), η_d (Diffusionsüberspannung), η_r (Reaktionsüberspannung), η_k (Kristallisationsüberspannung) und die zur Überwindung des Zellwiderstandes nötige Spannung η_R beschrieben werden.

$$\Delta U = E_{EMK} + \eta_D + \eta_d + \eta_r + \eta_k + \eta_R \quad (7-15)$$

Die elektromotorische Kraft ist die für die Reaktion minimal zu überwindende Potenzialdifferenz und kann nach Formel (7-16) aus den Tabellenwerten der elektrochemischen Spannungsreihe ermittelt werden.

$$E_{EMK} = E_{II}^0 - E_I^0 + \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln k_x \quad (7-16)$$

Mit Hilfe der Nernst'scher Gleichung können die Potenziale berechnet werden. Das Formelzeichen E^0 steht für das Standardpotenzial, welches aus Tabellenwerken der elektrochemischen Spannungsreihe zu entnehmen ist. Der letzte Summand spiegelt den Einfluss der realen Bedingungen wieder. Die im weiteren Verlauf zur Ermittlung der Spannung ΔU benötigten Überspannungen η_x können wie folgt ermittelt werden.

Die Durchtrittsüberspannung wird mittels der Butler-Volmer-Gleichung (17) in Zusammenhang mit der Durchtrittsströmdichte j_D gebracht. Dabei wird ein experimentell ermittelter Symmetriefaktor α zwischen kathodischer und anodischer Reaktion an der gleichen Elektrode benötigt, um die Austauschströmdichte j_0 anzupassen.

$$j_D = j_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{\alpha \cdot z \cdot F}{R \cdot T} \eta_D\right)} - e^{\left(\frac{(1-\alpha) \cdot z \cdot F}{R \cdot T} \eta_D\right)} \right) \quad (7-17)$$

Die Diffusionsüberspannung beinhaltet die Überwindung des Widerstands beim Stofftransports in der Nernst'schen Diffusionsschicht. Sie lässt sich nach Gleichung (7-18) aus dem Konzentrationsunterschied c_0 (Ionenkonzentration im Elektrolyten) und c_E (Ionenkonzentration in unmittelbarer Elektrodennähe) bestimmen.

$$\eta_d = \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \ln \frac{c_0}{c_E} \quad (7-18)$$

Die Berechnung der Reaktionsüberspannung ist sehr komplex, da sie alle Hemmungen der an der Durchtrittsreaktion beteiligten Reaktionen (vor- oder nachgelagert) beinhaltet. Diese sind prozessabhängig. Ähnliches gilt für die Kristallisationsüberspannung. Sie ist stark von der Anordnung der Oberflächenatome des Substrates sowie der Schicht und der Temperatur abhängig.

Für die theoretische Betrachtung des zu überwindenden Zellwiderstands nötigen Anteils der Spannung, kann das Modell bei bekannter Elektrolytleitfähigkeit und der räumlichen Anordnung der Elektroden nach Formel (7-19) bestimmt werden. In diese Formel fließt die elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyts σ , der mittlere Elektrodenabstand l sowie der stromdurchflossene Elektrolytquerschnitt q ein. Es ist möglich, die dafür benötigte Elektrolytleitfähigkeit aus der Elektrolytzusammensetzung theoretisch zu bestimmen. Die dafür nötigen physikalischen Zusammenhänge sind jedoch sehr komplex. Alle aus der Literatur bekannten analytischen Lösungen basieren auf Theorien, die ihre Gültigkeit bei stark mit Ionen beladenen Elektrolyten verlieren. Generell kann davon ausgegangen werden, dass sich die Elektrolytleitfähigkeit, aufgrund der Konzentrationsänderungen, mit dem Badalter ändert. Damit zeigt dieser Bereich weitere Möglichkeit zur Modellerweiterung auf.

$$\eta_r = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{q} \quad (7-19)$$

Zur Vereinfachung kann jedoch der Blick auf das Gesamtsystem dienen. Der durch den elektrischen Widerstand verursachte Energiebedarf, wird in Wärme umgewandelt. Solange die Wärmemenge durch den Widerstand kleiner als der Wärmeverlust des Prozessbades durch die Behältergrenzflächen ist, wird genau die hierfür benötigte Energie beim Halten der Badtemperatur eingespart. Für Prozesse, die keine Kühlung erfordern, ist demnach der

elektrische Widerstand (im Elektrolyten) für eine Energiebilanzierung vernachlässigbar. Der Auslegung von Gleichrichtern kann das Modell damit jedoch nicht dienen.

Ein alternativer Ansatz zur Ermittlung der benötigten Spannung ist das Ablesen des in den Stromversorgern integrierten Voltmeters. Für galvanische Beschichtungsanlagen liegt die benötigte Prozessspannung, inklusive der Widerstände von Zuleitungen und der Kontaktblöcke (Korrosionszustand sehr entscheidend), im Bereich zwischen 5 V und 15 V. Demnach kann der Energiebedarf für die abgeschiedene Masse m einer Nickelschicht vereinfacht mit Hilfe von Formel (7-13) und (7-14) vereinfacht in Formel (7-20) ($\Delta U = 12,5 \text{ V}$ *Przewirkungsgrad* = 98%) berechnet werden.

$$b_B \triangleq W_{el} = m[g] \cdot 41,1 \left[\frac{kJ}{g} \right] \quad (7-20)$$

Der reale Energiebedarf für die Gleichrichter kommt jedoch, wie in Formel (7-3) vorgesehen, erst durch Korrektur des Rechenwertes mit dem Wirkungsgrad der Gleichstromversorgung. Dieser liegt je nach Bauart und Alter der Gleichstromversorgung zwischen 60% und 93%.

7.2.3 Hartverchromung

Der Hartverchromungsprozess ist ein galvanischer Prozess und unterscheidet sich in der hier vorgenommenen theoretischen Betrachtung nur unwesentlich vom galvanischen Nickelprozess. Als Grundlage werden die im vorangegangenen Abschnitt behandelten Gleichungen genutzt und mittels Materialkonstanten sowie Prozessparametern auf den vorliegenden Sachverhalt angepasst. Das führt äquivalent zur Formel (7-20) und auf Formel (7-21).

$$b_B \triangleq W_{el} = m[g] \cdot 695,9 \left[\frac{kJ}{g} \right] \quad (7-21)$$

Die große Abweichung des Faktors resultiert aus der Ladungszahl $z = 6$ (statt 2 für Nickel) der molaren Masse von Chrom mit $M(\text{Cr}) = 51,996 \text{ g/mol}$ und dem elektrochemischen Wirkungsgrad von nur 20% (80% der Energie führen hauptsächlich zur Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff, welche durch die Absaugung ungenutzt in die Atmosphäre gelangen).

7.3 Ergebnisse und Konsequenzen der Modellanalyse

Unter Verwendung des Modells, ist es möglich den Ressourcenbedarf anhand des eingeflossenen Energieäquivalents speziell auf die jeweils zur Erzeugung der Beschichtung angewendeten Prozessstrecke sowie des Beschichtungsprozesses in einer Kennzahl vergleichbar zu

machen. Die Kennzahlen, der drei Beschichtungsprozesse (galvanisch Hartchrom, galvanisch Nickel und chemisch Nickel) können somit unabhängig von der Anlage ermittelt werden. Der Hartverchromungsprozess benötigt mit ca. $3,5 \frac{kWh}{m^2 \cdot \mu m}$ verhältnismäßig viel Energie im Vergleich zu den Vernicklungsprozessen. Chemisch Nickel liegt mit ca. $2,8 \frac{kWh}{m^2 \cdot \mu m}$ noch weit über dem galvanisch Nickel Prozess mit $0,8 \frac{kWh}{m^2 \cdot \mu m}$.

7.3.1 Galvanisch Ni-B-Dispersionsschicht

Ein mögliches alternatives Schichtsystem zu Hartchromschichten sind Dispersionsschichten. Durch den Einbau von Hartstoffen (z.B. Carbide, Diamant) in eine Nickelmatrix können ähnliche Eigenschaften, bezogen auf die Härte und Verschleißbeständigkeit von Hartchromschichten, erreicht werden. Als neuer Lösungsansatz wurde der Einbau von pyrolytischen Borpartikeln untersucht. Neben dem Effekt der Dispersionsverfestigung, soll durch eine thermische Nachbehandlung der abgeschiedenen Dispersionsschicht auch noch eine Phasenumwandlung (Bildung von harter Ni_3B Phasen) und damit verbunden eine Härtesteigerung realisiert werden.

Als Ausgangselektrolyt wurde ein Watt'scher Nickelelektrolyt verwendet und der optimale Borpartikelgehalt wurde experimentell ermittelt. Folgender Nickelelektrolyt wurde als Grundelektrolyt für die Beschichtungsversuche eingesetzt:

Zusammensetzung:

$$\text{Nickelsulfat: } c(NiSO_4 \times 7H_2O) = 250 \text{ g/l}$$

$$\text{Nickelchlorid: } c(NiCl_2 \times 6H_2O) = 50 \text{ g/l}$$

$$\text{Borsäure: } c(H_3BO_3) = 30 \text{ g/l}$$

$$\text{Nanopartikel: } c(B_{Partikel}) = 20 \text{ g/l}$$

Arbeitsparameter

$$\text{Arbeitstemperatur: } T = 50^\circ C - 55^\circ C$$

$$\text{Beschichtungsstromdichte: } i = 1 \text{ A/dm}^2 - 6 \text{ A/dm}^2$$

$$\text{pH-Bereich: } pH = 3,9 - 4,5$$

Mit diesem Elektrolyten wurden eine Vielzahl von Versuchsreihen durchgeführt, um Zusammenhänge zwischen den Badparametern: Elektrolyttemperatur, pH-Wert, Partikelkonzentration, Badbewegung und Additivierung auf die mechanischen Eigenschaften wie Härte und Verschleißbeständigkeit (mit und ohne Wärmebehandlung) herauszufinden.

Die Beschichtungsversuche wurden im Becherglas mit einem Volumen von bis zu max. 2L durchgeführt. Die größte Herausforderung war, die Vermeidung der Aggregat- und Agglomeratbildung der Primärpartikelgröße (1 μm) und eine homogene Borpartikeleinbaurrate in die Nickelschicht zu erzielen. Durch Additivierung (Tenside) und guter Konvektion konnten diese Anforderungen zufriedenstellend gelöst werden. Die beschichteten Muster wurden dann für weitere Untersuchungen zur Schichtcharakterisierung und Wärmebehandlung weiterverwendet.

In der Abbildung 2 ist der Härteverlauf der abgeschiedenen Ni-Bor-Dispersionsschicht nach einer Wärmebehandlung bei 400°C im Ofen dargestellt.

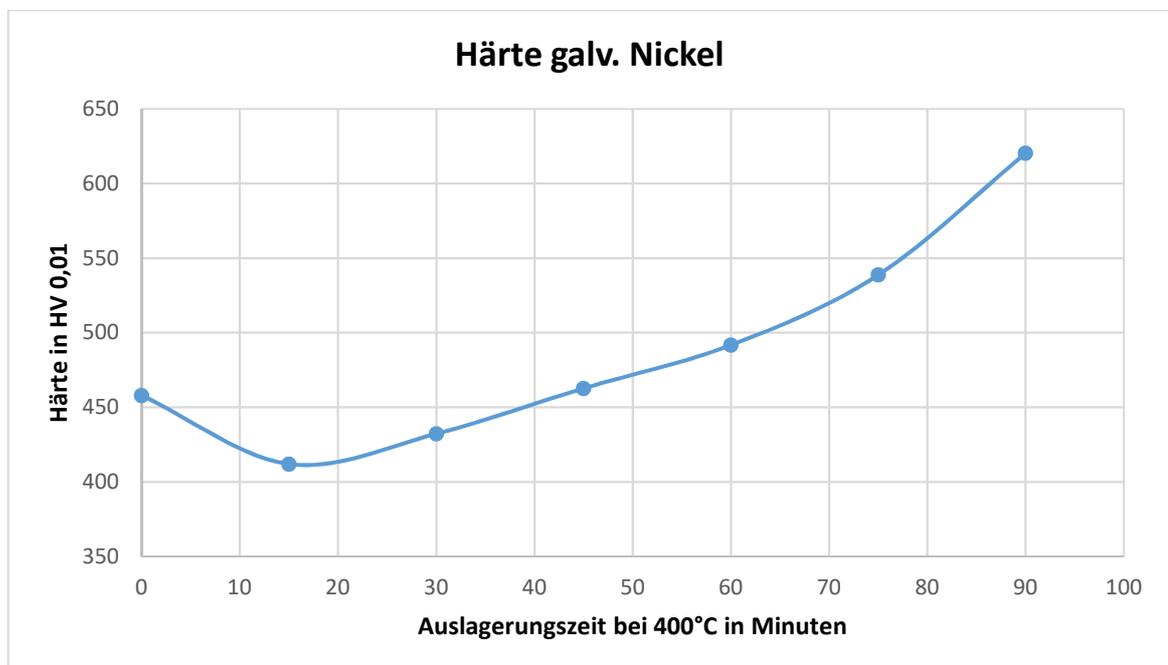


Abbildung 41: Einfluss der Wärmebehandlung auf die Härte Ni-B-Schichten

Im Vergleich zu einer reinen Nickelschicht, war der durch die Dispersionsverfestigung gewonnene Härtegewinn kleiner als erhofft. Dieser lag mit 460 $HV\ 0,01$ nur um ca. 21% höher als bei einer reinen Nickelschicht mit einer Härte von 380 $HV\ 0,01$. Die anschließende Wärmebehandlung führte zu einer Härtesteigerung der Ni-B-Dispersionsschicht bis auf 620 $HV\ 0,01$ nach einer Wärmebehandlung von 90 min. bei 400°C.

Die Verschleißigenschaften im getesteten Tribosystem (Kalomax NT) zeigten eine deutliche Verbesserung der Abtragsrate im Vergleich galv. Nickel zu galv. Ni-B-Dispersionsschichten. Diese Werte sind jedoch nur Vergleichswerte und können nicht auf beliebige Tribosysteme übertragen werden.

7.3.2 Chemisch Nickel-Phosphor-Bor-Dispersionsschicht

Der Zielsetzung, der hier zusammengefassten Versuche, ist ähnlich wie unter Abschnitt 7.3.1. dargestellt. Der Unterschied dieses Verfahren liegt jedoch in der Tatsache, dass durch den chemisch-reduktiven Prozess eine Nickel-Phosphor-Schicht außenstromlos erzeugt wird. Aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche wurden die weiteren Versuche mit chemisch Nickel intensiv durchgeführt, da die Härtewerte besser waren, als die mit galvanisch Nickel erzeugten Schichten und damit ein höheres Potenzial darstellen, galvanisch erzeugte Hartchromschichten zu substituieren.

7.3.2.1 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurden kommerzielle amorphe Borpartikel der Firma abcr GmbH mit drei verschiedenen Partikelgrößen in chemisch Nickel-Phosphor Schichten als Dispersions-schichten eingebaut. Die Borpartikelgrößen waren:

Borpulver 1: 350 nm

Borpulver 2: < 1000 nm

Borpulver 3: 1000 - 2000 nm

Als Substrate für die außenstromlosen Beschichtungen wurden geschliffene 100Cr6 Stahlronden und verzinkte Stahlbleche benutzt (vgl. Abbildung 42).



Abbildung 42: Probestkörper (100Cr6 Ronde und Stahlblech)

Vor der Beschichtung wurden die Stahlronden wie folgt vorbehandelt:

- Alkalische Abkochentfettung bei 60°C; 5 min.
- Beizen mit einer 1:1 verdünnten Salzsäure bei RT; 3 min.

- Dekapierung mit einer 5%igen schwefelsauren Lösung bei RT; 1 min
- Chemisch Nickel DNC 520-12-50; bei 80°C und pH: 5

Die Verzinkten Stahlbleche wurden wie folgt vorbehandelt:

- Beizen mit einer 1:1 verdünnten Salzsäure bei RT; 3 min.
- Dekapierung mit einer 5%igen schwefelsauren Lösung bei RT; 1 min
- Chemisch Nickel DNC 520-12-50; bei 80°C und pH: 5

Nach den jeweiligen Aktivbädern wurde mit VE-Wasser gespült und nach der Beschichtung wurden die Substrate im heißen Luftstrom getrocknet. Für die chemisch Nickel Beschichtung wurde ein konventioneller Elektrolyt auf Natriumhypophosphitbasis der Firma RIAG (DNC 520-12-50) genutzt. Laut dem Datenblatt soll der Elektrolyt ein Nickelgehalt von $5,0 \pm 0,5$ g/l und ein Reduktionsmittelgehalt von 40 ± 4 g/l haben und der pH-Wert soll zwischen 4,9 bis 5,1 bei 20 °C liegen. Der pH-Wert wurde mit 10%tiger Schwefelsäure und 15%tiger Ammoniaklösung eingestellt. Als optimale Badtemperatur, bezogen auf Abscheidegeschwindigkeit und Badstabilität, stellte sich 80°C heraus. Der Nickelgehalt, der pH-Wert und die Temperatur wurden regelmäßig überwacht und eingestellt. Alle Parameter wurden zunächst im Sollbereich gehalten. In der Abbildung 43 ist Versuchsaufbau zur außenstromlosen Vernickelung dargestellt.



Abbildung 43: Versuchsaufbau chemisch Nickel Beschichtungsvorgang

Um die gewünschte Schichtdicke (mindestens 60 μm) für die spätere Härteprüfung zu erzielen, wurden Vorversuche durchgeführt, um die optimalen Beschichtungsparameter zu ermitteln. 10 x 50 mm Stahlbleche wurden bei verschiedenen Temperaturen und pH-Werten für eine Stunde in einem 200 mL DNC 520-12-50 Bad ohne Nachdosierung beschichtet. Das Bad wurde während der Beschichtung mit einem Magnetrührstab (\varnothing 8mm, L 40mm) bei 100 Umdrehungen pro Minute gemischt. Die Schichtdicke wurde aus dem Massenunterschied berechnet und metallographisch bestimmt. Die untersuchten Temperaturen waren 60, 70, 80 und 90 °C bei pH 5,0 und die untersuchten pH-Werte waren pH 4,6; 4,8; 5,0 und 5,2 bei 80°C.

Der Partikeleinbau von nicht wärmebehandelten Proben wurde durch metallografische Methoden und durch ImageC an sechs verschiedene Messstellen ausgewertet. Die Bilder wurden von BX60 von Olympus bei 100x Vergrößerung und 0,90 Apertur aufgenommen. Die Probe wurde zunächst mit Accutom 50 (Trennscheibe 10S15; Bearbeitungsmethode: 10S15 LANGSAM) getrennt, im Epoxidharz eingebettet (siehe Abbildung 44).

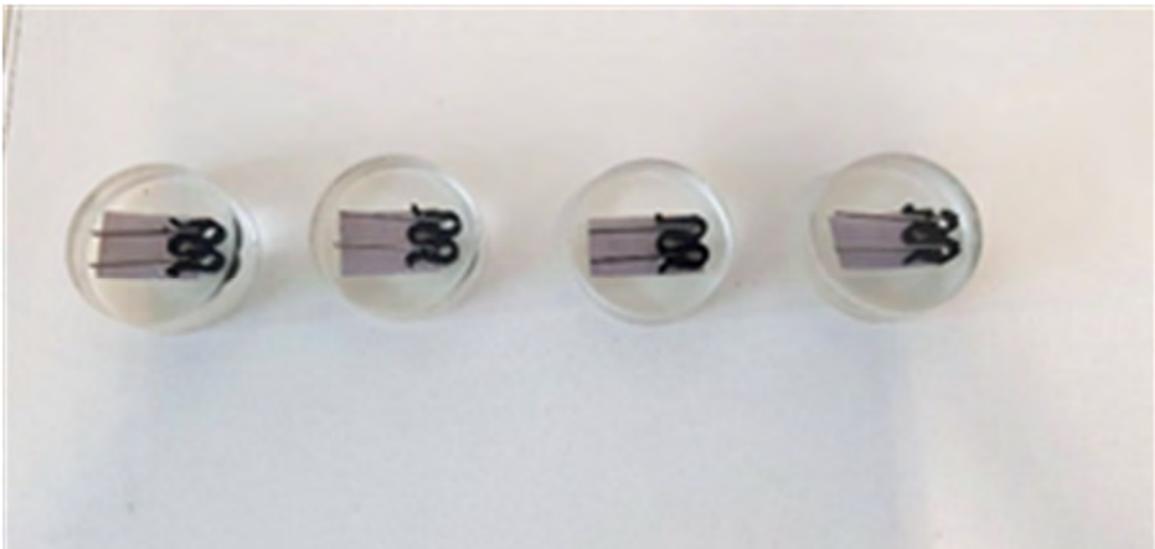


Abbildung 44: Beispiele der eingebetteten Proben

In der Abbildung 45 sind die Ergebnisse der Partikelgrößenverteilung für die Borpulver 1 (350nm), Borpulver 2 ($< 1 \mu\text{m}$) und Borpulver 3 (1-2 μm) in der Nickel-Phosphor-Schicht dargestellt. In der Abbildung 46 sind die Borpartikel im Anlieferungszustand abgebildet sowie der Einbau in die chemisch Nickel Phosphor Schicht.

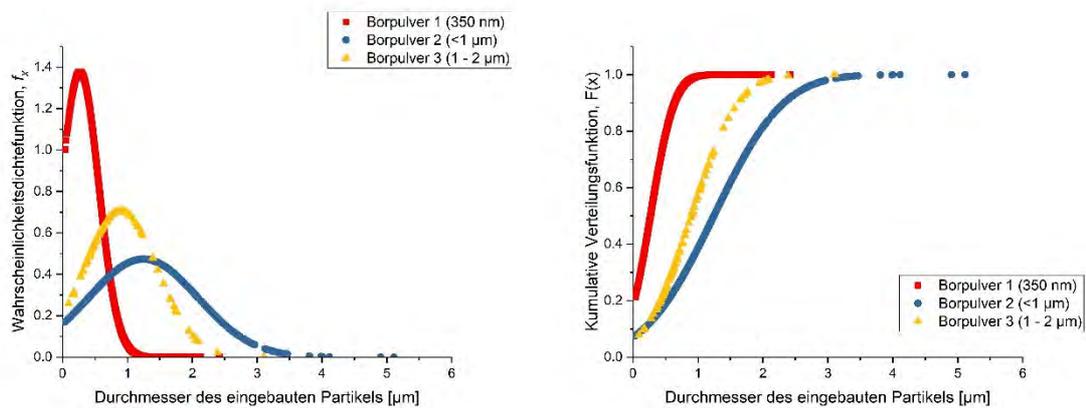


Abbildung 45:Verteilung der Borpartikel in den Ni-P-Schichten

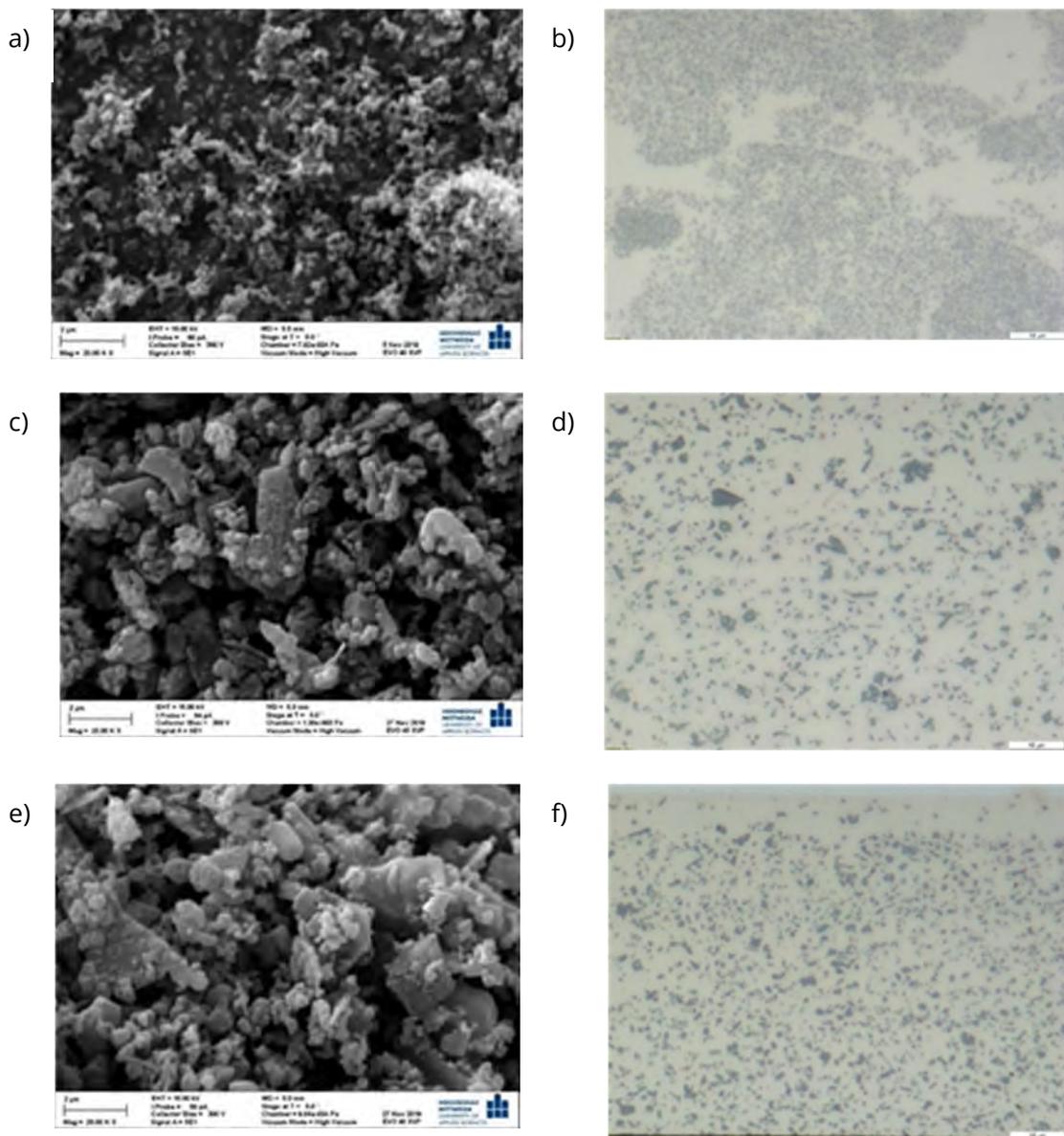


Abbildung 46: REM-Aufnahme (20 000x Vergrößerung) von a) Borpulver 1, b) Borpulver 2, c) Borpulver 3 und die metallographische Querschliffe der Ni-P-B-Schichten (100x Vergrößerung) mit b) Borpulver 1, d) Borpulver 2 und f) Borpulver 3

Die Einbauraten sind auch abhängig von der Partikelgröße. Wie in der Abbildung 47 dargestellt, ist die Einbauraten von kleineren Barpartikel begünstigt. In der Abbildung 48 sind die entsprechenden Bilder im Querschliff dargestellt.

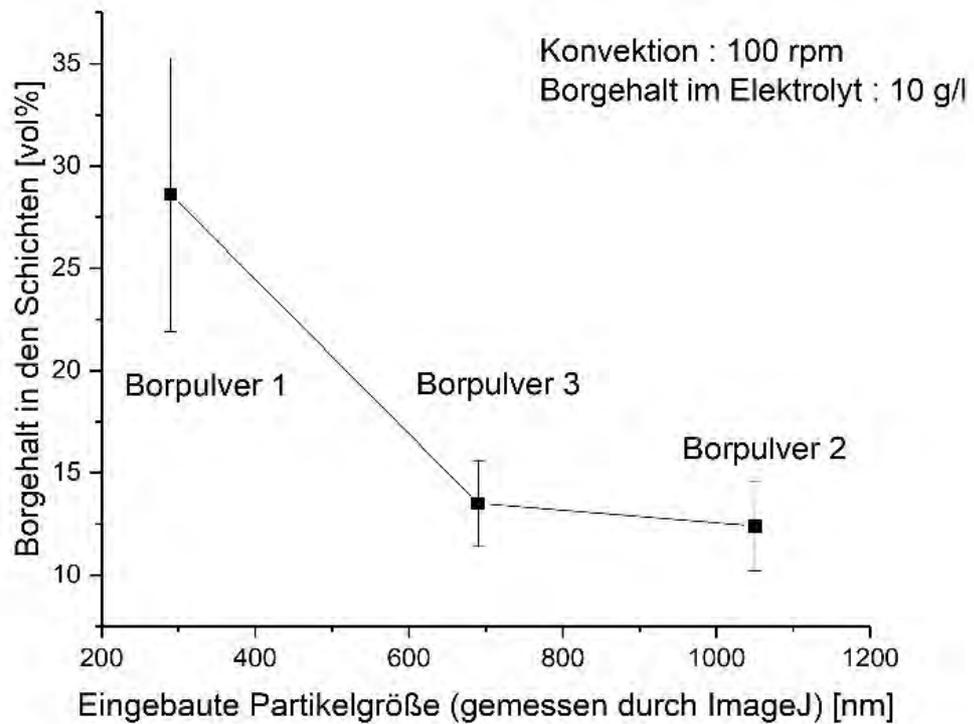


Abbildung 47: Partikeleinbau in den Ni-P-Schichten in Abhängigkeit der durch ImageJ gemessene Größe der eingebauten Borpartikel

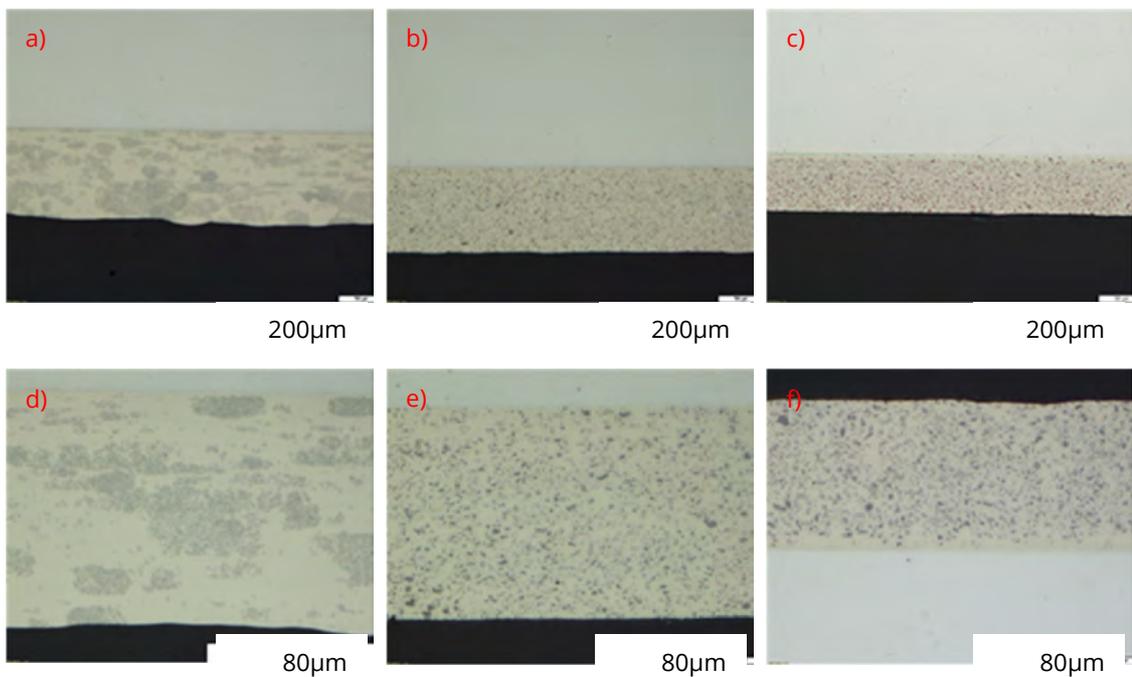


Abbildung 48: Die metallographische Querschliffe bei 20x und 50x Vergrößerung für Ni-P-B Schichten mit eingebauten Borpulvern a) d) Pulver 1, b) e) Pulver 2, und c) f) Pulver 3

Außerdem wurde der Einfluss der Konvektion im Elektrolyten untersucht. Hierzu wurden am Magnetrührer unterschiedliche Umdrehungszahlen eingestellt sowie der Einfluss von Ultraschall im Elektrolyten auf die Einbaurrate untersucht. Durch den Ultraschall entsteht ein Kavitationseffekt, der die Konvektion im Elektrolyten verbessert und zu einer Dispergierung der Partikel führt. Deswegen steigt der Partikeleinbau in den Ni-P-Schichten mit der Leistungsdichte des Ultraschalls, wie in Abbildung 49 gezeigt wird, an. Im Vergleich zur normalen Konvektion mit dem Magnetrührer (10 g/l Borgehalt im Elektrolyt) wie in der Abbildung 50 dargestellt, erreichte das Ultraschallbad bei einer Leistungsdichte von 62,07 mW/cm³ (10 g/l Borgehalt im Elektrolyt) fast die doppelte Partikeleinbaurrate. Allerdings ist die Nutzung des Ultraschallbades hier nachteilhaft, da Delaminationen der Schichten durch den Zusammenbruch der Gasblasen im Bereich nahe der Substratoberfläche hervorgerufen werden. Aufgrund der Delamination wurde für diesen Versuchsteil keine Härtemessung durchgeführt.

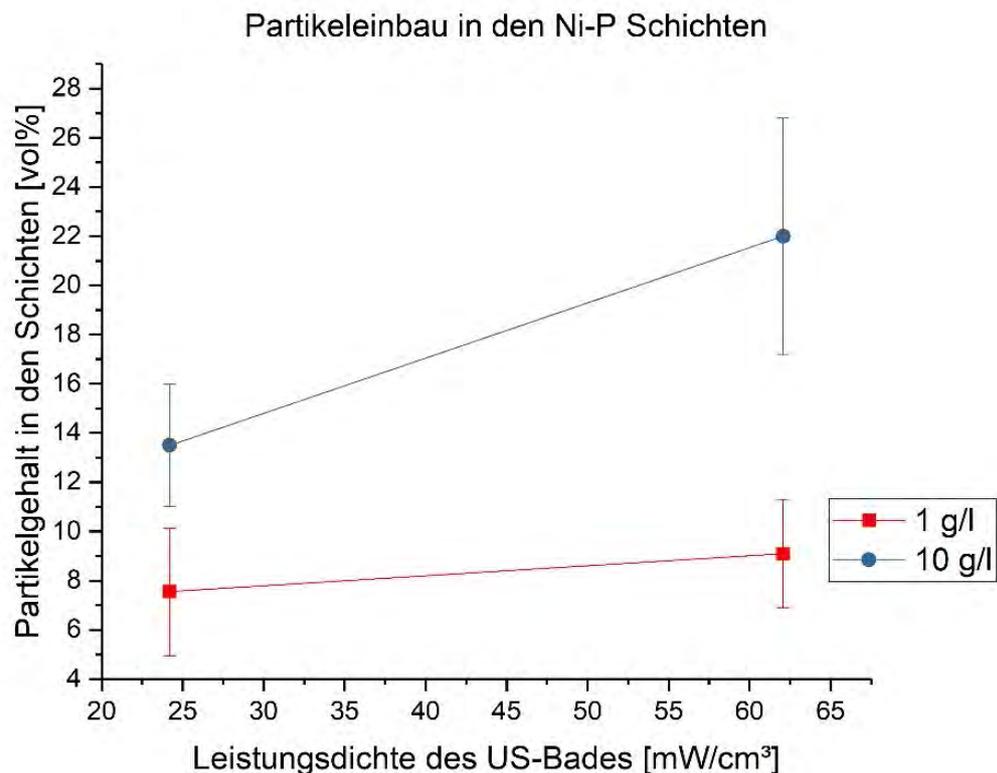


Abbildung 49: Der Partikeleinbau in den Ni-P-Schichten unter den Einfluss des Ultraschalls mit verschiedene Leistungsdichte

Wie in der Abbildung 50 dargestellt, steigt der Partikeleinbau mit der Umdrehungszahl. Dennoch wurde für die meisten Versuche mit 100 Drehung pro Minute gearbeitet, da bei einer höheren Umdrehungszahl gehäuft Wildabscheidungen im Becherglas auftraten. Unter

Wildabscheidung versteht man die unkontrollierte Abscheidung von Nickel auf den Gefäßwänden, was zur Zerstörung des Elektrolyten führt. Weiterhin könnte eine sehr hohe Strömung unvollständig umhüllte Partikel aus der Ni-P-Matrix reißen. Diese partiell mit Nickel beschichteten Teilchen würden als Startkeime für eine weitere Abscheidung auf den Partikeln fungieren, sodass der Nickelgehalt schnell sinkt und eine definierte Abscheidung auf den Substraten ohne Filterung des Elektrolyten nicht möglich ist. Diese Problematik verschlechtert sich mit der Beschichtungszeit und steigender Umdrehungszahl.

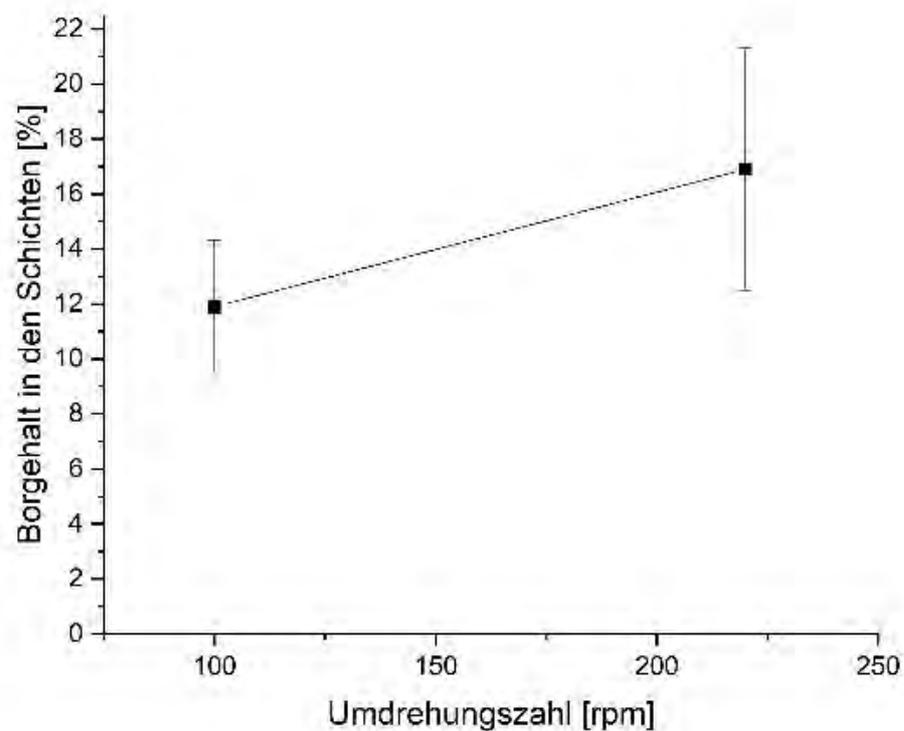


Abbildung 50: Einfluss der Hydrodynamik des Elektrolyten an dem Partikeleinbau in den Ni-P Schichten

Zum Abschluss der Untersuchung der Parametereinflüsse auf den Abscheidungsprozess wurde der Borgehalt im Elektrolyten variiert. Für diesen Versuchsteil wurde nur Borpulver 3 verwendet, sodass der Diffusionskoeffizient konstant bleibt und der Partikeleinbau in den Schichten mit dem Partikelgehalt im Elektrolyten in Zusammenhang gebracht werden kann. Die Abbildung 51 und Abbildung 52 zeigen die Zunahme der Einbaurrate durch die Erhöhung der Konzentration im Elektrolyten.

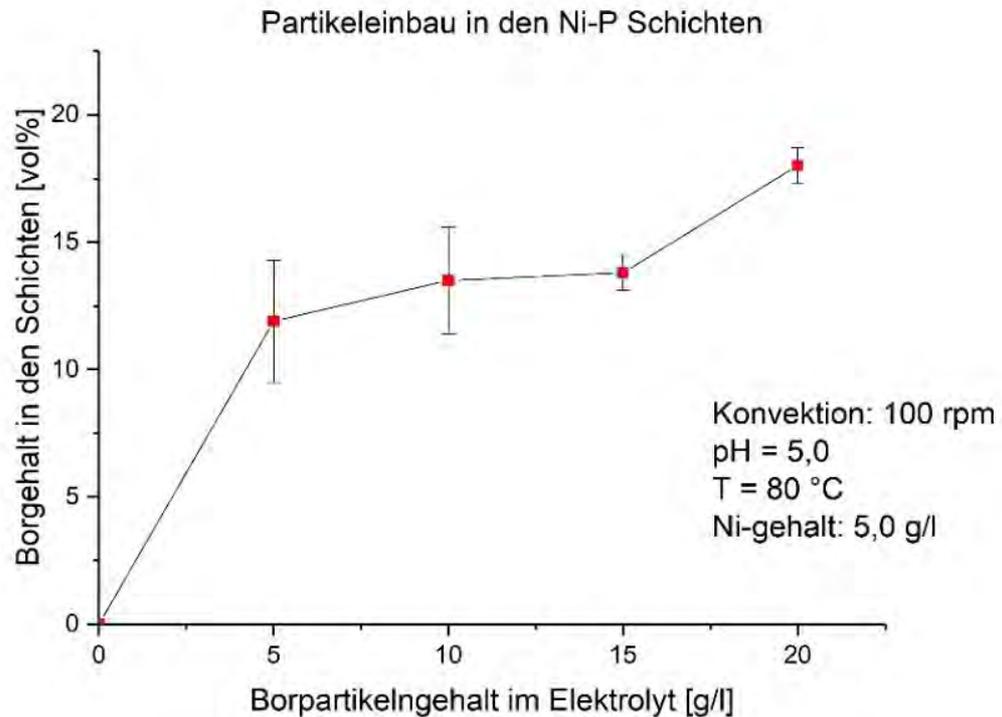


Abbildung 51: Partikeleinbau in den Ni-P-Schichten in Abhängigkeit des Partikelgehalts im Elektrolyten

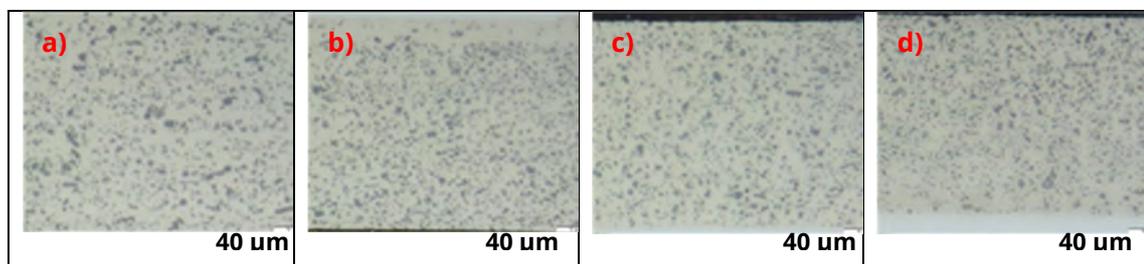


Abbildung 52: Metallographische Querschliffe bei 100x Vergrößerung für Partikelgehalt im Elektrolyten von a) 5 g/l, b) 10 g/l, c) 15 g/l und d) 20 g/l

Nach Abschluss der Parameteruntersuchungen wurde die Härte vor und nach einer Wärmebehandlung ermittelt sowie die Gefüge-Veränderungen mithilfe der XRD-Messung bestimmt. Die Abbildung 53 zeigt, wie die Härte der Schichten mit dem Borgehalt im Elektrolyten und mit der Wärmebehandlungszeit zusammenhängt. Die homogen verteilten Borpartikel in den Ni-P Schichten liefern eine höhere Härte im abgeschiedenen und wärmebehandelten Zustand. Bei ca. 50 HV 0,5 mehr als die Härte von den Ni-P ohne Bor Schichten. Dennoch spielt die Menge des eingebauten Borgehalts keine wesentliche Rolle, da sich die Härte mit steigendem Borgehalt nicht stark ändert. Die unterschiedliche Partikelgröße zeigt kein Einfluss auf der Härte der Schichten.

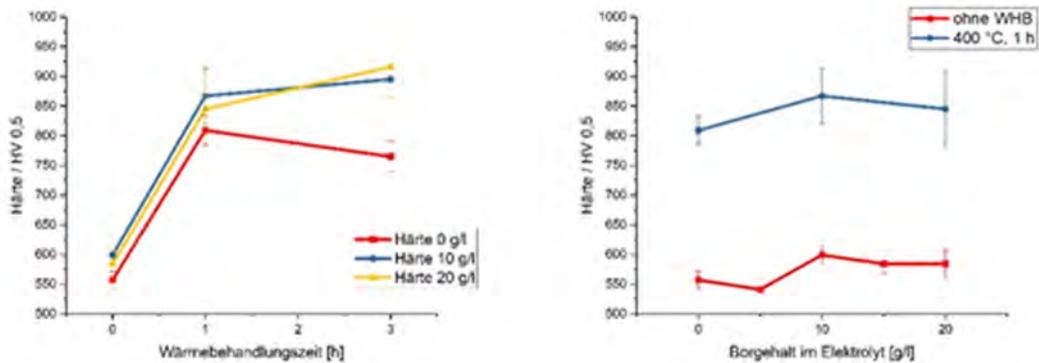


Abbildung 53: Härte der Ni-P-B Schichten bei verschiedene Borgehalte im Elektrolyten und unterschiedliche Wärmebehandlungszeiten

Die XRD Diffraktogramm (vgl. Abbildung 55) der Ni-P Schichten im abgeschiedenen Zustand zeigt keine Peaks. Das bedeutet, dass die nicht wärmebehandelte Ni-P Schichten amorph sind. Die amorphen Schichten wandeln sich aber in kristalline Struktur um, wenn sie bei 400 °C für 1 h im Wärmebehandlungsofen gelagert werden. In der Abbildung 56 wurden kristalline Ni- und Ni₃P Phasen in den Schichten identifiziert. Interessant ist der Fall der Ni-P Schichten, die bei 400 °C für 3 h wärmebehandelt wurden. Die Härte sinkt bei einer längeren Wärmebehandlungszeit, bedingt durch das weitere Kristallwachstum. Abbildung 54 zeigt, wie die Härte mit der Kristallgröße zusammenhängt.

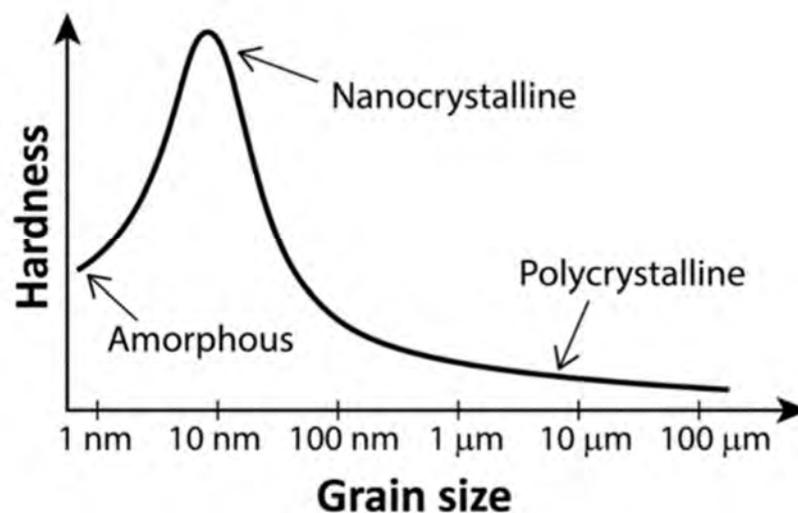


Abbildung 54: Zusammenhang zwischen der Korngröße und der Härte eines Materials

Da noch keine Nickelboride durch die XRD-Messung identifiziert wurden, liegt die weitere Härtesteigerung ausschließlich an der eingebauten Borpartikel. Es könnte sein, dass durch

die Fremdeinschlüsse, ein dreidimensionaler Gitterfehler, das Kristallwachstum von Nickel und Nickelphosphid gehemmt wird.

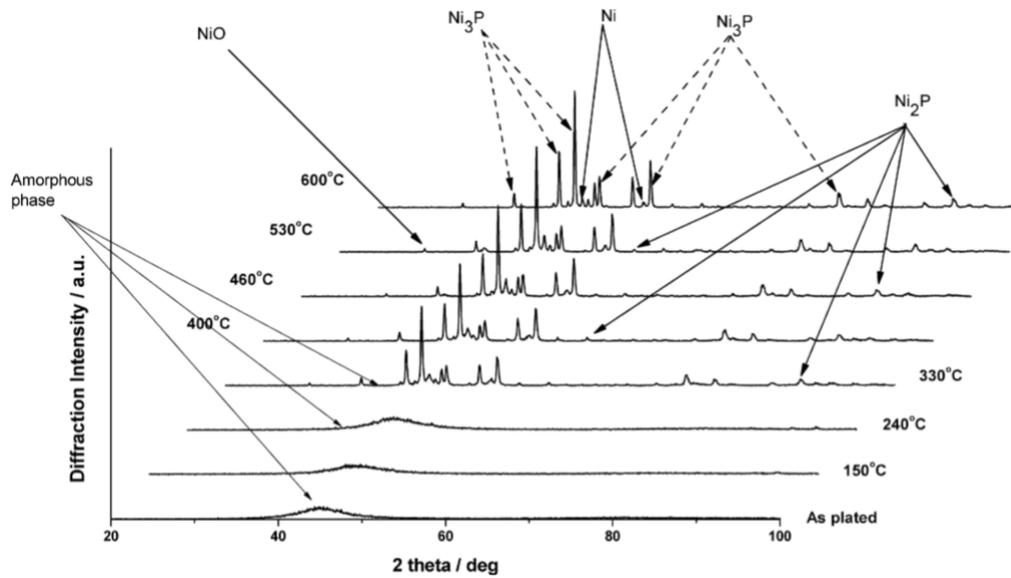


Abbildung 55: XRD Diffraktogramm von Ni-P Schichten bei verschiedene Wärmebehandlungs-temperaturen

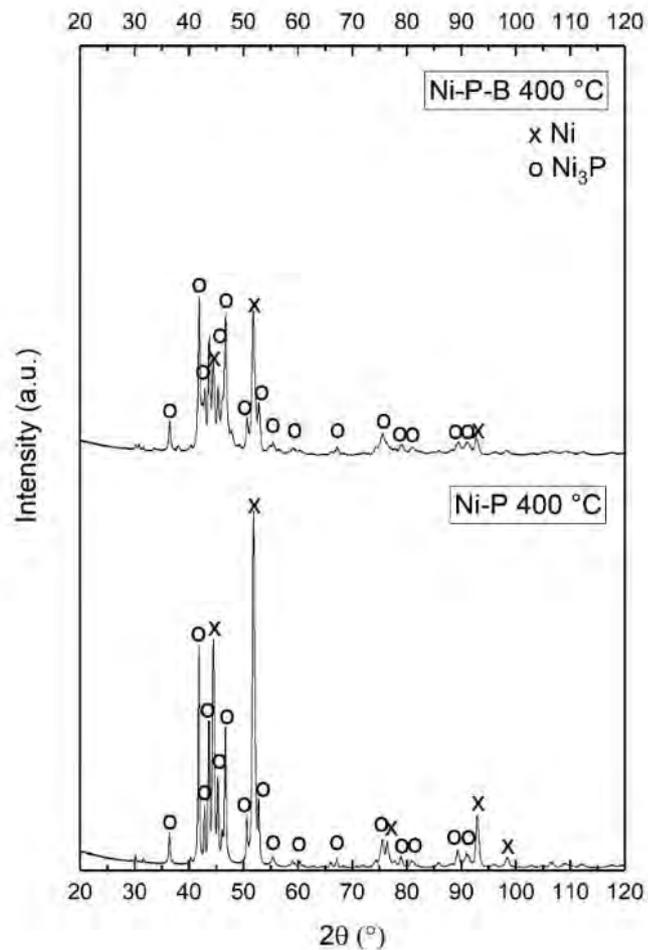


Abbildung 56: XRD Diffraktogramm von Ni-P und Ni-P-B Schichten bei 400 °C und 3 h

7.4 Zusammenfassung Berechnungsmodell nasschemische Beschichtung

Ausgehend von der Annahme, dass sich der Energiebedarf eines Prozesses aus der Summe der in einzelnen Prozessschritten aufgewendeten Energien und den rückgewonnenen Energien ergibt, wurde ein Prozessmodell aufgestellt. Die Modellgenauigkeit lässt sich aufgrund des gewählten Ansatzes stetig verfeinern. Das kann, wie am Beispiel der Prozessbaderwärmung, mit physikalischen Gesetzen präzisiert werden. Das Anwendungsfeld des Berechnungsmodells steigt mit der Präzision der Beschreibung. Mit bereits wenigen Annahmen, können die Prozesse im einfach gehaltenen Modell zur Kalkulation des Ressourcenbedarfs genutzt werden. Weitere Verfeinerungen ermöglichen es, Einsparpotenziale in den einzelnen Prozessschritten zu finden. Je mehr jedes Teilmodell durch thermodynamische, kinetische und elektrochemische Gleichungen beschrieben ist, desto besser können sie zur Auslegung

von Anlagen herangezogen werden. Weiteres Potenzial liefert die nicht beschriebene Einbindung von Energierückgewinnungsstrategien zur Optimierung bestehender Anlagen. Ferner kann das Modell für die Auswahl von geeigneten Fertigungsstrategien sowie die Beurteilung der Eignung von Anlagen (Größe und Prozess) von Lohnbeschichtern in Bezug auf eine ressourcenschonende Teilefertigung herangezogen werden.

Die aus der Modellbetrachtung der beschriebenen Beschichtungsprozesse gewonnenen Erkenntnisse wurden genutzt, um potenziell denkbare Alternativen zum Hartchromprozess in Form der Nutzung alternativer Elektrolyte wie z. B. galv. Ni-B-Dispersionsschichten oder auch galvanisch Ni-B-Dispersionsschichten umzusetzen. Mit chemisch NiP-B-Dispersionsschichten konnten ähnliche Härtewerte, wie sie bei Hartchromschichten zu messen sind, nach einer thermischen Wärmebehandlung realisiert werden. Damit könnte dieses Schichtsystem eine Alternative zum Hartverchromen darstellen, aber das Problem der Elektrolyt- bzw. Partikelstabilität muss weiter optimiert werden. Die Konsequenz daraus ist, dass weitere Elektrolytentwicklungen nötig sind, um einen industriell nutzbaren Beschichtungsprozess anzubieten und um eine effektive Verringerung des Ressourceneinsatzes zu realisieren.

Erarbeitung ressourcenorientierter Teilmodelle für die Fertigung hochbeanspruchter Bauteile als Grundlage innovativer Verfahrens- und Betriebsmittelmodelle

8.1 Modellbildung Maschinenmodell

Infolge aktueller gesetzlicher Bestimmungen und der gesellschaftlichen Diskussion um nachhaltiges Wirtschaften rückt das Thema Ressourceneffizienz immer mehr in den Fokus der produzierenden Unternehmen. Nicht nur die Strukturierung der Fabrik, die Logistik oder die Produktplanung und -gestaltung bieten hierbei eine Vielzahl von Einsparungsmöglichkeiten, sondern auch die optimierte Planung und Abstimmung der Fertigungsprozesse. Gerade im Bereich kleiner und mittlerer Stückzahlen bringen die bewusste Materialauswahl und eine ressourceneffiziente Bearbeitung hohe Einsparpotenziale mit sich. Im Bereich des elektrischen Energieverbrauchs ist festzustellen, dass bei Werkzeugmaschinen teilweise nur 15- 40 Prozent der Betriebszeit auf die eigentliche Bearbeitung entfallen [43], [44].

Im Projekt wurde ein Vorgehen zur Energiebedarfsprognose von Werkzeugmaschinen entwickelt. Die Abbildung 57 zeigt die erforderlichen Teilmodelle, die zur Energiebedarfsprognose prozess- und maschinenspezifisch entwickelt werden müssen.



Abbildung 57: Vorgehen und Modellbildungen zur Energiebedarfsprognose

Im Folgenden wird die Entwicklungsabfolge der einzelnen Modelle, sowie die Funktionsgenerierung zur Energiebedarfsprognose näher erläutert.

Zur Entwicklung des *Standardisierten Maschinenmodells* ist die Analyse, Strukturierung und Datenerfassung für die Auswahl des Werkzeugmaschinentyps mit den in der Abbildung 58 dargestellten Schritten erforderlich. Ziel des Maschinenmodells ist die Auseinandersetzung mit dem erforderlichen Werkzeugmaschinentyp und der Gestaltung bzw. Umsetzung der Arbeitsaufgabe. Ergebnisse des *Standardisierten Maschinenmodells* ist die Auswahl der Werkzeugmaschine, die Festlegung des Fertigungsverfahrens, die Ableitung der Bearbeitungsschritte sowie der hierfür erforderlichen Werkzeuge [45], [46], [47].

Im nächsten Schritt wird das *Standardisierte Maschinenmodell* auf eine konkrete Maschine angepasst und bildet somit die Basis des *Theoretischen Maschinenmodells*. Zur Entwicklung des *Theoretischen Maschinenmodells* ist die Extrahierung und Verdichtung der Daten, sowie Darstellung von Komponenten einer konkreten Werkzeugmaschine mit den in der Abbildung 122 in der Anlage 2 dargestellten Schritte erforderlich. Dieser Ansatz soll den möglichen Ressourcenbedarf und -verbrauch in Fertigungssystemen abbilden und verallgemeinerte Informationen bzw. Maschinenparameter auf die für die zu betrachtende Maschine relevanten Informationen verdichten. Dabei sind Ver- und Bearbeitungsparameter, wie Medien, Werkzeuge oder Bearbeitungsstrategien wesentliche Ausgangsinformationen, die unter Berücksichtigung der maschinenspezifischen Aggregate, wie bspw. Vorschubantriebe, Kühlung oder Spindelantriebe, dazu beitragen, dass am Ende des Arbeitsauftrages Ausgangsgrößen wie Daten, wie die benötigte elektrische Energie, entstehen. Ziel des *Theoretischen Maschinenmodells* ist die Auseinandersetzung mit der konkreten Werkzeugmaschine und ihren Komponenten, sowie die Planung möglicher Bearbeitungsstrategien. Ergebnisse des Maschinenmodells sind die Zuordnung der maschinenspezifischen Arbeitsvorgänge, sowie Fertigungsoperationen. Weiterhin erfolgt die Festlegung der erforderlichen Werkzeuge.

Zur Entwicklung des *Spezifizierten Maschinenmodells* ist die Anreicherung des Theoretischen Modells mit maschinenspezifischen Daten und Messwerten mit den in der Abbildung 123 (Anlage 2) dargestellten Schritten erforderlich. Ziel des Maschinenmodells ist die Modellierung und Planbarkeit der einzelnen energetischen Verbraucher und der Energiebedarfe der Maschine. Dieses Modell dient dabei als Ansatz für ein Berechnungsmodell, welches nach Eingabe der detaillierten Verfahrensparameter der jeweiligen Fertigungsverfahren die benötigte elektrische Maschinenleistung und den daraus resultierenden elektrischen Energiebedarf für einen Arbeitsauftrag an der betrachteten Maschine planbar machen soll. Bei Bedarf ist auch der Verbrauch weiterer Energieträger wie Druckluft, Wärme oder Kälte sowie von

Hilfsstoffen wie technischen Gasen oder flüssigem Stickstoff zur Kühlung zu berechnen. Auch hierfür benötigt es spezifizierte Teilmodelle.

Ergebnisse des Maschinenmodells sind die maschinenspezifischen Berechnungsfunktionen zur Bestimmung des Energiebedarfs. [52]

Für die finale *Energiebedarfsprognose* bilden die im *Spezifizierten Maschinenmodell* entstandenen Berechnungsfunktionen (Vgl. Formeln (8-7), (8-8)) die Grundlage. Diese Funktionen werden in einem Excel-basierten Berechnungstool zusammengeführt und unterstützen die technologische Planung durch die Bestimmung des bauteilspezifischen Energiebedarfs. Fertigungsalternativen können so energetisch bewertet und die ressourceneffizientere Variante umgesetzt werden.

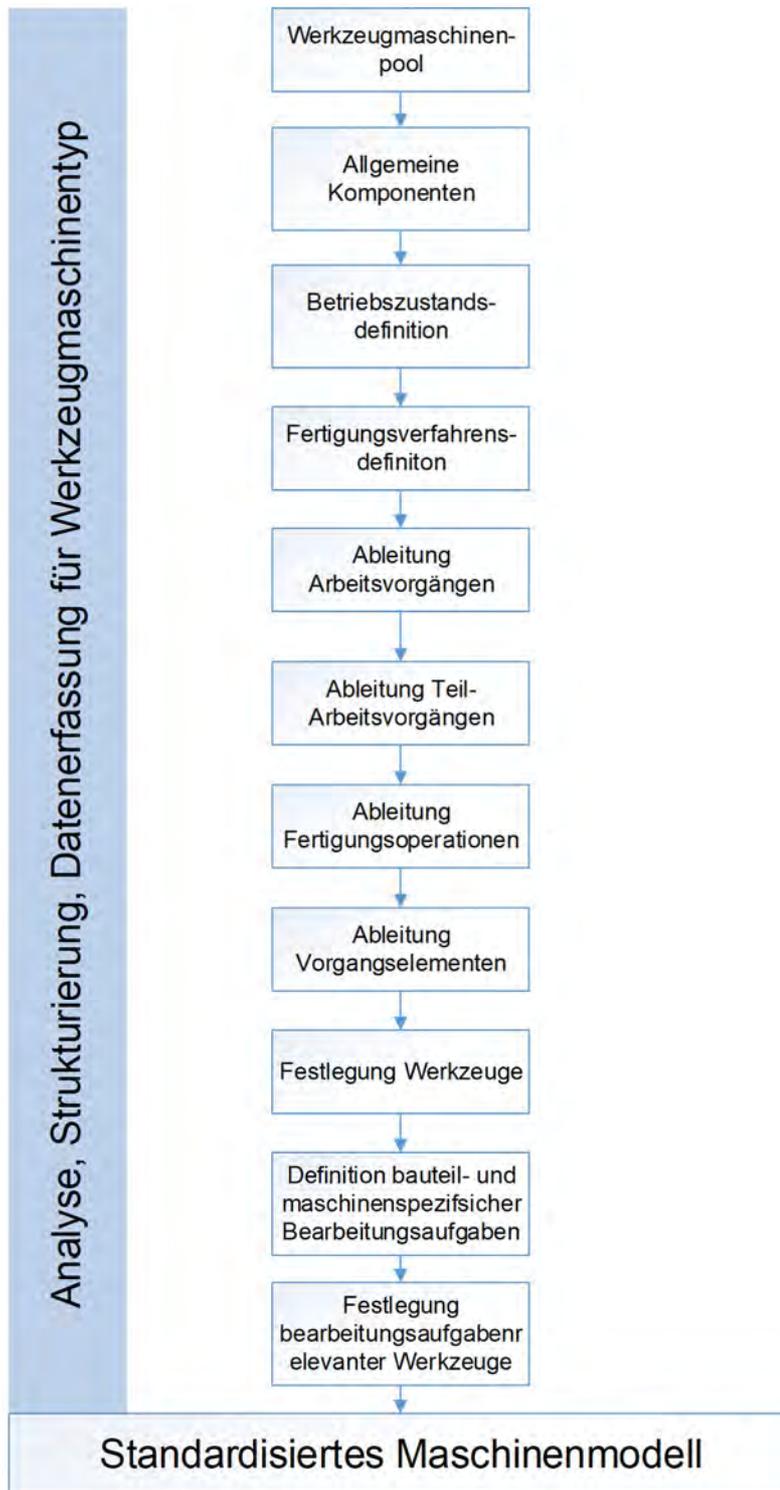


Abbildung 58: Standardisiertes Maschinenmodell

In der Abbildung 59 ist das *Theoretische Maschinenmodell* für die Referenzmaschine der Professur Fertigungstechnik DMG Mori CTX Alpha 500 abgebildet. Dieses wurde in Zusammenarbeit der Professuren Produktionsinformatik und Fertigungstechnik entwickelt. Auf dieses *Theoretische Maschinenmodell* stützen sich diverse Ansätze zur Reduzierung von Ressourcenbedarfen sowie die Planung der entsprechend notwendigen Messeinrichtungen. Mit diesem

Erarbeitung ressourcenorientierter Teilmodelle für die Fertigung hochbeanspruchter Bauteile als Grundlage innovativer Verfahrens- und Betriebsmittelmodelle

Vorgehen sollen spanende sowie nasschemische Bearbeitungsverfahren modellierbar und Zusammenhänge, die wesentlich für das Modell sind, erkannt werden.

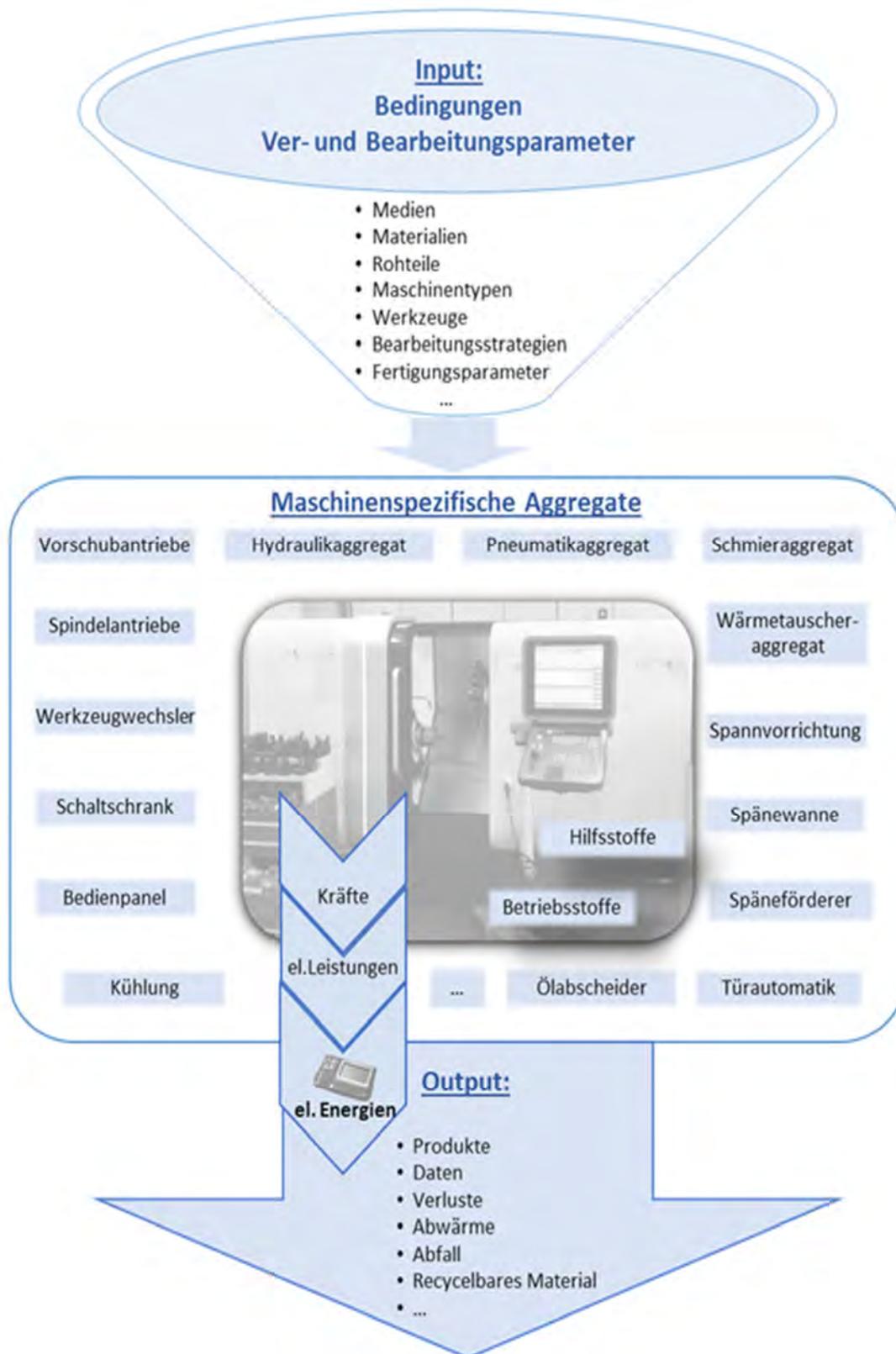


Abbildung 59: Theoretisches Maschinenmodell am Beispiel DMG Mori CTX Alpha 500

8.2 Beschreibung, Aus- und Bewertung der durchgeführten Versuche

8.2.1 Herangehensweise zur Datenerfassung für die Berechnung der Gesamtleistung der Maschine inklusive ihrer Komponenten

Zur Messung und Aufzeichnung der aufgenommenen Maschinenleistung werden eine Reihe von Lösungen hardware- sowie softwaretechnisch angeboten. Diese sind allerdings nicht in der Lage, die benötigte elektrische Maschinenleistung vorab zu planen. Hardwaretechnisch wird die elektrische Leistung i. d. R. mit im Schaltschrank zu verbauenden Energiemessgeräten gemessen. Diese sind jedoch standardmäßig nicht in jeder Maschine enthalten. Softwarelösungen hingegen beziehen die Leistungswerte aus gespeicherten Werten der Maschinensteuerung. Oftmals können hier aber auch externe Messgeräte eingebunden werden, die durch die Messung der Gesamtleistung die Validierung des Berechnungsmodells ermöglichen.

Aus diesem Grund erfolgte im Projekt pilothaft die Datenaufnahme an den Referenzmaschinen *EMCO Concept Turn 60* und *EMCO 120P* mit dem Ziel Berechnungsfunktionen für die bauteilspezifische Energiebedarfsprognose zu entwickeln. Das heißt, dass die Leistungsbedarfe der Maschine als Einheit in Abhängigkeit von unterschiedlichen Fertigungsfeatures, wie Fasen, Radien usw. mit variierenden Bearbeitungsparametern aufgenommen werden (vgl. Abbildung 61). Aus diesen ermittelten Daten und den darauf aufbauenden Regressionsanalysen werden Berechnungsformeln abgeleitet.

Das grobe Vorgehen bei der Datenaufnahme ist in Anlehnung an den DMAIC-Zyklus aus Six Sigma, beschrieben. Six Sigma ist eine Methodensammlung zur Problemlösung und Prozessverbesserung bzw. -optimierung. [48] Der DMAIC-Zyklus mit den 5 Phasen Define, Measure, Analyse, Improve und Control dient hierbei als eine Art Roadmap für den Problemlöseprozess. Dieser wird durch gezielte Fragestellungen und der methodischen Vorgehensweise unterstützt (Abbildung 60). Beispielsweise befasst sich die Phase *Measure* mit der Beschreibung des zu bewertenden Bearbeitungsprozesses, entsprechender Messmittel (Wirkleistungserfassung oder dem Druckluftbedarf), der Messkriteriendefinition (Betriebszuständen, Lastarten) oder der eigentlichen Datenaufnahme.

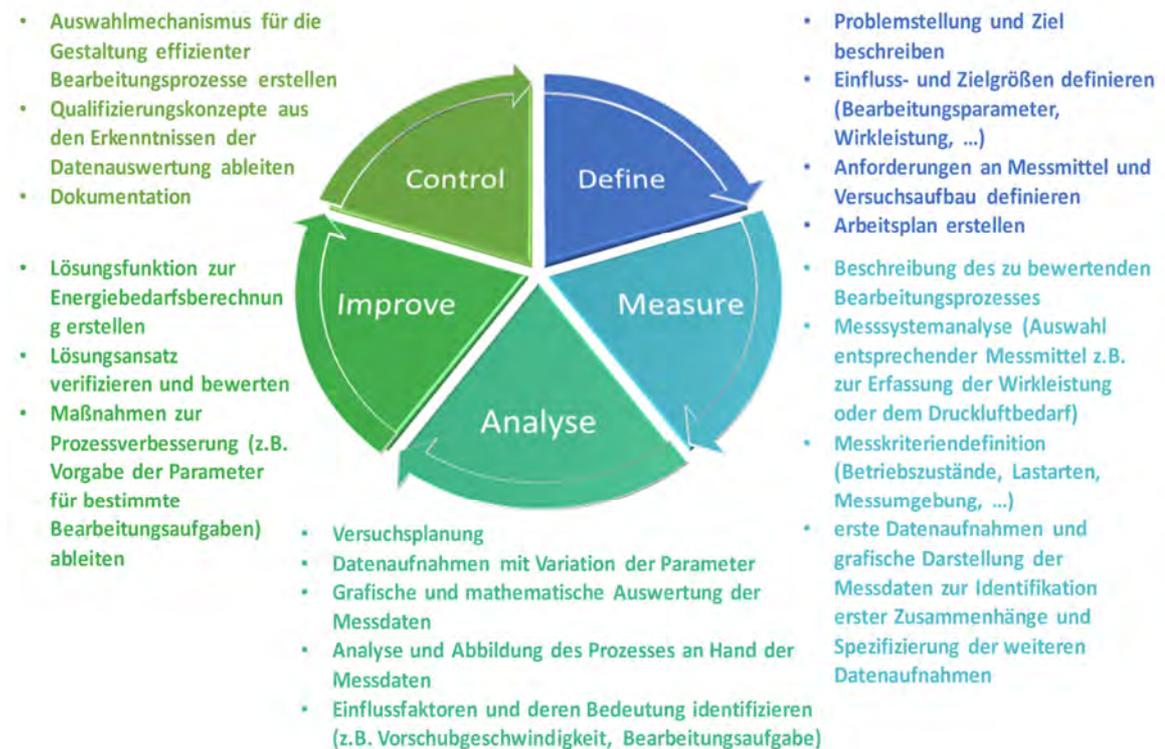


Abbildung 60: DMAIC-Zyklus für die Leistungsmessung und Datennutzung i.A.a. [48]

Für die Referenzmaschinen *EMCO Concept Turn 60* (nachfolgend EMCO CT60 genannt) und *EMCO 120P* wurden diese Phasen anhand des in Abbildung 61 dargestellten Referenzbauteils durchlaufen

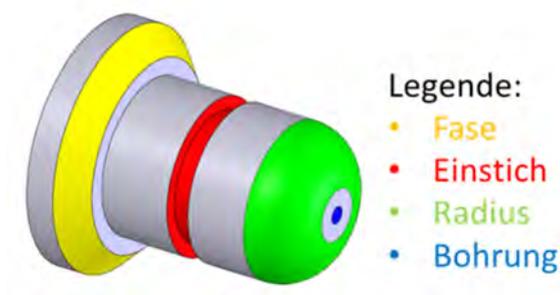


Abbildung 61: Referenzbauteil für Messungen an den Referenzmaschinen [51]

Die nachfolgende Tabelle 10 veranschaulicht die Phasen des DMAIC-Zyklus und den darauf aufbauenden den Lösungsweg zur Datenerfassung, -auswertung, Funktionserstellung und schließlich der Berechnung des Gesamtleistungsbedarfes der Referenzmaschinen. Darüber hinaus sind in der Tabelle 10 die Phasen und deren Inhalte für die für die oben genannten Referenzmaschine EMCO CT60 dargestellt. Die jeweiligen Daten zum Energiebedarf der Referenzmaschinen sowie die Versuchsanpassung und erneute Datenaufnahme (**Measure**)

wurden mit den im Abschnitten 8.2.2 (EMCO CT60) und 8.2.3 (EMCO 120P) beschriebenen Messsystem erfasst. Darüber hinaus erfolgte die Datenauswertung, die Identifikation der Einflussfaktoren und Untersuchung der gegenseitigen Einflussnahme sowie die Funktionserstellung (**Analyse**). Im weiteren Verlauf der Abarbeitung der Phasen des DMAIC erfolgte die Funktionserstellung und -überprüfung sowie die Entwicklung der ganzheitlichen, bauteilspezifischen Energiebedarfsprognose (**Improve**). Die Phasen Analyse und Improve wurden mit Hilfe der Tabellenkalkulationssoftware Microsoft Office durchgeführt.

Tabelle 10: Phasen DMAIC und Lösungsweg Referenzmaschine EMCO CT60 i.A.a. [48]

Phase - Inhalt	Lösungsweg
<u>Define</u>	Ziel: Berechnungsfunktion erstellen Messgrößen definieren Messmittel definieren Versuchsplan / Arbeitsplan erstellen
<u>Measure</u>	Datenaufnahme durchführen Ggf. Versuchsanpassung und erneute Datenaufnahme
<u>Analyse</u>	Datenauswertung Identifikation der Einflussfaktoren und Untersuchung der gegenseitigen Einflussnahme Funktionserstellung
<u>Improve</u>	Funktionserstellung und -überprüfung Entwicklung der ganzheitlichen, bauteilspezifischen Energiebedarfsprognose
<u>Control</u>	Überprüfung der ganzheitlichen, bauteilspezifischen Energiebedarfsprognose Dokumentation

Für die Versuche wurde das Material AlCuMgPb verwendet. Dabei handelt es sich um eine Aluminiumlegierung für effiziente Zerspanung und eignet sich demnach besonders für die Teilefertigung auf Werkzeugmaschinen sowie ohne den Einsatz von Kühlschmierstoff (KSS). Für die spätere Berechnung der spezifischen Schnittkraft sind die folgenden Werte aus [49] relevant:

- Tangens des Steigungswinkels $m = 0,82$
- Hauptwert der spezifischen Schnittkraft $kc_{1.1} = 510 \text{ N/mm}$

Zur Bearbeitung wurde eine Wendeschneidplatte (WSP) des Typs CCGT09T308-ALX gewählt. Diese WSP eignet sich für die Zerspaltung von Aluminiumwerkstoffen und verfügt über einen Plattenwinkel von 80° sowie einen Eckenradius von 0,8 mm. Das Werkzeug und die Werkzeugaufnahme bilden einen Einstellwinkel von 95° .

8.2.2 Datenerfassung, -auswertung und Formelgenerierung Energiebedarfsprognose für die Drehmaschine EMCO Concept Turn 60

Die EMCO Concept Turn 60 ist Bestandteil der Trainingsfabrik 4.0 der Fachgruppe Fertigungsorganisation und Qualitätssicherung.

Die technischen Daten sind folgende:

- Spindel-Drehzahlbereich 300- 4.200 [min^{-1}]
- Vorschubweg in X-Richtung von -25 bis 110mm
- Vorschubweg in Z-Richtung 85 bis 325mm

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 62 dargestellt und besteht grundsätzlich aus:

- dem Messgerät *Energy Logger 4000* (blau markiert)
- der CNC-Drehmaschine *EMCO Concept Turn 60* (gelb markiert)
- dem Steuerungs-PC (grün markiert)



Abbildung 62 Versuchsaufbau *EMCO CT60* [50]

Das Messgerät erfasst die Messwerte Spannung [V], die Leistung [W], den Energiebedarf [kWh], die Stromstärke [A] und die Netzfrequenz [Hz] und speichert diese im internen Speicher ab. In der Abbildung 63 ist das Energiemessgerät dargestellt. Weiterhin zeigt die Abbildung, die für die Modellbildung relevanten Daten, wie die Wirkleistung in Watt.



Abbildung 63: Messgerät

Zur Erfassung der Energiebedarfswerte wurde das Energieleistungsmessgerät *Voltcraft Energy Logger 4.000* (Abbildung 63) genutzt. Der *Energy-Logger 4.000* erfasst den Energiebedarf im internen Speicher. Die Daten können zur weiteren Analyse und Speicherung übertragen werden. Die Datenaufnahme erfolgt dabei in einem Messbereich von 1,5 bis 3.500 Watt. Eine Messung dieses Messgerätes ergab eine Messabweichung von unter 1%. Diese Genauigkeit ist für die Versuchszwecke ausreichend.

Grundsätzlich ist es für die spätere Berechnung der Leistungsaufnahme erforderlich die Leistungsbedarfe der Maschine während unterschiedlicher Lastarten, welche vom Betriebszustand abhängig sind, zu erfassen. Dabei erfolgt eine Einteilung der Lastarten in Einschalt-, Grund-, Bearbeitungs- und Ausschaltlast je nach Zustand der Maschine. Für die weiteren Betrachtungen sind Ein- und Ausschaltlast irrelevant, da sie lediglich einen sehr kurzen Zeitraum (wenige Sekunden) beim Ein- und Ausschalten der Maschine, einnehmen. Die Grundlast beschreibt den Leistungsbedarf einer eingeschalteten, betriebsbereiten Maschine, bei der alle Antriebe deaktiviert sind. Die Grundlast ist in der Regel konstant. Die Bearbeitungslast beschreibt den Zustand der Maschine, bei der die Antriebe je nach Bearbeitungsaufgabe aktiviert sind und ein spannender Eingriff vorliegen kann.

Die Datenaufnahme erfolgt analog dem in Abbildung 64 dargestellten Schema. Es werden im ersten Schritt die Leistungsdaten der Maschine erfasst, anschließend wird die Grundlast ermittelt und abschließend erfolgt die Aufnahme der maschinen- und bearbeitungsspezifischen Leistungsbedarfe.

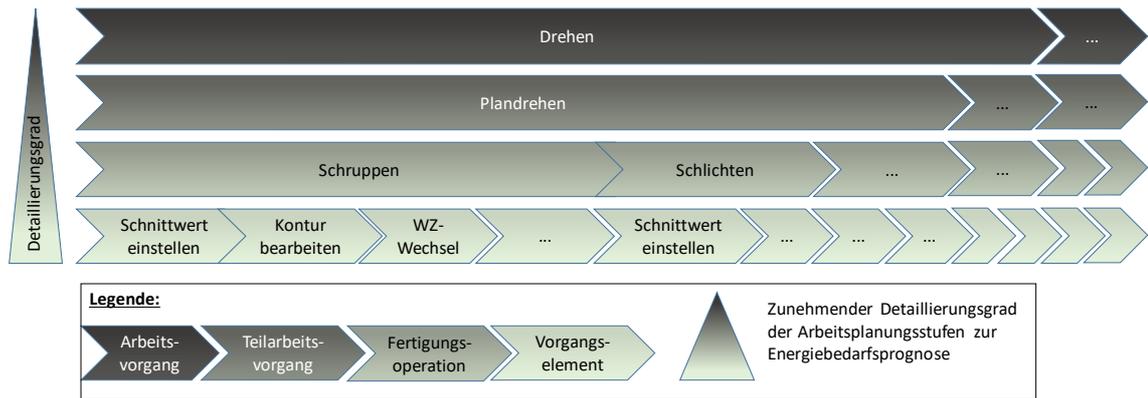


Abbildung 64: Prozessstruktur für Datenaufnahme an EMCO CT60 i.A.a. [80]

Während der Versuche wurden die Parameter elektrische Wirk- und Scheinleistung sowie der Leistungsfaktor dokumentiert. Für die Erarbeitung eines theoretischen Maschinenmodells ist die Fokussierung auf die Ermittlung der Wirkleistung empfehlenswert, da mit Hilfe der in der Literatur vorhandenen Berechnungsmodelle diese einfacher berechnet werden kann.

Mit Hilfe der Analyse und des prinzipiellen Vorgehens zur Leistungsdatenaufnahmen an einer 3-Achs-CNC-Fräsmaschine, sowie der Verwendung des abstrahierten Referenzproduktes wurde zunächst ein theoretisches Maschinenmodell erarbeitet. Auf dessen Grundlage erfolgte die Entwicklung eines Berechnungsmodells, welches die benötigte elektrische Maschinenleistung planbar machen soll. Für die Prognose der erforderlichen elektrischen Maschinenleistung mittels Berechnungsmodell gibt es grundlegende Ansätze, wie bspw. die Berechnung der spezifischen Schnittkraft F_c oder der Zerspanungsleistung P_c . Die Berücksichtigung der Berechnungen von Leistungen, Kräften und Hauptnutzungszeiten während des Drehprozesses (vgl. Formeln (8-1) bis (8-6)) sind zur Entwicklung der Berechnungsfunktionen zwingend erforderlich [53]. Diese ergeben sich aus den in der Fachliteratur [53] verfügbaren, zum Teil größenzugeschrittenen Formeln. Da es für jedes Formelement wie Nuten, Fasen etc. andere Berechnungsformeln gibt, soll nachfolgend exemplarisch auf die Berechnung des Längsdrehens eingegangen werden, um ein allgemeines Verständnis zu schaffen.

Parameter des Maschinenmodells mit Maßeinheiten	Formel	Erklärung
Spez. Schnittkraft (k_c): (N/mm ²)	$k_c = \frac{k_{c1.1}}{h^m}$	(8-1) $k_{c1.1}$ = Hauptwert der spez. Schnittkraft (N / mm ²) h = Spanungsdicke (mm) m = Tangens des Steigungswinkels
Spanungsdicke (h): (mm)	$h = f * \sin \kappa$	(8-2) f = Vorschub (mm / 1) κ = Werkzeugeinstellwinkel (°)
Spanungsbreite (b): (mm)	$b = \frac{a_p}{\sin \kappa}$	(8-3) b = Spanungsbreite (mm) a_p = Schnitttiefe (mm)
Schnittkraft (F_c): (N)	$F_c = b * h * k_c * K_{y0} * K_v * K_{sch} * K_{ver}$	(8-4) K_{y0} = Spanwinkelkorrektur K_v = Schnittgeschwindigkeitskorrektur K_{sch} = Schneidstoffkorrektur K_{ver} = Verschleißkorrektur
Schnittleistung (P_c): (kW)	$P_c = \frac{F_c * v_c}{1.000 \frac{mm}{min} * 60 \frac{sec}{min}}$	(8-5) F_c = Schnittkraft (N) v_c = Schnittgeschwindigkeit (m / min)
Hauptzeit (Bearbeitungszeit) (t_h): (min)	$t_h = \frac{L * D * \pi * i}{f * v_c * 1000 \frac{mm}{min}}$	(8-6) L = Drehweg (mm) D = Drehdurchmesser (mm) i = Anzahl Schnitte

Mit Hilfe der Modellierung sind die Leistungs- und Energiebedarfe für die einzelnen Bearbeitungsoperationen (z. B. Radian), die während der Bearbeitung des Bauteils auftreten, prognostizierbar. Dazu müssen jedoch alle Komponenten der Maschine, deren Lastarten sowie Betriebszustände oder die Einflussgrößen wie Verfahrbewegungen u. dgl. definiert aber auch quantifiziert werden. So ist exemplarisch die Messreihe für den Leistungsbedarf der Spindel nachfolgend in Abbildung 65 abgebildet.

Spindeldrehzahl [min ⁻¹]	Wirkleistung [W]		
	Max	Min	Mittel.
300	196,4	197,2	196,8
600	222,8	223,7	223,25
900	247,9	248,5	248,2
1200	276,2	278	277,1
1500	309,7	311	310,35
1600	321,5	322,3	321,9
1700	332,6	333,7	333,15
1800	327,1	328	327,55
1900	317,3	318,5	317,9
2000	308	309,2	308,6
2100	300,2	301	300,6
2200	294,8	297	295,9
2300	290,6	291,5	291,05
2400	285,9	288,4	287,15
2700	278,7	280	279,35
2800	276,3	277,7	277
2900	276,2	277,8	277
3000	275,7	276,4	276,05
3100	274,8	276,9	275,85
3200	275,4	276,2	275,8
3300	275,1	276,8	275,95
3400	276,3	277,4	276,85
3500	276,7	278,2	277,45
3600	277,6	279,1	278,35
3900	291,3	293	292,15
4200	304,2	300,3	302,25

Abbildung 65: Messdaten Leistungsbedarf Spindel EMCO CT60 [50]

Ausgehend von den dazu notwendigen Messwerten, die während der zahlreichen Datenaufnahmen gesammelt wurden, konnten bspw. leistungsbedingte Zusammenhänge zwischen Verfah- und Schnittbedingungen hergestellt und verdichtet werden.

Die Abbildung 66 zeigt bspw. die Regressionsanalyse für die Abbildung der Abhängigkeit der Wirkleistung von der Spindeldrehzahl. In der Abbildung sind neben den Trendlinien selbst auch die zugehörigen Funktionen und deren Bestimmtheitsmaß R^2 (bezeichnet den durch ein mathematisches Modell erklärten Anteil der Gesamtvariabilität der Daten) abgebildet. Die Abbildung 66 macht zugleich deutlich, dass der elektrische Leistungsbedarf der Spindel nur unzureichend durch eine einzige Funktion beschrieben werden kann, da die Abweichungen der errechneten Leistungswerte von den bereinigten Messwerten (aufgenommener Gesamtleistungsbedarf abzüglich der Grundlast) zu groß werden. Aus diesem Grund erwies es sich als sinnvoll, den Drehzahlbereich der Spindel in Abschnitte einzuteilen, um eine hinreichend genaue Beschreibung des elektrischen Leistungsbedarfes über den gesamten Drehzahlbereich der Maschine sicherstellen zu können. Somit wurden unter Berücksichtigung der

Bestimmtheitsmaße und der berechneten Leistungswerte eine Unterteilung in zwei Abschnitte vorgenommen. Um das Bestimmtheitsmaß so groß wie möglich werden zu lassen und damit die Prognosegenauigkeit im Hinblick auf den zu erwartenden Energiebedarf zu erhöhen, ist es sinnvoll die Auflösung des zu betrachtenden und zumessenden Wertebereiches fein genug zu gliedern, um beispielsweise auch Unstetigkeitsstellen infolge von Schaltvorgängen von Getrieben (vgl. Abbildung 66 bei 1.700min⁻¹) abbilden zu können.

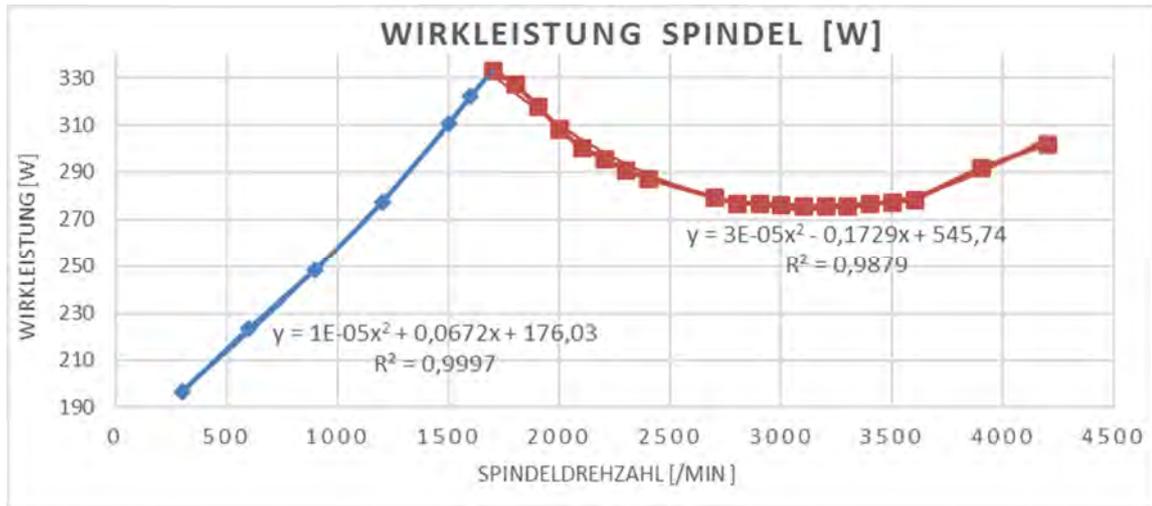


Abbildung 66: Regressionsanalyse zur graphischen Darstellung des Leistungsbedarfs Spindel EMCO CT60 [50]

Nach diesem Prinzip erfolgten weitere Messungen für die Verfahrensbewegungen der Achsen mit und ohne Bearbeitung des Werkstücks. Die Formel für den Gesamt-Leistungsbedarf (P_{VE}) je Vorgangselement (i mit $i=1; 2; \dots; n$) beinhaltet den jeweils gemessenen Grundbedarf der Maschine (P_G), den spezifischen Leistungsbedarf der Spindel (P_S), den spezifischen Leistungsbedarf der Verfahrensbewegungen der Achsen (P_A), den bearbeitungsaufgaben-spezifischen Korrekturfaktor (P_K) sowie die, auf der Grundlage des Vorhersagemodells von Kienzle berechnete, Schnittleistung (P_C) (vgl. Abbildung 64, Formel (8-7)). Die Korrekturfaktoren dienen z. B. zur Berücksichtigung möglicher Schwankungen bei den Verfahrensbewegungen der Achsen.

$$P_{VE} = P_G + P_S + P_A + P_C + P_K \quad (8-7)$$

Daraus resultierend kann mit der nachfolgenden Formel (8-8) der Gesamtenergiebedarf, basierend auf dem Leistungsbedarf je Vorgangselement (P_{VEi}) sowie dem dafür bestimmten Zeitbedarf je Vorgangselement (t_{VEi}) für die Fertigung eines Bauteils ermittelt werden [47].

$$E_{VE} = \sum_{i=1}^n P_{VEi} * t_{VEi} \quad (8-8)$$

Die sich daraus ergebende Komplexität und die Vielzahl der durchgeführten Versuche basiert auf dem Umstand, dass alle Maschinenkomponenten während unterschiedlicher Bearbeitungszustände gemessen wurden. Auf der Grundlage der gesammelten Daten und den dokumentierten Zusammenhängen ist es möglich, den elektrischen Leistungsbedarf während unterschiedlicher Betriebszustände und Bearbeitungsoperationen sehr genau zu prognostizieren.

8.2.3 Datenerfassung, -auswertung und Formelgenerierung Energiebedarfsprognose für die Drehmaschine EMCO 120P

Die Drehmaschine EMCO 120P (vgl. Abbildung 67) ist Bestand des CNC-Labors der Fachgruppe Fertigungstechnik. Die technischen Daten sind folgende:

- Drehzahlbereich: 150-4000 U/min
- Max. Drehmoment: 23 Nm
- Eilganggeschwindigkeit in Z/X-Achse: 3m/min
- Umlaufdurchmesser über Bett: 180 mm
- Umlaufdurchmesser über Planschlitten: 75 mm
- Größte Drehlänge: 160 mm
- DC-Antriebsmotor, Leistung: 4,0 kW
- Werkzeugsystem: 8fach Werkzeugrevolver



Abbildung 67: Komponenten der Drehmaschine EMCO 120P [51]

Da die EMCO 120P mit Dreiphasenwechselstrom (400 V) versorgt wird, musste die Datenaufnahme mit einem dem Messgerät **KEW 6315** durchgeführt werden (Abbildung 68). Mit diesem Messgerät lassen sich alle benötigten Messwerte mit einer Genauigkeit von +/- 0,3% rdg („Reading“) und einer minimalen Abtastrate von einem Wert pro Sekunde auslesen und in der bereitgestellten Software auswerten.



Abbildung 68: Messgerät KEW 6315 und zugehöriger Software [51]

Der Versuchsaufbau ist nachfolgend abgebildet (Abbildung 69) und beinhaltet folgende Elemente:

- Maschine EMCO 120P (gelb markiert),
- Steuerungseinheit (grün markiert) und
- Messgerät KEW 6315 (rot markiert) inkl. dem Adapterkabel.

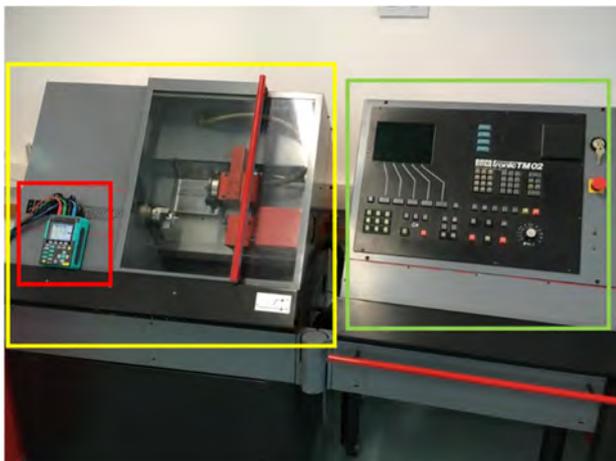


Abbildung 69: Versuchsaufbau [51]

Das Vorgehen zur Datenaufnahme und Auswertung gleicht grundsätzlich dem beschriebenen Vorgehen im Punkt 8.2.2 Datenerfassung, -auswertung und Formelgenerierung Energiebedarfsprognose für die Drehmaschine EMCO Concept Turn 60.

Für die mathematische Modellierung der zu fertigenden Formelemente wurden die Fertigungsverfahren Längsdrehen, Plandrehen und Formdrehen (bezogen auf das Formelement Fase) zur Untersuchung festgelegt. Damit ist gleichzeitig die Auswertung der horizontalen, vertikalen und diagonalen Achsen-Verfahrenbewegungen möglich.

So wurden folgende Messreihen aufgenommen:

- Grundlast der Maschine
- Leistungsbedarf der Spindel ohne Bearbeitung
- Leistungsbedarf X- Achse horizontal, vertikal und diagonal verfahren ohne Bearbeitung
- Leistungsbedarf Z- Achse horizontal, vertikal und diagonal verfahren ohne Bearbeitung
- Leistungsbedarf bei der Bearbeitung in Abhängigkeit von der Schnitttiefe, Spindeldrehzahl und dem Achsvorschub (vgl. Tabelle 11)

Ein Auszug aus der Messreihe zur Ermittlung des Leistungsbedarfs bei der Bearbeitung in Abhängigkeit von der Schnitttiefe, Spindeldrehzahl und dem Achsvorschub zeigt die grobe Orientierung an den Herstellerangaben bei der Auswahl der Bearbeitungsparameter (Schnitttiefe; Schnittgeschwindigkeit und daraus abgeleitet, die Drehzahl und der Achsvorschub). Dabei stellt der Faktor 100% (grüne Markierung in der Tabelle 11) die Empfehlung des Herstellers dar. Ausgehend von diesen Empfehlungen, wurden für jeden Parameter 80 % und 120 % berechnet, um das Versuchsfeld größer zu gestalten und zu ermitteln, wie sich die Leistungsbedarfe bei Veränderung der Parameter entwickeln.

Tabelle 11: Leistungsbedarf Bearbeitung EMCO 120P [51]

Schnitttiefe	Faktor	Drehzahl Spindel	Achsvorschub
	80 %	1680 U / min	0,08 mm / U
0,6 mm	100 %	2100 U / min	0,1 mm / U
	120 %	2510 U / min	0,12 mm / U
	80 %	1680 U / min	0,08 mm / U
0,8 mm	100 %	2100 U / min	0,1 mm / U
	120 %	2510 U / min	0,12 mm / U
	80 %	1680 U / min	0,08 mm / U
1,0 mm	100 %	2100 U / min	0,1 mm / U
	120 %	2510 U / min	0,12 mm / U

In der Tabelle 12 ist der Leistungsbedarf für das Längsdrehen dargestellt. In der zugehörigen grafischen Auswertung (Abbildung 70) lässt sich erkennen, dass es neben den bekannten Abhängigkeiten der Leistung von der Spindeldrehzahl und der Vorschubgeschwindigkeit auch eine Abhängigkeit von der Schnitttiefe gibt. Denn mit steigender Schnitttiefe, steigt auch die benötigte Leistung für den spanenden Vorgang.

Tabelle 12: Leistungsbedarf Längsdrehen (tabellarisch) [51]

Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]	Vorschubgeschwindigkeit [mm/U]	Wirkleistung [W]			Drehzahl [U / min]
		Min	Max	Mittel	
ap = 0,6 mm					
134	0,08	869,0	876,9	873,0	1680
210	0,10	947,6	995,0	971,3	2100
301	0,12	1074,0	1085,0	1079,5	2510
ap = 0,8 mm					
134	0,08	916,2	934,4	925,3	1680
210	0,10	1016,0	1041,0	1028,5	2100
301	0,12	1171,0	1181,0	1176,0	2510
ap = 1,0 mm					
134	0,08	959,3	991,3	975,3	1680
210	0,10	1075,0	1090,0	1082,5	2100
301	0,12	1262,0	1297,0	1279,5	2510

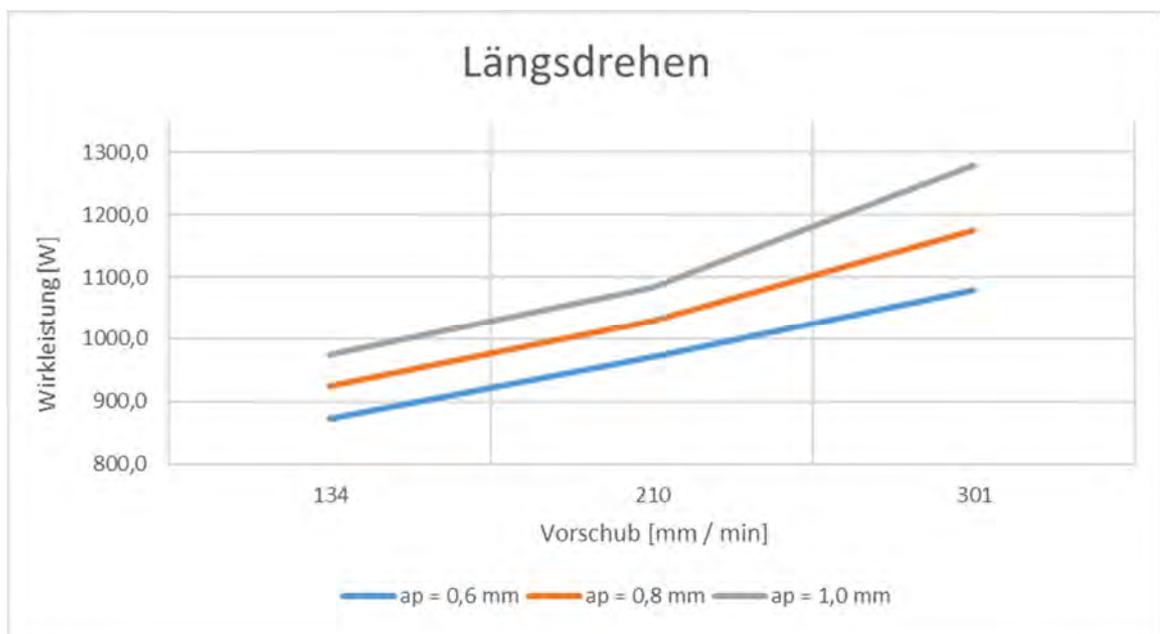


Abbildung 70: Leistungsbedarf Längsdrehen (graphisch) [51]

Die Formelgenerierung erfolgt analog dem Vorgehen im Punkt 8.2.2 (vgl. Formeln (8-7) und (8-8)).

Maschinenleistungsbedarf = Grundlast + Leistungsbedarf der Spindel + Leistungsbedarf der Achsenbewegung (8-9)

8.2.4 Integration der Funktionen in ein wissensbasiertes System

8.2.4.1 Implementierung der modellierten Funktionen im „Produktkonfigurator“

Das theoretische Konzept, basierend auf den Modellansätzen im Abschnitt 8.1, Abbildung 57 und den Maschinenversuchen, wurde in der Entwicklungsumgebung camos.Develop umgesetzt. Es erreicht eine hinreichend genaue Vorhersage der verfahrensbedingten Wirkleistung. Somit können bereits vor der physischen Fertigung rotationssymmetrischer Bauteile die Bearbeitungsparameter Energiebedarfe ausgewertet werden und eine energieeffiziente Bearbeitung geplant werden.

Die Implementierung erfolgte durch die Erweiterung des „Produktkonfigurator“. Der Produktkonfigurator ist eine, an der Professur Produktionsinformatik entwickelte wissensbasierte Anwendung zur Konfiguration von Produkten und Fertigungsprozessen. Die Nutzung dieser bereits bestehenden Anwendung bringt sowohl Vor- als auch Nachteile mit sich. Die bestehende Klassenstruktur der Wissensbasis stellt den größten Vor- und Nachteil dar. Die bereits bestehende Klassenstruktur erspart Zeit bei der Erarbeitung der Energiebedarfsvorhersage, da das Anlegen der Klassen und Merkmale entfallen. Allerdings entstehen durch diese bereits bestehenden Strukturen auch Restriktionen, die beim Programmieren beachtet werden müssen.

Die Abbildung 71 zeigt das Modell, welches sich aus dem Aufbau des „Produktkonfigurator“ und der Energiebedarfsvorhersage ergibt.

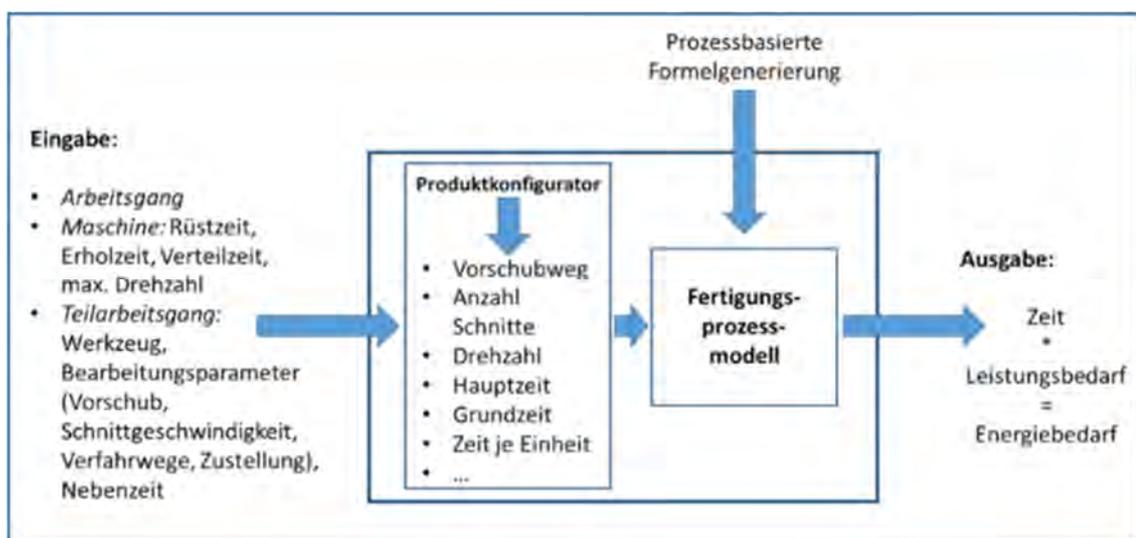


Abbildung 71: Modell zur Erweiterung des "Produktkonfigurators" [51]

8.2.4.2 Detailkonzeption des Planungsablaufs als Basis für die wissensbasierte Programmierung

Für ein besseres Verständnis und als Grundlage zur Programmerstellung wurde ein Ablaufdiagramm für die Planung und Bewertung spanender Fertigungsprozesse aus energetischer Sicht konzipiert (siehe Abbildung 72). Die Erstellung dieses Modells erfolgte allgemeingültig und ist somit für jede Fertigungsfolge anwendbar. Da die mathematischen Formeln zur Berechnung der einzelnen Komponenten abhängig vom jeweiligen (Teil-)Arbeitsgang sind, werden diese nicht im Modell dargestellt. [51]

Diese Vorgehensweise bietet die Chance zum energetischen Vergleich von Fertigungsvarianten. Darüber hinaus werden die Auswirkungen infolge der Substitution von Werkzeugen und / oder Bearbeitungsparametern auf den Energiebedarf bewertbar, wodurch dem Ziel der systematischen Reduzierung von Ressourcenbedarfen Rechnung getragen wird. Die Vorgehensweise bildet somit einen Bestandteil der im Projekt MoQuaRT verfolgten Zielstellung eines Gesamtmodells.

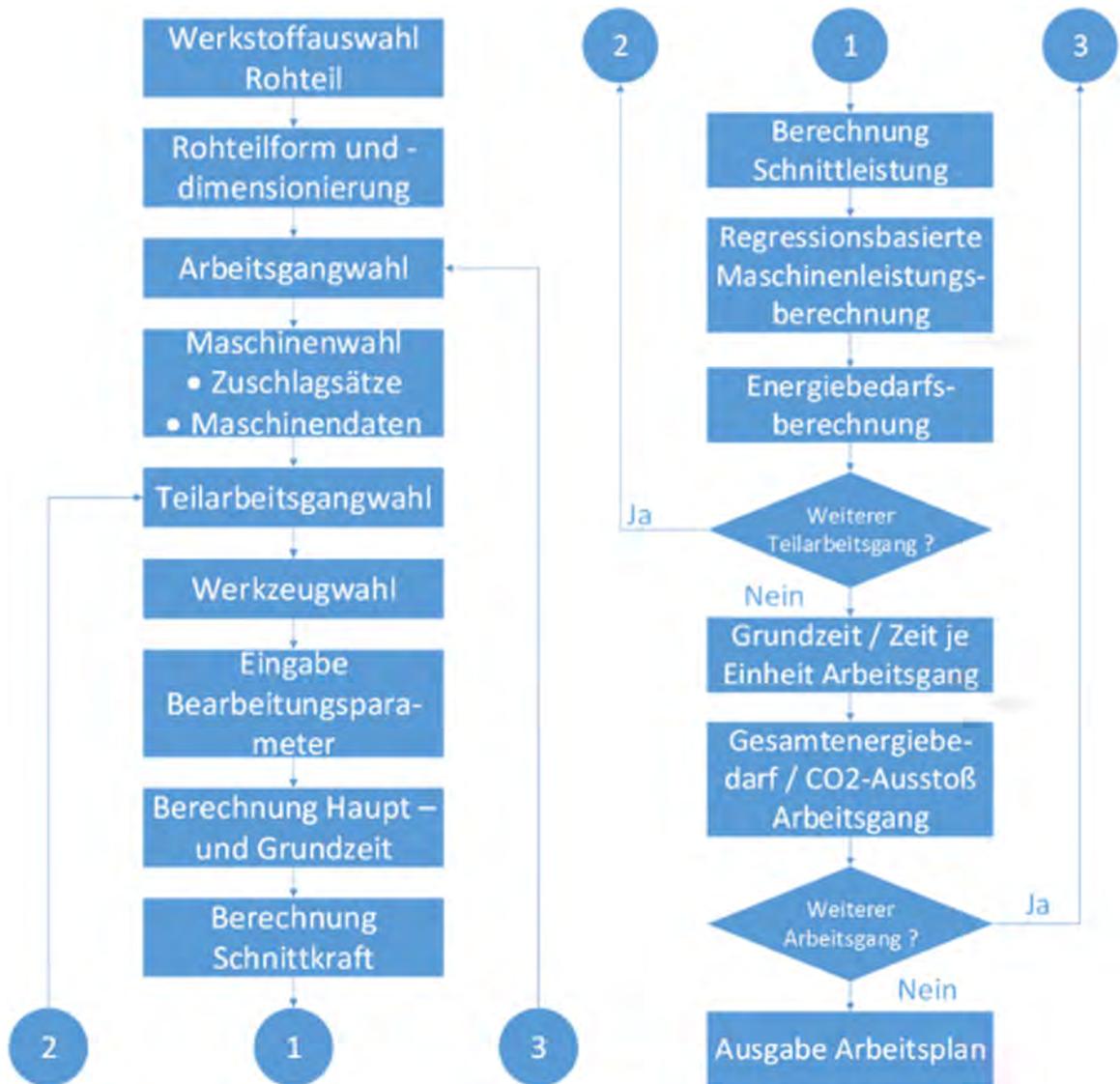


Abbildung 72: Ablaufdiagramm des Planungsprozesses [51]

8.2.4.3 Test der Vorhersagegüte und Umsetzung im wissensbasierten System

Das angepasste wissensbasierte System „Produktkonfigurator“ wurde im Verlauf getestet und somit die Vorhersagegüte der Ergebnisse bewertet. Dabei wurden für diverse spannende Versuche die rechnerisch ermittelten Leistungswerte mit den tatsächlich gemessenen Leistungswerten verglichen. In der Tabelle 13 sind die Ergebnisse der Maschinenversuche und der Programmberechnung sowie die Differenzen beider für das Längsdrehen dargestellt.

Tabelle 13: Gesamtleistungsbedarf Längsdrehen; gemessen und berechnet [51]

Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]	Vorschubgeschwindigkeit [U/min]	gemessene Wirkleistung [W]			Drehzahl [1/min]	Berechnete Wirkleistung [W]	Betrag berechnet/gemessen [W]	Differenz [%]
		min	max	Mittel				
ap=0,6mm								
134	0,08	869,00	876,90	872,95	1.680,00	858,12	14,83	1,70
210	0,10	947,60	995,00	971,30	2.100,00	887,22	84,08	8,66
301	0,12	1.074,00	1.085,00	1.079,50	2.510,00	944,47	135,03	12,51
ap=0,8mm								
134	0,08	916,20	934,40	925,30	1.680,00	896,06	29,24	3,16
210	0,10	1.016,00	1.041,00	1.028,50	2.100,00	942,42	86,08	8,37
301	0,12	1.171,00	1.181,00	1.176,00	2.510,00	1.019,15	156,85	13,34
ap=1,0mm								
134	0,08	959,30	991,30	975,30	1.680,00	934,01	41,29	4,23
210	0,10	1.075,00	1.090,00	1.082,50	2.100,00	997,60	84,90	7,84
301	0,12	1.262,00	1.297,00	1.279,50	2.510,00	1.093,83	185,67	14,51

In der Tabelle 13 ist erkennbar, dass alle Werte die festgelegte max. gewünschte Abweichung von 20 % einhalten. Damit kann das Programm zur Vorhersage des Leistungsbedarfs in den gemessenen Bereichen der Bearbeitungsparameter als fähig angesehen werden, da der maximale Betrag der Abweichung sich auf 14,51 % beläuft.

Für das Längsdrehen lässt sich bei steigendem Vorschub und einer steigenden Drehzahl ein starker Anstieg der Differenz zwischen gemessener und berechneter Wirkleistung feststellen. Beim Plandrehen sinkt die Differenz unter denselben Voraussetzungen. Ein eindeutiger Grund für dieses gegensätzliche Verhalten lässt sich mit den bisherigen Erkenntnissen nicht definieren, jedoch erscheint eine Kausalität mit den Achsenbewegungen nicht ausgeschlossen.

Die generierten Formeln wurden in camos.Develop, innerhalb des „Produktkonfigurators“ integriert. Neben der Hinterlegung der Berechnungsformeln erfolgte eine Überarbeitung und Anpassung der Benutzeroberfläche und der Programmstruktur, sodass eine Leistungsbedarfs- und Energiebedarfsvorhersage für die (Teil)- Arbeitsgänge möglich wurde. Damit ist der Anwender in der Lage nach erfolgter Eingabe aller erforderlichen Maschinendaten und der Beschreibung des Fertigungsprozesses (z. B. durch Anlegen der Maschinen, Werkzeuge, Arbeitsgänge, usw.) erfolgt die Berechnung der Haupt- und Nebenzeiten sowie des Energiebedarfs vorzunehmen. Die Abbildung 73 zeigt hierfür die Auswertansicht.

The screenshot shows a software interface with the following sections:

- Submaske** (Title bar)
- Werkzeuge** | **Allgemeines** | **Hauptzeit** | **Edit Modus** (Navigation tabs)
- Berechnung der Hauptnutzungszeit** (Main Calculation Section):
 - Drehweg [mm] → **Drehweg2**
 - Drehdurchmesser [mm] → **Drehdurchmesser3**
 - Anzahl Drehschnitte → **Anzahl_Schnitte_Dr**
 - Drehvorschub [mm] → **Vorschub_Drehen**
 - Schnittgeschwindigkeit [m/min] → **Schnittgeschwindig**
 - Hauptnutzungszeit Drehen [min] → **Hauptnutzungszeit**
- Eingabe Nebenzeit [min]** (Input Section):
 - Nebenzeit → **Nebenzeit**
 - errechnete Grundzeit [min] → **errechnete Grundzeit**
 - Grundzeit1 → **Grundzeit1**
- Energiebedarf** (Energy Requirement Section):
 - Schnittkraft = **E_Schnittkraft** [N]
 - Formel: $\text{Schnittkraft} = \text{Spannungsdicke} \cdot \text{Spannungsbreite} \cdot \text{spez. Schnittkraft}$
 - Formel: $\text{Schnittkraft} = \text{Spanwinkelkor.} \cdot \text{Schnittgeschw.kor.} \cdot \text{Schneidstoffkor.} \cdot \text{Verschleißkor.}$
 - Schnittleistung = **E_Schnittleistung** [kW]
 - Formel: $\text{Schnittleistung} = (\text{Schnittkraft} \cdot \text{Schnittgeschw.}) / (1000 \cdot 60)$
 - Maschinenleistung = **E_Maschinenleistung** [kW]
 - Formel: $\text{Maschinenleistung} = \text{Grundlast} + \text{Spindelleistung} + \text{Achsenleistung}$
 - Energiebedarf = **E_Leistungsb** [kWh]
 - Formel: $\text{Energiebedarf} = (\text{Schnittleistung} + \text{Maschinenleistung}) \cdot \text{Hauptnutzungszeit} / 60$

Abbildung 73: Umsetzung des Modells im "Produktkonfigurator" [51]

8.2.5 Berechnung der Leistungsdaten auf Komponentenebene der Maschinen

Diese alternative Herangehensweise zur Prognose des elektrischen Leistungsbedarfs der Maschine basiert auf der Modellierung des energetischen Verbrauchs der einzelnen Komponenten. Die Abbildung 74 veranschaulicht die typische Aufteilung des Leistungsbedarfes von Werkzeugmaschinen nach Komponenten.

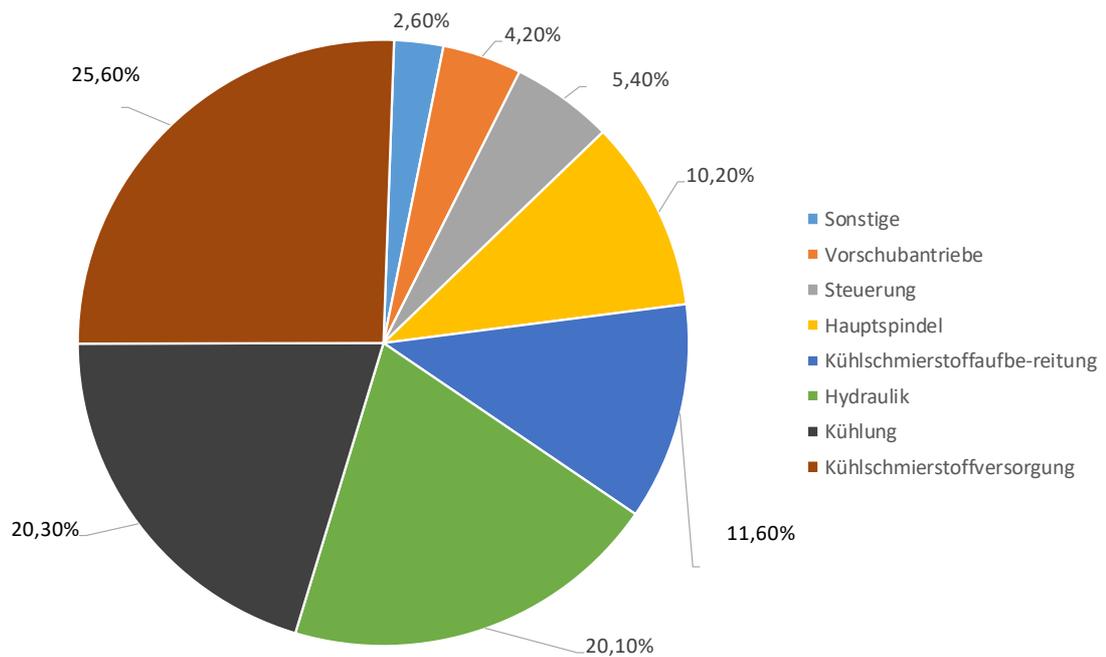


Abbildung 74: Typische Energiebedarfsaufteilung von Werkzeugmaschinen nach [54]

Zur genaueren Betrachtung der typischen Energiebedarfsaufteilung ist die komponentenorientierte Analyse der Werkzeugmaschinen erforderlich. Diese Analyse wurde allgemein mittels Abbildung aller enthaltenen Komponenten einer Drehmaschine in einem Komponentenbaum durchgeführt (Abbildung 75). Dabei zeigen die grün hinterlegten Felder die Hauptbaugruppen der Werkzeugmaschine, die blauen Felder die Komponenten und die gelben Felder stellen die möglichen energetischen Verbraucher der jeweiligen Komponente dar.

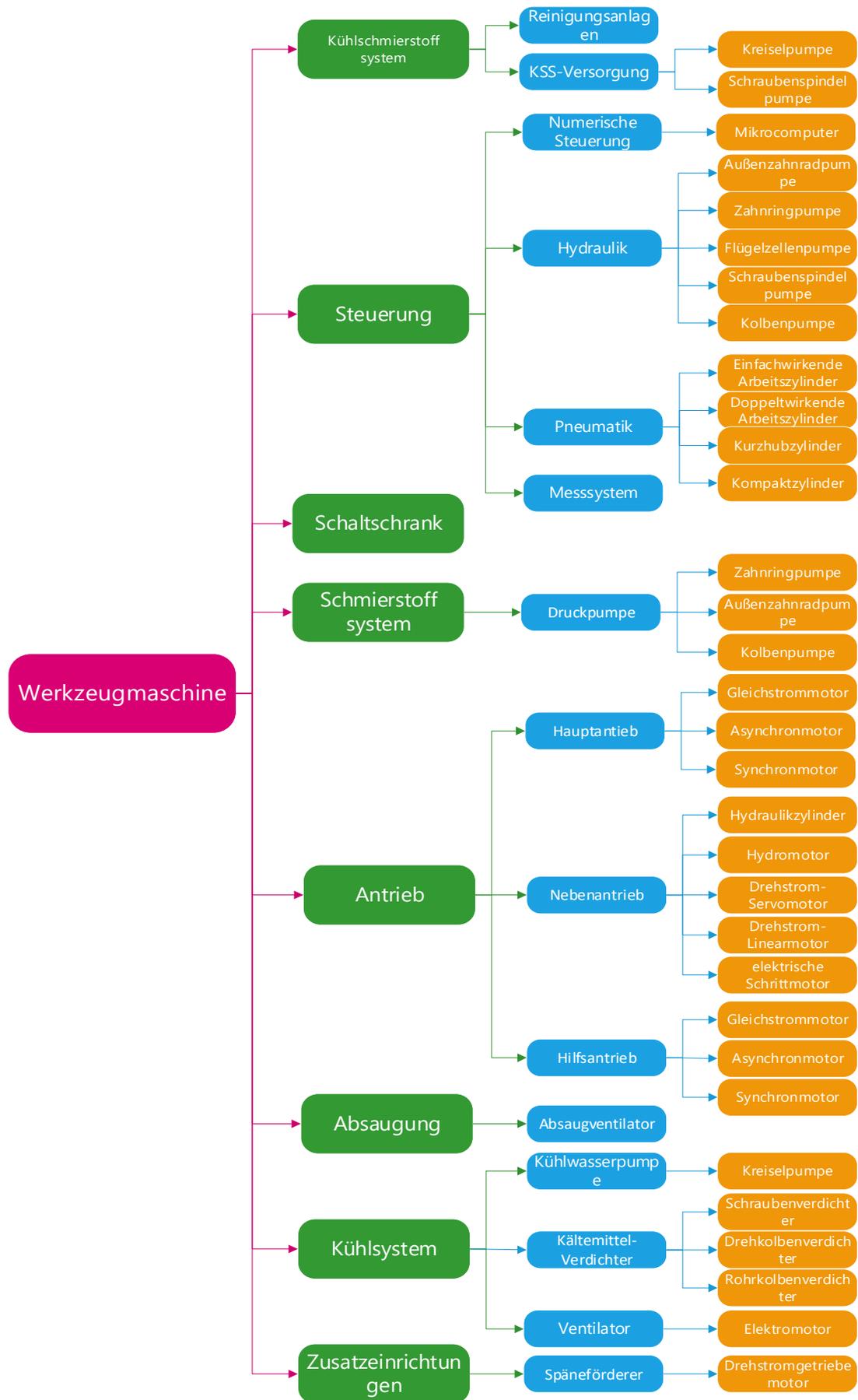


Abbildung 75: Komponentenbaum allgemeine Werkzeugmaschine [92]

Bei der Betrachtung der Leistungsbedarfe der einzelnen Komponenten ist die Berücksichtigung der Betriebszustände und Lastarten (Abbildung 76) von Werkzeugmaschinen bzw. Drehmaschinen besonders wichtig um eine Aussage über die entsprechenden Leistungsbedarfe treffen zu können.

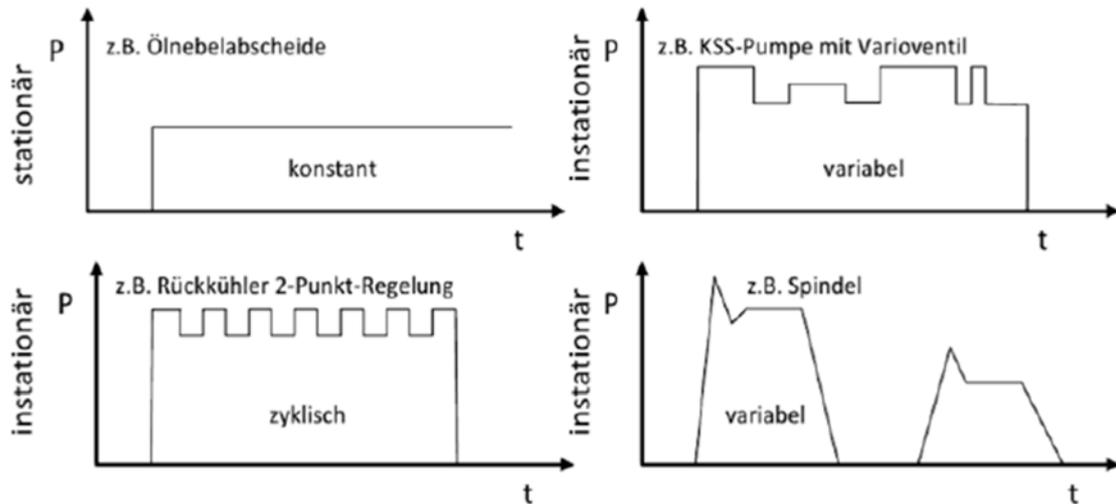


Abbildung 76: Lastarten nach [55]

„Die Nutzungsprofile der einzelnen Baugruppen sind in stationäre und instationäre Zustände unterteilt. Einen konstanten Leistungsbedarf, unabhängig vom Betriebszustand der Maschine, haben meist Nebenaggregate bzw. Hilfsantriebe mit einer festen Drehzahl. Dazu zählen z. B. Absaugeinrichtungen, Spanförder-Systeme sowie Kühl- und Schmierstoffeinrichtungen. Diese vom Fertigungsprozess entkoppelten Baugruppen sind verantwortlich für die Grundlast der Werkzeugmaschine und stellen in unproduktiven Phasen die energetischen Hauptverbraucher dar.“ [55]

Nach Betrachtung der Komponenten der Referenzmaschine *CTX Alpha 500* erfolgte die Auseinandersetzung mit den entsprechenden Leistungsdaten laut Hersteller).

Exemplarisch soll dieses Vorgehen am Beispiel der Hydraulikpumpe der *CTX Alpha 500*, einer Eintauchpumpe MTR 1-22/22 A-W-A-HUUV vom Hersteller Grundfos, veranschaulicht werden. Bei dieser Pumpe handelt es sich um eine Kreiselpumpe mit einem Volumenstrom von 14 l/min und einer stationären Leistungsänderung (siehe dazu Abbildung 76). Auf der Internetseite des Herstellers [56] kann die Leistungskennlinie der Pumpe eingesehen und ihr Leistungsbedarf am Betriebspunkt (mit einem Volumenstrom von 14 l/min) ausgegeben werden, wie in Abbildung 77 dargestellt ist. Dieser Leistungsbedarf beträgt 942,8 W.

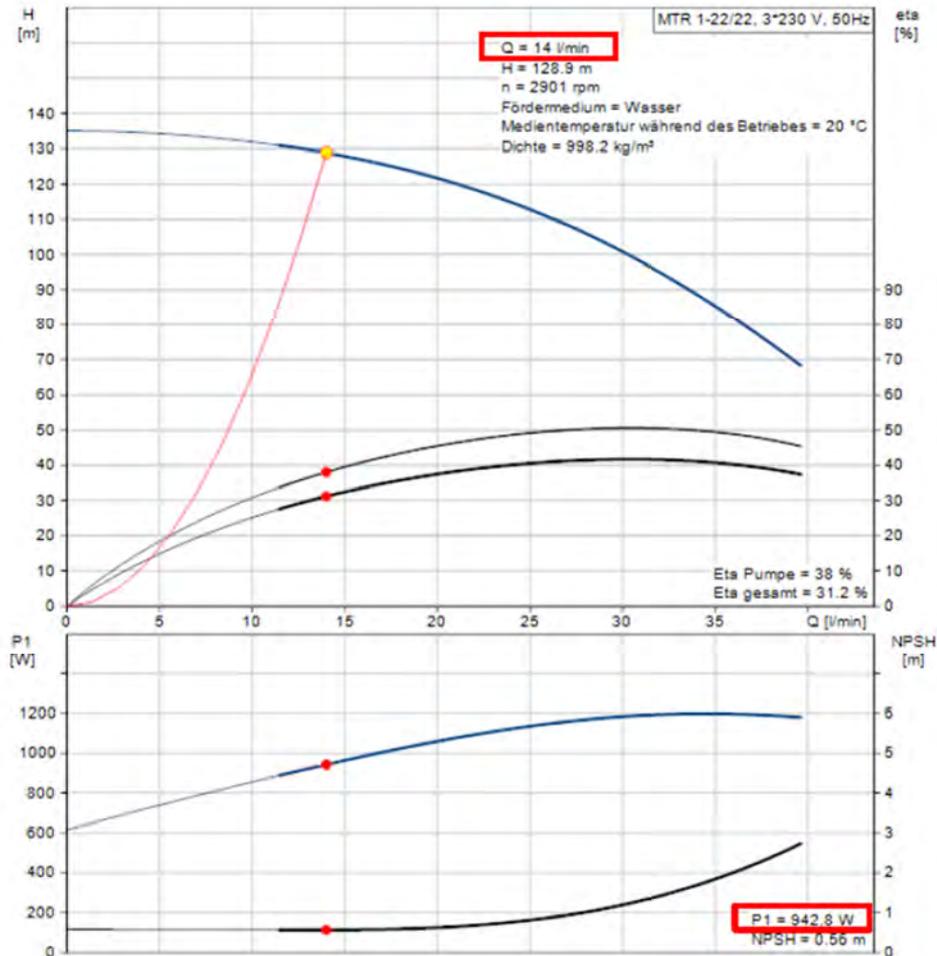


Abbildung 77: Leistungskennlinie von Hydraulikpumpe [56]

Nach Untersuchung der Wirkungsweisen der einzelnen Komponenten wurden die Ergebnisse zusammengefasst und in der Tabelle 14 hinterlegt.

Tabelle 14: Übersicht Leistungsbedarfe der Komponenten des Dreh-Bearbeitungszentrum CTX Alpha 500 [92]

Baugruppe	Ergebnisse	
	Modell [W]	Messung [W]
Hydraulik	942,8	942,4
Lüfter	370,0	285,3
Schmierstoffsystem	115,0	-
Kühlsystem	870,0	-
KSS-Pumpe	-	1.002,3
Gesamtmaschine	-	4.447,9

Durch die kurze Bearbeitungszeit dieser Untersuchung im Rahmen einer Bachelorarbeit und die fehlenden Informationen durch den Maschinenhersteller der Drehmaschine *CTX Alpha 500*, konnte das Modell aktuell nicht abgeschlossen werden.

Außerdem wurde deutlich, dass hier ein erheblicher Analyse- und Versuchsaufwand generiert wird. Die energetische Modellierung auf Komponentenebene unter Berücksichtigung der jeweils erforderlichen Komponentenleistung kann zukünftig wohl nur von Herstellern oder Inverkehrbringern effektiv erfolgen.

Allerdings bietet dieser Ansatz erhebliches Potenzial für genaue Energiebedarfsprognosen wie auch der Vergleich der gemessenen und ermittelten Daten zeigt. Mit diesem Vorgehen kann der Gesamtenergiebedarf durch die Berechnung des Energiebedarfs der einzelnen Komponenten ermittelt werden. Weiterhin besteht durch gezielte Betrachtung bzw. Beobachtung der einzelnen Komponenten und ihrer Energiebedarfsschwankungen die Möglichkeit Wartungen gezielter vorzunehmen und bevorstehende Ausfälle der Komponenten zu erkennen. Somit kann mit diesem Ansatz nicht nur der Energiebedarf vorherbestimmt und ggf. schon im Entwicklungsprozess der Maschine berücksichtigt werden, sondern es können auch nachhaltig Energie und Kosten eingespart werden. Es bleibt auch hier die Anforderung, den Fertigungsprozess detailliert vorzuplanen um teilespezifisch energetische Prognosen aufstellen zu können.

9

Beitrag zur Erarbeitung innovativer Verfahrens- und Betriebsmittelmodelle (CAM-basiert) als Simulationsansatz ressourcenorientierter Qualifizierungskonzepte und deren Umsetzung in Virtual Reality

9.1 Einleitung

Im Folgenden wird die Erstellung einer Maschinensimulation in Virtual Reality (VR) auf Basis von CAM-Daten als Teilansatz für ein ressourcenorientiertes Qualifizierungskonzept beschrieben. Um dies zu erreichen, soll eine real existierende CNC-Fertigungsmaschine mit ihrer zugehörigen Software als Ansatz dienen. Davon ausgehend muss zunächst geklärt werden, wie die Datenaufnahme/-ausgabe der relevanten Bewegungen etc. in einem Format realisiert werden kann, dass für die zu verwendende Software für die Erstellung und Interaktion von und mit virtuellen Welten nutzbar ist.

Anschließend können für ein definiertes Musterteil verschiedene Bearbeitungsstrategien und -parameter an der realen Maschine verfahren und bestimmte Parameter (z. B. Zeit, Oberflächenrauheit, Energieverbrauch) alphanumerisch aufgenommen werden. Die daraus resultierende Datenbank kann dann zusammen mit den Bewegungsdaten etc. in einer virtuellen Umgebung verknüpft und graphisch ausgegeben werden.

Im Ergebnis entsteht so eine virtuelle Lernumgebung der realen Maschine, bei der der Nutzer anhand vordefinierter Rahmenbedingungen verschiedene Bearbeitungsparameter ändern kann und deren Einfluss auf verschiedene Merkmale wie Bearbeitungsdauer, Oberflächengüte und Energieverbrauch vermittelt bekommt. Dies dient als Teil eines Qualifizierungskonzeptes, bei dem die Nutzer die Bearbeitungsparameter (im vorgegebenen Rahmen) verändern und deren Einfluss auf das Werkstück oder die Bearbeitung selbst beobachten, ohne die Gefahr einer Beschädigung der Maschinen oder des Menschen selbst. Auch können

kleinräumige, langsame oder schnelle Vorgänge visualisiert und von Menschen bewertet werden [97].

Nach Wiendahl und Fiebig [57] wird Virtual Reality als die „visuelle Präsentation und Manipulation von 3D-Daten in Echtzeit“ bezeichnet. Zudem wird VR durch Immersion (realitätsnahe Darbietung und Wahrnehmung), Interaktion (Beeinflussung und Veränderung) und Imagination (Erleben als quasi reale Welt) charakterisiert [58].

Zur Erstellung der Lernumgebung in VR wurde die Software IC.IDO der ESI Software Germany GmbH eingesetzt. Die Software IC.IDO ermöglicht mithilfe technischer Systeme (z. B. einer Powerwall) virtuelle Welten darzustellen und zu nutzen. Die Software ist in der Lage dreidimensionale Objekte stereoskopisch darzustellen und ermöglicht es dem Nutzer mit diesen zu interagieren.

IC.IDO ist modular aufgebaut. Die Basis der Software bildet das Modul IDO.Explore. Dieses stellt die Standard-Oberfläche der Software sowie den Viewer für die Desktop- und VR-Systeme dar. Für die Erstellung der hier beschriebenen Lernumgebung wurden zudem die Module IDO.Script, IDO.SolidMechanics und IDO.Present verwendet.

IDO.Script ist ein auf der Programmiersprache Python basierendes Modul und ermöglicht es Aktionen und Sensoren zu programmieren und zu steuern. Die im Projekt eigens programmierten Sensoren können u. a. individuell definierte Eingabeparameter erkennen, und daraufhin vordefinierte Ereignisse auslösen.

IDO.SolidMechanic ist ein Modul mit einem echtzeitfähigen Physik-Solver, der eine physikalisch korrekte Simulation von Objekten unterstützt. Es lassen sich sowohl Mehrkörpersysteme als auch kinematische Ketten simulieren. Des Weiteren kann mit jedem Simulationsobjekt interagiert werden.

IDO.Present bietet als Erweiterung zu IDO.Explore das Aufzeichnen von Bauteilbewegungen, das Aufnehmen von Kamerabewegungen und die Erstellung von Animationen mit Objekten aus anderen Modulen, z. B. IDO.SolidMechanics. Zudem ermöglicht IDO.Present zuvor gespeicherte Aufzeichnungen / Animation durch ein Sensor-Element interaktiv abzuspielen.

9.2 Grundlagen zur Erstellung einer Maschinensimulation in VR

9.2.1 Benötigte Komponenten

Für eine Maschinensimulation mit möglichst hoher Prozessabsicherung werden folgende Komponenten benötigt:

- Werkstück/Rohteil,
- NC-Programme (G-Code),
- Benötigte Werkzeuge,
- Erforderliche Vorrichtungen,
- Zu verwendende Maschine und
- Kinematik der Maschine. [59]

9.2.2 Ablauf zur Erstellung

Der in Abbildung 78 dargestellte Ablaufplan stellt den groben Ablauf zur Erstellung einer eigens entwickelten Maschinensimulation in VR dar.

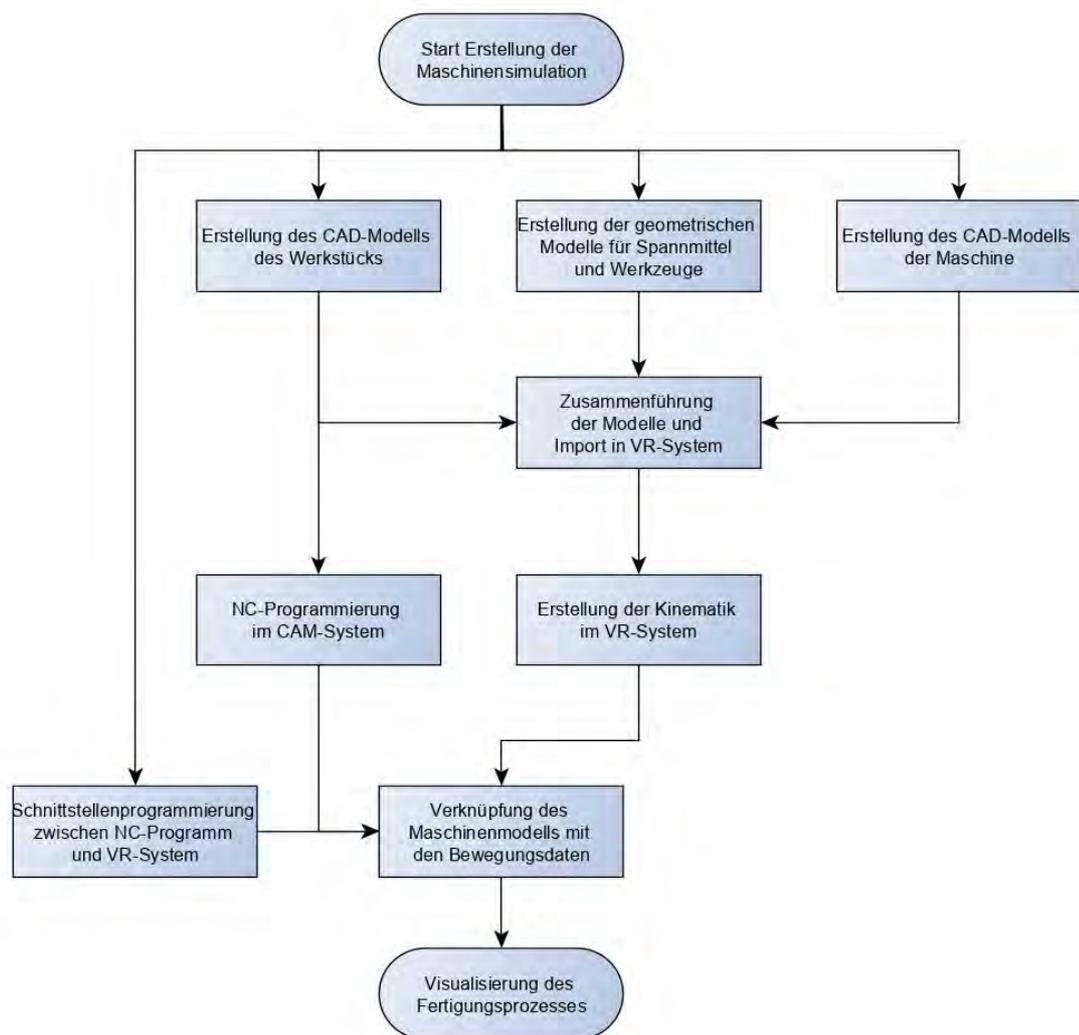


Abbildung 78: Ablaufplan zur Erstellung einer Maschinensimulation

Für den Aufbau der Maschinensimulation werden zunächst die CAD-Modelle des Werkstücks, der Spannmittel und Werkzeuge sowie das CAD-Modell der Maschine, welche verwendet werden soll zusammengetragen. Diese Modelle werden entweder selbst konstruiert

oder vom jeweiligen Hersteller geliefert und anschließend in einer CAD-Baugruppe zusammengeführt. Innerhalb dieser Baugruppe ist es nun erforderlich, einen Ausgangszustand (Positionierung Achsen, Werkzeuge und des Werkstücks) zu definieren und alle Elemente entsprechend auszurichten. Dies ist notwendig, da die verwendete VR-Software IC.IDO nur begrenzte Möglichkeiten zur exakten Anordnung eines definierten Ausgangszustandes bietet und der Ausgangszustand als Grundlage für die Programmierung der Schnittstelle zwischen NC-Programm und VR-Software dient. Das so entstandene CAD-Modell wird in die VR-Software IC.IDO importiert und das kinematische Modell der Maschine darin aufgebaut.

Des Weiteren muss der zu simulierende Fertigungsprozess des Werkstücks modelliert werden. Hierfür wird das CAD-Modell des Werkstückes in eine CAM-Software überführt und die einzelnen Fertigungsschritte angelegt. Aus dem daraus entstehenden Arbeitsplan kann anschließend mithilfe des Postprozessorlaufes das NC-Programm erzeugt werden.

Abschließend wird für die Maschinensimulation noch ein funktionsbasiertes Steuerungsmodell benötigt. Dieses Modell muss zunächst die Funktion besitzen, NC-Programme einzulesen und diese Daten für die Visualisierungssoftware in verwertbare Bewegungsinformationen umzuwandeln. Des Weiteren ist es notwendig, dass das Steuerungsmodell in der Lage ist, diese Bewegungsinformationen mit den Teil-Geometrien bzw. den Knoten des kinematischen Maschinenmodells zu verknüpfen. Die Funktionen dieses Steuerungsmodells wurden mit einer eigens programmierten Schnittstelle umgesetzt.

9.3 Modellaufbereitung in CAD

9.3.1 Werkstück

Zur Ausführung der Maschinensimulation wird zunächst ein Bauteil benötigt, welches bearbeitet werden soll. Die Wahl fiel auf die Schachfigur *Bauer* (Abbildung 79), da dieses Beispiel zahlreiche Geometrielemente aufweist. Zusätzlich wird die Schachfigur von 2 Seiten mit verschiedenen Werkzeugen bearbeitet. In der Lehre der Professur Produktionsinformatik wird es bereits angewendet und ist somit fertigungstechnisch sehr gut erschlossen. So existieren neben der technischen Zeichnung auch alle notwendigen Angaben zum Rohteil, den Werkzeugen, sowie NC-Programme, mit denen die Schachfigur real gefertigt wird.

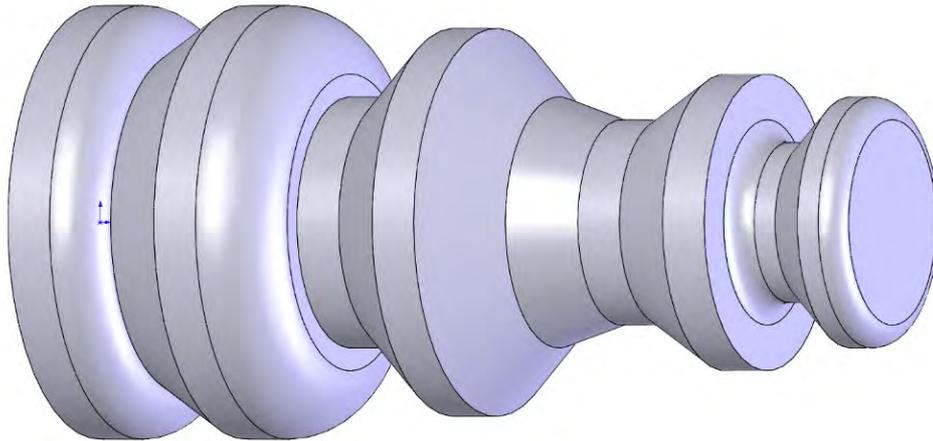


Abbildung 79: Modell der Schachfigur Bauer

9.3.2 Werkzeuge

Zur Fertigung des Bauers werden insgesamt vier Komplett-Werkzeuge benötigt. Darunter befinden sich drei Drehmeißel, zusammengesetzt jeweils aus Wendeschneidplatte und passendem Halter. Des Weiteren wird ein Zentrierbohrer mit Einspannhülse verwendet. Eine detaillierte Auflistung der Werkzeuge ist in Tabelle 15 zu finden. Dabei entspricht die Werkzeugnummer der tatsächlichen Position des Werkzeuges im realen Werkzeughalter der Drehmaschine.

Tabelle 15: Übersicht verwendeter Werkzeuge

<u>Werkzeugnummer</u>	<u>Werkzeug bzw. Wendeschneidplatte</u>	<u>Halter</u>
1	Wendeschneidplatte: CCMT 090304	SCLCR 1616H09
2	Zentrierbohrer: Typ A; d=3,15; HSS; DIN 333	Einspannhülse
3	Wendeschneidplatte: VBMT160404	SVJBR 1616H16
5	Wendeschneidplatte: VBMT160404	SVJBL 1616H16

9.3.3 Entwicklung des Maschinen-Modells für die CNC-Drehmaschine

Wabeco CC-D 100

Um eine Maschinensimulation in der VR-Software IC.IDO umzusetzen wird neben dem Referenzbauteil noch eine Maschine mit zugehörigem Modell benötigt. Hier wurde sich für die CNC-Drehmaschine Wabeco CC-D 100 entschieden, welche ein Teil der Trainingsfabrik der Professur Produktionsinformatik ist. Grund hierfür war die hohe Verfügbarkeit der Maschine, der notwendigen Basis-Daten sowie der einfache Aufbau der Maschine, welcher die Schnittstellenprogrammierung vereinfacht.

Die Werkzeuge wurden entsprechend ihrer realen Position mit dem Werkzeughalter verknüpft. Für den Ausgangszustand des CAD-Modells wurde der Werkzeughalter so positioniert, dass das Werkzeug der Position T1 ausgewählt ist und der gesamte Werkzeugschlitten sich auf Höhe der im NC-Programm definierten Rückzugsposition ($x=50\text{mm}$; $z=100\text{mm}$) befindet. Dies ist notwendig, da die NC-Programme des Referenz-Bauteils an der Rückzugsposition beginnen. Zudem arbeitet die verwendete VR-Software immer mit einer relativen Verschiebung vom Ursprungsort des zu bewegendes Objektes, was somit schon berücksichtigt wird.

Zur Positionierung der Objekte in CAD ist noch zu beachten, dass die Koordinaten der Rückzugsposition, wie auch alle Koordinaten innerhalb des NC-Programms sich auf die Werkzeugspitze (Schnittpunkt zwischen der Werkzeug-Bezugsebene, Schneiden-Ebene und Spanflächen-Ebene (vgl. Abbildung 80)) des im Eingriff befindlichen Werkzeugs bezieht [vgl. 53]. Dem entsprechend wurde für jedes Werkzeug die Werkzeugspitze in einer Skizze konstruiert, wodurch eine exakte Positionierung im Maschinen-Modell ermöglicht wird.

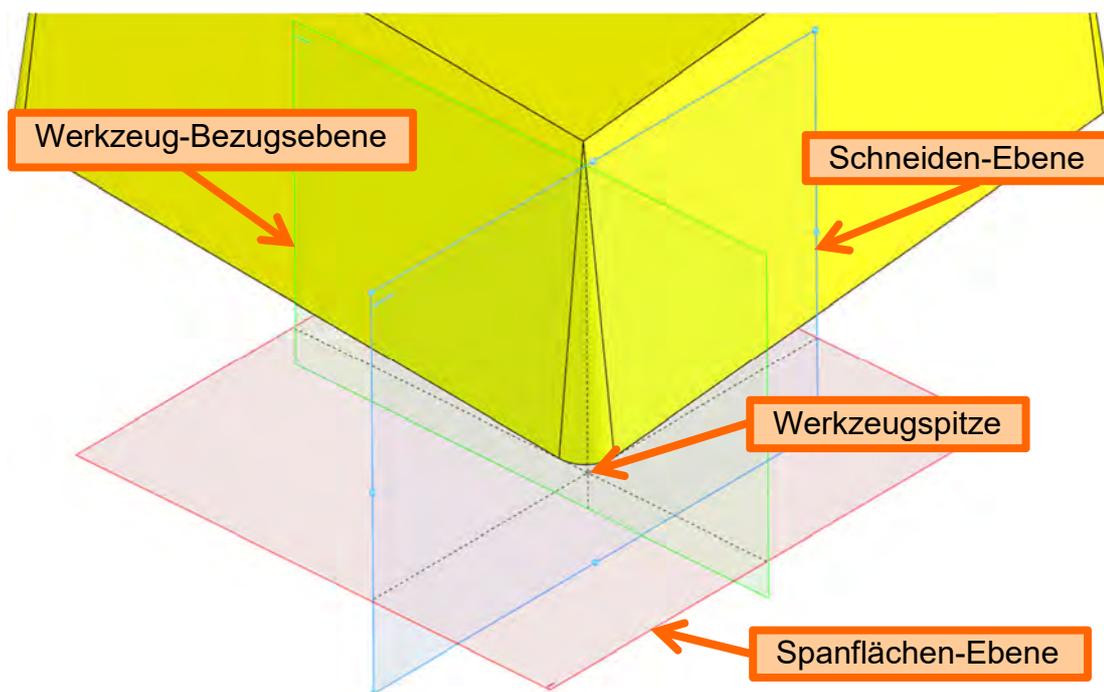


Abbildung 80: Ebenen-Beziehungen und Werkzeugspitze an einer Wendeschneidplatte [62]

Das so entstandene Gesamtmodell der Maschine inklusive der Werkzeuge bietet den Ausgangspunkt für die Übernahme und weitere Aufbereitung in der Software IC.IDO als Visualisierungs- und Simulationsplattform im Virtual Reality System und somit auch für die zu erstellende Maschinensimulation (vgl. Abbildung 81).

Die Bauteile der Drehmaschine können in feste und bewegliche Bauteile untergliedert werden (Abbildung 82). Feste Bauteile (Maschinengehäuse, Unterbau, Führungen des Werkzeugschlittens) werden für Simulation und Animation von Bewegungen nicht benötigt, sind aber vor allem für Kollisionsanalysen und eine immersive Darstellung notwendig. Die beweglichen Bauteile lassen sich in drei Komponenten unterscheiden. Die Tür wird für die Simulation von Rüstprozessen benötigt. Die Spindel führt eine Rotationsbewegung aus und wird bei der Simulation der Werkzeugwege ebenfalls mit simuliert. Da das Backenfutter und das Werkstück mit der Spindel verbunden sind, können diese der Spindel zugeordnet werden. Der Werkzeugschlitten gliedert sich in drei Bestandteile: ein Teil für die Translation in X, ein Teil für die Translation in Z und ein Teil für die Rotation beim Werkzeugwechsel.

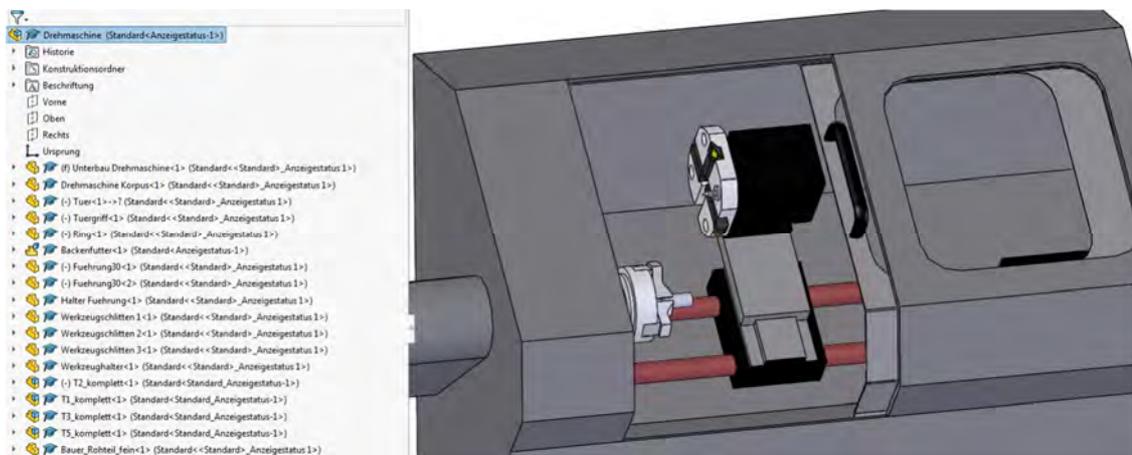


Abbildung 81: Aufgebautes Gesamtmodell der Wabeco CC-D 100 in CAD

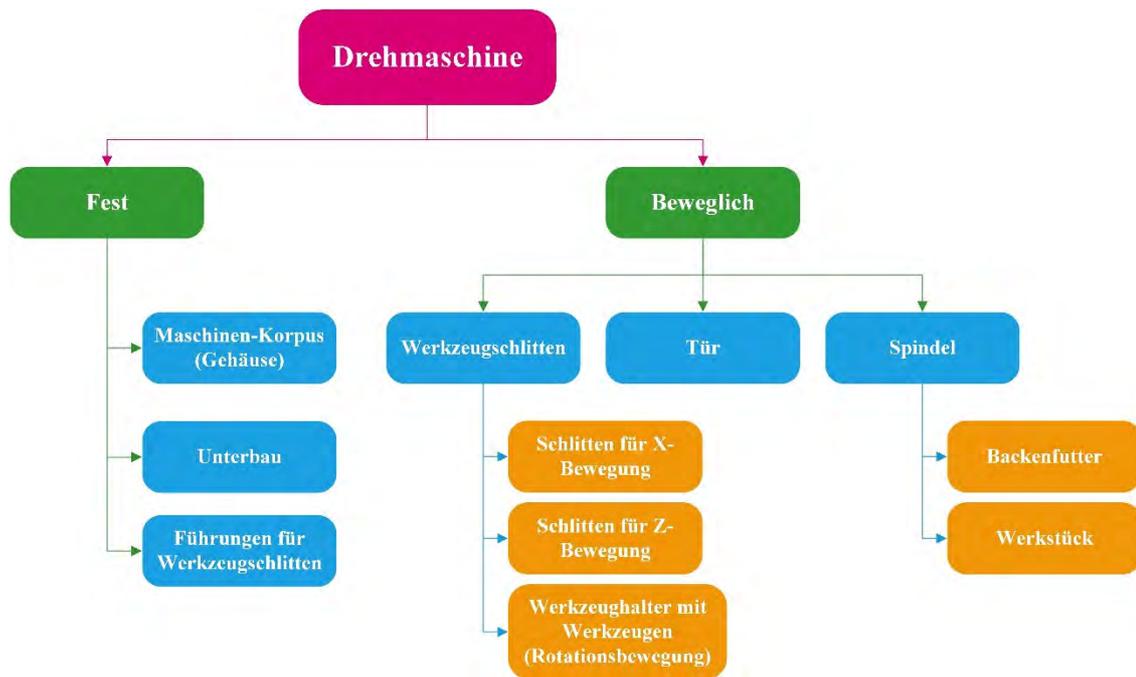


Abbildung 82: Komponentenbaum des Gesamtmodells

9.4 Aufbereitung eines Demonstrators in CAMWorks

9.4.1 Allgemeine Vorgehensweise

Zur Erstellung des CNC-Programms wurde die in SolidWorks vollständig integrierte CAM-Software CAMWorks verwendet. Diese setzt auf featurebasierte Bearbeitungen und kann teilweise Feature am Bauteil automatisch erkennen. Zudem ist eine umfassende Datenbank integriert, welche die Bearbeitungsstrategien und -parameter enthält. So werden sich wiederholende Programmieraufgaben verringert und der Zeitaufwand für die Programmierung sinkt deutlich.

Zur NC-Programmgenerierung in CAMWorks wird zunächst ein Bauteil in SolidWorks modelliert oder importiert und anschließend innerhalb der CAMWorks-Oberfläche die Maschine und das Rohteil festgelegt. Darauf aufbauend können die Bearbeitungsfeature festgelegt werden, wobei hierfür sowohl die automatische, als auch die interaktive Feature-Erkennung genutzt werden kann. Auf die Erstellung der Bearbeitungsfeature folgt die Erzeugung des Arbeitsplanes. Dadurch werden Bearbeitungsoperationen angelegt und darauffolgend die zugehörigen Werkzeugwege erzeugt und simuliert.

Der „Arbeitsplan“ in CAMWorks ist dabei nicht zu verwechseln mit einem Arbeitsplan als Dokument, welches den Herstellungsprozess eines Bauteiles oder einer Baugruppe in Arbeits-

und Teilarbeitsgängen beschreibt. Arbeitspläne im Sinne der Fertigungsprozessgestaltung enthalten:

- Daten zur eindeutigen Zuordnung der Fertigungstechnologie zur Konstruktion (Einzelteil, Baugruppe oder Produkt) und deren Klassifizierung
- Art und Menge des benötigten Materials
- Beschreibung der Arbeitsvorgänge mit Angaben zu Maschinen / Arbeitsplätzen, Werkzeugen, Vorrichtungen, Zeitbedarf, Entgeltgruppe u. ä.
- Dokumentenbezogene Daten, z. B. Erstellung, Freigabe, Gültigkeit
- Auftragsabhängige Daten, z. B. Losgröße, Termine.

Dem gegenüber beinhaltet der „Arbeitsplan“ in CAMWorks nur Bearbeitungsoperationen eines Arbeitsvorganges, welche alle notwendigen Informationen für den Postprozessor zur NC-Programmgenerierung bereitstellen. Hierzu gehören neben den zu verwendenden Werkzeugen auch alle zur Erzeugung des Werkzeugwegs notwendigen Parameter (z. B. Schnittstrategie, Vorschubgeschwindigkeit, Schnitttiefe, ...), welche anschließend noch angepasst werden können.

Die erzeugten Werkzeugwege werden in den Bearbeitungsoperationen automatisch hinterlegt. Die Werkzeugwegsimulation zeigt die relative Bewegung des Werkzeuges zum Werkstück an. Das bedeutet, dass weder Informationen bezüglich der Steuerung, noch die Maschinenkinematik (z. B. Maschinenachsen, Vorrichtungen) berücksichtigt werden.

Mithilfe der Ergebnisse aus der Simulation der Werkzeugwege können Rückschlüsse bezüglich dieser und der Bearbeitung des Bauteils getroffen werden. Sollte hier festgestellt werden, dass die Werkzeugwege nicht den Anforderungen entsprechen (z. B. Art der Anfahrt- und Rückzugswege oder Eintrittsmethode) oder das Bauteil noch nicht vollständig bearbeitet wurde, so müssen entweder die Operationsparameter angepasst oder zusätzliche Bearbeitungsoperationen erstellt werden. Abschließend erfolgt ein Postprozessorlauf, indem das maschinen- und steuerungsspezifische NC-Programm nach DIN 66025 generiert wird. Dieser Ablauf der NC-Programmgenerierung mit CAMWorks ist in Abbildung 83 zum besseren Verständnis dargestellt.

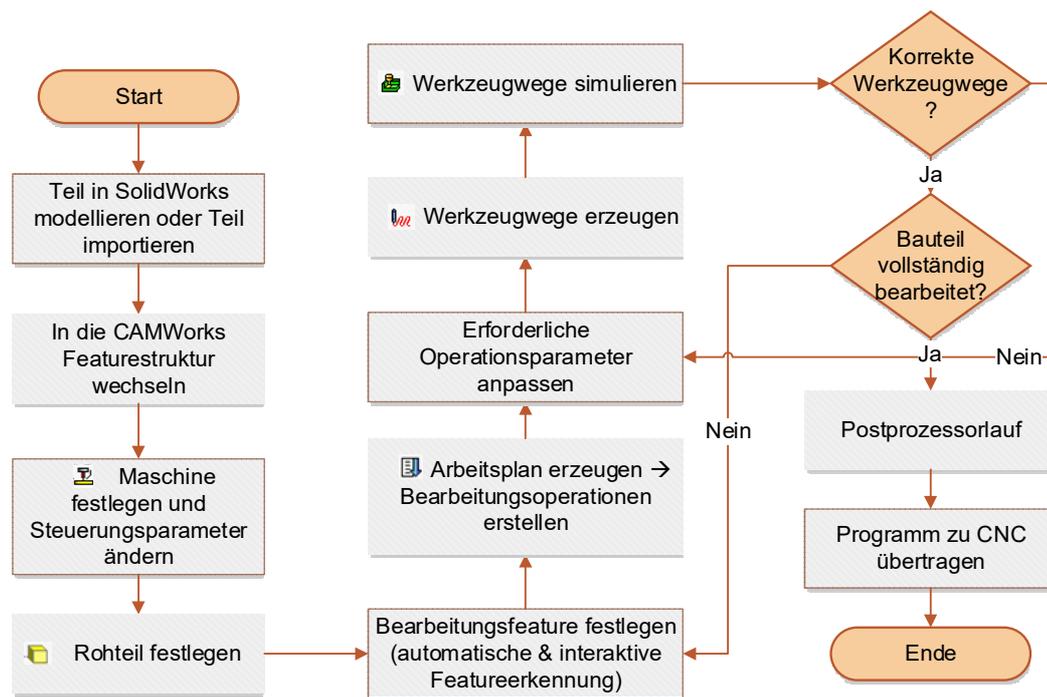


Abbildung 83: CAMWorks- Ablaufdiagramm i.A.a. [61]

9.4.2 NC-Programmierung des Demonstrators

Der Demonstrator „Bauer“ wird in zwei Aufspannungen (Setup 1 entspricht der Bearbeitung der Fuß-Seite, Setup 2 entspricht der Bearbeitung der Kopf-Seite) bearbeitet. Für jedes Setup werden insgesamt drei Bearbeitungsfeature angelegt. Da die automatische Feature-Erkennung die Aufteilung der Bearbeitung in zwei Aufspannungen nicht berücksichtigt und die automatisch erstellten Feature eine vollständige Überarbeitung benötigen würden, wurde darauf verzichtet und die Feature manuell erstellt.

Zunächst wird ein Innendurchmesser-Feature erstellt, um auf Kopf- und Fuß-Seite je eine Bohrung zu erzeugen. Daran anschließend folgt ein Flächen-Feature zum Plandrehen der Kopf- und Fuß-Fläche. Zuletzt erfolgt die Erstellung der Außendurchmesser-Feature zum Schruppen und Schlichten der Kontur. Dem entsprechend wird in dem jeweiligen Außendurchmesser-Feature eines Setups der zu bearbeitenden Konturabschnitte hinterlegt (vgl. Abbildung 84).

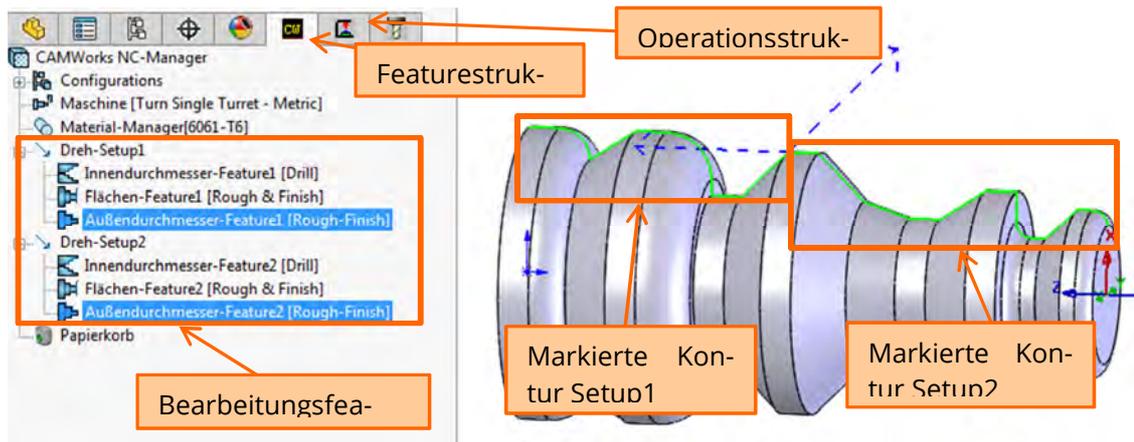


Abbildung 84: Vollständiger „Arbeitsplan“ für die Schachfigur Bauer

Aus der erstellten Featurestruktur wird im Anschluss der „Arbeitsplan“ in der Operationsstruktur erstellt. Dieser besteht beim Referenzbauteil „Bauer“ für jede Aufspannung aus vier Bearbeitungsoperationen:

- Bohren,
- Planschlichten,
- Schruppen und
- Schlichten.

Die Überprüfung des „Arbeitsplans“ erfolgt durch eine Werkzeugwegsimulation in CAMWorks. Diese bestätigt die vollständige Bearbeitung des Werkstücks durch den erstellten Arbeitsplan.

9.4.3 Erkenntnisse aus der NC-Programmierung

Um den Umfang der zu programmierenden Schnittstelle einzugrenzen, wurde das Untersuchungsfeld auf die für die Visualisierung notwendigen Daten des NC-Programms der Schachfigur Bauer beschränkt.

Dabei wurde zunächst festgestellt, dass die Erkennung der Werkzeugnummer (T-Adresse) für den Werkzeugwechsel, sowie die Vorschubwerte (F-Adresse) und Spindeldrehzahlen (S-Adresse) zur Zeitberechnung benötigt werden. Des Weiteren werden vier G-Befehle benötigt, welche auch erkannt werden sollten.

Die Befehle G00 und G01 können weitgehend gleichbehandelt werden, lediglich die Vorschubwerte differenzieren hierbei. Ebenso ähneln sich die Befehle G02 und G03, welche zur Berechnung der Kreisbahnen erkannt werden sollten. Hier besteht zudem die Notwendigkeit der Erkennung der Drehrichtung. Neben diesen Adressen / Befehlen müssen zusätzlich die Koordinaten nach den G-Befehlen übergeben werden. Im Falle des Drehens handelt es sich

hierbei um die X- und Z-Adresse, welche die Koordinaten des Endpunktes angeben, sowie die I- und K-Adresse für die G02- / G03-Befehle, welche die inkrementelle Verschiebung des Kreis-Mittelpunktes bezogen auf den Startpunkt widerspiegeln [vgl. 53]. Die Abbildung 85 veranschaulicht anhand des G02-Befehls beispielhaft die Zusammenhänge zwischen den zuvor beschriebenen I- und K-Adressen sowie den Kreis-Start- und Kreis-Endpunkt.

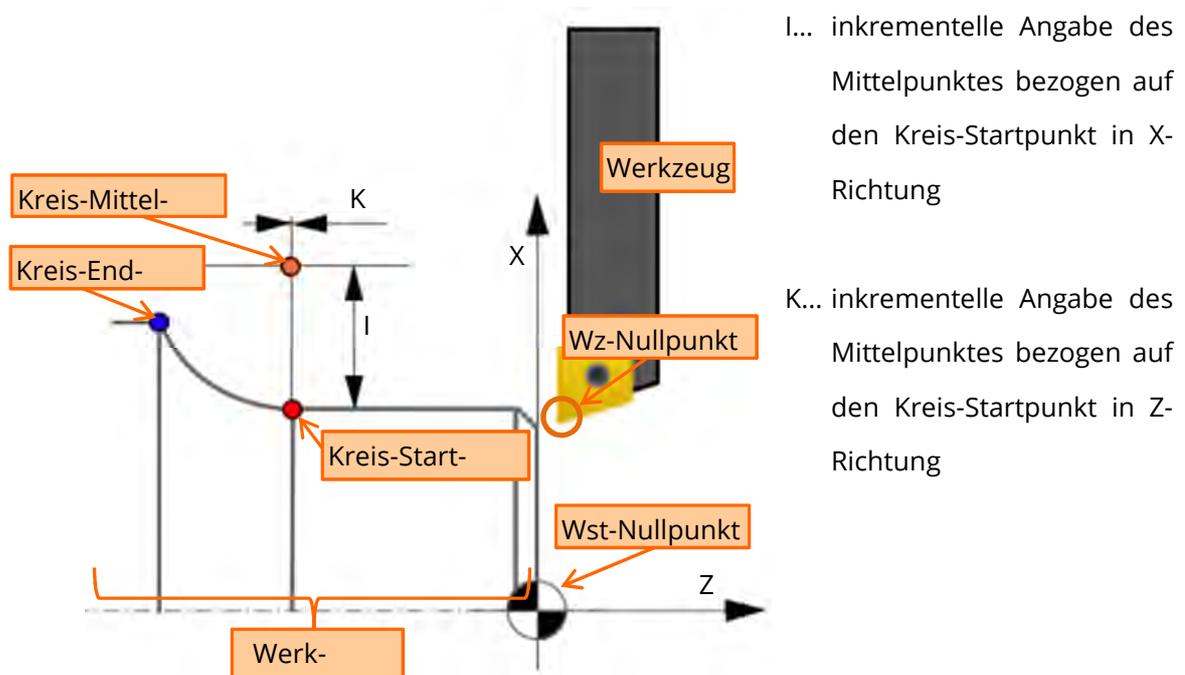


Abbildung 85: Darstellung I- und K-Adresse am Beispiel G02-Befehl i.A.a [55]; [64]

Zusätzlich ist noch zu beachten, dass sich alle X- und Z-Werte auf den Werkstück-Nullpunkt in Relation zur Werkzeugspitze des Werkzeuges beziehen. Das bedeutet, dass diese beiden Punkte eindeutig beschreibbar sein müssen, um eine hinreichend genaue Maschinensimulation zu erzeugen.

9.5 Modell-Import und -Aufbereitung in VR

9.5.1 Modell-Import

Der Import der Modelle in die VR-Software IC.IDO erfolgt über das Austauschformat VRML, wobei aufgrund der besseren Darstellung der Standard VRML2 [65] verwendet wurde. Bei der Verwendung von VRML2 aus SolidWorks heraus ist zu berücksichtigen, dass unter anderem alle Baugruppen-Dateien geöffnet und die Leerzeichen vor und nach den darin referenzierten Bauteilen / Baugruppen gelöscht werden müssen. Nach diesen Vorarbeiten konnte das Modell dann ohne Probleme importiert und weiter aufbereitet werden.

9.5.2 Modell-Aufbereitung

Im ersten Schritt der Modell-Aufbereitung in IC.IDO wurde das gesamte Modell markiert und die Geometrie-Eigenschaften geprüft. Dabei ist aufgefallen, dass das Modell um den Faktor 1.000 zu groß dargestellt wird und über eine entsprechende Skalierung zu korrigieren ist.

Nach dem Import und der Skalierung müssen die Knoten und Koordinatensysteme der zu bewegend Bauteile angepasst werden, da als Referenzkoordinatensystem nur das lokale Koordinatensystem angewendet werden kann. Da es nicht möglich ist, das lokale Koordinatensystem in Relation zur entsprechenden Teilegeometrie zu verschieben, müssen neue Knotenpunkte angelegt werden. Diese können nun so verschoben werden, dass deren lokales Koordinatensystem der gewünschten Position entspricht. Anschließend wird der zu bewegend Knoten dem neu angelegten Knoten untergeordnet. Die Änderung der Position des lokalen Koordinatensystems ist in Abbildung 86 am Beispiel des Werkzeughalters dargestellt.

Das ursprüngliche lokale Koordinatensystem befand sich im Unterbau der Drehmaschine, sodass der Werkzeughalter bei der Dreh-Animation nicht um seine reale Drehachse rotieren würde, sondern um den Unterbau der Drehmaschine. Nach Anpassung des Koordinatensystems liegt die Z-Achse des lokalen Koordinatensystems auf der Rotationsachse des Werkzeughalters. Des Weiteren wurde dieses Koordinatensystem so angepasst, dass dessen Lage für die gesamte Kinematik des Werkzeugschlittens verwendet werden konnte. Hierzu wurde der Knoten mit dem angepassten Koordinatensystem mehrfach kopiert und für die weiteren Bewegungen innerhalb der kinematischen Kette nach demselben Schema verwendet.

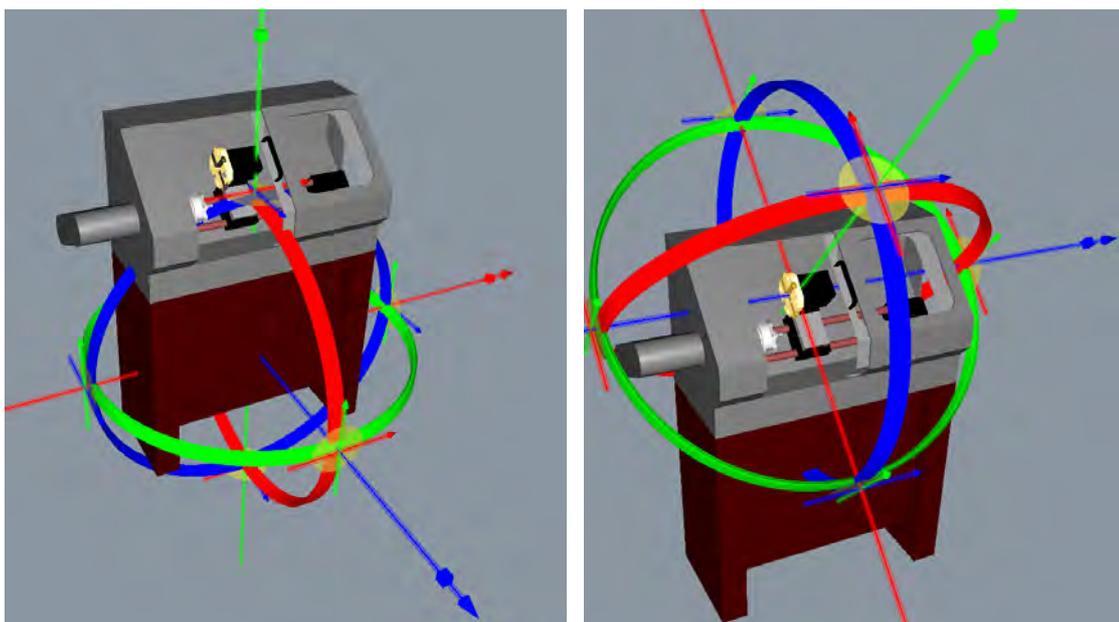


Abbildung 86: Änderung der Koordinatensystemposition am Beispiel des Werkzeughalters

9.6 Schnittstellenprogrammierung zwischen VR und CAM

9.6.1 Animation in IC.IDO mittels IDO.Script

In IC.IDO gibt es im Wesentlichen drei Möglichkeiten Animationen zu erstellen. Diese werden bezeichnet als *Recording*, *Keyframe Authoring* und *Script basierte Animation*.

Beim *Recording* wird innerhalb der VR-Software die manuell ausgeführte Bewegung direkt aufgenommen und gespeichert.

Für die Methode des *Keyframe Authoring* ist es notwendig für die zu animierenden Objekte manuell sogenannte Keyframes an ihrem Startpunkt zu erstellen. Anschließend werden die Objekte an ihren Zielort verschoben und wieder ein Keyframe erstellt. Für jedes zu animierende Objekt sind separate Keyframes zu erstellen. Diese enthalten die Koordinaten eines Objektes zu einem bestimmten Zeitpunkt. Sind mindestens zwei Keyframes für ein Objekt vorhanden, können diese als Animation in der VR-Software abgespielt werden. Die Bewegung des animierten Objekts erfolgt mittels linearer Interpolation von Keyframe zu Keyframe.

Daraus resultiert, dass sich sowohl das *Recording*, als auch das *Keyframe Authoring* nicht für die Animation von NC-Bewegungsdaten eignen. Die präzise Animation der NC-Bewegungsdaten mit den manuell ausgeführten Bewegungen ist beim *Recording* nicht möglich. Der Aufwand zur Erstellung möglichst genauer Animationen ist beim *Keyframe Authoring* zu hoch, da hier schon zur Animation weniger Objekte beim benötigten Detailgrad einer Maschinensimulation mehrere Tausend Keyframes manuell erstellt werden müssten. Zudem provoziert jede Änderung im NC-Programm eine Neuerstellung der Keyframes.

Die *Script basierte Animation* ermöglicht mithilfe des Moduls IDO.Script und der Programmiersprache Python komplexe Animationen zu erstellen, die auf zuvor erstellte Bewegungsdaten zurückgreifen. Um mittels IDO.Script eine Animation zu erstellen, müssen zusätzlich zur vollständig aufbereiteten *.ido Datei in IC.IDO weitere Dateien erstellt werden. Diese beinhalten:

- Textdatei *.txt
- Setupdatei *.inf
- Konfigurationsdatei *.ini
- Pythondatei *.py .

Die Textdatei *.txt beinhaltet alle für die Animation benötigten Bewegungsdaten. Diese kann manuell oder durch Programme wie Matlab oder Python automatisch erstellt werden. Der

Dateipfad der *.txt Datei wird in der Setupdatei *.inf hinterlegt. Diese beinhaltet zusätzlich alle sich in IC.IDO bewegendenden Gelenken (Joints), sowie die Festlegung ihrer Bewegungsarten. In der Konfigurationsdatei *.ini wird wiederum der Dateipfad der Setupdatei hinterlegt. Die Pythondatei *.py beinhaltet abschließend den Quellcode zur Animation und ist in der Lage auf die Konfigurationsdatei *.ini zuzugreifen, des Weiteren kann diese Datei in IC.IDO geladen und gestartet werden. (vgl. [66], [95], [96])

Die Pythondatei zur Animation entstammt dem Forschungsprojekt „AniMasch“. Diese Animationsdatei ermöglicht es eine beliebige Anzahl von Knoten / Geometrien innerhalb des gewählten Modells zu steuern. Dies gilt für Rotations- als auch Translationsbewegungen. Um dies zu ermöglichen, werden weitere Dateien benötigt, in denen spezifische Angaben zum Modell und den Bewegungen angegeben werden.

Die Setup-Datei (Abbildung 87) beinhaltet neben dem Dateipfad zu einer Textdatei, welche die Bewegungskordinaten enthält, die Animationsparameter, sowie die zu animierenden Knoten und die Angabe entlang bzw. um welche Achse diese sich bewegen sollen. Des Weiteren befindet sich in der Setup-Datei eine Zuordnung der Bewegungskordinaten zu den entsprechenden Knoten.

Die Knotenpunkte „Z-Achse“ und „X-Achse“ werden der dritten und zweiten Spalte der Bewegungsdatei zugeordnet und als Translations-Achse „z“, sowie „x“ festgelegt. Des Weiteren werden die Knotenpunkte „Wst_mit_Spannmittel“ und „Werkzeughalter“ den Spalten vier und fünf zugewiesen und als Rotations-Achsen „c“ definiert. Die erste Spalte der Bewegungsdatei wird in der Setup-Datei nicht explizit definiert, da diese immer für die Zeitstempel reserviert ist. Abschließend wird noch der Dateipfad der Text-Datei, welche die Beispielbewegung enthält in der Setup-Datei referenziert.

```
1 [datafile]
2   name=D:\\VR_Projekt\\Drehmaschine_IDO\\Script\\NC_BAUER.txt
3
4
5 [animation_data]
6   startTime=0           #Startzeit in Sekunden / negativ=Verzögerung / positiv=Werte überspringen
7   interval=1            #Zeit zwischen den Bildern in Millisekunden / ganzzahlig
8   speed=1               #Geschwindigkeitsmultiplikator / 1=Originalgeschwindigkeit
9   interpolation=1        #Interpolation zwischen den Werten / 1=ja / 0=nein
10  showInformation=1      #Textcarrier anzeigen / 1=ja / 0=nein
11  repeat=0              #Animation wiederholen / 1=ja / 0=nein
12
13 [correction]
14   timeCorrection=0      #Zeitkorrektur in Millisekunden / immer kleiner als Intervall
15
16
17 [object:Z-Achse]
18   z (2)=0
19
20 [object:X-Achse]
21   x (1)=0
22
23 [object:Wst_mit_Spannmittel]
24   c (3)=0
25
26 [object:Werkzeughalter]
27   c (4)=0
```

Abbildung 87: Inhalt der Setup-Datei

Der Inhalt der Konfigurationsdatei beschränkt sich auf die Angabe des vollständigen Dateipaths der Setup-Datei (Abbildung 88).

```
1 #Bewegung Wabeco
2
3 [configfile]
4   name=D:\\VR_Projekt\\Drehmaschine_IDO\\Script\\Wabeco.inf
```

Abbildung 88: Inhalt der Konfigurationsdatei

Die Bewegungsdaten werden in einer Textdatei (*.txt) gespeichert. Hierbei ist darauf zu achten, dass die erste Spalte immer die Zeitangabe darstellt, sodass die Positionen / Koordinaten in jeder Zeile einem definierten Zeitpunkt zugeordnet werden können. Anschließend folgen spaltenweise die Winkel oder Verschiebungen eines Objektes je Achse. Die Berechnung der Bewegungsdaten wird in 9.6.2 beschrieben.

9.6.2 Programmierung der Schnittstelle zur Konvertierung von NC-Programmen

9.6.2.1 Allgemeine Angaben

Da eine Vielzahl an NC-Befehlen und steuerungsspezifischen Zyklen existiert, wurde zunächst untersucht, welche Befehle am häufigsten in NC-Programmen von CNC-Drehmaschinen vorkommen. Dabei wurden insgesamt 13 NC-Befehle (Tabelle 16) identifiziert. Diese Befehle decken einen Großteil der NC-Programmierung an CNC-Drehmaschinen ab.

Tabelle 16: Wichtige NC-Befehle für Programme an CNC-Drehmaschinen

<i>Funktion / Zeichen</i>	<i>Bedeutung</i>
G00	Punktsteuerungsverhalten (Eilgang)
G01	Geraden-Interpolation (Vorschub gerade)
G02	Kreis-Interpolation im Uhrzeigersinn
G03	Kreis-Interpolation gegen den Uhrzeigersinn
M03	Spindel im Uhrzeigersinn
M04	Spindel gegen den Uhrzeigersinn
F	Vorschub
I	Interpolationsparameter oder Gewindesteigung parallel zur X-Achse
K	Interpolationsparameter oder Gewindesteigung parallel zur Z-Achse
S	Spindeldrehzahl
T	Werkzeug
X	Bewegung in Richtung der X-Achse
Z	Bewegung in Richtung der Z-Achse

Anhand des Demonstrators „Bauer“ konnten diese Erkenntnisse verifiziert werden. Die Bearbeitung erfolgt in zwei Aufspannung mit je einem NC-Programm (Kopf- und Fußseite). Beide NC-Programme können vollständig mit den ermittelten NC-Befehlen ausgewertet und in einer Maschinensimulation korrekt wiedergegeben werden.

Zur Ermittlung der Werkzeugnummer wurde der Adressbuchstabe „**T**“ und die darauffolgende Zahl ausgelesen. Um die Drehrichtung der Spindel festzulegen wurden die Sonderfunktionen **M3** und **M4** ausgewertet. Des Weiteren wurde durch Auslesen der Adressbuchstaben F und S der Vorschub sowie die Spindeldrehzahl erfasst. Nun wurden die in den NC-Programmen verwendeten Wegbedingungen **G0**, **G1**, **G2** und **G3**, sowie deren nachstehenden Adressbuchstaben **X**, **Z**, **I** und **K** ausgelesen. Für die Werte **X** und **Z** gilt, dass zu diesen jeweils ein Korrekturfaktor in Abhängigkeit des aktiven Werkzeuges mit einberechnet wird. Dieser ist notwendig, da die Werkzeugspitzen der Werkzeuge unterschiedliche Positionen einnehmen und die eingestellte Null-Position der Maschine sich auf die Werkzeugspitze des Werkzeuges **T1** bezieht.

Aufgrund des Funktionsumfanges der Schnittstelle gilt ein klar definierter Rahmen, indem diese nur angewendet werden kann. So ist es notwendig, dass der Vorschub in Millimeter und die Drehzahl in *1/min* (**G95** und **G97**) angegeben werden. Ebenso ist zu erwähnen, dass die Angaben der Koordinaten in **X** und **Z** sich immer auf die Werkzeugspitze beziehen und somit keine Berechnung der Position der Werkzeugspitze anhand der Werkstückgeometrie

und des Schneidenpunktes erfolgt. Die Berechnung der umgesetzten NC-Befehle wird in 9.6.2.2 ff. erläutert.

9.6.2.2 Verfahrensgeschwindigkeiten

Die Verfahrensgeschwindigkeit wird im Kontext der Maschinensimulation vor allem benötigt, um den Zeitverlauf während der Positionsänderung zu bestimmen. Hierzu sind zunächst zwei Werte notwendig, die Eilganggeschwindigkeit der Maschine und die im NC-Programm angegebene Vorschubgeschwindigkeit. Die Eilganggeschwindigkeit wurde aus dem Datenblatt der Wabeco CC-D 100 ermittelt (1.000 mm/min), in mm/s umgerechnet und in der Variablen „F_{eil}“ gespeichert. Die Vorschubgeschwindigkeitsangabe im NC-Programm wird wie eingangs erwähnt in mm/Umdrehung ausgegeben und mit Formel **(8-10)** in mm/s umgerechnet.

$$F_{vor} = F * \sqrt{(S^2)} \quad (8-10)$$

F_{vor}.....Vorschub in mm/s
F.....Vorschub in mm
SDrehzahl in 1/s

Um den jeweiligen Wegbedingungen pro Zeile die entsprechende Geschwindigkeit zuzuordnen wurde eine *if-else-Anweisung* verwendet, welche die in der Variablen „G“ gespeicherte Wegbedingung vergleicht und so der Wegbedingung **G0** die Eilganggeschwindigkeit und den Befehlen **G1**, **G2** und **G3** die Vorschubgeschwindigkeit zuordnet. Die entsprechende Geschwindigkeit wird anschließend noch in der Variablen „F_{use}“ gespeichert:

```
if G=="G0":
    Fuse=Feil
elif G=="G1" or G=="G2" or G=="G3":
    Fuse=Fvor
```

9.6.2.3 Zeitberechnung der Bewegungen

Die Zeitberechnung muss für jedes unterschiedliche Bewegungselement einzeln betrachtet werden. Dem entsprechend werden im Folgenden die drei Hauptelemente

- Lineare Bewegungen,
- Kreisbahnbewegungen und der
- Werkzeugwechsel berechnet.

Für lineare Bewegungen gilt Formel (8-11):

$$D = \sqrt{((Z_{neu} - Z_{alt})^2 + (X_{neu} - X_{alt})^2)} \quad (8-11)$$

D..... Abstand der Punkte
 Z_{neu}..... End-Z-Wert
 Z_{alt}..... Start-Z-Wert
 X_{neu}..... End-X-Wert
 X_{alt}..... Start-X-Wert

Aus den Koordinaten in **X**- und **Z**-Richtung kann so der Abstand beider Positionen im Raum bestimmt werden. Anschließend wird dieser Wert noch durch die Verfahrensgeschwindigkeit **F_{use}** dividiert. Im Ergebnis entsteht die benötigte Zeit für die lineare Bewegung vom Start- zum Endwert.

Für die Zeitberechnung auf Kreisbahnen wird nicht der einfache Abstand zweier Punkte, sondern die Länge des Kreisbogens benötigt (Abbildung 89). Dieser berechnet sich durch Formel (8-12):

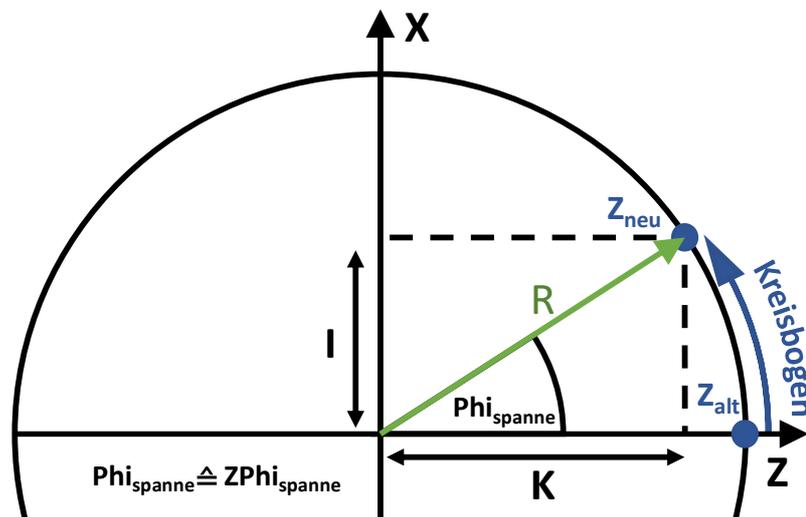


Abbildung 89: Zeit- und Wegdarstellung an Kreisbahnen

$$Kreishbogen = \frac{(R * \pi * Phi_{spanne})}{180} \quad (8-12)$$

R..... Radius des Kreises
 Phi_{spanne}..... Zentriwinkel zwischen Start- und Endpunkt

Das bedeutet, dass zuvor noch der Radius, sowie der Zentriwinkel zwischen dem Start- und Endpunkt zu berechnen sind. Der Radius kann dabei einfach aus den inkrementellen Angaben des Kreismittelpunktes in **X**- und **Z**-Richtung (**I**- und **K**-Wert) erfolgen (Formel (8-13)):

$$R = \sqrt{I^2 + K^2} \quad (8-13)$$

Der Zentriwinkel kann entweder über die **X**- oder die **Z**-Werte ermittelt werden, wobei hier die Berechnung über **Z** verwendet wurde (Formel (8-14)):

$$ZPhi_{spanne} = \sqrt{\left(\text{acos}\left(\frac{Z_{neu} - (Z_{alt} + K)}{R}\right) - \text{acos}\left(\frac{Z_{alt} - (Z_{alt} + K)}{R}\right)\right)^2} \quad (8-14)$$

Die Summe aus Z_{alt} und K bildet dabei die absolute Koordinate des Kreismittelpunktes in Z -Richtung ab. Des Weiteren ist bei der Berechnung des Zentriwinkels zu berücksichtigen, dass bei der genannten Formel nicht der Winkel in Grad, sondern im Bogenmaß berechnet wird. Innerhalb der Programmierung der Schnittstelle kann dies durch die Anwendung der Funktion „degrees“, welche durch:

```
from math import degrees
```

importiert wurde, gelöst werden. So wird das Bogenmaß automatisch in Gradmaß umgewandelt.

Zur Zeitermittlung des Werkzeugwechsels an der Maschine wurden mehrere Messungen zum Anfahren verschiedener Werkzeugplätze vorgenommen. Dabei wurde für die Änderung des Werkzeuges auf den nächstfolgenden Werkzeugplatz ein Richtwert von 0.5 Sekunden ermittelt. Dieser muss mit der Differenz der Werkzeugplatznummern im Werkzeug-Revolver der Drehmaschine multipliziert werden um für beliebige Werkzeugwechsel einen Richtwert zu erzeugen (Formel (8-15)):

$$Zeit = |T_{neu} - T_{alt}| * 0.5 \quad (8-15) \quad \begin{array}{l} T_{neu} \dots\dots\dots \text{neues Werkzeug} \\ T_{alt} \dots\dots\dots \text{letztes verwendetes Werkzeug} \end{array}$$

9.6.2.4 Lineare Bewegungen

Nach der Berechnung der benötigten Zeit für die linearen Bewegungen wird diese mit einem Intervall-Faktor multipliziert, um so die Anzahl der Intervallschritte zu bestimmen:

$$U = Zeit * 1000 \quad (8-16) \quad \begin{array}{l} U \dots \text{Anzahl der nötigen Intervallschritte} \end{array}$$

Der Intervallfaktor 1.000 wurde gewählt, um pro tausendstel Sekunde einen Bewegungs-Datensatz zu generieren. Anschließend werden die Differenzen zwischen den neuen und alten X - und Z -Werten gebildet, wodurch im Ergebnis die Gesamtänderung in X und Z entsteht. Diese können nun durch die Intervallschritt-Anzahl dividiert werden, um so die Änderung in X und Z (**Xaender** und **Zaender**) pro Intervallschritt zu erhalten.

Abschließend folgt noch eine *for-Schleife*, die die Intervallschritt-Anzahl durchläuft. Über diese Schrittfolge wird nun dem letzten X - und Z -Wert das zuvor berechnete Änderungsintervall in X und Z hinzuaddiert. Durch die Addition des Wertes 0,001 zur Gesamtzeit der bisher durchlaufenen Bewegung wird zudem der aktuelle Zeitstempel berechnet:

```

for i in range(int(U)):
    Zneu=Zalt+Zaender
    Xneu=Xalt+Xaender
    Zeitges=Zeitges+0.001
    
```

9.6.2.5 Kreisbahnbewegungen

Zur Berechnung der Kreisbahnen wird wie bei den linearen Bewegungen zuerst die Anzahl der Intervallschritte ermittelt. Dieser wird jedoch nicht mit den **X**- und **Z**-Werten, sondern mit dem Zentriwinkel **ZPhi_{spanne}** (Formel (8-14)) verrechnet. Dies erfolgt über zwei *if-else-Anweisungen* sowohl für die Winkeländerung des **X**-Wertes, als auch des **Z**-Wertes:

```

# Berechnung des Änderungswinkels in Z-Richtung unter Berücksichtigung der Drehrichtung
if ZPhineu <= ZPhialt:
    ZPhiaender=-ZPhispanne/U
else:
    ZPhiaender=ZPhispanne/U

# Berechnung des Änderungswinkels in X-Richtung unter Berücksichtigung der Drehrichtung
if XPhineu <= XPhialt:
    XPhiaender=-ZPhispanne/U
else:
    XPhiaender=ZPhispanne/U
    
```

Die Anweisungen fragen ab, ob der Winkel des Endpunktes der Kreisbewegung kleiner als der des Startpunktes ist. Ist dies der Fall, so wird das Änderungsintervall des Winkels als negativer Wert gespeichert, andernfalls positiv gespeichert. Diese *if-else-Anweisungen* genügen, um beide Kreisbahnbefehle **G2** und **G3** abzubilden.

Abschließend folgt wie bei den linearen Bewegungen eine *for-Schleife* zur Berechnung der **X**- und **Z**-Werte über die Schrittfolge **U**. Hierzu wird zunächst dem letzten Winkel in **X** und **Z** der Änderungsbetrag **XPhiaender** bzw. **ZPhiaender** hinzuaddiert, woraus die **X**- und **Z**- Winkel (**XPhi_{neu}** bzw. **ZPhi_{neu}**) der neuen Bewegungscoordinate entstehen. Nun können die neuen **X**- und **Z**-Werte durch Addition der absoluten Mittelpunktkoordinate des Kreises und dem Produkt aus dessen Radius und der zugehörigen Winkelfunktion gebildet werden (Formel (8-17) und (8-18)):

$$Z_{neu} = Z_{mitte} + R * \cos(ZPhi_{neu}) \quad (8-17)$$

$$X_{neu} = X_{mitte} + R * \sin(XPhi_{neu}) \quad (8-18)$$

Z_{neu} neue Z-Koordinate
 Z_{mitte} absolute Z-Koordinate des Kreis-
 mittelpunktes
 R Kreisradius
 X_{neu} neue X-Koordinate
 X_{mitte} absolute X-Koordinate des Kreis-
 mittelpunktes
 R Kreisradius

Hierbei ist noch zu beachten, dass die Winkel $X\Phi_{neu}$ und $Z\Phi_{neu}$ in der Schnittstelle im Gradmaß vorliegen. Zur Berechnung der Kosinus- und Sinusfunktionen in Python ist es jedoch notwendig, diese im Bogenmaß anzugeben. dies wird mithilfe der Funktion „radians“ realisiert. Dieser wandelt automatisch das Gradmaß in Bogenmaß um. In der programmierten Schnittstelle wird dies wie folgt umgesetzt:

```
# Berechnung von Punkten auf der Kreisbahn (Anzahl entspricht Wert U)
for i in range(int(U)):

    ZPhineu=ZPhialt+ZPhiander          # Winkel für neue Z-Position berechnen

    Zneu=Zmitte+R*cos(radians(ZPhineu)) # neue Z-Position berechnen

    XPhineu=XPhialt+XPhiander          # Winkel für neue X-Position berechnen

    Xneu=Xmitte+R*sin(radians(XPhineu)) # neue X-Position berechnen
```

9.6.2.6 Werkzeugwechsel und Spindelumdrehung

Wie bei den Berechnungen für lineare Bewegungen und Kreisbewegungen, wird auch für die Berechnung des Werkzeugwechsels zunächst die Intervallschritt-Anzahl ermittelt. Daran anschließend wird die Änderung der Werkzeugplatznummer mit 45° multipliziert und durch die Anzahl der Intervallschritte dividiert. Somit erhält man den vom Zeitintervall abhängigen Intervall-Wert des Werkzeughalter-Winkels (Formel (8-19)):

$$Wzhalter_{aender} = \frac{(T_{neu} - T_{alt}) * 45^\circ}{U} \quad (8-19)$$

$Wzhalter_{aender}$Intervall-Wert des
 Werkzeughalter-Winkels
 T_{neu} neues Werkzeug
 T_{alt} letztes verwendetes Werkzeug
 UAnzahl der Intervallschritte

Daran anschließend folgt die Berechnung des Werkzeughalter-Winkels für die Schrittfolge U über eine *for-Schleife*. Hierbei wird lediglich der Intervallwert $Wzhalter_{aender}$ zu dem aktuellen Wert des Werkzeughalter-Winkels hinzuaddiert.

Die Berechnung der Spindelumdrehung, bzw. des durchgeführten Drehwinkels der Spindel nach einer bestimmten Zeit erfolgt innerhalb der *for-Schleifen* der Berechnung der linearen Bewegung, Kreisbewegung und des Werkzeugwechsels. Die verwendete Formel (8-20) ist dabei in allen drei Fällen identisch:

$$Spingra = 0.001 * S * 360^\circ + Spingra \quad (8-20)$$

$Spingra$ aktueller Winkel der Spindel
 S Drehzahl

Der aktuelle Winkel der Spindel berechnet sich also aus dem Produkt des Zeitintervalls (0.001 Sekunden), der Drehzahl und der Multiplikation dieser mit 360° und der Addition des letzten Spindelwinkels zu diesem Produkt.

9.7 Ergebnisse

Die Funktionsfähigkeit der Maschinensimulation konnte anhand eines Beispielbauteils erfolgreich bewiesen werden. Die Fertigung der Schachfigur „Bauer“ als Beispielbauteil besteht aus zwei CNC-Programmen um die Kopf- und Fußseite in zwei Aufspannungen zu bearbeiten. Somit wurde nachgewiesen, dass die Schnittstelle nicht nur für das verwendete Muster-
teil, sondern auch für ähnliche rotationssymmetrische Bauteile angewendet werden kann.

Ebenso haben die Ergebnisse der Maschinensimulation in VR eine sehr hohe Prozessabsicherung gezeigt. Dies konnte anhand der Schlichtprozesse veranschaulicht werden, da hier der zu erwartende Verfahrensweg des Werkzeuges entlang der Werkstückkontur sehr gut sichtbar wurde (vgl. Abbildung 90 und Abbildung 91).

Der Aufwand zur eigenen Entwicklung einer Maschinensimulation kann als sehr hoch eingestuft werden. So wurde ein wichtiger Teil der vielen Befehle von NC-Programmen, die in Programmiersystemen erstellt werden abgedeckt, nicht jedoch die steuerungsspezifischen Zyklen.

Bei Bedarf lassen sich für weitere Befehle adäquate Algorithmen entwickeln. Auch die direkte Auswertung von feature-basierten Modellen für die spanende Fertigung rotationssymmetrischer Teile ist vorstellbar.

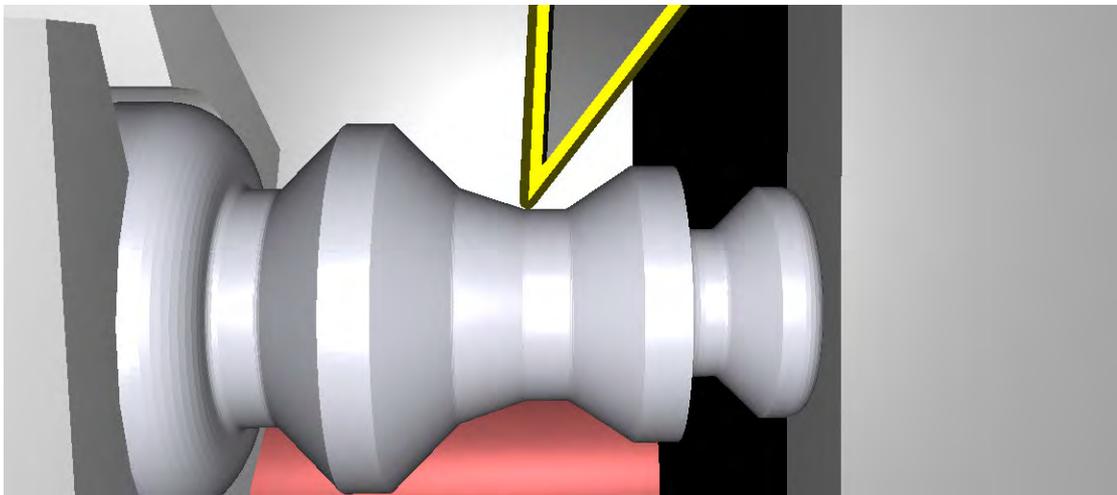


Abbildung 90: Exakt arbeitende Maschinensimulation

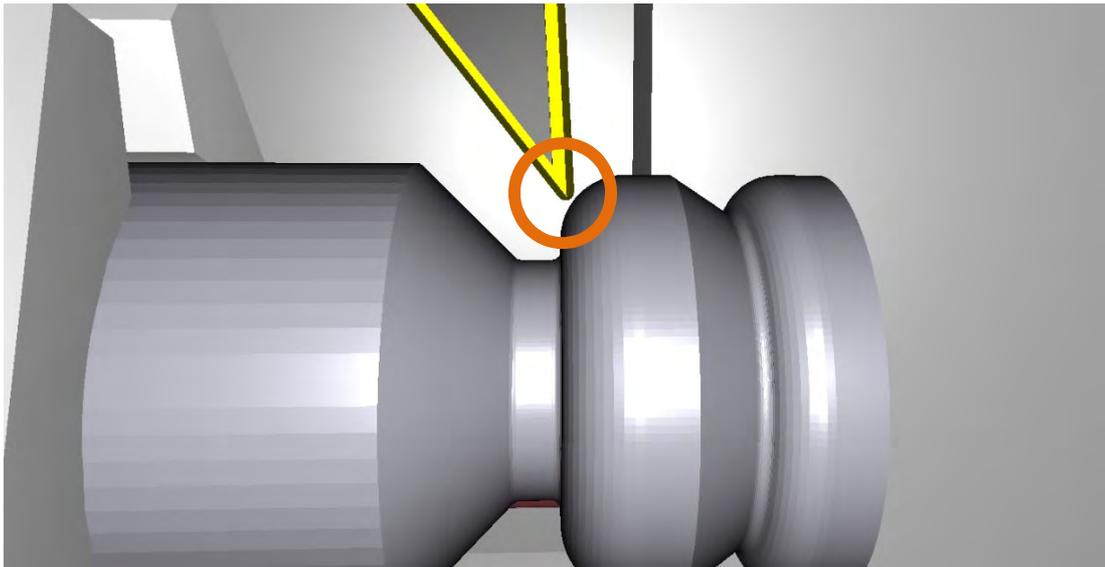


Abbildung 91: Durch fehlerhaftes NC-Programm entstandener Versatz zwischen Werkzeug und Werkstück

9.8 Aufbau von Bedienhandlungen als Ansatz zur Mitarbeiterqualifikation

9.8.1 Aufbau der Szene in IC.IDO

Um Qualifizierungen hinsichtlich einer Maschinen- / Anlagenbedienung innerhalb der virtuellen Realität durchzuführen ist es notwendig, die Bedienung der Szene in VR umzusetzen. Für den Aufbau und Test realitätsnaher Bedienhandlungen wurden Teile der Trainingsfabrik 4.0 der Professur Produktionsinformatik (vgl. Abbildung 92) ausgewählt. Erste Umsetzung von Bedienhandlungen wurde die Beschickung der Drehmaschine EMCO CT 60 durch den sechs-Achs-Roboter Universal Robot 10 (UR10) gewählt. Diese wird durch einen interaktiven Touchscreen konfiguriert und gestartet. Dabei müssen über das Touchpad drei Eingaben erfolgen. Zunächst muss die *Quelle* ausgewählt werden, von der aus das Bauteil vom Roboter aufgenommen wird. Anschließend erfolgt die Eingabe des *Ziels*, zu dem das Werkstück transportiert wird. Die dritte Eingabe bestimmt den *Typ* des Bauteils. Die Auswahlmöglichkeiten sind nummeriert und in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Bedeutung der Nummern für Bedienanweisung

	Quelle oder Ziel	Typ
1	Stopper	Block
2	Fräsmaschine	Zylinder
3	Drehmaschine	-

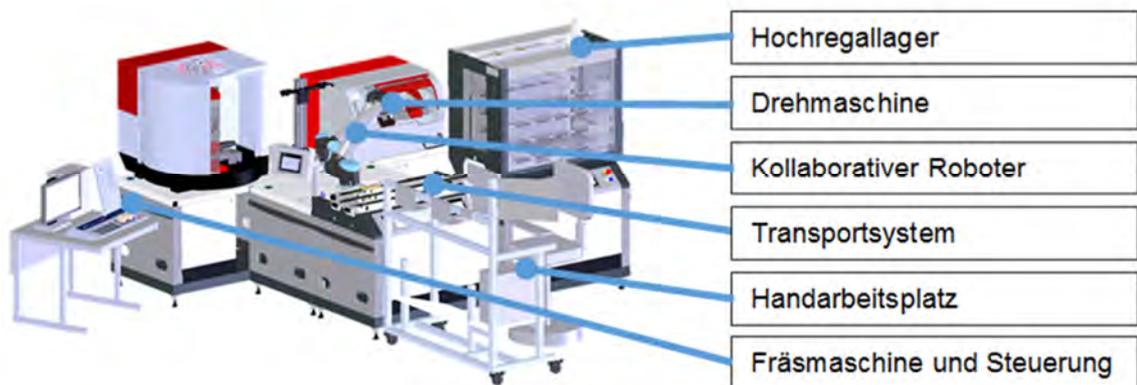


Abbildung 92: Aufbau der Trainingsfabrik 4.0

Aufgrund der besseren Bedienbarkeit wurde für die Eingabe im virtuellen System auf ein Touchpanel verzichtet und stattdessen ein Bedienpanel mit Tasten in die virtuelle Szene eingefügt. Um dennoch eine möglichst realitätsnahe Bedienung zu realisieren wurden die Anzeigen des realen Touchscreens modelliert und in das Bedienpanel eingefügt (Abbildung 93).



Abbildung 93: Virtuelles Bedienpanel mit Screen-Anzeige

9.8.2 Erstellung der Bedienfunktionen

Zunächst wurden die Bewegungen der Aktoren erstellt und als Animationen, welche das Beschicken der Drehmaschine sowie die Bedienung der Anlage und der damit verbundenen Änderungen in der Anzeige des Bildschirms demonstrieren. Für die Darstellung des Bildschirms ist es notwendig, dass bei Tastendruck bestimmte Animationen ausgelöst werden,

die die Darstellung des Bildschirms ändern. So wurden zwei Animationen erstellt, welche die Bestückung und Entnahme eines Werkstücks vom Transportband zur Drehmaschine (Abbildung 94) und zurück simulieren.

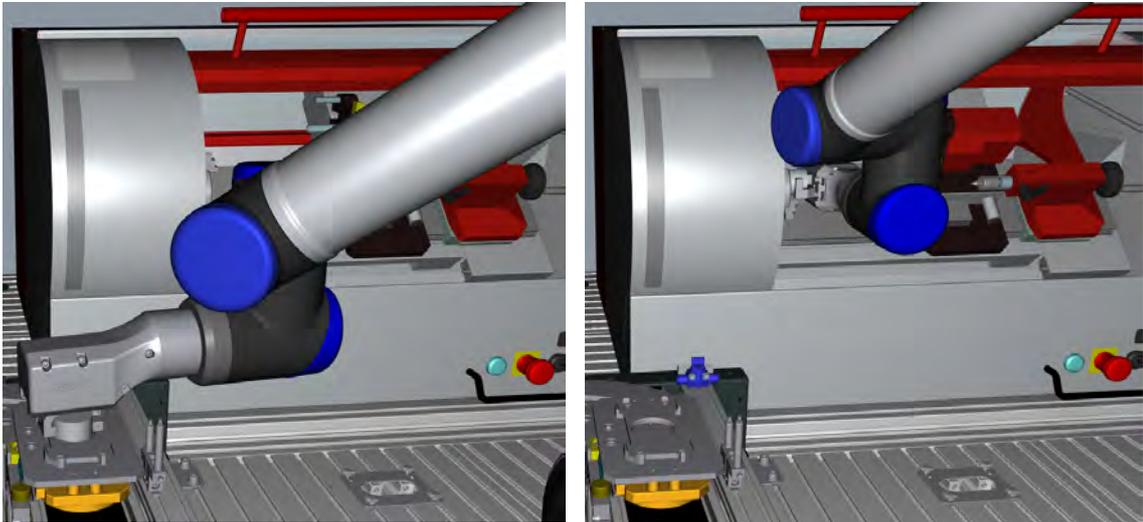


Abbildung 94: Beschickung eines Werkstücks vom Transportband (links) zur Drehmaschine (rechts)

Für die Bedienung der Anlage wurden vier Tasten mithilfe *Behavior Panels* in IC.IDO mit einem Auslöse-Sensor versehen, wodurch bei Tastendruck eine der zuvor erstellten Animationen ausgelöst wird (Abbildung 95).

Als „Sensor Object“ wird eine Geometrie festgelegt, welche auf ein bestimmtes Signal hin ein Event auslöst. Die Art des Signals wird im „Event Trigger“ ausgewählt. Im vorliegenden Fall wurde der Typ „is highlighted“ verwendet, wodurch ein Event durch Anklicken des Sensors ausgeführt wird. Alternativ ist auch eine Kollision des „Sensor Object“ mit einem anderen Objekt innerhalb der Szene als „Event Trigger“ möglich. Im „Event Type“ wird festgelegt, ob eine Animation oder eine Audio-Datei als Event ausgelöst werden soll. Über die Funktion „Mode“ können die verschiedenen Abspielvarianten ausgewählt werden (z. B. einmalig abspielen, in Dauerschleife abspielen, ...). Abschließend wird im Bereich „Behavior“ die spezifische Animation / Audio-Datei ausgewählt, welche abgespielt werden soll.

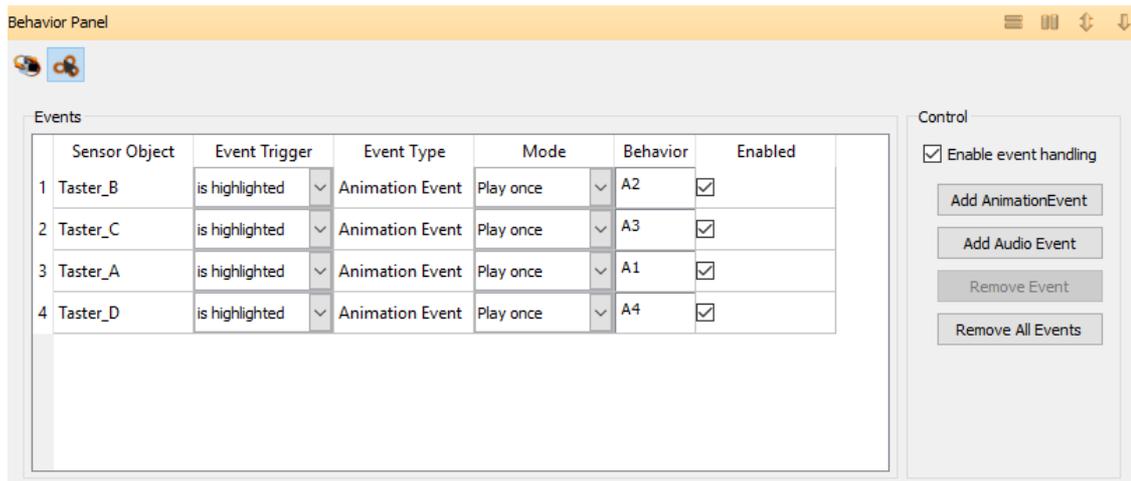


Abbildung 95: Erstellte Events und Sensoren im Behavior-Panel

9.8.3 Ergebnis

Die hier untersuchten und angewendeten neuen Funktionen von IC.IDO ermöglichen eine Programmierung auf einer graphischen Oberfläche. Dies stellt eine deutliche Vereinfachung zur Erstellung mittels klassischer Programmierung (vgl. [95], [96]) dar. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass die gewünschten Aktionen / Events zuvor als Animationen in IC.IDO erstellt sein müssen. Bei klassischer Programmierung ist dies nicht notwendig. Hier sind die Bewegungskordinaten in numerischer Form aufzubereiten (vgl. [95], [96]). Darstellungen am virtuellen Bildschirm sind als separate Bilder zu modellieren und einzufügen. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Größe der Darstellung im Bedienpanel und die Größe der Tasten zur Bedienung vor allem für ungeübte VR-Nutzer eine größere Herausforderung darstellt.

Entwicklung eines Qualifizierungskonzeptes

Erarbeitung eines Qualifizierungs- und Bedienkonzeptes für die ressourcenorientierte Fertigung hochbeanspruchter Bauteile als Grundlage innovativer Verfahrens- und Betriebsmittelmodelle

10.1 Ziel und Spezifikation des Qualifizierungskonzeptes zur ressourcenorientierten spanenden Fertigung

Häufige Produktänderungen sowie immer komplexere und flexiblere Arbeits- und Produktionssysteme erfordern neue, flexible Konzepte und Strategien zur Weiterentwicklung bzw. Qualifizierung der Mitarbeiter und machen die Bereitschaft der Mitarbeiter zum lebenslangen Lernen wichtiger denn je. [67], [68], [69], [70]

Für die Entwicklung eines Qualifizierungskonzeptes sind zunächst die folgenden Fragen zu klären:

- Was soll gelernt werden? - Lerninhalte
- Wie soll gelernt werden? – Methodik, Didaktik, Lernmittel
- Wo und wann soll gelernt werden? – Lern- bzw. Arbeitsort, Ablauf

Was gelernt werden soll greift die konkreten Lerninhalte auf, die vermittelt werden sollen. Darüber hinaus ist die Art, die Aufteilung (Lernsystematik), die fachliche Tiefe der Wissensvermittlung von eminenter Bedeutung. [71]

Wie gelernt werden soll umfasst die einzusetzenden, bzw. zu entwickelnden sinnvollen methodisch-didaktischen Lernmittel. Diese sind so auszulegen, dass sie für den jeweils betrachteten Arbeitsprozess detailliert anwendbar sind. Entscheidend hierbei ist der Praxisbezug, der den Nutzen deutlich machen muss. Darüber hinaus ist die personelle und organisatorische Unterstützung (Lernbegleiter) von großer Bedeutung, aber auch die Vermeidung von zu viel Theorie. [71]

Wo und wann gelernt werden soll beschreibt, welche Lern- bzw. Arbeitsplätze (auch virtuell) als Orte zur Qualifizierung geeignet sind. Zu bewerten ist hierbei, ob ein Arbeitsplatz als

Ort zum Lernen geeignet ist oder mehrere Orte und deren zeitliche Anordnung (Reihenfolge) zur Erreichung des Qualifizierungsziels notwendig sind. [71]

Mit Hilfe von Qualifizierungskonzepten wird grundsätzlich der Aufbau und Erhalt von Wissen im Unternehmen ermöglicht bzw. gefördert.

In diesem Beitrag liegt der Fokus der Qualifizierungskonzepte auf spanenden sowie nass-chemischen Fertigungsverfahren, wobei die wechselseitige Beeinflussung der Fertigungsverfahren und die gezielte Ressourceneinsparung durch die Qualifizierungskonzepte thematisiert werden. Darüber hinaus besteht damit die Chance zur Sensibilisierung und Weiterbildung aller im Unternehmen tätigen Personen, die zur Reduzierung der Ressourcenbedarfe beitragen werden.

Das Ziel des Qualifizierungskonzeptes für die ressourcenorientierte Fertigung ist die Kompetenzentwicklung von Planern und zukünftigen Planern infolge der Vermittlung vorrangig kognitiver Fähigkeiten, Fertigkeiten und Kenntnisse mittels einer entwickelten Vorgehensweise auf der Basis eines spezifischen Integrationskonzeptes.

Diese Vorgehensweise unterstützt in Abhängigkeit der bereits vorhandenen Kompetenzen primär eine Sensibilisierung und Motivation des nachhaltigen Denkens und Planens im Kontext von Zerspanungsprozessen. Industriezweige, wie die Metall- und Kunststoffverarbeitung aber auch die Beschichtung bieten in diesem Zusammenhang ein enormes Potenzial, denn hier werden häufig Bauteile eingesetzt, welche einen hohen Zerspanungsaufwand und somit Ressourcenverbrauch aufweisen. Forschungsarbeiten mit der Luftfahrtzulieferindustrie untermauern, dass schwer zerspanbare Materialien infolge ineffizienter Rohmaterialgeometrie- oder Fertigungstechnologieauswahl im Fertigungsprozess auf Grund des hohen Zerspanungsvolumens sehr langen Bearbeitungszeiten, starken Werkzeugverschleiß und teilweise unnötige Materialverluste hervorrufen [72]. Dafür verantwortlich ist vor allem das noch unzureichende Bewusstsein im Planungs- und Fertigungsbereich während der Prozessentwicklung und -erprobung, den Produktionsprozess nachhaltig zu hinterfragen (vgl. Abschnitt 10.3).

10.2 Vorgehen zur Entwicklung eines Qualifizierungskonzeptes

In der ersten Phase zur Entwicklung eines Qualifizierungskonzeptes wird ein dreiphasiger Ablauf gewählt (vgl. Abbildung 96). [73] In *Definition Anwendungsbereich* erfolgt die Abgrenzung der Anforderungen an das zu entwickelnde Qualifizierungskonzept. Hier fließen die Fragestellungen aus Abschnitt 10.1 ein. Das Hauptaugenmerk bildet vor allem die Abgrenzung des Anwendungsbereiches, z. B. die Festlegung der zu qualifizierenden Zielgruppe (Arbeitsvorbereiter, Meister, Werker usw.). Dies wird durch den Einsatz eines morphologischen Schemas realisiert. Weitere wesentliche Inhalte dazu werden im Abschnitt 10.3 beschrieben.

Die zweite Phase *Analyse Mitarbeiterkompetenz* (vgl. Abbildung 96) dient der Festlegung des Qualifizierungsbedarfs der im Bereich *Definition Anwendungsbereich* selektierten Zielgruppe. Innerhalb dieses Vorgehensschrittes erfolgt der Vergleich von bereits vorhandenem mit den erforderlichen Kompetenzen von Mitarbeitern. Dazu müssen die für die jeweilige Arbeitsaufgabe, bzw. -tätigkeiten vorhandenen Kompetenzen der Zielgruppe zuvor spezifiziert und detailliert werden. Dies beschreibt Abschnitt 10.4 detailliert.



Abbildung 96: Grundlegendes Vorgehen zur Entwicklung eines Qualifizierungskonzeptes

Das grundsätzliche Ziel der Phase drei *Ableitung Qualifizierungskonzept* (vgl. Abbildung 96) bildet die Kompetenzentwicklung der jeweiligen Zielgruppe infolge der Vermittlung vorrangig kognitiver Fähigkeiten, Fertigkeiten und Kenntnisse. Dabei ist zu beachten, dass sich die zu qualifizierende Zielgruppe (eine oder mehrere Personen) in ihrer auszuführenden Tätigkeit, ihrem Wissensniveau, ihren Fähigkeiten, Fertigkeiten und in der Bereitschaft Veränderungsprozesse zu unterstützen, oft grundhaft unterscheidet. Das konkrete Vorgehen ist im Abschnitt 10.5 dargestellt.

10.3 Entwicklungsphase 1: Definition Anwendungsbereich

Mithilfe des nachfolgend dargestellten morphologischen Schemas (vgl. Tabelle 18) erfolgt die Abgrenzung des Anwendungsbereiches, um die Vielfältigkeit der betrachteten Thematik einzuschränken und diese übersichtlich darstellen zu können. Der morphologische Kasten stellt die Merkmale dar, die den Forschungsgegenstand der Nachwuchsforschergruppe Mo-QuaRT charakterisieren. Darüber hinaus ist so die Gesamtheit aller Varianten im Anwendungsbereich übersichtlich darstellbar. Die aufgeführten Ausprägungen zeigen eine typische Auswahl der aufgeführten Merkmale, wobei weitere Ausprägungen grundsätzlich vorhanden sind. Die farbliche Hinterlegung in Tabelle 18 basiert auf einer beispielhaften Eingren-

zung des Anwendungsbereichs auf die Zielgruppe der Maschinenbaustudierenden (zukünftige Ingenieure). Für das zu entwickelnde Qualifizierungskonzept ergibt sich durch die systematische Kombination der Merkmale und deren Ausprägungen die Möglichkeit der Zielgruppe spezifische und nur für die jeweiligen Anwendungsbereiche sinnvolle Qualifizierungskonzepte und deren -inhalte zur Verfügung zu stellen. Das bedeutet, dass die im morphologischen Schema dargestellten Merkmale und deren Ausprägungen den Ordnungsrahmen für ein spezielles, sinnvolles Qualifizierungskonzept vorgibt.

Tabelle 18: Beispielhaftes morphologisches Schema mit Ausprägungen für pilothaftes Qualifizierungskonzept MoQuaRT [73]

Merkmal	Ausprägung				
	Metallverarbeitung	Kunststoffverarbeitung	Beschichtung	Montage	...
1 Branche	Kleinbetriebe	Mittelständische Unternehmen	Großbetriebe		
2 Firmengröße	Auftragsfertiger	Rahmenauftragsfertiger	Variantenfertiger	Lagerfertiger	
3 Auftragsabwicklungstyp	Einmalfertigung	Einzel- / Kleinserienfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung	
4 Fertigungsart	kundenspezifisch	Standard mit kundenspezifischen Varianten	Standard mit allgemeinen Varianten	Standard	
5 Erzeugungsspektrum	Marketing	Vertrieb	Produktentwicklung	Fabrikbetrieb	...
6 Aufgabenbereich	Konstruktion	Arbeitsvorbereitung	Teilefertigung	Montage	...
7 Produktion	Arbeitsplaner	Meister	Werker	Studenten	Ingenieurwissenschaft
8 Zielgruppe	technisch-fachliche Kompetenz	organisatorische Kompetenz	soziale Kompetenz		
9 Kompetenz	Material	Energie	Personal	Betriebsmittel	...
10 Ressourcen	elektrisch	chemisch	mechanisch	thermisch	
11 Energieform	auditiv	visuell	haptisch	analytisch	
12 Lerntyp	arbeitsimmanent	arbeitsgebunden	arbeitsbezogen		
13 Lernmethoden	Literatur	interaktiv	softwaregestützt	visuell	...
14 Lernmedien					

Die Merkmale 12- 14 in der Tabelle 18 umfassen bspw. die Merkmale Lerntyp, Lernmethoden sowie Lernmedien und sollen beispielhaft das Prinzip der Klassifizierung eines Qualifizierungskonzeptes demonstrieren.

Da Qualifizierungsprozesse grundsätzlich individuell ablaufen, ist ein Qualifizierungskonzept so zu gestalten, dass individualisierte Qualifizierungsprozesse ermöglicht werden. Diese sind u.a. vom Lerntyp, der Lernmethode oder dem Lernmedium abhängig. [74] Dazu ist ein Auszug der Lerntypen aufgeführt:

- visueller (sehend lernen)
- auditiver (hörend lernen)
- haptischer (tastsinnorientiert lernen)
- analytischer (algorithmisch lernen)

Keiner dieser Lerntypen trifft ausschließlich alleine auf eine Person zu. Grundsätzlich treten Mischformen auf, die Auswirkungen haben bzw. Berücksichtigung bei der Strukturierung und dem Aufbau des Qualifizierungskonzeptes finden. Die Festlegung des jeweiligen Lerntyps erfolgt durch die jeweilige Person selbst.

Ein Qualifizierungskonzept muss, um dessen Inhalt zielführend und nachhaltig vermitteln zu können, so aufgebaut sein, dass die Lernsituation der späteren Anwendungssituation möglichst ähnlich ist. Daher müssen entsprechend geeignete Lernmethoden ausgewählt werden. Diese können folgende sein:

- arbeitsimmanentes Lernen,
- arbeitsbezogenes Lernen oder
- arbeitsgebundenes Lernen.

Arbeitsimmanentes Lernen umfasst den Sachverhalt, dass durch das Arbeiten im Prozess gelernt wird. Das **arbeitsbezogene Lernen** beinhaltet nur eine geringe Beziehungsintensität zwischen dem Lerninhalt und dem eigentlichen Arbeitsprozess. Beim **arbeitsgebundenen Lernen** ist der Lerninhalt spezifisch auf den Arbeitsprozess abgestimmt, wobei aber eine klare Trennung zum Realprozess vorhanden ist. [6]

10.4 Entwicklungsphase 2: Analyse Mitarbeiterkompetenz (Allgemein)

10.4.1 Grundlagen und Vorgehensweise

Der Mitarbeiter nimmt innerhalb der Arbeitsplanung eine zentrale Rolle ein, z. B. durch die Spezifikation von Fertigungsverfahren sowie -strategien, oder die Auswahl einer grundsätzlich geeigneten Ausgangsmaterialgeometrie [75] (vgl. Abbildung 97).

„Laut [76] und [77] verursacht vor allem der Mensch infolge:

- fehlendem Bewusstsein für Ressourcenbedarfe,
- mangelnden Wissens über Einsparpotentiale,
- unzureichender Prozessüberwachung,
- fehlenden Wissens zu energieorientiertem Vorgehen, um den Produktionsprozess nachhaltig zu hinterfragen,

eine ineffiziente Nutzung der Ressourcen.“ [72]

Die aufgezeigten Aspekte machen einerseits die Notwendigkeit der Sensibilisierung der Mitarbeiter für das Thema einer ressourcenorientierten spanenden Teilefertigung deutlich.

Andererseits unterstreichen sie die Wichtigkeit der Vermittlung von Zusammenhängen zwischen der Gestaltung ressourcenschonender Fertigungsprozesse und der damit einhergehenden Material-, Energie- und Zeitersparnis. Die Vermittlung dieser Zusammenhänge erfordert wiederum ressourcenorientierte Qualifizierungskonzepte.

Für diese Konzepte ist die systematische Analyse und Aufbereitung der Fähigkeiten, der Fertigkeiten und der Kenntnisse der Mitarbeiter für ihren jeweiligen Tätigkeitsbereich in Form

eines Kompetenzprofils wesentlich. Das Kompetenzprofil deckt den notwendigen Qualifizierungsbedarf der Zielgruppe auf. Die jeweils zu qualifizierenden Zielgruppen sollen grundsätzlich durch das Qualifizierungskonzept Kenntnisse über die im Abschnitt *Definition Anwendungsbereich* definierten Aufgaben erhalten. Beispielhafte Aufgaben von Mitarbeitern, die innerhalb eines Fertigungsprozesses tätig sind, werden in der Abbildung 97 aufgeführt. [78]



Abbildung 97: Exemplarische Aufgaben der Zielgruppe (Mitarbeiter)

Des Weiteren sollen Wissen und Fähigkeiten ausgebildet sowie Fachkompetenz und Methodenkompetenz gefördert werden.

Sauter und Sauter definieren Kompetenzen als die Fähigkeiten in offenen, unüberschaubaren, komplexen, dynamischen und zuweilen chaotischen Situationen kreativ und selbst organisiert zu handeln (Selbstorganisationsdispositionen) [79]. Kompetenzen zeigen sich damit in den Handlungen während der Ausführung von Arbeitsinhalten der Personen.

Laut [80] bestimmen die Arbeitsinhalte explizit die Anforderungen der Arbeit an die ausführenden Personen. Sich durch organisatorische Gestaltungsmaßnahmen verändernde Arbeitsinhalte (Tätigkeiten) führen in ihrer Konsequenz zu modifizierten Anforderungen. Basierend auf der Summe der Anforderungen an den jeweiligen Mitarbeiter (erforderliche Kompetenzen) für die auszuführende Tätigkeit lässt sich ein entsprechendes Kompetenzprofil ableiten.

Dabei wird das didaktische Ziel einer Umorientierung weg von der reinen Wissensvermittlung durch die Lehrenden hin zur Wissensvermittlung mit Hilfe von Online-Lernmethoden,

den sog. Blended-Learning-Konzepten, (pädagogisch-didaktisch) ein wesentlicher Ansatzpunkt (vgl. Abschnitt 10.5.4). [81]

Didaktik (Wissensvermittlung) beschreibt die Kunst und Wissenschaft des Lehrens und Lernens. [82] Mit Hilfe von Lernkonzepten unterschiedlicher Art soll das Wissen zielgerichtet an spezifische Personengruppen vermittelt werden. Die Lernumgebung beschreibt dabei die räumlichen, zeitlichen und instrumentellen Merkmale eines Lernprozesses. [83] Diese kann innerhalb des Lernkonzeptes durch den Einsatz von Medien beispielsweise durch das Einbinden von Videos oder interaktiven Elementen unterstützt werden.

Um die Lernenden an das Wissen heranzuführen gibt es die „aktive“ und die „passive“ Methode. Bei der aktiven Methode wird der Lernende unmittelbar in den Prozess der Wissensvermittlung eingebunden, wohingegen bei der passiven Methode das Wissen an den Lernenden herangetragen wird. [84] Wesentlicher Vorteil ist, dass der Lernende in der Lage ist, sein Lerntempo und seinen Lernbedarf eigenständig festzulegen [85].

Zur Spezifikation des Qualifizierungsbedarfs der Zielgruppe ist der Einsatz von Kompetenzprofilen sinnvoll, da mit deren Hilfe zunächst festgestellt werden kann, welcher Kompetenzbedarf grundhaft existiert. Die Abbildung 98 zeigt die Vorgehensweise, zur Entwicklung eines Kompetenzprofils.

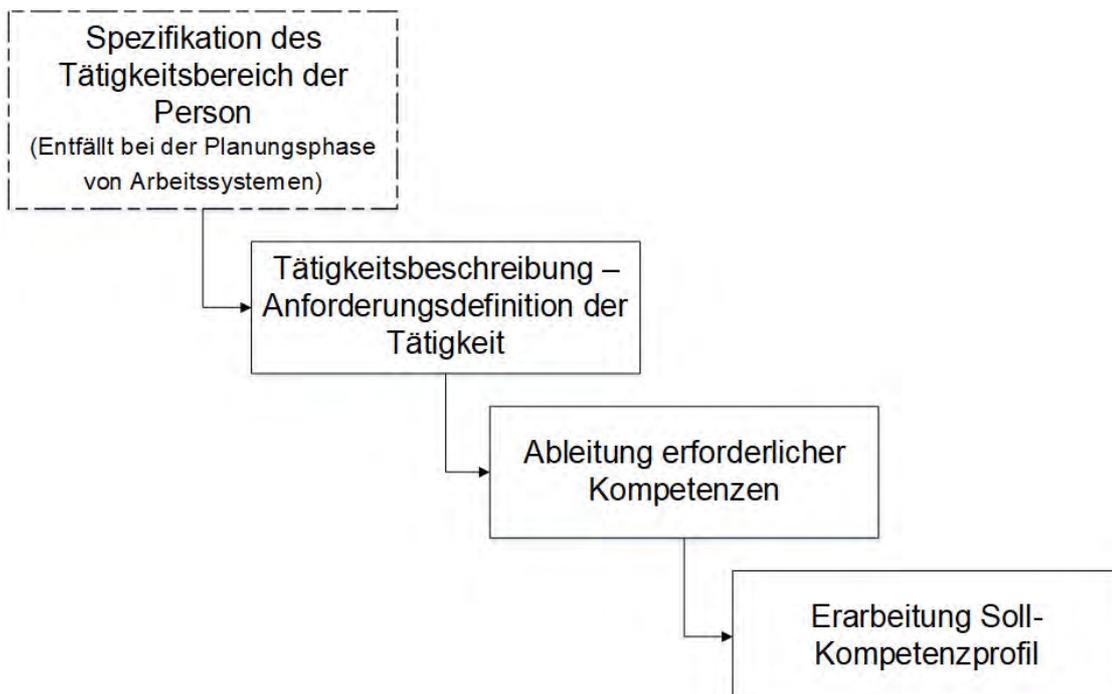


Abbildung 98: Vorgehensweise der Kompetenzprofilentwicklung

10.4.2 Spezifikation des Tätigkeitsbereichs der Zielgruppe

Die Spezifikation des Tätigkeitsbereichs umfasst die Festlegung, in welchem betrieblichen Bereich (Teil der Prozesskette) die betrachtete Zielgruppe tätig ist. Als betrieblicher Bereich werden beispielsweise die Konstruktion, die Arbeitsvorbereitung (Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung), die Fertigung aber auch die Logistik verstanden [87]. Die zu qualifizierende Zielgruppe innerhalb der Prozesskette (bspw. Konstrukteure, Arbeitsvorbereiter /-planer, Meister, Einrichter, Bediener) unterscheiden sich grundlegend in ihrer Tätigkeit, ihrem Wissensniveau, ihren Fähigkeiten, Fertigkeiten und in der Bereitschaft Veränderungsprozesse zu unterstützen [87].

Zur Veranschaulichung dient nachfolgend der betriebliche Bereich der Arbeitsplanung und dessen Teilaufgaben sowie die Tätigkeiten in der spannenden Fertigung als Beispiel.

10.4.3 Tätigkeitsbeschreibung – Definition der Anforderungen an die Tätigkeit

Eine Tätigkeitsbeschreibung umfasst die schriftliche Beschreibung einer Arbeitsaufgabe [87]. Diese gibt Aufschluss über auszuübende Tätigkeiten, notwendige Fachkenntnisse, deren Umfang sowie deren Tiefe und erforderlicher Erfahrungen.

Für die Mitarbeiter der *Arbeitsplanung* bedeutet dies beispielhaft:

Tätigkeiten:

- Entwicklung neuer Techniken auf dem Gebiet der Fertigungsorganisation mit einem hohen Maß an Verantwortlichkeit und Selbständigkeit
- Festlegung detaillierter Arbeitsabläufe für Fertigung und Test von Produkten
- Erstellung von Arbeitsplänen, inkl. Ermittlung von Vorgabezeiten
- Identifikation des benötigten Materials, der benötigten Betriebsmittel und Spezialwerkzeuge sowie der Art der Dokumentation

Kenntnisse:

- Fachkenntnisse auf dem Gebiet der Arbeitsplanung, der ressourceneffizienten Teilefertigung, inkl. der Kenntnis zu alternativen Fertigungsvarianten und Rohmaterial-Geometrien

Für die Mitarbeiter in der *spanenden Fertigung* bedeutet dies beispielhaft:

Tätigkeiten:

- Partielle Planung und zuverlässige Umsetzung von Fertigungsaufgaben mit einem hohen Maß an Verantwortlichkeit und Selbständigkeit

Kenntnisse:

- Fachkenntnisse auf dem Gebiet der ressourceneffizienten Teilefertigung, inkl. der Kenntnis zu alternativen Fertigungsvarianten

Kompetenzen:

- Fähigkeit zur Interpretation von Arbeitsplänen
- Organisation des benötigten Materials, der benötigten Dokumentation sowie der benötigten Betriebsmittel und Spezialwerkzeuge

Auf der Grundlage der auszuübenden Tätigkeiten und erforderlichen Kompetenzen eines Arbeitsplaners oder Mitarbeiters in der spanenden Fertigung werden dann die jeweils erforderlichen Kompetenzen abgeleitet.

10.4.4 Ableitung erforderlicher Kompetenzen

In der Literatur finden sich diverse Ansätze für die Einteilung von Kompetenzen (vgl. [85], [88]). Für das zu entwickelnde Kompetenzprofil wurde der Ansatz in Anlehnung an Risch und Wadewitz [89] gewählt.

Bei diesem Ansatz werden die Kompetenzen eines Mitarbeiters in die:

- technisch-fachliche Kompetenzen,
- organisatorische Kompetenzen und
- soziale Kompetenzen

differenziert.

Goldhahn nutzt diesen Ansatz, definiert und strukturiert diese Kompetenzen für die Anforderungen im Bereich Arbeitsplanung. Er beschreibt demnach die für jede Arbeitsplanungsaufgabe erforderlichen Kompetenzen. Auszugsweise ist dies in der nachfolgenden Tabelle (vgl. Tabelle 19) dargestellt. [80]

Tabelle 19: Auszug erforderlicher Kompetenzen in der Arbeitsplanung i.A.a. [80]

Aufgabe	Technisch-fachliche Kompetenz	Organisatorische Kompetenz	Persönlich-soziale Kompetenz
Ausgangsteil bestimmen	<ul style="list-style-type: none"> • Zeichnung lesen • Kenntnisse möglicher Rohteilarten und -abmessungen • Fähigkeit zur Bewertung von Wirtschaftlichkeit • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Absprache mit Konstruktion, Materialwirtschaft und Arbeitsplanung • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Räumliches Vorstellungsvermögen • Systematisches Denken • ...
...	• ...	• ...	• ...

Infolge der Charakterisierung der Arbeitsplanungsaufgaben bezüglich ihrer notwendigen Kompetenzen ist die Unterstützung einer ressourcenorientierten Arbeitsplanung möglich. Hier müssen Aspekte wie beispielsweise:

- systematisches, ressourcenorientiertes und analytisches Denken
- kreatives, ressourcenorientiertes Arbeiten
- Kenntnisse über ressourcenorientierte Aufgaben der Arbeitsplanung, z. B. zur Planung von Rohteilabmessungen und -arten, Fertigungsverfahren, Auswahl von Maschinen und Werkzeugen, Festlegung von Schnittparametern

ergänzt werden.

In der Tabelle 20 sind auszugsweise die erforderlichen Kompetenzen eines Mitarbeiters der spanenden Fertigung hinterlegt.

Tabelle 20: Auszug erforderlicher Kompetenzen für Mitarbeiter der spanenden Fertigung i.A.a. [80]

Aufgabe	Technisch-fachliche Kompetenz	Organisatorische Kompetenz	Persönlich-soziale Kompetenz
Planung Fertigungsablauf	<ul style="list-style-type: none"> • Zeichnung lesen • Kenntnisse zur Abhängigkeit der Schnittparameter auf Oberflächenqualität, sowie den technologieabhängigen Energiebedarf (z. B. Schnittparameter) • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Absprache mit Meister und Technologen • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Räumliches Vorstellungsvermögen • Systematisches Denken • ...
...	• ...	• ...	• ...

Für die Charakterisierung der Aufgaben der ressourcenorientierten spanenden Fertigung müssen beispielsweise folgende Aspekte Beachtung finden:

- ressourcenorientiertes Denken
- kreatives, ressourcenorientiertes Arbeiten
- Kenntnisse ressourcenorientierter Planung von Rohteilabmessungen und -arten

Zudem muss ein Kontrollinstrument z. B. in der Form einer Checkliste erstellt werden, welches Leitfragen formuliert, um die gewünschte Kompetenzentwicklung der Mitarbeiter zu beschreiben und bewertbar zu machen.

Beispielsweise sollen mit diesen Leitfragen das Ziel sowie die anvisierte Zielerreichung kritisch beleuchtet werden. Mögliche Fragen dazu können sein:

- Was soll die Zielgruppe nach der Qualifizierung(skonzeptdurchführung) können?
- Lassen sich die angestrebten Lernergebnisse überprüfen?

Diese Leitfragen können beispielsweise mit einem Soll-Ist-Kompetenzprofil (vgl. nachfolgender Abschnitt 10.4.5) aufgeklärt werden.

10.4.5 Erarbeitung Soll-Kompetenzprofil

Die im Punkt Ableitung erforderlicher Kompetenzen herausgearbeiteten Aspekte einer ressourcenorientierten Arbeitsplanung werden im Weiteren in ein Kompetenzprofil überführt. Voraussetzung für Kompetenzen sind der Wissensaufbau und die Qualifikation (vgl. Abbildung 99).

Das in der Abbildung 100 auszugsweise aufgeführte Kompetenzprofil beinhaltet exemplarisch die technisch-fachlichen Kompetenzanforderungen an Arbeitsplaner. Darüber hinaus zeigt es, wie ausgeprägt die jeweils geforderte Kompetenz sein muss (grün markiert Abbildung 100).

Erarbeitung eines Qualifizierungskonzeptes für die ressourcenorientierte Fertigung

		Ausprägung					
		0	1	2	3	4	5
Technisch-fachliche Kompetenzen							
Kenntnisse, Fähigkeiten, Wissen, Qualifikationen im Tätigkeitsbereich							
	...						
Organisatorische Kompetenzen							
Kenntnisse, Fähigkeiten, Wissen, Qualifikationen im Tätigkeitsbereich							
	...						
Soziale Kompetenzen							
Kenntnisse, Fähigkeiten, Wissen, Qualifikationen im Tätigkeitsbereich							
	...						x
Ausprägung: 0 ... trifft gar nicht zu / 5 ... trifft im vollen Maße zu							
Mindestausprägung							
x = Selbsteinschätzung Mitarbeiter							

Abbildung 99: Übersicht Kompetenzprofil

Zur Erstellung des IST-Kompetenzprofils ist es erforderlich, dass eine mitarbeiterindividuelle Einschätzung der Kompetenzen erfolgt. Dazu soll jeder zu qualifizierende Mitarbeiter durch Selbst- und Fremdeinschätzung im Gespräch seine persönliche Ist- Kompetenz-Situation bestimmen und im Anschluss daran seine individuellen Kompetenzziele in Abstimmung mit seiner Führungskraft definieren (SOLL-Kompetenzprofil, vgl. "x" in der Abbildung 100). [79]

Anschließend wird der SOLL-IST-Abgleich der Kompetenzprofile erforderlich. Dabei wird ein Vergleich des geforderten Qualifizierungsniveaus (SOLL-Kompetenzprofil) und des beim Mitarbeiter tatsächlichen vorhandenen Qualifizierungsniveaus (IST-Kompetenzprofil) ange stellt. Damit wird deutlich, wie umfangreich der jeweilige Qualifizierungsbedarf ist. Darüber hinaus werden die jeweiligen Qualifizierungsinhalte mitarbeiterspezifisch definiert.

		Ausprägung					
		0	1	2	3	4	5
Technisch-fachliche Kompetenzen							
Ausgangsteilbestimmung							
	praktische Erfahrungen Ausgangsteilbestimmung			x			
	Fähigkeit zur Interpretation einer technischen Zeichnung				x		
	Kenntnisse zu technisch relevanten Werkstoffeigenschaften				x		
	Kenntnisse zu Fertigungsverfahren			x			
	Fähigkeit und Kenntnis zur Nutzung eines CAP- oder ERP-Systems						x
	Kenntnisse über ressourcenorientierte Planung von		x				
	...						
Prozessfolgeermittlung							
	praktische Erfahrungen Prozessfolgeermittlung			x			
	Interpretation einer technischen Zeichnung				x		
	Kenntnisse zu ressourcenorientierten Fertigungsverfahren		x				
	Kenntnisse zu Fertigungsmitteln		x				
	Kenntnisse zu möglichen Zwangsreihenfolgen				x		
	Fähigkeiten zum Vergleich technologischer Varianten			x			
	Fähigkeit und Kenntnis zur Nutzung eines CAP- oder ERP-Systems						x
	...						
Ausprägung: 0 ... trifft gar nicht zu / 5 ... trifft im vollen Maße zu							
Mindestausprägung							
x = selbsteinschätzung Mitarbeiter							

Abbildung 100: Auszug SOLL-IST-Abgleich des Kompetenzprofils für technisch-fachliche Kompetenzen des Arbeitsplaners

Das in der Abbildung 101 auszugsweise aufgeführte Kompetenzprofil beinhaltet beispielhaft die technisch-fachlichen Kompetenzanforderung an einen Mitarbeiter der spanenden Fertigung. Zudem sind die jeweils unternehmensseitig geforderten Kompetenzen sowie die Mitarbeiter-IST-Kompetenzen dargestellt (grün markiert, Abbildung 101).

Auch hier wird ein SOLL-IST-Abgleich der Kompetenzprofile durchgeführt. Dabei wird ein Vergleich des geforderten Qualifizierungsniveaus und des beim Mitarbeiter tatsächlich vorhandenen Qualifizierungsniveaus angestellt. Damit wird kompetenzspezifisch deutlich, wie umfangreich der Qualifizierungsbedarf und seine jeweiligen -inhalte sein müssen.

Diese SOLL-Kompetenzprofile bestimmen die erforderliche Bandbreite einer Kompetenzausprägung für einen definierten Aufgabenbereich im Unternehmen. Für Kompetenzarten und deren Soll-Profil ist demnach eine firmenspezifische Anpassung durch Fach- und Führungskräfte eines Unternehmens möglich und erforderlich.

		Ausprägung					
		0	1	2	3	4	5
Technisch-fachliche Kompetenzen							
Planung Fertigungsablauf							
	Praktische Fähigkeiten bei der Inbetriebnahme der Werkzeugmaschine			x			
	Kenntnisse und Fähigkeiten beim Aufbau der Werkzeugmaschine und deren Komponenten				x		
	Kenntnisse zu systembedingten Einschränkungen bei der Fertigung (Hinterschneidungen (Formelemente), Bauteilgröße, Technologie)			x			
	Kenntnisse zur Abhängigkeit der Schnittparameter auf Oberflächenqualität (Rz-Werte) sowie den technologieabhängigen Energiebedarf (WZ- und Schnittparameter)		x				
	Kenntnisse zu den verwendeten Hilfsstoffen (z. B. Kühlschmierstoff) sowie deren Auswirkungen auf Werkstückoberfläche			x			
	Kenntnisse über ressourcenorientierte Planung von Rohteilabmessungen und -arten	x					
	...						
Einrichtung Maschinen							
	Kenntnisse zur Fertigungsverfahrenbestimmung			x			
	...						
Ausprägung: 0 ... trifft gar nicht zu / 5 ... trifft im vollen Maße zu							
Mindestausprägung							
x = Selbsteinschätzung Mitarbeiter							

Abbildung 101: Auszug SOLL-Kompetenzprofil technisch-fachliche Kompetenzen eines Mitarbeiters der spanenden Fertigung

10.5 Entwicklungsphase 3: Ableitung Qualifizierungskonzept

10.5.1 Definition, Aufbau und spezifische Anforderungen

Ein Qualifizierungskonzept ist ein modularisiertes, wissensbasiertes Baukastensystem zur methodisch-didaktischen Weiterentwicklung individueller Ressourcen von Mitarbeitern für

Arbeitssysteme unter Berücksichtigung von organisatorischen und fachlichen Rahmenbedingungen.

Das Qualifizierungskonzept verfolgt das Ziel der Weitergabe von Informationen zur Entwicklung von Kompetenzen (vgl. Abbildung 102).



Abbildung 102: Grundlegender Ablauf [78]

Das Qualifizierungskonzept unterstützt den Ansatz des selbstgesteuerten und selbstorganisierten Lernens nach [79]. Fähigkeiten, Fertigkeiten und vorhandene Kenntnisse machen die Kompetenz eines Mitarbeiters aus [90], worauf das Qualifizierungskonzept ausgerichtet bzw. angepasst wird. Nach [79] erlangen informelles und selbstorganisiertes Lernen sowie situatives Lernen am Arbeitsplatz und im Internet immer mehr an Bedeutung. Das erarbeitete Qualifizierungskonzept unterstützt diesen Ansatz. Eine arbeitsplatzorientierte Didaktik ist daher wichtig, weg von der eher prozessfernen Lehrgestaltung.

Qualifizierungskonzepte dienen der:

- Vereinfachung von Bedienhandlungen,
- Verkürzung der Bedienzeiten,
- effizienteren Ressourcennutzung (Werkzeugstandzeiterhöhung, Fertigungszeitreduzierung, Material- und Energiebedarfsreduzierung, Entsorgungsmengen durch elektrochemisch Beschichtung,
- Erhöhung der Mitarbeiterakzeptanz von ressourcenorientierten Fertigungsprozessen und
- Reduzierung der Mitarbeiterqualifizierungszeiten (Ansatz: Massenfertigung, Einmalfertigung, Azubis, keine Fachkräfte...).

Dazu wurde in der Nachwuchsforschergruppe MoQuaRT das folgende Vorgehen definiert:

- Erarbeitung vorhandener Maschinen-, Betriebs- und Werkzeugdaten, Mitarbeiterqualifikationen, technischer Zusammenhänge zwischen Energie-, Materialbedarf und speziell für galvanische Prozesse abgedecktem Werkstoff
- Erarbeitung von Zusammenhängen der Ressourcenverbräuche in Abhängigkeit von Teileanzahl (Serienfertigung, Einmalfertigung...), verfügbaren Maschinen (Anzahl, Dimension...)
- Beschreibung der Anforderungen an softwaretechnische Umsetzung
- Ggf. Überführung in eine Software (Maschinensteuerung, ERP-System oder ähnliches)

Anforderungen an ein Qualifizierungskonzept umfassen grundsätzlich:

Die Abbildung 103 visualisiert den grundsätzlichen Aufbau eines Qualifizierungskonzeptes. Ziel ist es, die Probleme des Arbeitsprozesses zu identifizieren und somit die Grundlage für die Lernsituation zu schaffen und lernrelevante Themen herauszuarbeiten bzw. abzuschern. Die Anforderungen, die sich innerhalb der Nachwuchsforschergruppe MoQuaRT an das Qualifizierungskonzept herauskristallisiert haben, sind:

- Langlebigkeit (Nachhaltigkeit)
- Zweckmäßigkeit,
- technischer Wert,
- Produktnotwendigkeit,
- Modularer Aufbau,
- Weiterverwendbarkeit und
- Flexibilität.

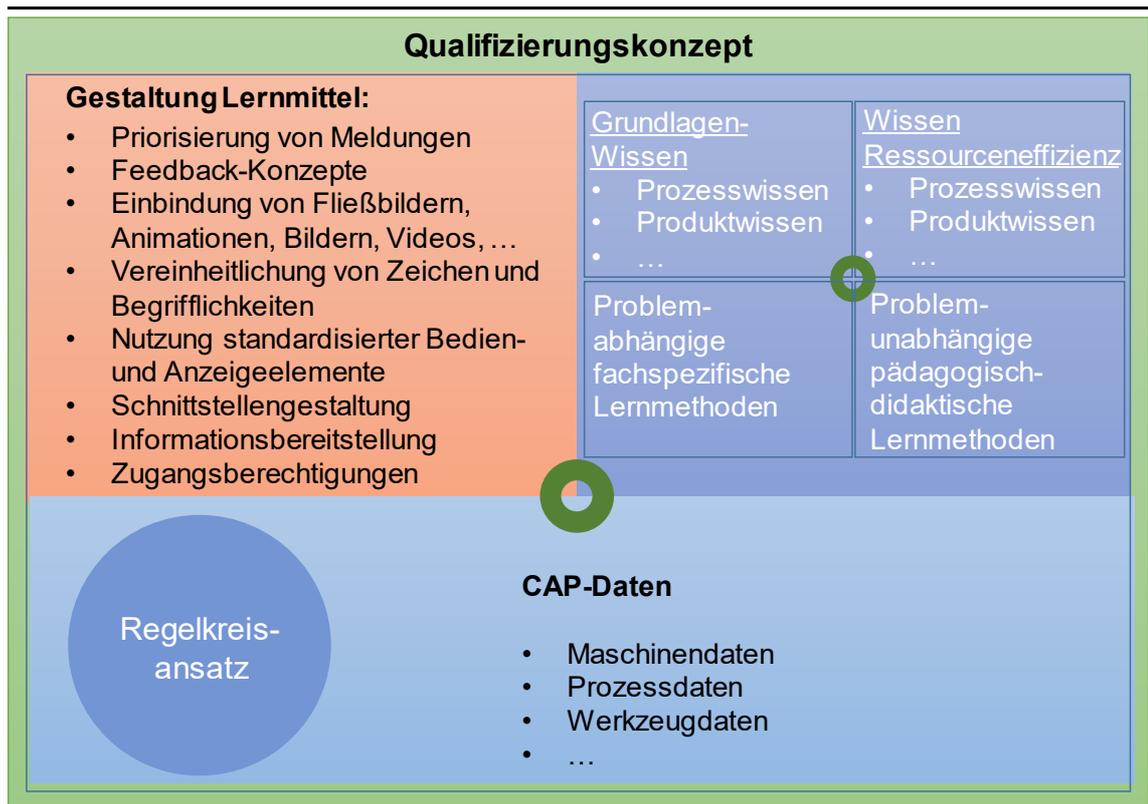


Abbildung 103: Grundsätzlicher Aufbau eines Qualifizierungskonzeptes

10.5.2 Lernmethoden des Qualifizierungskonzeptes

Lernmethoden als wesentlicher Bestandteil der zu entwickelnden Qualifizierungskonzepte können in aktive und passive Methoden eingeteilt werden. Aktive Qualifizierungskonzepte sind dabei so zu verstehen, dass der Lernende unmittelbar in die Vermittlung der Lerninhalte einbezogen wird. Im Gegensatz dazu wird bei einem passiven Lernkonzept das Wissen an die Lernenden herangetragen.

10.5.3 Integrationskonzept als Basis des Qualifizierungskonzeptes

Die Basis des Qualifizierungskonzeptes bildet das Integrationskonzept, welches die Kombination bzw. Verzahnung aus Präsenzphasen und Online-Phasen umfasst. Innerhalb des Integrationskonzeptes werden viele multimediale Elemente verwendet. Die angebotenen Informationen aus der Präsenzphase (Vorlesungsunterlagen) können vom Lernenden auch nach der Veranstaltung genutzt werden. Dies bietet demnach einen Ansatz zum selbstbestimmten Lernen. Ein wesentliches Element ist hier die Online-Phase, als fester Bestandteil. Diese Phase beinhaltet Aufgaben oder Schwerpunkte, die zur Vorbereitung der nachfolgenden Präsenzphase erforderlich sind. Dies können Selbsttests, Erklärfilme, Selbstlernmaterialien usw. sein. [85], [86]

Den inhaltlichen Schwerpunkt der Phasen soll in MoQuaRT die ressourcenorientierte Arbeitsplanung und deren anschließende Umsetzung in der Fertigung bilden. Innerhalb des dafür exemplarisch entwickelten Integrationskonzepts (Abbildung 104) wechseln sich Präsenzphase und Onlinephase jeweils iterativ ab.

Innerhalb der ersten Präsenzphase werden digitale Medien, wie ein bereits erarbeitetes Video und eine Vorlesung mit einer PowerPoint-Präsentation zunächst zur Sensibilisierung verwendet. Der Fokus liegt dabei auf der themenspezifischen Grundlagenschaffung für die ressourcenorientierte Planung und Fertigung.

In der anschließenden Onlinephase erfolgt die Aktivierung der Teilnehmer durch eine gezielte Wiederholung und Vertiefung der Informationen der Präsenzphase beispielsweise mittels Wissensabfrage an Hand von Multiple Choice-Tests.

Die praktische Umsetzung des Beispielbauteils in der zweiten Präsenzphase ist in zwei Unterphasen aufgeteilt, die sich grundlegend auf den methodischen Ansatz des Lernens, vereinfacht „Zusehen - Mitmachen – Probieren“, beziehen [91].

Dazu wird der Zielgruppe ein zu fertigendes Bauteil und die Aufgabenstellung vorgestellt. Darauf aufbauend erstellen sie unter Anleitung den Arbeitsplan und das NC-Programm für eine Musterlösung, richten die Maschinen ein, messen wichtige Verbrauchsparameter und werten diese aus. Im Anschluss daran erarbeiten die Teilnehmer eigenständig eine Alternativlösung, setzen diese um und bewerten diese, insbesondere im Vergleich zur Musterlösung. Die Arbeitsplanung und Umsetzung soll dabei mit den Hilfsmitteln, die in der Trainingsfabrik 4.0 zur Verfügung stehen, erfolgen.

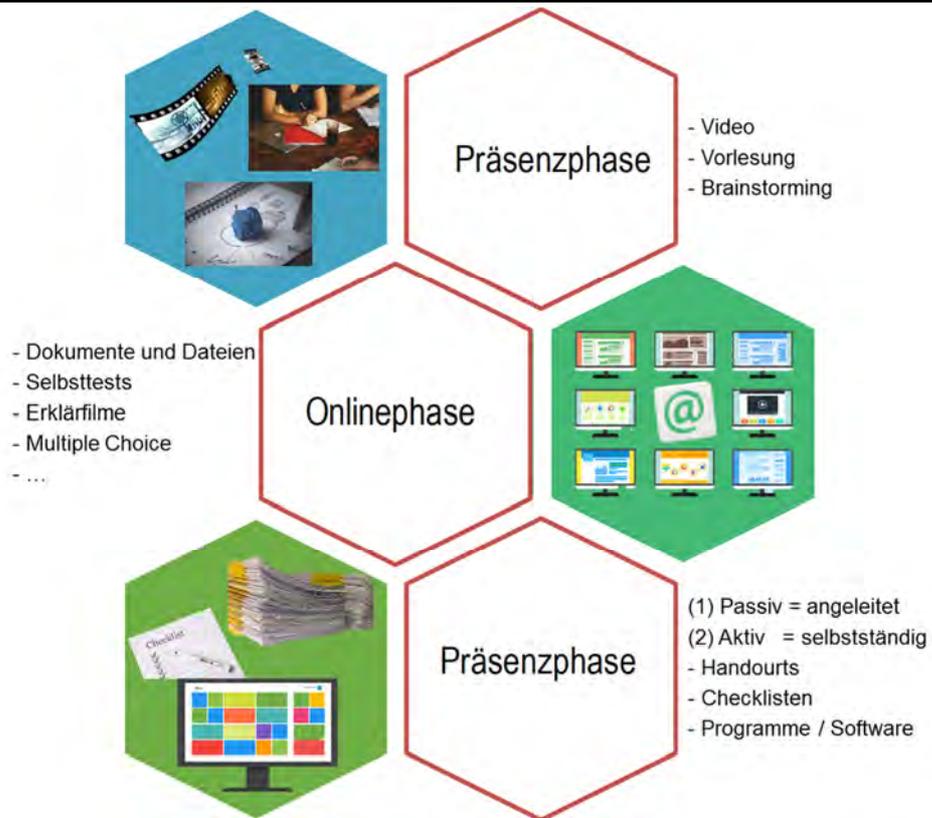


Abbildung 104: Integrationskonzept als Basis des Qualifizierungskonzeptes

10.5.4 Umsetzung des Qualifizierungskonzeptes

Die Umsetzung der einzelnen grundsätzlichen Entwicklungsphasen eines Qualifizierungskonzeptes, welche in den Abschnitten 10.3, 10.4 und 10.5 aufbereitet dargestellt wurden, erfolgt webbasiert, um dem zukünftigen Anwender eine Informationsplattform bieten zu können. Wesentlicher Vorteil dabei ist, dass der Anwender grundsätzlich zu jeder Zeit auf den Inhalt des Qualifizierungskonzeptes zugreifen kann, wodurch ein selbstgesteuertes Lernen erzielt wird.

Die Virtualisierung des Qualifizierungskonzeptes erfolgt mit der webbasierten Auszeichnungssprache HTML. Der Aufbau folgt den Phasen des Blended-Learning-Konzeptes (vgl. Tabelle 21) und unterstützt dieses Lernkonzept mit digitalen Unterlagen (auch zum Download), mit Medien wie Videos und Bildern sowie Übungsaufgaben (vgl. Tabelle 21). Im Kapitel 11 ist die software-technische Umsetzung des Qualifizierungskonzeptes beschrieben und dargestellt.

Tabelle 21: Überblick Qualifizierungskonzept und Inhalte der Phasen

	Präsenzphase	Onlinephase	Präsenzphase
Generelles Ziel	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilisierung und Qualifizierung der Studierenden für eine nachhaltige Fertigung im Bereich der Zerspanung 		
Ziel / Inhalt	<ul style="list-style-type: none"> • Einführung in Thematik • Wissenszugewinn 	<ul style="list-style-type: none"> • Wiederholung und Vertiefung fertigungstechnischer und arbeitsplanerischer Schwerpunkte 	<ul style="list-style-type: none"> • Praktika Koordinatensystem - Passiver Teil = angeleitet - Aktiver Teil = Selbstständig
Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Video zum Einstieg und zur thematischen Eingliederung • Vorlesung zur Grundlagenerstellung • Brainstorming „Potenziale der nachhaltigen Fertigung in der Fabrik“ zur Aktivierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Dokumente und Dateien (z. B. PDF-Dateien, Simulationen, ...) • Selbsttests • Multiple Choice • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Handout • Checklisten • Programme / Software (CAM, PRODAT ERP, MS Project)
Medien	<ul style="list-style-type: none"> • Video • PowerPoint Präsentation • Etherpad 	<ul style="list-style-type: none"> • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Dokumente und Dateien • Programme / Software • ...
Workload (Arbeitsaufwand)	<ul style="list-style-type: none"> • 90 min 	<ul style="list-style-type: none"> • ~ 30 – 90 min 	<ul style="list-style-type: none"> • Ca. 5 x 90min.
Betreuungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Zur Vorbereitung ggf. hoch 	<ul style="list-style-type: none"> • Zur Erstellung Onlinematerial hoch 	<ul style="list-style-type: none"> • Verteilt sich auf mehrere Präsenzphasen → überschaubar • Ergebnisbewertung evtl. etwas höher

Die bisherigen Versuche mit dem erarbeiteten Qualifizierungskonzept, vor allem aber der Arbeitsaufwand der zwei Präsenzphase, zeigen, wie umfangreich sowohl die Vorbereitung der Lehrenden auf die Präsenzphase, aber auch der Zeitaufwand für den Lernenden sind. Diese beiden Sachverhalte sprechen für eine Erhöhung des Digitalisierungsgrades aber auch für die Vereinfachung der gestellten Arbeitsaufgabe.

Pilot-Qualifizierungskonzept MoQuaRT

11.1 Beschreibung Qualifizierungskonzept MoQuaRT

Bei einem Qualifizierungskonzept handelt es sich, wie im Punkt 10.5.1 beschrieben, um ein modularisiertes, wissensbasiertes Baukastensystem zur methodisch-didaktischen Weiterentwicklung individueller Ressourcen von Mitarbeitern unter Berücksichtigung von organisatorischen und inhaltlichen Rahmenbedingungen. Ein spezifiziertes Qualifizierungskonzept umfasst zunächst die Modelle für die betrachteten Fertigungsprozesse sowie dessen Akteure.

Ziel des vorliegenden Qualifizierungskonzeptes (vgl. Punkt 10.1) ist der möglichst selbständige Wissens- und Kompetenzerwerb durch die Lernende durch die Nutzung der entwickelten multimedialen Lehr- und Lernunterlagen. Das Qualifizierungskonzept soll die Wissensvermittlung in Lehrveranstaltungen, insbesondere Praktika unterstützen und Übungen zur Wiederholung und Vertiefung des Gelernten bereitstellen.

Im Qualifizierungskonzept erfolgt pilothaft für die Studierenden des Studiengangs Maschinenbaus eine zielgerichtete Sensibilisierung und Motivation durch eine methodische Anleitung. Dazu werden zusätzlich auch computergestützte Modelle zur Energiebedarfsberechnung (Vorgehensweise zur maschinenspezifischen und bauteilabhängigen Energiebedarfsprognose) von ausgewählten Betriebsmitteln und Fertigungsverfahren genutzt. Die methodisch-didaktisch unterstützte Weiterentwicklung vorrangig kognitiver Fähigkeiten, Fertigkeiten und Kenntnisse ermöglicht dabei auch die iterative Anpassung und Anwendung der Modelle für weitere Gruppen von Akteuren bzw. weitere Anforderungen an diese.

Zur Umsetzung des Qualifizierungskonzeptes wurde zunächst ein Blended-Learning-Konzept (didaktische Methode vgl. Punkt 10.4.1) als Basis konzipiert und spezifiziert. Dabei wechseln sich die Präsenzphasen und eine Onlinephase iterativ ab (vgl. Abbildung 104). Innerhalb der Präsenzphase werden digitale Medien wie ein neu erarbeitetes Video und eine Vorlesung in Form einer PowerPoint-Präsentation zur Sensibilisierung verwendet.



Abbildung 105: Bestandteile Blended-Learning-Konzept

Der Fokus dieser ersten Präsenzphase des Blended-Learning-Konzeptes liegt auf der themenspezifischen Grundlagenschaffung, hier am Beispiel der ressourcenorientierten Fertigung. In der anschließenden Onlinephase erfolgt die Aktivierung der Studierenden durch eine gezielte Wiederholung und Vertiefung der Informationen der Präsenzphase durch Erklärfilme. Die praktische Umsetzung der Planung des Beispielbauteils (Praktika Koordinatensystem) in der anschließenden Präsenzphase ist in einen passiven und einen aktiven Teil aufgeteilt. Diese beziehen sich grundlegend auf den in der Abbildung 106 dargestellten methodischen Ansatz des Lernens.



Abbildung 106: Methodischer Ansatz des Lernens in der Präsenzphase

Die praktische Umsetzung (Praktika Koordinatensystem) des Qualifizierungskonzeptes erfolgt auf der Basis des in der Abbildung 107 aufgeführten Stufenkonzepts zur Arbeitsablaufplanung zunächst in der ersten Unterphase, unter der Anleitung der Hochschulbetreuer (passiver Teil), welchem ein aktiver Teil, die zweite Unterphase, folgt. Innerhalb dieser zweiten Unterphase wird das erlernte Wissen umgesetzt und selbständig ein weiteres mögliches Fertigungsverfahren oder eine Verfahrenskombination definiert. Hierbei steht der Hochschulbetreuer in Konsultationen für Rückfragen zur Verfügung.



Abbildung 107: Stufenkonzept im exemplarischen Qualifizierungskonzept

In der Abbildung 108 und Abbildung 109 sind Beispielbauteile dargestellt, welche die ressourcenorientierte Kompetenzentwicklung der Studierenden methodisch-didaktisch unterstützen sollen. Dies basiert auf der Vermittlung der Zusammenhänge zwischen der Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren, fallweise auch der Kombination unterschiedlicher Fertigungsverfahren, und der Berechnung des daraus je Variante notwendigen Material-, Energie- und Zeitbedarfes. So arbeiten die Lernenden Einsparpotenziale alternativer Lösungen aus und eignen sich die Methodik des ressourcenorientierten Planens an.

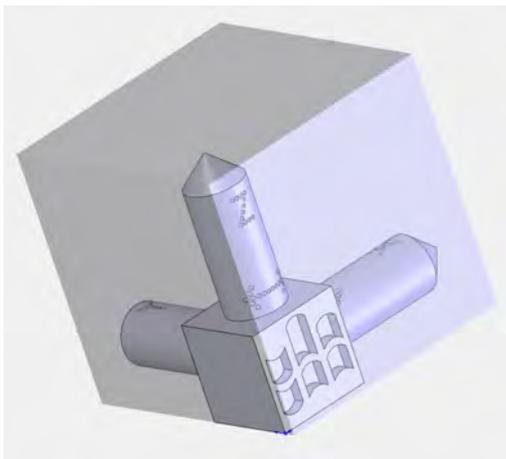


Abbildung 108: Beispielbauteil inkl. Ausgangsmaterial zur Umsetzung des Qualifizierungskonzeptes

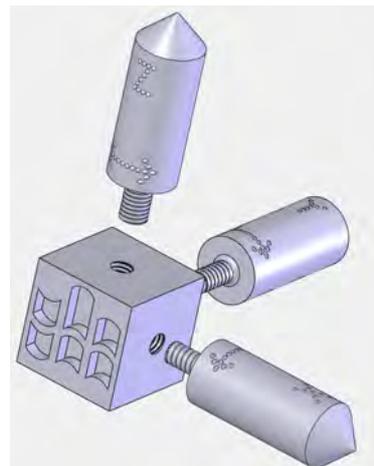


Abbildung 109: Beispielbauteil, konstruktiv neu gestaltet für alternative Ansätze hinsichtlich Rohmaterials und Fertigungsverfahren zur Umsetzung des Qualifizierungskonzeptes

Das entwickelte Qualifizierungskonzept mit den Beispielbauteilen des Koordinatensystems (Abbildung 108 und Abbildung 109) wurde in eine digitale Lernumgebung eingebettet. Diese Erstellung geschah mit der Programmiersprache HTML.

Der Aufbau der digitalen Lernumgebung folgt den Phasen des Integrationskonzeptes (vgl. Abschnitt 10.5.3) und unterstützt dieses Lernkonzept mit digitalen Unterlagen (auch zum Download), Medien wie Videos und Bildern, sowie Übungsaufgaben. Abbildung 110 zeigt die Startseite als Ausgangspunkt für alle Aktionen und mit Navigation in die Themengebiete.



Abbildung 110: Digitale Lernumgebung – Startseite

Themengebiete und Inhalte der digitalen Lernumgebung sind in der nachfolgenden Tabelle 22 näher definiert.

Tabelle 22: Themengebiete der digitalen Lernumgebung

Themengebiet	Inhalt
Qualifizierungskonzept	<ul style="list-style-type: none"> • Definition Qualifizierungskonzept • Überblick über Ziel und Konzept • Verlinkung zu den Phasen und Schwerpunkten Grundlagen, Wiederholung und Vertiefung, sowie der praktischen Anwendung
Grundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Kurzfilm zur thematischen Einstimmung • Definition und Verlinkung zu weiterführenden Informationen zu den Punkten Nachhaltigkeit, Ressourcen und nachhaltiges Handeln • Verweis zum Nachwuchsforscherprojekt MoQuaRT
Wiederholung & Vertiefung	<ul style="list-style-type: none"> • Überblick und Verlinkung zu weiterführenden Informationen zu den Schwerpunktthemen der Arbeitsplanung und Fertigungstechnik
Übung	<ul style="list-style-type: none"> • Erläuterung der Aufgabenstellung und des Vorgehens zum Beispielbauteil Koordinatensystem • Anleitung des „passiven“ Praktikumsteils • Aufgabenstellung für den „aktiven“ Praktikumsteil • Anleitung und Nutzung eines Tools zur Energiebedarfsprognose der Fertigungsvariante • Durchführung des Variantenvergleichs der Varianten aus passivem und aktivem Praktikumsteil
Kontakt	<ul style="list-style-type: none"> • Hinterlegung der Kontaktdaten und Verlinkung zu den im Projekt beteiligten Personen

Die nachfolgenden Abbildungen veranschaulichen die Umsetzung innerhalb der digitalen Lernumgebung.

Qualifizierungskonzept
für die ressourcenorientierte spanende Fertigung
am Beispiel der Trainingsfabrik 4.0

Home Grundlagen **Qualifizierungskonzept** Wiederholung und Vertiefung Übung Kontakt

Wiederholung & Vertiefung

Im Folgenden gibt es zwei Möglichkeiten der Wiederholung und Vertiefung.

(1) Allgemeine Wiederholung

Hier kann durch die Auswahl des Schwerpunktes direkt in dem jeweilige Gebiet wiederholt oder gefestigt werden.

Grundlagen Allgemein	Grundlagen Reale Lernumgebung Trainingsfabrik 4.0	Grundlagen virtuelle Lernumgebung
Grundlagen Produktionsplanung und -steuerung	Grundlagen Fertigungstechnik	Grundlagen SolidWorksCAM
Grundlagen Excel	Grundlagen Maschinenmodell	Grundlagen Energiebedarfsprognose (Berechnungsmodell)

(2) Ermittlung des gezielten Qualifizierungsbedarfes

Hier kann durch gezielte Abfrage der persönlichen Hintergründe und des Anwendungsbereiches direkt ein angepasstes Qualifizierungskonzept erstellt werden, welches eine Sammlung spezifischer, relevanter Inhalte darstellt.

[Hier ermitteln Sie Ihren Qualifizierungsbedarf](#)

Home Grundlagen Qualifizierungskonzept Wiederholung und Vertiefung Übung Kontakt

UNIVERSITÄT DUISBURG ESF

Abbildung 111: Auszug aus dem Themengebiet „Wiederholung und Vertiefung“

Qualifizierungskonzept
für die ressourcenorientierte spanende Fertigung
am Beispiel der Trainingsfabrik 4.0

Home Grundlagen Qualifizierungskonzept Wiederholung und Vertiefung **Übung** Kontakt

Das Konzept

Mit dem Qualifizierungskonzept sollen grundsätzliche Möglichkeiten zur Ressourceneinsparung in der spanenden Fertigung aufgezeigt werden.

Dabei liegen die Schwerpunkte auf den energetischen, materiellen und zeitlichen Ressourcenbedarfen.

Durch die Vergleiche der Energiebedarfe, Materialverbräuche und Durchlaufzeiten ist eine Bewertung und der Vergleich der Fertigungsvarianten möglich.

Das Vorgehen

Planungsvorbereitung

In diesem Punkt erfolgt die Grobplanung der Fertigung und die Diskussion der Konstruktionsdaten. Diese werden, falls erforderlich, nach der Festlegung des Fertigungsverfahrens (Grobplanung) entsprechend modifiziert.

Arbeitsplanungsaufgabe Prozessplanung

Hier erfolgt zunächst die Bestimmung der Rohteilgeometrie, -abmaße und des Werkstoffes zur genauen Spezifikation des Ausgangsteils. Das Ausgangsteil ist dabei so auszulegen, dass das Referenzbauteil Koordinatensystem vollständig hineinpasst. Weiterhin ist darauf zu achten, dass die Spannung des Ausgangsteils mit den vorhandenen Spannmitteln der entsprechenden Maschine realisierbar ist.

Nach Bestimmung der Rohteilgeometrie erfolgt die Prozessfolgeermittlung. In diesem Schritt ist das Fertigungsverfahren festzulegen und die erforderlichen Arbeitsvorgänge mit ihrer entsprechenden Reihenfolge zu beschreiben.

Im Anschluss an die Festlegung der Fertigungsreihenfolge erfolgt die Fertigungsmittelauswahl. Das bedingt die Festlegung geeigneter Maschinen, Werkzeuge und Vorrichtungen.

Arbeitsplanungsaufgabe Operationsplanung

Abbildung 112: Auszug aus dem Themengebiet „Übung“

Für das entwickelte Qualifizierungskonzept erfolgte die praktische Umsetzung der Fertigung. Hierzu wurden für verschiedene Fertigungsverfahren-Varianten (z. B. nur Fräsen oder Kombination aus Drehen und Fräsen) die CAM-basierten Arbeitspläne in der CAM-Software SolidWorks CAM erstellt. Die Fertigungsvariante, welche ausschließlich das Fräsen verwendet, ist die „Musterlösung“. Hier erarbeiten die Studierenden gemeinsam mit dem betreuenden Personal die Lösung für das Referenzbauteil Koordinatensystem, welches mit speziellen Spannbacken fixiert wird. Anschließend erfolgten die Spezifikation der benötigten Bearbeitungsfeatures und -operationen sowie die Generierung des NC-Programms.

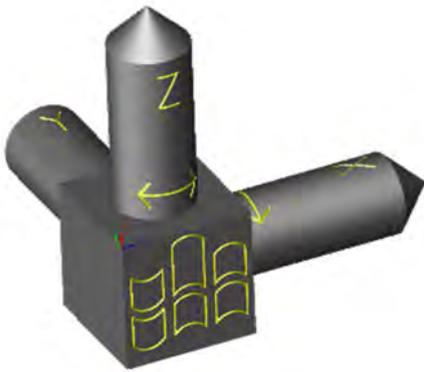


Abbildung 113: Beispielbauteil "Koordinatensystem" in der Musterlösung

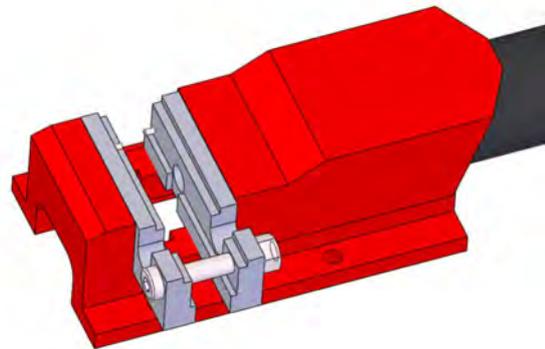


Abbildung 114: Zusätzlich gefertigte Spannbacken (grau) im Maschinenschraubstock (rot)

11.2 Auswertung der Anwendung des Qualifizierungskonzeptes

Die Bewertung der Studierenden nach Durchführung und Nutzung der Lernumgebung erfolgte mit Hilfe von Bewertungsbögen.

Dabei wurde als sehr positiv empfunden:

- der gut strukturierte Aufbau,
- die eindeutigen Anweisungen,
- sehr umfangreiche Gestaltung der Inhalte,
- Schriftgröße und Bilder sehr positiv in Größe und Gestaltung
- umfangreiche Verweise auf weiterführende Literatur

Als negativ wurde empfunden:

- Menüführung teilweise unsauber im Hinblick auf die Bezeichnung von Überschriften

Diese Anmerkungen durch die Studierenden gehen in die Weiterentwicklung des Qualifizierungskonzeptes ein. Hier ist vor allem wichtig, dass das erarbeitete Konzept für die zukünftige Lehre eingesetzt werden soll. Das Potential, einerseits Unternehmensressourcen durch die Übertragung der erlangten und vermittelten Kenntnisse der Studierenden perspektivisch einsparen zu können und andererseits durch die nachhaltige Weiterentwicklung des existierenden Qualifizierungskonzeptes ist als sehr umfangreich einzuschätzen (vgl. Kapitel 13).

Entwickeltes Gesamtmodell MoQuaRT

Die aufgezeigten Modelle zur Ressourceneffizienzsteigerung sowie die dafür notwendige Datengewinnung, sowohl im Bereich der nasschemischen Beschichtung als auch der spanenden Bearbeitung und das theoretische Maschinenmodell stellen neue Anforderungen an die Arbeitsplanung, aber auch an die Beschäftigten eines Unternehmens. Dazu wurde ein Gesamtmodell zur durchgängigen und ressourcenorientierten Produktion erarbeitet (vgl. Abbildung 115). Mithilfe dieses Modells sind die Ressourcenbedarfe (Plan-Werte) und Ressourcenverbräuche (Ist-Werte) von Fertigungssystemen abbildbar.

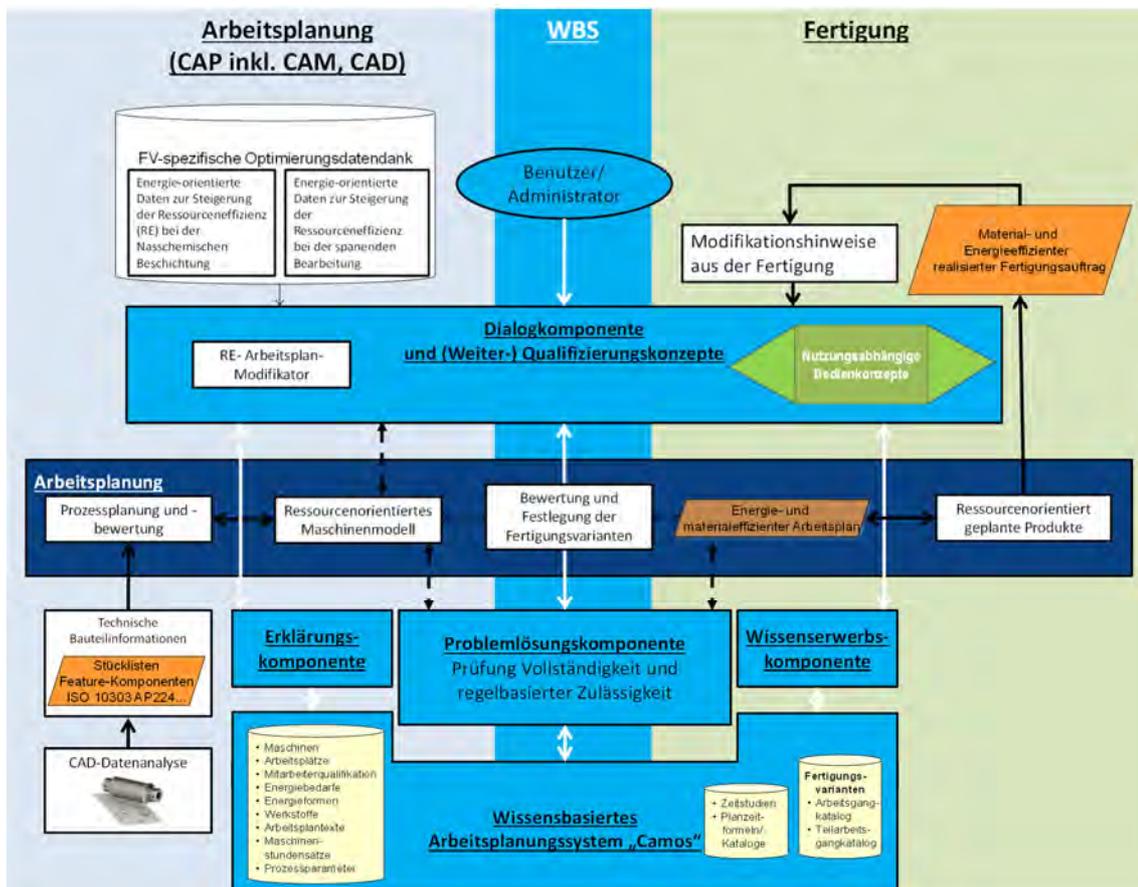


Abbildung 115: Modell zur ganzheitlichen ressourceneffizienten Produktion

Das Gesamtmodell beschreibt das eng verknüpfte Zusammenwirken von Arbeitsplanung, Qualifizierung und Fertigung mit dem Ziel einer durchgängigen und ressourcen-orientierten Produktion. Dazu war es erforderlich energiebezogene Daten und Informationen zur Steigerung der Ressourceneffizienz, sowohl für die spanende Fertigung (vgl. Kapitel 4, 5 und 6) als auch für die nasschemische Beschichtung (vgl. Kapitel 7) zu erarbeiten, zu recherchieren und für das Berechnungsmodell zu verdichten. Diese Informationen umfassen beispielsweise elektrische Messdaten, notwendige Mitarbeiterqualifikationen zur Maschinen- bzw. Anlagenbedienung, Hilfsstoffbedarf oder Inbetriebnahme-Strategien. Die gewonnenen Daten und Erkenntnisse fließen in den Bereich der Arbeitsplanung in eine Fertigungsverfahrenspezifische Datenbasis ein, die wiederum die Arbeitsplanung mit der Einbindung der gewonnenen theoretischen Erkenntnisse beeinflusst. So helfen beispielsweise die Parameter der spanenden Fertigung zur Festlegung ressourcenschonender Schnittwerte oder die Parameter der nasschemischen Beschichtung, zur Bestimmung günstiger Badtemperaturen oder Elektrolytzusammensetzungen (vgl. Kapitel 4, 5, 6 und 7).

Die Arbeitsplanung als Teil des Produktionsprozesses erfolgt nach aktuellem Vorgehen, das im ersten Schritt die CAD-Datenanalyse und darauf aufbauend die Generierung der technischen Bauteilinformationen, als Ergebnis u.a. fertigungsorientierte Stücklisten vorsieht. Die Planung ist durch das ressourcenorientierte Gesamtmodell zur Gestaltung und Bewertung von Fertigungsprozessen beeinflussbar und kann in Wechselwirkung mit diesem erneut weiterentwickelt und bewertet werden. Im Planungsprozess entstehen diverse Fertigungsvarianten die nach den Aspekten der Material- und Energieeffizienz bewertet werden (vgl. Kapitel 8).

Darüber hinaus sind diese Daten auch für die Qualifizierung der MitarbeiterInnen notwendig. Diese Qualifizierung kann einerseits mit einer selbst entwickelten Wissensbasis Camos (Entwicklungsplattform Camos Develop) unterstützt werden (vgl. Abschnitt 8.2.4). Alternativ kann dies auch mit einem webbasierten System, wie im Kapitel 11 beschrieben, erfolgen. In beiden Fällen erfolgt eine anwendungsorientierte Qualifizierung der MitarbeiterInnen.

Unter Nutzung der Qualifizierungskonzepte und der Berücksichtigung der Untersuchungserkenntnisse zur Steigerung der Material- und Energieeffizienz bei der Fertigung erfolgt die Sensibilisierung und Weiterbildung der MitarbeiterInnen. Als eine Grundlage zur Qualifizierung im Sinne des Gesamtmodells wurde beispielsweise ein Regelkreis (vgl. Abbildung 116) erarbeitet, der den Hauptprozess enthält und um die Aspekte einer ressourcenorientierten

Fertigung erweitert wurde. Damit sind die Zusammenhänge und Wirkungsweisen der Einfluss-, Stör- und Kontrollgrößen des Zerspanungsprozesses und der nasschemischen Beschichtung leicht nachvollziehbar abgebildet.

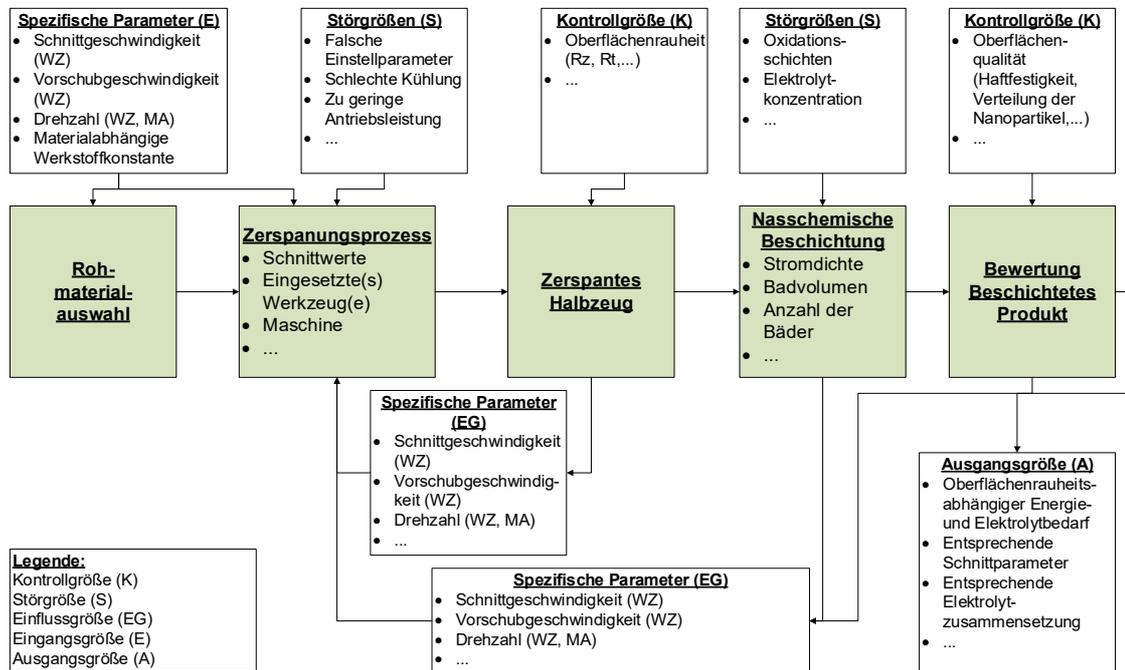


Abbildung 116: Regelkreis zur ressourcenorientierten Fertigung hochbeanspruchter Bauteile

Durch den anwenderorientierten Aufbau und Inhalt der Qualifizierung ist eine Anpassung an spezifische Maschinen und Fertigungsprozesse des Unternehmens möglich. Das bedeutet, dass folgende Punkte innerhalb des nutzungsabhängigen Bedienkonzeptes Berücksichtigung finden:

- Beschreibung der Maschinen/ -Arbeitsplätze (Aufbau inkl. aller Komponenten, Art der Steuerung)
- Spezifikation der Bedienvorgänge (Welche gibt es → Interaktion mit der Maschine: Vorgehen beim Ausschalten, Rüsten)
- Beachtung von maschinenspezifischen Besonderheiten (Aktivierungsreihenfolge der Peripherie)
- Einschränkungen
- ...

Mit diesen Erkenntnissen wird eine durchgängige und ressourcenorientierte Produktion ermöglicht, bei der die Sensibilisierung und Weiterbildung der MitarbeiterInnen zu einem ganzheitlichen Denken mit der Berücksichtigung von Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf den Produktionsprozess wirkt.

Fazit und Forschungsbedarf

13.1 Fazit

Die Nachwuchsforschergruppe MoQuaRT zeigte während der dreijährigen Projektlaufzeit, dass die Ressourcenbedarfe innerhalb der spanenden Fertigung sowie einer anschließenden nasschemischen Beschichtung berechenbar und damit planbar sind. Der sich daraus ergebende Vorteil ist sowohl ökologisch als auch ökonomisch belastbar.

Die Qualifizierung sowie die Sensibilisierung von Studierenden und damit von zukünftigen potentiellen Ingenieuren im Hinblick auf die Reduzierung von Ressourcenbedarfen wird als real eingeschätzt. Mit Hilfe einer Lernumgebung werden Planern und anderen betrieblichen Mitarbeitern bzw. Studierenden adäquate Hilfsmittel an die Hand gegeben. Die Erprobung erfolgte sowohl durch die Anwendung des Qualifizierungskonzeptes im Studienbetrieb als auch in der Zusammenarbeit mit einem Industriepartner.

Die Erkenntnisse der Nachwuchsforschergruppe werden im Hinblick auf Unternehmensressourcen, zunächst bezogen auf die sächsische Wirtschaft (Maschinenbau und Zulieferindustrie) einen wesentlichen Beitrag leisten. Diese Branchen sind zugleich die größten Arbeitgeber der Absolventen.

Damit leistet die Nachwuchsforschergruppe einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung von Ressourcenbedarfen in der sächsischen Wirtschaft (vgl. Tabelle 23 und Tabelle 24).

Tabelle 23: Zusammenfassung Quantifizierung Energie- und CO₂-Einsparung (geschätzt)

Maßnahme	
Verringerung des Energiebedarfs des Fertigungssystems durch mögliche Reduzierung der erforderlichen Energieaufnahme der Maschinen	
Eingesparte Energie bezogen auf betrachtete Maschine innerhalb der Nachwuchsforschergruppe [kWh/ a*Maschine]	Bis zu 1.000 kWh/ a*Maschine
Eingesparte Energie bezogen auf Maschinen ähnliche Leistungsklasse in der sächsischen Wirtschaft (1.000Stück) [kWh/ a]	Bis zu 1.000 MWh/ a

Eingespartes klimaaktives Gas (CO ₂) bezogen auf betrachtete Maschine innerhalb der Nachwuchsforschergruppe [t/ a*Maschine]	47,4t/ a*Ma- schine
Eingespartes klimaaktives Gas (CO ₂) bezogen auf Maschinen gleicher Leistungsklasse in der sächsischen Wirtschaft (1.000Stück) [t/ a]	474t/a

In der Tabelle 24 sind weitere Energieeinsparmaßnahmen aufgeführt, welche im Qualifizierungskonzept thematisiert werden. Für die Berechnung des Energieeinsparpotentials und daraus resultierend der reduzierten Emission des klimaaktiven Gases CO₂ sind folgende Umrechnungsfaktoren verwendet worden:

- 1 kg eingespartes Material in Fertigung verringert den Energiebedarf um ca. 6 kWh [93]
- 1 kWh reduzierter Energiebedarf bedeutet 0,474 kg weniger CO₂-Ausstoß [94]

Tabelle 24: Zusammenfassung Quantifizierung Energie- und CO₂-Einsparung (geschätzt)

Maßnahme	
Verringerung des Energiebedarfs durch Reduzierung des Materialeinsatzes in der Fertigung durch weniger Halbzeug infolge der Adaption des Ausgangsmaterials bezogen auf das Referenzbauteil Koordinatensystem	
Eingesparte Energie bezogen auf betrachtetes Referenzbauteil [kWh/ Bauteil]	7,75 kWh/ Bauteil
Eingesparte Energie bezogen auf weitere ähnliche Bauteile (1.000 Stück) [kWh]	7.750 kWh
Eingespartes klimaaktives Gas (CO ₂) bezogen auf betrachtetes Referenzbauteil [kg]	3,67kg
Eingespartes klimaaktives Gas (CO ₂) bezogen auf weitere ähnliche Bauteile (1.000 Stück) [kg]	3.670kg

Mit der Verbreitung des auf dem Qualifizierungskonzept basierenden Wissens und durch die Sensibilisierung, zunächst auf die zukünftigen Arbeitgeber der Studierenden in Sachsen, wird diesen eine weitere Möglichkeit gegeben, ihre internen Energie- und Material-bedarfe grundhaft zu reduzieren.

13.2 Forschungsbedarf

Die Ergebnisse der Nachwuchsforschergruppe bilden eine hervorragende Basis für weitere Forschungsarbeiten sowohl auf dem Gebiet der energetischen und visuellen Maschinenmodellentwicklung, als auch auf dem Gebiet der Mitarbeiterqualifizierung.

Das maschinelle Lernen, durch die Entwicklung adäquater Datenanalysen und Vorhersagemodelle, bietet erhebliches Potential, die Erfahrungen der auf Basis von Microsoft Excel entwickelten Maschinenmodelle aufzugreifen, neu zu überdenken und damit deren vorhan-

dene Reglementierungen, wie bspw. die Anzahl der in Wechselwirkung befindlichen Einflussgrößen (Vorschubgeschwindigkeit, Drehzahl oder herzustellende Formelemente) weiter auszubauen. Damit wäre eine noch genauere Prognose des Energiebedarfs realistisch und darüber hinaus aufwandsärmer zu erreichen.

13.3 Ausblick und Transfer am Beispiel virtueller Bedienhandlungen

Trainingsfabrik 4.0

Infolge der Nutzung des entwickelten Gesamtmodells bzw. einzelner Teilmodelle werden Studierende für den Umgang mit den Themen Ressourceneffizienz und Maschinenmodellierung in der Industrie sensibilisiert und qualifiziert, was eine gute Basis für das künftige Arbeitsleben schaffen wird. Die neuen Ansätze werden regional vor allem für Sachsen wirksam. Das erarbeitete Qualifizierungskonzept mit seinen Inhalten (Abschnitt 10.5 und Kapitel 11) soll durch den Einsatz in der Lehre perspektivisch in der Industrie Anwendung finden und entsprechendes Personal bei der Reduzierung von Ressourcenbedarfen unterstützen.

Eine innerhalb der Nachwuchsforschergruppe für das Qualifizierungskonzept erarbeitete Präsentation für eine Vorlesung vermittelt grundsätzliches Wissen, Energie und Material einzusparen. Diese Präsentation ist so aufgebaut, dass dem Auditorium verschiedene Einsparungspotentiale demonstriert werden, wodurch auch eine Sensibilisierung erfolgen soll. Im Anschluss an diese Präsentation ist eine Gruppenarbeit in Form eines moderierten Workshops Teil der Vorlesung. In diesem moderierten Workshop haben die Studierenden die Aufgabe eigene Einsparpotentiale aus dem Alltag aber auch aus ihren Unternehmen zu definieren. In dieser Findungsphase haben vor allem die Studierenden aus kooperativen Studiengängen oder in der Masterphase, die Möglichkeit Einsparpotentiale aus ihren jeweiligen Unternehmen zu finden und in der Gruppe zu debattieren. Daraus ergibt sich die Option Energie- und Materialbedarfe auch im Praxisbetrieb zu reduzieren.

Die Abbildung 117 zeigt die Virtual Reality (VR)- Software IC.IDO der Firma Engineering System International GmbH und die damit entwickelte Lernumgebung für die Trainingsfabrik 4.0 (neues Labor der Fakultät Ingenieurwissenschaften, Institut InnArbeit). Innerhalb dieser nun virtuell und real existierenden Lernumgebung können unterschiedliche Bedienhandlungen durchgeführt werden, welche innerhalb der Nachwuchsforschergruppe grundlegend erarbeitet wurden.

Im aktuell in Entwicklung befindlichen Beispiel haben die Anwender (Transferprojekt Saxy5) die Aufgabe, die EMCO Concept Mill 55 der Trainingsfabrik 4.0 der Hochschule Mittweida in Betrieb zu nehmen. Dazu sind zahlreiche praktische Handlungen notwendig. Erste Tests zeigen die Nutzung von (vgl. Abbildung 121, Abbildung 122 und Abbildung 123):

- virtuellen Applikationen für einzelne Nutzer relativ wert preiswert ist und
- VR-Brillen (z. B. der hier eingesetzten HTC Vive) ein breites Qualifizierungsspektrum erschließen.

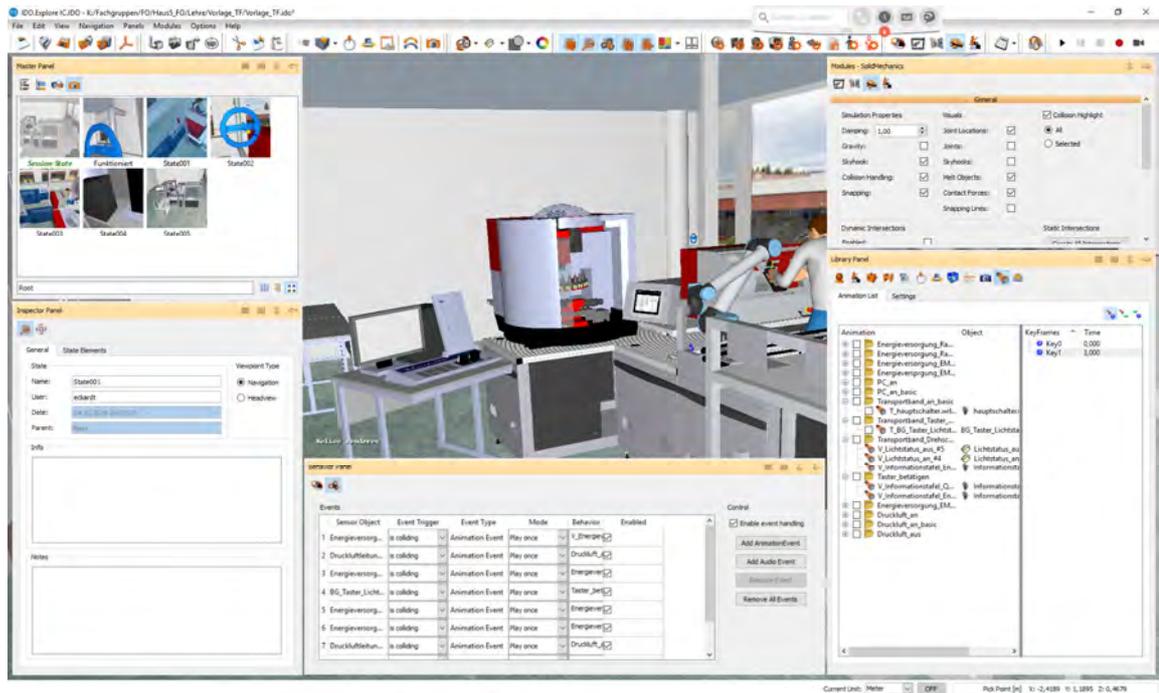


Abbildung 117: Virtual Reality-Software IC.IDO mit Modell der Lernumgebung



Abbildung 118: Nutzung der virtuellen Lernumgebung (Bedienhandlung: elektrische Energie für Fräsmaschine einschalten)



Abbildung 119: Nutzung der virtuellen Lernumgebung (Bedienhandlung: Steuerung der Fräsmaschine einschalten)



Abbildung 120: Nutzung der virtuellen Lernumgebung (Bewegung durch die virtuelle Trainingsfabrik)

Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Referat Öffentlichkeitsarbeit: Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II, Berlin
URL: < https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf >, aktualisiert am: 05.12.2019
- [2] Neugebauer, R. (2014). eniPROD - Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovation in der Produktionstechnik URL: <<http://www.eniprod.tu-chemnitz.de/motivation.php>>, Verfügbar am 17.12.2014
- [3] Barckhausen, A., Gründig, D. Grohne, C. (2015). Energieeffizienz in kleinen und mittleren Unternehmen. Energiekosten senken. Wettbewerbsvorteile sichern. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin.
- [4] Bakir, D. C. (2015). KMU-taugliche Methodik zur Erhöhung der innerbetrieblichen ökonomischen und ökologischen Ressourceneffizienz, Dissertation. Universität Aachen, Lehrstuhl für Produktionssysteme. Aachen.
- [5] Heinze, R. (2011). Ressourcen- und Energieeffizienz: Innovationen und Werkzeuge. URL: http://www.etz.de/files/e10227zfe_podium_effizienz.pdf Verfügbar am 17.12.2014
- [6] Müller, E.; Wirth, S.; Ackermann, J. (2009). Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Heidelberg: Springer. Bd. 1.
- [7] BMBF-Rahmenprogramm Forschung für Nachhaltige Entwicklungen (FONA). (2014). URL:<http://www.bmbf.de/de/17810.php>. Verfügbar am 15.12.2014
- [8] Eisele, C. (2014): Simulationsgestützte Optimierung des elektrischen Energiebedarfs spanender Werkzeugmaschinen, Darmstadt, TU., Diss., Aachen: Shaker
- [9] Hesselbach, J. (2012): Energie- und klimaeffiziente Produktion. Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. 1. Aufl.: Vieweg+ Teubner (GWW).

- [10] IHK Berlin (2018): Wettbewerbsvorteil Energieeffizienz. verfügbar unter <http://www.upl-lichtenberg.de/fileadmin/files/upl/ver-anstaltugen/Energieeffizienz/IHK.pdf>. [29.08.2018]
- [11] Eversheim, W. (2002). Organisation in der Produktionstechnik 3. Arbeitsvorbereitung. 4., bearbeitete und korrigierte Auflage. Berlin, Heidelberg. Springer (VDI-Buch)
- [12] Agricola, A., et. al. (2019). Steigerung der Energieeffizienz mit Hilfe von Energieeffizienz-Verpflichtungssystemen. Kurz: Energieeffizienz-Verpflichtungssysteme. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Köln. Online verfügbar unter https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9099_Studie_Energieeffizienz-Verpflichtungssysteme_EnEffV Sys.pdf, zuletzt geprüft am 10.01.2019.
- [13] VDI Richtlinien: VDI 4800, (2016), *Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien*. Beuth Verlag, S. 8f.
- [14] DIN EN ISO 50001. (2011). *Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung*. Beuth Verlag, S. 8
- [15] Fritz, A.-H.; Schulze, G. (2015). *Fertigungstechnik*, 11. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, S. 291
- [16] DMG Mori AG, URL:<<http://de.dmgmori.com/>>, verfügbar am 23.12.2016, S. 2ff
- [17] Kistler Instrumente AG – Firmendruckschrift (2009). *Zerspankraftmessung*, Winterthur (Schweiz), S. 3ff.
- [18] Klocke, F.; König, W. (2018). *Fertigungsverfahren 1 – Drehen, Fräsen, Bohren*. – 8. Aufl. Berlin/ Heidelberg: Springer-Verlag, S. 244
- [19] Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung. (2016). *Praxisleitfaden: Ressourceneffizienz in der Produktion – Zerspanungsprozesse*. Wiesbaden, S. 11
- [20] Dettmer, T. (2006). *Nichtwassermischbare Kühlschmierstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe*. IFW Braunschweig, o.S.
- [21] Klocke, F.; König, W. (2008). *Fertigungsverfahren 1 – Drehen, Fräsen, Bohren*. – 8. Aufl. Berlin/ Heidelberg: Springer-Verlag, S.250

- [22] MAV – Maschinen Anlagen Verfahren. (2014). *Mit MMS ressourceneffizient produzieren - Minimalmengenschmierung - ein Zukunftstrend?* Heft 9, S. 220
- [23] Klocke, F.; König, W. (2008): *Fertigungsverfahren 1 – Drehen, Fräsen, Bohren.* – 8. Aufl. Berlin/ Heidelberg: Springer-Verlag, S. 251
- [24] Thamke, D. (1997). *Möglichkeiten und Grenzen der Trockenbearbeitung.* Dortmund, Institut für spanende Forschung (ISF), o.S.
- [25] Sandvik Tooling Deutschland GmbH. (2018). Zerspanungswerkzeuge von Sandvik Coromant – Drehwerkzeuge, Katalog
- [26] Degner, W., Lutze, H., Smejkal, E. (2009). *Spanende Formung. Theorie, Berechnung, Richtwerte; mit 143 Tafeln.* 16., aktualisierte Aufl., München, Carl-Hanser-Verlag
- [27] Statista GmbH. (2019). *Strompreise für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2019:* URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154902/umfrage/strompreise-fuer-industrie-und-gewerbe-seit-2006/>, aktualisiert am 05.12.2019
- [28] Degner, W., Lutze, H., Smejkal, E. (2009). *Spanende Formung. Theorie, Berechnung, Richtwerte; mit 143 Tafeln.* 16., aktualisierte Aufl., München, Carl-Hanser-Verlag, S. 204
- [29] Müller, A., Schubert, C., Herrmann, C. (2013). *Anwendung der statistischen Versuchsplanung für das Drehen mit mikrostrukturierten Wendeschneidplatten.* Mittweida
- [30] http://www.mikroproduktion.com/uploads/media/20-25-Mikroproduktion_6_18_Lightmotif-online.pdf, 27.10.2019
- [31] Kleemann, U.; Zenner, H. (2006). *Bauteiloberfläche und Schwingfestigkeit – Untersuchungen zum Einfluss der Randschicht auf die Dauerschwingfestigkeit von Bauteilen aus Stahl.* *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 37(5):349–373
- [32] Sauer, B. (2016). editor. *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1: Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen.* Springer-Lehrbuch. Springer Vieweg, Berlin and Heidelberg, 9. Auflage.
- [33] Von Weingraber, W.; Abou-Aly, A. (1989). *Handbuch technische Oberflächen: Typologie, Messung und Gebrauchsverhalten.* Vieweg, Braunschweig und Wiesbaden

- [34] Stahlberatungsstelle des Ministeriums für Erzbau, Metallurgie und Kali. (1993). *Qualitäts- und Edelmehle: der Deutschen Demokratischen Republik: Eigenschaften, Behandlung, Verwendung*, Volume 1. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 4 Edition.
- [35] Dax, W.; Drozd, N.; Gläser, W.-D.; Kotsch, G.; Kumler, B.; Laier, H.; Slaby, J.; Uhlemann, A.; Weiß, A.; Zeimer, K. (2017). *Tabellenbuch für Metalltechnik: Theoretische Grundlagen - technische Kommunikation - Werkstofftechnik - Maschinenelemente - Fertigungstechnik - Steuerungs- und Regelungstechnik - Anhang*. Metalltechnik HT. Handwerk und Technik, Hamburg, 16., völlig überarbeitete Auflage.
- [36] Bergmann, W. (2009): *Werkstofftechnik 2: Werkstoffherstellung, Werkstoffverarbeitung, Werkstoffanwendung*. Carl Hanser Fachbuchverlag, s.l., 4., aktualisierte Auflage.
- [37] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2018). Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren, 07.2018.
- [38] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2018) Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung der Prüfmaschinen, 07.2018.
- [39] Bühler, H.; Klein, H.-D. (1969). Eigenspannungen in den Randzonen metallischer Werkstücke durch spanende Bearbeitung. *Werkstatt und Betrieb WB, Zeitschrift für spanende Fertigung*, 102(12):845–851.
- [40] Hoffmann, J. E. (1984). *Der Einfluss fertigungsbedingter Eigenspannungen auf das Biegeverhalten von glatten und gekerbten Proben aus K45 in verschiedenen Werkstoffzuständen*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 20.12.
- [41] Klein, H.-D. (1969). *Eigenspannungen und ihre Verminderung in metallischen Werkstücken durch spanende Bearbeitung*. Dissertation, Universität Hannover, Hannover.
- [42] Kloos, K.-H.; Kaiser, B. (1990). Fertigungsinduzierte Eigenspannungen. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, 45(6):356–366.
- [43] Hirsch, A. (2000): *Werkzeugmaschinen Grundlagen-Lehr- und Übungsbuch*, Vieweg, Braunschweig.

- [44] Eisele, C. (2014). Simulationsgestützte Optimierung des elektrischen Energiebedarfs spanender Werkzeugmaschinen, Dissertation TU Darmstadt, Shaker Verlag GmbH, Aachen
- [45] Kremser, A. (2008). Elektrische Maschinen und Antriebe, B.G. Teubner Verlag, Wiesbaden.
- [46] Weck, M. (1991). Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme Band 2, VDI Verlag, Düsseldorf.
- [47] Kuhrke, B. (2011). Methode zur Energie- und Medienbedarfsbewertung spanender Werkzeugmaschinen, epubli GmbH, Darmstadt.
- [48] Six Sigma (2013). Ihr " Roter Faden " durch alle Phasen des DMAIC Zyklus. online verfügbar unter [https:// http://www.six-sigma.me/six_sigma_dmaic_zyklus](https://http://www.six-sigma.me/six_sigma_dmaic_zyklus) (31.08.2017)
- [49] Apprich, Thomas; Brenner, Josef; Dambacher, Michael; Dreher, Franz; Fischer, Georg; Greiner, Gerd; Heine, Burkhard, Hochstatter, Armin; Holzberger, Sven; Holzwarth, Fabian; Kaiser, Harald; Liesch, Thomas; Pflug, Alexander; Schmid, Dietmar; Tawakoli, Taghi; Vogel, Rainer: Tabellenbuch für Zerspantechnik, Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2016, S.210.
- [50] Cheng, J. (2019). Erarbeitung und Evaluation eines Maschinenmodells zur Energiebedarfsprognose einer Drehmaschine. Praxismodulararbeit. Hochschule Mittweida
- [51] Müller, C. (2017). Konzeption eines wissensbasierten Fertigungsprozessmodells zur Energiebedarfsvorhersage unter Einbeziehung von Datenerhebungen an einer Drehmaschine. Diplomarbeit. Hochschule Mittweida
- [52] Paul, S.; Paul, R. (2014). Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 1, Springer Vieweg, Bremen.
- [53] Degner, W.; Lutze, H.; Smejkal, E. (2015): Spanende Formung; Theorie, Berechnung, Richtwerte, Carl Hnaser Verlag, München.
- [54] Langbein, R. (2019). Verbrauch auf Bedarf reduziert, URL:<<http://industrieanzeiger.industrie.de/technik/fertigung/verbrauch-auf-bedarf-reduziert/#slider-intro-2>>, online verfügbar: 09.12.2019.
- [55] Goy, S. (2016). Stand-by-Betrieb von Maschinen und Anlagen. Dissertation. Universität Kassel, Fachbereich Maschinenbau.

- [56] Grundfos (2020). MTR 1-22/22 A-W-A-HUUV – 96514885 URL: <<https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?custid=GPS&product-number=96514885&qcid=827203310>>, verfügbar am 23.03.2020
- [57] Wiendahl HP, Fiebig T (2003) Virtual factory design – a new tool for a co-operative planing approach Nr. 7: S. 535-540
- [58] Goldhahn L, 2003, Montageplanung und -ausführung – virtuell und real. 16 th International Scientific Conference Mittweida IWKM. Scientific Reports Nr. 2, 2003, S. 46 – 50
- [59] VSG Software & Service GmbH: Moderne CNC-Fertigung Prozesssichere Maschinensimulation (2017). URL: <<http://www.vsg.de/wp-content/uploads/Maschinensimulation.pdf>>, verfügbar am 18.10.2017.
- [60] Eversheim, Walter; Organisation in der Produktionstechnik, Band 3; Düsseldorf; VDI-Verlag GmbH; 1989
- [61] CAMWorks: Turn Tutorial. – Scottsdale (USA): Geometric Americas, 2019
- [62] DIN 6581 (1985): Begriffe der Zerspantechnik – Bezugssysteme und Winkel am Schneidteil des Werkzeuges. – Berlin : Beuth.
- [63] Olsson, P. (2017). X-firm Sytems. URL: <https://www.x-firm.com/?m=201007>>, verfügbar am 15.11.2017.
- [64] Fischer, U.; Gomeringer, R.; Heinzler, M.; Kilgus, R.; Näher, F.; Oesterle, S.; Paetzold, H.; Stephan, A. (2018). Tabellenbuch Metall. - 47. Aufl. Haan-Gruiten: Verlag Europa Lehrmittel.
- [65] Norm ISO/IEC 14772 (1997). Informationstechnik - Computergraphik und Bildverarbeitung - Virtuelle Realitätsmodellsprache VRML. *Teil1: Funktionelle Spezifikation und UTF-8-Coding.*
- [66] Sewohl, R. (2014). Untersuchung unterschiedlicher Varianten zur Animation von Bedienhandlungen und -folgen an automatisierten Sonderanlagen unter Nutzung von Virtual Reality. – 2014.- 138 S. Mittweida, Hochschule für angewandte Wissenschaften, Fakultät Maschinenbau, Bachelorarbeit.
- [67] Bauer, W., & Schlund, S. (Eds.). (2015). *Digitalisierung industrieller Arbeit, Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen: Wandel der Arbeit in indirekten Bereichen - Planung und Engineering.* Baden-Baden: Nomos edition sigma.

- [68] Hirsch-Kreinsen, H. (Ed.). (2015). Digitalisierung industrieller Arbeit, Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen: Digitalisierung industrieller Arbeit. Baden-Baden: Nomos edition sigma.
- [69] Kuhlmann, A. M., & Sauter, W. (2008). Innovative Lernsysteme: Kompetenzentwicklung mit Blended Learning und Social Software. X.media.press. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [70] Wischmann, S., & Hartmann, E. (Eds.). (2018). Zukunft der Arbeit - eine praxisnahe Betrachtung: 6. Soziotechnische Assistenzsysteme für die Produktionsarbeit in der Textilbranche ([1. Auflage]). Open. Berlin, Germany: Springer Vieweg.
- [71] Pfeiffer, I. (2018): Qualifizierungsprogramm erarbeiten, Forschungsinstitut Betriebliche Bildung (f-bb). verfügbar unter: http://qib.f-bb.de/qib/planen_umsetzen/qualifizierung/qualifizierungskonzept.rsys [04.09.2018]
- [72] Goldhahn, L.; Eckardt, R.; Pietschmann, C.; Roch, S. (2019). Competency Profiles as a Means of Employee Advancement for a Resource-Efficient Chipping Production. In: Advances in Manufacturing, Production Management and Process Control, Proceedings of the AHFE 2019, 24- 28. Juli 2019, Washington D.C., USA, pp.146-157; DOI: 10.1007/978-3-030-20494-5_14.
- [73] Goldhahn, L.; Pietschmann, C.; Eckardt, R.; Roch, S. (2018). Qualifizierungskonzept für die ressourcenorientierte Teilefertigung. In: Digitalisierung in Industrie und Gesellschaft - Arbeiten und Leben im Umfeld der 4. Industriellen Revolution. Scientific Reports. 25. Interdisziplinäre Wissenschaftliche Konferenz Mittweida, ISSN 1437-7654, 2018, Nr. 3, S. 43 -47.
- [74] Pfeiffer, I. (2018): Warum arbeitsprozessorientiertes Lernen?, Forschungsinstitut Betriebliche Bildung (f-bb), verfügbar unter: http://qib.f-bb.de/qib/planen_umsetzen/qualifizierung/lernen.rsys [04.09.2018]
- [75] Eversheim, W. (2002). Organisation in der Produktionstechnik 3. Arbeitsvorbereitung. 4., bearbeitete und korrigierte Auflage. Berlin, Heidelberg. Springer (VDI-Buch)

- [76] Neugebauer, R. (2014): Handbuch ressourcenorientierte Produktion. [Elektronische Ressource]. Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446436237>. München: Hanser (Hanser eLibrary).
- [77] Agricola, A., et. al (2019). Steigerung der Energieeffizienz mit Hilfe von Energieeffizienz-Verpflichtungssystemen. Kurz: Energieeffizienz-Verpflichtungssysteme. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Köln. Online verfügbar unter https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9099_Studie_Energieeffizienz-Verpflichtungssysteme_EnEffV Sys.pdf, zuletzt geprüft am 10.01.2019.
- [78] Goldhahn, L.; Roch, S.; Pietschmann, C.; Eckardt, R. (2019). Mitarbeiterorientiertes Qualifizierungskonzept für die ressourcenorientierte spanende Fertigung. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.): Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten. Bericht zum 65. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 27. Februar – 1. März 2019, ISBN 978-3-936804-25-6, 2019, C.7.4 pp. 1-6;
- [79] Sauter, W., Sauter, S. (2013). Workplace Learning. Integrierte Kompetenzentwicklung mit kooperativen und kollaborativen Lernsystemen. Berlin: Springer Gabler. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-41418-3>.
- [80] Goldhahn, L. (2000). Gestaltung des arbeitsteiligen Prozesses zwischen zentraler Arbeitsplanung und Werkstattpersonal. Dissertation. TU Chemnitz. Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme. Chemnitz.
- [81] Goldhahn, L., Pietschmann, C. Eckardt, R., Roch, S. (2019), Concepts for improving employee qualifications for resource-efficient chipping production. 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport (TRANSCOM 2019) (unveröffentlicht)
- [82] Grieshaber, W. (2011). Grieshaber FSU: Methoden Begriffe: Didaktik - Methodik. URL: < <https://www.uni-muenster.de/Sprachenzentrum/griesha/fsu/mtd/begriffe.html> >, online vergügbar: 10.12.2019

- [83] Reinmann, G., & Mandl, H. (2006). Unterrichten und Lernumgebungen gestalten. In A. Krapp & B. Weidenmann (Eds.), *Anwendung Psychologie. Pädagogische Psychologie. Ein Lehrbuch* (5th ed.). Weinheim: Beltz PVU.
- [84] Quilling, E., & Nicolini, H. J. 2009. *Erfolgreiche Seminargestaltung: Strategien und Methoden in der Erwachsenenbildung* (2., erweiterte Auflage). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden.
- [85] Bremer, C. (2018). *Bremer_Szenarien*. Retrieved from www.bremer.cx/material/Bremer_Szenarien.pdf. zuletzt geprüft am 14.12.2018.
- [86] Goldhahn, L.; Pietschmann, C.; Eckardt, R.; Roch, S. (2019). Concepts for improving employee qualifications for resource-efficient chipping production. In: *Human Interaction and Emerging Technologies. Bericht IHET International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies*, 21- 24. August 2019, ISBN 978-3-030-25628-9, 2019, pp. 66-72; DOI: 10.1007/978-3-030-25629-6_11
- [87] DEZERNAT PERSONAL: LEITFADEN FÜR TÄTIGKEITSDARSTELLUNGEN URL: < https://www.uni-heidelberg.de/md/zuv/personal/aktuelles/leitfaden_td_veroeffentlicht_-_stand_august_2014_.pdf >, online verfügbar: 10.12.2019
- [88] Schlick, C., Bruder, R., Luczak, H. (2018). *Arbeitswissenschaft*. 4. Auflage. Berlin: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-56037-2>.
- [89] Risch, W., Wadewitz, M. (1997). Analyse des Ist-Standes. In: Wiebach, H.: *Facharbeiterorientierte Betriebsmittel- und Arbeitsplanung in KMU. Handlungshilfe zur betrieblichen Umsetzung*. Eschborn: RKW, S. 65–72.
- [90] Goldhahn, L., Meißner, N., Müller-Eppendorfer, K., Thümer, C. (2012). Multimediale und Virtual-Reality-basierte Planungs- und Lernbausteine für die Teilefertigung und Montage, ZKProSachs, *Integrierte Planung in der Produktentstehung. Feature-basierter Ansatz zur durchgängigen Planung von der Konstruktion bis zur Fertigungssteuerung*, Berlin, MBV, 175 – 229
- [91] Rohs, M. (Ed.). (2016). *Handbuch Informelles Lernen*. Springer Reference Sozialwissenschaften. Wiesbaden: Springer VS

- [92] Qin, Chao. (2017): Energetische Modellierung von Werkzeugmaschinen am Beispiel einer Drehmaschine. Bachelorarbeit. Mittweida: Fakultät Ingenieurwissenschaften Hochschule Mittweida
- [93] Neugebauer, R. (2011): Methoden der energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung in der Produktionstechnik. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 "Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung" des Spitzentechnologieclusters eniPROD; Tagungsband. Technische Universität Chemnitz; Verl. Wiss. Scripten. Chemnitz.
- [94] Statista. (2020): Entwicklung des CO₂-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2018 URL < <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/> >, verfügbar am 23.03.2020
- [95] Goldhahn, L. (2016). Entwicklung eines lebenszyklusorientierten Bedienkonzeptes für automatische Montageanlagen. In: Arbeit in komplexen Systemen. Digital, vernetzt, human?!. 62. Arbeitswissenschaftlicher Kongress Aachen, ISBN 978-3-936804-20-1, 2016.
- [96] Goldhahn, L.; Bock, D. (2016). Bedienkonzepte maschineller Anlagen und deren virtuelle Validierung. In: VAR² 2017 – Realität erweitern. 4. Fachkonferenz zu VR/AR-Technologien in Anwendung und Forschung an der Professur Werkzeugmaschinen und Umformtechnik in Chemnitz, ISBN 978-3-00-058419-0, 2017, S. 129 - 136
- [97] Goldhahn, L.; Bock, D.; Thümer, C. (2015). Echtzeitnahe Visualisierung hochdynamischer Maschinenbewegungen in Virtual Reality. In: Schenk, Michael (Hrsg.): 12. Fachtagung Digital Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. Tagungsband. 18. IFF-Wissenschaftstage Magdeburg 24. - 25. Juni 2015. Stuttgart: Fraunhofer, ISSN 2196 – 7598, 2015, S. 167 – 176

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung/ Übersetzung
[A]	Stromstärke
AC/ DC-	Wechsel-/ Gleichstrom
a_e	Arbeitseingriff in mm
AHFE	Applied Human Factors and Ergonomics
a_p	Schnitttiefe in mm
b	Spannungsbreite in mm
b_i	Ressourcenbedarf
B	Summe
b_{BA}	Wasseraufbereitung
b_{BCj}	Bedarf an im Elektrolyt befindlicher Chemikalien
b_{BB}	Badbewegung
b_{BH}	Warentransport
b_{BP}	Elektrolytpflege (Filterung im Prozess)
b_{BT}	nötige Elektrolyttemperatur
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
c_E	Ionenkonzentration in unmittelbarer Elektrodennähe
CNC	Computerized Numerical Control
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
c_p	Wärmekapazität

Abkürzungsverzeichnis

c_0	Ionenkonzentration im Elektrolyten
Cr(VI)	Chrom(VI)-oxid
CTX Alpha 500	Universal-Drehmaschine des Unternehmens DMG MORI Global Marketing GmbH
cw-Betrieb	periodisch unterbrocher Laser
C45 (1.0503)	Unlegierter Vergütungsstahl
<i>DIAdem</i>	Messdatenauswertungssoftware
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOE	design of experiments
DMAIC	Define, Measure, Analyse, Improve, Control
DWZ	Werkzeughdurchmesser in mm
EN	Europäische Norm
ESF	Europäischen Sozialfonds
E_{EMK}	Einzelkomponenten
f	Vorschub in mm
F	Faraday-Konstante ($96485,33289 \frac{A \cdot s}{mol}$)
fb	Burstwiederholffrequenz in Kilohertz
F_c	Schnittkraft in N
fp	Pulswiederholffrequenz in Megahertz
f_z	Vorschub pro Zahn in mm
[g/l]	Gramm je Liter
h	Spanungsdicke in mm
HC, PVD-TiAlN beschichtet (LCPK10M)	Schneidstoff
HSC	High Speed Cutting
HTML	Hypertext Markup Language

Abkürzungsverzeichnis

HV	Härte nach Vickers
[Hz]	Netzfrequenz
i	Prozessschritt
IC.IDO	VR-Software der Firma ESI gmbH
InnArbeit	Zentrum für innovative Arbeitsplanung und Arbeitswissenschaft, Forschungsinstitut der Hochschule Mittweida
IHIET	International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies
ISO	International Organization for Standardization
j_D	Durchtrittsströmdichte
k_c	Spez. Schnittkraft
$k_{c1.1}$	Hauptwert der spez. Schnittkraft in N / mm ²
KJ/kgK	Kilojoule je Kilogramm und Kelvin
KSS	Kühlschmierstoff
kWh	Kilowattstunde
K_v	Schnittgeschwindigkeitskorrektur
K_{γ_0}	Spanwinkelkorrektur
K_{Sch}	Schneidstoffkorrektur
K_{ver}	Verschleißkorrektur
l/min	Liter pro Minute
ml/h	Milliliter pro Stunde
$M(Cr)$	Molaren Masse von Chrom 51,996 g/mol
mm	Millimeter
MoQuaRT	Nachwuchsforschergruppe <i>Entwicklung innovativer Verfahrens- und Betriebsmittelmodelle sowie Qualifizierungskonzepte für die ressourceneffiziente Fertigung hochbeanspruchter Bauteile</i>

Abkürzungsverzeichnis

MTO	Metal Turn Over
N	Nutzen
NC	Numerical Control
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
ns	Nanosekunde
P_c	Schnittleistung in W
P_e	Wirkleistung in W
PFT	Perfluorierte Tenside
ps	Pikosekunde
q	Stromdurchflossener Elektrolytquerschnitt
Q	Wärme
Q	Zeitspannungsvolumen in Kubikzentimeter pro Minute
$\dot{Q}(T)$	abgegebene Energie
$\dot{Q}(T)$	Wärmeverluststrom
$Q(T, t)$	thermischen Energie (Wärme)
R_e	Streckgrenze in N/ mm ²
R_m	Zugfestigkeit in N/mm ²
RT	Raumtemperatur
SAB	Sächsische Aufbaubank - Förderbank
t	Pulsdauer in Pikosekunden
t_b	Burstdauer in Mikrosekunden
t_c	Gesamtlaufzeit in min
t_p	Pulsabstand in Nanosekunden
[V]	Spannung
VBMT 160404	Wendeplatte positiv 7° VBMT 160404 HB7010-1
v_c	Schnittgeschwindigkeit in m/min

Abkürzungsverzeichnis

VCMT 160404	Wendeplatte positiv 7° SpW 35° VCMT 160404EN-SM CTCP125
VE-Wasser	Vollentsalztes Wasser
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
v_f	Vorschubgeschwindigkeit in mm pro Minute
VR	Virtual Reality
[W]	W
w0	Strahlradius in Mikrometer
XRD	Röntgendiffraktometrie
z	Zähnezahl
K_r	Einstellwinkel in °
α	Symmetriefaktor
λ	Wellenlänge in Nanometer
λ	Wärmewiderstandswerte
γ_0	Spanwinkel in °
λ_s	Neigungswinkel in °
η	Wirkungsgrad
$\Delta T(t)$	Betrachtungszeitpunkt der jeweiligen Temperaturdifferenz
ΔU	benötigte Potenzialdifferenz
η_D	Durchtrittsüberspannung
η_a	Diffusionsüberspannung
η_k	Kristallisationsüberspannung
η_r	Reaktionsüberspannung
η_R	Spannung zur Überwindung des Zellwiderstandes
σ	Elektrische Leitfähigkeit Elektrolyt
°C	Grad Celsius

Abkürzungsverzeichnis

∅	Durchmesser
µm	Mikrometer
3D	Dreidimensional

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1: Gewählter Ansatz und grundsätzliches Zusammenwirken der Fachdisziplinen	4
Abbildung 2: Allgemeine Aufgabenübersicht innerhalb der Nachwuchsforschergruppe MoQuaRT	7
Abbildung 3: Arbeitsbewegungen beim Fertigungsverfahren Drehen.....	15
Abbildung 4: Werkzeugmaschine CTX Alpha 500	16
Abbildung 5: Wendeschneidplatten der unterschiedlichen Anbieter.....	17
Abbildung 6: Temperaturverteilung in Werkstück, Span und Werkzeug	18
Abbildung 7: Anforderungen an die Trockenbearbeitung [24]	20
Abbildung 8: Musterwelle mit definierten Abschnitten.....	21
Abbildung 9: Zielgerichtete KSS-Zufuhr über Span- und Freifläche.....	22
Abbildung 10: Ausbildung der Verschleißmarkenbreite bei $v_c = 150$ m/min.....	24
Abbildung 11: Ausbildung der Verschleißmarkenbreite bei $v_c = 250$ m/min.....	24
Abbildung 12: Ausbildung der Verschleißmarkenbreite bei $v_c = 350$ m/min.....	24
Abbildung 13: Wirkleistung der verschiedenen Anbieter	25
Abbildung 14: Gesamtleistung der KSS-Varianten	27
Abbildung 15: Wirkleistung der KSS-Varianten	28
Abbildung 16: Energiebedarf bezogen auf das abgespannte Volumen	29
Abbildung 17: Vergleich der Abschnitte Musterwelle	30
Abbildung 18: Drehwerkzeuge für KSS-Zuführung	31
Abbildung 19: Ergebnisse der KSS-Zuführvariante	32
Abbildung 20: Gesamtleistungsbedarf bei konstantem Zeitspanvolumen	33

Abbildung 21: Vergleich bei konstantem Zeitspanvolumen.....	34
Abbildung 22: Schematische Darstellung der Bauteilrandschicht nach [1].....	55
Abbildung 23: Probengeometrie.....	57
Abbildung 24: Versuchsaufbau der Eigenspannungsmessungen.....	58
Abbildung 25: Schematische Darstellung zum Vorgehen der Mikrohärtprüfung.....	60
Abbildung 26: Versuchsaufbau der Mikrohärtprüfung	60
Abbildung 27: Eigenspannungsverläufe im Kombinationsvergleich v_c und f_z Proben B und Z.....	64
Abbildung 28: Eigenspannungsverläufe im Kombinationsvergleich v_c und f_z Proben D und BB.....	65
Abbildung 29: Eigenspannungsverläufe im Kombinationsvergleich v_c und f_z Proben A und Y.....	65
Abbildung 30: Eigenspannungsverläufe im Kombinationsvergleich Kühlung & K_r Proben I und N	66
Abbildung 31: Eigenspannungsverläufe Kombinationsvergleich Kühlung & K_r Proben AA und FF.....	67
Abbildung 32: Eigenspannungsverläufe Kombinationsvergleich Kühlung & K_r Proben Y und DD.....	67
Abbildung 33: Ausgewerteten Tiefenverläufe Probe 1FF und 1EE.....	68
Abbildung 34: Ausgewerteten Tiefenverläufe Probe 1EE und 1CC.....	69
Abbildung 35: Ausgewerteten Tiefenverläufe Probe 1CC und 1Y.....	69
Abbildung 36: Ausgewerteten Tiefenverläufe Probe 1Y und 1Q.....	70
Abbildung 37: Ausgewerteten Tiefenverläufe Probe 1A und 1Q.....	70
Abbildung 38: Darstellung der Mikrohärtverläufe Proben Y und DD.....	71
Abbildung 39: Darstellung der Mikrohärtverläufe Proben CC und Y.....	72
Abbildung 40: Programm zur Realisierung der Teilmodells "Elektrolyterwärmung"	79
Abbildung 41: Einfluss der Wärmebehandlung auf die Härte Ni-B-Schichten	86
Abbildung 42: Probekörper (100Cr6 Ronde und Stahlblech).....	87

Abbildung 43: Versuchsaufbau chemisch Nickel Beschichtungsvorgang	88
Abbildung 44: Beispiele der eingebetteten Proben	89
Abbildung 45: Verteilung der Borpartikel in den Ni-P-Schichten	90
Abbildung 46: REM-Aufnahme (20 000x Vergrößerung) von a) Borpulver 1, b) Borpulver 2, c) Borpulver 3 und die metallographische Querschliffe der Ni-P-B-Schichten (100x Vergrößerung) mit b) Borpulver 1, d) Borpulver 2 und f) Borpulver 3.....	91
Abbildung 47: Partikeleinbau in den Ni-P-Schichten in Abhängigkeit der durch ImageJ gemessene Größe der eingebauten Borpartikel	92
Abbildung 48: Die metallographische Querschliffe bei 20x und 50x Vergrößerung für Ni-P-B Schichten mit eingebauten Borpulvern a) d) Pulver 1, b) e) Pulver 2, und c) f) Pulver 3	92
Abbildung 49: Der Partikeleinbau in den Ni-P-Schichten unter den Einfluss des Ultraschalls mit verschiedene Leistungsdichte.....	93
Abbildung 50: Einfluss der Hydrodynamik des Elektrolyten an dem Partikeleinbau in den Ni-P Schichten	94
Abbildung 51: Partikeleinbau in den Ni-P-Schichten in Abhängigkeit des Partikelgehalts im Elektrolyten.....	95
Abbildung 52: Metallographische Querschliffe bei 100x Vergrößerung für Partikelgehalt im Elektrolyten von a) 5 g/l, b) 10 g/l, c) 15 g/l und d) 20 g/l	95
Abbildung 53: Härte der Ni-P-B Schichten bei verschiedene Borgehalte im Elektrolyten und unterschiedliche Wärmebehandlungszeiten.....	96
Abbildung 54: Zusammenhang zwischen der Korngröße und der Härtewerte eines Materials	96
Abbildung 55: XRD Diffraktogramm von Ni-P Schichten bei verschiedene Wärmebehandlungs-temperaturen	97
Abbildung 56: XRD Diffraktogramm von Ni-P und Ni-P-B Schichten bei 400 °C und 3 h.....	98
Abbildung 57: Vorgehen und Modellbildungen zur Energiebedarfsprognose.....	100

Abbildung 58: Standardisiertes Maschinenmodell	103
Abbildung 59: Theoretisches Maschinenmodell am Beispiel DMG Mori CTX Alpha 500.....	104
Abbildung 60: DMAIC-Zyklus für die Leistungsmessung und Datennutzung i.A.a. [48]	106
Abbildung 61: Referenzbauteil für Messungen an den Referenzmaschinen [51].....	106
Abbildung 62 Versuchsaufbau <i>EMCO CT60</i> [50]	108
Abbildung 63: Messgerät	109
Abbildung 64: Prozessstruktur für Datenaufnahme an EMCO CT60 i.A.a. [80].....	110
Abbildung 65: Messdaten Leistungsbedarf Spindel EMCO CT60 [50]	112
Abbildung 66: Regressionsanalyse zur graphischen Darstellung des Leistungsbedarfs Spindel EMCO CT60 [50]	113
Abbildung 67: Komponenten der Drehmaschine EMCO 120P [51]	114
Abbildung 68: Messgerät KEW 6315 und zugehöriger Software [51]	115
Abbildung 69: Versuchsaufbau [51]	115
Abbildung 70: Leistungsbedarf Längsdrehen (graphisch) [51].....	117
Abbildung 71: Modell zur Erweiterung des "Produktkonfigurators" [51].....	119
Abbildung 72: Ablaufdiagramm des Planungsprozesses [51]	120
Abbildung 73: Umsetzung des Modells im "Produktkonfigurator" [51]	122
Abbildung 74: Typische Energiebedarfsaufteilung von Werkzeugmaschinen nach [54]	123
Abbildung 75: Komponentenbaum allgemeine Werkzeugmaschine [92].....	124
Abbildung 76: Lastarten nach [55].....	125
Abbildung 77: Leistungskennlinie von Hydraulikpumpe [56]	126
Abbildung 78: Ablaufplan zur Erstellung einer Maschinensimulation.....	130
Abbildung 79: Modell der Schachfigur Bauer	132
Abbildung 80: Ebenen-Beziehungen und Werkzeugspitze an einer Wendeschneidplatte [62]	133

Abbildung 81: Aufgebautes Gesamtmodell der Wabeco CC-D 100 in CAD	134
Abbildung 82: Komponentenbaum des Gesamtmodells	135
Abbildung 83: CAMWorks- Ablaufdiagramm i.A.a. [61]	137
Abbildung 84: Vollständiger „Arbeitsplan“ für die Schachfigur Bauer	138
Abbildung 85: Darstellung I- und K-Adresse am Beispiel G02-Befehl i.A.a [55]; [64]	139
Abbildung 86: Änderung der Koordinatensystemposition am Beispiel des Werkzeughalters	140
Abbildung 87: Inhalt der Setup-Datei	143
Abbildung 88: Inhalt der Konfigurationsdatei	143
Abbildung 89: Zeit- und Wegdarstellung an Kreisbahnen	146
Abbildung 90: Exakt arbeitende Maschinensimulation	150
Abbildung 91: Durch fehlerhaftes NC-Programm entstandener Versatz zwischen Werkzeug und Werkstück	151
Abbildung 92: Aufbau der Trainingsfabrik 4.0	152
Abbildung 93: Virtuelles Bedienpanel mit Screen-Anzeige	152
Abbildung 94: Beschickung eines Werkstücks vom Transportband (links) zur Drehmaschine (rechts)	153
Abbildung 95: Erstellte Events und Sensoren im Behavior-Panel	154
Abbildung 96: Grundlegendes Vorgehen zur Entwicklung eines Qualifizierungskonzeptes	157
Abbildung 97: Exemplarische Aufgaben der Zielgruppe (Mitarbeiter)	160
Abbildung 98: Vorgehensweise der Kompetenzprofilentwicklung	161
Abbildung 99: Übersicht Kompetenzprofil	166
Abbildung 100: Auszug SOLL-IST-Abgleich des Kompetenzprofils für technisch- fachliche Kompetenzen des Arbeitsplaners	166
Abbildung 101: Auszug SOLL-Kompetenzprofil technisch-fachliche Kompetenzen eines Mitarbeiters der spanenden Fertigung	167
Abbildung 102: Grundlegender Ablauf [78]	168

Abbildung 103: Grundsätzlicher Aufbau eines Qualifizierungskonzeptes	170
Abbildung 104: Integrationskonzept als Basis des Qualifizierungskonzeptes	172
Abbildung 105: Bestandteile Blended-Learning-Konzept.....	175
Abbildung 106: Methodischer Ansatz des Lernens in der Präsenzphase	175
Abbildung 107: Stufenkonzept im exemplarischen Qualifizierungskonzept.....	176
Abbildung 108: Beispielbauteil inkl. Ausgangsmaterial zur Umsetzung des Qualifizierungskonzeptes.....	176
Abbildung 109: Beispielbauteil, konstruktiv neu gestaltet für alternative Ansätze hinsichtlich Rohmaterials und Fertigungsverfahren zur Umsetzung des Qualifizierungskonzeptes	176
Abbildung 110: Digitale Lernumgebung – Startseite.....	177
Abbildung 111: Auszug aus dem Themengebiet „Wiederholung und Vertiefung“	179
Abbildung 112: Auszug aus dem Themengebiet „Übung“	179
Abbildung 113: Beispielbauteil "Koordinatensystem" in der Musterlösung.....	180
Abbildung 114: Zusätzlich gefertigte Spannbacken (grau) im Maschinenschraubstock (rot)	180
Abbildung 115: Modell zur ganzheitlichen ressourceneffizienten Produktion	182
Abbildung 116: Regelkreis zur ressourcenorientierten Fertigung hochbeanspruchten Bauteilen	184
Abbildung 117: Virtual Reality-Software IC.IDO mit Modell der Lernumgebung	188
Abbildung 118: Nutzung der virtuellen Lernumgebung (Bedienhandlung: elektrische Energie für Fräsmaschine einschalten).....	189
Abbildung 119: Nutzung der virtuellen Lernumgebung (Bedienhandlung: Steuerung der Fräsmaschine einschalten)	189
Abbildung 120: Nutzung der virtuellen Lernumgebung (Bewegung durch die virtuelle Trainingsfabrik)	190
Abbildung 121: Vorgehen zur Entwicklung eines <i>Standardisierten Maschinenmodells</i>	219
Abbildung 122: Vorgehen zur Entwicklung eines <i>Theoretischen Maschinenmodell</i>	220

Abbildung 123: Vorgehen zur Entwicklung eines *Spezifizierten Maschinenmodells*221

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Arbeitsplan und zeitlicher Ist-Abgleich Projektumfang kumuliert	13
Tabelle 2: Abweichungen der unterschiedlichen Bearbeitungen und deren Vorschubrichtung.....	35
Tabelle 3: Werkstoffkennwerte Vergütungsstahl C45 für d = 16 - 40 mm nach [34, 35].....	56
Tabelle 4: Vorgehen beim Vergüten der Proben	56
Tabelle 5: Definierte Werte der Eigenspannungsmessung	58
Tabelle 6: Definierte Werte der Mikrohärteprüfung nach Vickers	59
Tabelle 7: Variable Einflussgrößen der Versuchsreihe V1	61
Tabelle 8: Einflussgrößen der Versuchsreihe V2	62
Tabelle 9: konstante Einflussgrößen aller Versuchsreihen	62
Tabelle 10: Phasen DMAIC und Lösungsweg Referenzmaschine EMCO CT60 i.A.a. [48]	107
Tabelle 11: Leistungsbedarf Bearbeitung EMCO 120P [51]	116
Tabelle 12: Leistungsbedarf Längsdrehen (tabellarisch) [51]	117
Tabelle 13: Gesamtleistungsbedarf Längsdrehen; gemessen und berechnet [51]	121
Tabelle 14: Übersicht Leistungsbedarfe der Komponenten des Dreh- Bearbeitungszentrum CTX Alpha 500 [92].....	126
Tabelle 15: Übersicht verwendeter Werkzeuge	132
Tabelle 16: wichtige NC-Befehle für Programme an CNC-Drehmaschinen	144
Tabelle 17: Bedeutung der Nummern für Bedienanweisung	151
Tabelle 18: Beispielhaftes morphologisches Schema mit Ausprägungen für pilothaftes Qualifizierungskonzept MoQuaRT [73]	158

Tabelle 19: Auszug erforderlicher Kompetenzen in der Arbeitsplanung i.A.a. [80].....	164
Tabelle 20: Auszug erforderlicher Kompetenzen für Mitarbeiter der spanenden Fertigung i.A.a. [80]	164
Tabelle 21: Überblick Qualifizierungskonzept und Inhalte der Phasen	173
Tabelle 22: Themengebiete der digitalen Lernumgebung	178
Tabelle 23: Zusammenfassung Quantifizierung Energie- und CO ₂ -Einsparung (geschätzt)	185
Tabelle 24: Zusammenfassung Quantifizierung Energie- und CO ₂ -Einsparung (geschätzt)	186
Tabelle 25: Ansatz zur Modellierung Referenzmaschine CTX Alpha 500 auf Komponentenebene	223

Anlagenverzeichnis

	Seite
Anlage A1: Vorgehen zur Entwicklung eines Maschinenmodells	196
Anlage A2: Ansatz zur Modellierung Referenzmaschine CTX Alpha 500 auf Komponentenebene	200
Anlage A3: Programmierte Schnittstelle	202

Titel des Anhangs:	Vorgehen zur Entwicklung eines Maschinenmodells
Nummer des Anhangs:	A1
Inhaltsbeschreibung:	Ausgehend von einem standardisierten Maschinenmodell erfolgt die Konkretisierung von Daten in Form von Abarbeitungsschritten über das theoretische Maschinenmodell hin zum spezifizierten Maschinenmodell (vgl. Abbildung 121, Abbildung 122, Abbildung 123)
Anzahl der dokumentierenden Seiten:	3

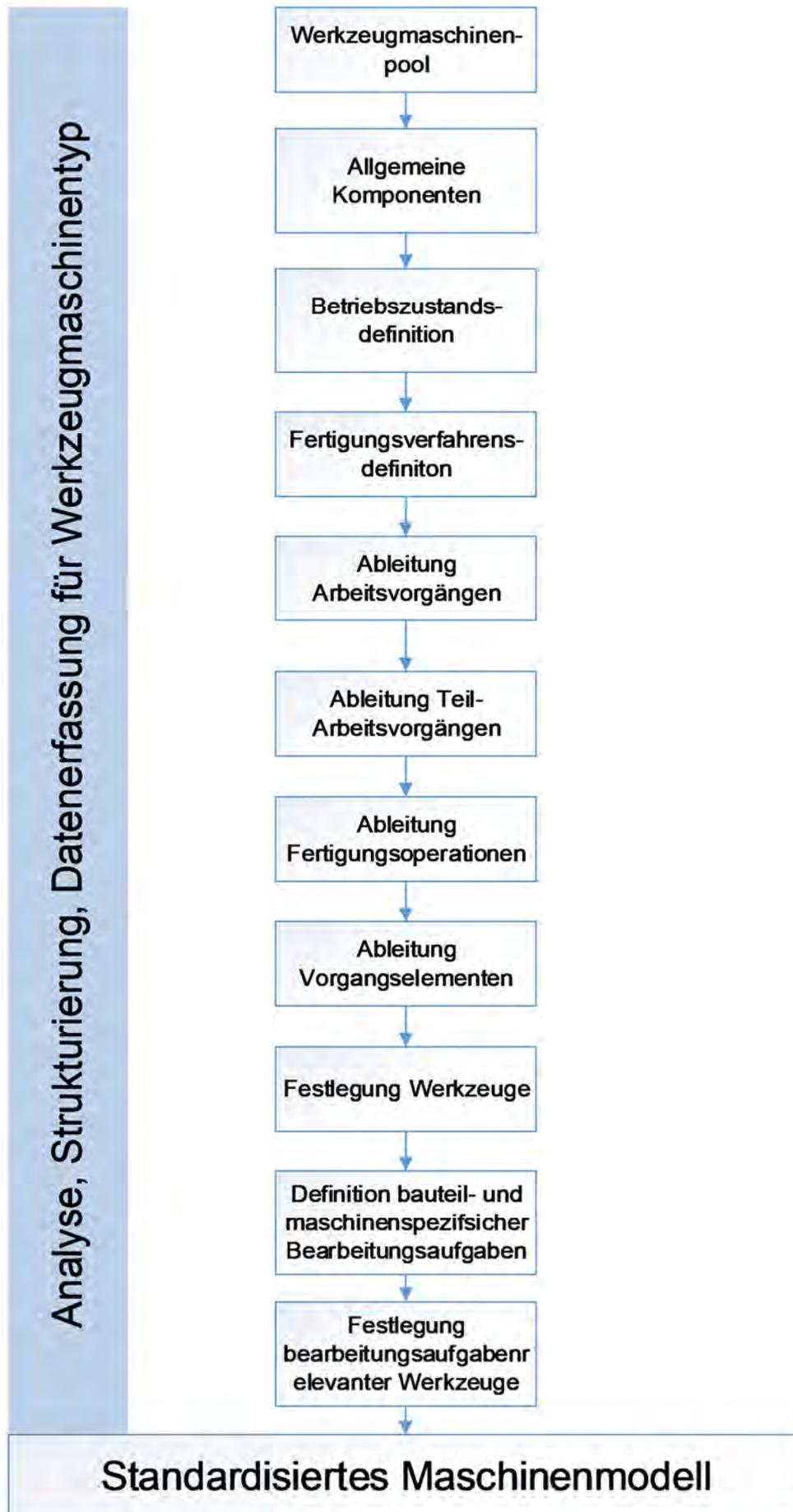


Abbildung 121: Vorgehen zur Entwicklung eines *Standardisierten Maschinenmodells*

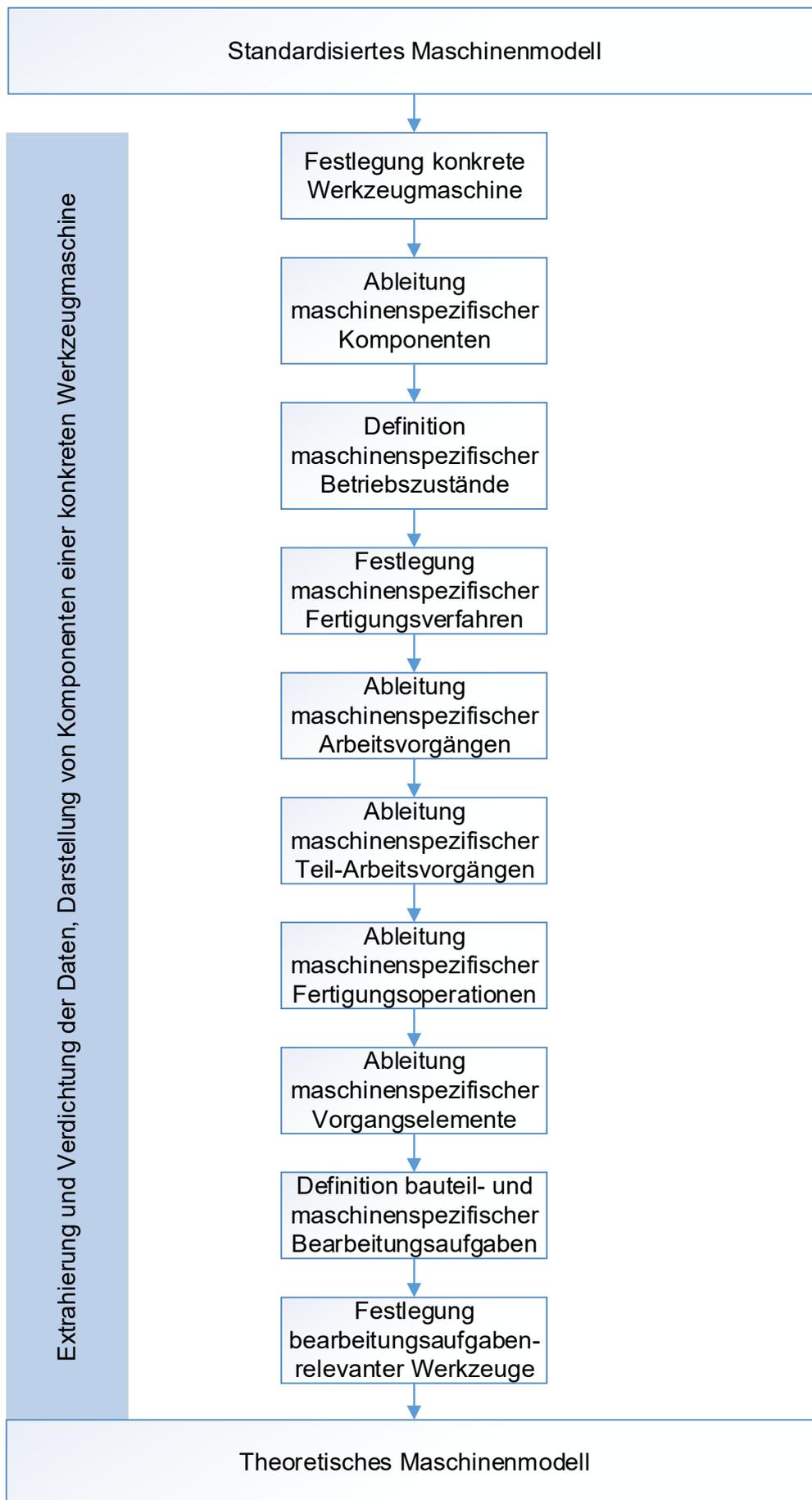


Abbildung 122: Vorgehen zur Entwicklung eines *Theoretischen Maschinenmodell*

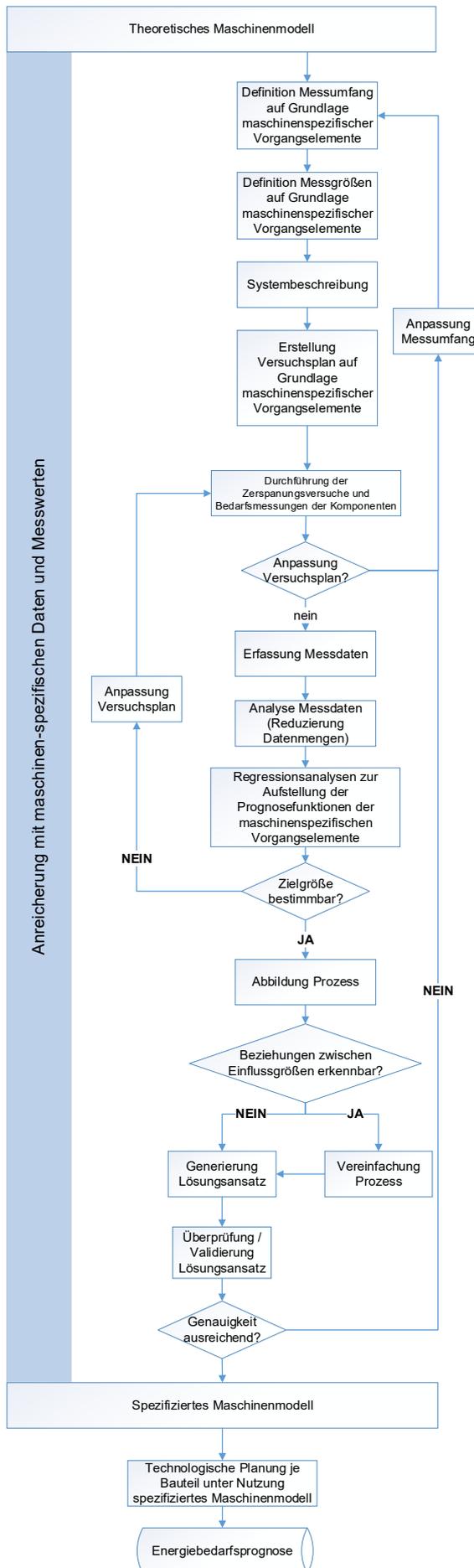


Abbildung 123: Vorgehen zur Entwicklung eines *Spezifizierten Maschinenmodells*

Titel des Anhangs:	Ansatz zur Modellierung Referenzmaschine CTX Alpha 500 auf Komponentenebene
Nummer des Anhangs:	A2
Inhaltsbeschreibung:	Darstellung eines theoretischen Ansatzes zur energetischen Modellbildung einer Werkzeugmaschine und deren Komponenten
Anzahl der dokumentierenden Seiten:	1

Titel des Anhangs:	Programmierte Schnittstelle
Nummer des Anhangs:	A3
Inhaltsbeschreibung:	Darstellung Quellcodes der erstellten Schnittstelle zur Berechnung von Bewegungsdaten für IC.IDO aus NC-Programmen
Anzahl der dokumentierenden Seiten:	11

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 # Programm zum Auslesen und Konvertieren von NC-Code in ein mit IDO-Script lesbares Format
3 # Daten werden in ein Textdokument geschrieben
4 # funktioniert für Wabeco und die NC-Programme zum fertigen der Schachfigur "Bauer"
5
6 from math import sqrt, sin, cos, asin, acos, pi, degrees, radians
7
8 pfad = "D:\\VB_Projekt\\Drehmaschine_IDO\\"
9 datei = "NC_BAUER.txt"
10 ausgangsdatei = "BAUER.txt"
11
12 dateischr = None
13 dateiname=pfad + datei
14 print("Dateiname: ", dateiname)
15
16 try:
17     #'w' - leere Datei generieren
18     #'a' - Inhalt an vorhandene Datei anhängen
19     dateischr = open(dateiname, "w")
20 except:
21     print("Dateizugriff nicht erfolgreich")
22
23 dateiname=pfad + ausgangsdatei
24 print("Dateiname: ", dateiname)
25
26 dateilese = None
27 try:
28     dateilese = open(dateiname, "r")
29 except:
30     print("Dateizugriff nicht erfolgreich")
31
32 G=""
33 richtung=1
34 Zalt=0

```

```

35 Xalt=0 # voreingestellte / letzte Position
36 Zneu=Zalt # aktuelle / neue Position
37 Xneu=Xalt # aktuelle / neue Position
38 Zeit=0 # benötigte Zeit zum zurücklegen des Weges zwischen alter und neuer Positi
39 Zeitges=0 # Gesamtzeit der Bewegung
40 Feil=1000/60 # Eilganggeschwindigkeit in Millimeter pro Sekunde
41 Talt="" # voreingestelltes / letztes Werkzeug im Ausgangszustand des Modells
42 Ineu=falt # aktuelles Werkzeug im Ausgangszustand des Modells
43 Spingra=0 # Spindel-winkel für die gesamte Bewegung in Grad
44 I=0 # inkrementelle Angabe des Kreis-Mittelpunktes bezogen auf den Kreis-Anfar
45 K=0 # inkrementelle Angabe des Kreis-Mittelpunktes bezogen auf den Kreis-Anfar
46 F=0 # Vorschubgeschwindigkeit
47 S=0 # Drehzahl
48 WZKI1X=0 # T1 Werkzeugkorrektur in X-Richtung
49 WZKI1Z=0 # T1 Werkzeugkorrektur in Z-Richtung
50 WZKI2X=-27.925 # T2 Werkzeugkorrektur in X-Richtung
51 WZKI2Z=17.34 # T2 Werkzeugkorrektur in Z-Richtung
52 WZKI3X=-0.294 # T3 Werkzeugkorrektur in X-Richtung
53 WZKI3Z=0.02 # T3 Werkzeugkorrektur in Z-Richtung
54 WZKI5X=1.699 # T5 Werkzeugkorrektur in X-Richtung
55 WZKI5Z=-24.11 # T5 Werkzeugkorrektur in Z-Richtung
56 Wzhalter=0 # Drehwinkel des Werkzeughalters in Grad
57 Wzhalteralt=Wzhalter # letzter Drehwinkel des Werkzeughalters entspricht aktuellem Drehwinkel c
58 Scale=1000 # Skalierung der zu verwendenden IDO Session Datei
59
60 if (dateilese != None):
61     data = dateilese.readline()
62     while(len(data) > 0):
63         data = data.replace("\n","")
64         #finde 'N' an erster Stelle
65         if (data.find('N',0,1) >= 0):
66             print("Zeile: ", data)
67             #Zeile zerlegen bei Leerzeichen

```

```

68 listedata=data.split(' ')
69 #Anzahl Felder
70 anz=len(listedata)
71 #print("Anzahl: ", anz)
72 for i in range(anz):
73     #print("T(i):",listedata[i])
74     p=listedata[i]
75     #Werkzeug auslesen
76     if(listedata[i].find('T') >= 0):
77         T=listedata[i].split('T')
78         print("Dateiname: ", dateiname)
79         Tneu=T[1]
80         #Richtung auslesen
81         if(listedata[i].find('M') >= 0):
82             M=listedata[i].split('M')
83             #Drehrichtung speichern
84             if(M[1] == "3"):
85                 richtung=1
86             elif(M[1] == "4"):
87                 richtung=-1
88             elif(M[1] == "5" or M[1] == "30"): # M5 (Spindel&Kühlmittel abschalten)
89                 #naechste Zeile auslesen
90                 data = dateilese.readline()
91
92         #Drehzahl auslesen
93         if(listedata[i].find('S') >= 0):
94             S=listedata[i].split('S')
95             #Drehzahl
96             S=float(S[1])/60*richtung
97
98         #Vorschubgeschwindigkeit auslesen
99         if(listedata[i].find('F') >= 0):
100            F=listedata[i].split('F')

```

```

101 #Vorschub speichern
102 F=float('0'+F[1]) # "Null" vor Vorschub-Zahl setzen, da "Null" vor "Pu
103
104 #G-Befehle auslesen
105 if(listedata[i].find('G0') >= 0):
106     G="G0"
107 elif(listedata[i].find('G1') >= 0):
108     G="G1"
109 elif(listedata[i].find('G2') >= 0):
110     G="G2"
111 elif(listedata[i].find('G3') >= 0):
112     G="G3"
113 elif(listedata[i].find('G4') >= 0): # "Verweilzeit" auslesen --> nur zum
114     G="G4"
115
116 #X-Wert auslesen
117 if(listedata[i].find('X') >= 0):
118     X=listedata[i].split('X')
119     Xneu=float(X[1]) # Wenn X-Wert gefunden, dann soll dieser als neuer X
120     Xneu=Xneu/2-50 # X-Wert umrechnen --> Halbieren, da Angaben im NC-P
121
122 # einrechnen der Werkzeugkorrektur
123 if Tneu=="1":
124     Xneu=Xneu+WZKT1X
125 elif Tneu=="2":
126     Xneu=Xneu+WZKT2X
127 elif Tneu=="3":
128     Xneu=Xneu+WZKT3X
129 elif Tneu=="5":
130     Xneu=Xneu+WZKT5X
131
132 #2-Wert auslesen
133 if(listedata[i].find('2') >= 0):

```

```

134 Z=listedata[i].split('Z')
135 Zneu=float(Z[1]) # Wenn Z-Wert gefunden, dann soll dieser als neuer Z-
136 Zneu=Zneu-100 # 100 subtrahieren, da Ausgangspunkt (Nullpunkt) in :
137
138 # einrechnen der Werkzeugkorrektur
139 if Ineu=="1":
140     Zneu=Zneu+WZKT1Z
141 elif Ineu=="2":
142     Zneu=Zneu+WZKT2Z
143 elif Ineu=="3":
144     Zneu=Zneu+WZKT3Z
145 elif Ineu=="5":
146     Zneu=Zneu+WZKT5Z
147
148 #inkrementelle Angabe des Kreis-Mittelpunktes bezogen auf den Kreis-Anfangspu
149 if(listedata[i].find('I') >= 0):
150     I=listedata[i].split('I')
151     I=float(I[1])
152
153 #inkrementelle Angabe des Kreis-Mittelpunktes bezogen auf den Kreis-Anfangspu
154 if(listedata[i].find('K') >= 0):
155     K=listedata[i].split('K')
156     K=float(K[1])
157
158 # Werkzeugwechsel einberechnen --> Drehung des Werkzeughalters, Zeitbedarf (nur
159 if Ineu != Talt:
160
161     Zeit=(sqrt((float(Tneu)-float(Talt))**2))*0.5 # Zeitbedarf für Werkzeug
162     #Wzhalter= Wzhalter+(float(Tneu)-float(Talt))*45 # Winkel für Werkzeugwe
163
164     U=Zeit*1000
165     Zeitaender=Zeit/U
166     Wzhalterraender=((float(Tneu)-float(Talt))*45)/U

```

```

167 Zeit=0
168
169 Zalt=Zneu
170 Xalt=Xneu
171 Ialt=Ineu
172
173 for i in range(int(U)):
174
175     Zeit=Zeitaender
176     Spingra=Zeit*S*360+Spingra
177     Spingra=round(Spingra, 10)
178     Zeitges=Zeit+Zeitges
179     Zeitges=round(Zeitges, 10)
180     Wzhalter=Wzhalter+Wzhalteraender
181     Wzhalter=round(Wzhalter, 10)
182
183     Xwrite=Xneu/Scale
184     Zwrite=Zneu/Scale
185     Xwrite=round(Xwrite, 10)
186     Zwrite=round(Zwrite, 10)
187
188     dateischr.write(str(Zeitges))
189     dateischr.write('\t' + str(Xwrite))
190     dateischr.write('\t' + str(Zwrite))
191     dateischr.write('\t' + str(Spingra))
192     dateischr.write('\t' + str(Wzhalter))
193     dateischr.write('\n')
194
195 # Vorschub umrechnen von Millimeter pro Umdrehung zu Millimeter pro Sekunde
196 Fvor=(F*sqrt((S)**2))
197
198 if G=="GO":
199     Fuse=Feil

```

```

200 elif G=="G1" or G=="G2" or G=="G3":
201     Fuse=Fvor
202
203     if G=="G0" or G=="G1":
204         # Linearbewegung mit Vorschubgeschwindigkeit
205         D=sqrt(((Zneu)-(Zalt))**2)+(((Xneu)-(Xalt))**2)) # Abstandsberechnung zwischen
206         Zeit=(D/Fuse) # Zeitberechnung mit Vorschubgeschwindigkeit
207         Zeit=round(Zeit, 3)
208         U=Zeit*1000
209
210         DZ=Zneu-Zalt
211         DX=Xneu-Xalt
212
213         if U!=0:
214             Zeitaender=Zeit/U
215             Zaender=DZ/U
216             Xaender=DX/U
217         else:
218             U=1
219             Zeitaender=Zeit/U
220             Zaender=DZ/U
221             Xaender=DX/U
222
223         for i in range(int(U)):
224
225             Zneu=Zalt+Zaender
226             Xneu=Xalt+Xaender
227
228             D=sqrt(((Zneu)-(Zalt))**2)+(((Xneu)-(Xalt))**2)) # Abstandsberechnung zw:
229             Zeit=Zeitaender # Zeitberechnung mit Vorschubgeschw:
230             Spingra=Zeit*S*360+Spingra # Berechnung des aktuellen Spindel-winkel:
231
232

```

```

233 Spingra=round(Spingra, 10) # Runden des berechneten Spindel-winkels
234 Zeitges=Zeit+Zeitges # Addieren der berechneten Zeit für die l
235 Zeitges=round(Zeitges, 10) # Runden der berechneten Gesamtzeit -->
236
237 Zalt=Zneu # speichern der aktuellen Position als le
238 Xalt=Xneu # speichern der aktuellen Position als le
239 Xwrite=Xneu/Scale
240 Zwrite=Zneu/Scale
241 Xwrite=round(Xwrite, 10)
242 Zwrite=round(Zwrite, 10)
243
244 dateischr.write(str(Zeitges)) # Gesamtzeit der Bewegung sch;
245 dateischr.write('\t' + str(Xwrite)) # aktuelle Position schreiben
246 dateischr.write('\t' + str(Zwrite)) # aktuelle Position schreiben
247 dateischr.write('\t' + str(Spingra)) # derzeitigen Spindel-Winkel
248 dateischr.write('\t' + str(Wzhalter)) # derzeitigen Werkzeughalter-
249 dateischr.write('\n') # Zeilenumbruch schreiben
250
251 Xneu=round(Xneu, 3)
252 Zneu=round(Zneu, 3)
253
254 elif G=="G2" or G=="G3": # Kreisbahn berechnen
255
256 Xmitte=Xalt+I # absolute Koordinate des Kreismi
257 Zmitte=Zalt+K # absolute Koordinate des Kreismi
258 R=sqrt(I**2+K**2) # Kreis-Radius berechnen
259
260 ZPhialt=((Zalt-Zmitte)/(R)) # Zwischenwert für Winkel der Aus
261 ZPhialt=round(ZPhialt, 10) # Runden des Zwischenwertes, da e;
262
263 ZPhialt=degrees(acos(ZPhialt)) # Winkel der Ausgangspos;
264 #ZPhialt=round(ZPhialt, 10)
265

```

```

266 ZPhineu=((Zneu-Zmitte)/(R))
267 ZPhineu=round(ZPhineu, 10)
268
269 ZPhineu=degrees(acos(ZPhineu))
270 #ZPhineu=round(ZPhineu, 10)
271
272 ZPhispanne=sqrt((ZPhineu-ZPhialt)**2)
273 #ZPhispanne=round(ZPhispanne, 10)
274
275 Kreisbogen=(R*pi*ZPhispanne)/180
276
277 Zeit=(Kreisbogen/Fuse)
278
279 Zeit=round(Zeit, 3)
280
281 U=Zeit*1000
282
283 XPhialt=((Xalt-Xmitte)/(R))
284 XPhialt=round(XPhialt, 10)
285
286 XPhialt=degrees(asin(XPhialt))
287 #XPhialt=round(XPhialt, 10)
288
289 XPhineu=((Xneu-Xmitte)/(R))
290 XPhineu=round(XPhineu, 10)
291
292 XPhineu=degrees(asin(XPhineu))
293 #XPhineu=round(XPhineu, 10)
294
295 XPhispanne=sqrt((XPhineu-XPhialt)**2)
296 #XPhispanne=round(XPhispanne, 10)
297
298 Zeitaender=Zeit/U

```

```

# Zwischenwert für Winkel der End
# Runden des Zwischenwertes, da e

```

```

# Winkel der Endposition

```

```

# Winkel-Spanne zwischen Ausgangs

```

```

# Zwischenwert für Winkel der Aus
# Runden des Zwischenwertes, da e

```

```

# Winkel der Ausgangspos

```

```

# Zwischenwert für Winkel der End
# Runden des Zwischenwertes, da e

```

```

# Winkel der Endposition

```

```

# Winkel-Spanne zwischen Ausgangs

```

```

299
300 # Berechnung des Änderungswinkels in Z-Richtung unter Berücksichtigung der Drei
301 if ZPhineu <= ZPhialt:
302     ZPhiaender=-ZPhispanne/U
303 else:
304     ZPhiaender=ZPhispanne/U
305
306 # Berechnung des Änderungswinkels in X-Richtung unter Berücksichtigung der Drei
307 if XPhineu <= XPhialt:
308     XPhiaender=-XPhispanne/U
309 else:
310     XPhiaender=XPhispanne/U
311
312 # Berechnung von Punkten auf der Kreisbahn (Anzahl entspricht Wert U)
313 for i in range(int(U)):
314
315     ZPhineu=ZPhialt+ZPhiaender           # Winkel für neue Z-Position berec
316
317     Zneu=Zmitte+R*cos(radians(ZPhineu))  # neue Z-Position berechnen
318
319     XPhineu=XPhialt+XPhiaender           # Winkel für neue X-Position berec
320
321     Xneu=Xmitte+R*sin(radians(XPhineu))  # neue X-Position berechnen
322
323     Zeit=Zeitaender                      # Zeitberechnung mit Vorschubgeschwi
324     Spingra=Zeit*S*360+Spingra           # Berechnung des aktuellen Spindel-winkel:
325     Spingra=round(Spingra, 10)          # Runden des berechneten Spindel-winkels
326     Zeitges=Zeit+Zeitges                 # Addieren der berechneten Zeit für die M
327     Zeitges=round(Zeitges, 10)          # Runden der berechneten Gesamtzeit --> :
328
329     Zalt=Zneu
330     Xalt=Xneu
331     ZPhialt=ZPhineu

```

```

332 XPhialt=XPhineu
333 Xwrite=Xneu/Scale
334 Zwrite=Zneu/Scale
335 Xwrite=round(Xwrite, 10)
336 Zwrite=round(Zwrite, 10)
337
338 #Werte in Datei schreiben
339 dateischr.write(str(zeitges))
340 dateischr.write('\t' + str(Xwrite))
341 dateischr.write('\t' + str(Zwrite))
342 dateischr.write('\t' + str(Spingra))
343 dateischr.write('\t' + str(Wzhalter))
344 dateischr.write('\n')
345
346 elif G=="G4": # "Verweilzeit" auslesen --> nur zum Fehler abfangen
347 #naechste Zeile auslesen
348 data = dateilese.readline()
349
350 G=""
351 # Wegbedingung zuruecksetzen
352
353 #naechste Zeile auslesen
354 data = dateilese.readline()
355
356 dateilese.close()
357 del dateilese
358 dateischr.close()
359 del dateischr

```

