

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

JÜRGEN HERBERT LENZ

**Modell zum maschinellen Lernen von Wirk-
zusammenhängen bei der Holzverarbeitung
auf Basis von online-erfassten Werkzeug-
maschinendaten**



Universität Stuttgart



Fraunhofer

IPA

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG BAND 82

Herausgeber:

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

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

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

Jürgen Herbert Lenz

**Modell zum maschinellen Lernen von Wirk-
zusammenhängen bei der Holzverarbeitung auf Basis
von online-erfassten Werkzeugmaschinen**

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:

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

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG**Herausgeber:**

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

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

Titelbild: © Fa. Leitz GmbH & Co. KG

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-1371-9

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2018

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

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2018

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

Alle Rechte vorbehalten

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

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

GELEITWORT DER HERAUSGEBER

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

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

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

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

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

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

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper

Modell zum maschinellen Lernen von Wirkzusammenhängen bei der Holzverarbeitung auf Basis von online-erfassten Werkzeugmaschinendaten

Von der Graduate School of Excellence
advanced Manufacturing Engineering der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Jürgen Herbert Lenz

aus Aalen

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

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich

Mitberichter : Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Möhring

Tag der mündlichen Prüfung: 12.06.2018

Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering
Universität Stuttgart
2018

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand an der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Engelbert Westkämper der mir die Möglichkeit zur Erstellung dieser Arbeit gegeben hat und mich in der gesamten Zeit hilfsbereit betreute. In gleicher Weise danke ich Herrn Professor Michael Weyrich und Professor Hans-Christian Möhring für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Durch das BMBF-geförderte Forschungsprojekt eApps4production entstand die Gelegenheit der Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Leitz GmbH & Co. KG. Hierdurch bot sich die Möglichkeit, viele Einblicke in die Holzbearbeitung zu gewinnen und für diese Arbeit wertvolle Diskussionen zu führen. Mein besonderer Dank gilt hier Andreas Kisselbach und Jürgen Graef.

Danken für die Hilfestellungen während der Anfertigung dieser Arbeit möchte ich außerdem Hans-Friedrich Jacobi, Dominik Brenner, Felix Georg Müller, Markus Weskamp und Markus Feil.

Ebenso danken möchte ich meinen ehemaligen Kollegen am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, insbesondere Dominik Lucke, Johannes Volkmann und Martin Landherr, die mich gerade in der Anfangszeit der Promotion fachlich unterstützt und für dieses Vorhaben motiviert haben.

Abschließend danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die Förderung meiner Forschungsaktivitäten, die diese Dissertation ermöglichten.

Kurzfassung

Aufgrund des immer härter werdenden globalen Wettbewerbs müssen produzierende Unternehmen, die auch in der Zukunft profitabel produzieren wollen, ihre Leistungsreserven nutzen. Die Möbelfertigung, die größte Holzverarbeitende Industrie, besteht im Hauptprozess aus dem Fräsen von Holzwerkstoffen. Hierbei gibt es Leistungsreserven in der Einsatzplanung der Fräswerkzeuge. Gute Einsatzplanung ist die Voraussetzung für eine hohe Verfügbarkeit des Produktionssystems. Die Einsatzplanung wird durch Entwicklungen wie individuelle Möbelstücke, kleinere Losgrößen und neue Schneidstoffe erschwert. Die Herausforderung der Planungsunsicherheit beim Werkzeugeinsatz in der Holzbearbeitung wächst zusätzlich durch die größere Anzahl an industriell hergestellten Holzwerkstoffen mit jeweils unterschiedlicher Abrasivität. Dadurch wird die Bestimmung der Reststandzeit eines Werkzeuges erschwert.

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Planungssicherheit des Werkzeugeinsatzes durch eine exakte Planung des Werkzeugwechselfensters sowie durch Prognose der Reststandzeit zu erhöhen. Mithilfe dieser Prognose kann das gesamte Standvermögen des Werkzeuges verwendet werden. Das führt dazu, dass die Verfügbarkeit des Produktionssystems erhöht wird, da durch das Überschreiten der Werkzeugeinsatzgrenze bedingte Stillstände vermieden werden. Hierfür wurde ein Modell erstellt, das online erfasste Daten aus der Werkzeugmaschinensteuerung mit kontextbezogenen Informationen aus Datenbanken wie dem ERP-System und der Werkzeugverwaltung kombiniert. Aus diesen Informationen wird eine werkzeugspezifische Einsatzhistorie gebildet und mit gemessenen physikalischen Werten über den Werkzeugverschleiß und Kantenqualität des Werkstückes in Verbindung gebracht. Diese Verbindung von Bearbeitungshistorie und echten physikalischen Messgrößen bilden die Datenbasis für das maschinelle Lernen von Wirkzusammenhängen. Durch das Erlernen dieser Zusammenhänge kann die Reststandzeit eines Werkzeuges prognostiziert werden und somit die Planungsgenauigkeit des Werkzeugeinsatzes durch exakte Festlegung von Werkzeugwechselfenstern gesteigert werden.

Zur Erprobung wurde das entwickelte Modell implementiert und seine Funktionsfähigkeit anhand einer Werkstoff-/Schneidstoffpaarung validiert. Diese Erprobung zeigte dass die Wirkzusammenhänge erlernt werden können.

Short Summary

The increasing global competition forces manufacturing companies to be more and more efficient and utilize remaining capabilities. In the furniture manufacturing industry, one of the main processes is milling. In the operational planning of tool usage during the milling process, there's lots of room for improvement in efficiency. Well planned tool usage is the prerequisite for high equipment utilization. Current industry trends in furniture manufacturing are mass customization, smaller lot sizes, individualized furniture and new cutting materials. These trends pose enormous challenges when it comes to precise planning and scheduling of cutting tool usage due to the fact that each cutting material and raw material combination comes with different abrasive wear characteristics.

The goal of this thesis is to capture and evaluate the tool usage data to monitor the operation in a traceable manner. To achieve this goal, a model for online-capturing and evaluation was established. This model combines machine tool control data and context information about the specific tool used as well as the production order information such as raw material type.

Using this information, a tool-specific operation history is generated. The resulting history data, combined with actual physical measurements, is the basis for the learning step which establishes wear factors for each combination of raw material and cutting material. The wear factors are used to predict the remaining tool life and determine the ideal tool replacement window between two production orders.

To proof the model's consistency, it was implemented and the operational capability was tested by performing various trial runs to determine the interaction of the process features and the process outcome for one specific raw material and cutting material combination. This interaction are quantified in a set of wear and quality prognosis coefficients.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	XII
Abbildungsverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XVI
Formelzeichen	XIX
Indizes	XXI
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation	2
1.1.1 Holzwerkstoffe	5
1.1.2 Holzverarbeitende Industrie.....	8
1.1.3 Holzverarbeitungsprozesse in der Möbelfertigung.....	9
1.2 Problemstellung.....	10
1.3 Ziel der Arbeit.....	15
1.4 Aufbau der Arbeit	17
2 Stand der Wissenschaft und Technik des Werkzeugeinsatzes	20
2.1 Werkzeugwesen.....	20
2.2 Tool-Monitoring	23
2.3 Stand der Wissenschaft zur Modellbildung in der Holzverarbeitung.....	25
2.3.1 Klassische Modellbildungsansätze	25
2.3.2 Modellbildungsansätze mit maschinellem Lernen.....	27
2.4 Anwendung von Prognosemodellen in der Praxis	34
2.5 Defizitbewertung.....	35
3 Grundlagen des Betrachtungs- und Gestaltungsbereichs.....	36
3.1 Spanende Holzbearbeitung.....	36
3.2 Holzbearbeitungswerkzeuge	39
3.2.1 Schneidstoffe in der Holzbearbeitung	39
3.2.2 Fazit zu Schneidstoffen in der Holzbearbeitung.....	41

3.2.3	Spanbildung bei der Holzbearbeitung.....	42
3.2.4	Verschleißfortschritt bei der Holzbearbeitung	43
3.2.5	Fazit zum Verschleißfortschritt bei der Holzbearbeitung.....	45
3.3	Qualitätssicherung durch Kantenmessung.....	46
3.4	Fertigungsnahe IT-Systeme	47
3.4.1	Produktionsplanung	48
3.4.2	Werkzeugmanagementsystem	49
3.4.3	Werkzeugmaschinensteuerungen	50
3.4.4	Schnittstellen für Prozessdaten	51
3.4.5	Fazit zur Prozessmodellierung durch Werkzeugmaschinenendaten	51
3.5	Werkzeugkostenerfassung im Rechnungswesen.....	52
3.5.1	Kostenarten	53
3.5.2	Sondereinzelkosten der Fertigung.....	54
3.5.3	Fertigungseinzelkosten.....	54
3.5.4	Fazit zur Werkzeugkostenerfassung im Rechnungswesen	54
4	Konzeption des Modells	55
4.1	Prozessmodellierung.....	55
4.2	Anforderungen an das Prognosemodell zur Verschleißvorhersage	56
4.2.1	Branchenbezogene Anforderungen	57
4.2.2	Prozessbezogene Anforderungen	57
4.2.3	Anforderungen der Modell-Anwender	58
4.2.4	Anforderungen aus wissenschaftlicher Sicht	58
4.3	Annahmen über den Werkzeugeinsatz	59
4.3.1	Relativbewegungen zwischen Werkstück und Werkzeug.....	60
4.3.2	Einflussgrößen auf den Werkzeugverschleiß	61
4.3.3	Werkzeugverschleißart	61
4.4	Voraussetzungen	62
4.4.1	Identifizierung des Werkzeuges.....	62

4.4.2	Schnittstelle zur Werkzeugmaschinensteuerung	62
4.4.3	Kontextdaten aus Datenbanken.....	62
4.5	Modellansatz	63
4.5.1	Prozessbeobachtung	64
4.5.2	Erfasste Prozessgrößen	65
4.5.3	Lernen aus Prozessgrößen	66
4.5.4	Fazit des Modellansatzes	66
5	Detaillierung des Modells.....	68
5.1	Überblick über das Modell.....	68
5.2	Informationsmodell.....	69
5.3	Subroutinen.....	71
5.3.1	Analyse des aktuellen NC-Satzes.....	71
5.3.2	Fertigungsauftragsabfrage.....	73
5.3.3	Zentrales Speichern der Werkzeugeinsatzdaten	74
5.3.4	Werkzeugdatenabfrage	75
5.3.5	Koordinatensystemkorrektur.....	76
5.3.6	Fräserradiuskompensation	77
5.3.7	Generieren des Rasters des Rohteiles	78
5.4	In-Situ-Flow	79
5.4.1	Push-Mitteilung der Werkzeugmaschine	79
5.4.2	Berechnung der Prozesseigenschaften	81
5.4.3	Dynamisches Update der Rohteilinformation.....	85
5.4.4	Lokales Speichern der Werkzeugeinsatzdaten.....	86
5.4.5	Durchführung der Prognose	86
5.5	Post-Prozess-Ablauf.....	87
5.5.1	Verschleißmessung am Werkzeug	87
5.5.2	Qualitätsmessung der Kantenbeschaffenheit	88
5.5.3	Matching der Werkzeugeinsätze mit physikalischen Messdaten	89

5.5.4	Lernmodell.....	90
5.6	Visualisierungskonzept.....	94
5.7	Einsatzabhängige Werkzeugkosten	97
5.8	Pay-Per-Use-Abrechnungssystem	100
5.8.1	Status quo des Abrechnungsvorgangs	101
5.8.2	Einsatzabhängiger Abrechnungsvorgang	102
5.9	Zusammenfassung des Modells.....	103
6	Anwendung des Modells	104
6.1	Implementierung des Modells als eApp.....	105
6.1.1	Verwendete Hardware	105
6.1.2	Eingesetzte Software.....	106
6.2	Überprüfung auf Plausibilität	107
6.2.1	Plausibilität des Laufwegs	107
6.2.2	Plausibilität der Vorschubgeschwindigkeit	108
6.2.3	Plausibilität des Arbeitseingriffs	109
6.2.4	Plausibilität des Schnittweges	109
6.2.5	Plausibilität des Systems	110
6.3	Versuchsdurchführung	114
6.3.1	Verwendetes Werkzeugsystem	114
6.3.2	Verwendeter Werkstoff	116
6.3.3	Versuchsdesign	116
6.3.4	Schneidkantenversatzmessungen	118
6.3.5	Qualitätsmessung	119
6.4	Ergebnisse der Versuchsdurchführung	120
6.4.1	Bewertungskriterien der Versuchsergebnisse	120
6.4.2	Ergebnisse der Schneidkantenversatzmessungen	121
6.4.3	Verschleißfaktoren für die Verschleißprognose	126
6.4.4	Evaluierung der Verschleißprognose	127

6.4.5	Fazit zur Verschleißmodellierung.....	127
6.4.6	Kantenschartigkeitsmessungen.....	128
6.4.7	Evaluierung der Qualitätsprognose.....	132
6.4.8	Fazit zur Qualitätsmodellierung	132
6.5	Spezifische einsatzabhängige Werkzeugkosten	133
6.6	Gesamtfazit zur Validierung des Modells	135
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	137
7.1	Zusammenfassung.....	137
7.2	Ausblick auf weitere Entwicklungen	139
8	Summary.....	140
8.1	Summary of the Model	142
8.2	Future Prospects	143
Literaturverzeichnis		144
Lebenslauf.....		164

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Dichteklassen der Faserplatten	6
Tabelle 1.2: Einordnung in Merkmale und Ausprägungen einer Fabrik	8
Tabelle 5.1: Metadaten der Werkzeughistorie	74
Tabelle 5.2: Einsatzdaten der Werkzeughistorie	75
Tabelle 5.3: Variablen der Push-Nachricht	80
Tabelle 6.1: Technische Daten der Versuchsmaschine.....	105
Tabelle 6.2: Auswertung der Laufweg-Ist-Daten-Analyse.....	108
Tabelle 6.3: Auswertung der Vorschubgeschwindigkeits-Ist-Daten Analyse	108
Tabelle 6.4: Auswertung der Schnittwegs-Ist-Daten-Analyse	110
Tabelle 6.5: Ergebnisse der Schnittwegermittlung.....	114
Tabelle 6.6: Technische Daten des Werkzeugsystems	115
Tabelle 6.7: Die drei Versuchsreihen des Versuchsdesigns.....	117
Tabelle 6.8: Prozessparameter der Versuchsreihe „A“	117
Tabelle 6.9: Prozessparameter der Versuchsreihe „B“	118
Tabelle 6.10: Prozessparameter der Versuchsreihe „C“	118
Tabelle 6.11: Schneidkantenversatzmessungen der Versuchsreihe "A"	121
Tabelle 6.12: Ermittlung des Schnittweges der Versuchsreihe "A"	121
Tabelle 6.13: Schneidkantenversatzmessungen der Versuchsreihe "B"	123
Tabelle 6.14: Durchschnittlicher Vorschub der Versuchsreihe "B"	123
Tabelle 6.15: Ermittlung des Schnittweges der Versuchsreihe "B"	123
Tabelle 6.16: Schneidkantenversatzmessungen der Versuchsreihe "C"	124
Tabelle 6.17: Durchschnittlicher Vorschub der Versuchsreihe "C"	125
Tabelle 6.18: Ermittlung des Schnittweges der Versuchsreihe „C“	125
Tabelle 6.19: Ergebnisse der Kreuzvalidierung der Verschleißprognose	127
Tabelle 6.20: Ergebnisse der Kantenausbruchsmessungen	128
Tabelle 6.21: Ergebnisse der Kreuzvalidierung der Qualitätsprognose	132

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Holzindustrie als Teil der Holzwirtschaft im Cluster Fort und Holz.....	1
Abbildung 1.2: Ausgangssituation in der Holzverarbeitung	4
Abbildung 1.3: Gliederung der Holzwerkstoffe.....	5
Abbildung 1.4: Produktionsaufkommen der Holzwerkstoffe	6
Abbildung 1.5: Globales Produktionsvolumen von Medium-density fibreboards	7
Abbildung 1.6: Arbeitsschrittfolge in der Möbelfertigung.....	9
Abbildung 1.7: Anwendungsszenario der effizienten Werkzeugnutzung	10
Abbildung 1.8: Auswahlprozess des einzusetzenden Werkzeuges	11
Abbildung 1.9: Charakteristische Abläufe	12
Abbildung 1.10: Gründe der Abweichungen der Ist-Daten von den Planungsdaten .	13
Abbildung 1.11: Ansatz des industriellen Lernens	15
Abbildung 1.12: Aufbau der Arbeit.....	19
Abbildung 2.1: Das Werkzeugwesen und seine Bereiche	21
Abbildung 2.2: Allgemeiner Werkzeugkreislauf mit vier Stationen.....	22
Abbildung 2.3: Verschiedene Tool-Monitoring-Ansätze.....	23
Abbildung 2.4: Überwachtes vs. unüberwachtes Lernen.....	27
Abbildung 3.1: Eingangs- und Ausgangsgrößen des Zerspanprozess	36
Abbildung 3.2: Eigenschaften der Schneidstoffgruppen	40
Abbildung 3.3: Standbegriffe im Zerspanprozess	43
Abbildung 3.4 Verschleißfortschritt nach Fischer.....	44
Abbildung 3.5: Kenngrößen am Schneidkeil.....	44
Abbildung 3.6: Definition der Scharfenfläche.....	46
Abbildung 3.7: Relevante fertigungsnahe IT-Systeme.....	47
Abbildung 3.8: Kostenarten	53
Abbildung 4.1: Anforderungen an das Modell.....	56
Abbildung 4.2: Überblick über die Annahmen.....	59
Abbildung 4.3: Geometrie des Zerspanvorganges	60
Abbildung 4.4: Unternehmensorganisatorische Sicht des Informationsflusses	63
Abbildung 4.5: Ansatz des Modells mit Input- und Outputgrößen.....	64
Abbildung 4.6: Modellansatz.....	67
Abbildung 5.1: Überblick über Schritte und Ablauf des Modells	68
Abbildung 5.2: Informationsmodell mit Beziehungen und Funktionsbausteinen.....	70

Abbildung 5.3: Programmablaufplan des NC-Parsers	72
Abbildung 5.4: Sequenzdiagramm bei detektiertem NC-Programmbeginn	73
Abbildung 5.5: Sequenzdiagramm des Werkzeugeinsatzdatenspeichervorgangs ...	74
Abbildung 5.6: Sequenzdiagramm bei detektiertem Werkzeugwechsel	75
Abbildung 5.7: Versatz zwischen Werkstücknullpunkt und Maschinennullpunkt	76
Abbildung 5.8: G-Worte der Fräserradiuskompensation.....	77
Abbildung 5.9 Generiertes Raster des Rohteils.....	78
Abbildung 5.10: Einzelschritte des In-Situ-Flows.....	79
Abbildung 5.11: Sequenzdiagramm der Berechnung der Prozesseigenschaften	80
Abbildung 5.12: Wegsegmente während der Bearbeitung	82
Abbildung 5.13: Geometrische Beschreibung des Arbeitseingriffs	82
Abbildung 5.14: Programmablaufplan der Berechnung des Arbeitseingriffs.....	83
Abbildung 5.15: Schnittweg der Schneide im Werkstück.....	84
Abbildung 5.16: Dynamisches Speichern der Rohteilkontur.....	85
Abbildung 5.17: Schritte im Post-Prozess-Ablauf	87
Abbildung 5.18: Kenngrößen an der Werkzeugschneide	87
Abbildung 5.19: Messprofil einer Schneide.....	87
Abbildung 5.20: Sequenzdiagramm des Matchvorgangs der Daten.....	89
Abbildung 5.21: Nomenklatur der Messreihen.....	91
Abbildung 5.22: Navigation zwischen den Sichten	94
Abbildung 5.23: Werkzeugübersicht einer Maschine.....	95
Abbildung 5.24: Standwege eines Werkzeuges	95
Abbildung 5.25: Werkstoffmix eines Werkzeuges.....	96
Abbildung 5.26: Prognose des Reststandweges	96
Abbildung 5.27: Verlauf des Zahnvorschubes	96
Abbildung 5.28: Verlauf des Arbeitseingriffes	96
Abbildung 5.29: Aufbau der einsatzabhängigen Kostenfunktion.....	98
Abbildung 5.30: Offline-Abrechnungsvorgang	101
Abbildung 5.31: Online-Abrechnungsvorgang	102
Abbildung 6.1: Überblick über den Datenfluss zwischen den Services	106
Abbildung 6.2: Erkannte Wegsegmente des Laufwegs aus Versuchsreihe "C".....	107
Abbildung 6.3: Foto der Bearbeitung der Versuchsreihe "C"	107
Abbildung 6.4: Online berechneter Arbeitseingriff	109
Abbildung 6.5: Bahnkurve Kreis-Geometrie.....	111

Abbildung 6.6: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm der Kreis-Geometrie	111
Abbildung 6.7: Bahnkurve Dreieck-Geometrie.....	112
Abbildung 6.8: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm der Dreieck-Geometrie	112
Abbildung 6.9: Bahnkurve der Mäander-Geometrie	113
Abbildung 6.10: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm der Mäander-Geometrie	113
Abbildung 6.11: Wendemesser-Oberfräser vom Typ 5161.....	115
Abbildung 6.12: REM-Aufnahme des Schneidkeiles	116
Abbildung 6.13: Messvorgang des Schneidkantenversatzes	119
Abbildung 6.14: Messvorgang mit Kantenschartigkeitsmessgerät.....	119
Abbildung 6.15: Kantenschartigkeitsmessgerät des IfW der Universität Stuttgart ..	119
Abbildung 6.16: Schneidkantenversatz der Versuchsreihe "A".....	122
Abbildung 6.17: Schneidkantenversatz der Versuchsreihe "B"	124
Abbildung 6.18: Schneidkantenversatz der Versuchsreihe "C"	125
Abbildung 6.19: Visualisierung des Verschleiß-Kennfeldes.....	126
Abbildung 6.20: Abhängigkeit der Qualität von der Vorschubgeschwindigkeit	129
Abbildung 6.21: Abhängigkeit der Qualität vom Schnittweg	130
Abbildung 6.22: Visualisierung des Qualitäts-Kennfeldes	131
Abbildung 6.23: Kennfeld mit zwei Werkzeugzuständen	133

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface (Programmierschnittstelle)
App	Applikation (Anwendungssoftware)
ca.	circa
CCD	Charge-Coupled Device (ladungsgekoppeltes Bauteil)
CFK	kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff
CIRP	College International pour la Recherche en Productique
CNC	Computerized Numerical Control
CVD	Chemical Vapour Deposition (Chemische Gasphasenabscheidung)
DDE	Dynamic Data Exchange
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
eApp	Engineering App
EEK	Entwicklungs- und Konstruktionskosten
EKEK	Entwicklungs- und Konstruktionseinzelkosten
EKGK	Entwicklungs- und Konstruktionsgemeinkosten
EN	Europäische Norm
EQUAM	Edge Quality Measurement Device
ERP	Enterprise Resource Planning
FEK	Fertigungseinzelkosten
FGK	Fertigungsgemeinkosten
FK	Fertigungskosten
GUI	Graphical User Interface (Grafische Benutzeroberfläche)
HDF	Hochdichte Faserplatte
HK	Herstellkosten
HSK	Hohlschaftkegel
HSS	High Speed Steel (Schnellarbeitsstahl)

HV	Vickershärte
IBM	International Business Machines Corporation
ID	Identifikator
ISO	Internationale Organisation für Normung
IT	Informationstechnik
JSON	JavaScript Object Notation
kNN	künstliche Neuronale Netze
L-MDF	Leichte Faserplatte
m	Meter
MDF	Mitteldichte Faserplatte
MEK	Materialeinzelkosten
MGK	Materialgemeinkosten
min	Minute
Mio	Millionen
MK	Materialkosten
mm	Millimeter
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
Mrd	Milliarden
MRP I	Material Requirement Planning (Materialbedarfsplanung)
MRP II	Manufacturing Resources Planning (Kapazitätsplanung)
NC	Numeric Control
OEE	Overall Equipment Effectiveness (Gesamtanlageneffektivität)
OPC-UA	Open Platform Communications-Unified Architecture
PKD	Polykristalliner Diamant
PPS	Produktionsplanungs- und Steuerung
PVD	Physical Vapour Deposition (Physikalische Gasphasenabscheidung)
QR	Quick Response (schnelle Antwort)

REM	Rasterelektronenmikroskop
ReST	Representational State Transfer
RFID	Radio-Frequency Identification
RPC	Remote Procedure Call
RSME	Root-mean-square deviation
s	Sekunde
SEF	Sondereinzelkosten der Fertigung
SK	Selbstkosten
SSE	Explained Sum of Squares (erklärte Streuung)
SSR	Sum of Squared Residuals (Residuenquadratsumme)
SST	Total Sum of Squares (Gesamtstreuung)
SV	Schneidkantenversatz
UL-MDF	Ultraleichte Faserplatte
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDM	Verband der Deutschen Möbelindustrie
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VTEK	Vertriebseinzelkosten
VTGK	Vertriebsgemeinkosten
VVGK	Verwaltungs- und Vertriebsgemeinkosten
VWGK	Verwaltungsgemeinkosten

Formelzeichen

A	mm ²	Zerspanfläche
a_p	mm	Schnittbreite
a_e	mm	Arbeitseingriff
a_{w_avg}		gewichteten Mittel der Kantenschartigkeit
α_m		Mikrofreiwinkel
Anz_{Inst}		Anzahl der Werkzeuginstandsetzungs-Vorgänge
b	mm	Spanungsbreite
β	\mathbb{R}^6	Regressionsparameter
c		Federwert des Werkstoffs
D	mm	Durchmesser
d	μm	Mittlere Abweichung
D_v	mm ³	Verschleißvolumen
f_z		Zahnvorschub
g		Gewichtung
h_1	mm	Verschiebung der Schnittkante
h_m	mm	mittlere Spandicke
K	€	Kosten
L	km	Standweg
l_c	m	Schnittweg
L_c	km	Standweg in Schnittrichtung
L_{c_tot}	km	Gesamtschnittweg in Schnittrichtung
l_e	m	Wirkweg
l_f	m	Vorschubweg (<i>Laufweg</i>)
n	1/min	Drehzahl
n_c		Number of Cuts (Schnittanzahl)

Formelzeichen

p	N/m ²	Druck
φ	\mathbb{R}^6	Feature Vektor
φ_e		Eingriffswinkel
Q	mm ³ /min	Zeitspanvolumen
S_a	mm ²	Schartenfläche
s_n		Wegsegment
SV	µm	Schneidkantenversatz
t	s	Zeit
v_c	m/s	Schnittgeschwindigkeit
v_f	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
w_i	mm	Bildbreite
w_n	mm	Breitenwerte
z		Zähnezahl des Werkzeuges
Z		Zustand (Werkzeugzustand)

Indizes

<i>a</i>	bezogen auf die Axial-Komponente oder bezogen auf das Anstellen des Werkzeuges
<i>avg</i>	Average (Durchschnitt)
<i>c</i>	bezogen auf die Schnittrichtung
<i>e</i>	bezogen auf die Wirkrichtung
<i>f</i>	bezogen auf die Vorschubrichtung
<i>i</i>	Laufvariable (Messpunkte)
<i>Inst</i>	Instandsetzung des Werkzeuges
<i>j</i>	Laufvariable (Messpunkte der Kantenschartigkeit)
<i>k</i>	Laufvariable
<i>m</i>	Mikro bei Winkel
<i>max</i>	maximal möglicher Schneidkantenversatz
<i>n</i>	Nummer der Verschleißmessung am Werkzeug
<i>Qual</i>	Qualitätsbezug der Modellierungsfaktoren
<i>tot</i>	bezogen auf eine Summe (engl. <i>total</i>)
<i>VK</i>	(Verkaufs-/) Kaufpreis des Werkzeuges
<i>Wear</i>	Verschleißbezug der Modellierungsfaktoren
<i>z</i>	bezogen auf den einzelnen Zahn bei mehrschneidigen Werkzeugen

1 Einleitung

Durch die fortschreitende Digitalisierung in der Holzwirtschaft werden völlig neue Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung geschaffen. Neue Informationstechniken erlauben eine Datenintegration entlang der gesamten Wertschöpfungskette in der Holzwirtschaft. Die Holzwirtschaftsbranche umfasst alle unternehmerischen Tätigkeiten, die Wertschöpfung mit dem Rohstoff Holz erzeugen. Die gesamte Branche erwirtschaftete im Jahr 2014 ca. 118 Mrd. Euro (Becher 2014) und gliedert sich in Holzhandel, Holzindustrie und Holzhandwerk. Die Holzindustrie selbst lässt sich wiederum unterteilen in holzbearbeitendes und Holzverarbeitendes Gewerbe. Das holzbearbeitende Gewerbe umfasst die Sägeindustrie und die Holzwerkstoffindustrie. Die Holzwerkstoffindustrie wiederum lässt sich in drei Gruppen gliedern: die Möbelindustrie, die Holzpackmittelindustrie und das industrielle Holzbauwesen, siehe Abbildung 1.1.

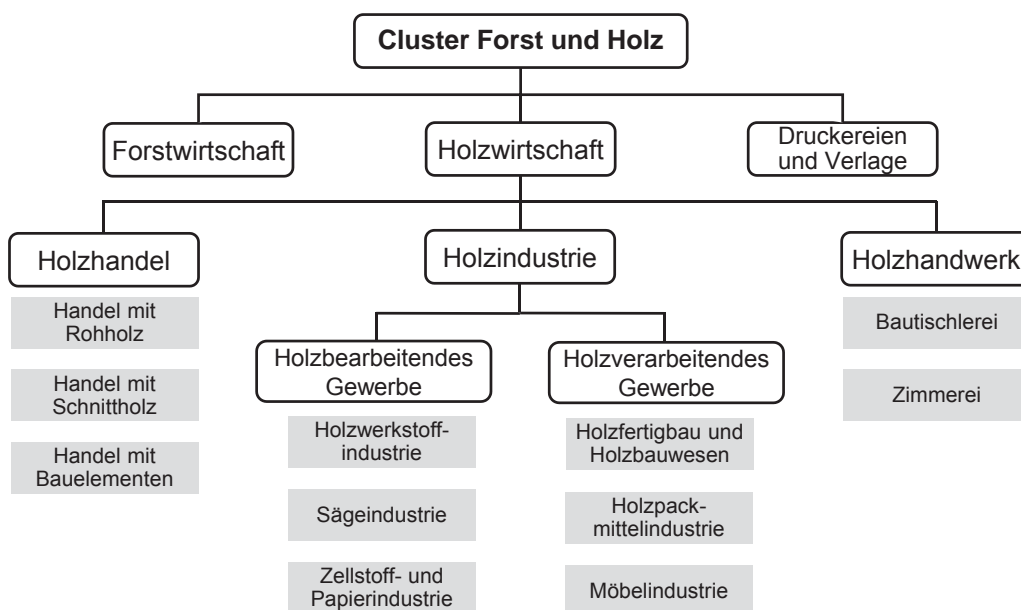


Abbildung 1.1: Holzindustrie als Teil der Holzwirtschaft im Cluster Forst und Holz (Becher 2014; DHWR 2016)

Dem im Rahmen dieser Arbeit betrachteten, wachsenden Teilbereich der Möbelindustrie, dem der industriell gefertigten Möbel, gehörten im Jahre 2013 ca. 11.800 Unternehmen in Deutschland an, die in Summe ca. 130.000 Mitarbeiter beschäftigen (Becher 2014). Die Möbelfertigung ist die größte Holzverarbeitende Branche und wird geprägt von kleinen und mittelständischen Betrieben.

Die industriell hergestellten Möbel werden auf Holzbearbeitungsmaschinen mit numerischen Steuerungen (engl. *Numerical Control*; NC) produziert. Der Absatzmarkt

für Holzbearbeitungsmaschinen hatte 2015 für Deutschland einen Umfang von etwa 2,4 Mrd. Euro (Meißner et al. 2016). Das entspricht etwa 25 % des weltweiten Absatzmarktes von 9 Mrd. Euro (VDMA 2015). Der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) prognostiziert der Branche darüber hinaus einen weiteren Zuwachs.

Die auf Holzbearbeitungsmaschinen produzierten Güter müssen sich permanent auf dem Weltmarkt behaupten. Um auf wettbewerbsfähigem Kostenniveau produzieren zu können ist es notwendig, ständig Potenziale zur Optimierung der Produktionsorganisation zu erschließen und Prozesse kontinuierlich zu verbessern (Westkämper 2014a). Die Herausforderung liegt darin, den derzeitigen Wettbewerbsvorteil durch effiziente Nutzung aller Betriebsmittel zu sichern. Das Bestreben der Werkzeugeinsatzplanung ist daher die Holzbearbeitungsmaschinen und -werkzeuge effizient zu nutzen.

Eine Möglichkeit eine hocheffiziente Werkzeugeinsatzplanung zu verwirklichen ist der Datenaustausch entlang der Produktionskette über alle beteiligten Prozesse und Betriebsmittel, denn im Falle des Werkzeugeinsatzes liegt die organisatorische Aufgabe beim Fachbereich des Werkzeugwesens. In unternehmerischer Hinsicht ist das Werkzeugwesen nicht nur für den Anteil der Beschaffungskosten der spanabhebenden Werkzeuge an den Fertigungskosten verantwortlich, sondern ebenso für die Kosten, die durch Werkzeuge beeinflusst werden. Diese Beeinflussungskosten können bis zu einem Drittel der Fertigungskosten betragen und umfassen neben der Werkzeugplanung und -beschaffung auch Tätigkeiten wie Werkzeugeinrichtung, -vermessung, -bereitstellung und das Rüsten der Maschinen sowie die Instandsetzung der Werkzeuge (Abele et al. 2008).

1.1 Ausgangssituation

Einer der prägenden aktuellen Markttrends ist der Konsumentenwunsch nach individualisierten Produkten. Auf der Produktionsseite führt dies zur personalisierten Massenproduktion (*Mass Customisation*) (Piller 2007). Aus der Individualisierung resultiert eine höhere Variantenvielfalt und somit kleinere Losgrößen. Im Falle der Holzverarbeitenden Industrie in Deutschland lässt sich eine Zunahme der Herstellung von individuellen Möbelstücken beobachten (Knauf et al. 2013, S. 103).

Die fortschreitende Industrialisierung der Holzverarbeitung resultiert in eine Konsolidierung der Möbelhersteller und einer Verdrängung kleinerer Tischlerbetriebe.

Als Trend in Bezug auf den technischen Fortschritt lassen sich neue Schneidstoffe (Westkämper et al. 2016, S. 94) beobachten, die höhere Schnittgeschwindigkeiten und höhere Vorschubgeschwindigkeit erlauben. Diese Geschwindigkeiten reduzieren die Bearbeitungszeit für den Plattenzuschnitt auf Holzbearbeitungsmaschinen. Daher ermöglicht die Steigerung der Zerspanleistung die Substitution des flexiblen Plattenzuschnitts durch das *Nesting* (Schachteln) anstelle des Sägens auf Plattenaufteilmaschinen mit Kreissägeblättern (Cobus 2016).

Die Holzwerkstoffe haben während der letzten 20 Jahre in ihrer Vielfalt zugenommen. Diese Entwicklung lässt sich auf neue Materialien im Bereich der Leichtbauwerkstoffe zurückführen (Eierle et al. 2008). Ebenfalls verantwortlich für die zunehmende Werkstoffvielfalt ist die Funktionsintegration in den Werkstoff, wie beispielsweise Brandschutz oder magnetische Einsätze für Magnetpinnwände.

Entwicklungen bei den Holzbearbeitungswerkzeugen zeigen sich in der Verwendung von neuartigen Schneidstoffen und den daraus resultierenden längeren Standzeiten (Heisel et al. 2011) aufgrund neuartiger Beschichtungen (Klocke et al. 2009). Die Werkzeugtypenvielfalt nimmt zu, der Trend führt hin zu einem höheren Anteil an Sonderwerkzeugen, die speziell auf einen Prozess und ein kleines Spektrum an individualisierten Produkten zugeschnitten wurden.

Ebenso ist eine Leistungssteigerung in der Steuerungselektronik moderner CNC-Holzbearbeitungswerkzeugmaschinen zu beobachten. CNC-Steuerungen verfügen heute über ausreichende Rechenleistung hinsichtlich der Ausgabe einer Vielzahl an Variablen innerhalb eines kurzen Intervalls. Diese Daten stammen sowohl von den in der Werkzeugmaschine verbauten Sensoren (Weck et al. 2003) als auch von Zwischenberechnungen aus der Werkzeugmaschinensteuerung. Sie werden mittels Schnittstellen automatisiert übertragen (Westkämper 2014b). Durch Abgreifen der Daten ist es möglich Rückschlüsse über den Zerspanprozess und darüber hinaus durch fortlaufende Beobachtung Erkenntnisse über den Prozess zu gewinnen. Die Rechenleistung und damit die Ausgabemöglichkeiten von Daten beschleunigt sich zusätzlich durch Entwicklungen der Halbleitertechnologien wie Miniaturisierung und Preisverfall (Moore 1965; Lundstrom 2003).

Abbildung 1.2 zeigt einen Überblick über die Trends in Bezug auf den Markt und den Technologien in der Holzindustrie.

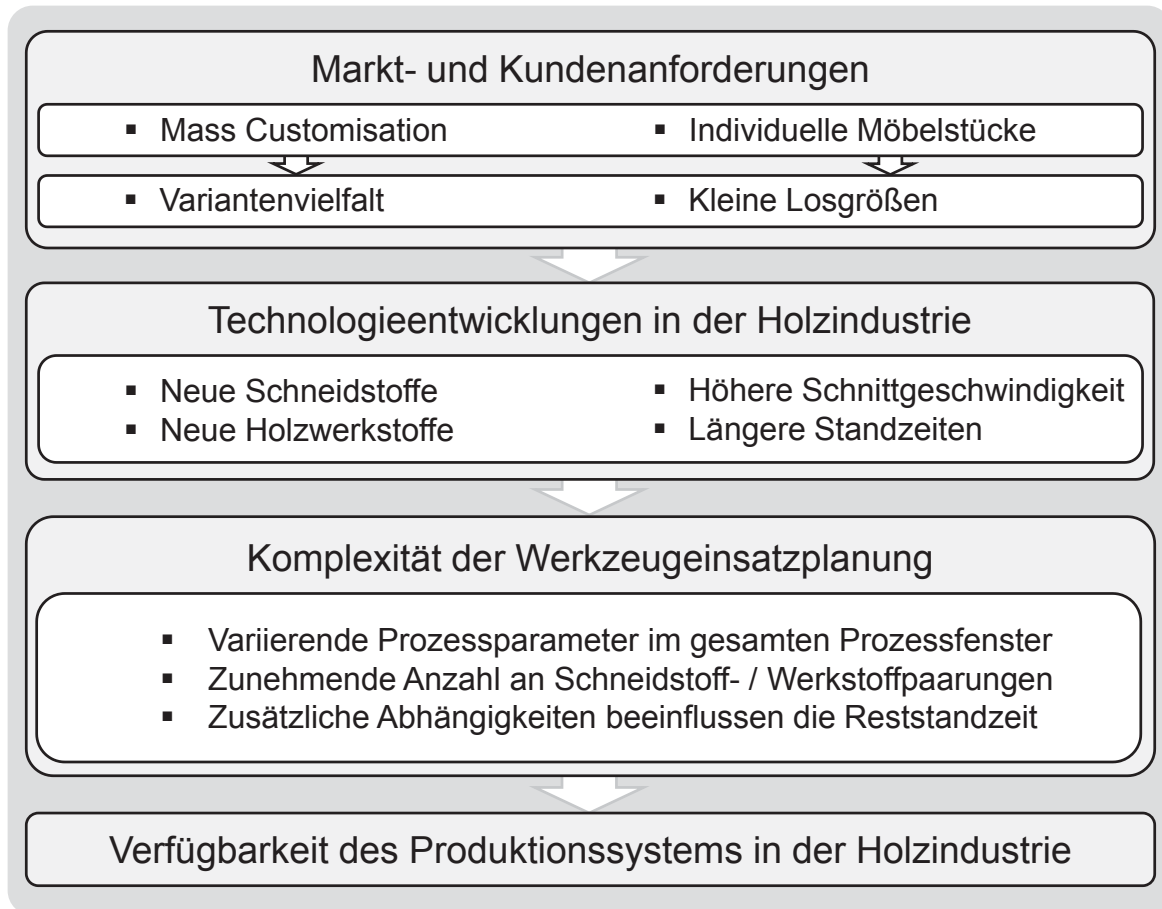


Abbildung 1.2: Ausgangssituation in der Holzverarbeitung

Vor dem Hintergrund der beschriebenen marktgetriebenen Trends und technischen Entwicklungen ergibt sich eine immer komplexere Aufgabenstellung hinsichtlich der Planung des Werkzeugeinsatzes. Die Verbesserung des Werkzeugeinsatzes zählt zu den Voraussetzungen für die Erhöhung der Verfügbarkeit des Produktionssystems (VDI 3423:2011). Infolge des Ausreizens der Werkzeugeinsatzgrenze können sowohl Nebenzeiten reduziert– beispielsweise durch das Vermeiden von Stillstandzeit – als auch die Standzeiten gesteigert werden. Diese Grenze, auch Standvermögen genannt, ist zunehmend aufwändiger zu ermitteln, da kleinere Losgrößen gefertigt werden und diesen kleinen Fertigungsaufträgen jeweils unterschiedliche zu bearbeitende Bauteile und Werkstoffe zugrunde liegen. Im Folgenden wird ein Überblick über die Holzwerkstoffe, die holzverarbeitende Industrie und die Holzbearbeitungsprozesse in der Möbelfertigung gegeben.

1.1.1 Holzwerkstoffe

Die Holzwerkstoffindustrie als Teil des holzbearbeitenden Gewerbes umfasst alle Werkstoffe, die durch Zerkleinern von Holz und anschließendem Zusammenfügen der Strukturelemente erzeugt werden. Holzwerkstoffe lassen sich in fünf verschiedene Gruppen einteilen, siehe Abbildung 1.3. Es wird unterschieden nach den Werkstoffen Vollholz, Furnier, Späne, Fasern und Verbundholz.

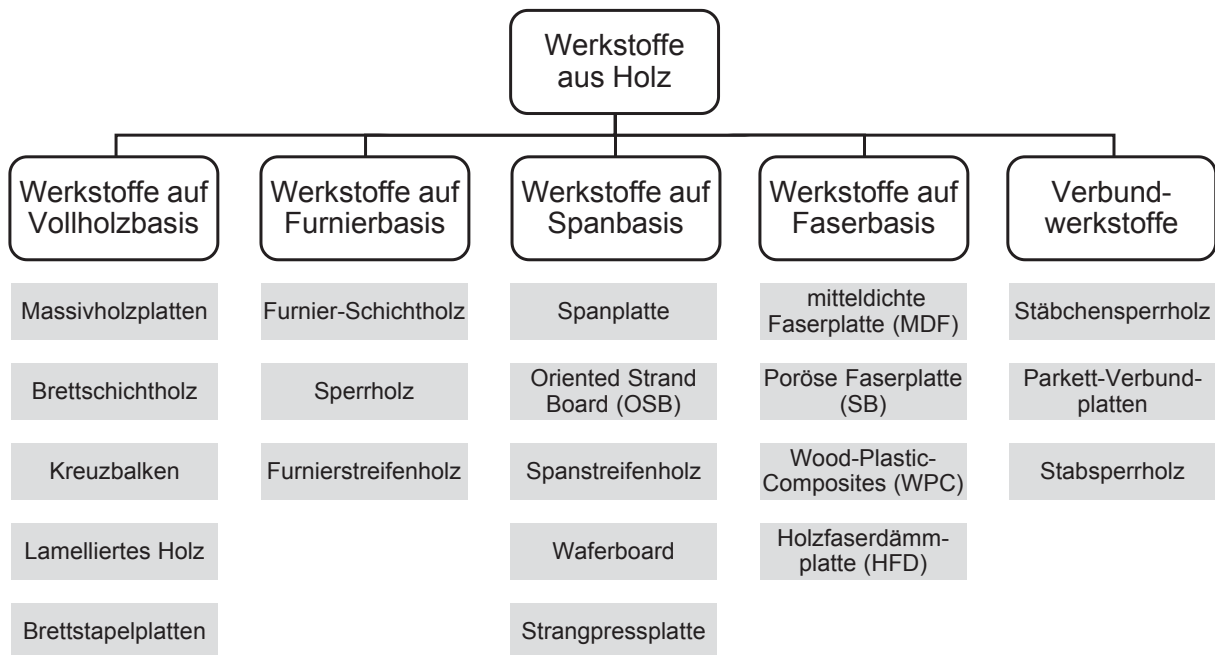


Abbildung 1.3: Gliederung der Holzwerkstoffe (vgl. Dunky et al. 2002)

Die Gruppe der *Werkstoffe auf Faserbasis* umfasst Werkstoffe, die aus herausgelösten Holzfasern aufgebaut sind. Die mitteldichte Faserplatte (engl. *medium-density fibreboard*; MDF), auf deren Bearbeitung der Fokus dieser Arbeit liegt, ist der bedeutendste Vertreter der Holzwerkstoffe und entwickelt sich gerade zum Standardwerkstoff in der Möbelfertigung.

In der Vergangenheit wurden hauptsächlich Laubhölzer zur Möbelfertigung verwendet. Nadelhölzer wie Kiefer und Fichte galten als ungeeignet. Dies hat sich zum Gegenteil gewandelt, da Nadelhölzer zu MDF verarbeitet werden können. Durch gleiche Materialeigenschaften in Längs- und Querrichtung, eine gleichmäßige, homogene Werkstoffqualität und feste Kanten gibt es keine Einschränkungen für die Möbelfertigung aus nadelholzbasierter MDF-Platten.

MDF wird nach dem Trockenverfahren hergestellt und zeichnet sich durch Isotropie und homogene Dichteverteilung aus, die in der DIN EN 316 (DIN EN 316:2009) festgelegt wurde. Ein weiterer großer Vorteil gegenüber anderen Holzwerkstoffen ist die Formstabilität. Diese entsteht durch einen geringen Feuchtegehalt von 6-10%, wodurch die Expansion und die Kontraktion stark begrenzt werden.

Tabelle 1.1: Dichteklassen der Faserplatten

Bezeichnung	Abkürzung	Dichtebereich
Hochdichte Faserplatte	HDF	> 800 kg/m ³
Mitteldichte Faserplatte	MDF	> 650 kg/m ³ bis < 800 kg/m ³
Leichte Faserplatte	L-MDF	< 650 kg/m ³
Ultraleichte Faserplatte	UL-MDF	< 550 kg/m ³

In Tabelle 1.1 sind die unterschiedlichen Dichtebereiche von genormten Faserplatten aufgelistet (DIN EN 622:2003). Die am häufigsten produzierte Variante ist die mitteldichte Faserplatte.

Produktionsvolumen von Medium-density fibreboards

Die Abbildung 1.4 zeigt das absolute Produktionsvolumen aller Holzwerkstoffe. Die MDF-Produktion macht mit ihren 93,5 Millionen Kubikmetern einen Anteil von etwa 24 % an allen weltweit produzierten Holzwerkstoffen aus.

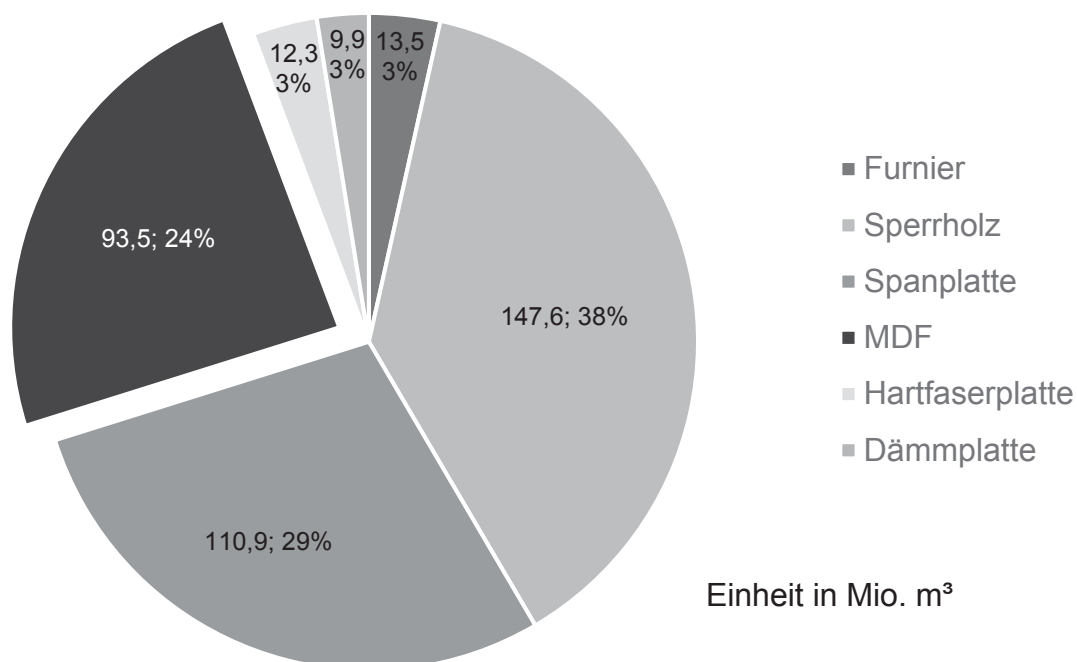


Abbildung 1.4: Produktionsaufkommen der Holzwerkstoffe (UN 2016)

Abbildung 1.5 veranschaulicht die weltweite MDF-Plattenproduktion und deren Zunahme. Deutlich ist das Wachstum in Asien, das auf das stetig steigende Produktionsvolumen in China zurückzuführen ist. MDF-Massenfertigung begann in den 1980er Jahren. Eine globale Sättigung ist noch nicht erkennbar.

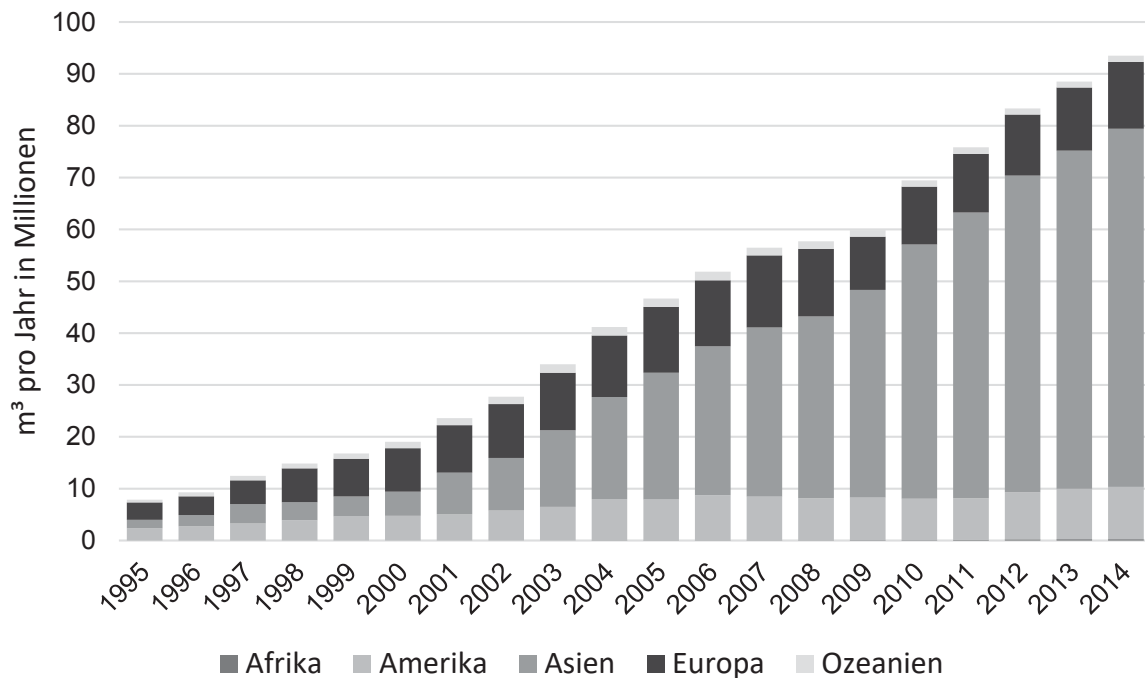



Abbildung 1.5: Globales Produktionsvolumen von Medium-density fibreboards (UN 2016)

1.1.2 Holzverarbeitende Industrie


Der holzverarbeitenden Industrie vorgelagerte Branchen sind die Sägeindustrie und die Holzwerkstoffindustrie. Untergliedert wird sie nach ihren Erzeugnissen. Die maßgeblichen Gruppen sind hier Fenster-, Türen- und Fassadenindustrie sowie Möbel-, Treppen-, Küchen- und Ladenbauindustrie und Messe- sowie Innenausbau. Die holzverarbeitende Industrie weist im Vergleich zu anderen Branchen Besonderheiten auf. Eine davon ist die Größe und Vielfältigkeit der Betriebe. Im ersten Halbjahr 2016 lagen die Umsätze der deutschen Möbelindustrie bei 8,9 Mrd. Euro und ihr gehörten bundesweit ca. 500 Betriebe an (VDM 2017), deren Vielfalt von kleinen Schreinereien bis hin zu spezialisierten Serienherstellern reicht.

Tabelle 1.2: Einordnung in Merkmale und Ausprägungen einer Fabrik

Merkmale	Ausprägung			
Mitarbeiteranzahl	< 50	50-150	> 150	
Maschinenanzahl	< 10		> 10	
Produktionsstufen	Einstufige		Mehrstufige	
Fertigungsart	Einzel-fertigung	Serien-fertigung	Massen-fertigung	
Produktvielfalt	nach Kunden-wunsch	viele Varianten	wenige Varianten	nur Serie
Automatisierungsgrad	Manuell	teilweise automatisiert	hoch automatisiert	
Komplexität	Einzelteil	Bauelement	Baugruppe	
Steuerung	Werkstatt-fertigung	Inselfertigung	Fließfertigung	
Wandlungsfähigkeit	hoch		niedrig	



Auftragsfertiger
z.B.: Schreiner



Serienfertiger
z.B.: Küchenhersteller

In Tabelle 1.2 sind die unterschiedlichen Ausprägungen der Fabriken für diese beiden Fälle aufgezeigt. Die Merkmale und Ausprägungen der Fabrik (vgl. Bauernhansl 2016) zeigen die organisatorischen und technischen Strukturen der beiden Extremtypen Schreinerei und Großserienküchenfertiger.

1.1.3 Holzverarbeitungsprozesse in der Möbelfertigung

Die Standardabläufe in der industriellen Möbelfertigung beginnen mit der Anlieferung der Rohteilplatten und enden mit einem versandfertigen Bausatz des Möbelstückes (vgl. Döhl et al. 1989).



Abbildung 1.6: Arbeitsschrittfolge in der Möbelfertigung

Die Abbildung 1.6 zeigt die Reihenfolge der Prozessschritte. Zu Beginn werden die im Lager befindlichen und für den Auftrag notwendigen Teile kommissioniert. Anschließend folgt das Zerlegen der Platten auf Plattenaufteilmaschinen in kleinere, meist rechtwinklige Halbfabrikate. Diese Halbfabrikate werden auf Plattenbearbeitungsmaschinen auf die Endmaße gebracht und Bohrungen sowie Taschen eingebracht. Anschließend erfolgt das Bekleben der Kanten auf Kantenanleimmaschinen. Die fertigen Platten werden mit anderen Bauteilen zu Sets zusammengestellt und nach bestandener Qualitätsprüfung zum Versand bereitgestellt.

Im Arbeitsschritt *Plattenbearbeitung* nimmt die Werkzeugeinsatzplanung eine essenzielle Rolle ein. Bei fehlerhafter Planung kann es, beispielsweise durch Werkzeugbruch, zu längeren Stillständen kommen. Bei Stillständen wird die getaktete Kette der Prozesse unterbrochen und ein simultanes Ausführen der vorgelagerten und nachgelagerten Prozesse in der Fertigungsabfolge ist nicht mehr gegeben. Es folgen weitere Stillstände von anderen Prozessen.

1.2 Problemstellung

Der Werkzeugeinsatz für die Holzbearbeitung umfasst die Planung und den operativen Einsatz des Werkzeuges. Die Planung gliedert sich in die Fertigungsplanung, die im Produktionsplanungs- und Steuerungssystem realisiert wird und die Werkzeugeinsatzplanung, die durch die Werkzeugverwaltung umgesetzt wird. In der Werkzeugeinsatzplanung wird eine Bearbeitung für einen bereits festgelegten Werkzeugtyp einem physikalischen Einzelwerkzeug zugewiesen, siehe Abbildung 1.7.

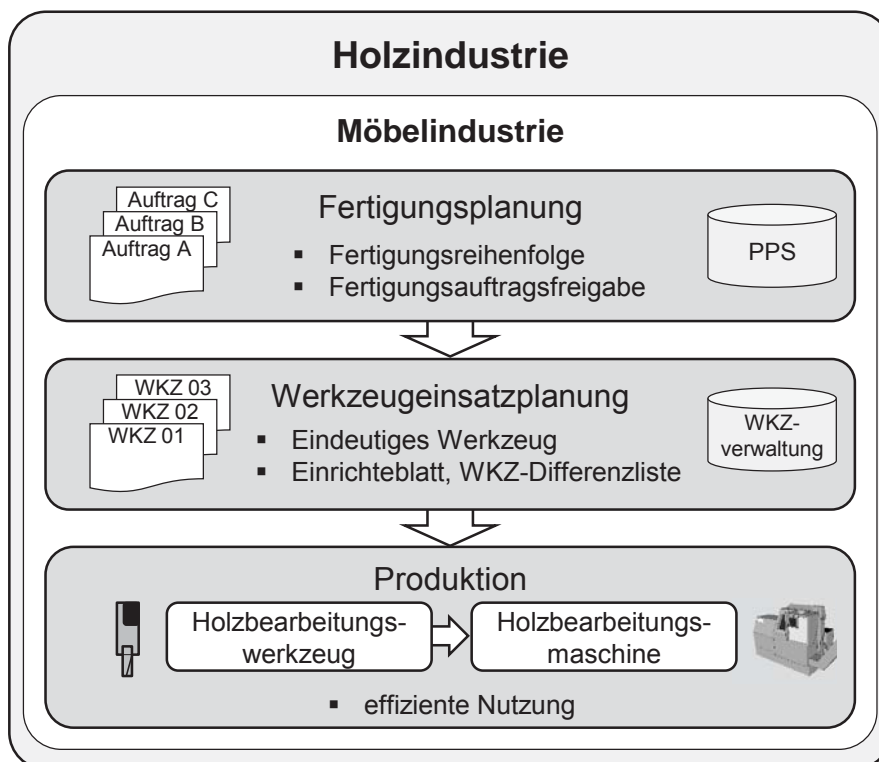


Abbildung 1.7: Anwendungsszenario der effizienten Werkzeugnutzung

Hierbei ist die Entscheidung zu treffen, welches baugleiche Schwesterwerkzeug eingesetzt werden soll und wann es die Werkzeugeinsatzgrenze beim zu planenden Auftrag überschreiten wird. Diese Entscheidung wird getroffen basierend auf der Einsatzhistorie und der Summe des Schnittweges des zu bearbeitenden Fertigungsauftrags.

Um den genauen Zustand des Werkzeuges beziffern zu können ist die Einsatzhistorie über alle vergangenen Werkzeugeinsätze zu erfassen und zu evaluieren. Ausgehend vom ermittelten aktuellen Zustand werden die kommenden Einsätze analysiert. Hierbei darf die Summe des Standweges des zu bearbeitenden Fertigungsauftrags die

verbleibende Standzeit des Werkzeuges bei der gegebenen Holzwerkstoff-/Schneidstoffpaarung nicht überschreiten, siehe Abbildung 1.8.

Im Folgenden wird die Datengrundlage dieser für die Planung notwendigen Größen betrachtet. Grundsätzlich gibt es mehrere Möglichkeiten, den Zustand eines Werkzeuges zu beurteilen. Eine Möglichkeit ist die Sichtprüfung durch den Werker. Diese Prüfung führt aufgrund der naturgemäßen Subjektivität zu einer großen Streuung der Prüfergebnisse, da sie keine Wiederholgenauigkeit aufweist. Eine andere Möglichkeit bezieht sich auf die Einsatzhistorie des Werkzeuges.

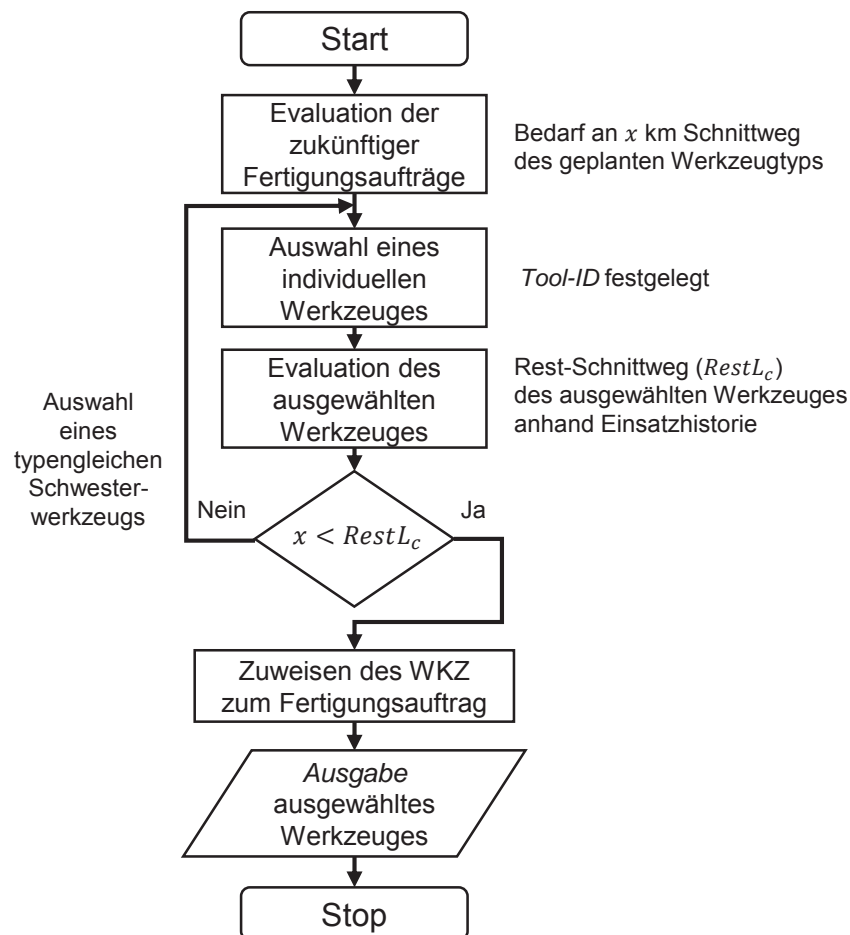


Abbildung 1.8: Auswahlprozess des einzusetzenden Werkzeuges

Diese kann nur beurteilt werden, wenn die Fertigungsaufträge aller Einsätze und die Zerspanungsleistung des Werkzeuges innerhalb eines Fertigungsauftrages bekannt sind. Solche Auswertungen liegen in der Regel unzureichend vor.

Der Reststandweg eines Werkzeuges ist der Schnittweg, ausgehend vom evaluierten Zustand, der bei der vorliegenden Werkstoff-/Schneidstoffpaarung zurückgelegt werden kann, bis ein definierter Werkzeuggrenzwert erreicht wird. Ab diesem Werk-

zeuggrenzwert ist eine Bearbeitung gemäß den Qualitätskriterien nicht mehr gewährleistet. Dieser Zusammenhang verdeutlicht, wo die Schwierigkeit hinsichtlich der Aussagefähigkeit des Erreichens des Werkzeuggrenzwerts liegt: Es sind sowohl bei der Erfassung der Einsatzhistorie als auch bei der Ermittlung der gültigen Wirkzusammenhänge für den Verschleißfortschritt Informationslücken festzustellen.

Der planerischen Unsicherheit beim Festlegen des Werkzeugeinsatzes und damit einhergehend des Werkzeugwechselfensters maschinenseitig kann nur begegnet werden, wenn der tatsächlich anfallende Verschleißfortschritt bekannt ist. Auf diese Weise ist ein präventives Wechseln der Werkzeuge vor Standzeitende zu vermeiden und eine Optimierung der Standmenge zu erreichen.

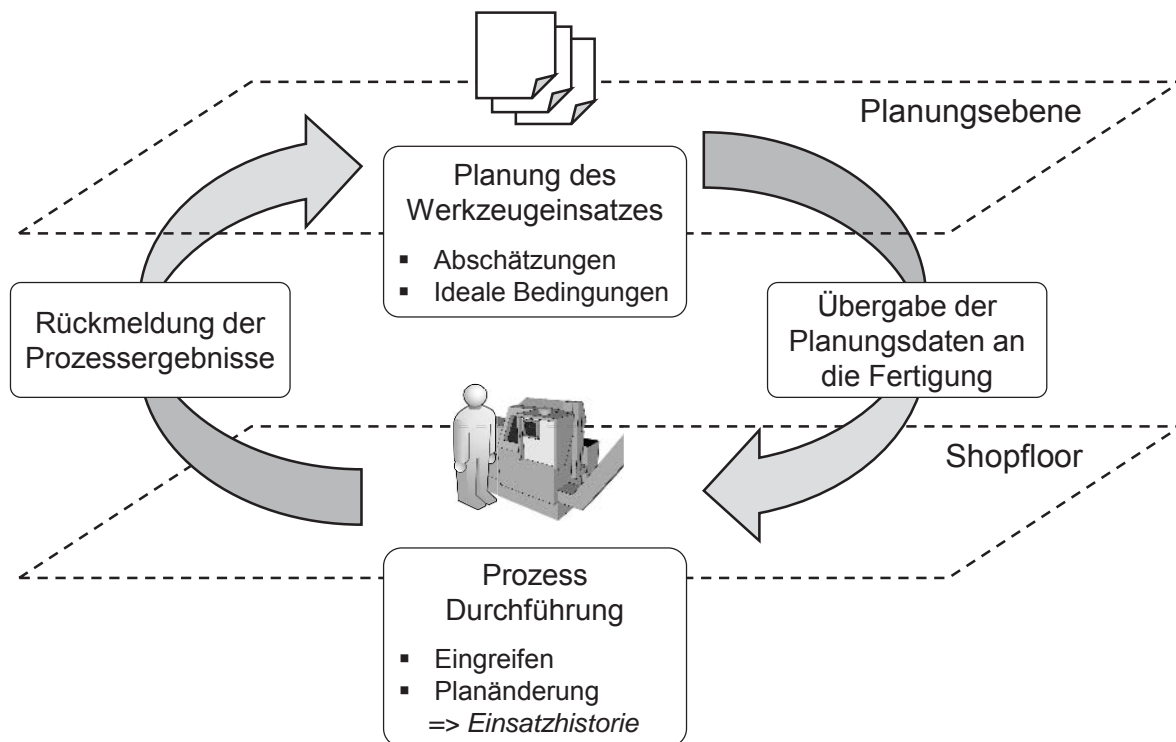


Abbildung 1.9: Charakteristische Abläufe

Abbildung 1.9 veranschaulicht die charakteristischen Abläufe mit der dort ausgeführten Planung, basierend auf Annahmen und idealen Bedingungen sowie die Shopfloor-Ebene mit dem durchgeführten Prozess und die dort entstehenden Prozessparameter mit Planabweichungen.

Diese Abweichungen entstehen aufgrund der Funktionsweise der Werkzeugmaschinensteuerung. Die Steuerung selbst führt den Prozess nach einem vorher festgelegten Ablauf aus. Die Kenntnis über Eingriffsbedingungen und die daraus resultierenden Kräfte des Werkzeuges ist der Werkzeugsteuerung nur aus Planungssicht

bekannt. Die tatsächlich im Prozess auftretenden Größen weichen von dem im Vorfeld erstellten Plan ab. Abbildung 1.10 schafft eine Übersicht der Gründe für Abweichungen der Ist-Daten gegenüber den Planungsdaten. Abweichungen können von allen beteiligten Prozessakteuren stammen und führen zu einer vom Plan abweichenden Anzahl an Schnitten bei vom Plan abweichenden Prozessgrößen und damit zum früheren oder späteren Eintreten eines kritischen Verschleißzustandes.

Das System Werkzeugeinsatz für die Holzbearbeitung lässt sich durch die Prozessakteure Maschinenbediener, Werkzeugmaschine, Werkstoff und Werkzeugsystem kennzeichnen.

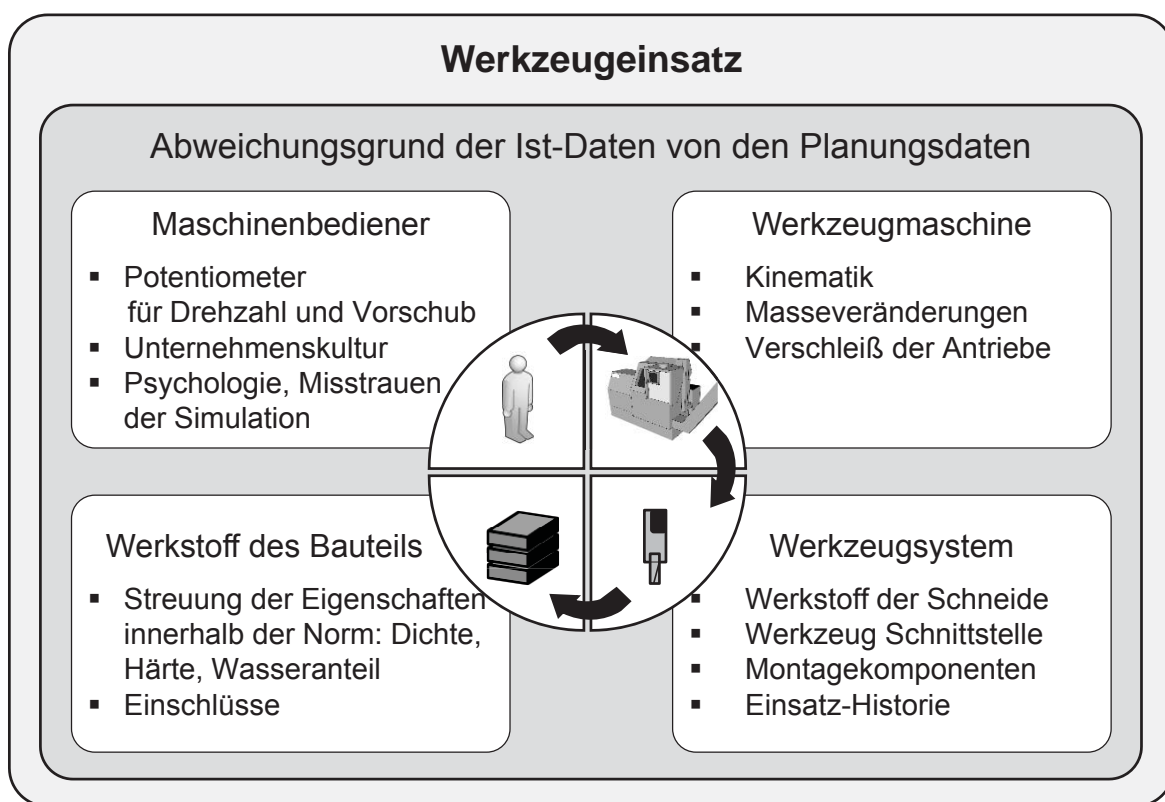


Abbildung 1.10: Gründe der Abweichungen der Ist-Daten von den Planungsdaten

Die durch den Maschinenbediener hervorgerufenen Abweichungen beziehen sich auf die manuellen Eingriffe in die Regelung der Steuerung. Die Vorgaben des Vorschubs und die Drehzahlregelungen können durch Potentiometer überschrieben und somit beeinflusst werden. Diese Funktion, die das Regeln auf Sicht erlaubt, war ursprünglich notwendig, um Bauteile in ihrer erstmaligen Fertigung einzufahren. Unter Verwendung von modernen Simulationstechniken ist die Funktion nicht mehr erforderlich. Gründe für die Anwendung des manuellen Regels sind der Grad des Vertrauens des Maschinenbedieners in die Simulation und vorherrschende Standardvorgehen, die in der Unternehmenskultur verankert sind.

Der Prozessakteur der Werkzeugmaschine ist in diesem Zusammenhang eine Fräsmaschine zur Holzbearbeitung. Die hervorgerufenen Abweichungen resultieren aus der individuellen Beschaffenheit der Fräsmaschine. Die Antriebseigenschaften, wie etwa der Verschleißzustand, die gesetzten Maschinenkonstanten und die Masseveränderungen (Aufbauten wie schwere Bauteile, Spannsysteme etc.) sind hierbei die Hauptursachen für Abweichungen.

Die durch den Holzwerkstoff der Bauteile hervorgerufenen Abweichungen sind beispielsweise Streuungen der Materialkennwerte innerhalb der Werkstoffnorm. Hierzu gehören Anteile der verschiedenen Bestandteile (Fasern, Binder etc.) und daraus resultierende Werkstoffeigenschaften wie Dichte, Feuchtegehalt, Härte etc. Ein weiterer Grund für Deviationen sind Einschlüsse, beispielsweise Silikate.

Abweichungen der Plan- und Prozessdaten in Bezug auf das Werkzeugsystem sind unter anderem die Werkzeugaufnahme, die verbauten Montagekomponenten, die Wuchtgüte der Komponenten, der Werkstoff der Schneide und die Einsatzhistorie.

Die genannten Abweichungen ausreichend zu erfassen, ist Voraussetzung zum Erstellen einer Datenbasis, die als Ausgang für eine Prognose des Werkzeugverbrauchs in Form von Verschleiß dient. Alle genannten Abweichungen ändern die Prozess-Parameter. Diese Prozessparameter werden daher auch Ist-Daten genannt, um die Abgrenzung gegenüber den geplanten Prozessparametern zu verdeutlichen.

Die industrielle Wissenslücke zeigt sich durch wenig vorhersagbare Abweichungen im Ist-Prozess (Ist zu Plan), die in der Werkzeugeinsatzplanung Verschwendungen bewirken. Diese Verschwendungen zeigen sich durch Plankostenüberschreitung infolge vorzeitiger Werkzeugwechsel noch einsatzfähiger Werkzeuge. Dies gilt sowohl für neue als auch für bereits eingesetzte Werkzeuge. Wirkzusammenhänge sind für jede Schneidstoff- und Werkstoffpaarung über das gesamte Prozessfenster der Prozessparameter unzureichend bekannt. Diese Wirkzusammenhänge erlauben eine fortlaufende Vorhersage des Reststandweges eines Werkzeuges sowohl in der Planungsphase als auch in der aktuellen Einsatzphase.

Diese Arbeit liefert für diese industrielle Wissenslücke einen wissenschaftlichen Beitrag.

1.3 Ziel der Arbeit

Die Konsequenzen aus der oben diskutierten Ausgangssituation führen zur Verringerung der Werkzeugauslastung. Um dieser Situation entgegenzuwirken, muss die Planungssicherheit des Werkzeugeinsatzes erhöht werden. Einer der Wege, die Planungssicherheit zu erhöhen, ist eine exakte Prognose des Zustands des Werkzeuges und des Reststandweges mithilfe des Erkennens von Wirkzusammenhängen. Um die Wirkzusammenhänge auf der Basis von Werkzeugverbrauchsdaten zu ermitteln, muss aus dem Prozess heraus gelernt werden.

Nach der Definition von *Simon* bezeichnet das Lernen in Bezug auf ein technisches System die Veränderung, mit der das System so umgestellt wird, dass die identische Aufgabe in der Zukunft effizienter und effektiver vollzogen wird (Simon 1983, S. 28).

Westkämper formulierte den Ansatz des *Industriellen Lernens* als geschlossene Regelschleife, um fortlaufend aus jedem fertiggestellten Auftrag Erkenntnisse gewinnen zu können (Westkämper 1993); (Warnecke 1995, S. 16); (Westkämper et al. 2016, S. 196), siehe Abbildung 1.11.

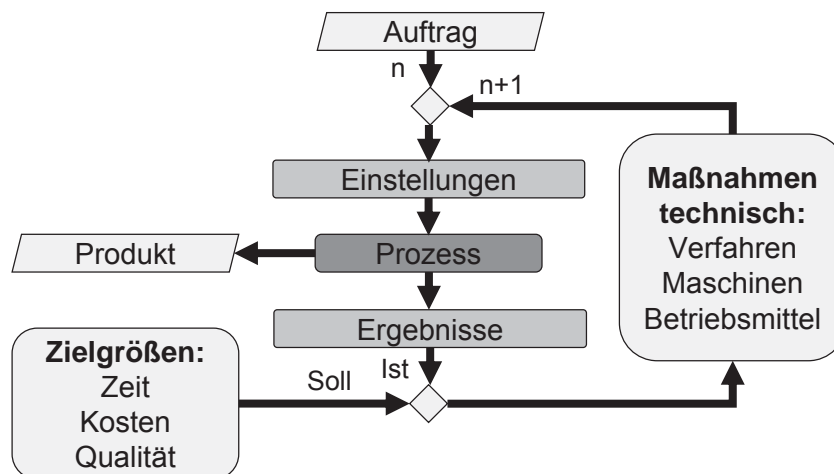


Abbildung 1.11: Ansatz des industriellen Lernens

Hieraus leitet sich das Ziel der Arbeit ab: Entwicklung eines Modells zum Erlernen von Wirkzusammenhängen zwischen Schneidstoff- und Werkstoffpaarungen bei der Holzverarbeitung. Das Erlernen soll auf Basis von online-erfassten Werkzeugmaschinen-daten erfolgen. Mit Hilfe dieser ermittelten Werkzeugverbrauchsdaten soll eine Reststandwegprognose des Werkzeuges ermöglicht werden. Hierzu ist ein nachvollziehbares Monitoring des Werkzeugeinsatzes notwendig. Das Ziel und die Teilziele lauten wie folgt:

- Modellierung der Wirkzusammenhänge zur Schaffung einer Datengrundlage für die zielkonformere Planung des Werkzeugeinsatzes in der Holzverarbeitung
 - Realistische Planung des Werkzeugwechselfensters durch Prognose der Reststandzeit
 - Erhöhung der Auslastung des Produktionssystems (Erhöhung der OEE)
 - Senkung der Ausschussrate
 - Minimierung der Rüstaufwände
- Darlegung der Anwendbarkeit des Modells
 - Plausibilität der erfassten Daten
 - Aufzeigen der einsatzabhängigen Werkzeugkosten.

Die wissenschaftlichen Herausforderungen liegen in der Modellierung des Vorgehens der Datenerfassung, der Berechnung der Zwischenergebnisse und der darauf aufbauenden Gewinnung von Verschleißdaten als Basis einer Kostenerfassung. Zu berücksichtigen sind die realen Einsatzbedingungen ebenso wie die systematische Erfassung und Verarbeitung von Prozessdaten. Dieser neue Weg der Werkzeugverschleißerfassung (Lenz et al. 2015) macht sich die Verfügbarkeit von zyklischen Daten aus Werkzeugmaschinensteuerungen zunutze. Die beschriebene Zielsetzung führt zu folgenden Forschungsfragen, die es zu beantworten gilt:

Wie ist ein Modell zum Erlernen von Wirkzusammenhängen zwischen Schneidstoff- und Werkstoffpaarungen bei der Holzverarbeitung auf Basis von online-erfassten Werkzeugmaschinen- und Verschleißdaten zu gestalten?

Die zentrale Forschungsfrage lässt sich in folgende abgegrenzten Aspekte gliedern:

1. *Welche Daten werden benötigt und wie können diese Daten erfasst werden?*

Die Beantwortung dieser Frage liefert die notwendige Basis für alle folgenden Schritte und stellt aufgrund der hochzyklischen online-Prozessparameter eine wesentliche Neuerung gegenüber bisherigen Ansätzen dar.

2. *Wie sieht die Logik der Datenverarbeitung aus, mit der anhand der Daten ein systematisches Erlernen von Verschleiß-/Qualitätsfaktoren je Schneidstoff-/Werkstoff-paarung stattfinden kann?*

Kernelemente des Modells sind die Fragen nach den Wirkzusammenhängen des physikalischen Prozessmodells und der Rechenoperation des kontinuierlichen maschinellen Lernens.

3. Wie wird die Reststandzeit anhand der Wirkzusammenhänge prognostiziert?

Nachdem die Verschleiß-/Qualitätsfaktoren verfügbar sind, stellt sich die Frage, wie fortzufahren ist, um die verbleibende Standzeit eines Werkzeuges zu prognostizieren.

4. Wie können die tatsächlich anfallenden Ist-Kosten des Werkzeugeinsatzes erfasst werden?

Diese Teilfrage lässt sich über die Erfassung und Bezifferung der Kosten bezogen auf den Werkzeugzustand.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Abbildung 1.12 verdeutlicht diese Gliederung.

Kapitel 1 erläutert die Ausgangssituation. Diese bezieht sich auf Holzwerkstoffe, die holzverarbeitende Industrie und Holzbearbeitungsprozesse in der Möbelfertigung. Die dargelegte Problemstellung handelt von der Werkzeugeinsatzplanung. Dazu gehört das Problem der mangelnden Bewertbarkeit der Werkzeugverbrauchsdaten zur Planung zukünftiger Werkzeugeinsätze. Ausgehend von der Problemstellung wird das Ziel der Arbeit in Form der zentralen Forschungsfrage mit vier Teilaspekten formuliert.

In Kapitel 2 erfolgt das Aufzeigen des aktuellen Stands der Technik zum Werkzeugeinsatz beim Fräsen. Dieser teilt sich auf in Werkzeugwesen, Tool-Monitoring und Modellbildung in der Holzverarbeitung. Gebräuchliche Tool-Monitoring Ansätze der beiden Gruppen des direkten und indirekten Tool-Monitorings werden vorgestellt. Daran anknüpfend werden verschiedene Modellierungsansätze betrachtet, die unter anderem aus diesen Monitoring-Daten Prognosen ableiten. Diese Modellierungsansätze umfassen die Standzeit nach Taylor, die Norm zur Standzeitbestimmung, die Dimensionsanalyse, die analytische Herleitung und die Fuzzylogik. Des Weiteren wird allgemein das maschinelle Lernen erläutert und die drei dominierenden Ansätze – künstliche neuronale Netze, genetische Algorithmen und Regression – vorgestellt. Relevante Anwendungen in der Holzwissenschaft sind zu den jeweiligen Ansätzen

aufgezeigt. Des Weiteren sind die Anwendung von Prognosemodellen in der Praxis sowie die Defizite des Stands der Wissenschaft und Technik dargelegt.

Kapitel 3 gibt die Grundlagen des Betrachtungs- und Gestaltungsbereichs wieder. Diese umfassen die spanende Holzbearbeitung, Holzbearbeitungswerkzeuge, Messmethoden der Qualität der Bauteile nach der Bearbeitung, relevante fertigungsnahe IT-Systeme sowie die Werkzeugkostenerfassung im Rechnungswesen.

Kapitel 4 beschreibt die Konzeption des Modells. Die Konzeption gliedert sich in die Anforderungen an das zu entwickelnde Modell, die Annahmen an den Prozess und die Umgebung dargelegt und die Voraussetzungen zur Anwendung des Modells. Am Ende des Kapitels steht der Modellansatz zur Erfüllung der identifizierten Defizite.

Das Kapitel 5 befasst sich mit der Detaillierung des Modells. Das Kapitel beginnt mit einem Überblick über das Gesamtmodell. Dieses teilt sich in Subroutinen auf – den In-Situ-Flow, der echtzeitnah abläuft, und den Post-Prozess-Ablauf. Die Erklärung der Einzelschritte der jeweiligen Abfolgen findet chronologisch statt. Das nächste Unterkapitel befasst sich mit einem Visualisierungskonzept, das eine mögliche Anordnung der gewonnenen Informationen in verschiedenen Ansichten zeigt. Des Weiteren ist die Erfassung von einsatzabhängigen Werkzeugkosten aufgezeigt. Am Ende des Kapitels folgt ein mögliches Pay-Per-Use-Abrechnungssystem für Zerspanungswerkzeuge.

Kapitel 6 behandelt die durchgeführte Implementierung des Modells. Die erfassten Daten und abgeleiteten Zwischenergebnisse werden einer Plausibilitätsprüfung unterzogen und anschließend das Gesamtmodell anhand einer Schneidstoff-/Werkstoffpaarung validiert. Die Validierung fand anhand eines Versuchsdesigns statt, das der Möbelfertigung nachempfunden ist. Das Rohmaterial bestand aus beschichteten MDF-Platten und das Versuchswerkzeugsystem aus einem Hartmetall-Oberfräser. Nach der Aufnahme der Verschleißfaktoren dieser Werkstoff-/Schneidstoffkombination konnte eine spezifische einsatzabhängige Werkzeugkostenermittlung durchgeführt werden.

Kapitel 7 gibt abschließend eine Zusammenfassung der erarbeiteten Ergebnisse und einen Ausblick auf weiterführende Forschungsthemen.

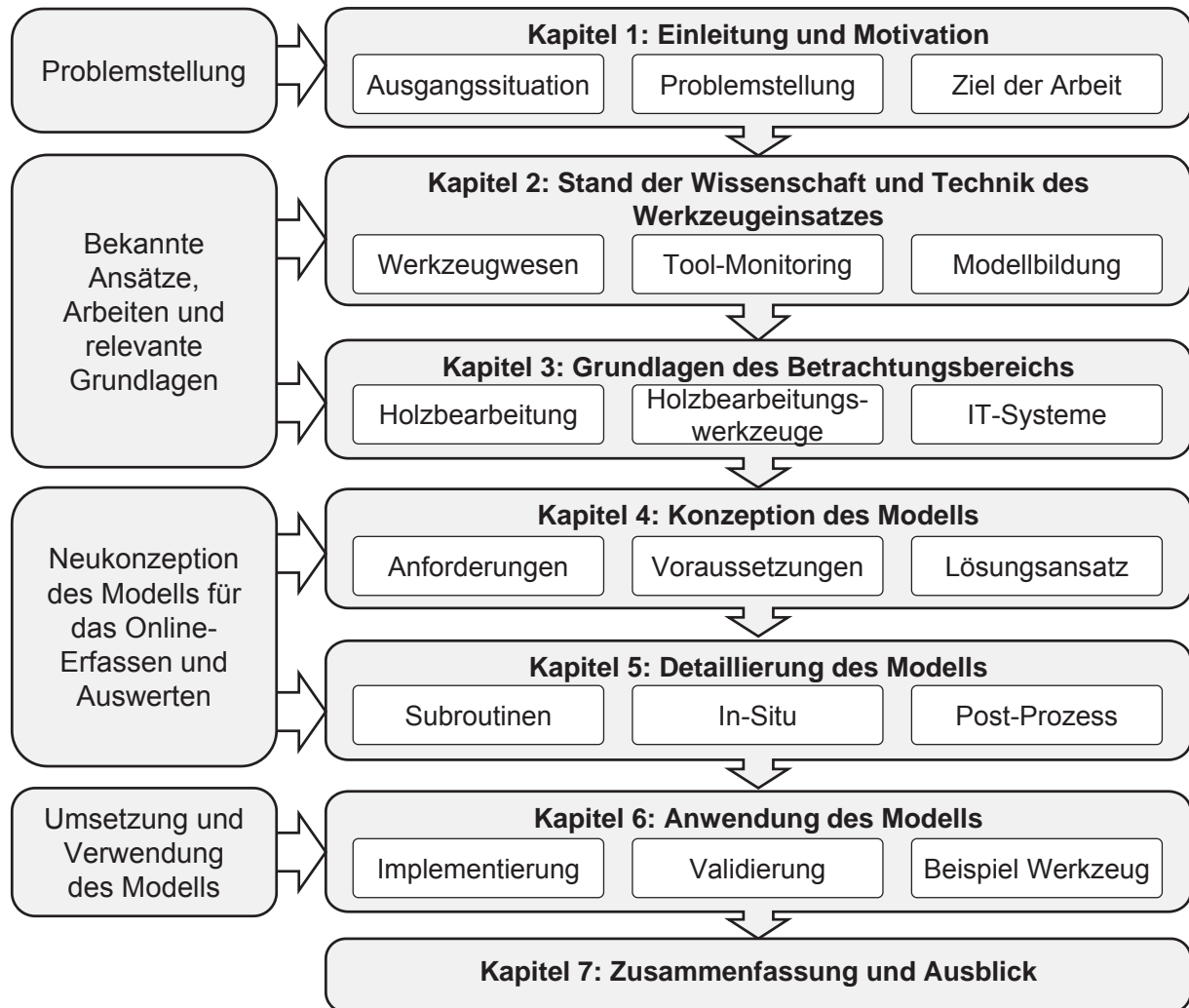


Abbildung 1.12: Aufbau der Arbeit

2 Stand der Wissenschaft und Technik des Werkzeugeinsatzes

Das Kapitel 2 stellt den aktuellen Stand der Wissenschaft in Bezug auf den Betrachtungsgegenstand des Werkzeugeinsatzes dar. Dieser gliedert sich in die Untersuchungsbereiche *Werkzeugwesen*, das *Tool-Monitoring* – Verfahren zur Prozess-Beobachtung und die *Prozessmodellbildung* zur Prognose. Es werden verschiedene Herangehensweisen der Modellbildung vorgestellt. Eine dieser Kategorien ist das maschinelle Lernen. Es folgen verschiedene Beispiele der Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens bei der Holzbearbeitungsmodellbildung. Anschließend findet eine Defizitbewertung der vorgestellten Ansätze gegenüber der Problemstellung statt.

2.1 Werkzeugwesen

Das Werkzeugwesen erfüllt in Unternehmen eine Dienstleistungsfunktion mit dem Ziel des Bereitstellens von Werkzeugen in der richtigen Menge, zum richtigen Termin und mit der richtigen Technologie (Leinhauser 1996).

Die Richtlinie (VDI 2518:1987) definiert Werkzeuge als Fertigungsmittel. Fertigungsmittel wiederum gelten als Teil der Betriebsmittel, wie Anlagen und Geräte und weitere Einrichtungen zur betrieblichen Leistungserstellung.

Das Werkzeugwesen lässt sich, in Übereinstimmung mit bekannten Definitionen (Westkämper et al. 1977; Romberg 1993; Geib 1997; Valkyser 2004), in fünf Bereiche gliedern. Diese Bereiche bestehen aus Werkzeugplanung, Werkzeugbewirtschaftung, Werkzeugdisposition, Werkzeugversorgung und Werkzeugeinsatz. Abbildung 2.1 zeigt die Bereiche des Werkzeugwesens mit ihrem Planungshorizont und ihrer Planungsgenauigkeit.

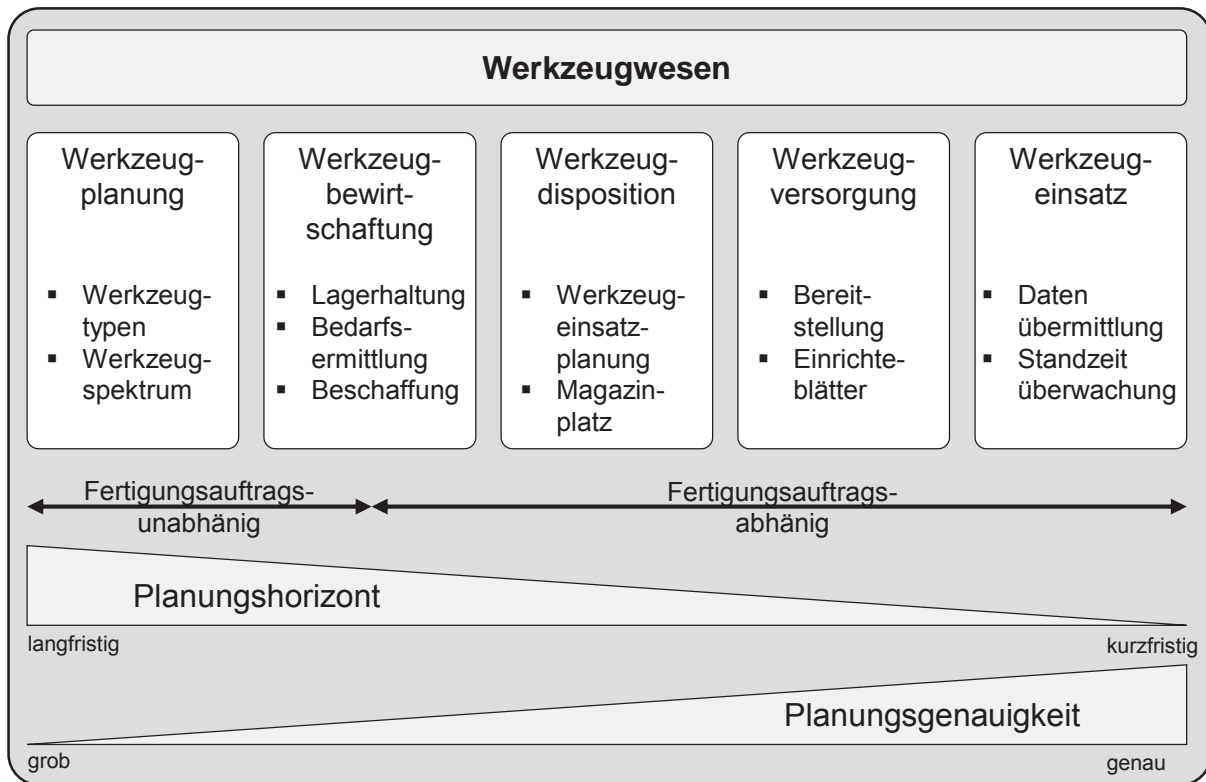


Abbildung 2.1: Das Werkzeugwesen und seine Bereiche

Die **Werkzeugplanung** legt das Werkzeugspektrum fest. Die Hauptanforderung ist das Erfüllen möglichst aller Aufgaben der Fertigung mit einer möglichst geringen Vielfalt. Der Einsatz von Sonderwerkzeuge bietet viele Vorteile. Der Hauptvorteil liegt in den kürzeren Bearbeitungszeiten für einen einzelnen Anwendungsfall. Standardwerkzeuge haben dagegen einen erheblichen Kostenvorteil und eignen sich für viele Anwendungsfälle. Der Zielkonflikt in der Werkzeugplanung liegt darin, eine höhere Verfügbarkeit an bereitgestellten Werkzeugen gewährleisten zu können und insgesamt geringere Kosten zu verursachen (Eversheim et al. 1994). Einsatzhäufigkeiten der Werkzeuge werden erfasst und selten verwendete Werkzeuge versucht zu ersetzen. Der Planungshorizont ist hierbei mehrere Monate (langfristig).

Die **Werkzeugbewirtschaftung** hat das Ziel, die entstehenden zukünftigen Bedarfsmengen zu berechnen, die hierfür notwendigen Werkzeuge zu beschaffen und das Werkzeuglager zu betreiben. Hierbei ergibt sich der Zielkonflikt der Gewährleistung einer sehr hohen Verfügbarkeit eines benötigten Werkzeugtyps und im Gegensatz dazu niedrige Lagerbestände. Der Planungshorizont beläuft sich auf einen Monat oder länger (mittel- bis langfristig).

Die **Werkzeugdisposition** hat die Aufgabe, eine auftragsbezogene Planung der Werkzeuge durchzuführen. Dies beinhaltet die Prüfung auf Verfügbarkeit des Werkzeuges, die Planung der Vorbereitung des Einsatzes der Werkzeuge und die Belegung des Werkzeugmagazinplatzes in der Maschine. Der Planungshorizont der Disposition reicht von einem Tag bis hin zu einer Woche.

Die **Werkzeugversorgung** ist zuständig für die Durchführung der in der Disposition geplanten Bereitstellung und das Einlagern. Hier werden die Einrichteblätter erstellt. Einrichteblätter sind fertige Listen für Werker als Hilfestellung beim Rüstvorgang. Die Werkzeugnummern werden hierbei mit Nummern der Magazinplätze der Werkzeugmaschine zusammengebracht. Ebenfalls werden in der Werkzeugversorgung die verschlissenen Werkzeuge ausgesondert (Romberg 1993). Es wird hierbei mit einem sehr kurzen Planungshorizont von der Dauer mehrerer Fertigungsaufträge gearbeitet.

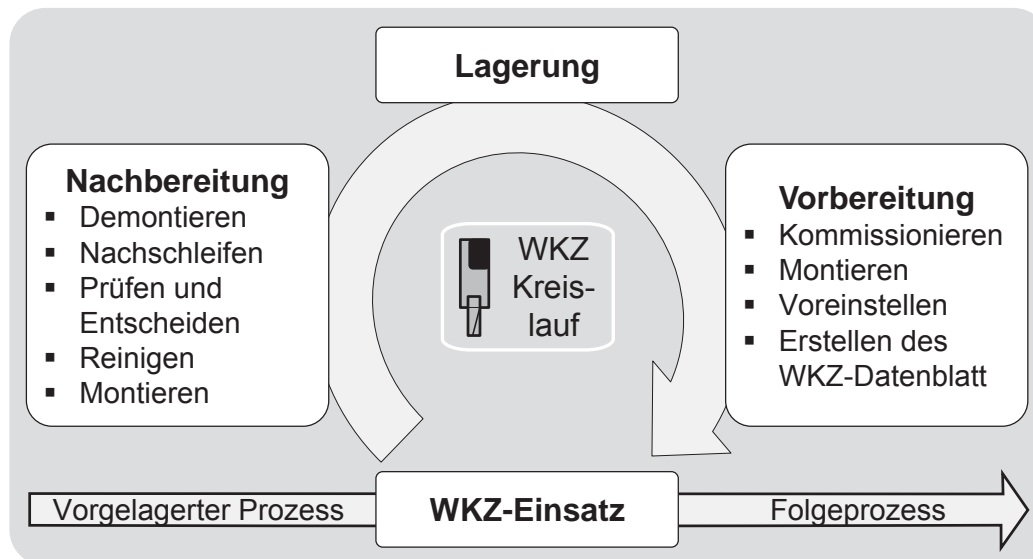


Abbildung 2.2: Allgemeiner Werkzeugkreislauf mit vier Stationen (Mumm 1999)

Der Funktionsbereich des **Werkzeugeinsatzes** umfasst die in Abbildung 2.2 dargestellten Stationen des Kreislaufes des physischen Werkzeuges. Die Stationen sind die Entnahme aus dem Lager, die Vorbereitung, der Einsatz, die Nachbereitung und die erneute Einlagerung. Die Vorbereitung besteht aus der Kommissionierung der Einzelteile, der Montage, der Voreinstellung, der Verwaltung der Werkzeugdaten und dem Weiterleiten der Werkzeugdaten samt physischen Transports. Während des Einsatzes wird die Standzeit überwacht und nach Möglichkeit beginnende Ausfälle erkannt. Die anschließende Nachbereitung besteht aus der Demontage, der Begutachtung des Werkzeuges und der Entscheidung über das weitere Vorgehen. Es wird entweder nachgeschliffen, ausgesondert oder erneut eingelagert.

2.2 Tool-Monitoring

Das Tool-Monitoring dient der Datenaufnahme und Interpretation der ermittelten Rohdaten, um auf den aktuellen Zustand des Werkzeuges zu schließen. Fallbeispiele sind größere Ausbrüche, Abbrechen des Werkzeuges oder weites Überschreiten der Werkzeugeinsatzgrenze. Der Zustand des Werkzeuges beeinflusst in hohem Maße die Erfüllung der Qualitätskriterien und die Maßgenauigkeit der Bearbeitungsoperation.

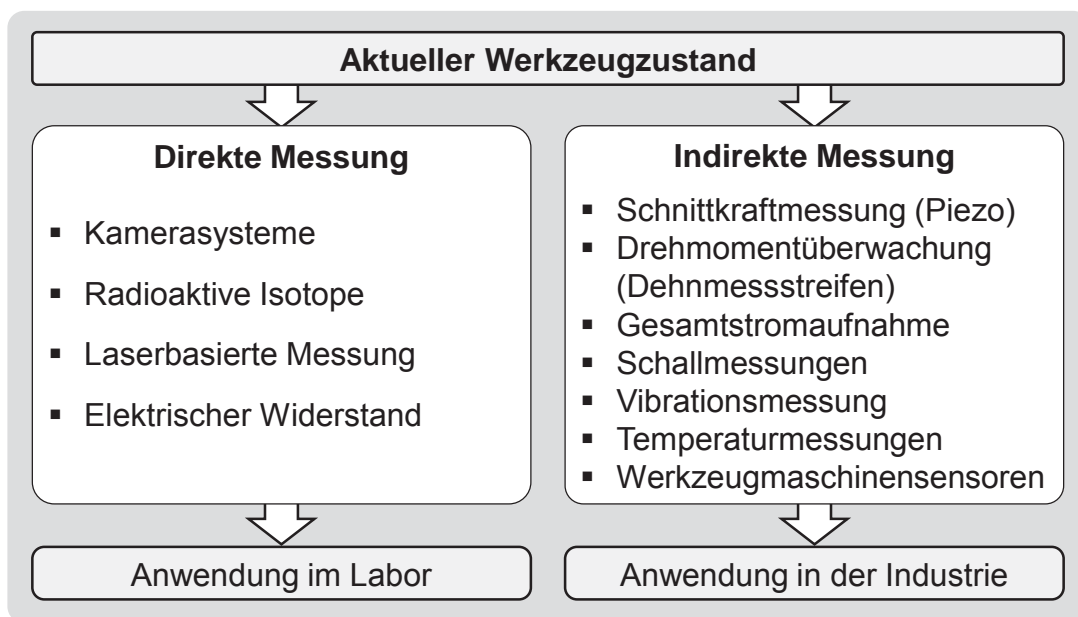


Abbildung 2.3: Verschiedene Tool-Monitoring-Ansätze

Abbildung 2.3 zeigt die verschiedenen Ansätze des Tool-Monitorings in der Einteilung gemäß der Arbeitsgruppe *CIRP STC-C Tool Condition Monitoring* (Byrne et al. 1995; Teti et al. 2010). Im Folgenden werden die Systeme nach Kategorien vorgestellt:

Ein **direktes Tool-Monitoring**-System besitzt die Fähigkeit, die Zielvariable – zum Beispiel eine Volumenabnahme des Werkzeuges – aus erster Quelle zu bestimmen. Die Zielvariable selbst wird durch das Sensorsystem bestimmt. Beispiele für Systeme dieser Art sind Kamerasysteme, radioaktive Isotope, laserbasierte Messung und Messung durch elektrischen Widerstand. Direkte Tool-Monitoring-Systeme weisen eine höhere Messgenauigkeit auf. Sie finden überwiegend in Laboruntersuchungen Verwendung. Gründe für die eingeschränkte Industrieanwendbarkeit sind unzureichende Zugänglichkeit, schlechte Beleuchtungsverhältnisse und Verschmutzungen.

Die Funktionsweise von **indirekten Tool-Monitoring-Systemen** beruht auf der Deduktion der Zielvariablen von gemessenen Prozessgrößen durch empirisch ermittelte Korrelationen. Beispiele für Systeme dieser Art sind Kraftmessungen durch piezoelektrische Sensoren, Drehmomentüberwachung z.B. durch Dehnmessstreifen, Stromaufnahmemessung einzelner Komponenten, Messung der akustischen Emissionen und Vibrationsmessungen. Die indirekte Messung weist eine geringere Genauigkeit und eine geringere Komplexität auf als die direkte Messung. Aufgrund der geringen Investition und hohen Zuverlässigkeit in der Anwendung eignet sich die indirekte Messung bei Massenproduktion (Botsaris et al. 2008).

Onlinefähige indirekte Tool-Monitoring-Systeme in der Holzwissenschaft

Onlinefähigkeit meint im Kontext des Tools-Monitorings das echtzeitnahe Erfassen und Auswerten von Prozessparametern mit kontinuierlichem Rückschluss auf den aktuellen Zustand des Werkzeuges. Onlinefähige Systeme zum Zwecke des indirekten Tools-Monitorings wurden für Durchlaufmaschinen in Großserienbetrieben entwickelt. Hierbei stehen nicht primär die Verschleißerkennung im Vordergrund, sondern Die Ausgangsgrößen des Prozesses, wie beispielsweise Oberflächengüte. Systeme dieser Art wurden vorgeschlagen und mit verschiedenen Eingangsgrößen erforscht. Beispiele hierfür sind *McKenzie* für die Online-Analyse von auftretenden Kräften (McKenzie et al. 1975), *Szwajka* für die Online-Analyse von Vibrationen (Szwajka et al. 2006) und *Yang* für die Analyse der entstehenden Oberflächengüte in Form von Rauheit (Yang et al. 2006). Um indirekte Tool-Monitoring-Systeme kalibrieren zu können, müssen Informationen über Schwellen- und Referenzwerte erhoben werden.

Tool-Monitoring-Systeme in der Praxis

In der Praxis stützen sich Tool-Monitoring-Systeme auf robuste und zuverlässige Sensoren, beispielsweise auf die Messung von Drehmomentmessung oder der Stromaufnahme. Das nachträgliche Ausrüsten einer Drehmomentüberwachung erscheint nicht zweckmäßig, da Alternativen auf Basis der Überwachung der Spindelstromaufnahme ungenauer, aber kosteneffizienter sind. Diese Systeme überwachen Schwellwerte, die entweder über die Zeit erfasst oder manuell eingegeben werden. Während der Operation werden die erfassten Größen mit dem hinterlegten Wert verglichen und entsprechende Maßnahmen ergriffen. Dieses Vorgehen ist zeitaufwändig und kann nur bei wiederkehrenden Operationen angewandt werden (O'Donnell et al. 2001).

2.3 Stand der Wissenschaft zur Modellbildung in der Holzverarbeitung

Die Modellbildung der Prozessvorgänge in der Holzverarbeitung kann mit einer Vielzahl von Ansätzen verfolgt werden. Es werden insbesondere die Ansätze der Modellbildung des Verschleißes vorgestellt. Diese Eingrenzung findet statt mit Blick auf eine Modellierung auf Wirkebene.

2.3.1 Klassische Modellbildungsansätze

Im Folgenden werden die Taylor-Gerade, die Norm zur Standzeitbestimmung, lineare Modellansätze, die analytische Herleitung, die Dimensionsanalyse, die Fuzzylogik und Ansätze des maschinellen Lernens vorgestellt.

Frederick Winslow **Taylor** fand mit der nach ihm benannten Taylor-Geraden einen Zusammenhang zwischen der resultierenden Standzeit T und verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten v_c (Taylor 1906; Fritz et al. 2015, S. 286), wobei c_1 für die theoretische Standzeit bei einer Schnittgeschwindigkeit von einem Meter pro Minute steht.

$$T = c_1 \cdot v_c^{c_2} \cdot h^{c_3} \cdot b^{c_4} \quad (\text{Paucksch et al. 2008, S. 53}) \quad (2.1)$$

Die Erweiterung dieser Standzeitbestimmung beinhaltet zusätzliche Einflussfaktoren. Gleichung 2.1 zeigt die Taylor-Gerade in der erweiterten Form mit den Faktoren der Spandicke h und der Spannungsbreite b . Hierdurch kann die durchschnittliche Lebensdauer eines Fräswerkzeuges unter konstanten Prozessparametern eingeschätzt werden. Jedoch schwanken bei normalen Fräsoptionen die Prozessparameter erheblich. Die Taylor-Gerade bildet diese unterschiedlichen Einsatzparameter nicht ab.

Die **Norm** zur Lebensdauerprüfung beim Fräsen in Bezug auf das Stirn-Umfangfräsen (ISO 8688:1989) bietet Empfehlungen zur Durchführung einer Bestimmung der Lebensdauer. Diese Empfehlungen versuchen, Bedingungen zu schaffen, die eine Vergleichbarkeit herstellen. Sie beinhalten vorgeschlagene Schnittbedingungen, Apparatur, Vorgehensweise und die Auswertung der Ergebnisse samt Darstellungsempfehlungen in Diagrammform mit statistischer Interpretation.

Ein weiterer Ansatz ist die **Dimensionsanalyse**, auch Ähnlichkeitstheorie genannt. Nach einem genau definierten Vorgehen, erstmals von Buckingham beschrieben, wird ein physikalischer Prozess in ein Modell überführt (Buckingham 1914). Das hierbei

hergeleitete Modell ist dimensionslos und verhält sich ähnlich wie der echte Prozess, wenn die dimensionslose Vergleichsgröße sich ähnlich verhält. Beispiele hierfür sind die Reynold-Zahl und Wärmeübertragung. Im Bereich der Holzverarbeitung ist *Sitkei* eine Dimensionsanalyse für den Energieaufwand beim Sägeprozess gelungen (Sitkei 2013).

Modellbildungen mit einfachem **Dreisatz** als Erklärungsversuch des Verschleißes gibt es beispielsweise von *McKenzie*, der vermutet, dass die Summe der Energie, die in das Bauteil gesteckt wird, mit dem Verschleiß korreliert. *Palitzsch* hingegen vermutet, der Verschleiß müsse mit dem zerspannten Volumen korrelieren (Klamecki 1979)

Einen weiteren Ansatz der Modellbildung bietet die **analytische Herleitung**. Bei der analytischen Herleitung werden bewiesene physikalische Zusammenhänge verwendet, um die Zielvariable zu beschreiben. *Altintas* und *Lee* haben eine analytische Beschreibung des Zerspanprozesses bei der Metallbearbeitung ausgearbeitet mit dem Ziel der Kräftevorhersage (Lee et al. 1996). *Tani* hat erfolgreich das Modell auf die Holzspannung übertragen. Das analytische Modell ist in der Lage, die Zerspankräfte bei der MDF-Bearbeitung in alle drei Richtungen abzuschätzen (Tani et al. 2007) .

Ein weiterer Ansatz der Modellbildung ist die **Fuzzylogik**. Die Fuzzylogik basiert auf den unscharfen (*fuzzy*) Mengen. Die Idee der Fuzzy-Mengen verwirft den Gedanken der scharfen Zugehörigkeit, das heißt, dass ein Element entweder vollständig zu einer Menge gehört oder gar nicht. Stattdessen sind bei Fuzzy-Mengen graduelle Zugehörigkeitsgrade zugelassen. Bei einer Fuzzy-Menge muss daher für jedes Element durch Zugehörigkeitsfunktionen angegeben werden, in welchem Grad es zur Fuzzy-Menge gehört (Michels et al. 2002). Unter Fuzzylogik fällt die Verarbeitung der unscharfen Mengen durch logische Operationen hin zu unscharfen Aussagen. Anwendung fand die Fuzzylogik in der Holzverarbeitung beispielsweise in der Regelung von Prozessparametern mit dem Ziel, den optimalen Betriebspunkt im Prozessparameterfenster des Werkzeuges für den jeweiligen Werkstoff zu ermitteln (Licher 1993).

2.3.2 Modellbildungsansätze mit maschinellem Lernen

Mit maschinellem Lernen ist das *künstliche* Generieren von Wissen aus Erfahrung gemeint. Hierbei wird aus Beispielen gelernt und anhand dieser Beispiele verallgemeinert. Es werden nicht die Beispiele erlernt, sondern Gesetzmäßigkeiten in den Trainingsdaten ermittelt.

In Abbildung 2.4 sind die grundsätzlichen Vorgehen dargestellt. Beim *überwachten Lernen* lernt der Algorithmus eine Funktion aus gegebenen Paaren von Ein- und Ausgaben. Dabei stellt während des Lernens ein „Lehrer“ den korrekten Soll-Wert bereit. *Überwachtes Lernen* eignet sich sowohl für kategoriale als auch für kontinuierliche Variablentypen. Die am meisten untersuchte und angewandte Lernaufgabe des maschinellen Lernens ist das überwachte Lernen (Wrobel et al. 2013, S. 405). Zu den Ansätzen der Algorithmen des überwachten Lernens gehören Entscheidungsbäume, Regression, Nächste-Nachbarn-Klassifikation, Neuronale Netze, Support Vector Machines und genetische Verfahren.

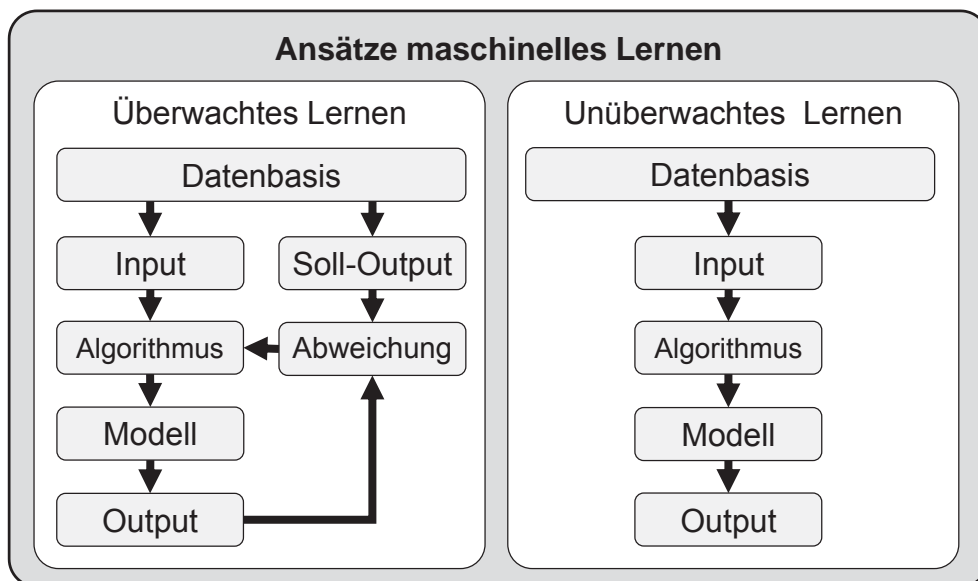


Abbildung 2.4: Überwachtes vs. unüberwachtes Lernen

Beim *unüberwachten Lernen* erzeugt der Algorithmus ein Modell, das die Eingaben beschreibt und Vorhersagen ermöglicht. Überwachtes Lernen eignet sich eher für kategoriale Variablentypen. Beispiele für diese Typen sind Gruppierungen und Muster. Dabei gibt es Clustering-Verfahren, die die Daten in mehrere Kategorien einteilen, die sich durch charakteristische Muster voneinander unterscheiden. Zu den Ansätzen der Algorithmen des unüberwachten Lernens gehören Clustering, Principal Component Analysis und Neuronale Netze.

Maschinelles Lernen wurde bei verschiedenen Prozessmodellierungen erfolgreich eingesetzt (Monostori et al. 1996). Beispiele in der Metallverarbeitung sind die Verschleißmodellierung für das Drehen (Dornfeld et al. 1990; Monostori et al. 1993; Behrend 1996; Sick 2001; D'Addona et al. 2011) und das Fräsen (Wilkinson et al. 1999; Chen et al. 2005; Palanisamy et al. 2008).

Einen Überblick über die Anwendung von maschinellem Lernen in der Holzwissenschaft bietet *Toshiro*. Er identifizierte die dominierenden Gruppen der Algorithmen in der Holzwissenschaft. Diese gliedern sich in *Neuronale Netze*, *Genetische Algorithmen* und *Regression* (Toshiro 2004).

2.3.2.1 Genetische Algorithmen

Genetische Algorithmen stellen einen der vier Teilbereiche von evolutionären Algorithmen dar. Evolutionäre Algorithmen sind gekennzeichnet durch einen stochastischen, metaheuristischen Optimierungsansatz. Die Funktionsweise der Evolution ist der biologischen natürlichen Veränderung über Generationen hinweg nachempfunden (Gerdes et al. 2004).

Genetische Algorithmen gehen zurück auf *Holland*. Er beschrieb als erster die Formulierung und den Ablauf eines genetischen Algorithmus und demonstrierte das Lösen von mathematischen Modellen mit nichtlinearen Zusammenhängen (Holland 1975).

Formuliert werden genetische Algorithmen mit Genen in Chromosomen. Die Gene bestehen aus einzelnen Bits, die invertiert, dupliziert oder gelöscht werden können. Der Ablauf eines genetischen Algorithmus kann in folgenden sechs Schritten charakterisiert werden: Der erste Schritt ist die Initialisierung. Dabei wird die erste Generation von Lösungskandidaten zufällig erzeugt. Der zweite Schritt besteht aus der Evaluation. Hier findet eine Zuweisung der Lösungskandidaten der Generation zu einem Wert entsprechend der Güte einer Fitnessfunktion statt. Der letzte Schritt ist das Durchlaufen einer Schleife, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Innerhalb dieser Schleife findet die Selektion, Rekombination, Mutation und erneut die Selektion statt.

In der Selektion werden Individuen für die Rekombination ausgewählt. Unter Rekombination ist in der Biologie die Neuordnung von genetischem Material zu verstehen. Auch die Rekombination von mehr als zwei Elterngenomen ist möglich und führt in manchen Fällen zu besseren Ergebnissen. Anschließend folgt der Schritt der Mutation. Hierbei wird eine zufällige Veränderung der Nachfahren erzwungen. Die

Schritte Evaluation und Selektion werden nun für die neue Generation durchgeführt. Ein weiterer Durchgang beginnt dann erneut mit der Selektion geeigneter Lösungskandidaten.

In der Holzwissenschaft wurde dieses Vorgehen erfolgreich angewandt, um Materialkennwerte von Verbundwerkstoffen modellieren zu können, insbesondere der Kennwert Biegesteifigkeit (Cunha et al. 1999).

Cook hat ein neuronales Netz kombiniert mit einem genetischen Algorithmus, um die Spanplattenfertigung zu modellieren. Die Modellierung hatte das Ziel, durch Prozessparametereinstellungen Eigenschaften der fertigen Spanplatte vorherzusagen (Cook et al. 2000).

Fazit zur Prozessmodellierung mit genetische Algorithmen

Genetisch Algorithmen haben den Vorteil, dass komplexe Probleme einfach implementiert werden können. Sie funktionieren gut bei der Suche nach einem globalen Optimum, da die Suche im ganzen Lösungsraum erfolgt. Genetische Algorithmen sind gut geeignet für den Einsatz bei Problemen, über deren Hintergrund wenig bekannt ist und bei denen die Menge aller Lösungen zu groß ist, um sie direkt zu durchsuchen. Die Lösungen können in Bezug auf Qualität und Geschwindigkeit optimiert werden, indem der Algorithmus beeinflusst wird, falls etwas über den Hintergrund des Problems bekannt ist. Die Nachteile genetischer Algorithmen sind die fehlende Echtzeitfähigkeit und die Unvorhersagbarkeit der Suchdauer. Dies ist besonders problematisch, wenn eine schnelle Lösung erforderlich ist.

2.3.2.2 Regression

Die Regressionsanalyse ist ein Verfahren aus der Statistik, die zum Ziel hat, Beziehungen zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen zu modellieren. Sie wird insbesondere verwendet, wenn Zusammenhänge quantitativ zu beschreiben oder Werte der abhängigen Variablen zu prognostizieren sind (Backhaus et al. 2016, S. 64).

Unter Regression ist allgemein die Vorhersage einer reellen Größe aus einer oder mehreren anderen reellen Größen zu verstehen (Gerdes et al. 2004, S. 6).

Den Begriff der *Regression* prägte Sir Francis Galton (1822 - 1911), der die Körpergröße von Söhnen in Abhängigkeit von der Körpergröße ihrer Väter untersuchte und dabei die Tendenz einer Rückkehr (engl. *regress*) zur durchschnittlichen Körpergröße feststellte.

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots) + u \quad (2.2)$$

Mathematisch kann die Beziehung zwischen den unabhängigen Variablen x_i und der abhängigen Variablen Y dargestellt werden. Die Funktion f bildet demnach die Variablen x_i ab unter Berücksichtigung der Störgröße (stochastischen Fehler) u auf die Zielgröße Y . Grundlegende gebräuchliche Regressionsverfahren sind die lineare Regression, die logistische Regression und die polynomiale Regression. Die Vorgehensweise unterteilt sich in eine Schrittfolge, bestehend aus der Modellformulierung, der Schätzung der Regressionsfunktion, der Prüfung der Regressionsfunktion, der Prüfung der Regressionskoeffizienten und der Prüfung der Modellprämissen.

In der Holzwissenschaft wurde mehrfach auf die Anwendung von Regression zurückgegriffen.

Pahlitzsch und *Sandvoß* beschrieben den Zusammenhang zwischen der Abstumpfung der Schneide mit zunehmender Schnittlänge:

$$D = c_1 L^{c_2} \quad (\text{Pahlitzsch et al. 1972}) \quad (2.3)$$

Die Koeffizienten c_1 und c_2 stehen hierbei für die Einflüsse des Werkstoffs und der Prozessgegebenheiten. Der Verschleiß in Form des Abrundungsgrades (engl. *dullness*) wird mit D angegeben und die Schnittlänge mit L (Pahlitzsch et al. 1972).

Antoine wandte Regression an, um den Einfluss der Schnittlänge auf den Stromverbrauch zu quantifizieren. Durch den Stromverbrauch wurde auf den Verschleiß geschlossen (Antoine 1963; Klamecki 1979).

Lemaster verwendete Beschleunigungssensoren, um Spindelvibrationen zu messen. Aus diesen Vibrationen wurde auf den Werkzeugzustand und die Bauteilqualität geschlossen. Das hierfür entwickelte Regressionsmodell zeigt eine Verbindung zwischen den erfassten Vibrationen und der resultierenden Qualität (*Lemaster et al. 2000*).

Fazit zur Prozessmodellierung mit Regression

Die Verwendung von Regression zur Prozessmodellierung benötigt Sachkenntnis über den Prozess, um mögliche Einflussgrößen, die auf die zu erklärende Variable einwirken, zu erkennen und zu definieren. Die wichtigen Einflussgrößen müssen im Modell enthalten sein, aber eine Erweiterung des Modells mit zusätzlichen Variablen mit schwachen Einflüssen muss nicht besser sein. Variablen sollten nur dann einbezogen werden, wenn hierfür begründete physikalische Wechselwirkungen bestehen.

Vorteile bei der Verwendung von Regression zur Prozessmodellierung sind die schnelle Berechnung des Ergebnisses, die einfache Modellierung des Zusammenspiels verschiedenster Variablen und die gute Eignung für kontinuierliches Lernen.

Nachteile sind die Schwierigkeit bei der Erfassung komplexer, nichtlinearer Zusammenhänge und die damit verbundene Aufstellung einer geeigneten Regressionsgleichung.

2.3.2.3 Künstliche Neuronale Netze

Künstliche Neuronale Netze (KNN) haben ihr Vorbild in der Biologie. Sie werden den natürlichen neuronalen Netzen gegenübergestellt, jedoch geht es bei KNN mehr um eine Abstraktion (Modellbildung) von Informationsverarbeitung und Speicherung, nicht um das Simulieren der neurobiologischen Prozesse. Die Funktionsweise ist dem Nervensystem und speziell dem Gehirn nachempfunden. Sie bestehen aus einer großen Anzahl einfacher, parallel arbeitender Einheiten, den sogenannten Neuronen (Kruse et al. 2015, S. 7).

Szwajka hat ein *in-process* Verschleißüberwachungssystem für Fräsprozesse in der Holzverarbeitung entwickelt. Als Eingangsgrößen wurden Kraftmessdaten, Vorschubgeschwindigkeit und Schnitttiefe verwendet. Die Daten wurden in einem künstlichen neuronalen Netz weiterverarbeitet. Bei der gewählten Werkstoff- und Werkzeugkombination wurde eine durchschnittliche Fehlerprädiktion von $\pm 0,037$ mm ermittelt. Als optimale Konfiguration des neuronalen Netzes erwies sich der Ansatz, zwei Layer mit je acht Neuronen zu verwenden (Szwajka et al. 2008).

Zbieć entwickelte ein Tool zur Werkzeugüberwachung und Verschleißprognostizierung. Das Ziel seines Forschungsvorhabens war es, festzustellen, inwiefern sich ein System basierend auf maschinellem Lernen für die Verschleißprognose bei der MDF-Fräsbearbeitung eignet. Als Eingangsgrößen wurden Kraftmessungen, Maschinentemperatur, Vibrationen von Spindel und Tisch sowie Stromaufnahme der Spindel und der Antriebe verwendet. Als Lernansatz wurde ein neuronales Netz mit einer Schicht (engl. *Layer*) und vier Neuronen verfolgt. Begründet wurde die Wahl von vier Neuronen mit dem Befund, dass bei höherer Anzahl lediglich unwesentliche Änderungen bemerkbar waren. Der durchschnittliche Prognosefehler lag zwischen 3 % und 10 %. Hieraus wurde der Schluss gezogen, dass das Tool mit dem Ansatz der indirekten Messung von Prozessgrößen und dem Design des neuronalen Netzes fähig ist, den Verschleiß für eine industrielle Anwendung genau genug zu prognostizieren. Dies gilt im Speziellen für die Bearbeitung von homogenen Werkstoffen wie MDF (Zbieć 2011).

Fazit zur Prozessmodellierung mit künstlichen neuronalen Netzen

Künstliche neuronale Netze bieten in Bezug auf die Prozessmodellierung Stärken und Schwächen. Zu den Stärken gehört, dass für nicht lineare Probleme gute Lösungen gefunden werden. Ebenfalls zu den Stärken der KNN gehört, dass sie bessere Ergebnisse liefern können als existierende statistische Ansätze, wenn das Problem ausreichend komplex ist. Dies ist der Fall, wenn ein Problem nicht linear ist, und es viele Eingangsgrößen gibt. Weitere Vorteile sind, dass für große Datenmengen und Eingangsgrößen sinnvolle Ergebnisse ermittelt werden können und dass kein vorangehendes Prozesswissen nötig ist. Zu den Schwächen der KNN zählt, dass keine Aussage getroffen werden kann, ob die gefundene Lösung das globale Optimum ist oder es bessere Lösungen gibt. Weitere Schwächen sind der große Bedarf an Trainingsdaten, bevor ein gutes Ergebnis berechnet werden kann und dass nicht nachvollzogen werden kann, wieso ein Netzwerk eine bestimmte Entscheidung getroffen hat. Der größte Nachteil besteht aber in der Überanpassung (engl. *overfit*). Dieser Effekt tritt ein, wenn das Modell zu viele erklärende Variablen enthält.

2.4 Anwendung von Prognosemodellen in der Praxis

Bestehende Prognosemodelle finden Anwendung in Analysen für die Entwicklung neuer Werkzeuge und zu Ausbildungszwecken. Die Modelle werden als Gleichungen mit Koeffizienten umgesetzt. Die Einflüsse werden mit statischen Faktoren auf die Prozesszielgrößen abgebildet. Die Koeffizienten sind nur in diesen Prozesseinstellungen gültig. In der Praxis unterliegen die Prozessgrößen jedoch Schwankungen aufgrund von händischen Einstellungen und manuellen Eingriffen in das NC-Programm (Gottlöber et al. 2017).

Der Stand der Technik auf Seiten der Werkzeughersteller wird geprägt von dem durch die Norm geregelten, fest vorgeschriebenes Verfahren zur Ermittlung von Standzeiten bei gleichbleibenden Parametern (ISO 8688:1989). Diese industrielle Methode der Verschleißprognose, basierend auf den Angaben der Werkzeughersteller oder den Erfahrungswerten der Werker, sind sehr ungenau (Chryssolouris et al. 1990).

Von Seiten der Hersteller von Werkzeugmaschinen für die Holzbearbeitung angebotene Techniken ermöglichen das Erfassen einer bestimmten Anzahl gefertigter Bauteile pro Werkzeug. Dieser Zähler dient als Richtwert in der Großserienfertigung, hat aber bei hoher Variantenvielfalt wenig Aussagekraft. Einige Werkzeugmaschinenhersteller bieten zusätzlich das Protokollieren der zurückgelegten Wegstrecke, basierend auf dem Werkzeugmittelpunkt, an. Der dabei erfasste Laufweg des Werkzeuges erfasst alle Bewegungen und kann nicht unterscheiden zwischen einer spanenden Bearbeitung innerhalb des Rohteiles und keiner Bearbeitung außerhalb des Rohteiles. Diese Auswertung eignet sich daher ebenfalls lediglich als grober Anhaltspunkt für wiederkehrende Bauteile.

2.5 Defizitbewertung

Das Defizit des dargelegten Standes der Wissenschaft und Technik wird aus drei Blickwinkeln heraus aufgezeigt: Aus Sicht des Tool-Monitorings, aus Sicht der Modellbildung und aus Sicht der Industrie.

Der Handlungsbedarf aus Sicht des Tool-Monitorings entsteht dadurch, dass keine der vorgestellten Ansätze eine Auswertung vorsieht, die auf den standardmäßig eingebauten Sensoren der Werkzeugmaschine basiert. Die vorgestellten Ansätze bedingen zusätzliche Hardwareinstallationen, um Daten zu generieren, die das Werkzeug überwachen.

Das Defizit bei der Modellbildung in der Holzverarbeitung offenbart sich darin, dass alle betrachteten Modellbildungsansätze vorsehen, spezielle Versuchsreihen durchzuführen. Die Gültigkeit der hinterlegten Koeffizienten ist dadurch nur im Bereich der Prozessgrößen der Versuchsreihen gegeben. Fehlprognosen entstehen, wenn diese Koeffizienten außerhalb ihrer Gültigkeit verwendet werden. Die Gewinnung der Eingangsdaten aus dem regulären betrieblichen Ablauf würde den Verschleißfortschritt über das gesamte Prozessfenster und mehrere Werkstoffe abdecken. Diesen Ansatz verfolgt keine der vorgestellten Arbeiten.

Aus Sicht der Industrie bestehen Defizite wegen einer Reihe von Gründen, die gegen eine Verwendung von Prognosemodellen im betrieblichen Alltag sprechen. Zum einen ist hier die unzureichende Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu nennen. Eine zu große Abweichung vom Modellverhalten und der Realität macht die Prognose unbrauchbar. Ein weiterer Grund sind die unbekanntenen Kontextdaten der Werkzeugmaschine über den Prozessstatus und das Rohteil.

Insgesamt ist festzustellen, dass der Bedarf nach einer allgemeingültigen Prognose, die ohne zusätzliche Hardware auskommt, wächst, da weniger in Serie produziert wird. Der Handlungsbedarf besteht darin, die Prognose unabhängig vom zu bearbeitenden Bauteil zu tätigen, basierend auf Prozessgrößen, die sich von allen Bauteilen ableiten beziehungsweise quantifizieren lassen. Das Defizit der Prozess-Beobachtung und Prognose liegt in der Allgemeingültigkeit für den Prozess der Holzwerkstoffbearbeitung und der Unabhängigkeit von Zusatzequipment.

3 Grundlagen des Betrachtungs- und Gestaltungsbereichs

In Kapitel 3 werden Grundlagen des Betrachtungs- und Gestaltungsbereichs behandelt. Diese umfassen die Holzbearbeitung, Holzbearbeitungswerkzeuge, Messmethoden bezüglich der Qualität der Bauteile nach der Bearbeitung und relevante fertigungsnahe IT-Systeme. Insbesondere wird bei den IT-Systemen auf die Werkzeugmaschinensteuerung sowie auf die Möglichkeit eingegangen, Daten aus der Steuerung zu übertragen.

3.1 Spanende Holzbearbeitung

Nach der Norm zu den Fertigungsverfahren (DIN 8580: 2003) gehören zur Gruppe *Trennen* (3. Hauptgruppe) alle Fertigungsverfahren, bei denen die Form eines Werkstückes verändert wird, indem der Zusammenhalt örtlich aufgehoben wird. Eine Kategorie dieser Gruppe ist das Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide (DIN 8589:2003), Gruppe 3.2).

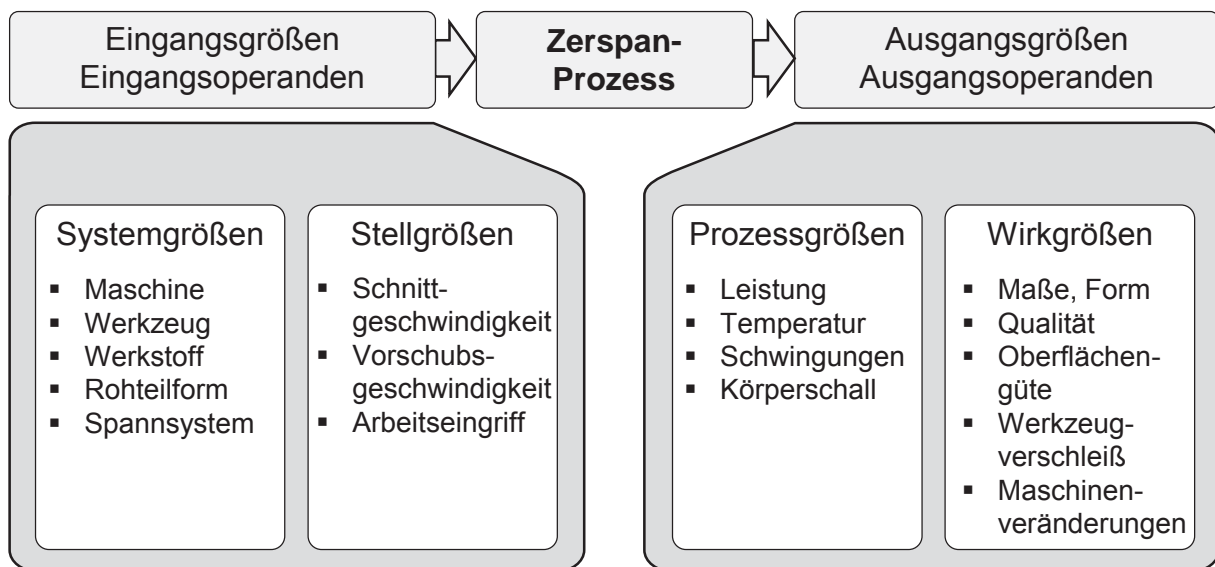


Abbildung 3.1: Eingangs- und Ausgangsgrößen des Zerspanprozesses

In Abbildung 3.1 sind die Ein- und Ausgangsgrößen des Zerspanprozesses abgebildet (vgl. Denkena et al. 2011, S. 8).

Die Eingangsgrößen gliedern sich in Systemgrößen und Stellgrößen. Systemgrößen beschreiben das System, das sich für die Dauer des Prozesses nicht beeinflussen lässt. Die Hauptgrößen sind die verwendete Maschine, das verwendete Werkzeug und der eingesetzte Werkstoff. Stellgrößen lassen sich dagegen für jedes Werkstück neu

einstellen bzw. programmieren. Die Hauptstellgrößen sind Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit und der Arbeitseingriff.

Die Eingangsgrößen werden durch den Prozess in die Ausgangsgrößen überführt. Die Ausgangsgrößen fallen ebenfalls in zwei Kategorien, die Prozessgrößen und die Wirkgrößen. Prozessgrößen werden durch den Prozess verursacht und liegen nur während des Prozesses vor. Beispiele hierfür sind Temperaturentwicklung und Schallemission. Wirkgrößen lassen sich nach dem Prozess messen. Die Hauptkriterien zur Beurteilung des Prozesses anhand der Wirkgrößen sind der Verschleiß am Werkzeug und die Qualität der Oberfläche (bzw. Kante).

Die Ein- und Ausgangsgrößen des Zerspanprozesses in der Holzbearbeitung sind identisch zu der in der Metallbearbeitung. Dennoch liegen bei der spanenden Bearbeitung von Holzwerkstoffen generell andere Randbedingungen vor. Zum einen ist Holz nicht fließfähig und zum andern neigt es zur Vorspaltung (Gottlöber 2014, S. 29). Das Fräsen ist eines dieser spanenden Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide. Weitere in der Holzbearbeitung relevante Verfahren sind Sägen, Hobeln und Bohren. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Fräsbearbeitung.

Gemäß Norm ist das Fräsen ein Spanen mit kreisförmiger, einem meist mehrzahnigen Werkzeug zugeordneter Schnittbewegung und erfolgt mit senkrecht oder auch schräg zur Drehachse des Werkzeuges verlaufender Vorschubbewegung zur Erzeugung beliebiger Werkstückoberflächen (Spur 2014).

Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten formelmäßigen Zusammenhänge in Bezug auf den Fräsprozess beschrieben. Die wichtigsten Stellgrößen sind der Arbeitseingriff a_e und die Schnittbreite a_p . Diese bilden die Spanfläche A . In Kombination mit der eingestellten Vorschubgeschwindigkeit v_f ergibt sich das Zeitspanvolumen Q , siehe Gleichung 3.1.

$$Q = A \cdot v_f = a_p \cdot a_e \cdot v_f \quad (\text{Denkena et al. 2011, S. 16}) \quad (3.1)$$

Der Zahnvorschub f_z ermittelt sich aus dem Vorschub je Umdrehung f und der Zähnezahl des Werkzeuges z . Er wird mit der Drehzahl n des Werkzeuges und ebenfalls mit der Vorschubgeschwindigkeit v_f eingestellt. Der Zusammenhang ist in Gleichung 3.2 dargelegt.

$$f_z = \frac{f}{z} = \frac{v_f}{n \cdot z} \quad (\text{Denkena et al. 2011, S. 17}) \quad (3.2)$$

Die mittlere Spandicke h_m ist Kriterium für die Güte des Schneideneingriffs. Sie sollte nicht unter ein Minimum sinken, das abhängig ist vom Werkstoff. Ansonsten wird der Span zu dünn und es entsteht eine Mischung aus Reiben und Zerspanen mit großer Wärmeentwicklung. Der Zusammenhang für die hier relevante Holzbearbeitung ist die in Gleichung 3.3 aufgezeigte mittlere Spandicke h_m .

$$h_m = 0,5 \cdot f_z \cdot \sin \varphi_e \quad (\text{Tröger et al. 2015, S. 89}) \quad (3.3)$$

Sie berechnet sich aus dem Eingriffswinkel φ_e und dem Zahnvorschub f_z . Der Spankörperform ähnelt der Form eines *Kommas*.

Zerspanprozess Nesting:

Das Nesting-Prinzip ist eine Form der Bearbeitungen von Plattenwerkstücken aus einer Rohplatte in Kombination mit einem verschachtelten Verschnitt der Platte zu unterschiedlichen Bauteilen. Bekannte Einsatzgebiete sind zum Beispiel die Bearbeitung von Spanplatten und MDF, aber auch Kunststoff-, Brandschutz-, Hartfaser-, Waben- und Leichtbauplatten. Der Fokus liegt hier auf der optimalen Materialausnutzung. Für Nesting spricht die Integration von mehreren Prozessschritten wie das Aufteilen der Platten, das Bearbeiten auf Endmaß der Außenmaße und das Bohren/Aussparen von Taschen für Beschläge. Ein weiterer großer Vorteil ist die hohe Maßgenauigkeit, da kein erneutes Aufspannen der Platte notwendig ist.

Der an Bedeutung zunehmende Nesting-Prozess mit häufigen Richtungswechsel und jeweils neu gesetzten Bauteilen ist prädestiniert für eine schnittwegbasierte Auswertung und liegt daher im Fokus dieser Arbeit.

3.2 Holzbearbeitungswerkzeuge

Holzbearbeitungswerkzeuge lassen sich nach der Norm für Maschinenwerkzeuge zur Holzbearbeitung (DIN EN 847:2013) in drei Gruppen einordnen: einteilige Werkzeuge, Verbundwerkzeuge und zusammengesetzte Werkzeuge. Einteilige Werkzeuge sind aus einem Rohteil gefertigt. Der verwendete Werkstoff ist hierbei meist Hartmetall. Verbundwerkzeuge haben zwei Bestandteile. Zum einen den Tragkörper aus leichtem, kostengünstigem Material und zum anderen den Schneidkörper, der aus einem speziellen Schneidstoff gefertigt und mit dem Tragkörper durch Kleben oder Löten verbunden ist. Das zusammengesetzte Werkzeug zeichnet sich durch Spannelemente aus, die Schneidelemente bzw. Schneidplatten auf den Grundkörper lösbar montieren lassen.

Die dominierende Verbindung des Werkzeuges mit der Maschine ist die Hohlchaftkegel-(HSK)-Werkzeugaufnahme. DIN 69893 legt Durchmessergrößen und Ausführungsformen fest (DIN 69882:2005). Dieser Werkzeugaufnahmetyp zeichnet sich aus durch hohe Steifigkeit, hervorragende Wechselgenauigkeit und Eignung für hohe Drehzahlen.

Werkzeugtypen innerhalb dieser Gruppen unterscheiden sich stark nach dem Anwendungsbereich. Daher lassen sie sich nach den zu bearbeitenden Produkten einteilen. Bekannte Gruppierungen sind hierbei Möbelfertigung, Türenherstellung, Fensterrahmenbearbeitung und Fußbödenherstellung. Allgemein ist ein Trend hin zu anwendungsoptimierten Sonderwerkzeugen für die Holzbearbeitung zu beobachten.

3.2.1 Schneidstoffe in der Holzbearbeitung

Die Anzahl der verschiedenen, verfügbaren und in großer Menge hergestellten Schneidstoffe und Beschichtungen erhöht sich (Enssle 2008). Ein Schneidstoff lässt sich beschreiben durch seine Materialeigenschaften: Härte, Druckfestigkeit, Zähigkeit und Biegefestigkeit. Grundsätzlich gilt: Mit steigender Verschleißfestigkeit des Schneidstoffes nimmt die Biegebruchfestigkeit ab. Das heißt, die Schneidstoffe werden spröder mit zunehmender Härte. Umgekehrt sind Schneidstoffe mit geringerer Härte elastischer. Die beiden Eigenschaften sind je nach Anwendung für den Zerspanprozess besser geeignet.

Die Schneidstoffe gliedern sich in Werkzeugstähle, Hochleistungs- und Schnellarbeitsstähle (HSS), Hartmetalle, Schneidkeramik und Diamant (Westkämper et al. 2010, S. 124). Abbildung 3.2 zeigt die Einordnung der vier Hauptschneidstoffgruppen zu den konträren Materialeigenschaften.

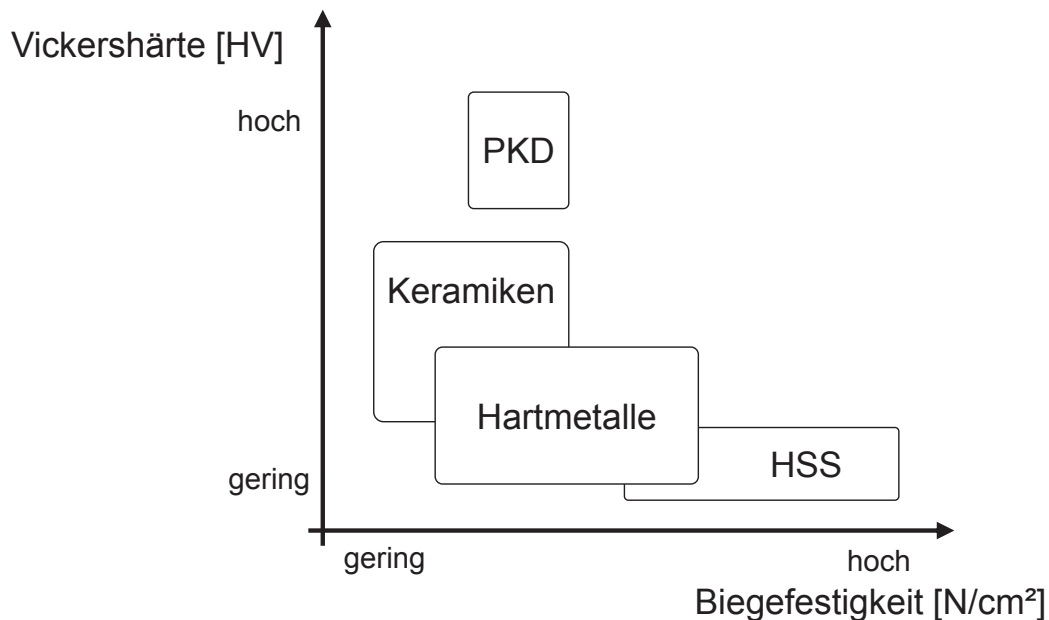


Abbildung 3.2: Eigenschaften der Schneidstoffgruppen (vgl. Paucksch et al. 2008, S. 55)

Schnellarbeitsstähle (DIN EN ISO 4957:2017) sind hochlegierte Werkzeugstähle. Die Hauptlegierungselemente sind Kohlenstoff, Wolfram, Molybdän, Vanadium, Chrom und Kobalt. Insgesamt können die Legierungsanteile bis zu 30 % ausmachen. Früher waren die Schnellarbeitsstähle für die Holzbearbeitung die bedeutendste Schneidstoffgruppe. Mit dem Aufkommen neuer Schneidstoffe hat deren Verbreitung abgenommen, sie haben aber noch ihre Daseinsberechtigung aufgrund der hohen Biegebruchfestigkeit und der Tatsache, dass sie aus einem Stück urgeformt werden.

Härtere Schneidstoffe wie Hartmetalle, Keramik und Diamant sind gemäß Norm (DIN ISO 513:2014) in ISO-Klassen eingeteilt. Die für die Holzbearbeitung relevante Klasse ist hierbei die K-Klasse (für kurzspanende Werkstoffe). Die Gruppe der Schneidkeramiken haben in der industriellen Anwendung bei der Holzbearbeitung keine Relevanz.

Hartmetalle sind Metallmatrix-Verbundwerkstoffe, bei denen Hartstoffe durch eine Matrix aus Metall zusammengehalten werden. Die Herstellung erfolgt durch das Mahlen und Mischen des in kleinen Partikeln vorwiegend Hart- und Metallpulvers. Anschließend findet eine Formgebung durch Pressen und das Verbinden der Partikel durch Sintern statt. Übliche Metallbinder sind Wolframcarbid, Titancarbid, Titanitrid und Niobcarbid. Dominierende Vertreter der Hartstoffe sind Kobalt und Nickel. Durch das Variieren der Anteile und Korngrößen besteht die Möglichkeit Materialeigenschaften auf die jeweilige Prozessanforderung anzupassen. Neue Hartmetalle mit sehr geringem Binderanteil versprechen hohe Härte und Schlagzähigkeit (Heisel et al. 1997). Die Standzeit kann durch Beschichten des Hartmetalls verlängert werden. Die Beschichtungsverfahren sind Chemical Vapour Deposition (CVD) oder Physical Vapour Deposition (PVD). Die Beschichtungen bestehen aus Oxiden, Carbiden oder Nitriden (Paterock 2000).

Bei Diamantwerkzeugen wird unterschieden zwischen polykristallinen (PKD) und monokristallinen Diamanten. Seit den 70er Jahren zeichnet sich eine stetige Weiterentwicklung der Diamantzüchtungen und eine Akzeptanzgewinnung mit einhergehendem etablierten industriellen Nutzung ab (Feld 1993). Mit besonderen Diamantbeschichtungen ist es möglich den Trend zu höheren Schnittgeschwindigkeiten und mehr zerspantem Volumen in Summe pro Werkzeug fortzuführen (Heisel et al. 2011).

Die Struktur des Schneidstoffs bestimmt maßgeblich die erzielbare Schneidenschärfe. Im Falle einer Hartmetallschneide gilt der Grundsatz: Je feiner die Kornstruktur, desto schärfer kann die Schneidkante geschliffen werden und je schärfer die Schneidkante, desto glatter ist der Schnitt durch das Werkstück. Die zunehmende Schneidverrundung verursacht in der Holzbearbeitung die Deformation und Quetschung der Holzzellen, was zu rauen Oberflächen führt. Generell gilt: Je schärfer der Ausgangszustand einer Schneide ist, desto länger auch der Standweg.

3.2.2 Fazit zu Schneidstoffen in der Holzbearbeitung

Durch die Zunahme der unterschiedlichen Schneidstoffe wächst die Anzahl der Wirkpaarungen. Da nicht alle Schneidstoff/Werkstoff-Kombinationen im Labor einem Dauerversuch unterzogen werden können, ist es für diese Arbeit relevant, die Wirkzusammenhänge im laufenden Betrieb zu analysieren.

3.2.3 Spanbildung bei der Holzbearbeitung

Bei der Spanbildung mit geometrisch bestimmter Schneide in der Holzbearbeitung gibt es signifikante Unterschiede gegenüber der Metallbearbeitung. Die Metallspanbildung ist sehr genau beschrieben und die Berechnungen decken sich nahezu vollständig mit der Realität (Fritz et al. 2015). Das Metall wird vor der Schneide elastisch und plastisch verformt und beim Eindringen der Schneide in den Werkstoff werden in der unmittelbaren Umgebung Spannungen im Material erzeugt, die größer sind als die Fließ- bzw. Bruchgrenze des Werkstoffes. Es entsteht in der Regel ein geometrisch bestimmter Span.

Dies ist bei der Vollholzbearbeitung nicht möglich, da Holz nicht fließfähig und aufgrund der in Wuchsrichtung ausgerichteten Holzfasern ist Vollholz anisotrop. Daher ist bei einer Bearbeitung, die sich nicht an der Rohteilstruktur ausrichtet, mit Vorspaltung und großen Ausbrüchen zu rechnen. Die bedeutendsten Untersuchungen dieser Ausrichtungen sowie der Spanbildung bei Zerspanung von Vollholz und dessen Vorspaltung liefert *Kivimaa* (Kivimaa 1952b; Kivimaa 1952a). Aufbauend darauf erbrachte er grundlegende Definitionen zu Schnittrichtungen. Versuche, diese Vorgänge in Modelle zu überführen, gab es von *McKenzie* (McKenzie 1961; McKenzie et al. 2001) und *Rehm* (Rehm 2002).

In dieser Arbeit wird unter anderem der Werkstoff MDF betrachtet, der aufgrund der künstlich neu ausgerichteten Fasern isentropisch ist und daher eine sehr geringe Tendenz zur Vorspaltung bzw. zum Splintern aufweist. Wegweisende Untersuchungen zum Fräsen von Faserplatten gibt es von *Palitzsch* und *Sandvoß* (Pahlitzsch et al. 1970; Sandvoß 1971).

3.2.4 Verschleißfortschritt bei der Holzbearbeitung

Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche, hervorgerufen durch mechanische Ursachen (DIN 50323:1993). Verschleiß in Form von Abstumpfung zeigt sich an Holzbearbeitungswerkzeugen als Verrundung der Schneidkante. Mit fortschreitender Verrundung wird von einem Schneidkantenversatz gegenüber der ursprünglichen Geometrie gesprochen.

Die für den Verschleiß relevanten Begriffsdefinitionen sind in verschiedene Kategorien von Standbegriffen gegliedert. Diese Standbegriffe gliedern sich in Standbegriffskategorien (siehe Abbildung 3.3). Der Begriff der Standbedingungen umfasst alle beim Prozess vorliegenden Bedingungen. Das Werkzeug betreffend sind diese Standbedingungen gekennzeichnet durch die Form und den Schneidstoff. Die Standbedingung kann nur durch den Werkzeughersteller beeinflusst werden.

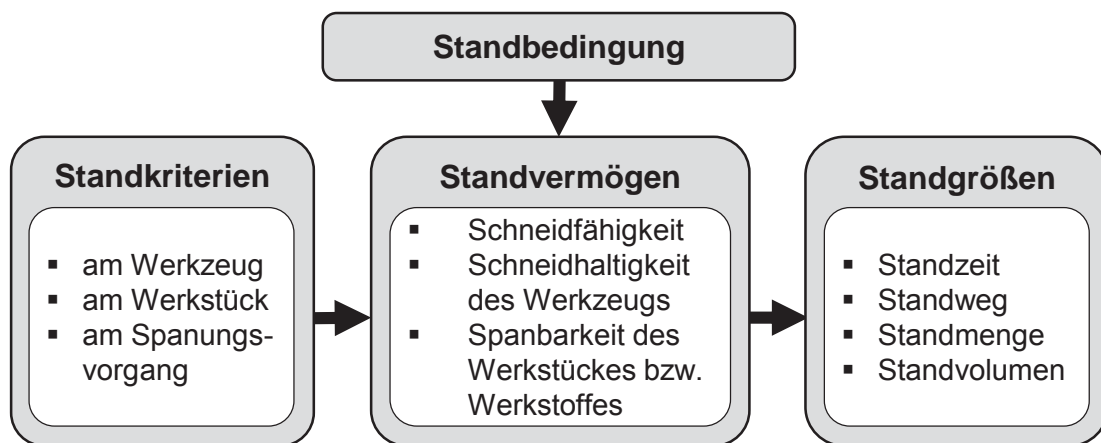


Abbildung 3.3: Standbegriffe im Zerspanprozess (DIN 6583:1985)

Eine weitere Standbedingung ist die Werkzeugmaschine, bzw. deren statische und dynamische Steifigkeit. Diese Bedingungen wurden durch den Werkzeugmaschinenhersteller gesetzt. Weitere Standbedingungen wie den Zerspanvorgang (z. B. Schneideneingriff) und die Umgebung (z. B. Temperatur) verändern sich fortlaufend und können nur durch Sensoren vor Ort erfasst werden.

Standkriterien sind Schwellwerte durch prozessbedingte Veränderungen am Werkzeug, am Werkstück oder beim Zerspanprozess selbst. Im Falle des Werkzeuges handelt es sich um den Werkzeuggrenzwert. Das gebräuchlichste Standkriterium bezieht sich auf die messbare Verschleißgröße, wie Verschleißmarkenbreite oder Schneidkantenversatz. Im Falle des Werkstücks gilt als Kriterium meist die Oberflächen- oder Kantenqualität. Im Falle des Zerspanprozesses spielen gesetzte Grenzwerte beispielsweise für größere, unerwartete Vibrationen eine Rolle.

Im Zentrum steht das Standvermögen: Es stellt den Fähigkeitsgrad dar, inwieweit eine Wirkpaarung (Schneidstoff und Werkstoff) einen bestimmten Zerspanvorgang mit bestimmten Stellgrößen bis zum Erreichen des Standkriteriums durchsteht. Das Standvermögen kann in Form von Zeit, Teilemenge, Standgrößen oder Standweg ausgedrückt werden. Insbesondere der Standweg in Schnittrichtung hat eine Aussagekraft für die Vergleichbarkeit verschiedener Werkzeugsysteme.

Die Stellgrößen für den auftretenden Verschleiß im Prozess wurden nach und nach identifiziert und analysiert. *Jostmeier* und *Prokes* haben jeweils verschiedene Versuchsreihen durchgeführt (Jostmeier 1966; Prokes 1970) und kamen zu dem Schluss, dass die Einflüsse Schnittgeschwindigkeit, Zahnvorschub und Schnitttiefe für den Verschleiß des Werkzeuges maßgebend sind und bewerteten diese. *Stühmeier* ging nach seinen Untersuchungen von einer verrundeten Schneidenspitze mit einem Mikrofreiwinkel (Stühmeier 1989) aus.

Pahlitzsch und *Sandvoß* beschreiben wie sich die Spitze abrundet und einen Radius mit Verschleißfase bildet. Der Mikrofreiwinkel dieser Fase ändert sich bei zunehmender Verrundung nicht (Pahlitzsch et al. 1972).

Tröger kam nach seinen Untersuchungen zu dem Schluss, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Volumenabtrag am Werkzeug und zurückgelegtem Schnittweg besteht (Tröger et al. 2015, S. 44).

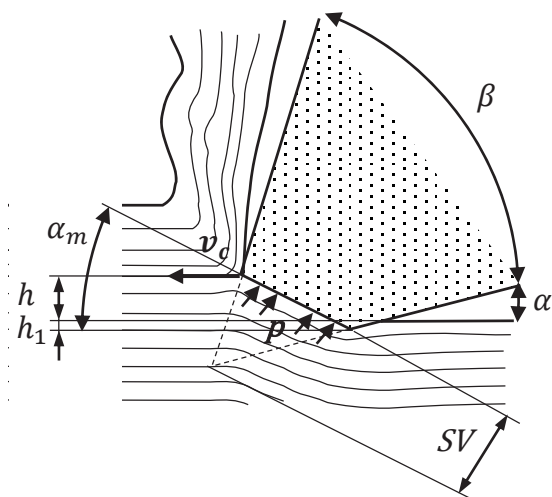


Abbildung 3.4 Verschleißfortschritt nach Fischer

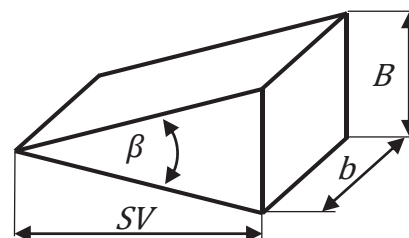


Abbildung 3.5: Kenngrößen am Schneidkeil

Fischer hat Grundlagen der Vorgänge bei der Holzbearbeitung erarbeitet. Dem *Fischer-Modell* liegt die Idee zugrunde, dass der Schneidstoff des Schneidkeils unter Schnittlast einen maximalen Druck p standhält bevor ein Abtragen des Schneidstoffes

eintritt. Unter einem bestimmten Druck p und dem Federwert des Werkstoffs c entsteht eine Verschiebung h_1 der Schnittkante senkrecht zur Schnittrichtung. Um die Verschiebung Relation setzen zu können wird die Maßeinheit Δy benötigt. Durch diese Verschiebung bildet sich der Mikrofreiwinkel α_m . Die Bezeichnungen sind in Abbildung 3.4 veranschaulicht. Der Zusammenhang ist in Gleichung 3.4 gegeben.

$$\tan \alpha_m = \frac{p \cdot \Delta y}{c \cdot h_1} \quad (3.4)$$

Das *Fischer-Modell* (Fischer 1996; Fischer 1997; Fischer 2005) geht von einem konstanten schnittflächenspezifischen Verschleiß D_v aus. Diese Annahme geht von einem über den Schnittweg l_c und auf die Spannungsbreite b (siehe

Abbildung 3.5) bezogener gleichmäßiger Volumenverlust. Der Sachverhalt ist in Gleichung 3.5 dargelegt. Die Betrachtung des zurückgelegten Schnittweges l_c erfolgt in Kapitel 5.4.2.3.

$$D_v = \frac{1}{b} \cdot \frac{dV_{\text{Verschleiß}}}{dl_c} = \text{const.} \quad (3.5)$$

Der Verschleißfortschritt lässt sich als Veränderung der geometrischen Merkmale der Schneide über den zurückgelegten Schnittweg bei konstanten Bedingungen charakterisieren (Gottlöber 2003, S. 48). Das resultierende Verschleißvolumen $V_{\text{Verschleiß}}$ ist in Gleichung 3.6 formuliert.

$$V_{\text{Verschleiß}} = D_v \cdot l_c \cdot b \quad (3.6)$$

Die Bedingungen in den betrieblichen Anwendungsszenarien bleiben nicht konstant, können aber für kleine Wegsegmente innerhalb kurzer Intervalle als konstant angesehen werden.

3.2.5 Fazit zum Verschleißfortschritt bei der Holzbearbeitung

Für diese Arbeit und die Beschreibung der Wirkpaarung Wi sind daher die relevanten Prozessgrößen der Schnittweg und für die Berechnung des schnittflächenspezifischen Verschleißvolumens D_v die Vorschubgeschwindigkeit v_f und die zugehörige Schnittgeschwindigkeit v_c notwendig.

3.3 Qualitätssicherung durch Kantenmessung

Die Qualität der Kante ist in der spanenden Holzbearbeitung das dominierende Qualitätsmerkmal (VDI 3414:2014). Meist bleibt sie bei nachfolgenden Prozessschritten nicht verborgen und bleibt optisch sichtbar. Daher ist die Bearbeitungsqualität der Werkstückschmalfläche von eher untergeordneter Bedeutung. Die Qualität der Kante äußert sich in Aufwölbungen und Ausbrüchen. Die Fläche der Ausbrüche pro Kantenlänge wird quantifiziert in der Kennzahl der Kantenschartigkeit.

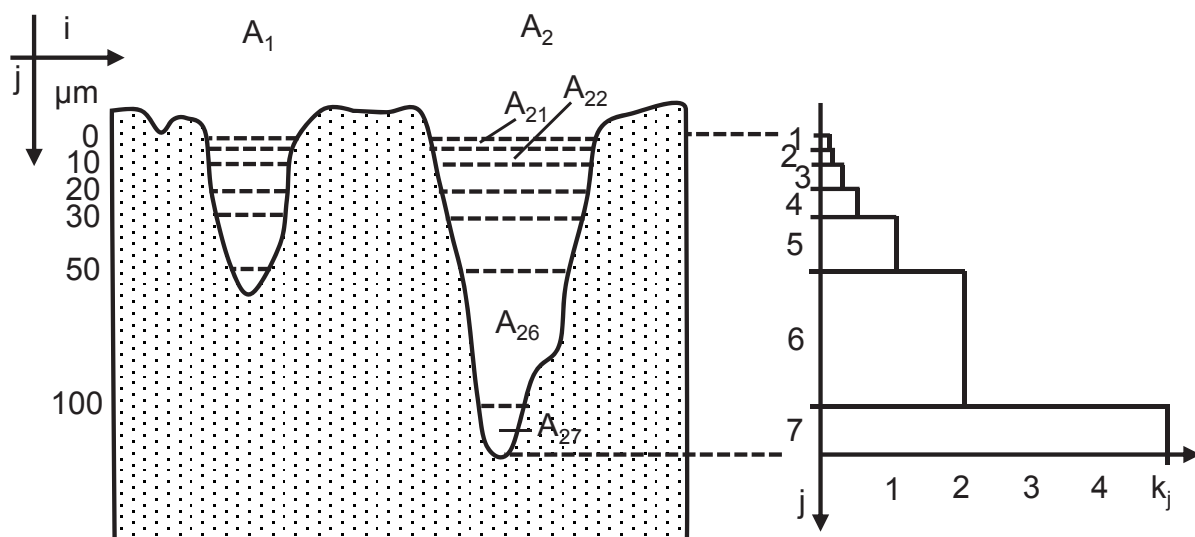


Abbildung 3.6: Definition der Schartenfläche (Drückhammer 1989)

Eine Vereinfachung der meist schollenartigen und flachen Ausbrüche ist die Definition der Schartenfläche S_A nach *Drückhammer*, siehe Gleichung 3.7 bzw. Abbildung 3.6. Die Einteilung des gesamten Ausbruches erfolgt hierbei in verschiedene einzelne Ausbrüche A_i und in Flächenabschnitte für verschiedene Tiefen A_j . Diese Flächen werden mit einer Gewichtung je Tiefe k_j versehen und in Relation zu der Länge der Messtrecke l_{xM} gesetzt.

$$S_A = \frac{1}{l_{xM}} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^7 \Delta A_{ij} \cdot k_j \quad (3.7)$$

Methoden zur Messung dieser Schartenfläche gliedern sich in taktile und optische Verfahren (VDI 3414:2014).

Der Hauptvertreter der taktilen Verfahren ist das Tastschrittverfahren. Die Beschreibung (Dubenkropp 1981) und Implementierung dieses Verfahrens gelang in Versuchsreihen an der *TU Braunschweig* mittels des Edge Quality Measurement Device (EQUAM)-Messgerätes.

Optische Messmethoden untergliedern sich in Laserlichtvorhänge, Spaltprojektionen und Laservorhänge. Laservorhänge sind möglich, aber keine ideale Lösung (Riegel et al. 2009). Eine Art der Spaltprojektionen ist das Durchlichtverfahren, wobei durch eine Kamera mit CCD-(charge-coupled-device)-Sensor das Restlicht auf der gegenüberliegenden Kantenseite gemessen wird. Dieser Ansatz wurde sukzessive weiterentwickelt (Tröger 1977; Fuchs 1992; Grübler 2005), Messgeräte mit hoher Wiederholgenauigkeit der Messung sind Stand der Technik (IfW 2013).

3.4 Fertigungsnahe IT-Systeme

Fertigungsnahe IT-Systeme werden verwendet, um den Betrieb in der Fertigung zu planen, zu optimieren sowie die Durchführung zu unterstützen und zu überwachen (Lucke 2014, S. 37). Im Betrachtungs- und Gestaltungsbereich spielen drei IT-Systeme eine Rolle, da hierzu der Bearbeitungsprozess in Kontext gesetzt wird. Die Hierarchie der relevanten IT-Systeme Produktionsplanung, Werkzeugmanagement und Werkzeugmaschine betrachtet Abbildung 3.7.

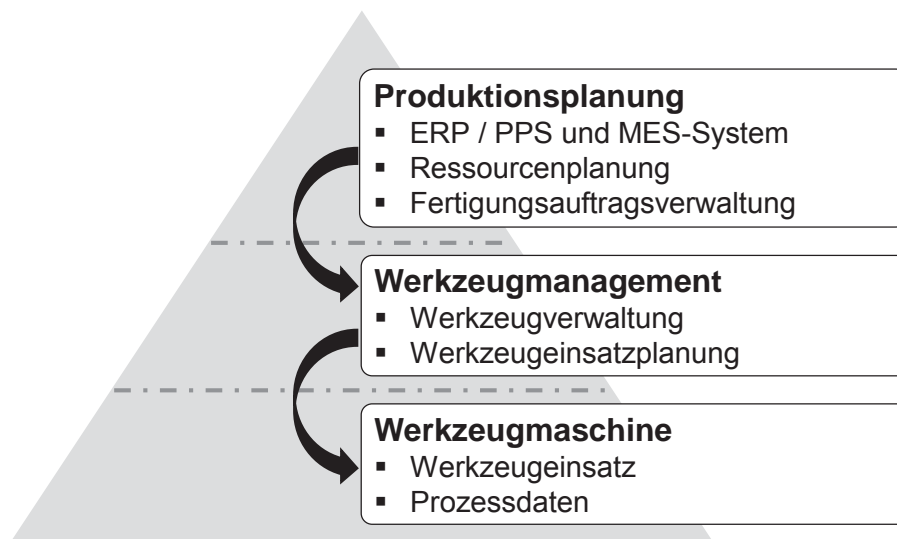


Abbildung 3.7: Relevante fertigungsnahe IT-Systeme

Produktionsplanung, Werkzeugmanagement und Werkzeugmaschine müssen für eine effiziente Zusammenarbeit in der Lage sein, Daten untereinander auszutauschen. Dies wird auch als *vertikale Integration* (acatech 2013) bezeichnet. Im Folgenden wird auf diese drei Systeme näher eingegangen.

3.4.1 Produktionsplanung

Die Produktionsplanung findet entweder in einem Enterprise Resource Planning (ERP)-System, in einem separaten Produktionsplanungs- und Steuerungssystem (PPS) oder in einem Manufacturing Execution System (MES) statt.

Das ERP-System hat die unternehmerischen zentralen Aufgaben, Kapital, Personal, Betriebsmittel, Produktion und Material rechtzeitig und bedarfsgerecht zu planen. Die Materialwirtschaft untergliedert sich wiederum in Beschaffung, Lagerhaltung und Disposition. Ebenso werden Engineering-Daten wie Stammdaten, Stücklisten und Produktdaten verwaltet. Die Kernaufgaben des ERP-Systems sind die Materialbedarfsplanung in der Produktion „*Material Requirement Planning*“ (MRP I) und die Durchführung einer Produktionsprogrammplanung mit Einbeziehung von Kapazitäten „*Manufacturing Resources Planning*“ (MRP II).

Die Produktionsplanung und -steuerung gliedert sich in Produktionsprogrammplanung, Bedarfsplanung, länger- und mittelfristige Fertigungsauftragsplanung, Materialdisposition und Bestandsführung (Schuh 2006). Hauptaufgaben, die es zu erfüllen gilt, sind Bedarfsermittlung, Kostenkalkulation, Anpassung an Beschäftigungsschwankungen und Losgrößenbestimmung (Dyckhof 2003).

Ein MES-System ist ein Produktionsleitsystem mit den Hauptaufgaben der Betriebsdatenerfassung, der Feinplanung und der Rückverfolgbarkeit (Kletti 2006). Die Feinplanung wird meist in kürzeren Planungszyklen und mit automatisierten Rückmeldungen aktuell gehalten und ergibt somit eine realistische Umsetzung der Fertigungspläne (Wiendahl 2017).

Unabhängig vom auszuführenden System umfasst die Fertigungsauftragsplanung den Termin, die Losgröße, Arbeitsgänge samt Maschinenbelegung und die benötigten Betriebsmittel. Die hierbei abgeleitete Belegungsplanung ist Ausgangsbasis für das Management der Werkzeuge.

3.4.2 Werkzeugmanagementsystem

Das Werkzeugmanagementsystem, auch *Tool Management System* genannt, erfüllt mit IT-Mitteln die Aufgaben des in Kapitel 2.1 beschriebenen Werkzeugwesens. Die gesamte Prozesskette der Werkzeugeinsatzplanung kann hierbei komplett digital stattfinden. Alle in der Fertigung eingesetzten Werkzeuge werden im System angelegt. Dies kann unterstützt werden durch digital verfügbare Kataloge der Hersteller (Kief et al. 2015, S. 475). Ein elektronisches Werkzeugmanagementsystem bietet Funktionalitäten, die auf die Aufgaben des Werkzeugwesens abgestimmt sind. Es kann eine aktuelle Übersicht der verfügbaren Werkzeugtypen erzeugt werden. Die Festlegung des Magazinplatzes in der Werkzeugmaschine erfolgt durch Plausibilitätsüberprüfung und durch Integration in das Computer-aided manufacturing (CAM)-System halbautomatisiert auf Vorschlagsbasis. Hierbei können die Werkzeugdaten durch eine einheitliche Beschreibung der Werkzeuge in einem austauschbaren Format (Nyqvist 2008) übernommen werden. Ebenfalls erlaubt die einheitliche Beschreibung eine Übertragung der Werkzeugkorrekturdaten von Voreinstellgeräten auf beliebige Werkzeugmaschinen (Widmann 2013).

Der Bestand der Werkzeuge wird laufend optimiert (Maßberg et al. 1991) und somit der Nutzungsgrad der Werkzeuge gesteigert (Müller 2004). Durch Hinterlegen einer Strategie kann der Werkzeugwechselzeitpunkt vorgeschlagen werden (Rao et al. 2011).

Die Vergabe einer eindeutigen Nummer pro Werkzeug ermöglicht die Werkzeugidentifikation. Diese ist unabdingbar für das Ausschließen einer Verwechslung baugleicher Schwesterwerkzeuge (Röschinger et al. 2015). Herkömmliche Mittel, die Nummerierung maschinenlesbar zu erfassen, sind Bar-Codes, QR-Codes oder die Speicherung der Nummer auf einem RFID-Funkchip (Aurich et al. 2008). Die Umsetzung eines Werkzeugmanagementsystems findet meist als zentrale Datenbankanwendung statt. Eine Realisierung als Cloud-Anwendung kann weitere Flexibilität und Einsparpotenziale bieten (Röschinger 2014).

Das bestmögliche Werkzeugmanagementsystem hat einen verlustfreien, firmenübergreifenden Informationsfluss über den gesamten Lebenszyklus eines Werkzeuges (Eversheim et al. 1991).

Für das Ziel dieser Arbeit ist ein Werkzeugmanagement erforderlich, das alle verwendeten Werkzeuge verwaltet und identifiziert.

3.4.3 Werkzeugmaschinensteuerungen

Werkzeugmaschinen sind Maschinen zur Fertigung von Werkstücken mit Werkzeugen, deren Bewegung zueinander durch die Maschine vorgegeben wird (Neugebauer 2012). Typische Baugruppen von Werkzeugmaschinen sind Gestell, Führungen, Antriebe, Werkzeugmagazin, Werkzeugaufnahmen, Kühlkreisläufe, Hydraulikaggregat, Entsorgungseinrichtungen, Messsysteme und Steuerung. Die Baugruppen Messsystem und Steuerung werden unter dem Aspekt der Datenerfassung und -verarbeitung näher betrachtet.

Die erste NC-Steuerung (Numerical Control) wurde im Jahre 1953 am MIT (Massachusetts Institute of Technology) entwickelt. Es handelt sich um ein System, das Koordinatenbewegungen von Werkzeugmaschinen durch numerische Information steuert (Weck 2005, S. 21). Bis ca. 1970 war es Stand der Technik, diese Information mittels Lochstreifen an die Maschine zu übergeben. Die einzelnen Abläufe der Maschinenfunktionen waren fest verdrahtete, logische Verknüpfungen. Ab Mitte 1970 wurden mit der aufkommenden Halbleitertechnik die logischen Verknüpfungen durch Digitalrechner realisiert. Diese CNC-Steuerungen (Computerized Numerical Control) zerlegen die programmierten Bewegungen in interpolierte Einzelschritte. In einem Regelkreis werden die Sollwerte mit den gemessenen Ist-Werten verglichen und die neuen Ansteuersignale für die Antriebe berechnet.

Die Messsysteme in Werkzeugmaschinen, die diese Ist-Werte liefern, sind Strom-, Lage- und Drehzahlsensoren. Die Strommessung erfolgt durch Hallsensoren oder Stromshunts. Die Lage- und Drehzahlmessung erfolgt optisch, magnetisch, induktiv oder ultraschallbasiert. Die Ausgabewerte können absolut, zyklisch absolut oder inkrementell sein.

3.4.4 Schnittstellen für Prozessdaten

Es gibt mehrere Möglichkeiten für die Übermittlung dieser gemessenen Istwerte, berechneten Prozessgrößen und Steuerungsvariablen. Eine der Möglichkeiten ist das Mitlesen des Bussystems (z.B. *Siemens Profinet*) der Werkzeugmaschinensteuerung. Hierzu müssen aber Variablennamen und deren Bedeutung bekannt sein. Dies ist nicht einheitlich zwischen den Werkzeugmaschinenherstellern definiert. Standardisierte Schnittstellen mit einheitlichen Variablen sind beispielsweise der *MTConnect*-Standard und *OPC-UA*.

Der *MTConnect*-Standard wurde von der US-amerikanischen Gesellschaft für Produktionstechnik (AMT - The Association For Manufacturing Technology) im Jahr 2006 initiiert (Edstrom 2013) und ab dem Jahr 2008 an der Universität von Kalifornien in Berkeley (Vijayaraghavan et al. 2008) entwickelt. Er hat das Ziel, Prozessinformationen aus NC-Steuerungen mitzulesen und auszugeben (Dornfeld et al. 2009).

Die OPC-Spezifikation (OPC 2017) wurden von der OPC Foundation herausgegeben. Sie enthält im Gegensatz zu *MTConnect* eine Verbindungsüberwachung in beide Richtungen. Pufferung von Daten und Empfangsbestätigung von übertragenen Daten führen bei Verbindungsunterbrechungen nicht zu Datenverlust, verlorene Daten werden einfach erneut angefordert.

Des Weiteren gibt es zahlreiche individuelle Applikationen, die prozessspezifisch ohne öffentlich zugängliche Spezifikation erstellt wurden. Meist lesen diese ausgewählte Variablen mit (z.B. über *Dynamic Data Exchange*), die sie ebenfalls über proprietäre Applikationen weiterreichen.

Darüber hinaus existieren höherwertige Schnittstellen, die nicht nur Prozessdaten weiterleiten, sondern Dienstleistungen direkt von der Werkzeugmaschinensteuerung aus anbieten. Diese Schnittstellen haben jedoch zum Zeitpunkt dieser Arbeit keine signifikante Verbreitung (Kreidler et al. 2001).

3.4.5 Fazit zur Prozessmodellierung durch Werkzeugmaschinenendaten

Damit sich eine Werkzeugmaschine für die Implementierung einer Prozessdatenauswertung eignet, wird eine Werkzeugmaschinensteuerung vorausgesetzt, die über eine geeignete Schnittstelle angesprochen werden kann.

3.5 Werkzeugkostenerfassung im Rechnungswesen

Das Rechnungswesen ist ein Teilgebiet der Betriebswirtschaftslehre. Es befasst sich mit der systematischen Erfassung und Überwachung von Geld- und Leistungsströmen. Im Folgenden werden die Zusammenhänge vom Unternehmenserlös heruntergebrochen, und es wird auf die relevanten Kostenarten eingegangen.

$$\text{Erlös} = \text{Preis} \cdot \text{Menge} \quad (3.8)$$

Gleichung 3.8 zeigt die Beziehung zwischen Erlös, Preis und Menge. Erlös oder Umsatz ist in der Wirtschaftswissenschaft der Gegenwert, der einem Unternehmen in Form von Geld oder Forderungen durch den Verkauf von Waren zufließt. „Preis“ oder auch Verkaufspreis (Stückpreis) bezieht sich auf den Preis, zu dem eine Ware am Markt verkauft wird. Die Menge ist die Anzahl der verkauften Produkte.

$$\text{Verkaufspreis} = \text{Selbstkosten} + \text{Gewinnaufschlag} \quad (3.9)$$

Gleichung 3.9 zeigt die Beziehung zwischen dem Nettoverkaufspreis, den Selbstkosten und dem Gewinnaufschlag. Selbstkosten sind die Summe der entstandenen Kosten aller einzelnen Kostenträger.

$$\text{Gewinnzuschlag} = \text{Selbstkosten} \cdot \text{Gewinnzuschlagssatz} \quad (3.10)$$

Gleichung 3.10 zeigt die Berechnung des Gewinnzuschlags. Der Gewinnzuschlag wird üblicherweise in Prozent angegeben. Die Selbstkosten enthalten Material-, Fertigungs-, Entwicklungs-, Verwaltungs- und Vertriebskosten.

3.5.1 Kostenarten

Das Verursachungsprinzip besagt, dass einem Kostenträger diejenigen Produktionsfaktoren zugerechnet werden, die bei seiner Entstehung eingesetzt wurden. Das ist nach dem Verursachungsprinzip nur bei den Einzelkosten möglich. Das Verursachungsprinzip ist das zentrale Prinzip der Kosten- und Leistungsrechnung überhaupt. Das Zuordnen von angefallenen Kosten zu einem Bezugsobjekt ist nur dann zulässig, wenn die Kosten tatsächlich von diesem Bezugsobjekt allein verursacht worden sind (Plinke et al. 2015, S. 48).

Kostenarten sind spezifische Kategorien für eine bestimmte Kostengruppe. Dabei steht jede Kostenart für die Menge aller Kosten, bei denen ein bestimmtes Merkmal in gleicher Weise ausgeprägt ist.

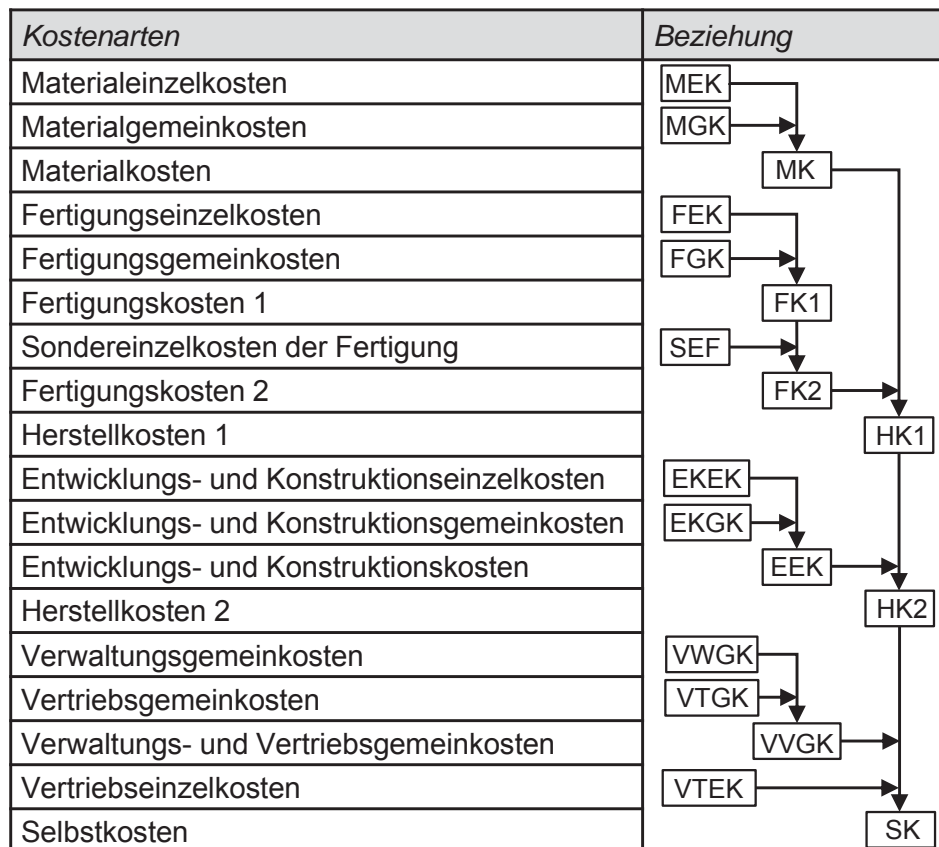


Abbildung 3.8: Kostenarten (vgl. Bronner 1996)

Abbildung 3.8 zeigt die Kostenarten und deren Verrechnungen. Die Material- (MK) und Fertigungskosten (FK2) bilden dabei den Block der Herstellkosten. Die Verteilung der Verwaltungs- (VWGK), Vertriebs- (VTGK) und Entwicklungs- und Konstruktionskosten (EEK) auf die Kostenträger orientiert sich an den Herstellkosten des Umsatzes. Diese Struktur wird vorwiegend in Fertigungsbetrieben verwendet.

3.5.2 Sondereinzelkosten der Fertigung

Sondereinzelkosten der Fertigung (SEF) sind Teil der Herstellkosten. Sie sind Teil der Kostengruppe der Einzelkosten, werden aber nicht einzelnen Kostenträgern zugeordnet. Diese Kosten können einem Fertigungsauftrag direkt zugeordnet werden. Beispiele für diese Kostenart sind technische Hilfsstoffe, Spannvorrichtungen, Konstruktionszeichnungen und Spanwerkzeuge (vgl. Bronner 1996, S. 9).

3.5.3 Fertigungseinzelkosten

Fertigungseinzelkosten (FEK) sind Kosten, die direkt einem Kostenträger zugerechnet werden können. Dazu gehören zum Beispiel die Lohnkosten der Produktionsmitarbeiter und Maschinenkosten. Bestandteile der Maschinenkosten sind Wartung, Energiekosten, Abschreibungen, Reparaturkosten und Hilfsmaterialien.

$$FEK = \text{Zeit} \cdot \text{Lohnkosten} + \text{Maschinenzeit} \cdot \text{Maschinenkosten} \quad (3.11)$$

Gleichung 3.11 zeigt die Berechnung der Fertigungseinzelkosten. Genauere Fertigungslohnkosten können statt manuellen Ausfüllens des Lohnscheins durch automatische Ermittlung der Daten automatisiert errechnet werden. Beim Einsatz von Fertigungsmaschinen, die über digitale Steuerungen verfügen, können die notwendigen Daten zur Ermittlung der Laufzeiten verwendet werden.

3.5.4 Fazit zur Werkzeugkostenerfassung im Rechnungswesen

Der Regelfall ist die Umlegung der Werkzeugkosten als *Sondereinzelkosten der Fertigung* auf die gesamte Fertigung. Diese Zuordnung ist dem Umstand geschuldet, dass ein Bezug zwischen Werkzeug und den bearbeiteten Fertigungsaufträgen nötig ist, um eine genauere Kostenerfassung durchzuführen. Eine produktbezogene Erfassung als *Fertigungseinzelkosten* ist unter der Voraussetzung möglich, dass hinreichende Information über den Werkzeugeinsatz für die Aufteilung der Werkzeugkosten vorliegen. Mit Hilfe dieser Informationen können die Werkzeugkosten als zusätzlicher Summand in der Gleichung 3.11 zu den Fertigungseinzelkosten addiert werden.

4 Konzeption des Modells

Der *Verein Deutscher Ingenieure* versteht unter einem Modell eine vereinfachte Abbildung der Realität, bestehend aus Modellelementen. Diese werden durch die Modellbeschreibung definiert und mit einer Modellierungsmethode (VDI 3633:2013) erstellt. Dieses Verständnis deckt sich mit der allgemeinen Modelltheorie (Stachowiak 1973). Hier ist ein Modell durch verschiedene Merkmale gekennzeichnet. Relevante Merkmale sind das Abbildungsmerkmal, das das reale System abbildet und das Verkürzungsmerkmal, das das Modell auf relevante Elemente beschränkt. Diese Grundsätze sind unabhängig vom Modellierungsansatz und Modelltyp. Das Modell steht für eine Gültigkeit in Bezug auf das Problem und die Situation, demnach für die Gültigkeit in einem Zeitintervall zu einem bestimmten Kontext. Das Verkürzungsmerkmal des Ansatzes ist die Reduzierung auf maßgebende Einflussgrößen. Einflussgrößen von geringer Relevanz werden nicht mit einbezogen. In dieser Applikation ist der Kontext des Modells die Gültigkeit für den Verschleißfortschritt bei der spanenden Holzbearbeitung, hervorgerufen durch Abrasion.

Es gibt generell drei Ebenen der Prozessmodellierung:

- Die Prozessebene: Hier wird der gesamte Schnittvorgang in der Maschine betrachtet.
- Die Wirkebene: Auf dieser Ebene wird jede einzelne Schnittoperation jeder Schneide betrachtet
- Die Mikroprozessebene: Hierbei werden die physikalischen Vorgänge wie Mechanik und Reibung modelliert.

Diese Arbeit verfolgt den Ansatz der Modellierung auf Wirkebene.

4.1 Prozessmodellierung

Generell stellt die Prozessmodellierung eine Verbindung zwischen bestimmten Eingangs- und Ausgangsvariablen her. Die Bezugsgrenze des zu konzeptionierenden Modells schließt die Beschaffung der Eingangsvariablen mit ein. Der Zweck des Modells ist die Beschreibung des Vorgehens bei der Online-Datenerfassung und der darauffolgenden Berechnungen. Die Zusammenhänge hin zu den technisch-organisatorischen Zielparameter Verschleiß und Qualität stellen das Ergebnis der

Berechnung dar. Diese Zusammenhänge werden für je eine Schneidstoff-/Werkstoffpaarung beschrieben und deren Koeffizienten aufgenommen.

4.2 Anforderungen an das Prognosemodell zur Verschleißvorhersage

Das Modell soll Anforderungen hinsichtlich der Holzbearbeitungsbranche, prozessbezogene Anforderungen und Anforderungen des Anwenders bzw. aus wissenschaftlicher Sicht erfüllen.

Abbildung 4.1 zeigt einen Überblick über alle Anforderungen und zuordenbare Kategorie.

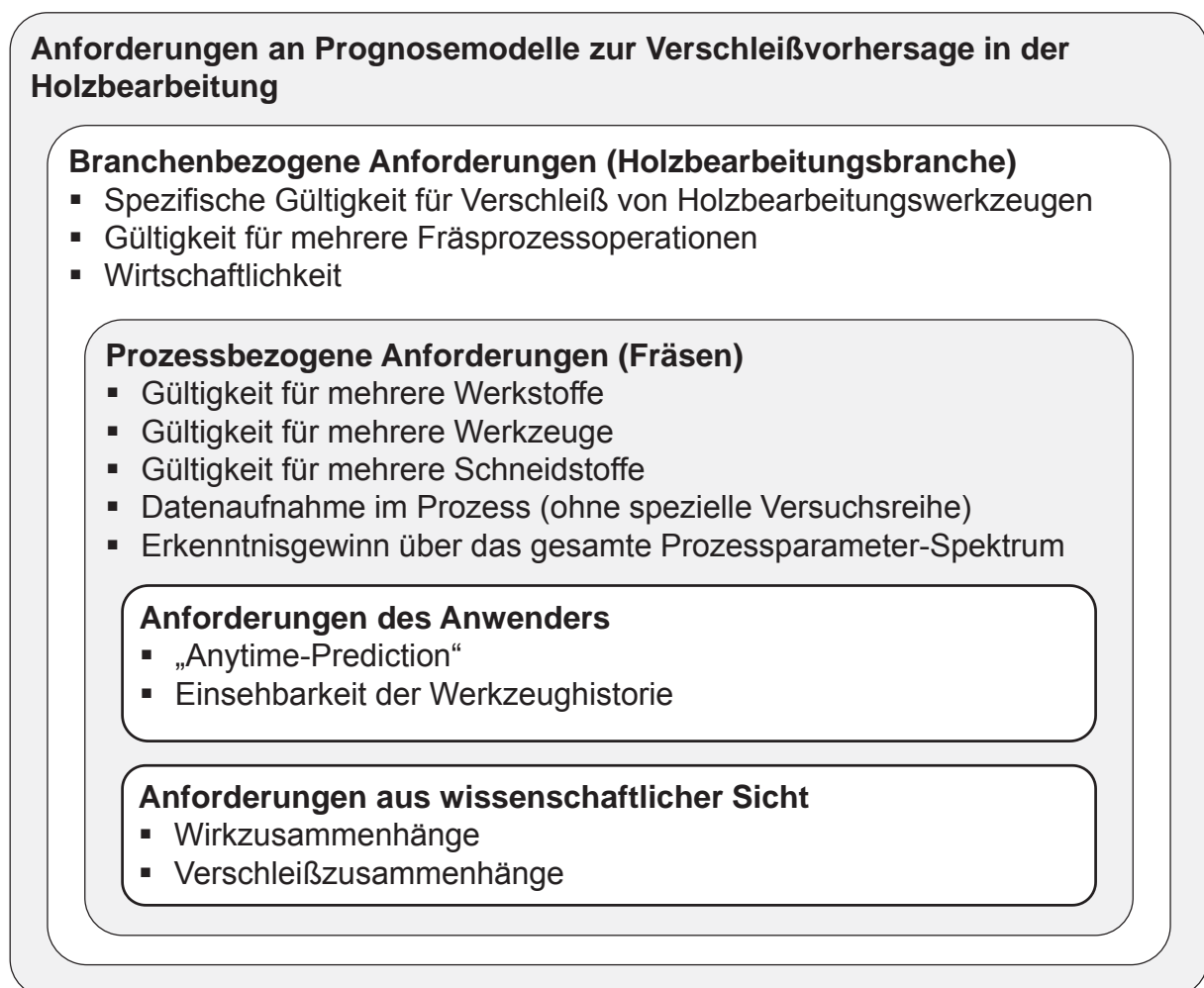


Abbildung 4.1: Anforderungen an das Modell

4.2.1 Branchenbezogene Anforderungen

Die branchenbezogenen Anforderungen beziehen sich auf die Anwendbarkeit in der Holzbearbeitungsbranche. Insbesondere sind sie an den spezifischen Verschleißmechanismen festzumachen.

Die Gültigkeit soll für alle Fräsprozesse in der Holzbearbeitung gewährleistet sein. Fräsoperationen finden in Durchlauf- und an Stationärmaschinen statt.

Die durch die marktwirtschaftliche Wirtschaftsordnung geforderte Wirtschaftlichkeit muss gewahrt bleiben. Sowohl die einmaligen Einrichtungsaufwendungen der Lösung als auch die laufenden Kosten sollen dem Nutzen des Modells gegenüberstehen.

4.2.2 Prozessbezogene Anforderungen

Die Anforderungen an das Modell in Bezug auf den Zerspanprozess selbst sind, dass es Gültigkeit für eine relevante Werkstoffklasse haben muss. Außerdem soll eine hohe Varianz der Werkzeuge im Modell abbildbar sein, die sich in möglichen Schneidstoffen widerspiegelt.

Eine weitere Anforderung an das Modell ist die Datenaufnahme, die im Prozess stattfinden soll: nicht unter Laborbedingungen im Rahmen eines Verschleißversuches, sondern in der realen Produktion samt der sich dadurch ergebenden Umgebungseinflüsse.

Die Anforderung an die Aussagefähigkeit ist, dass nicht der Standweg eines Werkzeuges an einem Punkt im Kennfeld der Prozessparameter prognostiziert werden wird, sondern innerhalb des gesamten Kennfeldes eine Aussage getroffen werden kann.

4.2.3 Anforderungen der Modell-Anwender

Die Anwender sind sowohl unternehmensinterne Anwender, die direkt mit der Zerspanung oder in deren Planung miteinbezogen sind, als auch die Werkzeughersteller. Die unternehmensinternen Anwender sind im Einzelnen:

1. Maschinenbediener: Sie haben die Anforderung, dass eine Vorhersage zu jedem Zeitpunkt möglich sein muss (engl. *Anytime-Prediction*). Hieraus kann der Bediener dann ableiten, wann ein Werkzeugwechsel ansteht und wie viele Bauteile er noch fertigen kann.
2. CNC-Programmierer: Damit möglichst nahe am Optimum geplant werden kann, müssen die Schnittwerte (Drehzahl, Vorschub, Arbeitseingriff) bekannt sein.
3. Arbeitsplaner: Der Arbeitsplaner legt die Belegung der konkreten Werkzeuge und die Werkzeugwechselfenster in der Maschinenbelegung fest. Hierfür muss der Standweg bekannt sein.

Die Werkzeughersteller Anwendergruppe stellt die Konstrukteure dar. Um konstruktive Verbesserungen an den Werkzeugen vorzunehmen (z.B. Freiflächen, Spanwinkel, ...), müssen die bisherigen Zusammenhänge zwischen Form und Verschleiß ausreichend genau bekannt sein.

Die Hauptanforderung aus Sicht aller Anwendergruppen an das Modell ist die Fähigkeit, eine Echtzeitprognose der Reststandzeit eines Werkzeuges auszugeben.

4.2.4 Anforderungen aus wissenschaftlicher Sicht

Die Anforderung aus wissenschaftlicher Sicht ist das Aufnehmen und Bereitstellen von Wirkzusammenhängen verschiedener Prozesseinstellungen auf den Verschleiß zwischen bisher nicht analysierten Werkstoff-/Schneidstoffpaarungen. Die Anforderung ist es ein Modell zu entwickeln das in der Lage ist Wirkzusammenhängen bei der Holzverarbeitung auf Basis von online-erfassten Werkzeugmaschinen-daten zu erlernen.

4.3 Annahmen über den Werkzeugeinsatz

Um die Gültigkeit des Modells sicherzustellen, wurden Annahmen getroffen über die auftretende Verschleißart, die Einflussgrößen auf den Verschleiß und die im Prozess stattfindenden Bewegungen.

Abbildung 4.2 zeigt einen Überblick über alle Annahmen über den Werkzeugeinsatz, die getroffen wurden, um die Gültigkeit des Modells zu wahren.

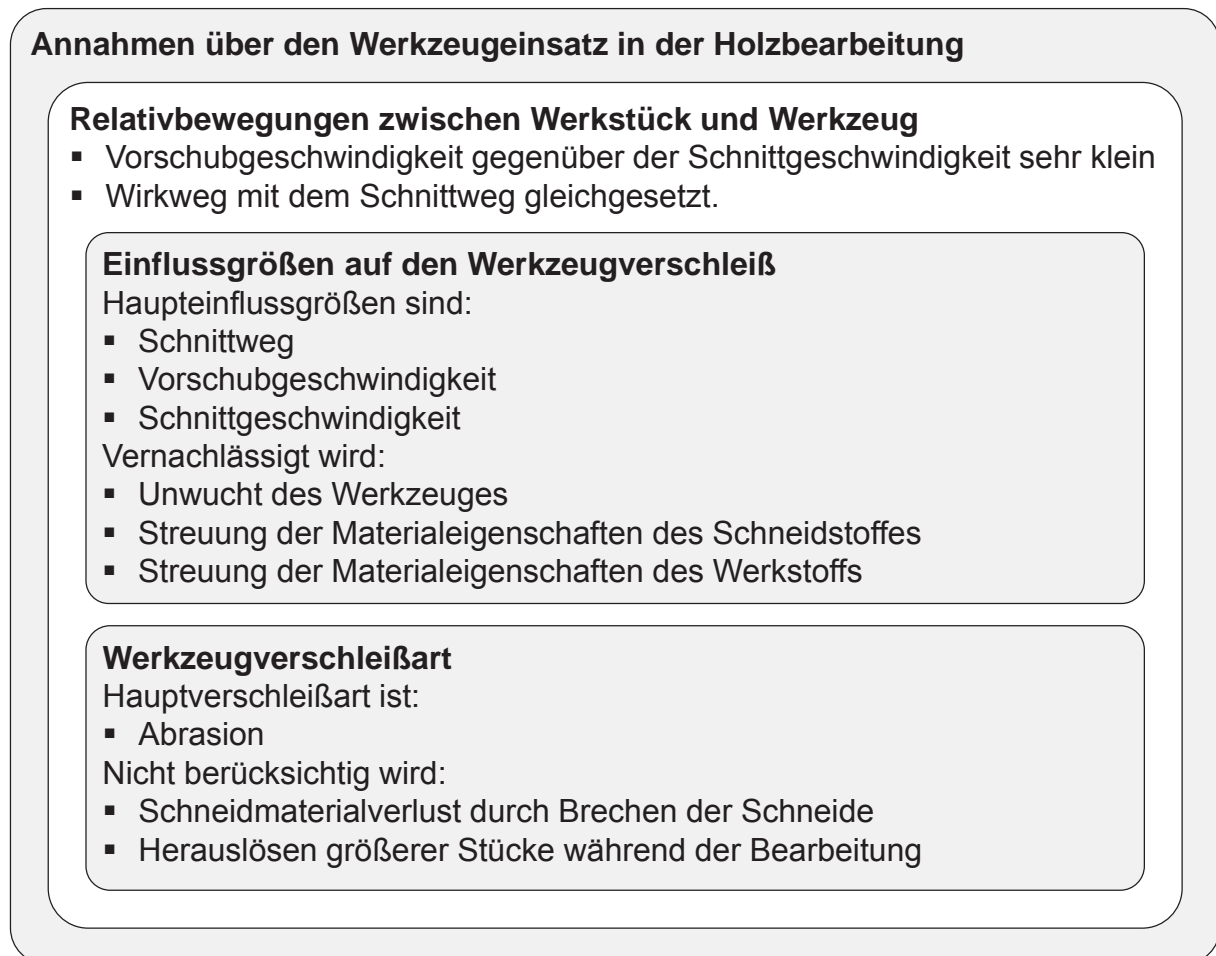


Abbildung 4.2: Überblick über die Annahmen

4.3.1 Relativbewegungen zwischen Werkstück und Werkzeug

Während des Zerspanprozesses Fräsen gibt es zwei sich überlagernde Bewegungen: Die zirkulare Kreisbewegung und die translatorische Vorschubbewegung.

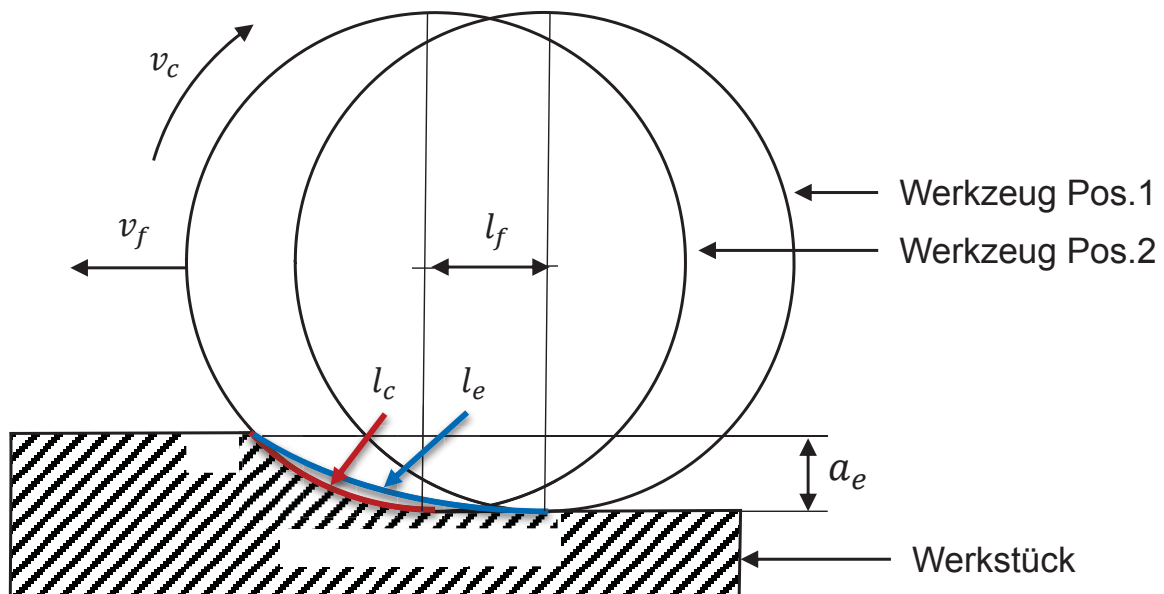


Abbildung 4.3: Geometrie des Zerspanvorganges (DIN 6580:1985)

Durch Überlagerung beider Bewegungen ergibt sich eine neue Trajektorie. Die Strecke der überlagerten Bewegung wird, wenn sie schneidend im Bauteil stattfindet, Wirkweg l_e genannt (siehe Abbildung 4.3). Ohne die Überlagerung wird die Strecke Schnittweg l_c genannt. Der Schnittweg ist der schneidend zurückgelegte Weg der Werkzeugschneide in Schnittrichtung und entspricht der Bogenlänge eines Schneideneingriffs. Unter der bei der Holzbearbeitung geltenden Bedingung, dass aufgrund der hohen Drehzahl die Vorschubgeschwindigkeit gegenüber der Schnittgeschwindigkeit sehr klein ist ($v_f \ll v_c$), wird der Wirkweg mit dem Schnittweg gleichgesetzt.

Ebenfalls wird im Modell nicht zwischen Gleichlauf- und Gegenlaufräsen unterschieden. Etwaige Verschleißeffekte werden vernachlässigt.

4.3.2 Einflussgrößen auf den Werkzeugverschleiß

Die Haupteinflussgrößen für den auftretenden Verschleiß sind Schnittweg, Vorschubgeschwindigkeit und Schnittgeschwindigkeit, wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben. Auftretende Unwucht wird vernachlässigt.

Faktoren, die keinen Einfluss auf das Modell haben, sind die Streuung der Materialeigenschaften des Schneidstoffes und die Streuung der Materialeigenschaften des Werkstoffs. Der Werkstoff MDF ist aufgrund des Herstellungsverfahrens ein sehr homogener Werkstoff.

4.3.3 Werkzeugverschleißart

Der auftretende Schneidenversatz ist Verschleiß aufgrund von Abrasion. Abrasion ist laut Norm der Materialabtrag durch furchende oder ritzende Beanspruchung (DIN 50323:1993). Unter Abrasion wird der mechanische abschabende Abrieb verstanden. Das Modell behält seine Gültigkeit lediglich, wenn neben Abrasion kein weiterer Schneidmaterialverlust durch Brechen der Schneide oder durch Herauslösen größerer Stücke während der Bearbeitung auftritt. Bei Hartmetallwerkzeugen ist der abrasive Verschleiß dominant (Tröger et al. 2015, S. 41).

Fazit zu den Annahmen:

Die Annahmen wurden getroffen, um potenzielle auftretende Sonderfälle und unübliche Prozesssituationen auszuschließen. In Bezug auf das erstellte Modell wird dadurch die Geltung erhöht.

4.4 Voraussetzungen

Damit das Modell seine Funktionsweise erfüllen kann, müssen folgende Gegebenheiten bzw. Vorbedingungen vorliegen:

4.4.1 Identifizierung des Werkzeuges

Eine Voraussetzung ist die eindeutige Identifizierung des Werkzeuges. Die Identifizierung dient zur prozesssicheren Unterscheidung von baugleichen Schwesterwerkzeugen. Um diese Unterscheidung durchführen zu können, muss ein System etabliert sein, das einen Nummernkreis definiert und Nummern (*IDs*) vergibt. Diese Nummern müssen dazu noch auf dem Werkzeug angebracht sein (z.B. durch Barcode oder *RFID*) und zuverlässig gelesen werden können.

4.4.2 Schnittstelle zur Werkzeugmaschinensteuerung

Eine Voraussetzung an die Werkzeugmaschine ist die Kompatibilität mit einer Schnittstelle zum Versenden von Daten aus der Steuerung (beispielsweise *OPC-UA*, *MTConnect* oder *Dynamic Data Exchange*). Darüber hinaus muss die Steuerung über eine ausreichend hohe Rechenkapazität verfügen, um aktualisierte Nachrichten in einem Intervall von kleiner als ca. 50 ms versenden zu können.

4.4.3 Kontextdaten aus Datenbanken

Die Kontextdaten über den ablaufenden Prozess müssen aus weiteren Datenbanken wie Enterprise-Resource-Planning und Werkzeugverwaltung über definierte Schnittstellen (beispielsweise *RESTful API* oder Remote Procedure Call) angesprochen werden können. Die dort eingepflegten Daten, wie Fertigungsauftrag und Werkzeuge, müssen auf dem aktuellen Stand sein und der Wirklichkeit entsprechen.

4.5 Modellansatz

Die Grundlage für das Lösungsmodell sind Daten aus den Steuerungen der Werkzeugmaschinen, ebenso wie Daten aus produktionsnahen IT-Systeme, um den Kontext zu den Maschinendaten herzustellen.

Dieser Ansatz, fortlaufend aus gemessenen Abweichung des Prozesses, Maßnahmen abzuleiten, wird durch moderne IT-Werkzeuge, wie die Integration von Werkzeugmaschinen in Informationssysteme, auch für zyklische große Datenmengen automatisierbar (Westkämper et al. 2013; Bauernhansl 2014).

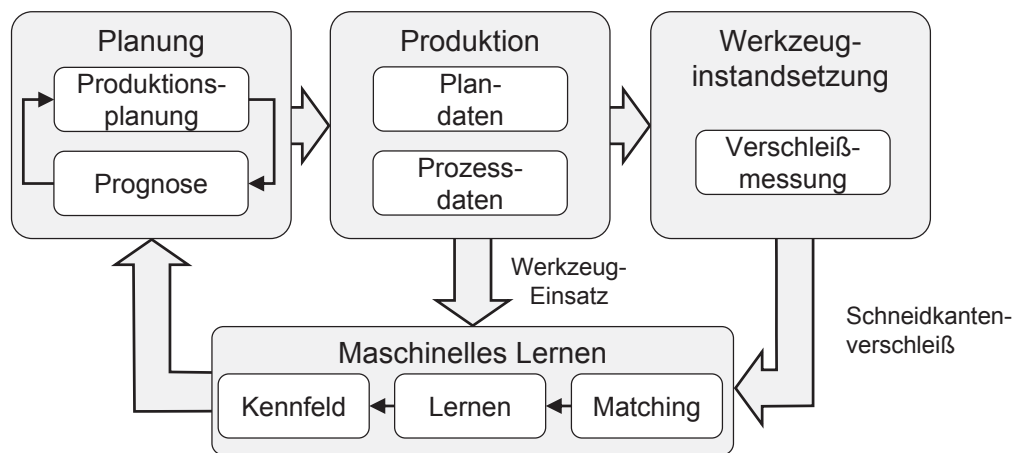


Abbildung 4.4: Unternehmensorganisatorische Sicht des Informationsflusses (Lenz et al. 2016)

Abbildung 4.4 zeigt einen Überblick über den angestrebten Informationsfluss, um Werkzeugeinsatzdaten für Lernzwecke zu verwenden. Um diesen Ansatz automatisiert umzusetzen, muss er auf das Werkzeugwesen adaptiert werden. Hieraus ergeben sich die Ziele der Arbeit, ein Modell zu entwickeln, das den angestrebten Informationsfluss abbilden wird.

Im Modell wird ein neuartiger Ansatz der Datenerfassung verfolgt. Basierend auf Werkzeugmaschinensteuerungsdaten und Kontextdaten über den Fertigungsauftrag und das Werkzeug werden Standwegangaben abgeleitet, die sich auf den tatsächlich spanend zurückgelegten Weg eines Werkzeuges, den Schnittweg l_c , beziehen und dadurch prozessbedingte Änderungen gegenüber der geplanten Bahnkurve des Werkzeuges (Lenz et al. 2017) beinhalten.

Die Abbildung 4.5 zeigt die Datensicht auf den Modellansatz. Hierbei sind die Quellen und die Zielgröße der Berechnungen dargestellt. Der Schnittweg ist durch den Zusammenhang der Abhängigkeit von Vorschubweg, Werkzeugdurchmesser, Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit und Arbeitseingriff errechenbar. Um den Schnittweg präzise zu berechnen, ist es unabdingbar, zu wissen, wann das Werkzeug im Eingriff ist und mit welcher Zustellung es arbeitet.

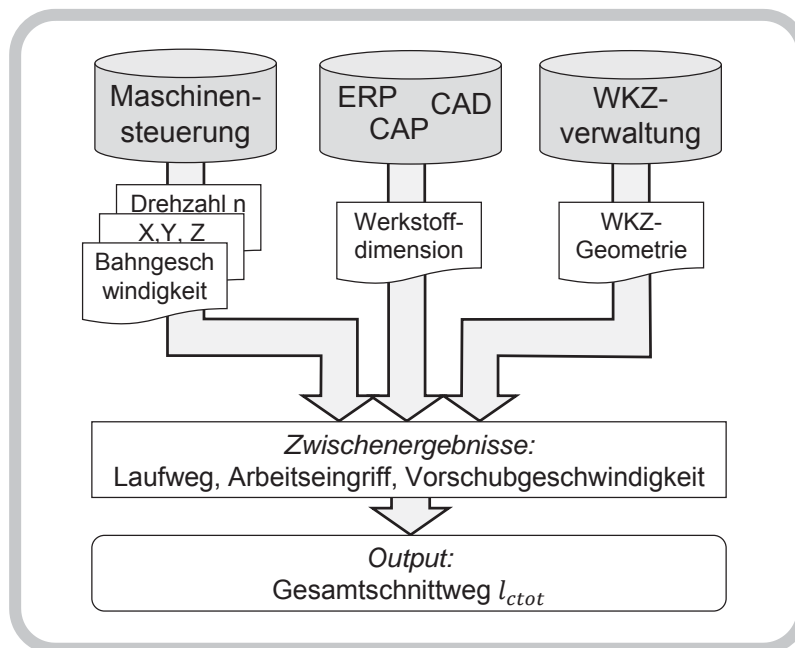


Abbildung 4.5: Ansatz des Modells mit Input- und Outputgrößen

Die dafür erforderlichen Informationen können lediglich durch das in Kontext setzen der Daten der Werkzeugmaschinensteuerung, der Auftragsdatenverwaltung und der Werkzeugverwaltung gewonnen werden.

4.5.1 Prozessbeobachtung

Der gewählte Ansatz bezieht sich auf eine indirekte Beobachtung des Prozesses. Die Beobachtung findet durch die in der Werkzeugmaschine verbauten Sensoren statt. Diese sind dort bereits integriert, da Sie zur Erfüllung der Steuerungsaufgaben benötigt werden. Die Messwerte der Sensoren werden über die Werkzeugmaschinensteuerung weitergeleitet.

Der Ansatz benötigt lediglich fünf Variablen aus der Werkzeugmaschinensteuerung. Dies führt zu einer breiten Kompatibilität zu allen Steuerungstypen und einer nachvollziehbaren transparenten Berechnung der Prozesseigenschaften. Die verwendeten Ist-Daten aus den Nachrichten der Steuerung bestehen aus folgenden Variablen:

- Zeitstempel
- X/Y/Z-Achsposition
- Drehzahl
- Bahngeschwindigkeit
- NC-Satz.

Diese Ist-Daten werden dazu ergänzt mit Plan-Daten aus den beiden Datenbanken Auftragsverwaltung und Werkzeugverwaltung, um den Kontext des Bearbeitungsprozesses mit Fertigungsauftrag und eingesetztem Werkzeug, herzustellen. Folgende Plan-Daten werden für den Ansatz verwendet:

- Werkstoff (Werkstoff-ID)
- Rohteilabmessungen
- Werkzeug-ID (Tool-ID)
- Werkzeugabmessung.

Sie werden in das Modell eingespeist, und es werden jeweils für eine Werkstoff-/Schneidstoffpaarung Verschleißfaktoren erlernt.

4.5.2 Erfasste Prozessgrößen

Anstatt der Protokollierung der zurückgelegten Wegstrecke eines Werkzeuges wird unter Einbeziehung der Rohteilkontur nur die Wegstrecke erfasst, bei der das Werkzeug im Eingriff ist, ohne An- und Wegfahrbewegungen. Ebenso wird die reale Bahngeschwindigkeit des Zerspanungsprozesses mit einbezogen, indem Verzögerungs- und Beschleunigungsvorgänge, die im Zusammenspiel der programmierten Kontur und der Achsbeschleunigungen entstehen, vollständig erfasst werden. Durch die zyklische Online-Erfassung der Variablen fließt jede Änderung – beispielweise in der Eingriffssituation des Werkzeuges, der Vorschubgeschwindigkeit und der Drehzahl – in die Standwegberechnung mit ein und bildet somit eine lückenlose Historie. Das ermöglicht eine vollständige Abbildung des Prozesses während der Nutzungsdauer jedes Werkzeuges. Die relevanten Prozessgrößen für die Modellierung sind Schnittgeschwindigkeit, Schnittweg und Vorschubgeschwindigkeit (siehe Kapitel 3.2.4).

Der Schnittweg hat den größten Einfluss auf den Verschleiß (Fischer 1996; Fischer 1997). Es entstehen bei konstanten Prozessparametern mit fortschreitendem Schnittweg Verschleißkennlinien in Form von Wurzelfunktionen. Diese Kennlinien weisen, ausgehend vom Ursprung, einen exponentiellen Fortschritt auf, der in einen degressiven Teil übergeht und anschließend einen linearen Fortschritt zeigt.

Die Vorschubgeschwindigkeit ist die Drehzahl des Fräasers, multipliziert mit dem Zahnvorschub. Dieser hat ebenfalls einen großen Einfluss auf den Verschleiß (Licher 1993). Licher hat aufgezeigt, wie bei sich änderndem Zahnvorschub die Schnittkräfte variieren und welchen Einfluss diese auf den Verschleiß haben. Durch den sich im Prozess ändernden Zahnvorschub ist es unabdingbar, die realen Ist-Daten aufzunehmen.

Die Zielgrößen des Modells sind der Verschleißfortschritt in Form des Schneidkantenversatzes sowie die Qualität der entstehenden Kante in Form der Kantenschartigkeit. Beide Zielgrößen hängen zusammen und sind daher nicht unabhängig voneinander zu betrachten. Zunehmender Verschleiß ergibt eine Verschlechterung der Qualität und somit eine Erhöhung der Kantenschartigkeit (Licher 1993; Fuss 1995).

4.5.3 Lernen aus Prozessgrößen

Nachdem die Daten erfasst wurden, folgen die Berechnung der Prozessgrößen und die Messungen der physikalischen Größen. Durch die Verknüpfung beider Datensätze, indem lückenlos der Werkzeugeinsatz mit den Resultaten in Verbindung gebracht wird, kann der Zusammenhang zwischen den Prozessgrößen und den Zielgrößen Verschleiß und Qualität hergestellt werden. Dieser Zusammenhang kann ohne organisatorischen Mehraufwand gelernt und das Gelernte in Form von Verschleißfaktoren und Qualitätsfaktoren ausgedrückt werden.

4.5.4 Fazit des Modellansatzes

Der Modellansatz besteht aus vier Aspekten: der Datengewinnung aus Werkzeugmaschinensteuerung bzw. Verwaltungssysteme, der Berechnungslogik für das Gewinnen der Prozessgrößen, dem Lernmodell für Prognosefaktoren und der Kostenerfassung. Der mit dieser Arbeit verfolgte Ansatz bietet mehrere Vorteile. Es besteht kein Bedarf an Installation zusätzlicher Sensorik. Die in der Werkzeugmaschine bereits verbaute Hardware ist ausreichend. Es entstehen geringe operationale Kosten, da keine Verschleißversuche gefahren werden müssen, denn die Parameteraufnahme erfolgt während den regulären Produktionsbedingungen. Abbildung 4.6 zeigt eine Übersicht über den Modellansatz.

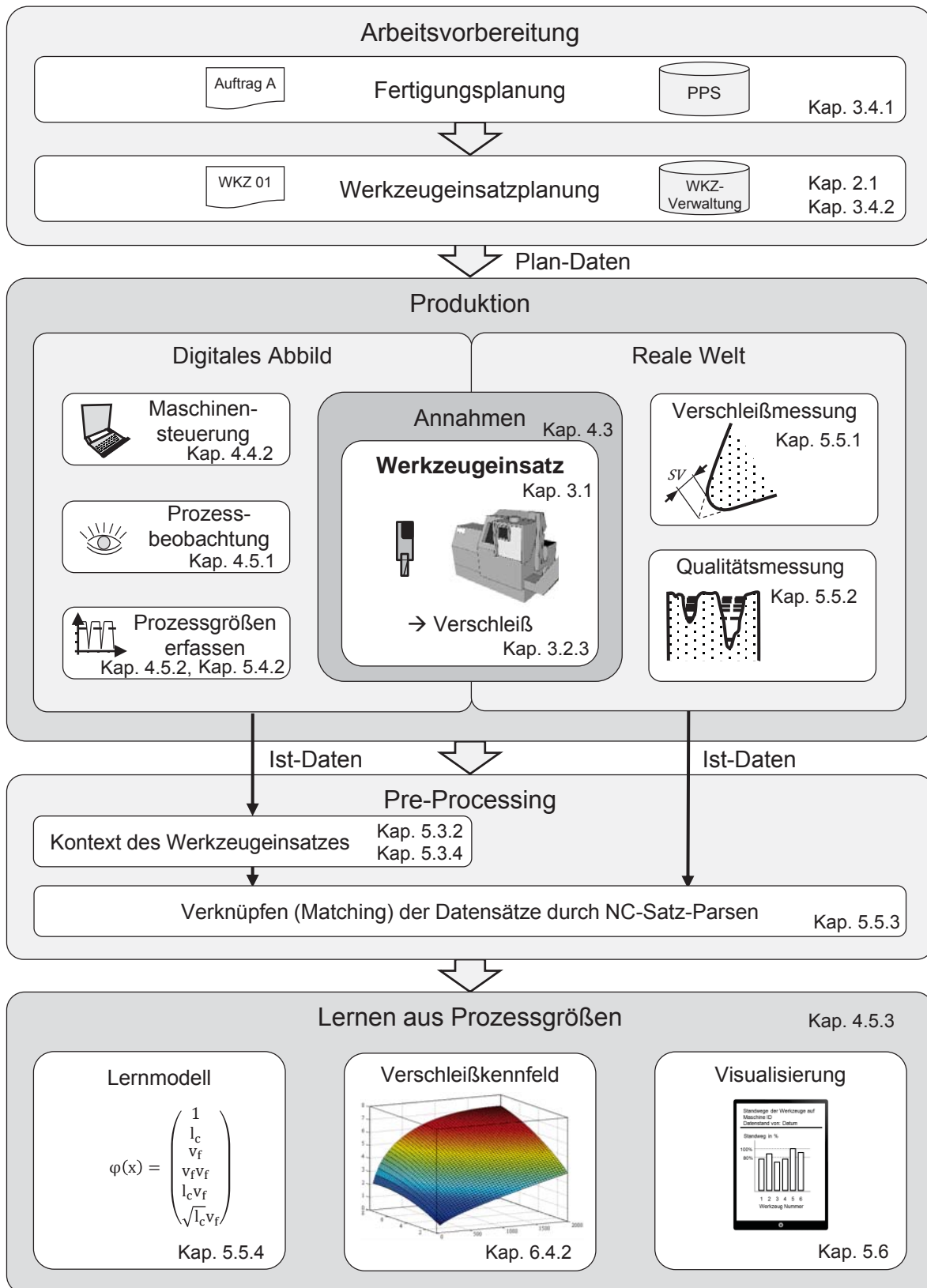


Abbildung 4.6: Modellansatz

5 Detaillierung des Modells

Die detaillierte Beschreibung des Modells für das Online-Erfassen und Auswerten von Werkzeugverbrauchsdaten erfolgt durch das Aufzeigen der notwendigen Schritte der Berechnungsreihenfolge. Aufbauend auf der Verschleiß- und Qualitätsprognose wird eine einsatzabhängige Werkzeugkostenbetrachtung vorgestellt. Darüber hinaus wird ein Visualisierungskonzept präsentiert, das veranschaulicht, wie die gewonnenen Daten dargestellt werden können.

5.1 Überblick über das Modell

Die Abbildung 5.1 zeigt einen Überblick über das Modell mit den zwei Berechnungssträngen und den Datenquellen.

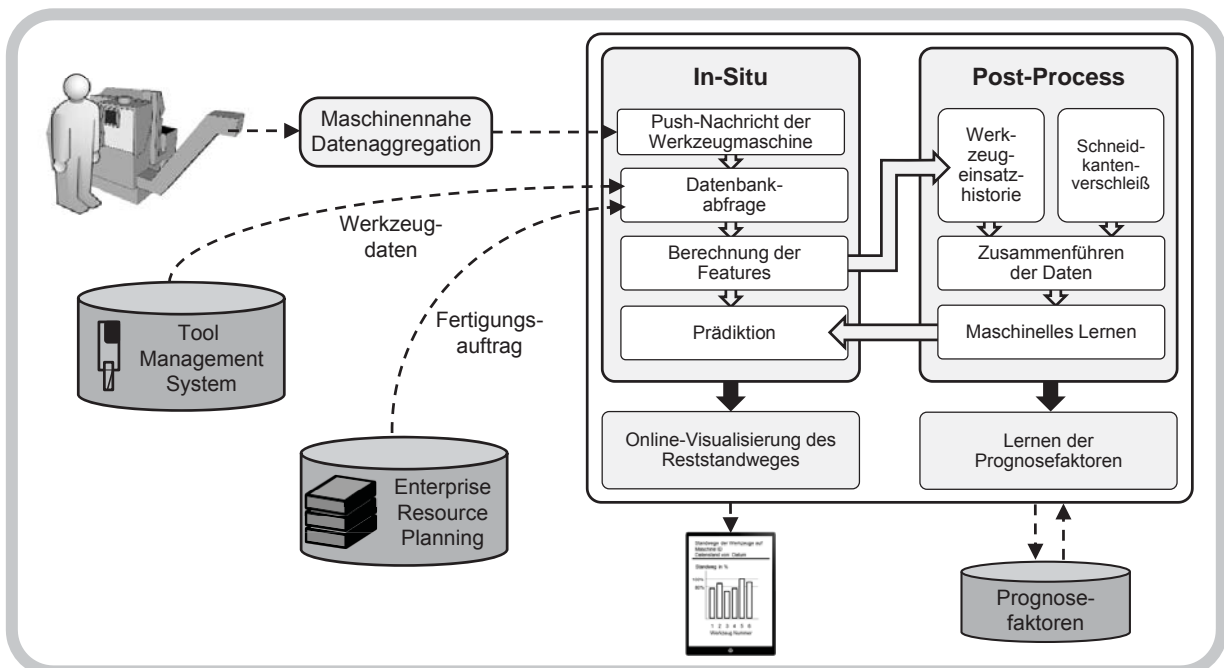


Abbildung 5.1: Überblick über Schritte und Ablauf des Modells

Als Datenquellen werden die Steuerung der Werkzeugmaschine, das Werkzeugverwaltungssystem und das zentrale Planungssystem benutzt. Das Modell sieht zwei prozedurale Berechnungsstränge vor. Der eine Berechnungsstrang findet während des Prozesses (In-Situ) statt. Hierfür werden Initialisierungen benötigt, die in Subroutinen stattfinden. In-Situ bedeutet, es werden die Daten aus der Steuerung der Werkzeugmaschine verarbeitet, bevor neue hinzukommen. Der andere Strang findet nach dem Prozess statt, zum Zeitpunkt der Messung des tatsächlichen physikalischen Verschleißes an der Werkzeugschneide. Darauf folgend werden Berechnungen

ausgelöst, die die Daten mit den Prozessdaten vereinen und aus der Kombination wirkpaarungsspezifische Prognosefaktoren (Verschleißfaktoren und Qualitätsfaktoren) berechnen.

5.2 Informationsmodell

Das Informationsmodell, siehe Abbildung 5.2, gibt einen Überblick über die Funktionsbausteine des Modells, die Objekte und deren verwendete Variablen. Die Funktionsbausteine lassen sich in die Fertigungsauftragsverwaltung (ERP) (1), den Administration-Service (2), den Schnittweg-Service (3), die Werkzeugverwaltung (Tool Management) (4) sowie die Werkzeugmaschine (5) ausmachen. In den folgenden Unterkapiteln wird die Interaktion dieser fünf Akteure in Sequenzdiagrammen dargelegt. Diese Bausteine erfüllen jeweils einen spezifischen Zweck im Modell:

1. Die Fertigungsauftragsverwaltung (ERP) wird für das Modell aufgrund des Kontextes zu dem auf der Werkzeugmaschine befindlichen Rohteil benötigt. Hierzu werden die Daten des Auftrages und des dazugehörigen Produktes und Arbeitsplanes standardisiert abgerufen (VDI 5600:2013; DIN EN 62714:2015).
2. Der Service „*Administration*“ ist für den Ablauf der Initialisierung des Modells zuständig. Hier wird überprüft, ob alle Initialbedingungen erfüllt sind, und es werden Subroutinen gestartet.
3. Der Service „*Schnittweg*“ führt bei Erhalt der Nachricht von der Werkzeugmaschinensteuerung die Berechnungen der Prozessgrößen aus.
4. Die Werkzeugverwaltung (*Tool Management*) hat jedes einzelne Werkzeug und dessen Merkmale (ISO13399:2006) gespeichert. Die für das Modell relevanten Merkmale sind die geometrische Beschreibung gemäß Norm (DIN 4000:2012; DIN 4003:2014) und die Werkzeugreferenzpunkte für die Holzbearbeitung (VDMA 2014). Zusätzlich zu den Werkzeugbeschreibungen werden die Werkzeugeinsatzhistorie und die jeweiligen Vermessungen des Werkzeuges mit Referenz der Tool-ID hier abgelegt.
5. Die Werkzeugmaschine sendet echtzeitnah eine Nachricht mit den jeweils aktuellen Variablenwerten.

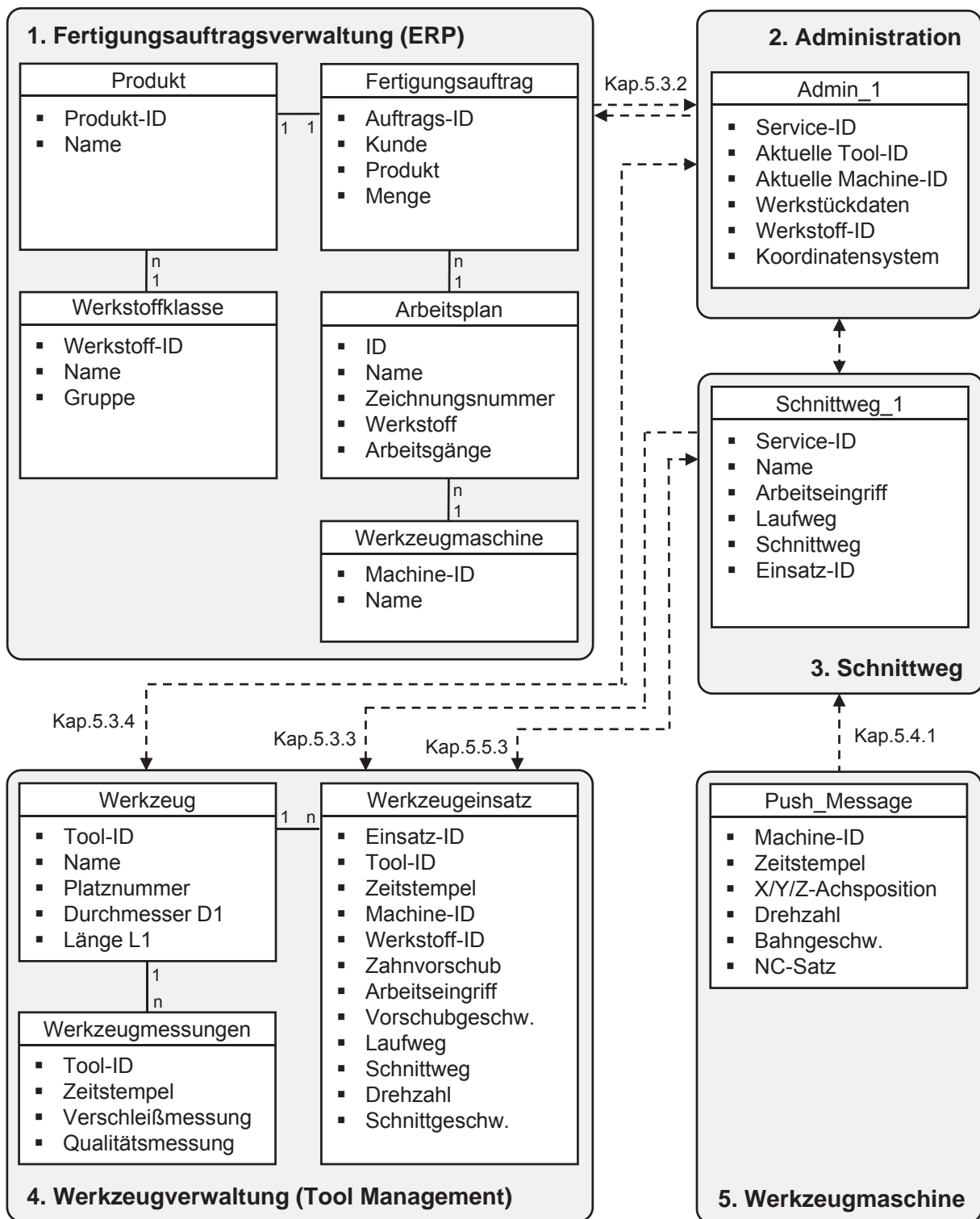


Abbildung 5.2: Informationsmodell mit Beziehungen und Funktionsbausteinen

5.3 Subroutinen

Voraussetzung für das Ablaufen des Hauptdatenflusses ist die Initialisierung. Die Initialisierung besteht aus folgenden Teilen:

- dem Auslesen der Materialkennwerte aus den Fertigungsprogrammdateien durch Erkennen des aktuellen NC-Programms,
- dem Erkennen des aktuell im Eingriff befindlichen Werkzeuges und dem Laden der Werkzeuggeometriedaten
- der momentanen Konfigurationssituation des Koordinatensystems
- der aktuellen Einstellung der Fräserradiuskompensation sowie
- dem Generieren des Rasters des aktuell auf der Werkzeugmaschine befindlichen Werkstückes bzw. Rohteiles.

Die Subroutinen gliedern sich in die Analyse des aktuellen NC-Satzes und in die von dort aus getriggerten Abfragen (Fertigungsauftrag und Werkzeugdaten) und Systemeinstellungen. Die Systemeinstellungen sind im Einzelnen Bauteilgröße, Bauteillage und Koordinatensystemkorrektur.

5.3.1 Analyse des aktuellen NC-Satzes

Ein Parser ist laut Lexikon „eine Software, die den Datenstrom eines Dokumentes analysiert und entsprechend der Syntax aufbereitet“ (Computerlexikon 2017). Diese grammatikalische Analyse, angewandt auf die eintreffenden NC-Sätze, bereitet die für das Modell relevanten Informationen über das aktuelle Programm, das aktuelle Werkzeug und die aktuelle Koordinatensystemkorrektur strukturiert auf. Der NC-Parser zerlegt den von der Werkzeugmaschine aktuell bearbeiteten Satz in die einzelnen Wörter (nach DIN 66025:1983).

In Abbildung 5.3 ist der Programmablaufplan des NC-Parsers abgebildet. Nachdem ein passendes Wort gefunden wurde, wird das entsprechende Unterprogramm gestartet. Das Modell sieht vier Unterprogramme vor: die Fertigungsauftragsabfrage, das Versenden der Werkzeugeinsatzdaten, die Werkzeugdatenabfrage und die Koordinatensystemkorrektur.

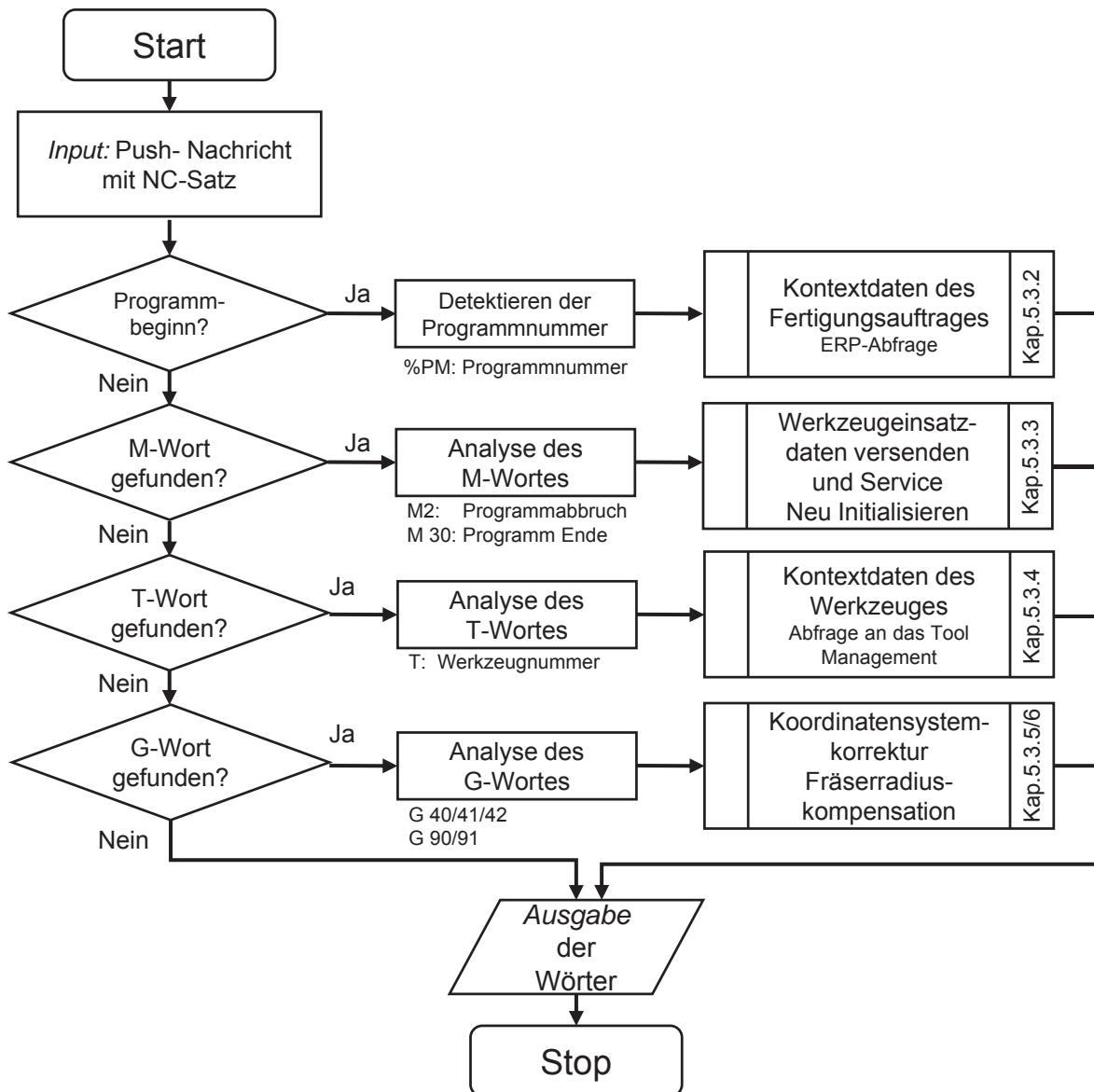


Abbildung 5.3: Programmablaufplan des NC-Parsers

5.3.2 Fertigungsauftragsabfrage

Die Fertigungsauftragsabfrage wird angestoßen durch die erkannte Programmnummer, die in der Regel zu Beginn des NC-Programms festgelegt ist. In Kombination mit der Werkzeugmaschine, auf der das Programm abläuft, kann es einem eindeutigen Fertigungsauftrag zugeordnet werden.

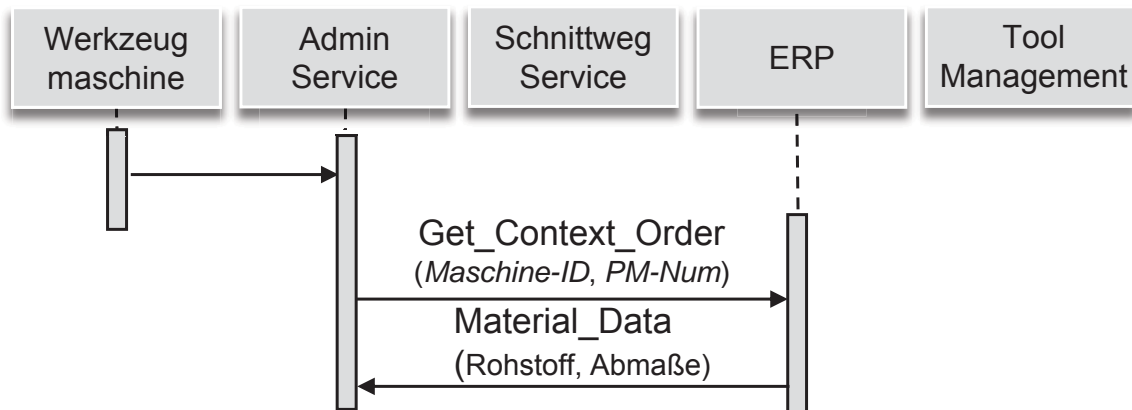


Abbildung 5.4: Sequenzdiagramm bei detektiertem NC-Programmbeginn

In Abbildung 5.4 ist die Sequenz der Abfrage dargestellt. Sie fragt nach Rohteilabmessungen und dem verwendeten Werkstoff. Die Abfrage enthält die Übergabewerte der Programmnummer und der Maschine, auf der das Programm ausgeführt wird.

5.3.3 Zentrales Speichern der Werkzeugeinsatzdaten

Bei erkanntem Programmende, Programmabbruch oder bei einem Werkzeugwechsel werden die bis zu diesem Zeitpunkt angesammelten lokal gespeicherten Werkzeugeinsatzdaten an die Werkzeugverwaltung geschickt. Die Werkzeugeinsatzdaten werden zu der aktuellen *Tool-ID* geschrieben und sind daher später eindeutig zuordenbar.

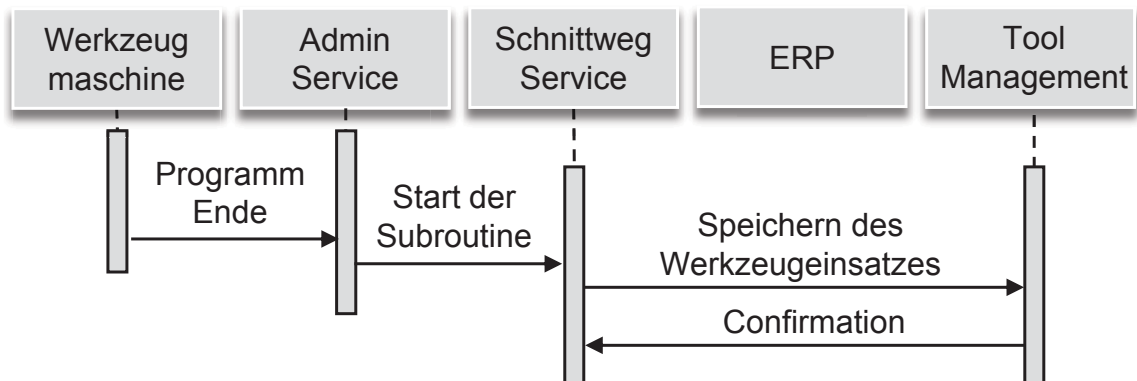


Abbildung 5.5: Sequenzdiagramm des Werkzeugeinsatzdatenspeichervorgangs

In Abbildung 5.5 ist der Ablauf des Speichervorgangs der Werkzeugeinsatzdaten dargestellt. Der Grundgedanke ist, dass der Speichervorgang nicht nach dem Ende jeder einzelnen Berechnung stattfindet, sondern nach Ereignissen, die einen abgeschlossenen Einsatz des Werkzeuges bedeuten. Abgeschlossene Werkzeugeinsätze sind nach einem Werkzeugwechsel, am Programmende oder bei Programmabbruch zu verzeichnen. Nach erfolgreichem Speichern und Erhalt der Bestätigung kann der lokale Puffer geleert werden. Somit können keine Aufzeichnungen verloren gehen und eine Doppelzählung wird vermieden.

Die Werkzeugeinsatzdaten bestehen aus den errechneten Prozessgrößen, aus Metadaten und Zwischenergebnissen, um den Einsatz zu einem späteren Zeitpunkt lückenlos nachvollziehen zu können. Tabelle 5.1 zeigt die Metadaten der Werkzeughistorie.

Tabelle 5.1: Metadaten der Werkzeughistorie

Metadaten	Datenformat	Beispiel
Tool-ID	Integer.Integer	105003342.0001
Zeitstempel	Epoch/ Unix Time	1471008326203
Maschinen-ID	String_Integer	Maschine_1754

Die aufgenommenen Variablen der Werkzeughistorie sind in Tabelle 5.2 gelistet. Die letzten drei Variablen sind die Prozessgrößen, die für die Modellierung des Verschleißverhaltens benötigt werden.

Tabelle 5.2: Einsatzdaten der Werkzeughistorie

Einsatzdaten	Datenformat	Bemerkung
Werkstoff	Integer	MDF
Zahnvorschub	Double	dimensionslos
Arbeitseingriff	Double	Einheit: mm
Drehzahl	Integer	Einheit: 1/min
Vorschubgeschwindigkeit	Double	Einheit: mm/min
Schnittweg	Double	Einheit: m
Schnittgeschwindigkeit	Double	Einheit: m/s

5.3.4 Werkzeugdatenabfrage

Die Werkzeugdatenabfrage wird angestoßen durch einen im NC-Satz erkannten Werkzeugwechsel. In Abbildung 5.6 ist der Ablauf der Abfrage dargestellt. Die Abfrage *GetKontext()* wird mittels der Werkzeugnummer und der *ID* der Maschine durchgeführt und bekommt die Geometrie des Werkzeuges als Rückmeldung.

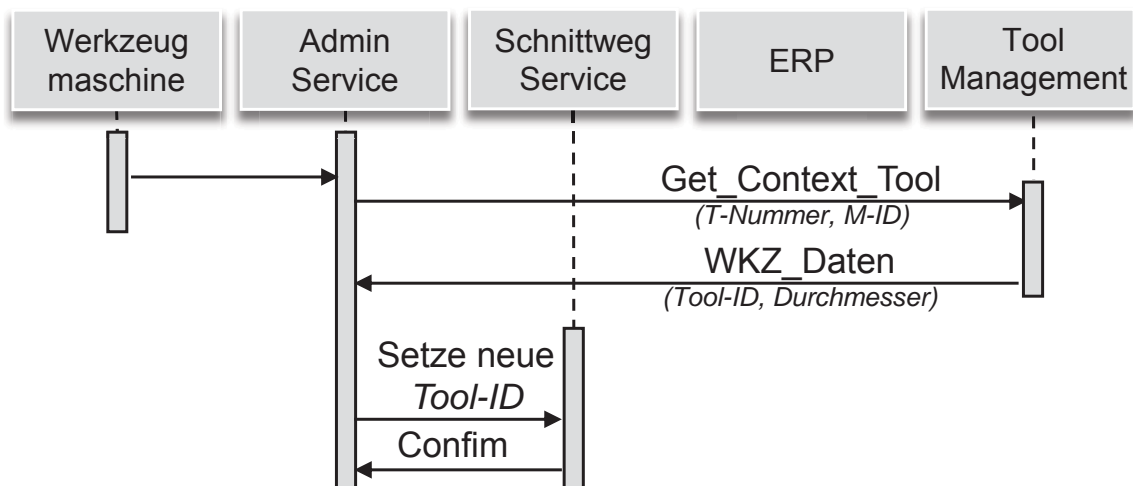


Abbildung 5.6: Sequenzdiagramm bei detektiertem Werkzeugwechsel

5.3.5 Koordinatensystemkorrektur

Die Hinterlegung der exakten Positionen von Werkstück und Werkzeug gelten als Grundvoraussetzungen für spätere Berechnungen. Durch die vorrangige Abfrage (Kapitel 5.3.2) nach den im Fertigungsauftrag hinterlegten Abmaßen und der Form des Rohteiles (Länge x und Breite y) muss nun die Position des Rohteiles festgesetzt werden. In der Regel werden bei Holzbearbeitungsmaschinen die Platten an festen Anschlägen ausgerichtet. Die Positionen dieser Anschläge sind maschinenspezifisch und müssen daher vorab hinterlegt werden.

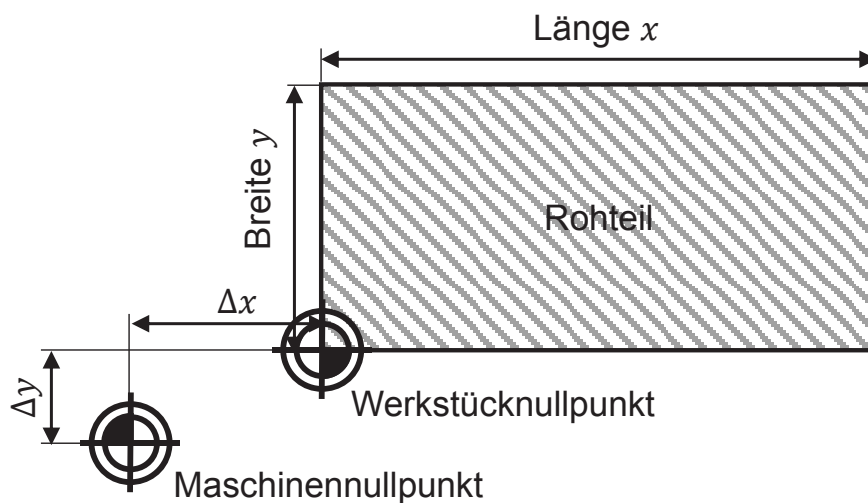


Abbildung 5.7: Versatz zwischen Werkstücknullpunkt und Maschinennullpunkt

Abbildung 5.7 zeigt den nun bekannten Versatz zwischen dem Werkstücknullpunkt und dem Maschinennullpunkt. Die Abbildung stellt den Versatz als Δx und Δy dar. Der Maschinennullpunkt wird meist innerhalb des Programmablaufes verschoben, um ein einfacher zu lesendes und zu erzeugendes Programm benutzen zu können. Diese Verschiebungen des Koordinatensystems werden bei der NC-Analyse (Kapitel 5.3.1) erkannt und berücksichtigt. Die neue Nullpunktsetzung findet statt bei der Verwendung der normgemäßen G-Code-Befehle und des Norm-Bezugssystems (ISO 3002:1982) durch folgende G-Worte. Bei G90 sind die Koordinatenangaben absolut. Bei G91 sind die Koordinatenangaben im Kettenmaß. G53 deaktiviert die Nullpunktverschiebung und G54-G59 aktivieren die Nullpunktverschiebung 1-6. Mit Kenntnis über diese Information steht die Verschiebung der Achskoordinatenausgabe fest und somit die Position des Werkstückes.

5.3.6 Fräserradiuskompensation

Die Fräserradiuskompensation ermöglicht es, Werkstückkonturpunkte direkt zu programmieren. Es muss daher keine Fräsermittelpunktsbahn (Äquidistante) vorab gerechnet werden. Für das Modell ist der aktuelle Modus der Kompensation relevant. Bei angewählter oder abgewählter Kompensation verändert sich dementsprechend die Ausgabe der Achspositionen.

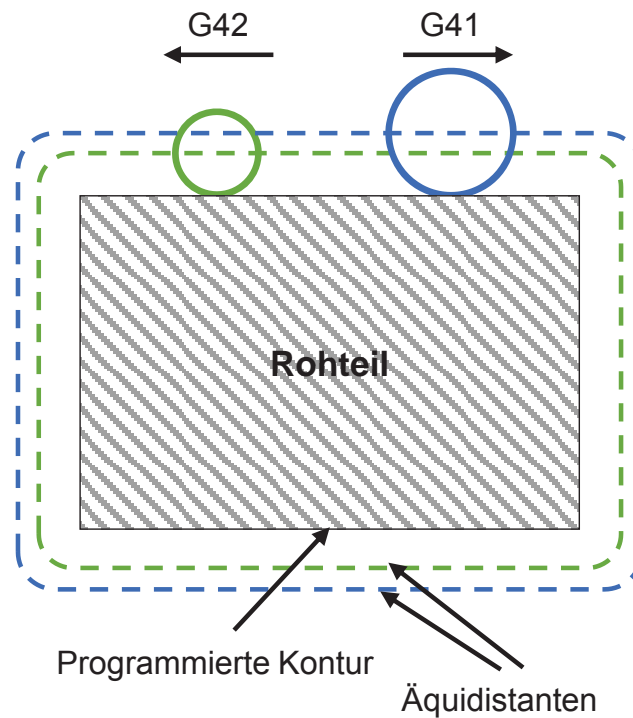


Abbildung 5.8: G-Worte der Fräserradiuskompensation

Abbildung 5.8 verdeutlicht den Sachverhalt der Fräserradiuskompensation. Es existieren hierbei nach Norm (DIN 66025:1983) drei G-Worte. G40 deaktiviert die Fräserradiuskompensation. G41 aktiviert die Fräserradiuskompensation links der beschriebenen Kontur und G42 aktiviert die Fräserradiuskompensation rechts der beschriebenen Kontur.

5.3.7 Generieren des Rasters des Rohteiles

Nachdem die Rohteilabmessungen und die Koordinatensystemkorrektur Abfrage erfolgte kann das Raster des aktuell auf der Werkzeugmaschine befindlichen generiert werden. Das Raster stellt eine Notwendigkeit für die Berechnung des Arbeitseingriffs dar.

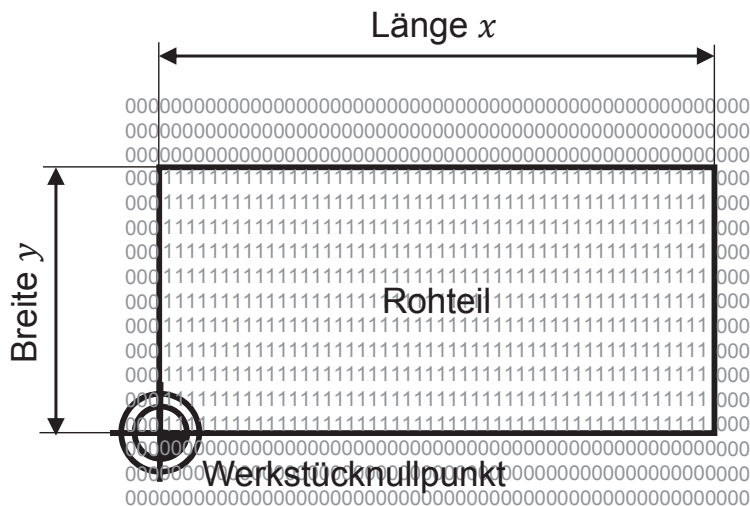


Abbildung 5.9 Generiertes Raster des Rohteils

Abbildung 5.9 zeigt ein beispielhaftes Raster, das als Feld (engl. *array*) mit zweiwertigen (binären) booleschen Variablen angelegt wurde.

Das Anlegen der Rohteilinformation in Form eines Rasters ist Ausgangssituation für das dynamische Update der Rohteilinformation nach jedem erfassten Wegsegment der Werkzeugbewegung (siehe Kapitel 5.4.3).

5.4 In-Situ-Flow

Der In-Situ-Flow wird in der Geschwindigkeit durchlaufen, in der die Nachrichten von der Werkzeugmaschine kommen. In Abbildung 5.10 sind die Einzelschritte dargestellt (Ausschnitt aus Abbildung 5.1).

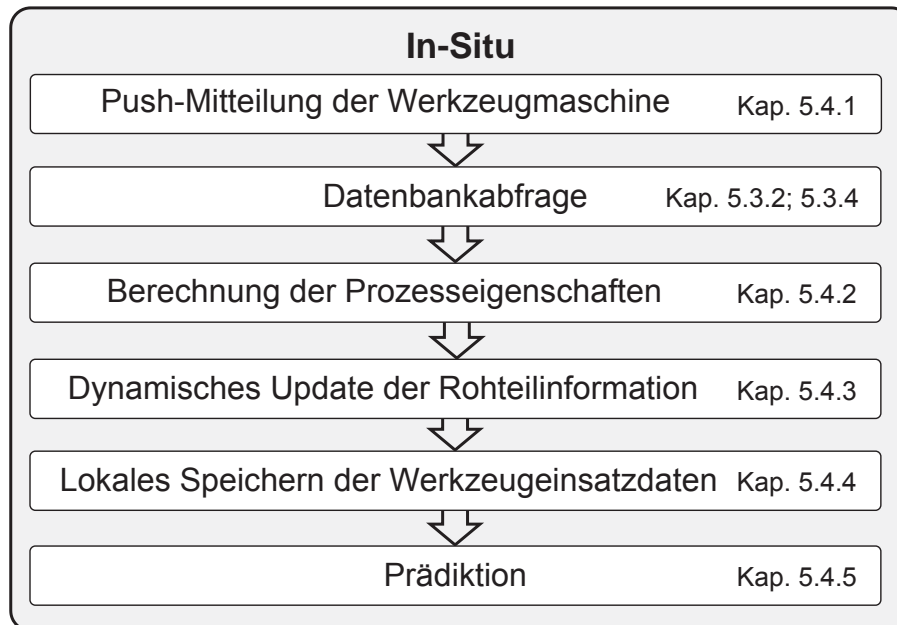


Abbildung 5.10: Einzelschritte des In-Situ-Flows

Die Berechnungen gliedern sich in das Versenden der Nachricht der Werkzeugmaschinensteuerung, die Datenbankabfragen im Falle von Änderungen der gegebenen Randbedingungen (Werkzeug, Programm), die Berechnung der Prozesseigenschaften (Vorschubgeschwindigkeit, Schnittgeschwindigkeit Schnittweg), das dynamische Update der Rohteilinformation, das lokale Speichern der Einsatzdaten und die Prädiktion der Zielvariable (Verschleiß, Qualität).

5.4.1 Push-Mitteilung der Werkzeugmaschine

In Abbildung 5.11 ist die Sequenz der Hauptroutine mit den hierbei beteiligten Systemen dargestellt. Die Werkzeugmaschinensteuerung sendet die Push-Mitteilung an den Schnittweg-Service (vgl. Abbildung 5.2). Dieser kann nun mit den Kontextdaten aus der Initialisierung die Berechnung der Prozessgrößen durchführen. Anschließend werden die Daten in dem Service lokal gespeichert und eine Prognose über die Reststandzeit des Werkzeuges durchgeführt. Die Prognose kann nun über die graphische Darstellung (*graphical user interface*; GUI) ausgegeben werden.

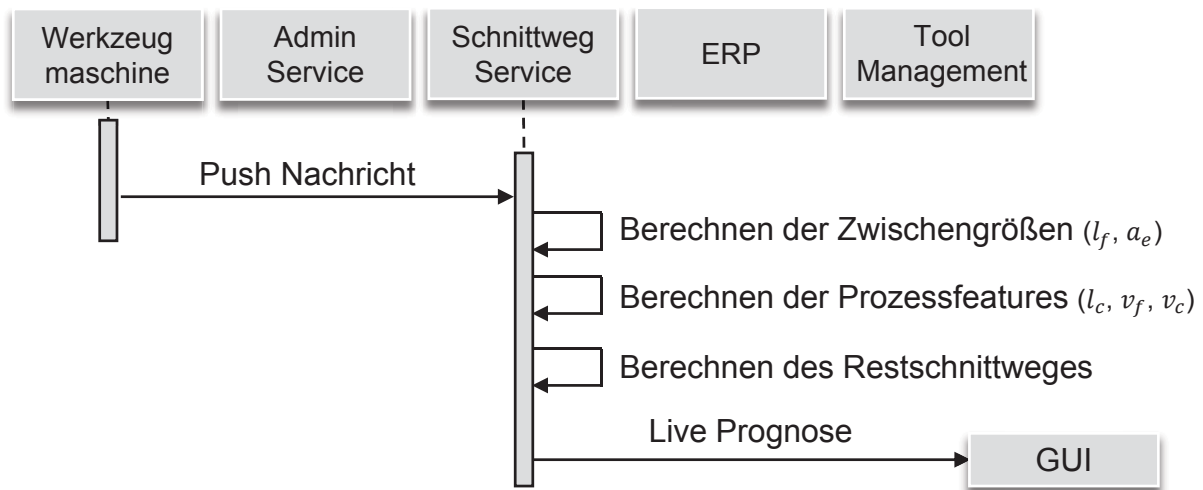


Abbildung 5.11: Sequenzdiagramm der Berechnung der Prozesseigenschaften

Die aus der Maschinensteuerung ausgelesenen Variablen entstammen entweder direkt aus den in der Werkzeugmaschine verbauten Sensoren oder aus Variablen im Speicher der Steuerung. Die vom Werkzeugmaschinenhersteller verbauten Sensoren sind Teil des Wegmesssystems oder ein Teil der Spindelregelung. Die Nachricht ist ereignisgesteuert, das heißt, sie wird lediglich dann versendet, wenn Variablenänderungen vorliegen.

Bevor die Nachrichten von der Werkzeugmaschinensteuerung als Input in das Modell gelangen, muss ein Vorbereiten (Pre-Processing) der Daten stattfinden. Eine typische Aufgabe dieses Bereinigens ist das Eliminieren des Zitterns von Variablen im Ruhezustand. Das Vorkommen solcher Sprünge zwischen zwei Werten ist beispielsweise bei Wegmesssystemen der Fall. In Tabelle 5.3 sind alle für das Modell notwendigen Variablen der Push-Nachricht von der Werkzeugmaschinensteuerung aufgelistet.

Tabelle 5.3: Variablen der Push-Nachricht

Variablenname	Einheit	Bemerkung
Zeitstempel	Millisekunde	Epoc / Unix Time
X/Y/Z-Achsenposition	mm	Im Maschinenkoordinatensystem
Drehzahl	1/min	Im Uhrzeigersinn positiv
NC-Satz	Text	z.B. für das Erkennen von Werkzeugwechsel
Bahngeschwindigkeit	mm/min	Mittelpunkt des Werkzeuges

5.4.2 Berechnung der Prozesseigenschaften

Die für das Modell relevanten Prozesseigenschaften (engl. *Features*) sind die Vorschubgeschwindigkeit, die Schnittgeschwindigkeit und der Schnittweg. Nachfolgend wird die Berechnung dieser Features erläutert.

5.4.2.1 Berechnung der Vorschubgeschwindigkeit

Die Vorschubgeschwindigkeit v_f ist der Vorschubweg l_f pro Zeiteinheit t . Sie lässt sich im Prozess berechnen aus dem Streckenunterschied des aktuellen und des vorherigen Punktes und die verstrichene Zeit zwischen den beiden Zeitstempeln der Ortsinformation, siehe Gleichung 5.1.

$$v_f = \frac{l_f}{t} = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{\Delta timestamp} \quad (5.1)$$

Die Vereinfachung einer Gerade zwischen den beiden Punkten ist bei der kurzen verstrichenen Zeit ein zu vernachlässigender Fehler.

5.4.2.2 Berechnung der Schnittgeschwindigkeit

Die Schnittgeschwindigkeit v_c ist die relative Geschwindigkeit zwischen Werkstück und Schneide des Werkzeuges. Dies ist bei einem Fräswerkzeug die Umfangsgeschwindigkeit.

$$v_c = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot n \quad (\text{Denkena et al. 2011, S. 7}) \quad (5.2)$$

Diese errechnet sich durch Durchmesser und Drehzahl, siehe Gleichung 5.2.

5.4.2.3 Berechnung des Schnittweges

Der Schnittweg l_c ist der zurückgelegte Weg der Schneide im Eingriff (DIN 6583:1985). Als Prämisse zur Berechnung des Schnittweges müssen die relative Lage des Rohteiles und die Dimension des Rohteiles ermittelbar sein. Aufbauend auf diesen Initialbedingungen können anschließend für jedes Wegsegment mit eingehender Nachricht der Werkzeugmaschine die Zwischengrößen Laufweg l_f und Arbeitseingriff a_e ermittelt werden. Abschließend kann nun, mit der aktuell vorliegenden Eingriffssituation, für das aktuelle Wegsegment resultierend der Gesamtschnittweg l_{c_tot} berechnet werden. Im Folgenden sind die Herleitung der Schnittwegberechnung und die Berechnung der Zwischenergebnisse dargelegt.

Berechnung des Laufweges:

In Abbildung 5.12 sind drei konsekutive Positionen des Werkzeuges zu sehen. Der Laufweg ist die Summe der Strecken der jeweiligen Wegsegmente S_n zwischen den Werkzeugpositionen.

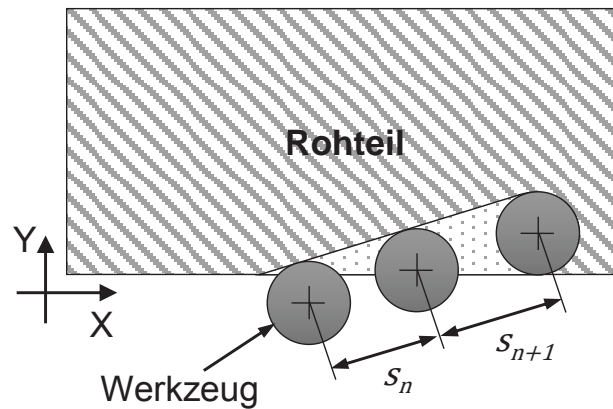


Abbildung 5.12: Wegsegmente während der Bearbeitung

Unter Anwendung der X-/Y-Achskoordinaten und des Hypotenusensatzes werden die jeweiligen Wegsegmentstrecken ermittelt.

Berechnung des Arbeitseingriffs:

Der Arbeitseingriff a_e ist laut Norm „die Größe des Eingriffes des Werkzeuges, gemessen in der Arbeitsebene und senkrecht zur Vorschubrichtung“ (DIN 6580:1985). Bei der Formatbearbeitung bzw. beim Nesting-Prozess ist dies der variable Eingriff. Die Schnittbreite a_p des Werkzeuges, die Tiefe des Eingriffes des Werkzeuges, gemessen senkrecht zur Arbeitsebene, ist gleich der Dicke der Platte, da sie in der Regel vollständig durchtrennt werden soll.

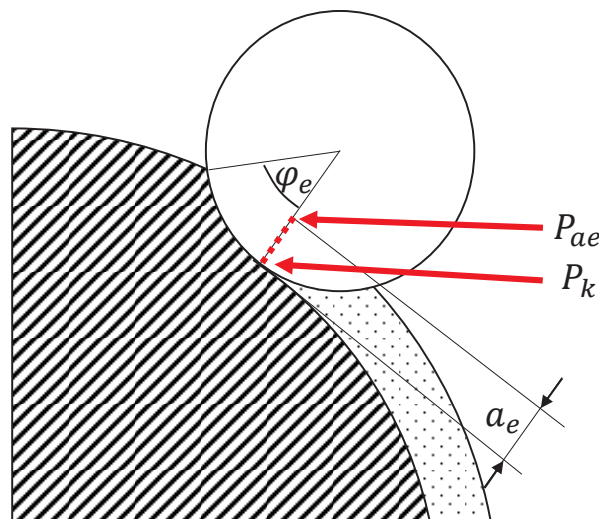


Abbildung 5.13: Geometrische Beschreibung des Arbeitseingriffs

In Abbildung 5.13 ist andeutungsweise ein Werkzeug bei einer Außenkonturbearbeitung zu sehen. Bei Fräserradiuskompensation bildet der konturerzeugende Punkt P_k eine gedachte Linie durch den Punkt des bisherigen Rohteilendes, den Punkt des aktuellen Arbeitseingriffes P_{ae} , hin zum Mittelpunkt des Werkzeuges.

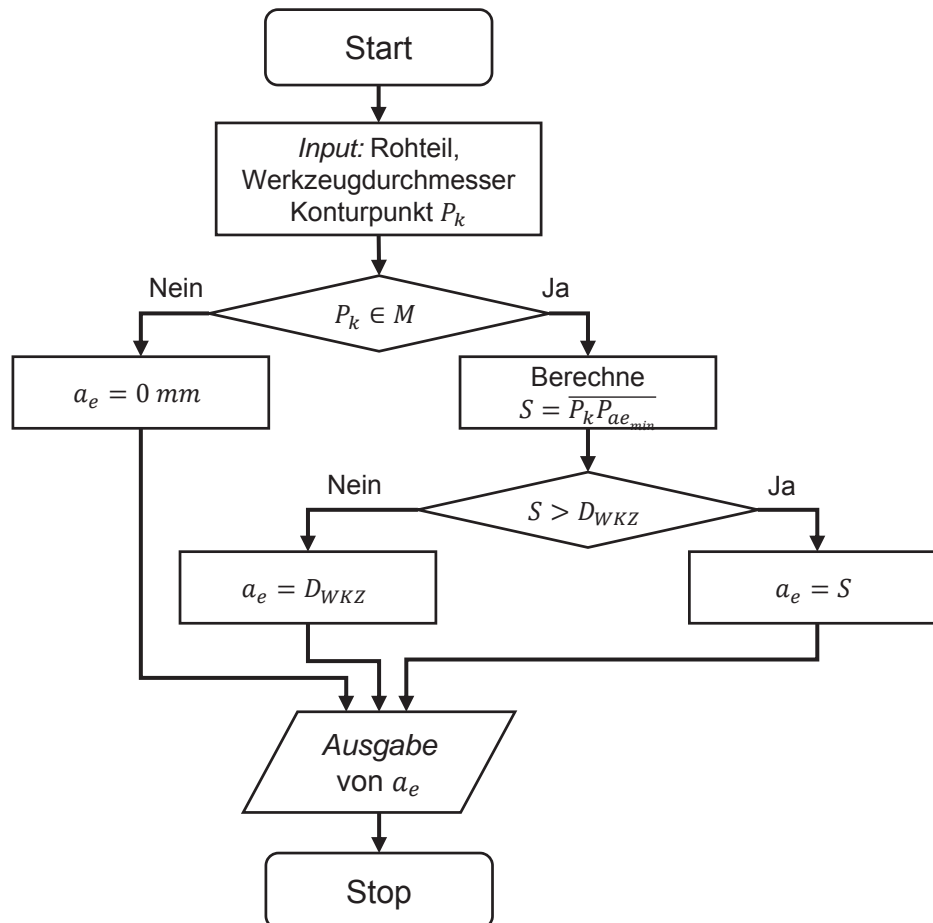


Abbildung 5.14: Programmablaufplan der Berechnung des Arbeitseingriffs

In Abbildung 5.14 ist das Vorgehen bei der Berechnung des Arbeitseingriffs dargestellt. Die erste Verzweigung ist die Überprüfung, ob sich der Punkt P_k innerhalb der aktuellen Rohteilgeometrie (Menge M) befindet. Falls dies der Fall ist, wird die Strecke S von P_k nach P_{ae} berechnet. Die erste Verzweigung ist die Überprüfung, ob die Strecke größer als der Durchmesser D_{WKZ} des aktuell verwendeten Werkzeuges ist – dies würde bedeuten, dass das Werkzeug sich in Volleingriff befindet, das heißt der Arbeitseingriff ist dem Durchmesser des Werkzeuges gleichzusetzen, andernfalls ist der Arbeitseingriff gleich der Strecke S .

Berechnung des Gesamtschnittweges:

Da nun über das aktuelle Wegsegment alle benötigten Informationen wie Vorschubgeschwindigkeit, Laufweg und Arbeitseingriff vorliegen, kann der Gesamtschnittweg berechnet werden. Im Folgenden wird die Herleitung der hierfür verwendeten Gleichung aufgezeigt.

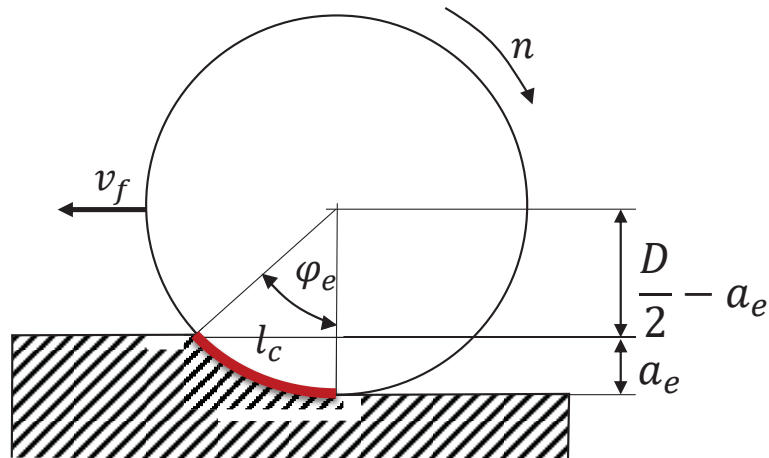


Abbildung 5.15: Schnittweg der Schneide im Werkstück (Tschätsch et al. 2016)

Der in Abbildung 5.15 links dargestellte Eingriffswinkel φ_e lässt sich berechnen wie in Gleichung 5.3 aufgezeigt.

$$\varphi_e = \arccos\left(\frac{1-2 \cdot a_e}{D}\right) \quad (\text{Maier 2000, S. 45}) \quad (5.3)$$

Das Ergebnis der Berechnung des Kreisbogens b mit Mittelpunktswinkel α im Bogenmaß, siehe Gleichung 5.4, ergibt die Wegstrecke der Schneide im Material für eine Umdrehung des Werkzeuges. Der Kreisbogen b ist in Abbildung 5.15 rot dargestellt. Dies entspricht dem Schnittweg einer Umdrehung für eine Schneide.

$$b = r \cdot \alpha = \frac{D}{2} \cdot \varphi_e \quad (5.4)$$

Um den Gesamtschnittweg zu erhalten, wird die Anzahl der Schnitte n_c für die Wegstrecke des zurückgelegten Laufwegs l_f berechnet, siehe Gleichung 5.5.

$$n_c = \frac{l_f}{f_z} = \frac{l_f \cdot n \cdot z}{v_f} \quad (\text{Maier 2000, S. 70}) \quad (5.5)$$

Hierbei wird der Zahnvorschub f_z durch die Drehzahl n , die Zähnezahl z und die Vorschubgeschwindigkeit v_f ersetzt.

Durch einsetzen der Gleichungen 5.3 und 5.5 in Gleichung 5.4 ein, werden alle Kreisbogensegmente berechnet, die innerhalb des zurückgelegten Laufwegs spanend zurückgelegt werden. Dies ist der Gesamtschnittweg $l_{c\ tot}$ des Werkzeuges, siehe Gleichung 5.6.

$$l_{c\ tot} = \frac{D \cdot l_f \cdot n \cdot z \cdot \arccos(1 - 2 \frac{a_e}{D})}{2000 \cdot v_f} \quad (\text{Licher 1993, S. 9}) \quad (5.6)$$

Bei einem einschneidigen Werkzeug entfällt die Zähnezahl z .

5.4.3 Dynamisches Update der Rohteilinformation

Die in der Initialisierungsphase angelegte Rohteilinformation wird stetig mit der Information des aktuell bearbeiteten Wegsegmentes ergänzt und dient somit wieder als Ausgangsbasis für den nachfolgenden Bearbeitungsschritt. Mehrfachbearbeitungen und Räumzyklen zum Abtragen größeren Volumens werden somit korrekt berücksichtigt. Ebenfalls bleibt die Information nach einem Werkzeugwechsel erhalten und aufeinanderfolgende Bearbeitungsschritte wie Schruppen und Schlichten können somit korrekt berechnet werden.

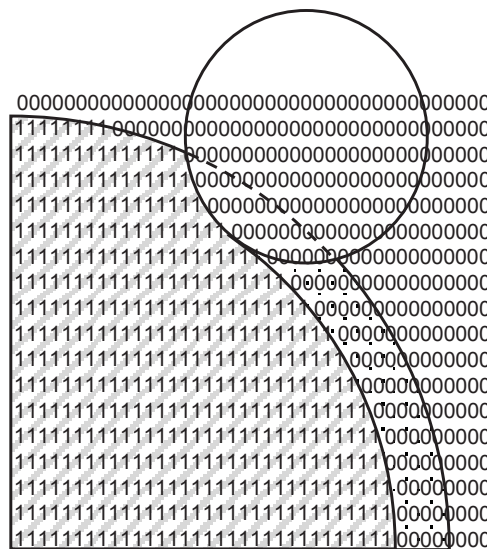


Abbildung 5.16: Dynamisches Speichern der Rohteilkontur

In Abbildung 5.16 ist die Repräsentation der aktuellen Rohteilinformation nach erfolgtem Update mit dem aktuellen Wegsegment zu sehen.

5.4.4 Lokales Speichern der Werkzeugeinsatzdaten

Um eine ständige Kommunikation mit der Datenbank der Werkzeugverwaltung zu vermeiden, werden die Daten im Service lokal gespeichert und aggregiert versendet. Dieses Versenden an ein zentrales System findet nach abgeschlossenem Werkzeugeinsatz statt, siehe Abbildung 5.3. Die zentrale Speicherung ist notwendig, da somit ermöglicht wird, Werkzeuge auf verschiedenen Werkzeugmaschinen einzusetzen.

5.4.5 Durchführung der Prognose

Um anhand der Verschleißfaktoren eine Prognose des aktuellen Verschleißes in Form des Schneidkantenversatzes abgeben zu können, werden die aktuellen Prozessgrößen dem Historienverlauf hinzugefügt und mit den Verschleißfaktoren verrechnet. Die nun aktuelle Historie wird bis zum Zeitpunkt t integriert. Dies ergibt, wie in Gleichung 5.7 zu sehen, den prognostizierten Zielwert \widehat{SV} .

$$\hat{y}(t) = \widehat{SV} = \int_0^t x(t)^T_i \hat{\beta} \quad (5.7)$$

Der anhand von Qualitätskriterien definierte Werkzeuggrenzwert, Tool Limit (TL), siehe Kapitel 5.5.4, wird mit dem prognostizierten Zielwert \widehat{SV} verrechnet, siehe Gleichung 5.8. Das ergibt den Restschneidkantenversatz (RestSV).

$$RestSV = TL - \widehat{SV} \quad (5.8)$$

Es wird nun ausgehend von der bisherigen Werkzeugeinsatzhistorie der restliche Schnittweg bei aktueller Vorschubgeschwindigkeit ermittelt. Nun kann die Standgröße (Restschnittweg) durch das nun bekannte Standvermögen (Verschleißfaktoren) durch Eingabe der Standbedingungen (aktueller Vorschub) und Standkriterium (RestSV) errechnet werden.

5.5 Post-Prozess-Ablauf

Der Post-Prozess-Ablauf gliedert sich in drei Schritte. Er beginnt mit der Verschleißmessung am Werkzeug bzw. weiteren Messungen, die Aussagen über den aktuellen Werkzeugzustand geben, etwa der Kantenschartigkeit. Der zweite Schritt ist das *Matchen* (dt. Abgleichen) der Werkzeugeinsatzdaten, die bereits im Prozess erfasst wurden, mit den gemessenen Daten. Der letzte Schritt ist das Lernen von neuen Prognosefaktoren (Verschleißfaktoren bzw. Qualitätsfaktoren).

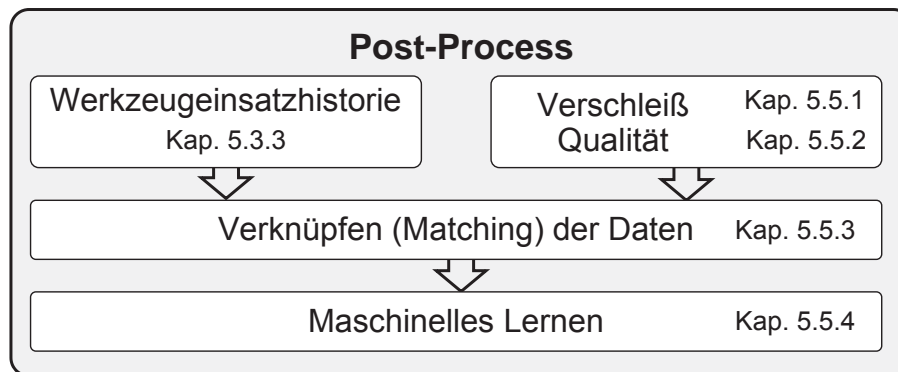


Abbildung 5.17: Schritte im Post-Prozess-Ablauf

Abbildung 5.17 zeigt die chronologischen Schritte des Post-Prozess-Ablaufs. (Ausschnitt aus Abbildung 5.1).

5.5.1 Verschleißmessung am Werkzeug

In Abbildung 5.18 sind die Kenngrößen in einem zweidimensionalen Schnitt durch die Schneide dargestellt. Eine der beiden Kenngrößen ist der Schneidkantenversatz (SV). Die Messung des Schneidkantenversatzes entlang der Tangente an der Schneidkante wird im Tastschnittverfahren nach DIN 3274 (DIN 3274:1998) durchgeführt.

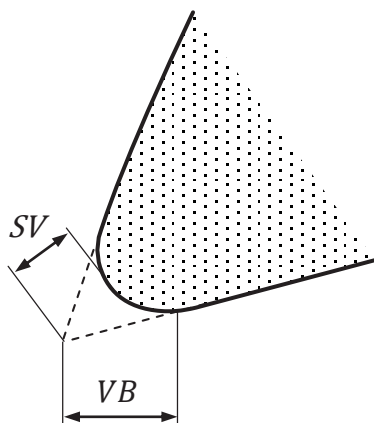


Abbildung 5.18: Kenngrößen an der Werkzeugschneide

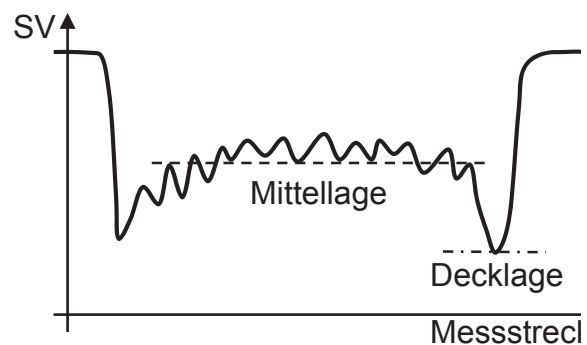


Abbildung 5.19: Messprofil einer Schneide

In Abbildung 5.19 wird die Messung einer Schneide durch das Tastschrittverfahren schematisch dargestellt. Aus den Messungen der erstmalig vermessenen Schneide und der aktuell gemessenen Schneide entsteht das Differenzprofil. Daher kann am Anfang und Ende der Messung (rechter und linker Rand in der Abbildung) kein Schneidkantenversatz gemessen werden. Die weiteren Bestandteile der Messung gliedern sich in die Decklage und die Mittellage. In der Decklage liegt aufgrund der Beschichtung der Holzwerkstoffplatte ein hoher Schneidkantenversatz vor. In der Mittellage wurde der homogene Werkstoff zerspannt. Daher ist hier keine größere Schwankung zu erwarten.

Der für die Arbeit verwendete SV-Wert definiert sich über das arithmetische Mittel aller gemessenen Werte in der Mittellage, siehe Gleichung 5.9.

$$\overline{SV}_{arithm} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SV_i = \frac{SV_1 + SV_2 + \dots + SV_i}{n} \quad (5.9)$$

Der ermittelte SV-Wert wird zusammen mit der zur Messung gehörenden Meta-Daten Tool-ID und Timestamp gespeichert und kann so mit der Einsatzhistorie des vermessenen Werkzeuges in Zusammenhang gebracht werden. Eine Instandsetzung des Werkzeuges beinhaltet ohnehin vor dem Nachschleifvorgang eine Messung des Schneidkantenversatzes.

5.5.2 Qualitätsmessung der Kantenbeschaffenheit

Die Messung des Kantenausbruchs erfolgt durch den gewichteten Mittelwert. Der Mittelwert bildet sich aus der Summe aller ermittelten Breitenwerte w_n , geteilt durch die Bildbreite w_i .

$$a_{w_avg} = \frac{\sum_{n=1}^{w_i} g(w_n) \cdot w_n}{w_i} \quad (\text{IfW 2013, S. 15}) \quad (5.10)$$

Gleichung 5.10 zeigt die Berechnung der gewichteten mittleren Kantenschartigkeit. Zusätzlich zum Messwert werden die *Tool-ID* und der Zeitpunkt der Messung festgehalten. Die Qualitätsmessung der Kantenqualität muss vor dem nächsten Prozessschritt erfolgen.

5.5.3 Matching der Werkzeugeinsätze mit physikalischen Messdaten

Das Zusammenbringen der Werkzeugeinsatzdaten mit den physikalischen Messdaten ist nicht an einen starren zeitlichen Ablauf gebunden. Die Werkzeugdaten werden aufgenommen, während der Prozess stattfindet und bei abgeschlossenem Werkzeugeinsatz an die zentrale Werkzeugverwaltung übermittelt. Die Aufnahme der Messdaten findet im Falle der Verschleißmessung wesentlich später statt und umfasst alle Werkzeugeinsätze, die das Werkzeug seit der letzten Instandsetzung durchlaufen hat. Diese Einsätze können verschiedene Bauteile umfassen und auf verschiedenen Werkzeugmaschinen erfolgen.

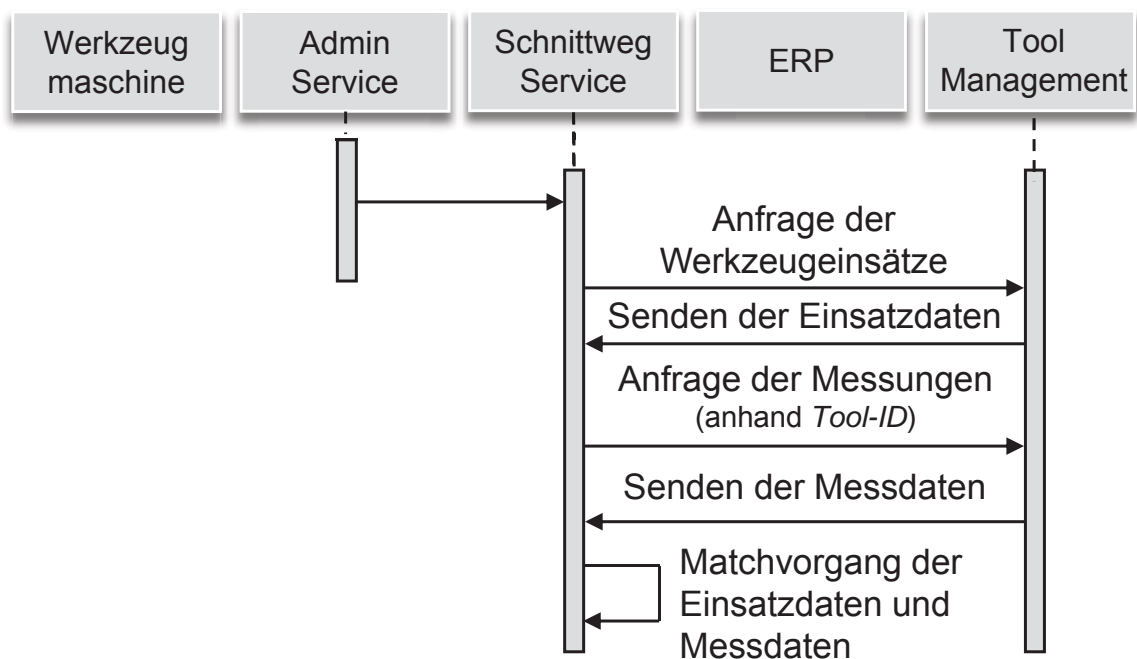


Abbildung 5.20: Sequenzdiagramm des Matchvorgangs der Daten

In Abbildung 5.20 ist die Datenabruflaufsequenz des Matchvorgangs dargestellt. Angestoßen wird der Prozess dadurch, dass neue Messungen verfügbar sind. Es werden zunächst alle Werkzeugeinsätze der identischen Schneidstoff-Werkstoffpaarung aus der Datenbank abgerufen. Anschließend werden die gespeicherten Messungen der Werkzeuge abgerufen, die auf diese Werkzeugeinsätze zutreffen. Zuletzt findet eine Set-Bildung statt, wodurch die Daten so aufbereitet werden, dass die Prozessgrößen der Werkzeugeinsätze, die zwischen zwei Messungen desselben Werkzeuges durchgeführt wurden, der entsprechenden Messung anhand der *Tool-IDs* und Zeitstempel zugeordnet werden.

5.5.4 Lernmodell

Das Lernmodell besteht aus der Modell-Funktion, der Loss Function und der Berechnung der optimalen Parameter.

Modell-Funktion

Das Modell beinhaltet eine Funktion, die den Input x auf einen Output y abbildet.

$$\dot{y}(t) = x(t)^T \beta \quad (5.11)$$

Der Input x besteht aus einer Kombination von drei Prozesseigenschaften (engl. *Features*):

- Schnittweg (l_c)
- Schnittgeschwindigkeit (v_c) und
- Vorschubgeschwindigkeit (v_f).

Der Input x wird als Vektor mit den Features ϕ (φ) dargestellt. Die Regressionsfaktoren im Einzelnen sind: die linearen Features, der quadratische Vorschub, die Wechselwirkung von Vorschub und Schnittweg und Wechselwirkung der Wurzel des Schnittweges sowie der Vorschub. Die Liste der Features wird um „1“ ergänzt, um β_0 abbilden zu können. In dieser Betrachtung wird die Schnittgeschwindigkeit vernachlässigt, da sie bei einer konstanten Drehzahleinstellung konstant bleibt. Die Gesamtdimension des Inputvektors φ ist daher von der Dimension \mathbb{R}^6 :

$$\varphi_{Wear} = \begin{pmatrix} 1 \\ l_c \\ v_f \\ v_f v_f \\ l_c v_f \\ \sqrt{l_c} v_f \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^6 \quad (5.12)$$

Der Output y der Funktion f ist der Schneidkantenversatz (SV). Eingesetzt in die Grundfunktion 5.11, lautet die Funktion des Modells wie folgt, 5.13:

$$\dot{SV} = x(t)^T \beta \quad (5.13)$$

Durch Ausmultiplizieren des Skalarprodukts ergibt sich eine Summe, siehe Gleichung 5.14.

$$\dot{SV} = x(t)^T = \beta_0 + \beta_1 l_c + \beta_2 v_f + \beta_3 v_f v_f + \beta_4 l_c v_f + \beta_5 \sqrt{l_c} v_f \quad (5.14)$$

Der Zielwert als physikalische Größe kann durch das Integrieren bis zum Zeitpunkt t bestimmt werden, siehe Gleichung 5.15.

$$SV = \int_0^t \dot{SV} dt \quad (5.15)$$

Die Integralgrenzen reichen vom Ursprungswert, sprich dem Neuzustand des Werkzeuges, bis zum aktuellen Zeitpunkt des Einsatzes.

Um die Laufvariablen der Datenaufnahmen an der Werkzeugmaschine von der Laufvariablen der Verschleißmessung am Werkzeug unterscheiden zu können, werden zwei Variablen definiert:

- Messpunkt der Werkzeugmaschine: $i = 1 \dots T$
- Verschleißmessungen des Werkzeuges: $n = 1 \dots K$

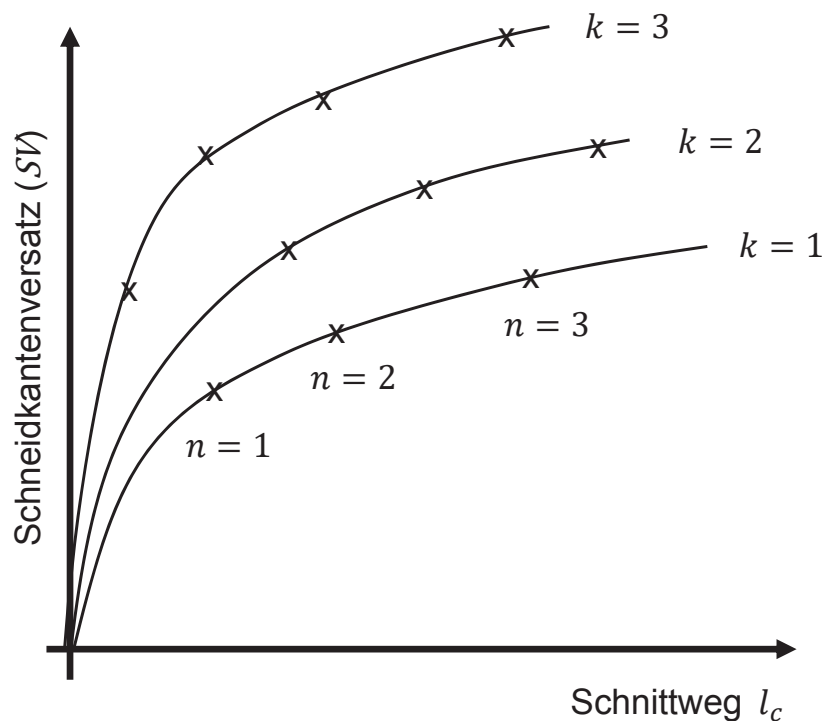


Abbildung 5.21: Nomenklatur der Messreihen

Die Bedeutung der beiden Laufvariablen n und k kann der Abbildung 5.21 entnommen werden. n gibt den Messpunkt eines Werkzeuges in einer Reihe an. k steht für die Reihe selbst.

Loss Function

Die Verlustfunktion (eng. *Loss Function*) entspricht der Summe aller Fehler. Ein Fehler ist die Differenz zwischen der Prognose und der echten Messung. Im Falle einer absolut korrekten Vorhersage ergibt die Verlustfunktion *Null*. Eine Variante, den

Verlust zu bewerten, ist die *squared loss function* (Kuhn et al. 2013). Das Gesamtstrafmaß aller Punkte ergibt sich aus der Quadrate der Summe der einzelnen Strafmaße, siehe Gleichung 5.16.

$$L(\beta) = \sum_{i=1}^n \left(\left(\int_0^{f_i} \dot{y}(t) dt \right) - y_i \right)^2 \quad (5.16)$$

Die Güte des Fehlers für ein Parameterset β für die jeweiligen Reihen k und deren Einzelwert n ergibt die Gesamtfunktion 5.17.

$$L(\beta) = \sum_{k=1}^{k_{max}} \sum_{n=1}^{N_k} (SV_n^k - \widehat{SV}_n^k)^2 \quad (5.17)$$

Berechnung der optimalen Parameter

Das Minimum der Verlustfunktion ist bei optimalen Parameter $\hat{\beta}$.

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (5.18)$$

Die Gleichung 5.18 zeigt die Berechnung der optimalen Parameter (vgl. Sen et al. 1996; Harrington 2012).

Bearbeitung unterschiedlicher Werkstoffe

Im Falle von Werkzeugeinsätzen desselben Werkzeuges bei Fertigungsaufträgen mit verschiedenen Werkstoffen werden pro Fertigungsauftrag Teilprognosen erstellt. Diese Anteile werden mit den jeweils verschiedenen Verschleißfaktoren des Werkstoffes durchgeführt. Somit wird die Historie lückenlos über die Fertigungsaufträge gebildet und der Schneidkantenverschleiß über mehrere verschiedene Werkstoffe hinweg prognostiziert, sofern für jeden Werkstoff die Verschleißfaktoren vorliegen.

Festlegen des Werkzeuggrenzwerts durch Qualitätsmessung

Der Werkzeuggrenzwert (engl. *Tool Life End* oder auch *Tool Limit*) ist der Zustand des Werkzeuges, ab dem eine Bearbeitung gemäß den Qualitätskriterien nicht mehr gewährleistet ist. Dieses Limit wird auch Standkriterium genannt. Das Standkriterium wird definiert über das Festlegen der maximal zulässigen Kantenausbrüche. Diese Größe, gemäß Kapitel 3.3, kann fest vorgegeben werden. Bei fester Vorgabe entspricht der Schneidkantenversatz einer Konstante, multipliziert mit der prognostizierten Kantenqualität. In erster Näherung, falls keine Qualitätsmessungen vorliegen, ist dieses Vorgehen legitim. Ein genaueres Prozessabbild stellt eine von den

Prozessparametern abhängige Qualitätsprognose dar. Dies bedeutet, dass bei verschiedenen Prozessparametern trotz gleichen Schneidkantenversatzes unterschiedliche Qualitätsergebnisse erzielt werden.

In Gleichung 5.19 ist das postulierte Regressionsmodell zum Erlernen der Qualitätsfaktoren zu sehen.

$$\varphi_{Qual}(x) = \begin{pmatrix} 1 \\ l_c \\ v_f \\ l_c l_c \\ v_f v_f \\ l_c v_f \end{pmatrix} \quad (5.19)$$

Es handelt sich hierbei um die beiden Prozessgrößen Schnittweg und Vorschubgeschwindigkeit, deren linearen und quadratischen Einfluss und die Wechselwirkung.

Zusammenfassung des Lernmodells

Das Lernmodell hat das Ziel, die Korrelation der Eingangsgrößen und der Zielgröße möglichst nahe dem physikalischen Prozess abzubilden. Hierzu werden die Eingangsgrößen Schnittweg, Schnittgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit verwendet. Die Zielgrößen sind für die Verschleißbeurteilung der Schneidkantenversatz und für die Qualitätsbeurteilung die Kantenschartigkeit. Mit dem gewählten Ansatz der Regressionsanalyse lässt sich eine Kausalität nicht zweifelsfrei nachweisen. Vielmehr vermag die Regressionsanalyse lediglich die Korrelationen zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen nachzuweisen. Dies ist zwar eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für Kausalität. Die Verknüpfung der klassischen Regressionsanalyse mit Ideen des maschinellen Lernens ermöglicht ein rasches Erlernen, da bereits physikalische Gesetzmäßigkeiten in der Modellfunktion hinterlegt sind. Des Weiteren werden durch jede hinzukommende Messung die Koeffizienten für jede Werkstoff-/Schneidstoffpaarung kontinuierlich verbessert. Das Lernmodell befindet sich daher in jedem Post-Prozess-Ablauf in der Lernphase. Die aktualisierten Koeffizienten bilden ein Kennfeld der Prozessparameter des Fräsprozesses ab. Dieses Kennfeld je Materialkombination erlaubt sowohl die Beurteilung des aktuellen Zustandes als auch eine Prognose des Verschleißes. Durch die Prognostizierung der Qualität kann der obere Werkzeuggrenzwert festgelegt werden.

5.6 Visualisierungskonzept

Eine grafische Benutzeroberfläche, auch GUI (engl. *graphical user interface*) genannt, wurde konzeptioniert, um die Daten visuell für den Nutzer einfach verständlich darzustellen. Ebenso wurde eine Eingabelogik beschrieben, die ohne manuelle Eingabe auskommt und sich über die verschiedenen Sichten zu allen verfügbaren Daten erstreckt, siehe Abbildung 5.22.

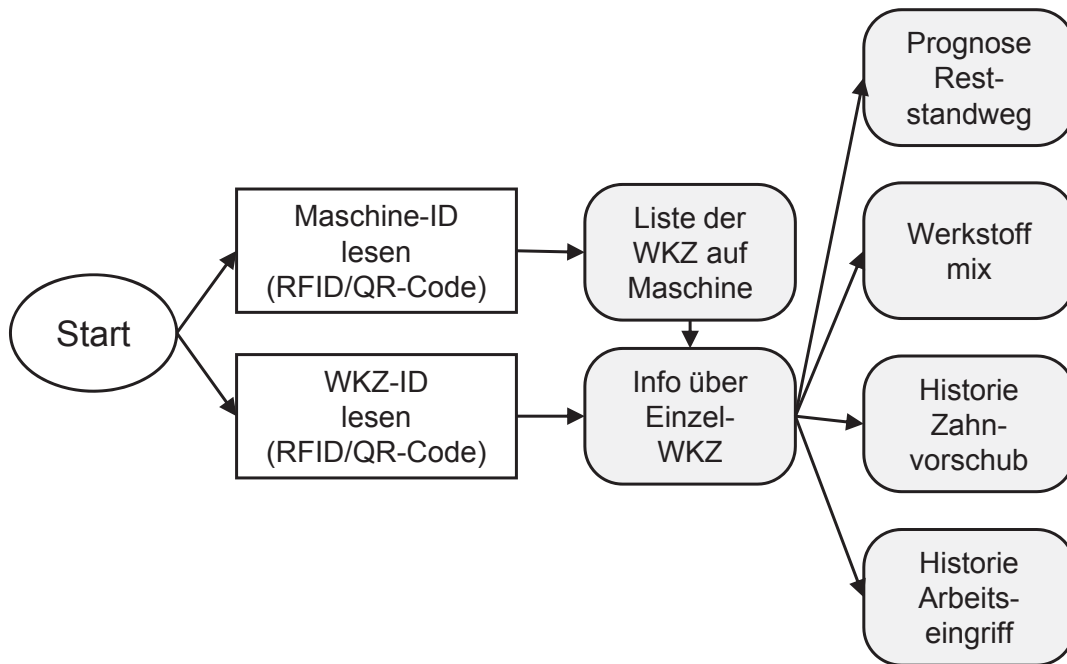


Abbildung 5.22: Navigation zwischen den Sichten

Zum Einstieg in die Struktur ist eine Identifikationsnummer gefordert. Es kann sowohl mit einer Maschinenidentifikationsnummer als auch mit einer Werkzeugidentifikationsnummer fortgefahren werden. Die *Maschinen-ID* verweist auf die Gesamtbelegung mit allen auf der Maschine befindlichen Werkzeugen, die *Werkzeug-ID* hingegen verweist direkt auf die Information bezüglich des individuellen Werkzeuges.

In der graphischen Darstellung der Datensammlung der momentan im Magazin der Werkzeugmaschine befindlichen Werkzeuge wird der individuelle Fortschritt des Schnittweges, als prozentualer Anteil des empfohlenen Standweges, dargestellt (Abbildung 5.23).

Aus dieser Sicht lässt sich ein Werkzeug auswählen. Zu dem gewählten Werkzeug wird die Historie der vergangenen Services abgerufen. Ein Service-Intervall ist der Zeitraum zwischen zwei Instandsetzungsvorgängen. Ein Konzept zu dieser Sicht ist in Abbildung 5.24 zu sehen.

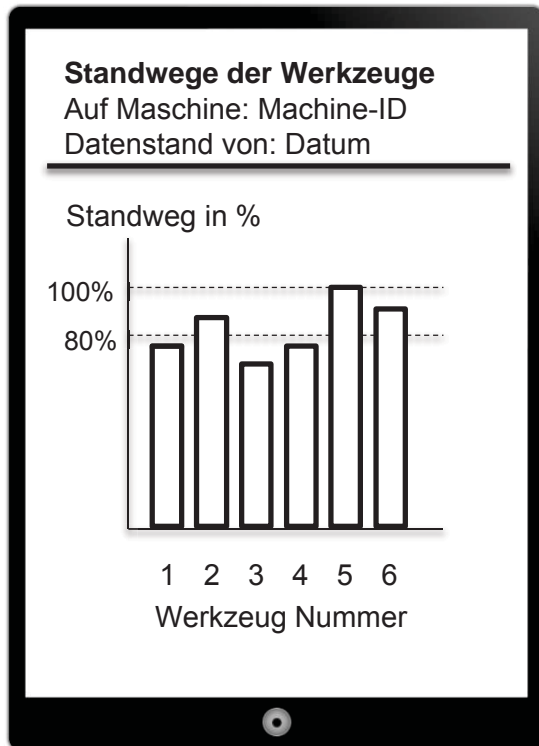


Abbildung 5.23: Werkzeugübersicht einer Maschine

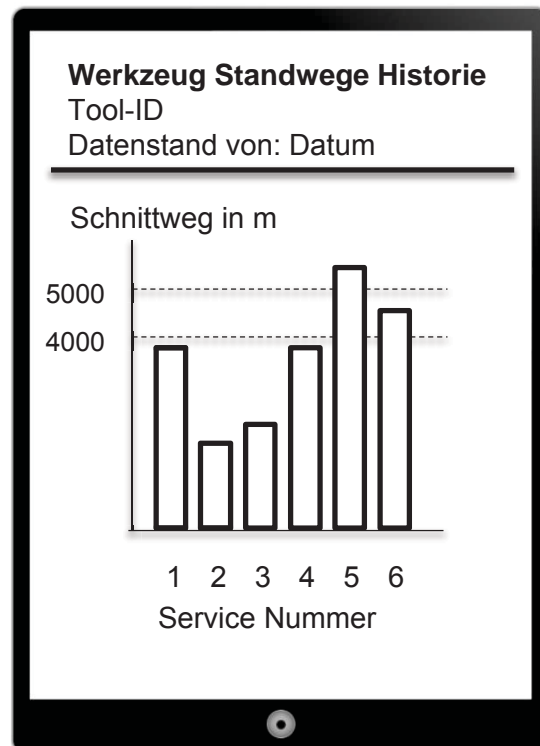


Abbildung 5.24: Standwege eines Werkzeuges

Das Auswählen eines Instandsetzungs-Services verweist auf die Daten bezüglich der Maschineneinsätze innerhalb des Werkzeuginstandsetzungs-Intervalls. Hierbei besteht die Möglichkeit, die Werkstoffe der Fertigungsaufträge (Abbildung 5.25) sowie die Prognose des verbleibenden Reststandweges (Abbildung 5.26) abzurufen oder sich Prozessdaten wie Zahnvorschub (Abbildung 5.27) oder Arbeitseingriff (Abbildung 5.28) während dieses Intervalls anzeigen zu lassen.

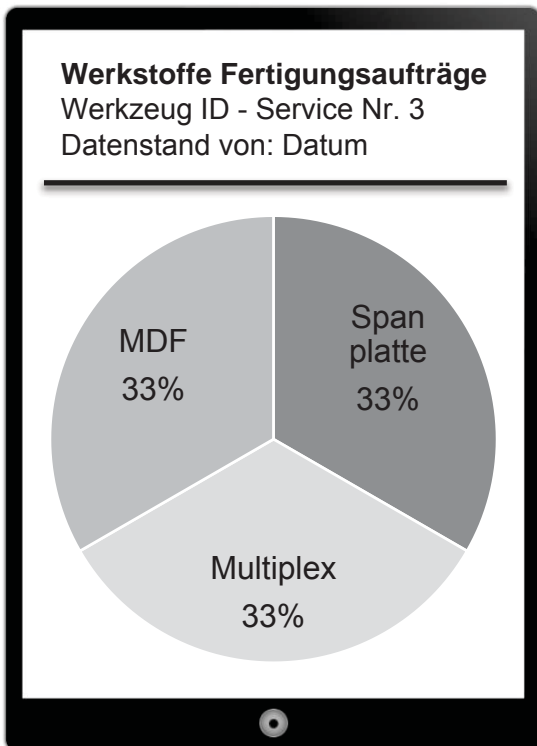


Abbildung 5.25: Werkstoffmix eines Werkzeuges

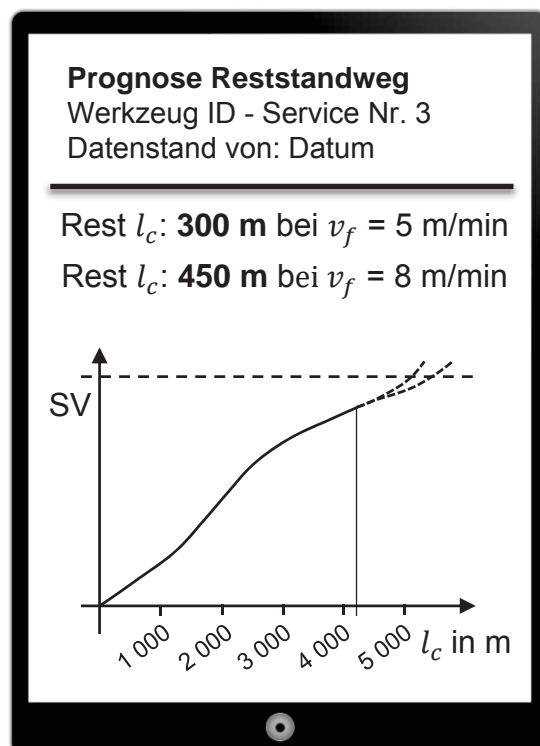


Abbildung 5.26: Prognose des Reststandweges

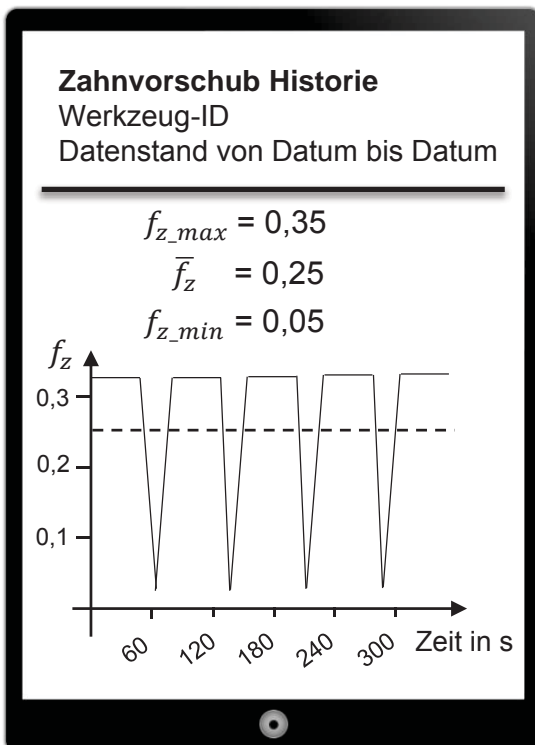


Abbildung 5.27: Verlauf des Zahnvorschubes

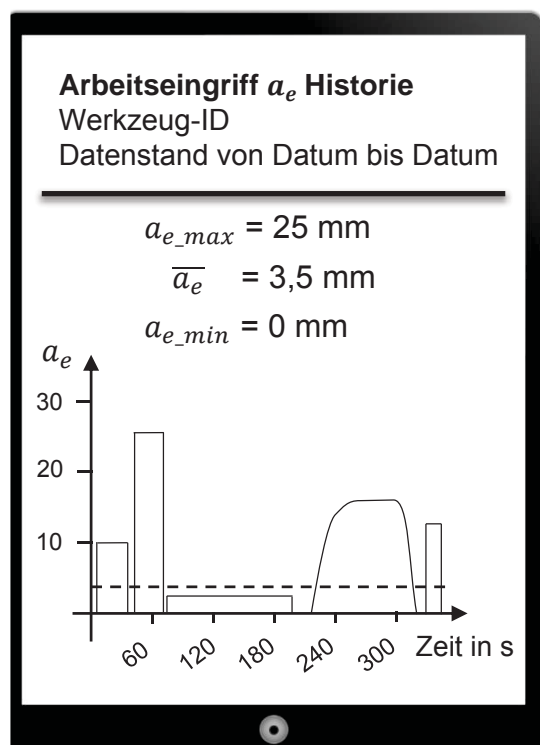


Abbildung 5.28: Verlauf des Arbeitseingriffes

5.7 Einsatzabhängige Werkzeugkosten

Zumeist werden Werkzeugkosten als *Sondereinzelkosten der Fertigung* auf die gesamte Fertigung umgelegt. Durch automatisches Ermitteln der Werkzeugverbrauchsdaten können diese analog zu den Maschinenlaufzeiten automatisch und produktbezogen als *Fertigungseinzelkosten* erfasst werden.

Notwendige Informationen für eine einsatzabhängige Werkzeugkostenerfassung sind die Verschleißfaktoren der jeweiligen Werkstoff-Schneidstoffkombination, die Werkzeugzustände vor und nach dem Werkzeugeinsatz und folgende Kostenpositionen:

K_{VK} : (Verkaufs-/) Kaufpreis des Werkzeuges

Anz_{Inst} : Anzahl der Werkzeuginstandsetzungs-Vorgänge

$K_{WKZ_{Inst}}$: Kosten einer Werkzeuginstandsetzung

Ein erster Ansatz ist, die anfallenden Kosten umzulegen, basierend auf den Kosten pro Meter Schnittweg.

$$K_{c_{lc}} = \frac{\left(\frac{K_{VK}}{Anz_{Inst}+1} + Anz_{Inst} \cdot K_{WKZ_{Inst}} \right) \cdot l_c}{\sum_1^m l_{ctot}} \quad [€] \quad (5.20)$$

$K_{c_{lc}}$ sind die Kosten für die Schnittleistung (engl. *cutting*), bezogen auf den Schnittweg (engl. *length of cut*). In Gleichung 5.20 wird dieser Ansatz gezeigt.

Das Problem hierbei ist, dass es bei der Werkzeugabnutzung pro Schnittmeter erhebliche Unterschiede gibt. Haupteinflüsse hierbei sind die Prozessparameter wie Schnittgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit.

Ein wesentlich genauerer Ansatz ist der Bezug auf den tatsächlich anfallenden Werkzeugverschleiß. Hierfür werden die folgenden Größen eingeführt:

ΔSV : anteiliger Schneidkantenversatz

SV_{max} : maximal möglicher Schneidkantenversatz

$K_c(\Delta SV)$: Kosten für den anteiligen Werkzeugverschleiß (Schneidkantenversatz)

$$K_c(\Delta SV) = \left(\underbrace{K_{VK}}_{\text{Werkzeugeinsatzkosten}} + \underbrace{Anz_{Inst} \cdot K_{WKZ_{Inst}}}_{\text{Kosten pro Instandsetzung}} \right) \cdot \underbrace{\Delta SV}_{\text{anteiliger Werkzeugverschleiß}} \quad [€]$$

Verwendung während der gesamten Lebensdauer

Festgelegte Kosten in Bezug auf das Werkzeug

K_{VK} : Kaufpreis des Werkzeuges
 Anz_{Inst} : Anzahl der Werkzeuginstandsetzungs-Vorgänge
 $K_{WKZ_{Inst}}$: Kosten einer Werkzeuginstandsetzung

Vom System erfasste Ist-Daten

ΔSV : anteiliger Schneidkantenversatz
 SV_{max} : maximaler Schneidkantenversatz (zwischen zwei Instandsetzungen)

Abbildung 5.29: Aufbau der einsatzabhängigen Kostenfunktion

Abbildung 5.29 zeigt die Kostenfunktion in Abhängigkeit vom Verschleiß in Form des Schneidkantenversatzes. Die Kostenfunktion gliedert sich in zwei Teile. Zum einen berücksichtigt sie den kompletten Anschaffungspreis des Werkzeuges. Dieser wird aufgrund der langlebigen Komponenten des Werkzeuges, wie beispielweise Werkzeugaufnahme und Grundkörper des Werkzeuges, gleichmäßig auf alle Zyklen verteilt. Ein Zyklus beginnt beim erneuten Verwenden eines instandgesetzten Werkzeuges. Den zweiten Anteil der Kostenfunktion machen die Instandhaltungskosten aus. Diese gliedern sich in die ausgetauschten Werkzeugkomponenten (z.B. Schneiden) und den Instandhaltungsaufwand (zum Großteil Personalkosten).

$$\Delta SV = \frac{Z_2 - Z_1}{SV_{max} \cdot (Anz_{Inst} + 1)} \quad (5.21)$$

Die Gleichung 5.21 zeigt den anteiligen Schneidkantenversatz des Werkzeugeinsatzes am Verschleiß des Werkzeuges über dessen gesamte Lebenszeit. Dieser setzt sich zusammen aus der Abweichung der Werkzeugzustände vor und nach dem Einsatz, dividiert durch den maximalen Schneidkantenversatz zwischen zwei

Instandsetzungen, multipliziert mit der Anzahl der Werkzeuginstandsetzungsvorgänge.

In Kombination mit der Formel aus Abbildung 5.29 und dem anteiligen Verschleiß aus der Gleichung 5.21 ergeben sich folgende Konstellationen:

Bei einer einmaligen Verwendung des Werkzeuges ohne Instandsetzung ($Anz_{Inst} = 0$) besteht die Kostenfunktion lediglich aus dem Kaufpreis, multipliziert mit dem anteiligen Schneidkantenversatz.

Bei einer mehrfachen Verwendung des Werkzeuges mit beispielweise zehn Instandsetzungsvorgängen ($Anz_{Inst} = 10$) setzt sich die Kostenfunktion aus dem Kaufpreis des Werkzeuges und zehnmal Instandhaltungskosten zusammen. Der anteilige Schneidkantenversatz wird hierbei in Verhältnis zum Elffachen des maximalen Schneidkantenversatzes gesetzt.

Am Lebensende des Werkzeuges ergibt die Summe aller anteiligen Werkzeugeinsatzkosten der jeweiligen Fertigungsaufträge die Summe aller angefallenen Kosten. Diese beinhalten den Kauf des Werkzeuges und alle Instandsetzungskosten.

Es entstehen geringe operationale Kosten, da keine Verschleißversuche gefahren werden müssen, die Parameteraufnahme erfolgt während der regulären Produktionsbedingungen. Die Kosten sind auch bei den Messvorgängen an der Werkzeugschneide gering, da dies ein regulärer Teilschritt beim Nachschleifvorgang ist.

5.8 Pay-Per-Use-Abrechnungssystem

Der Grundgedanke von *Pay-Per-Use*-Abrechnungsmodellen ist das Bezahlen pro tatsächlicher Anwendung des Produktes. Dieses Abrechnungsmodell hat in der Software-Branche eine Dominanz, ist aber auch für Nicht-Software-Produkte möglich und sinnvoll (Bauernhansl et al. 2015). Der Maschinen- und Anlagenbau allgemein bekommt durch die Digitalisierung neue Geschäftsmodellmöglichkeiten.

Übertragen auf Fräswerkzeuge in der Holzbearbeitung bedeutet dies, dass nur die Leistung (hier: die Zerspanleistung) eingekauft wird.

Die Vorteile eines *Pay-Per-Use*-Abrechnungsmodells sind eine Risikoreduzierung durch die Verringerung der Kapitalbindung in der Fabrik, die Weitergabe des Auslastungsrisikos und das Sichern des Systembetriebs durch Experten (Westkämper et al. 2016, S. 221)

Voraussetzung für die Anwendung eines *Pay-Per-Use*-Abrechnungsmodells ist die systematische und automatisierbare Erfassung des Einsatzes und der Anwendungsparameter des Produktes, die auf den tatsächlichen Nutzungsvorgang schließen lassen. Im Falle von indirekten Messungen der Nutzung muss der betroffene Prozess in Hinblick auf die Bezugsgröße des Abrechnungsgegenstands modelliert werden.

Der betrachtete Prozess ist im Anwendungsszenario dieser Arbeit das Oberfräsen von MDF-Platten für die Möbelindustrie, der erfasste Abrechnungsgegenstand ist der anteilige Werkzeugeinsatz des Werkzeuges.

5.8.1 Status quo des Abrechnungsvorgangs

Der bisherige dominante Abrechnungsvorgang ist das Beschaffen von Holzbearbeitungswerkzeugen auf Stückbasis. Es gibt aber Werkzeughersteller, die ihren Kunden einen vollständigen Service für Verbrauchswerkzeuge anbieten. Dieser Ansatz beinhaltet bereits das Abrechnen anhand von Laufmetern des Werkzeuges (Leitz GmbH & Co. KG 2016).

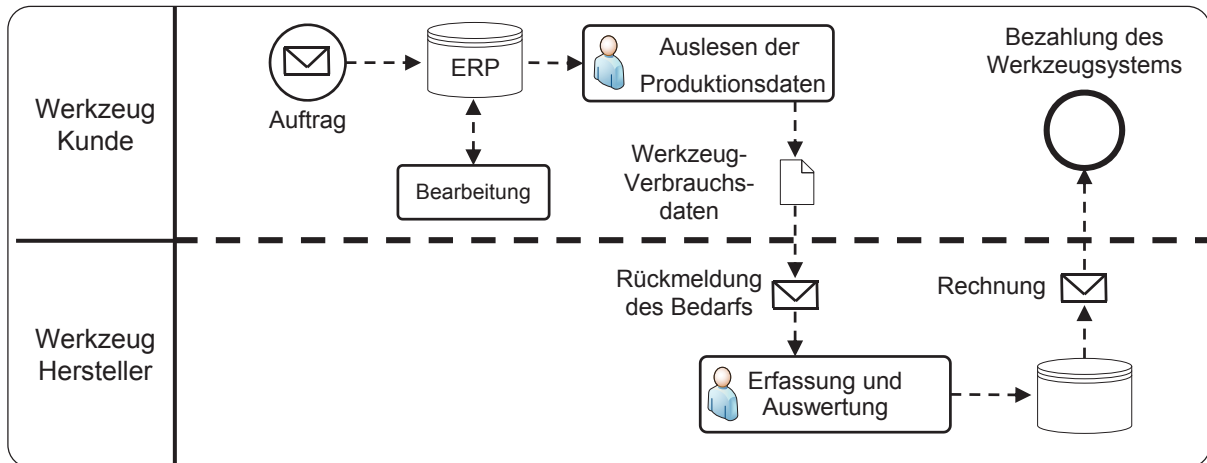


Abbildung 5.30: Offline-Abrechnungsvorgang

Wie in Abbildung 5.30 dargestellt, erfassen die Kunden ihre Produktionsmengen und melden sie in regelmäßigen Abständen manuell dem Hersteller. Auf dieser Grundlage erfolgt auf Seiten des Herstellers eine manuelle Erfassung und Auswertung. Darauf basierend kann anschließend eine Abrechnung der Werkzeuge erstellt werden. Ein großer Kostenfaktor sind hierbei die Personalkosten für die Erfassung. Aufgrund des hohen manuellen Anteils ist das Geschäftsmodell aktuell nicht nur sehr kostenintensiv in Einrichtung und Betrieb, sondern auch ungenau, da die Daten aus Plandaten stammen und nicht am tatsächlich anfallenden Verschleiß festgemacht werden. In diesem System können neue Werkstoffe und kleine Losgrößen schlecht abgebildet werden, da diese nur manuell rückblickend beurteilt werden können. Hierdurch ergibt sich ein hohes Risiko für den Hersteller. Aus diesem Grund ist das Geschäftsmodell lediglich für eine kleine Anzahl von Kunden mit gleichbleibenden Produkten und Großserien sinnvoll.

5.8.2 Einsatzabhängiger Abrechnungsvorgang

Durch die vorgestellte Erfassung des Werkzeugeinsatzes und die darauf aufbauende Kostenberechnung kann der Abrechnungsvorgang vollständig digitalisiert werden. Der in Abbildung 5.31 dargestellte Prozess kann gegenüber dem Status quo verbessert werden. Aus dem Bearbeitungsprozess kann der Werkzeugverbrauch automatisiert erfasst und an das System der Werkzeughersteller zurückgemeldet werden. Der Hersteller kann aus diesen Rückmeldedaten automatisiert eine Rechnung an den Kunden erstellen. Ein manuelles Eingreifen in den Vorgang ist nicht notwendig.

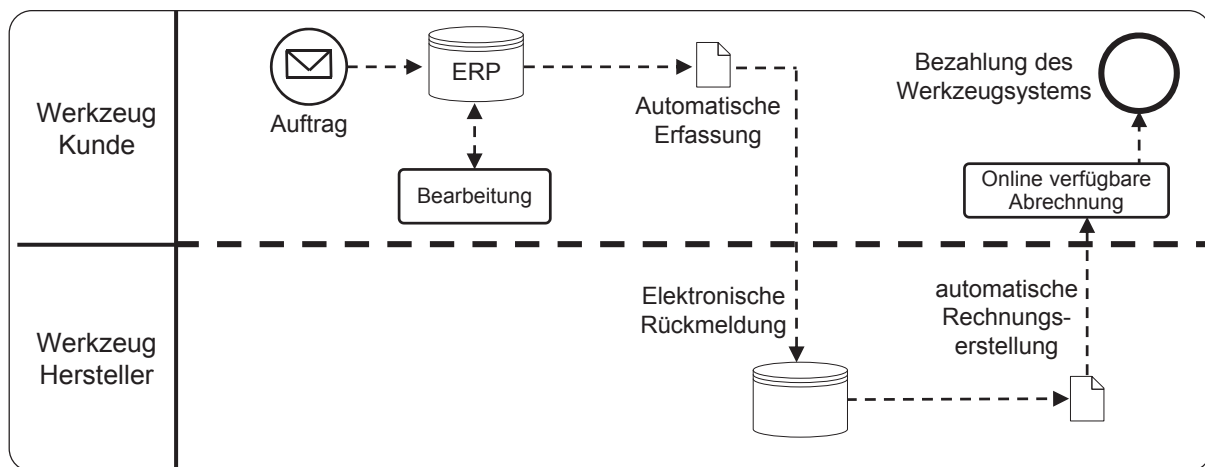


Abbildung 5.31: Online-Abrechnungsvorgang

Der informationstechnische Mehraufwand ist den durch das System geschaffenen Vorteilen gegenüberzusetzen.

Dieser Mehraufwand besteht aus der einmaligen Implementierung des Systems auf Seiten des Herstellers und aus der Einrichtung kundenseitig. Die kundenseitige Einrichtung beinhaltet Softwarekonfiguration und teilweise erforderliche Hardware, da jede Werkzeugmaschine an einen firmeninternen Rechner angeschlossen werden muss. Darüber hinaus entstehen Kosten für den Betrieb des Systems, wie beispielsweise Wartung und Pflege.

Vorteile sind die gewonnene Transparenz, der geringere Personalaufwand für den Abrechnungsvorgang und die nun geschaffene Möglichkeit, verbrauchsorientiert die Werkzeugkosten den Fertigungsaufträgen zuzurechnen.

5.9 Zusammenfassung des Modells

Zur Lösung der Problemstellung der mangelnden Datengrundlage bei der Werkzeugeinsatzplanung wurde im Modell ein Ansatz des indirekten Tool-Monitorings beschrieben, dass die benötigten Daten, durch Mitlesen der in der Werkzeugmaschine verbauten Sensoren, berechnet. Das Modell hat dadurch die Fähigkeit, ohne zusätzliche Sensorhardware auszukommen. Die Daten der Werkzeugmaschine werden an einen Service versendet und durch das *Parsen* des NC-Satzes werden verschiedene Subroutinen gestartet. Durch Erkennen des Programmnamens kann durch Abfrage an die Fertigungsplanung der Kontext zu dem bearbeiteten Fertigungsauftrag hergestellt werden. Bei erkanntem Werkzeugwechsel wird der Kontext zu dem verwendeten Werkzeug hergestellt, indem durch eine Anfrage an die Werkzeugverwaltung ein eindeutiges Werkzeug zugeordnet werden kann. Die erkannten G-Codes geben Auskunft über die verwendeten Verrechnungen der Achspositionen, sowohl für die Fräserradiuskompensation als auch für den Koordinatensystemversatz durch Nullpunktverschiebung.

Der hergestellte Kontext und die Achspositionskorrekturen erlauben nun die Verwendung der übertragenen Variablen im In-Situ-Flow. Hier werden die Berechnung der Prozessgrößen Schnittweg, Schnittgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit für jedes neue kleine Zeitintervall in Bezug auf ein kleines Wegsegment neu durchgeführt.

Im Post-Prozess Ablauf werden die physikalischen Messungen mit den errechneten Prozessgrößen in dem Lernmodell zusammengebracht. Das Lernmodell trägt die physikalischen Gegebenheiten als Randbedingungen in sich. Die Zielgrößen sind für die Verschleißbeurteilung der Schneidkantenversatz und für die Qualitätsbeurteilung die Kantenschartigkeit. Die Koeffizienten werden kontinuierlich mit den dazugekommenen Wertepaaren berechnet und bilden die Korrelation der Variablen näher am physikalischen Prozess ab. Diese Koeffizienten haben Gültigkeit für das gesamte Prozessfenster. Die hierauf fußende Prognose erlaubt eine Aussage über die Einsetzbarkeit eines Werkzeuges für einen Fertigungsauftrag und bietet somit eine sichere Datengrundlage bei der Werkzeugeinsatzplanung.

6 Anwendung des Modells

Die Anwendung des entwickelten und detailliert erläuterten Modells fand bei einem Hersteller für Holzbearbeitungswerkzeuge statt und die Evaluierung erfolgte anhand der in Kapitel 4.2 aufgestellten Anforderungen. Für die Anwendung wurde eine Holzbearbeitungsmaschine mit entsprechender Datenschnittstelle ausgestattet, um kontinuierlich Daten an einen Server zu versenden. Die Umsetzung der im Modell beschriebenen Funktionsbausteine „*Admin-Service*“ und „*Schnittweg-Service*“ erfolgte in Form von zwei Web-Services.

Im Anschluss an die Implementierung der selbstgeschriebenen Software stand eine Qualifizierung der erhaltenen Daten. Diese Qualifizierung bestand aus der Plausibilitätsuntersuchung der verwendeten Prozessgrößen und dem systematischen Zusammenspiel der einzelnen Prozessgrößen.

Nach der Evaluation der Abweichung der Prozessgrößen von den jeweiligen Planwerten, wurde die Funktionsweise der Übertragung sichergestellt und die Logik der Berechnungen überprüft.

Die Durchführung der Validierung des Modells bedingt ein Versuchsdesign. Das erstellte Versuchsdesign bestand aus drei Kontouren, einem Versuchswerkzeugtyp und einem Versuchswerkstoff.

Die erfassten Versuchsdaten mündeten durch die Anwendung des Modells in erlernte Prognosefaktoren für Werkzeugverschleiß und Kantenqualität (des Bauteils). Diese Faktoren ermöglichten nun eine Prognose. Diese Faktoren ermöglichten zudem Aussage über die Genauigkeit dieser Prognose und eine Gütebestimmung des Modellierungsansatzes.

Für das verwendete Versuchswerkzeug war es mithilfe der Faktoren möglich die einsatzabhängigen Werkzeugkosten zu ermitteln.

6.1 Implementierung des Modells als eApp

Eine sogenannte Engineering App (*eApp*) ist eine dedizierte Anwendung, in die die Logik fest implementiert wurde. Die Applikation kann ohne aufwändige Konfiguration verwendet werden. Dieses Format und die Eigenschaften wurden von *Westkämper* beschrieben (Westkämper 2012). Überlegungen und Ansätze zur Erstellung einer derartigen spezifischen *eApp* wurden im Forschungsprojekt „eApps4Production – Engineering Apps für die Produktion“ angedacht (eApps 2016).

6.1.1 Verwendete Hardware

Ein CNC-Bearbeitungszentrum für die Holzbearbeitung vom Typ „*Pro-Master S 7023*“ der *Fa. Holz-Her* wurde für die Implementierung ausgewählt. Die technischen Daten sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Tabelle 6.1: Technische Daten der Versuchsmaschine

Maschine:	Hersteller:	Holz-Her
	Typ:	Pro-Master S 7023
	Baujahr:	2008
Steuerung:	Hersteller:	Siemens
	Typ:	SINUMERIK 810 D
Spindelantrieb:	Drehzahl:	max. 24 000 U/min
	Motorleistung	6 KW
Vorschubantriebe:	max. in X-Achse	70 m/min
	max. in Y-Achse	70 m/min
	max. in Z-Achse	15 m/min

Die Werkzeugmaschine ist ein typischer Vertreter der Plattenbearbeitung in der Möbelindustrie. Bei der verbauten Steuerung *SINUMERIK 810D* der Firma *Siemens* handelt es sich um eine ältere Version, die noch nicht über eine standardisierte Schnittstelle wie *OPC-UA* oder *MT-Connect* für den Datentransfer verfügt. Der Zugriff auf die Daten der Maschinensteuerung wurde über die Schnittstelle *Dynamic Data Exchange* (DDE) umgesetzt.

6.1.2 Eingesetzte Software

Das Framework der *JS Foundation* namens *Node.js* fand Verwendung bei der Orchestrierung der Services und Verwalten der Datenflüsse. Es handelt sich hierbei um einen speziellen Interpreter für die Programmiersprache *Java Script*, der auf der Runtime Engine von *Google Chrome* aufbaut (*V8-Engine*).

Auf dieser Runtime Engine wurde das Tool *Node-Red* verwendet. Ursprünglich von *IBM* entwickelt und 2016 als Open Source an die *JS Foundation* überführt, bietet das Tool eine graphische Hilfe bei der Erzeugung von flussbasierten Programmabläufen.

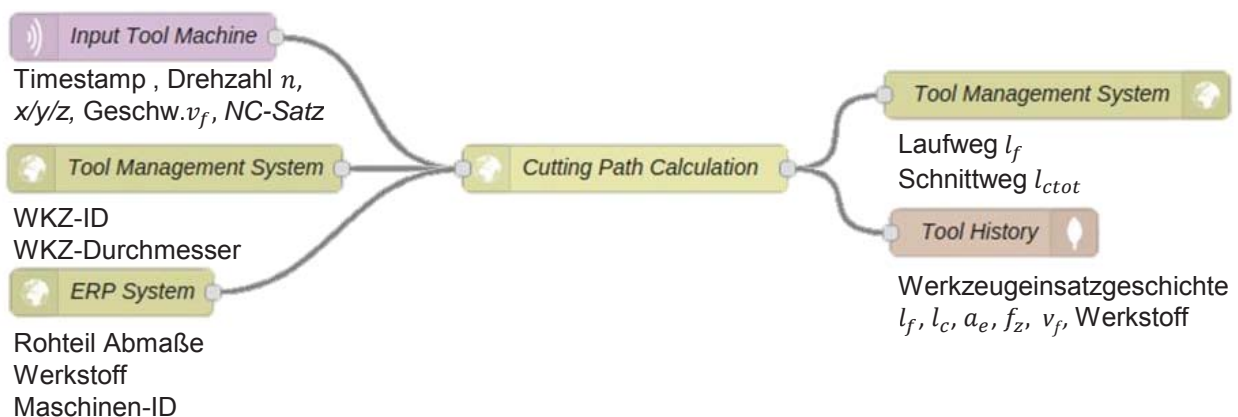


Abbildung 6.1: Überblick über den Datenfluss zwischen den Services

Abbildung 6.1 zeigt das implementierte Modell als Fluss in der *Node-Red*-Umgebung. Ausgangsbasis sind die drei Quellen, im Fluss auf der linken Seite dargestellt. Der violett hervorgehobene Knoten (Node) steht für die Werkzeugmaschinensteuerung. Von ihm aus werden die Nachrichten im *JavaScript Object Notation* (JSON)-Datenformat via *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT)-Nachrichtenprotokoll versendet. Der Empfänger ist, wie in der Abbildung dargestellt, der Service „*Cutting Path Calculation*“. Hier findet die Kombination der Daten mit anderen Quellen und die Berechnung der Prozesseigenschaften statt. Nach erfolgter Berechnung werden die Ergebnisse an die Werkzeugverwaltung und eine Datenbank zur Sicherung der Werkzeughistorie weiter verschickt.

6.2 Überprüfung auf Plausibilität

Die implementierte Logik ermöglicht es, Prozesszwischen Größen unter realen Bearbeitungsbedingungen mit ständig wechselnden Parametern zu ermitteln und aufzuzeichnen. Somit wurde eine Analyse der Prozessgrößen möglich. Um die Datenqualität der aufgenommenen Werte zu quantifizieren, werden in den folgenden Unterkapiteln die konstanten Planwerte den auf Ist-Daten basierenden berechneten Werten für Laufweg, Vorschubgeschwindigkeit, Arbeitseingriff und Schnittweg gegenübergestellt.

6.2.1 Plausibilität des Laufwegs

Der Laufweg l_f ist die Wegstrecke der konturkorrigierten Bahn. Es wurden mehrere Wegstrecken mit jeweils einem Meter Bahnstrecke gefräst.

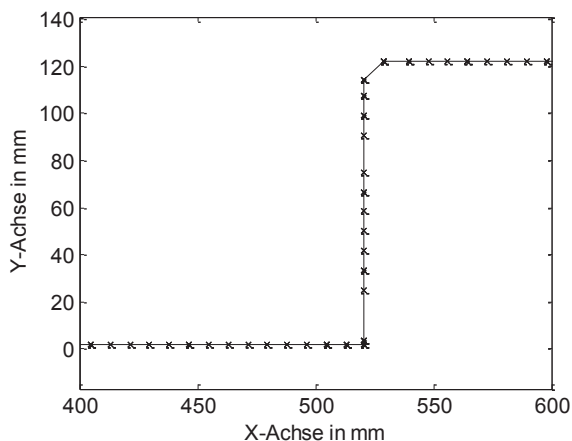


Abbildung 6.2: Erkannte Wegsegmente des Laufwegs aus Versuchsreihe "C"

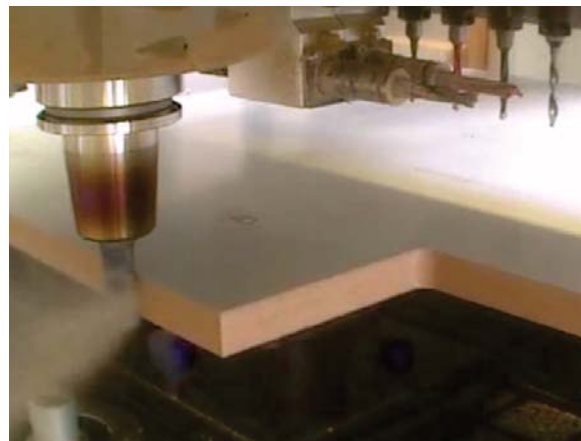


Abbildung 6.3: Foto der Bearbeitung der Versuchsreihe "C"

In Abbildung 6.3 ist ein Foto der Bearbeitung aus der Versuchsreihe „C“ abgebildet. In Abbildung 6.2 ist der identische Ausschnitt der Bearbeitung als erkannter Laufweg abgebildet. Der erkannte Laufweg umfasst die Lageinformationen einer Nachricht der Werkzeugmaschinensteuerung. Diese Lageinformation entspricht der in der Abbildung mit einem Kreuz geplottet Positionen. Die Gerade zwischen den gekennzeichneten Positionen wurde interpoliert. Da eine Nachricht von der Werkzeugmaschine stets nach oder vor Ein- bzw. Austritt aus dem Material erfolgt und nie exakt an der Stelle des Eintrittes, ergibt sich eine leichte Unschärfe bei Ein- und Austrittssituationen. Um diese Unschärfe zu quantifizieren, wurden Bahnen mit jeweils einem Meter geplantem Laufweg gefräst. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 6.2 aufgelistet.

Tabelle 6.2: Auswertung der Laufweg-Ist-Daten-Analyse

Parameter	Resultat
Anzahl Nachrichten	2423
Anzahl Bahnen je 1 Meter	21
Durchschnittlicher Laufweg	1001,6 mm
Maximaler Laufweg	1010,2 mm
Minimaler Laufweg	993,6 mm
Standardabweichung	$\sigma = 4,15$

Die Abweichungen lagen im Bereich mehrerer Millimeter, jedoch maximal eines Zentimeters. Die ermittelte Standardabweichung von lediglich 4,15 streut sich um den Mittelwert von 1001,6 mm.

6.2.2 Plausibilität der Vorschubgeschwindigkeit

Aufbauend auf dem Laufweg wird die Vorschubgeschwindigkeit v_f ermittelt. Die prozessbedingten Schwankungen wurden für unterschiedliche Vorschübe untersucht. In Tabelle 6.3 sind die Ergebnisse der Auswertung für die programmierten Vorschübe 5 m/min und 10 m/min aufgelistet.

Tabelle 6.3: Auswertung der Vorschubgeschwindigkeits-Ist-Daten Analyse

Parameter	Test_Vf_5	Test_Vf_10
Programmierter Vorschub	5 m/min	10 m/min
Anzahl Bahnen je 1 Meter	11	10
Anzahl Nachrichten	1634	789
Durchschnittliche Vorschubgeschwindigkeit	4,95 m/min	9,73 m/min
Maximale Vorschubgeschwindigkeit	5,00 m/min	9,99 m/min
Minimale Vorschubgeschwindigkeit	4,83 m/min	8,70 m/min
Standardabweichung	$\sigma = 0,05$	$\sigma = 0,42$

Es werden, wie erwartet, langsamere Vorschübe als die programmierten Einstellwerte gefahren. Die Streuung ist bei 5 m/min Vorschub gering (0,05) und bei schnelleren Verfahrbewegungen größer (0,42), aber dennoch mit einer Abweichung von 1% bzw. 2,6% auf einem sehr hohen Genauigkeitsniveau. Dies ist genau genug, um mit Sicherheit sagen zu können, dass Betrachtung und Auswertung basierend auf kleinen inkrementellen Wegsegmenten stimmig ist.

6.2.3 Plausibilität des Arbeitseingriffs

Der Arbeitseingriff a_e wird für jedes Wegsegment basierend auf der Position des Rohteiles neu berechnet. Um die resultierenden Werte zu überprüfen, wurde mit einem Fügefräser mit Durchmesser 100 mm ein Kreis bearbeitet mit einem Endabmaß von 1000 mm Durchmesser und einem Rohteilmaß von 5 mm. In Abbildung 6.4 ist das Resultat der Untersuchung zu sehen.

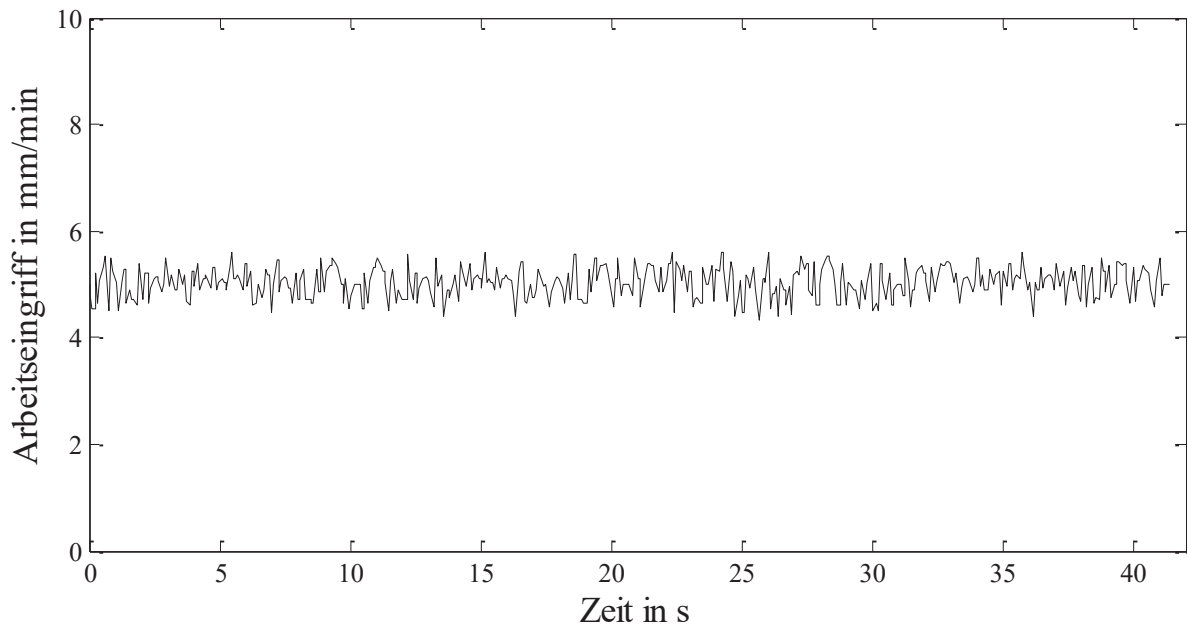


Abbildung 6.4: Online berechneter Arbeitseingriff

Der online berechnete Arbeitseingriff beträgt im Mittelwert genau 5,00 mm, da sich alle nach oben und unten abweichenden Werte gegenseitig ausgleichen. Der dynamisch berechnete Arbeitseingriff wurde daher verifiziert, genau genug zu sein, um weitere Berechnungen auf diesen Werten durchzuführen.

6.2.4 Plausibilität des Schnittweges

Die Schnittwegberechnung baut auf den genannten Zwischenwerten, Laufweg, Vorschubgeschwindigkeit und Arbeitseingriff auf. Um die Plausibilität zu überprüfen, wurden Bahnen mit jeweils einem Meter Laufweg, einem Oberfräser von 20 mm Durchmesser bei einer Drehzahl von 18 000 U/min und einem geplanten Arbeitseingriff von 2 mm gefräst. Bei einem Vorschub von 5 m/min ergibt dies einen Soll-Schnittweg von 23,2 m; bei einem Vorschub von 10 m/min hingegen halbiert sich der Soll-Schnittweg auf 11,6 m. In Tabelle 6.4 sind die gewonnenen Resultate zu sehen.

Tabelle 6.4: Auswertung der Schnittwegs-Ist-Daten-Analyse

Parameter	Test_Vf_5	Test_Vf_10
Programmierter Schnittweg	23,2 m	11,6 m
Anzahl Bahnen je 1 Meter	11	10
Anzahl Nachrichten	1634	789
Durchschnittlicher Schnittweg	23,71 m	12,09 m
Maximaler Schnittweg	26,14 m	13,61 m
Minimaler Schnittweg	23,01 m	11,58 m
Standardabweichung	$\sigma = 1,057$	$\sigma = 0,673$

Der jeweils leicht erhöhte durchschnittliche Schnittweg l_c (2,1% bzw. 4,2%) ist mit dem im Durchschnitt niedrigeren Vorschub zu begründen, der prozessbedingt stets leicht unter dem vorgegebenen Soll-Wert liegt. Das Fazit der Fehlerbetrachtung ist, dass die Reproduzierbarkeit des resultierenden Schnittweges gegeben ist und die Daten für die Modellanwendung geeignet sind.

6.2.5 Plausibilität des Systems

Nach erfolgter Einzelbetrachtung der Prozessgrößen wird das Zusammenspiel von gesammelten Ist-Daten auf die Zielgröße Schnittweg untersucht. Diese Untersuchung fand anhand verschiedenen Geometrien statt. Ziel der Untersuchung ist das Aufzeigen von Auswirkung der geänderten Vorschubgeschwindigkeit auf den Schnittweg. Folgende Geometrien wurden untersucht:

- ein Kreis mit einem Durchmesser von 1000 mm und einem Umfang von 3141,6 mm,
- ein gleichseitiges Dreieck mit der Höhe 900 mm und einer Gesamtkantenlänge von 3117 mm,
- ein Mäander mit fünf Kehren und 500 mm Geraden mit einem Versatz von 23,5 mm und einer Gesamtlänge von 3134 mm.

Die nahezu identische Konturlänge lässt den Effekt der abrupten Richtungsänderungen genauer untersuchen, da alle anderen Prozesseinflüsse konstant gehalten blieben. Das Fräsen der Geometrien fand statt mit einem Dia-Oberfräser mit Durchmesser 12 mm im Vollschnitt ($a_e = 12$ mm) bei einer Drehzahl von $n = 24000$ min^{-1} und einer Vorschubgeschwindigkeit von 12 m/min.

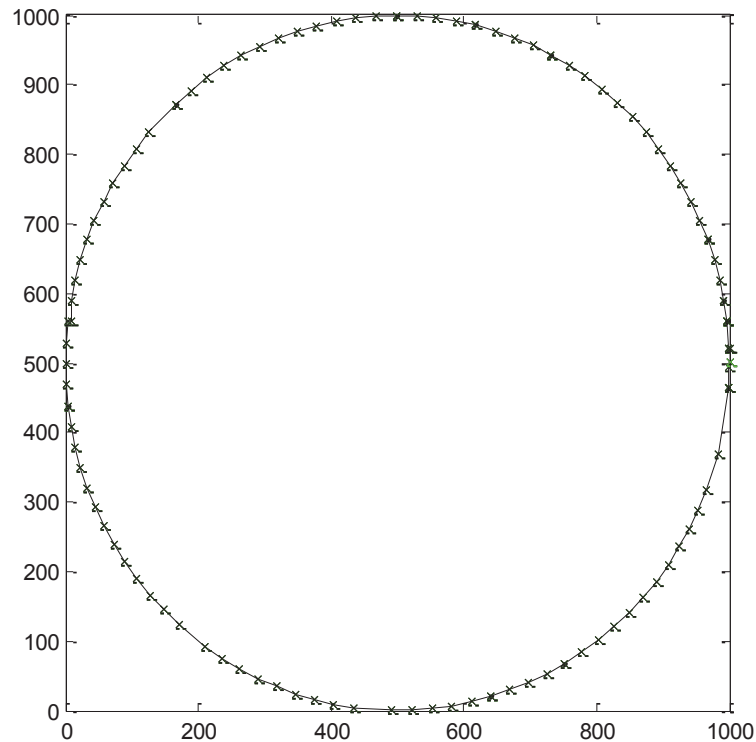


Abbildung 6.5: Bahnkurve Kreis-Geometrie

In Abbildung 6.5 ist die reale Bahnkurve der Bearbeitungskonturen aus inkrementellen Wegsegmenten dargestellt. Es zeigt sich, dass die Konturabweichung trotz der Zusammensetzung aus einzelnen geraden Wegsegmenten gering ist.

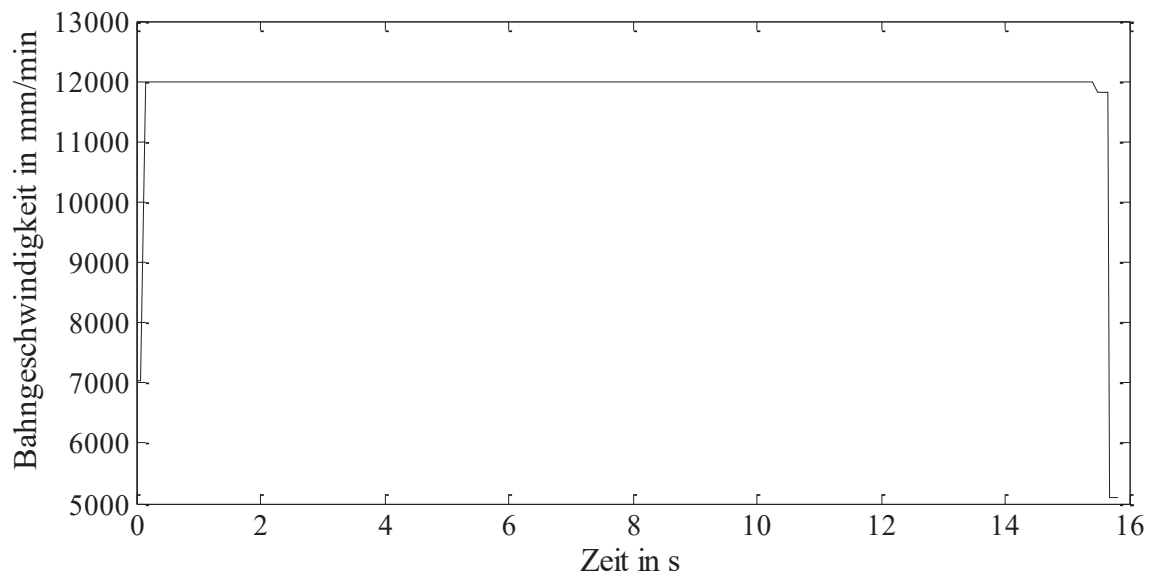


Abbildung 6.6: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm der Kreis-Geometrie

In Abbildung 6.6 ist der Geschwindigkeitsverlauf beim Fräsen dieser Kontur dargestellt. Der Vorschub bleibt während der gesamten Operation konstant. Daher

kann die Aussage getroffen werden, dass beim Fräsen eines Kreises mit hinreichend großem Durchmesser der Ist-Wert dem programmierten Wert entspricht.

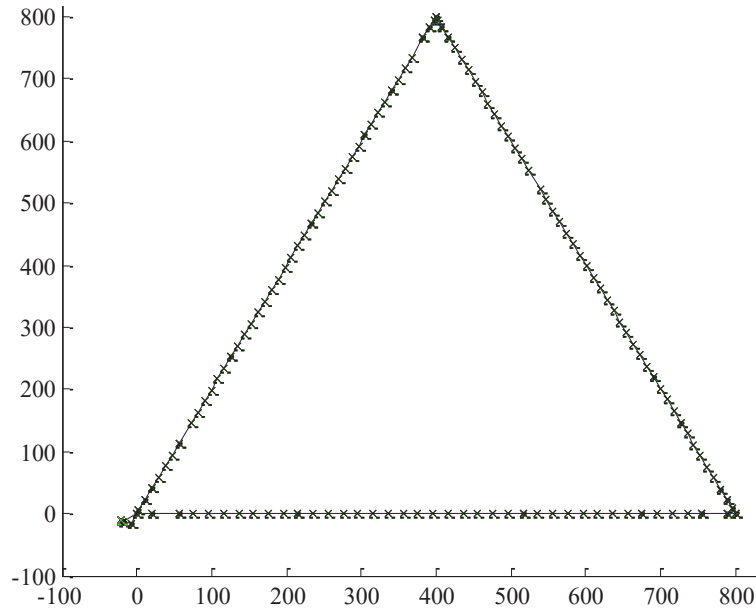


Abbildung 6.7: Bahnkurve Dreieck-Geometrie

In Abbildung 6.7 ist die Bahnkurve des erfassten Laufweges der programmierten Dreieck-Kontur dargestellt.

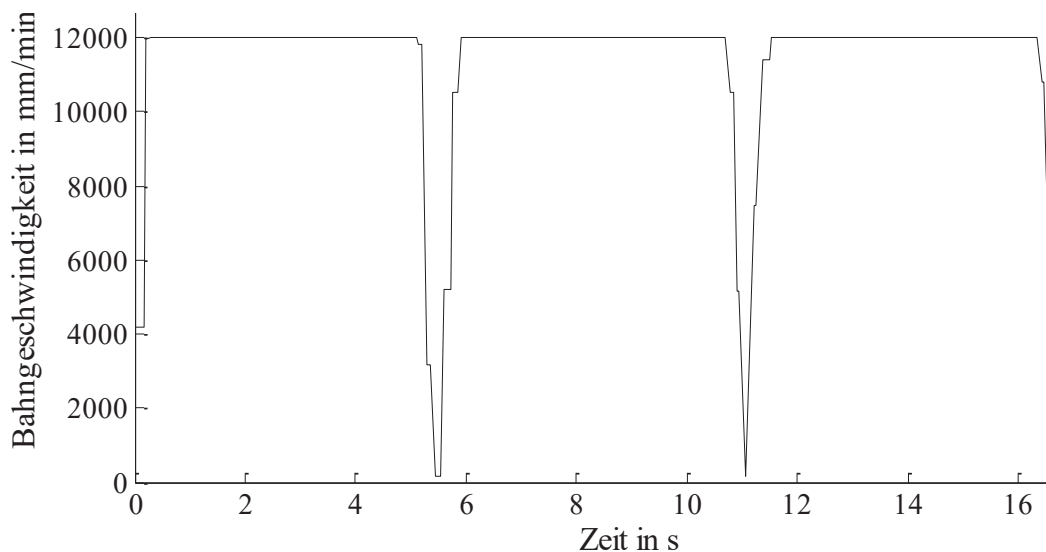


Abbildung 6.8: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm der Dreieck-Geometrie

In Abbildung 6.8 ist zu erkennen, dass beim Dreieck auf den Geraden die programmierte Vorschubgeschwindigkeit erreicht wird. An den drei Ecken wird diese bis auf „null“ abgebremst und dann wieder auf Maximalwert beschleunigt. Bei kleinen Konturradien und Ecken kann die programmierte Vorschubgeschwindigkeit aufgrund der Trägheit der Antriebe und bewegten Massen nicht konstant gehalten werden. Daher fiel die laut NC-Programm vorgegebene Vorschubgeschwindigkeit von

$v_f = 12 \text{ m/min}$ um 4,5% auf 11,48 m/min. Der Schnittweg erhöhte sich durch die höhere Anzahl an Schnittbögen bei gleicher Vorschubstrecke auf 128,16 m.

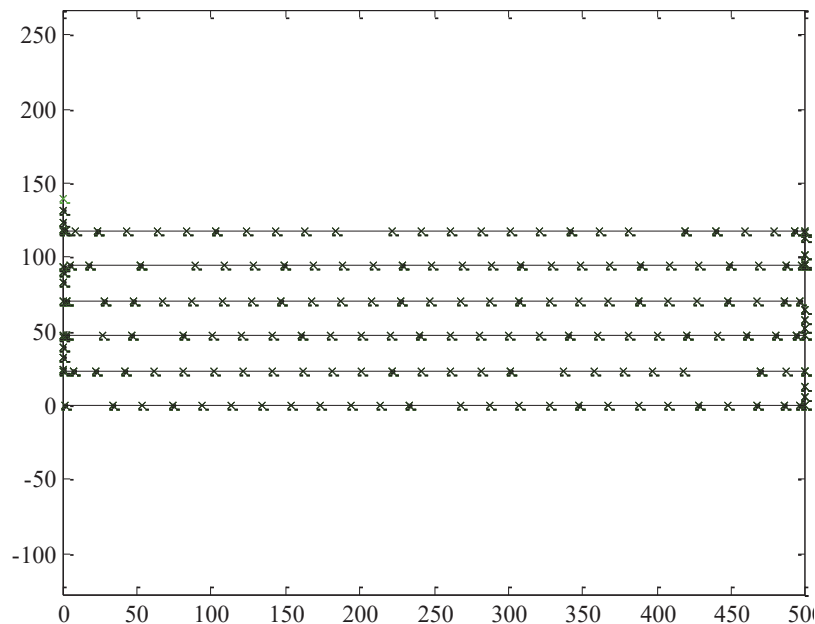


Abbildung 6.9: Bahnkurve der Mäander-Geometrie

In Abbildung 6.9 ist die Bahnkurve des Mäanders zu sehen. Es sind insgesamt fünf Kehren. Diese finden sich auch in der Geschwindigkeitsverlauf-Darstellung in Abbildung 6.10 wieder.

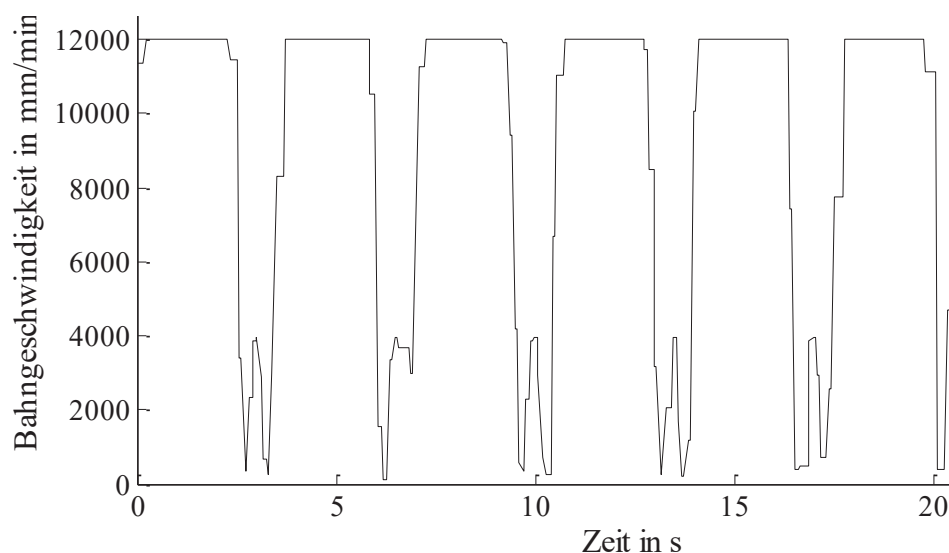


Abbildung 6.10: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm der Mäander-Geometrie

Hier wird sichtbar, dass durch die Verzögerungs- und Beschleunigungsphasen bei den Richtungswechseln die durchschnittliche Vorschubgeschwindigkeit reduziert wird, wodurch sich die Bearbeitungszeit trotz gleicher Konturlänge erhöht. Sehr deutlich liegt dieser Sachverhalt auf der kurzen geraden Wegstrecke entlang der Y-Achse vor, da

hierbei die vorgegebene Vorschubgeschwindigkeit nicht erreicht wurde. Insgesamt ist eine Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit bei der Bearbeitung der Mäanderkontur von 23 % ermittelt worden. Dies spiegelt sich in einem 60 % höherem Schnittweg wieder. Der Gesamtschnittweg dieser Kontur betrug 189,15 m.

Tabelle 6.5: Ergebnisse der Schnittwegermittlung

Parameter	Einheit	Soll	Kreis	Dreieck	Mäander
Vorschubweg l_f	mm	3141,59	3138,16	3143,50	3134,19
Abweichung		-/-	0,1 %	0,06 %	0,23 %
Schnittweg l_{ctot}	m	118,5	119,26	128,16	189,15
Abweichung		-/-	+0,06%	+8,15%	+59,62%

In Tabelle 6.5 sind die Ergebnisse der Schnittwegermittlung zusammengefasst. Die geringfügige Abweichung (<0,25%) des aus dem Prozess aufgenommenen Vorschubweges erklärt sich mit der Zusammensetzung aus inkrementellen Wegsegmenten. Die Abweichung des erfassten Schnittweges gegenüber dem nach vorgegebener Vorschubgeschwindigkeit berechneten Wert steigt, je öfter eine Fräskontur eine Richtungsumkehr oder kleine Konturradien mit Verzögerungs- und Beschleunigungsvorgängen erfordert. Diese wird von der Werkzeugmaschine nach den baulichen Zulässigkeiten, wie maximale Geschwindigkeit bei kleinen Radien und maximal zulässige Beschleunigung pro Achse, bestmöglich ausgeführt.

Die Ergebnisse der Plausibilitätsprüfung des Gesamtsystems haben gezeigt, dass die Ermittlung der aufgenommenen Vorschubgeschwindigkeit und der daraus berechneten Schnittwege stimmig zueinander sind.

6.3 Versuchsdurchführung

Die qualifizierte Implementierung der Datenerfassung und -verarbeitung erlaubt nun die Durchführung der Versuchsreihe mit dem Ziel der Ermittlung von Wirkzusammenhänge einer Werkstoff-/Schneidstoffpaarung in Form von Verschleißfaktoren und Qualitätsfaktoren.

6.3.1 Verwendetes Werkzeugsystem

Das Werkzeugsystem besteht aus dem Tragkörper und der aus dem Schneidstoff gesinterten Hartmetallwendeplatte. Die beiden Komponenten werden zu einer Einheit verschraubt. Das Gesamtsystem ist in Abbildung 6.11 abgebildet.



Abbildung 6.11: Wendemesser-Oberfräser vom Typ 5161 (Leitz 2011)

Dieses System wurde gewählt, da es sich um einen weit verbreiteten Oberfräser zum Formatieren handelt. Es hat eine achsparallele Schneide und die Messerbestückung ist ausgelegt auf einen absatzfreien Schnitt. Die für die Versuchsreihe relevanten Daten des Werkzeugsystems beinhalten die Zähnezahl: $Z = 1$, die Nutzlänge (Schneidenlänge): $NL = 30 \text{ mm}$ und der Durchmesser: $D = 20 \text{ mm}$.

In Tabelle 6.6 sind die wichtigsten technischen Daten des Systems aufgelistet, um eine Vergleichbarkeit mit anderen Studien gewährleisten zu können.

Tabelle 6.6: Technische Daten des Werkzeugsystems

Merkmal	Eigenschaft
Prozess	Formfräsen
Tragkörper	Schaftfräser ID 40879
Schneidplatte	TYP 5161
Werksbezeichnung	HW-K05
Abmessungen	30 x 12 x 1,5 mm
Keilwinkel β	55 °
Freiwinkel α	0 °
Schneidstoffbezeichnung	HC05
Hersteller	Ceratizit
Binder	4%
Härte HV10	1730
Härte HV30	1700
Biegefestigkeit	2200 N/mm ²
Bruchzähigkeit K_{1C}	8,7
Korngröße	0,8 - < 1,3 μm

Abbildung 6.12 zeigt die mikroskopische Sicht auf den Schneidkeil einer Schneide. Die Aufnahme wurde mit einem Elektronenmikroskop des Typs *JEOL-JCM-5000 NeoScope* angefertigt. Die Einstellung zeigt senkrecht von oben auf die Winkelhalbierende zwischen Span- und Freifläche und lässt in der Bildmitte die ausgeprägte Schneidkante erkennen. Hierbei ist die Schneidkante auch im Neuzustand nicht ideal scharf, sondern weist je nach Schneidstoff, Schliffgüte und Schneidstoffstruktur eine gewisse Schneidkantenverrundung, eine sogenannte „Abbruchfase“ von ca. 2 µm Abbruchfasenbreite, auf.

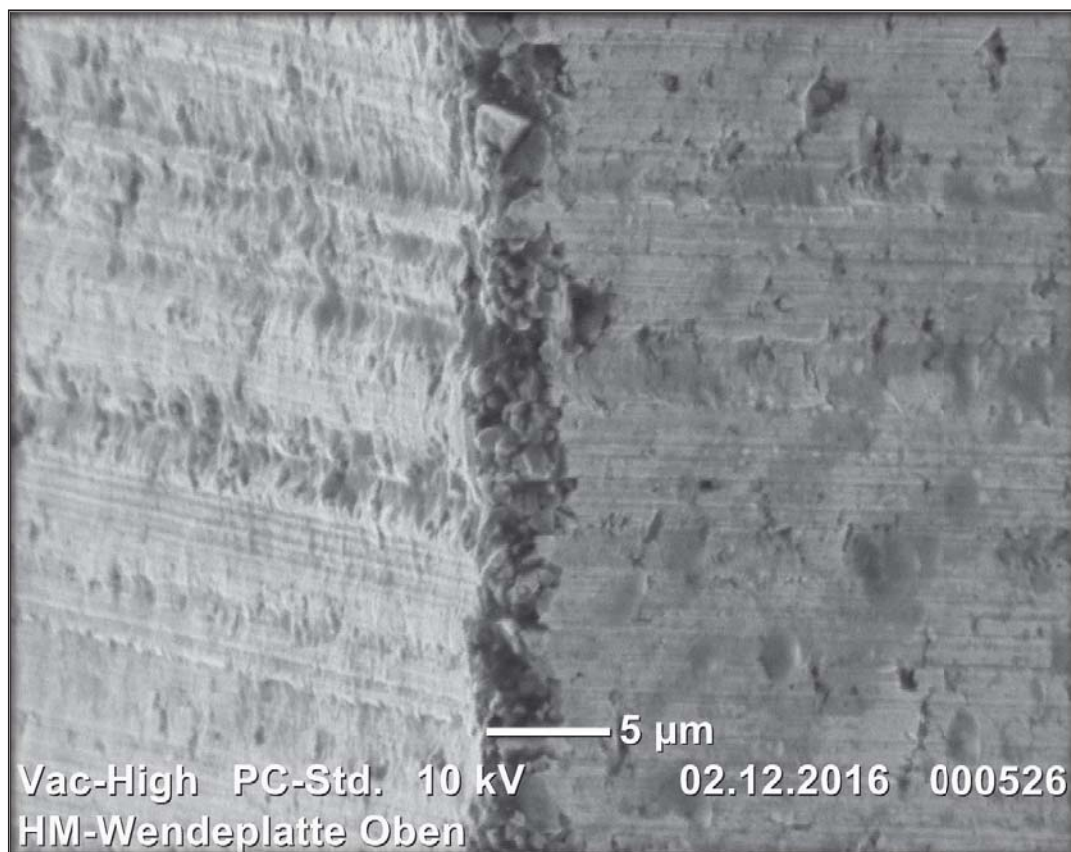


Abbildung 6.12: REM-Aufnahme des Schneidkeiles




6.3.2 Verwendeter Werkstoff

Für die Versuchsreihe wurden MDF-Platten mit Grundierfolie verwendet, gemäß (DIN EN 622:2003). Die Dimensionierung der Platten war 1000 x 500 x 19 mm.

6.3.3 Versuchsdesign

Es wurde ein Versuchsdesign konzipiert, das insgesamt alle für die Großserien-Möbelfertigung typischen Prozessschritte abbildet. Das Design ist in drei Versuchsreihen gegliedert. In Tabelle 6.7 sind die drei Versuchsreihen und deren Geometrien aufgelistet.

Tabelle 6.7: Die drei Versuchsreihen des Versuchsdesigns

Versuchsreihen	A	B	C
Geometrie	Gerade 	Start-Stop 	Innen-/Außen-Kontur 
Zahnvorschub f_z	konstant	dynamisch	dynamisch
Laufweg l_f	1 000 mm	1 000 mm	1 000 mm

Die Geometrie der Versuchsreihe „A“ ist eine gerade Wegstrecke mit konstantem Vorschub. Die Wegstrecke beträgt die gesamte Länge der MDF-Platte, 1000 mm. Danach wird das Werkzeug zurückgesetzt und in eine erneute Zustellung von 2 mm gebracht.

Diese Art von Fräsvorgang fällt in der Möbelfertigung beispielsweise beim Platten-aufteilen an. Der Vorschub wird von Versuch zu Versuch gesteigert, von 1 m/min bis 20 m/min. Die Versuchsreihen werden jeweils mit einer neuen Schneide gestartet und dann mehrere Messungen pro Versuch durchgeführt, um den Verschleißfortschritt vom lernenden System zu erfassen. Tabelle 6.8 zeigt die Prozessparameter der Versuchsreihe „A“.

Tabelle 6.8: Prozessparameter der Versuchsreihe „A“

Versuchs	A1	A2	A3	A4
Vorschubgeschw. v_f [m/min]	1	5	10	20
Schnittdicke a_e [mm]	2	2	2	2
Schnitttiefe a_p [mm]	19	19	19	19
Drehzahl [1/min]	18 000	18 000	18 000	18 000
Zahlvorschub geplant [mm]	0,06	0,28	0,56	1,11

Die Geometrie der Versuchsreihe „B“ besteht ebenfalls aus einer geraden Wegstrecke, hat aber drei Stellen, an denen das Werkzeug für einen sehr kurzen Zeitraum die Position hält. Um die programmierte Anforderung zu erfüllen, regelt die Werkzeugmaschinensteuerung die Vorschubgeschwindigkeit in einer Rampenform herunter und beschleunigt anschließend wieder auf den programmierten Wert. Dieser Start-Stopp-Vorgang ahmt eine Konturzugbearbeitung mit kleinen Radien und vielen Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen nach.

Tabelle 6.9: Prozessparameter der Versuchsreihe „B“

Versuch	B1	B2	B3	B4
Vorschubgeschw. v_f [m/min]	0,5	5	10	20
Schnittdicke a_e [mm]	2	2	2	2
Schnitttiefe a_p [mm]	19	19	19	19
Drehzahl [1/min]	18 000	18 000	1 8000	18 000
Zahlvorschub geplant [mm]	0,03	0,28	0,56	1,11

Tabelle 6.9 zeigt die Einstellungen der Versuchsreihe „B“. Hierbei ist zu beachten, dass sowohl die Vorschubgeschwindigkeit als auch der Zahnvorschub lediglich die im NC-Programm festgelegten Werte darstellen und beide Werte in der Praxis aufgrund der Start-Stopp-Vorgänge vermutlich niedriger liegen werden.

Tabelle 6.10: Prozessparameter der Versuchsreihe „C“

Versuch	C1	C2
Vorschubgeschw. v_f [m/min]	5	10
Schnittdicke a_e [mm]	2	2
Schnitttiefe a_p [mm]	19	19
Drehzahl [1/min]	18 000	18 000
Zahlvorschub geplant [mm]	0,28	0,56

Die Geometrie der Versuchsreihe „C“ beinhaltet zwei Richtungswechsel um je 90°. Dieser Versatz findet sich häufig in der Möbelherstellung beim Vorbereiten von Beschlägen oder dem Aussparen von Taschen. In Tabelle 6.10 sind die jeweils gewählten Parameter aufgelistet.

Um den Lernprozess für das gesamte Prozessparameterspektrum zu beschleunigen, wurden innerhalb dieses Versuchsdesigns pro Versuch mehrere Messungen des Schneidkantenversatzes durchgeführt. Zu Beginn der Versuchsreihe wurden aufgrund des exponentiellen Verlaufs des Verschleißfortschrittes drei Messwerte erzeugt: bei 10 m, 20 m und 50 m Vorschubweg sowie im späteren Verlauf bei 100 m und bei 200 m. Da bei gleichem Vorschubweg in den verschiedenen Versuchsreihen unterschiedliche Schnittwege anfallen, kann dort der mit dem Schnittweg korrelierende Verschleiß gemessen werden.

6.3.4 Schneidkantenversatzmessungen

Zur Messung des Schneidkantenversatzes wurde ein Oberflächenmessgerät des Typs *Form Talysurf 50* der Firma *Taylor Hobson Ltd* verwendet. Laut Datenblatt von *Taylor Hobson Ltd* beträgt die Messunsicherheit $\pm 2\%$.



Abbildung 6.13: Messvorgang des Schneidkantenversatzes

In Abbildung 6.13 ist der Messvorgang zu sehen. Hierbei wird der Tastkopf über der Messtrecke, die größer als die im Eingriff verwendete Schneide ist, über das fest eingespannte und ausgerichtete Werkzeug gezogen. Gemessen wurde jeweils die Mittellage der Bearbeitung (siehe Kapitel 5.5.1).

6.3.5 Qualitätsmessung

Durchgeführt wurden die Qualitätsmessungen der Kante durch das Kantenschartigkeitsmessgerät „KaScha“ des IfW der Universität Stuttgart (Abbildung 6.15).

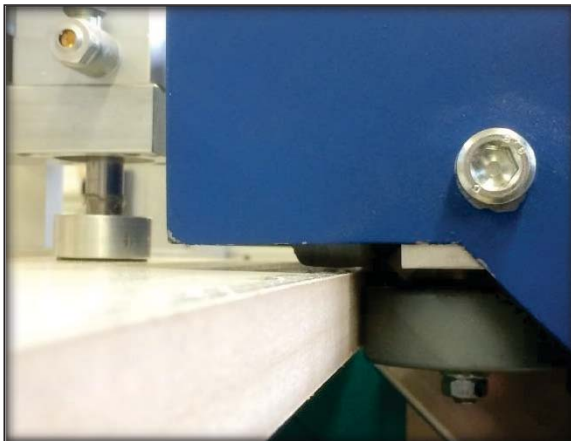


Abbildung 6.14: Messvorgang mit Kantenschartigkeitsmessgerät

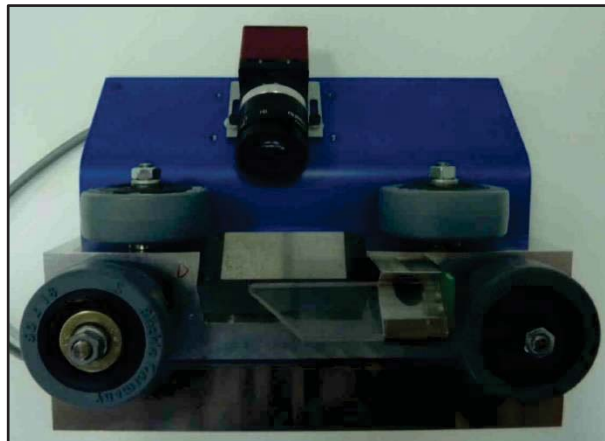


Abbildung 6.15: Kantenschartigkeitsmessgerät des IfW der Universität Stuttgart (IfW 2013)

In Abbildung 6.14 ist der Messvorgang zu sehen. Um die definierte Messstrecke von 900 cm mit konstantem Vorschub abzufahren, wurde das Messgerät durch einen vorschubgeregelten Säge Tisch geführt. Ein gewichteter Mittelwert aller Kantenausbrüche innerhalb der Messstrecke stellt das Ergebnis der Messung dar, siehe Kapitel 5.5.2.

6.4 Ergebnisse der Versuchsdurchführung

Die Ergebnisse der Versuchsdurchführung bestehen aus den kontinuierlichen Werkzeugmaschinen- und den errechneten Prozessgrößen, den Ergebnissen der Messung des Schneidkantenversatzes sowie den Messungen der Kantenqualität.

6.4.1 Bewertungskriterien der Versuchsergebnisse

Die Bewertung des Modells hat zwei Ziele. Erstens eine Überprüfung der Regressionsfunktion als Ganzes, d. h. ob und wie gut die Zielvariable durch das Modell erklärt wird (*goodness of fit*). Das zweite Ziel ist die Überprüfung der Modellprämisse. Das Modelldesign wird hierbei anhand der Kreuzvalidierungsverfahren kontrolliert.

Die Überprüfung der Regressionsfunktion als Ganzes findet anhand der Güteindikatoren des Fits statt. Als Güteindikatoren werden die Kennzahlen *Root-mean-square deviation* (RSME) und der Determinationskoeffizient R^2 verwendet. Die RSME ist die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler, siehe Gleichung 6.1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (6.1)$$

Der Determinationskoeffizient R^2 trifft eine Aussage über die Anzahl der Variationen innerhalb der Daten, die durch die vorliegende Regression erklärt werden kann, siehe Gleichung 6.2. Dabei steht *SST* für „*Total Sum of Squares*“ und *SSE* für „*Explained Sum of Squares*“.

$$R^2 = \frac{SSE}{SST} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{Backhaus et al. 2016, S. 84}) \quad (6.2)$$

Zur Überprüfung der Modellprämisse wird das Kreuzvalidierungsverfahren (Picard et al. 1984) angewendet. Hierbei werden die Ergebnisse in gleichgroße Untergruppen (k = Gruppenanzahl) eingeteilt. Eine Gruppe (Testdaten) wird außen vorgelassen und zum Test der Qualität der Prognose verwendet. Die restlichen Untergruppen werden zur Erzeugung der Wirkzusammenhänge verwendet (Trainingsdaten). Nachdem die Größe der Fehlerprognose der Testdaten evaluiert wurde, wird das Vorgehen mit einer anderen Gruppe wiederholt, bis alle Daten einmal als Testpunkt und $k-1$ -mal zur Erzeugung der Wirkzusammenhänge verwendet wurden (Siebertz 2010, S. 219).

6.4.2 Ergebnisse der Schneidkantenversatzmessungen

Insgesamt wurden 42 Schneidkantenversatzmessungen vorgenommen. Die Ergebnisse werden erst innerhalb einer Versuchsreihe dargestellt und anschließend konsolidiert betrachtet. Die Betrachtung der einzelnen Versuchsreihen erlaubt Aussagen über die Stimmigkeit des Verschleißfortschrittes eines Werkzeuges und die des angewandten Verschleißmodells.

$$y(x) = c_1 \cdot x^{c_2} \quad SV(l_c) = c_1 \cdot l_c^{c_2} \quad (6.3)$$

Für die Veranschaulichung und Auswertung der einzelnen Versuchsreihen wurde die Form eines Regression Fits mit der Funktion des Schnittweges in Abhängigkeit von zwei Koeffizienten gewählt, siehe Gleichung 6.3.

Ergebnisse der Versuchsreihe „A“

Die Versuchsreihe „A“ bestand aus geradlinigen Bahnen ohne geplante Vorschubveränderung. Innerhalb der vier Versuche wurden insgesamt 18 Messungen vorgenommen. In Tabelle 6.11 ist der gemessene Verschleißfortschritt während der Versuche der Versuchsreihe A bei verschiedenen Laufmetern aufgezeigt.

Tabelle 6.11: Schneidkantenversatzmessungen der Versuchsreihe "A"

Versuch	$l_f=10\text{ m}$	$l_f=20\text{m}$	$l_f=50\text{m}$	$l_f=100\text{m}$	$l_f=200\text{m}$	c_1	c_2	RMSE	R^2
A1	2,9 μm	3,8 μm	5,0 μm	6,5 μm	./.	0,2565	0,3441	0,0942	0,9976
A2	2,0 μm	2,9 μm	3,3 μm	5,1 μm	6,6 μm	0,2214	0,4015	0,3271	0,9765
A3	1,9 μm	2,8 μm	4,0 μm	5,5 μm	6,7 μm	0,3207	0,3944	0,2222	0,9903
A4	1,2 μm	1,6 μm	1,8 μm	2,2 μm	./.	0,4783	0,2383	0,0978	0,9632

Ebenfalls in Tabelle 6.11 aufgelistet sind die Koeffizienten und die Güte des Fits.

Tabelle 6.12: Ermittlung des Schnittweges der Versuchsreihe "A"

Versuch	$l_f=10\text{ m}$	$l_f=20\text{m}$	$l_f=50\text{m}$	$l_f=100\text{m}$	$l_f=200\text{m}$	Plan bei 100m	Abweichung
A1	1 183 m	2366 m	5 915 m	11 830 m	./.	11 583 m	+ 2 %
A2	231,5 m	463 m	1 158 m	2 315 m	4 630 m	2 316,6 m	0 %
A3	118,3 m	236,6 m	591,5 m	1 183 m	2 366 m	1 158,3 m	+ 2 %
A4	59,15 m	118,3 m	295,75 m	591,5 m	./.	579,2 m	+ 2 %

Die Schnittwege, die in dieser Versuchsreihe aufgenommen wurden, sind in der Tabelle 6.12 aufgelistet. Der geplante Schnittweg bei einer Vorschubgeschwindigkeit

von 1 m/min liegt bei einem Meter Laufweg bei 115 μm . Die geringe Schnittwegabweichung war zu erwarten, da die konstante Geradeausbewegung keinerlei Vorschubgeschwindigkeitsveränderungen bewirkt.

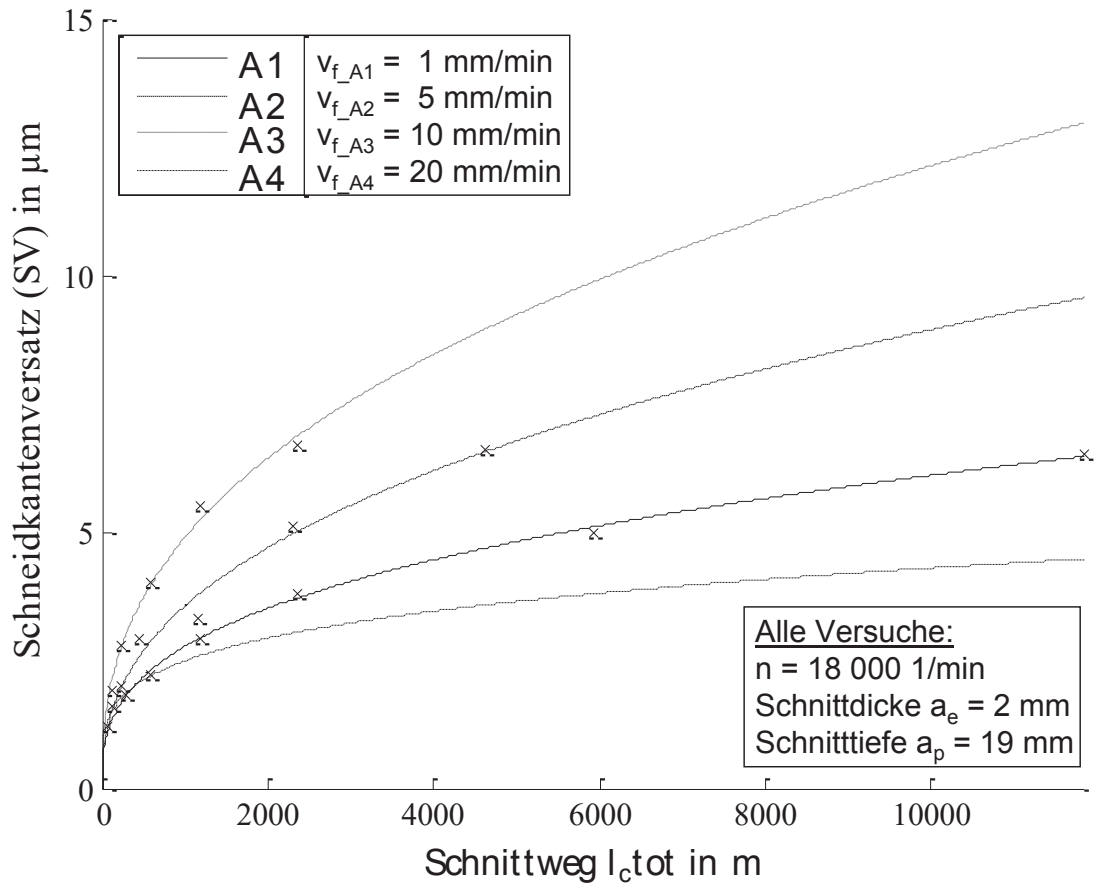


Abbildung 6.16: Schneidkantenversatz der Versuchsreihe "A"

In Abbildung 6.16 sind sowohl die Messungen als auch ein Regression Fit pro Versuch zu sehen.

Ergebnisse der Versuchsreihe „B“

In der Versuchsreihe „B“ werden mehrere Punkte programmiert, die einen Konturzug nachstellen. Dies ist nur möglich, indem das Werkzeug auf diesen Punkt hin abbremst und anschließend erneut beschleunigt. Insgesamt wurden 16 Messungen in dieser Versuchsreihe vorgenommen. Die Tabelle 6.13 zeigt alle Messungen und Fits dieser Reihe.

Tabelle 6.13: Schneidkantenversatzmessungen der Versuchsreihe "B"

Versuch	$l_f=10\text{ m}$	$l_f=20\text{m}$	$l_f=50\text{m}$	$l_f=100\text{m}$	c_1	c_2	RMSE	R^2
B1	3,8 μm	5,4 μm	6,2 μm	8,2 μm	0,3755	0,3042	0,4345	0,9624
B2	3,6 μm	4,8 μm	5,8 μm	6,4 μm	0,8537	0,2414	0,2754	0,9699
B3	2,8 μm	4,2 μm	4,6 μm	5,8 μm	0,4094	0,2705	0,4118	0,9261
B4	1,6 μm	2,4 μm	2,6 μm	3,2 μm	0,336	0,2537	0,2402	0,9119

Tabelle 6.14: Durchschnittlicher Vorschub der Versuchsreihe "B"

Versuch	Ist v_f	Plan v_f	Abweichung
B1	0,49 m/min	0,5 m/min	- 2,0 %
B2	4,18 m/min	5 m/min	- 16,4 %
B3	6,97 m/min	10 m/min	- 30,3 %
B4	9,5 m/min	20 m/min	- 52,5 %

Die Vorschubbetrachtung zeigt, wie erwartet, ein zunehmendes Einbrechen des erreichten Vorschubs bei höherer Vorschubgeschwindigkeit, siehe Tabelle 6.14. Bei kleinem Vorschub fallen die Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge relativ gesehen wenig ins Gewicht, der durchschnittliche Vorschub verringert sich hierbei lediglich um 2 %. Bei der höchsten vorgegebenen Vorschubgeschwindigkeit von 20 m/min ist bei der identischen Kontur eine Verringerung von mehr als der Hälfte des durchschnittlichen Vorschubes zu beobachten.

Tabelle 6.15: Ermittlung des Schnittweges der Versuchsreihe "B"

Versuch	$l_f=10\text{ m}$	$l_f=20\text{m}$	$l_f=50\text{m}$	$l_f=100\text{m}$	Plan bei 100m	Abweichung
B1	2 410 m	4 820 m	12 050 m	24 100 m	23 166 m	+ 3,87 %
B2	514,5 m	1 029 m	2572,5 m	5 145 m	2 316 m	+ 120 %
B3	596 m	1 192 m	2 980 m	5 963 m	1 158,3 m	+ 514 %
B4	724,4 m	1 448 m	3 622 m	7 244 m	579,2 m	+ 1 050 %

In Tabelle 6.15 sind die erfassten Schnittwege der Versuchsreihe zu sehen. Der Schnittweg ist wie zu erwarten bei B1 nahezu identisch mit der Planvorgabe und steigt dann aufgrund des größeren Zeitanteils, der aus Abbrems- und Beschleunigungsvorgängen besteht, um ein Vielfaches gegenüber dem Plan an.

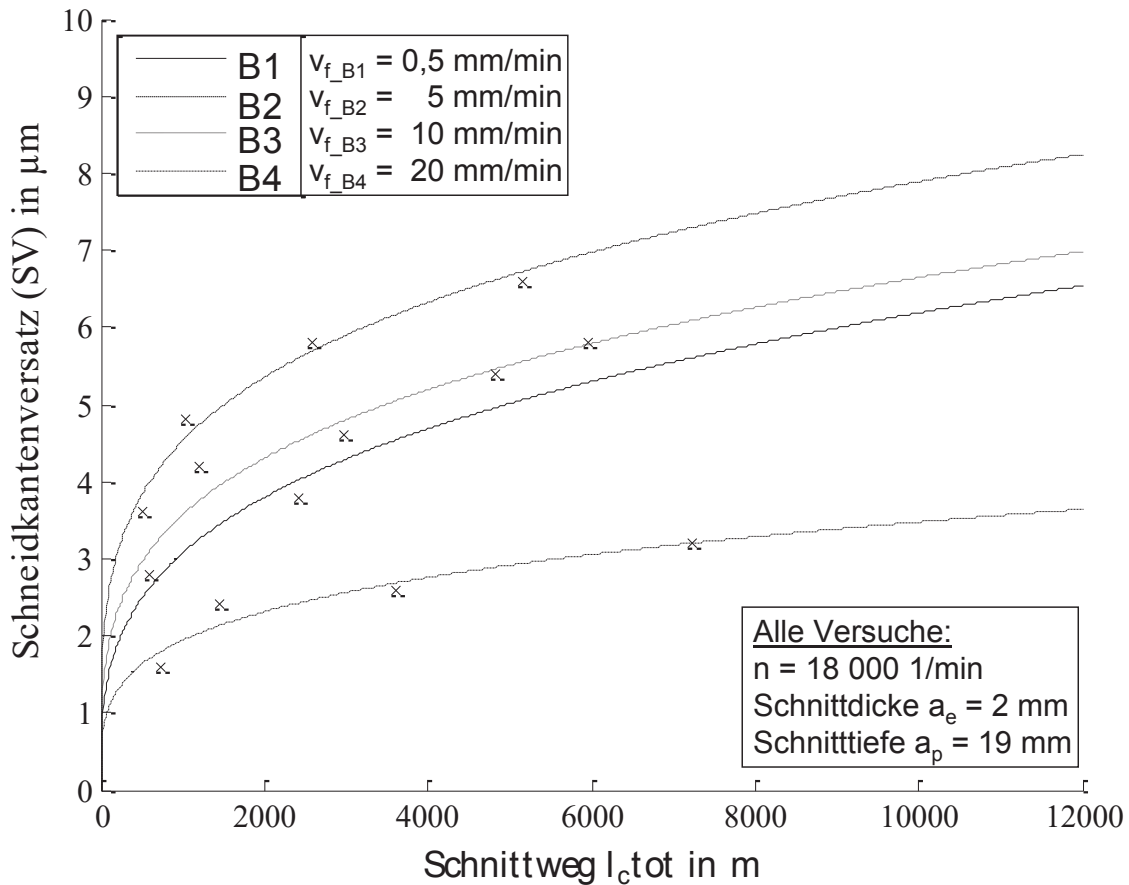


Abbildung 6.17: Schneidkantenversatz der Versuchsreihe "B"

In Abbildung 6.17 sind die Verschleißfortschritte der einzelnen Versuchswerkzeuge festgehalten. Da jeweils verschiedene durchschnittliche Vorschubgeschwindigkeiten zugrunde liegen, ist ein direkter Vergleich der Fits nicht möglich.

Ergebnisse der Versuchsreihe „C“

Die Kontur der Versuchsreihe C weist je zwei Richtungswechsel um je 90° auf, was eine oft wiederkehrende Bearbeitung in der Möbelindustrie darstellt.

Tabelle 6.16: Schneidkantenversatzmessungen der Versuchsreihe "C"

Versuch	$l_f=10\text{ m}$	$l_f=20\text{ m}$	$l_f=50\text{ m}$	$l_f=100\text{ m}$	c_1	c_2	RMSE	R^2
C1	5,0 μm	6,0 μm	8,3 μm	9,2 μm	1,084	0,2676	0,3842	0,9743
C2	6,8 μm	7,9 μm	9,3 μm	10,9 μm	2,295	0,2015	0,1663	0,9941

Tabelle 6.16 zeigt die gemessenen Verschleißfortschritte und die jeweiligen Fit-Kurven.

Tabelle 6.17: Durchschnittlicher Vorschub der Versuchsreihe "C"

Versuch	Ist v_f	Plan v_f	Abweichung
C1	4,93 m/min	5 m/min	- 1,4 %
C2	9,19 m/min	10 m/min	- 8,1 %

Wie in Tabelle 6.17 zu sehen, sind die Durchschnittsvorschübe bei dieser Bearbeitungskontur aufgrund der beiden Bremsvorgänge geringer als die geplanten Vorschübe.

Tabelle 6.18: Ermittlung des Schnittweges der Versuchsreihe „C“

Versuch	$l_f=10\text{ m}$	$l_f=20\text{ m}$	$l_f=50\text{ m}$	$l_f=100\text{ m}$	Plan bei 100m	Abweichung
C1	325,3 m	650,6 m	1 627 m	3 253 m	2 316 m	+ 40,5 %
C2	217,8 m	435,6 m	1 089 m	2 178 m	1 158,3 m	+ 88,03 %

Tabelle 6.18 zeigt die im Prozess ermittelten Schnittwege der Kontur. Der Schnittweg nimmt aufgrund des gefallenen Vorschubes in einem erwarteten Maße zu. Abbildung 6.18 zeigt den Fortschritt der beiden Kurven.

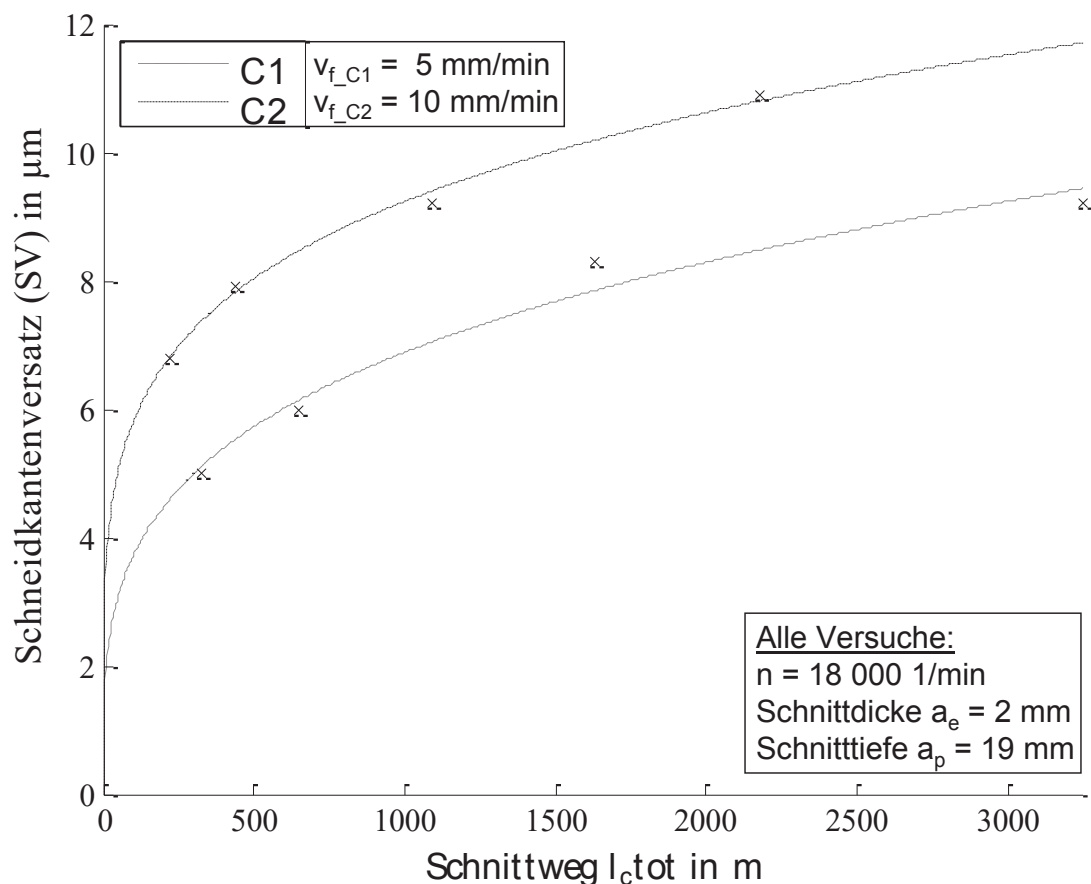


Abbildung 6.18: Schneidkantenversatz der Versuchsreihe "C"

6.4.3 Verschleißfaktoren für die Verschleißprognose

Das Ziel der Verschleißfaktoren ist die Kombination aller aufgenommenen Werte aus allen Versuchsreihen in ein für diese Schneidstoff-/Werkstoffpaarung allgemeingültiges Kennfeld.

Die Gleichung 6.4 zeigt die resultierenden optimalen Parameter für die durchgeführte Versuchsreihe.

$$\varphi_{Wear}(x) = \begin{pmatrix} 1 \\ l_c \\ v_f \\ v_f v_f \\ l_c v_f \\ \sqrt{l_c} v_f \end{pmatrix} \hat{\beta}_{Wear} = \begin{pmatrix} 0,034142905752613 \\ 0,001312496422389 \\ 0,359651969058353 \\ -0,039007654375270 \\ -0,000490111181352 \\ 0,034064701413502 \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

Abbildung 6.19 zeigt einen dreidimensionalen Plot des sich aus dem optimalen Parameter ergebenden Kennfeldes. Das Kennfeld gibt den resultierenden Schneidkantenversatz über das gesamte Prozessfenster wieder.

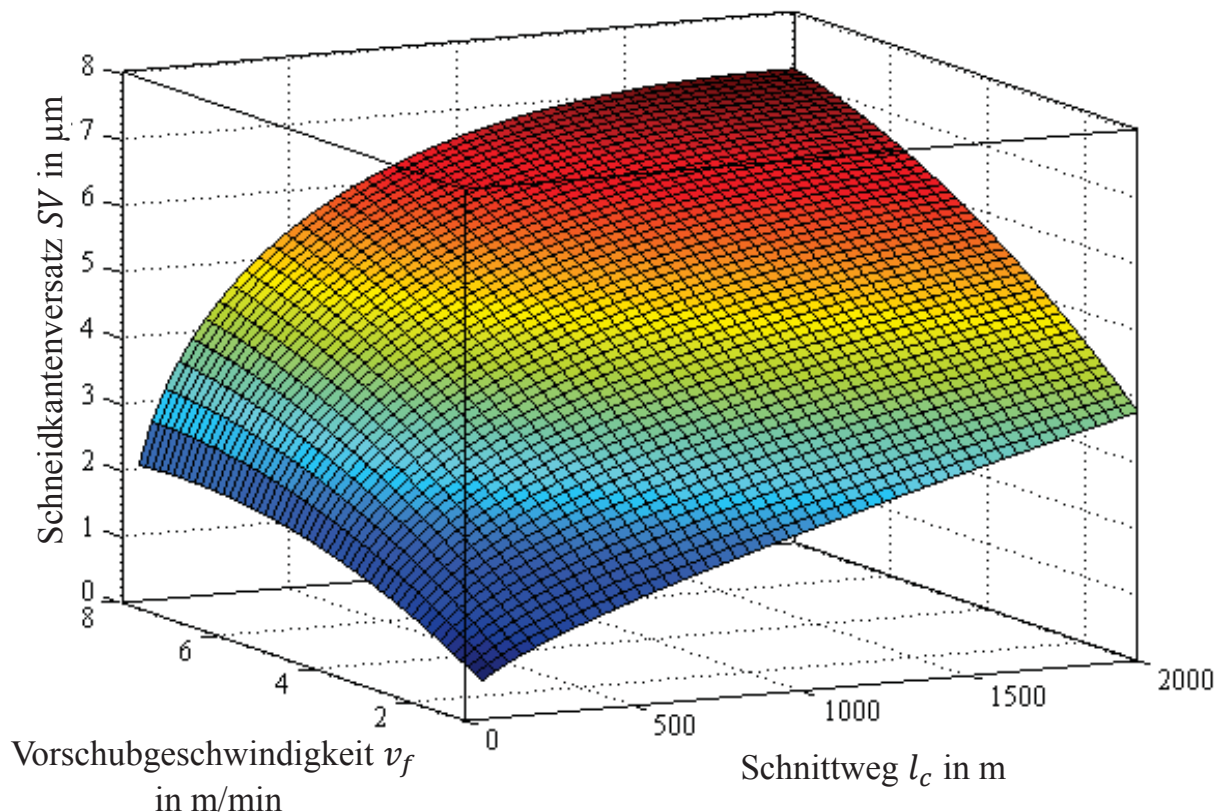


Abbildung 6.19: Visualisierung des Verschleiß-Kennfeldes

Die drei Phasen des Verschleißes sind für die Hartmetall-MDF-Bearbeitung typisch und im Kennfeld wiederzufinden. Die erste Phase ist ein exponentieller Verlauf, die zweite Phase ein degressiver Verlauf und die dritte Phase ein linearer Verlauf. Bei

höherem Vorschub ergibt sich pro Schnittweg ein höherer Verschleiß. Da aber bei gleichem Laufweg und höherem Vorschub wenig Schnittweg entsteht, wird der Effekt kompensiert und bei höherem Vorschub entsteht, auf den gleichen Laufweg der Bauteilkontur gesehen, weniger Verschleiß.

6.4.4 Evaluierung der Verschleißprognose

Die Güteindikatoren des Modells ergeben für den Wert des RMSE = 1,729 und für den Determinationskoeffizienten $R^2=0,51$. Die Evaluierung des Verschleißmodells mittels Kreuzvalidierungsverfahren wurde mit fünf Gruppen durchgeführt ($k=5$) und pro Durchgang die mittlere Abweichung der Messwerte von den prognostizierten Werten ermittelt.

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |SV_{mess} - \widehat{SV}| \quad (6.5)$$

Die Tabelle 6.19 zeigt die nach Gleichung 6.5 berechneten mittleren Abweichungen für je einen Kreuzvalidierungsdurchgang.

Tabelle 6.19: Ergebnisse der Kreuzvalidierung der Verschleißprognose

Gruppe	Mittlere Abweichung (d)
1	1,43 μm
2	1,75 μm
3	1,01 μm
4	2,23 μm
5	2,44 μm

Die gleiche Dimension der mittleren Abweichungen pro Gruppe zeigt, dass das Modell keine Überanpassung (engl. *overfit*) aufweist und es daher für das Lernen dieses physikalischen Zusammenhangs geeignet ist.

6.4.5 Fazit zur Verschleißmodellierung

Die Versuche haben gezeigt, dass der Verschleißfortschritt durch das Modell abgebildet werden kann. Es wurde ebenfalls gezeigt, dass eine Überführung aller aufgenommenen Prozessgrößen und Messwerte in eine konsolidierte Beschreibung durch Verschleißfaktoren machbar ist. Es wurde pro individueller Versuchsreihe ein Prognosefehler kleiner 5% ermittelt. Bei der Übertragung der einzelnen Versuchsreihen auf das gesamte Prozessfenster erhöhte sich der Prognosefehler wie erwartet. Dennoch ist der Fehler von 23 % für die Anwendung tolerierbar. Eine weitere

Erkenntnis aus den Versuchen ist die Tatsache, dass die Verschleißfaktoren im Prozess, während der Bearbeitungen von Bauteilen, erlernbar sind.

6.4.6 Kantenschartigkeitsmessungen

Insgesamt wurden 18 Kantenschartigkeitsmessungen durchgeführt. Die Messtrecke betrug jeweils 900 mm. Die Ergebnisse der Kantenschartigkeit in Form der gewichteten Mittel α_{w_avg} sind in Tabelle 6.20 aufgelistet.

Tabelle 6.20: Ergebnisse der Kantenausbruchsmessungen

Versuch	Schnittweg	Vorschubgeschwindigkeit	Zeit im Eingriff	gewichtetes Mittel
A1	1 183 m	1 m/min	600 s	1,09
A1	2 366 m	1 m/min	1 200 s	1,82
A1	5 915 m	1 m/min	3 000 s	2,54
A1	11 830 m	1 m/min	6 000 s	6,42
A2	2 315 m	5 m/min	1 206 s	4,08
A2	4 630 m	5 m/min	2 412 s	6,58
A4	1 183 m	10 m/min	600 s	7,8
A4	2 366 m	10 m/min	1 200 s	12,5
B1	4 820 m	0,49 m/min	2 426,56 s	8,6
B2	514,5 m	4,18 m/min	142,5 s	3,1
B2	1 029 m	4,18 m/min	285 s	2,5
B2	2 572,5 m	4,18 m/min	712,5 s	4,6
B2	5 145 m	4,18 m/min	1425 s	8,6
B3	1 778,21 m	6,97 m/min	85,62 s	5,77
B3	3 556,42 m	6,97 m/min	171,24 s	7,4
B3	8 891,05 m	6,97 m/min	428,1 s	9,8
C1	3 253 m	4,93 m/min	1230 s	2,73
C2	2 178 m	9,19 m/min	663 s	2,81

Die Auswertung der Versuche fand mit dem beschriebenen Modell statt. Es wurden im Prozess die Prozesseigenschaften Vorschubgeschwindigkeit und Schnittweg ermittelt und nach dem Prozess die Qualität der Kante gemessen. Die Gleichung 6.6 zeigt die für die Versuchsreihe ermittelten Qualitätsfaktoren.

$$\varphi_{Qual}(x) = \begin{pmatrix} 1 \\ l_c \\ v_f \\ l_c l_c \\ v_f v_f \\ l_c v_f \end{pmatrix} \quad \hat{\beta}_{Qual} = \begin{pmatrix} 0,548179195313023 \\ 0,001193737983665 \\ -0,072327613709813 \\ -0,000000059230385 \\ 0,064727349435600 \\ 0,000011659835153 \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

Der quadratische Einfluss des Laufweges und die Interaktion der beiden Eingangsgrößen weisen einen sehr geringen Einfluss auf.

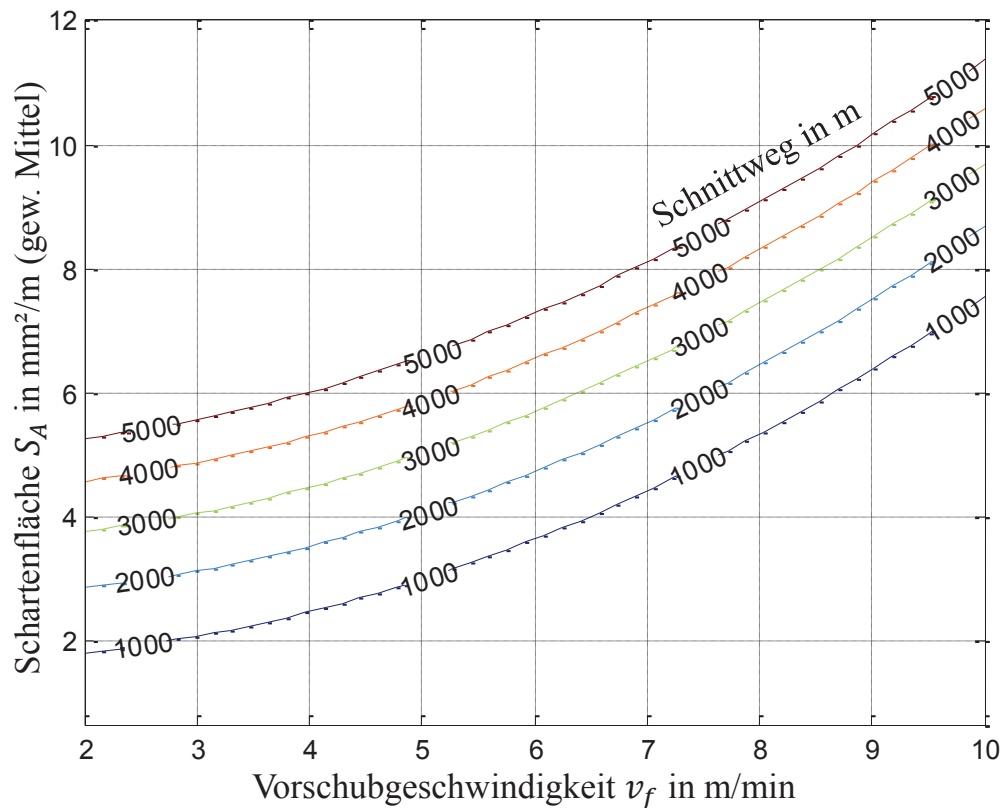


Abbildung 6.20: Abhängigkeit der Qualität von der Vorschubgeschwindigkeit

Die Abbildung 6.20 zeigt die Abhängigkeit der Qualität von der Vorschubgeschwindigkeit bei verschiedenen zurückgelegten Schnittwegen. Zu sehen ist, dass mit zunehmendem Schnittweg die Qualität stetig abnimmt. Der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit ist hierbei sehr groß. Je schneller der Zerspanprozess stattfindet, umso mehr Ausbrüche pro Fläche zeigt die entstandene Kante. Dieser Zusammenhang lässt sich durch die mittlere Spandicke h_m der entstehenden Späne erklären. Die Dicke der entstehenden Späne steht in einem linearen Zusammenhang zum Vorschub.

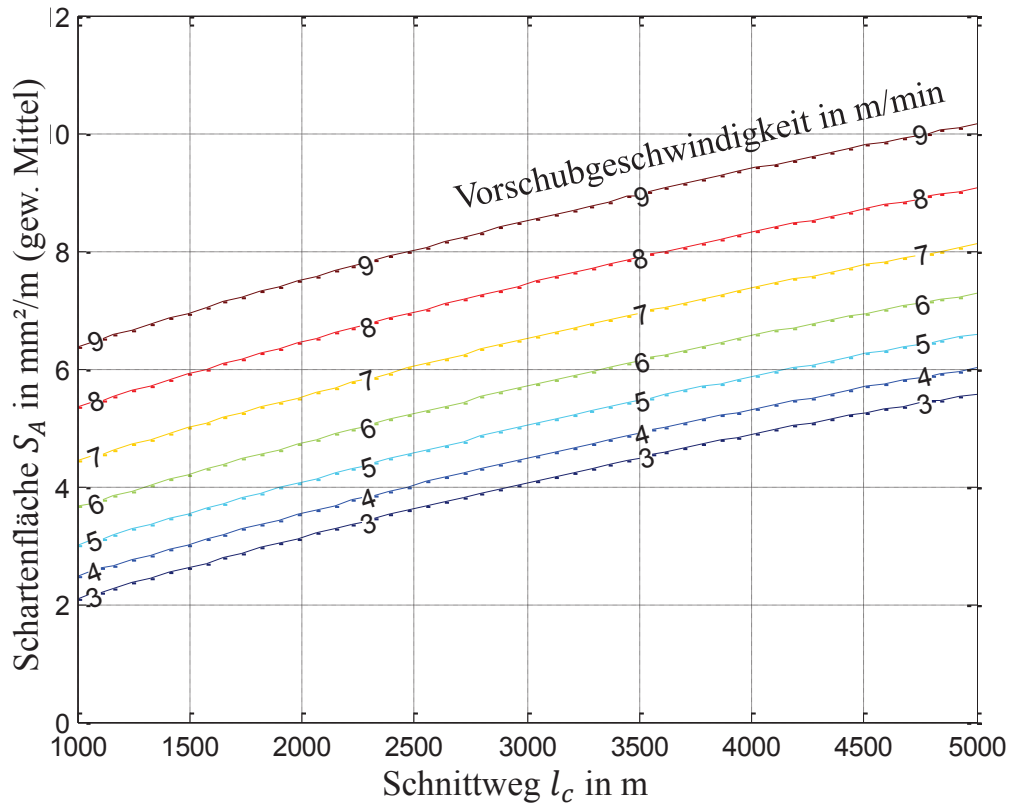


Abbildung 6.21: Abhängigkeit der Qualität vom Schnittweg

Die Abbildung 6.21 zeigt die Abhängigkeit der Qualität vom Schnittweg bei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten. Es ist zu erkennen, dass bei identischem zurückgelegtem Schnittweg bei verschiedenen Einstellungen unterschiedliche Qualität erreicht wird. Das heißt, bei unterschiedlichen Prozesseinstellungen kann mit dem identischen Werkzeug das Standkriterium gehalten oder überschritten werden. Die Entscheidung, ob ein Werkzeug nicht mehr verwendet wird, muss daher in Kombination mit dem zu erwartenden Schnittweg und den gewählten Prozesseinstellungen des zu fertigenden Auftrages gefällt werden.

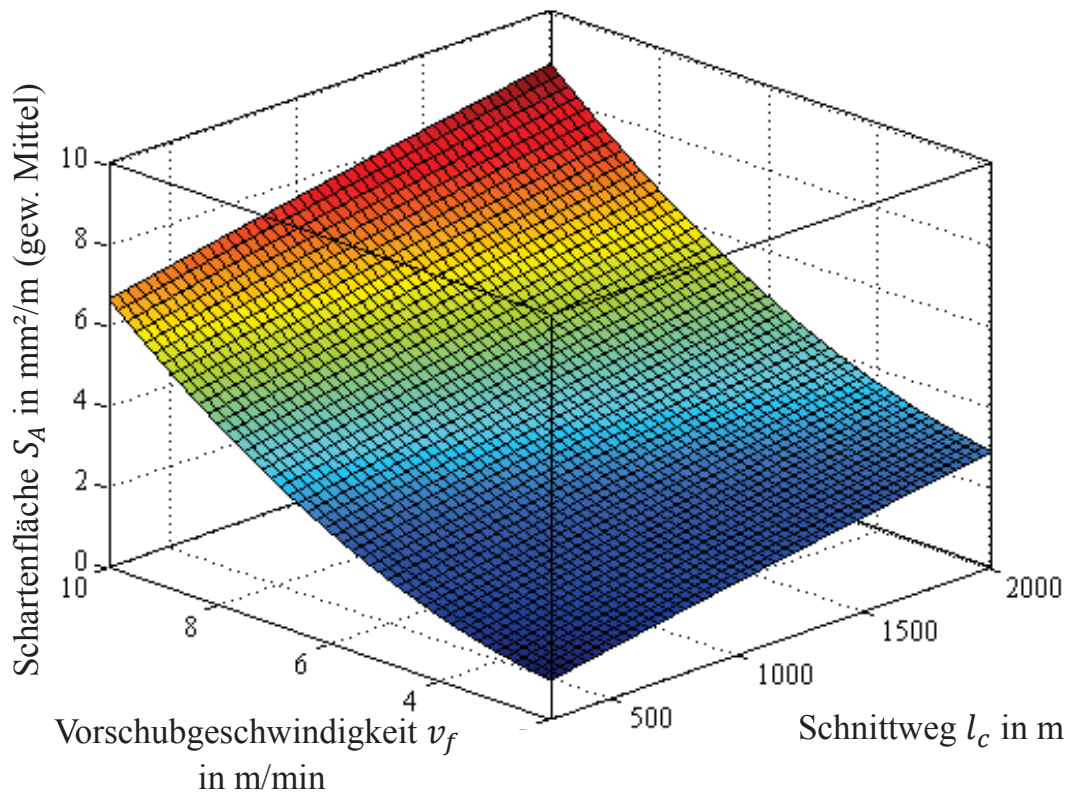


Abbildung 6.22: Visualisierung des Qualitäts-Kennfeldes

Die Abbildung 6.22 zeigt das gesamte Kennfeld der zu erwartenden Kantenschartigkeit bei ansteigendem Schnittweg und Vorschubgeschwindigkeit. Zu sehen ist der stetige Anstieg der Kantenschartigkeit mit zunehmendem Schnittweg. Dies ist gleichzusetzen mit einer abfallenden Qualität der Kante. Ebenfalls klar zu sehen ist der starke Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit. Dies zeigt sich zum einen in dem höheren Wert bei schnellerem Vorschub und zum anderen daran, dass bereits bei sehr geringem zurückgelegtem Schnittweg ein starkes Ausbrechen der Kante messbar ist.

6.4.7 Evaluierung der Qualitätsprognose

Die Güteindikatoren des Qualitätsprognosemodells ergeben für den Wert des RMSE = 2,92 und für den Determinationskoeffizienten $R^2 = 0,58$. Die Güte in Bezug auf die Qualitätsfaktoren des Modells liegt somit im tolerierbaren Bereich. Die Evaluierung des Verschleißmodells mittels Kreuzvalidierungsverfahren wurde mit fünf Gruppen durchgeführt ($k=5$) und pro Durchgang die mittlere Abweichung der Messwerte von den prognostizierten Werten ermittelt. Tabelle 6.21 zeigt die mittleren Abweichungen für je einen Kreuzvalidierungsdurchgang.

Tabelle 6.21: Ergebnisse der Kreuzvalidierung der Qualitätsprognose

Gruppe	Mittlere Abweichung (d)
1	1,146 mm ² /m
2	1,850 mm ² /m
3	1,395 mm ² /m
4	0,961 mm ² /m
5	1,401 mm ² /m

Die gleiche Dimension der mittleren Abweichungen pro Gruppe zeigt, dass das Modell keine Überanpassung (engl. *overfit*) aufweist und es daher für das Lernen dieses physikalischen Zusammenhangs geeignet ist.

6.4.8 Fazit zur Qualitätsmodellierung

Es wurde gezeigt, dass die Qualitätsfaktoren bereits bei geringen Messvorgängen in Kombination mit den erfassten Prozessdaten erlernt werden können. Diese werden, neben der Einsatzhistorie und den Verschleißfaktoren, als Standkriterium für exakte Prognosen benötigt, also als maximale Obergrenze des Werkzeugeinsatzes.

6.5 Spezifische einsatzabhängige Werkzeugkosten

Die Beispielbetrachtung der einsatzabhängigen Werkzeugkosten besteht aus dem verwendeten Versuchswerkzeugsystem aus Kapitel 6.3.1 und den Verschleißfaktoren aus Kapitel 6.4.3. Dieses System wurde gewählt, da es sich um einen weit verbreiteten Oberfräser zum Formatieren handelt. Es hat eine achsparallele Schneide und die Messerbestückung ist ausgelegt auf einen absatzfreien Schnitt.

Im Bearbeitungsszenario wird das Werkzeug bei der Ausführung des Fertigungsauftrages ausgehend von dem Zustand 1 in den Zustand 2 versetzt. Das Verschleißverhalten und die beiden Zustände des Werkzeuges sind in Abbildung 6.23 zu sehen.

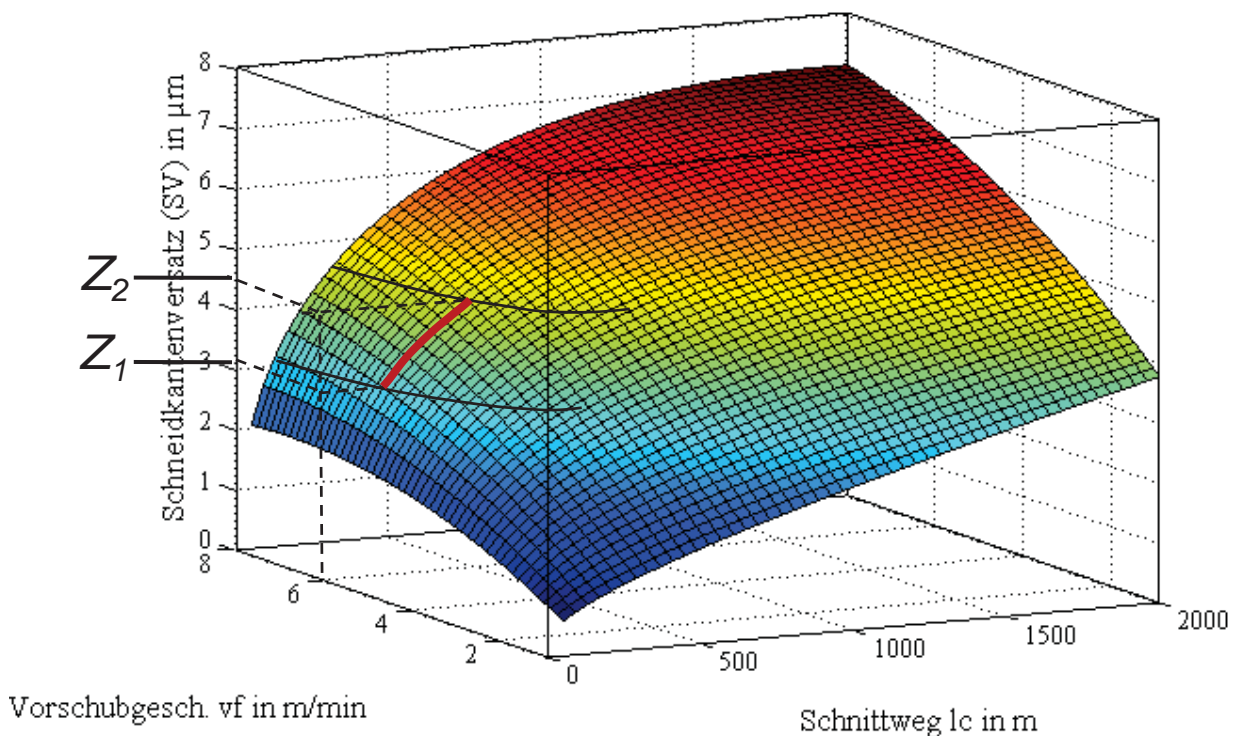


Abbildung 6.23: Kennfeld mit zwei Werkzeugzuständen

Zustand 1 ist der aus der Werkzeughistorie resultierende Schneidkantenversatz von 3,1 μm , Zustand 2 der aus der Werkzeughistorie resultierende Schneidkantenversatz von 4,5 μm , siehe Abbildung 6.23. Die Werkzeugeinsatzgrenze wurde mit 7 μm ermittelt und repräsentiert 100 % des einsetzbaren Werkzeuges.

Zustand 1 weist folgenden Verschleiß in Form von Schneidkantenversatz auf:

$$Z_1 = 3,1 \mu m \quad (6.7)$$

Zustand 2 weist folgenden Verschleiß in Form von Schneidkantenversatz auf:

$$Z_2 = 4,4 \mu m \quad (6.8)$$

Der anteilige Schneidkantenversatz aus den beiden Zuständen und einer zehnmaligen Instandsetzung ergibt:

$$\Delta SV = \frac{Z_2 - Z_1}{SV_{max} \cdot (Anz_{Inst} + 1)} = \frac{4,4 \mu m - 3,1 \mu m}{7 \mu m * 11} = 0,01688 \quad (6.9)$$

Der Tragkörper des verwendeten Werkzeuges (*Schafffräser ID-40879*) kostet x_1 , die eingesetzte Wendeschneidplatte vom Typ *HW-K05 30 x 12 x 1,5 mm* kostet jeweils x_2 . Aus diesen beiden Preisen ergibt sich für den initialen Werkzeugpreis:

$$K_{VK} = \text{Summe aller Komponenten des Werkzeugsystems} = x_1 + x_2 \quad (6.10)$$

Durch das Ersetzen einer Wendeschneidplatte und einem angenommenen Kostensatz von x_3 für den Werkzeuginstandsetzungsaufwand $Inst_{Aufwand}$ ergibt sich aus beiden Preisen folgender Kostensatz für einen Werkzeuginstandsetzungsvorgang:

$$K_{WKZ_{Inst}} = WKZ_{Komponenten} + Inst_{Aufwand} = x_2 + x_3 \quad (6.11)$$

Eingesetzt in die Gleichung für den anteiligen Werkzeugverschleiß (Abbildung 5.29):

$$K_c (\Delta SV) = (K_{VK} + Anz_{Inst} \cdot K_{WKZ_{Inst}}) \cdot \Delta SV \quad (6.12)$$

$$K_c (0,01688) = (x_1 + x_2 + 10 \cdot (x_2 + x_3)) \cdot 0,01688 \quad (6.13)$$

Die Kosten für den anteiligen Werkzeugverschleiß, die durch den Einsatz des Werkzeuges bei der Ausführung des Auftrages entstanden sind zeigt Gleichung 6.13. Diese setzen sich zusammen aus einem Anteil für die Beschaffung des Werkzeuggrundkörpers und einem Anteil für die Instandsetzungsvorgänge.

6.6 Gesamtfazit zur Validierung des Modells

Die an das Modell gestellten Anforderungen gliederten sich in branchenbezogene Anforderungen, prozessbezogene Anforderungen, Anforderungen des Anwenders und wissenschaftliche Anforderungen. Die branchenbezogenen Anforderungen sind die Anwendbarkeit in der Holzbearbeitungsbranche und die Wirtschaftlichkeit. Der Nachweis der Anwendbarkeit in der Holzbearbeitungsbranche mit den spezifischen Verschleißmechanismen fand anhand einer Versuchsreihe statt und somit ist die Gültigkeit für Fräsprozesse in der Holzbearbeitung gewährleistet. Die Wirtschaftlichkeit der Lösung liegt vor, wenn der Nutzen über eine bestimmte Dauer gegenüber den Kosten überwiegt. Der Nutzen ist gegeben durch Einsparungen im Werkzeugeinsatz. Werkzeuge können bis nahe an ihren Werkzeuggrenzwert verwendet werden und dadurch verringern sich die Werkzeugkosten gegenüber einer weniger präzisen Werkzeugeinsatzplanung. Die Kosten sind ausschließlich der Informationstechnik zuzuschreiben, da zur Datenaufnahme keine zusätzlichen Sensoren benötigt werden.

Die gestellten prozessbezogenen Anforderungen sind die Gültigkeit für in der Holzbearbeitung relevante Werkstoffklassen und eine Gruppe von Werkzeugtypen und bekannte Schneidstoffe. Die Gültigkeit des Modells für die Werkstoffklasse der MDF-Platten – dem häufigsten Vertreter der Holzwerkstoffe – wurde nachgewiesen. Der gewählte Validierungsfall mit Hartmetall-Wendescheidplatten repräsentiert die Gruppe der Hartmetallwerkzeuge. Er trifft eine Aussage über die gesamte Gruppe. Die Anforderung in Bezug auf die Datenaufnahme im Prozess wurde ebenfalls erfüllt. Der Prozess wurde nicht beeinflusst und es müssen keine Änderungen oder Zusätze im NC-Programm vorgenommen werden. Das Modell sieht vor, dass das Mitlesen der Ist-Daten ohne die Werkzeugmaschinensteuerung zu beeinflussen erfolgt. Die Anforderung, dass eine Aussagefähigkeit der Prognose sich nicht nur auf eine statische Prozessparameterkombination beschränkt, sondern eine Aussage innerhalb des gesamten Kennfeldes möglich ist, gilt ebenfalls als erfüllt.

Die Anforderung der Anwender, dass eine Vorhersage des Reststandwegs zu jedem Zeitpunkt möglich sein soll wurde ebenfalls adressiert. Es wurde gezeigt, wie die Daten für die Werkzeugeinsatzhistorie berechnet werden, und darauf aufbauend, dass eine Vorhersage zu jedem Zeitpunkt während des Prozesses möglich ist.

Die Anforderung aus Sicht der Wissenschaft ist das Erlernen von Wirkzusammenhängen in der Holzbearbeitung. Das vorgestellte Modell erfüllt diese Anforderung durch das vorgestellte Lernmodell. Durch das Mitlesen der Prozessparameter und Rückmelden der Werkzeuge quantifiziert das Modell die Wirkzusammenhänge in Form von Prognosefaktoren nach und nach.

Die Anwendung des Modells am konkreten Beispiel einer Kombination von Werkstoff und Schneidstoff geschah mit der Implementierung an einer Holzbearbeitungswerkzeugmaschine. Die Durchführung der Versuchsreihe ergab Daten, die die Validität und die Praxistauglichkeit des Modells und das Vorgehen zeigten.

Die Versuche haben bewiesen, dass die Modellierung den Verschleißfortschritt sehr gut abbildet und die Verschleißfaktoren im Prozess, während der Bearbeitung von Bauteilen, erlernbar sind. Dies erlaubt eine Prognose des Verschleißes von Holzbearbeitungswerkzeugen und damit den Reststandweg eines im Prozess befindlichen Werkzeuges. Es wurde gezeigt, dass die Qualitätsfaktoren durch Messvorgängen, kombiniert mit den erfassten Prozessdaten, erlernbar sind.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In Kapitel 7 werden die erfolgten Ausarbeitungen und die erreichten Ergebnisse zusammengefasst. Zusätzlich wird in einem Ausblick dargelegt, wo die weiteren Entwicklungen hinführen und an welcher Stelle künftige Forschungsarbeiten anknüpfen könnten.

7.1 Zusammenfassung

Auf die gestiegenen Markt- und Kundenanforderungen – wie kundenindividuelle Massenproduktion von Möbelstücken und die daraus resultierende Variantenvielfalt mit kleineren Losgrößen – reagiert die Industrie mit der Entwicklung von neuen Werkstoffen und neuen Schneidstoffen der Werkzeuge mit längeren Standzeiten und höheren Schnittgeschwindigkeiten. Diese Trends führen zu einer Erhöhung der Komplexität der Werkzeugeinsatzplanung, da es zusätzliche Abhängigkeiten gibt, die die Reststandzeit beeinflussen. Um über diese eine aussagekräftige Prognose aufstellen zu können, wird sowohl eine plausible Evaluation des aktuellen Zustands eines Werkzeuges als auch eine Möglichkeit der Abschätzung des Verschleißfortschrittes bei bestimmten Prozessparametern benötigt. Die Herausforderung liegt im Erfassen des Zustandes des Werkzeuges unter Einbeziehung der Abweichungen der Ist-Daten von den Plandaten. Die Abweichungen finden statt aufgrund des Maschinenbedieners, der Werkzeugmaschine, des Werkzeuges und des Bauteilwerkstoffes.

Um die Verbesserung der Werkzeugeinsatzplanung systematisch anzugehen werden im Stand der Technik die Definitionen und Aufgaben des Werkzeugwesens sowie Tool-Monitoring-Ansätze und Arbeiten über Modellbildung in der Holzbearbeitung. Hier wurden die für die Modellerstellung notwendigen Grundlagen der Holzbearbeitung dargelegt und die für diesen Prozess notwendigen Werkzeuge, IT-Systeme und Werkzeugmaschinen vorgestellt.

Ziel des Modells war es, die Planungssicherheit des Werkzeugeinsatzes durch eine exakte Planung des Werkzeugwechselfensters sowie durch Prognose der Reststandzeit zu erhöhen. Mithilfe dieser Prognose kann das gesamte Standvermögen des Werkzeuges verwendet werden. Das führt dazu, dass die Verfügbarkeit des Produktionssystems erhöht wird, da durch das Überschreiten der Werkzeugeinsatzgrenze bedingte Stillstände vermieden werden. Dieses Ziel wurde verfolgt mit dem

Lösungsansatz, Daten aus den in der Werkzeugmaschinensteuerung verbauten Sensoren zu gewinnen und relevante Prozessgrößen für die Modellierung durch Kontextdaten über den Fertigungsauftrag sowie das verwendete Werkzeug zu berechnen. Der Lösungsansatz gliedert sich in vier Aspekte, das Erfassen der benötigten Daten, die Logik der Datenverarbeitung, das Prognosemodell und die Kostenerfassung.

Alle Forschungsfragen dieser vier Aspekte wurden beantwortet: Die für das Modell benötigten Daten wurden identifiziert, sowohl auf Seite der Werkzeugmaschinendaten als auch auf der Seite der Verwaltungssysteme. Die Berechnungslogik für das Gewinnen der Prozessgrößen aus den Rohdaten wurde schrittweise beschrieben. Nachdem die Prozessgrößen bekannt sind, werden sie für das Lernmodell verwendet. Dieses hat feste physikalische Zusammenhänge als Ausgangssituation. Es werden lediglich Koeffizienten, sog. Verschleißfaktoren und Qualitätsfaktoren, je Wirkpaarung erlernt. Nach dem Erlernen dieser Koeffizienten können die durch einen Werkzeugeinsatz angefallenen Kosten individuell für jeden Auftrag erfasst werden. Das Ziel des Modells die Planungssicherheit des Werkzeugeinsatzes zu erhöhen wurde somit erreicht.

Der Nachweis industrieller Einsatzfähigkeit konnte durch die praktische Durchführung einer Versuchsreihe gezeigt werden. Das Modell wurde als Software-Service an einer Holzbearbeitungswerkzeugmaschine implementiert. Diese prototypenhafte Umsetzung wurde verwendet, um Verschleißfaktoren einer Wirkpaarung zu erlernen. Es konnte gezeigt werden, dass eine kleine Versuchsreihe, die der typischen Möbelherstellung nachempfunden ist, bereits ausreicht, um präzise Prognosen zu ermöglichen. Der Verschleißfortschritt kann durch Verschleißfaktoren je Schneidstoff-/Werkstoffpaarung abgeschätzt werden. Des Weiteren wurden Qualitätsfaktoren erlernt, welche die Kantenqualität prognostizieren und somit eine Aussage über den Werkzeuggrenzwert des zulässigen Verschleißes treffen können. Mit dem Nachweis der industriellen Einsatzfähigkeit wurden alle an das Modell gestellten Anforderungen erfüllt. Diese Anforderungen richteten sich an die Holzbearbeitungsbranche, prozessbezogene Anforderungen, Anforderungen der Anwender und wissenschaftliche Anforderungen.

7.2 Ausblick auf weitere Entwicklungen

Das vorgestellte Modell kann um eine weitere Dimension ergänzt werden. Da während der Versuche die Drehzahl konstant blieb ist ebenso die Schnittgeschwindigkeit konstant geblieben. Eine Veränderung der Schnittgeschwindigkeit erweitert das Kennfeld um eine Dimension. Dies ließe sich als weitere dreidimensionale Flächen pro aufgenommener Schnittgeschwindigkeit darstellen.

Die Validierung des vorgestellten Modells erfolgte an einem Werkzeug mit einer Schneide. Weitere Werkzeugtypen und Sonderwerkzeuge mit mehreren Schneiden auf einem Flugkreisdurchmesser erfordern eine Adaption des Lernens der Verschleißfaktoren, da sich der Verschleiß auf alle Schneiden aufteilen würde.

Eine Weiterentwicklung des Modells ist möglich durch Übertragung auf weitere spanende CNC-gesteuerte Fertigungsverfahren – ebenso wie der Transfer auf andere Branchen und Werkstoffe, wie Aluminium und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff (CFK). Die Verarbeitung von CFK weist aufgrund der Matrixstruktur mit Faser und Binder Ähnlichkeiten zur Holzbearbeitung auf.

Eine weiterführende Nutzung der Prognose ist über die Werkzeugeinsatzplanung hinaus denkbar. Eine Optimierung des Werkzeugwesens und des Werkzeugkreislaufs ist zum Beispiel durch eine Koppelung des Bestandsmanagements von Werkzeugen vorstellbar. Mögliche Anknüpfungspunkte des aktiven Bestandsmanagements sind Bestandsminimierung, automatische Nachbestellungen und Just-in-Time-Werkzeugvorbereitung.

8 Summary

The woodworking industry is undergoing significant changes. These changes originate in the consumer market trend of demanding more individualized furniture, which leads to mass customization of end products with higher variances and smaller lot sizes. One of the technological developments in response to this demand is an increased number of cutting tool materials with higher tool lifetime. Also, function integration into engineered wood materials, such as visual effects and magnetic function, result in a higher amount of raw material types. These trends lead to increasingly complex tool deployment planning, since there are higher combination possibilities between raw material and cutting material, which creates the challenge of a higher planning uncertainty regarding the usage of cutting tools. Figure 8.1 shows the Tool Operation Planning.

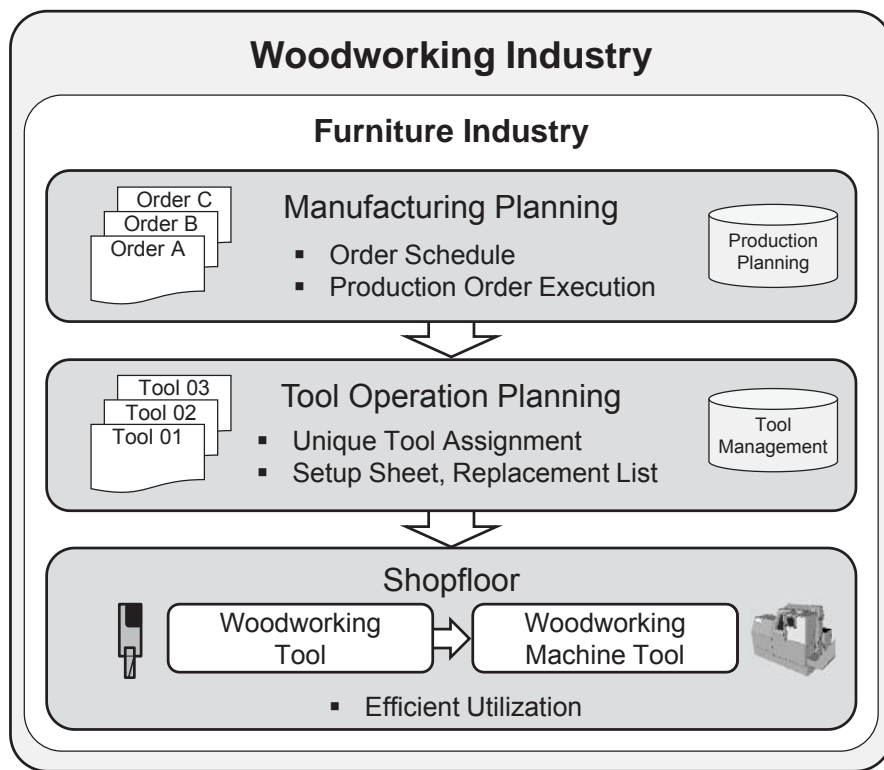


Figure 8.1: Use case of woodworking Tool Operation Planning

Recent developments in digitalization enable the woodworking industry to increase the efficiency of tool operation planning. New ICT-technologies allow the integration of processes in the woodworking industry. In the furniture industry, the milling process is the key process to shape boards and add fittings and pockets during operations. Here, cutting conditions are not constant. Due to the planned geometry, the tool centre point undergoes changes in direction. These direction changes lead to numerous planned

deceleration and acceleration events, which are executed differently depending on machine type, weight of raw material and tool as well as depending on manual operator interference with the process. All of the above result in different cutting conditions regarding the duration of the operation and smaller feed rate per tooth. The outcome of the process and the resulting wear depend on these cutting conditions. This interrelation leads to different tool life depending on materials used, process parameters set and machine operated.

Current tool monitoring techniques were discussed and various prediction models, based on the data captured with these data acquisition techniques, were introduced. The existing process models have empirically studied the occurring wear at constant cutting conditions. They lack the ability to predict process outcome over the whole range of process parameters used for furniture manufacturing application. An accurate evaluation of the current state of a tool as well as a possibility of estimating the wear progress with certain process parameters are required.

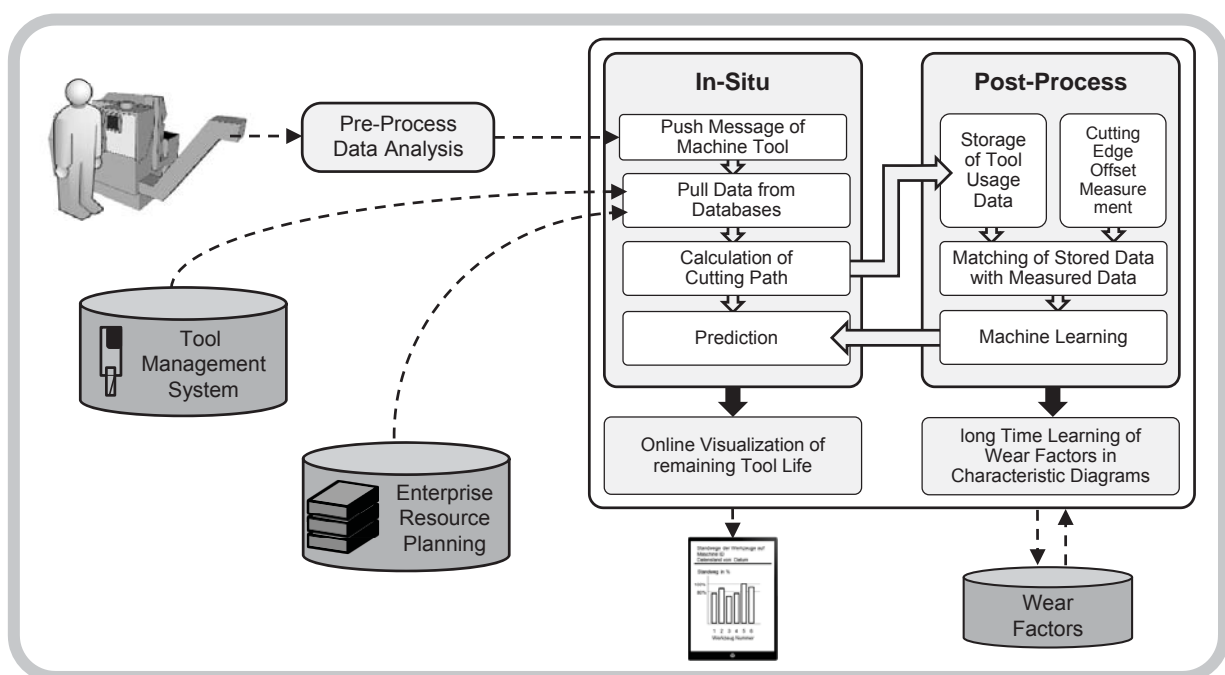


Figure 8.2: Overview of the Model

This work aims to increase tool efficiency by improving tool operation planning with a prediction model for the remaining tool life of woodworking cutting tools. The prediction helps to achieve maximum utilization of each tool and the machine tool. By reducing the machine downtime due to broken tools, the overall equipment efficiency can be increased.

8.1 Summary of the Model

The approach used here was an industrial learning method. The process data combined with context data and the physical measurement of the cutting tool's end-of-life point make such an industrial learning approach possible. The basic idea is to use the machine tool's built-in sensors. These sensors, which are used to control the motion, can be tapped in and the gathered data can be forwarded via interface outside of the machine tool control. The requirements, prerequisites and constraints of this model were stated. The various steps included the context generation regarding the current production order and tool used with help of the gathered data. Figure 8.2 shows an overview of the model including the data sources and procedural steps. At the end of all steps, the process description variables were deduced. This was achieved by breaking down the cutting operation into small line segments instead of one continuous operation with constant parameter settings. The collected data created a unique tool history for each cutting tool, which is used for the learning model. The model works in a woodworking context due to the fact that abrasive wear is the dominant wear type. It has physical effects as a basis and coefficients, so-called wear factors, are acquired for each cutting material/raw material combination.

The model's industrial validation was proved by implementing it into a woodworking machine tool as an IT-service. This prototypical realization was used to conduct a test series with the goal of acquiring the wear factors of one specific cutting material/raw material combination. The test series was designed to recreate typical furniture manufacturing contours. The acquired wear factors' accuracy revealed the model's feasibility. In addition, quality factors predicting edge quality were acquired in order to make a statement about the tool life limit.

8.2 Future Prospects

Future prospects in relation to this work include several expansion and adaptation possibilities for this process model. The current model describes the behavior for single-bladed tools. In order to describe multi-bladed tools, the model would have to be altered due to the fact that the tool wear is distributed unevenly among the blades. Advanced development may include the transfer to other CNC-controlled manufacturing processes and the application in other industries or materials, such as carbon-fiber-reinforced plastic, since its fiber matrix structure is similar to wood composite materials. Future applications beyond tool operation planning are also possible: i.e. usage in inventory management with automatic replenishment, inventory optimization algorithms and just-in-time tool preparation.

Literaturverzeichnis

- Abele et al. 2008** Abele, Eberhard, Hueske, Benjamin & Liebeck, Tobias. 2008.
Optimierte Informationstechnik im
Werkzeugmanagement.
Werkstattstechnik **98** (1), S. 71–76
- acatech 2013** acatech – Deutsche Akademie der
Technikwissenschaften e.V. 2013.
*Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt
Industrie 4.0; Abschlussbericht des Arbeitskreises
Industrie 4.0; Herausgeber: Prof. Dr. Henning
Kagermann, zuletzt geprüft am 9. Juli 2017.*
Verfügbar:
http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Abschlussbericht_Industrie4.0_barrierefrei.pdf
- Antoine 1963** Antoine, R. 1963.
Conjugated influences of stellite facing and speed
reduction on tool life in abrasive wood sawing.
Bois Voters Tropiques (9), S. 33–38
- Aurich et al. 2008** Aurich, Jan, Faltin, Markus & Kempf, Felipe. 2008.
Intelligente Werkzeuge und Spannsysteme durch
RFID.
ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb
103 (12), S. 883–887
- Backhaus et al. 2016** Backhaus, Klaus, Erichson, Bernd, Plinke, Wulff &
Weiber, Rolf. 2016.
*Multivariate Analysemethoden: Eine
anwendungsorientierte Einführung.*
14., überarbeitete und aktualisierte Auflage.
Wiesbaden : Springer Gabler.
Springer-Lehrbuch.
ISBN 978-3-662-46075-7
- Bauernhansl 2014** Bauernhansl, Thomas. 2014.
*Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und
Logistik: Anwendung, Technologien, Migration.*
Wiesbaden : Springer Vieweg.
ISBN 978-3-658-04681-1
- Bauernhansl 2016** Bauernhansl, Thomas. 2016.
Fabrikbetriebslehre Management in der Produktion
(Fabrikbetriebslehre I); Skript Sommersemester
2016, zuletzt geprüft am 20. April 2017.
Verfügbar: <http://www.iff.uni-stuttgart.de/>
- Bauernhansl et al. 2015** Bauernhansl, Thomas, Emmrich, Volkhard, Paulus-
Rohmer, Dominik, Döbele, Mathias, Schatz, Anja &

- Weskamp, Markus. 2015.
Geschäftsmodell-Innovation durch Industrie 4.0: Chancen und Risiken für den Maschinen- und Anlagenbau : München: Wieselhuber & Partner, zuletzt geprüft am 12. Dezember 2017.
Verfügbar:
http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3397337.pdf
- Becher 2014** Becher, Georg. 2014.
Clusterstatistik Forst und Holz : Tabellen für das Bundesgebiet und die Länder 2000 bis 2013; Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei.
DOI: 10.3220/WP_32_2014
- Behrend 1996** Behrend, Heiko. 1996.
Entwicklung eines lernfähigen Systems zur Beobachtung des Werkzeugverschleißes beim Drehen: Dissertation; Technische Universität Braunschweig.
Essen : Vulkan Verlag
- Botsaris et al. 2008** Botsaris, Pantelis & Tsanakas, Ioannis. 2008.
State-of-the-Art in Methods Applied to Tool Condition Monitoring (TCM) in Unmanned Machining Operations: A Review.
In: Preditest/Czech Society of NDT (Hrsg.): *Proceedings of The International Conference of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM), Prague, Czech Republic*, S. 73–87
- Bronner 1996** Bronner, Albert. 1996.
Angebots- und Projektkalkulationen: Leitfaden für technische Betriebe.
Berlin, Heidelberg : Springer.
ISBN 978-3-662-05742-1
- Buckingham 1914** Buckingham, E. 1914.
On Physically Similar Systems; Illustrations of the Use of Dimensional Equations.
Physical Review **4** (4), S. 345–376.
DOI: 10.1103/PhysRev.4.345
- Byrne et al. 1995** Byrne, G., Dornfeld, David, Inasaki, Ichiro, Ketteler, G., König, Wilfried & Teti, Roberto. 1995.
Tool Condition Monitoring (TCM) — The Status of Research and Industrial Application.
CIRP Annals - Manufacturing Technology **44** (2), S. 541–567.
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60503-4

- Chen et al. 2005** Chen, Jacob C. & Chen, Joseph C. 2005.
An artificial-neural-networks-based in-process tool wear prediction system in milling operations.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **25** (5-6), S. 427–434.
DOI: 10.1007/s00170-003-1848-y
- Chryssolouris et al. 1990** Chryssolouris, George. & Guillot, M. 1990.
A Comparison of Statistical and AI Approaches to the Selection of Process Parameters in Intelligent Machining.
Journal of Engineering for Industry **112** (2), S. 122.
DOI: 10.1115/1.2899554
- Cobus 2016** Cobus. 2016.
Nesting - Die Plattenaufteiltechnik der Zukunft.
HOB - Die Holzbearbeitung (12), S. 48–49
- Computerlexikon 2017** Computerlexikon. 2017.
Begriff Parsen, zuletzt geprüft am 17. Juni 2017.
Verfügbar: <https://www.computerlexikon.com/begriff-parsen>
- Cook et al. 2000** Cook, D. F., Ragsdale, C. T. & Major, R. L. 2000.
Combining a neural network with a genetic algorithm for process parameter optimization.
Engineering Applications of Artificial Intelligence **13** (4), S. 391–396.
DOI: 10.1016/S0952-1976(00)00021-X
- Cunha et al. 1999** Cunha, Jesiel, Cogan, Scott & Berthod, Christophe. 1999.
Application of genetic algorithms for the identification of elastic constants of composite materials from dynamic tests.
International Journal for Numerical Methods in Engineering **45** (7), S. 891–900.
DOI: 10.1002/(SICI)1097-0207(19990710)45:7<891:AID-NME610>3.3.CO;2-T
- D'Addona et al. 2011** D'Addona, Doriana, Segreto, Tiziana, Simeone, Alessandro & Teti, Roberto. 2011.
ANN tool wear modelling in the machining of nickel superalloy industrial products.
CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology **4** (1), S. 33–37.
DOI: 10.1016/j.cirpj.2011.07.003
- Denkena et al. 2011** Denkena, Berend & Tönshoff, Hans. 2011.
Spanen, Grundlagen.
3 Aufl.
Berlin, Heidelberg : Springer.
VDI-Buch.
ISBN 978-3-642-19771-0

- DHWR 2016** Deutscher Holzwirtschaftsrat e. V. 2016.
Roadmap Holzwirtschaft 2025; Beitrag der Holzwirtschaft zu einer biobasierten Wirtschaft.
Verfügbar:
http://www.dhwr.de/docs/dyn/6887/dhwr_roadmap_holzwirtschaft_2025_web.pdf
- DIN 3274:1998** Deutsches Institut für Normung. 1998.
Geometrische Produktspezifikationen; Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten.
Berlin : Beuth
- DIN 4000:2012** Deutsches Institut für Normung. 2012.
Sachmerkmal-Listen; Teil 1: Begriffe und Grundsätze.
Berlin : Beuth
- DIN 4003:2014** Deutsches Institut für Normung. 2014.
Konzept für den Aufbau von 3D-Modellen auf Grundlage von Merkmalen; Teil 1: Übersicht und Grundlagen.
Berlin : Beuth
- DIN 50323:1993** Deutsches Institut für Normung. 1993.
Tribologie; Reibung; Begriffe, Arten, Zustände, Kenngrößen.
Berlin : Beuth
- DIN 6580:1985** Deutsches Institut für Normung. 1985.
Begriffe der Zerspantechnik; Bewegungen und Geometrie des Zerspanvorganges.
Berlin : Beuth
- DIN 6583:1985** Deutsches Institut für Normung. 1981.
Begriffe der Zerspantechnik: Standbegriffe.
Berlin : Beuth
- DIN 66025:1983** Deutsches Institut für Normung. 1983.
Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen.
Berlin : Beuth
- DIN 69882:2005** Deutsches Institut für Normung. 2005.
Werkzeughalter mit Kegel-Hohlschaft nach DIN 69893-1 - Teil 3: Form B, Aufsteckfräserdorn mit vergrößertem Anlagedurchmesser für Fräser mit Quernut - Maße.
Berlin : Beuth
- DIN 8580: 2003** Deutsches Institut für Normung. 2003.
Fertigungsverfahren; Begriffe, Einteilung
- DIN 8589:2003** Deutsches Institut für Normung. 2003.
Fertigungsverfahren Spanen; Allgemeines Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
Berlin : Beuth

- DIN EN 316:2009** Deutsches Institut für Normung. 2009.
Holzfaserverplatten - Definition, Klassifizierung und Kurzzeichen.
Berlin : Beuth
- DIN EN 622:2003** Deutsches Institut für Normung. 2003.
Faserplatten Anforderungen; Teil 1: Allgemeine Anforderungen.
Berlin : Beuth
- DIN EN 62714:2015** Deutsches Institut für Normung. 2015.
Datenaustauschformat für Planungsdaten industrieller Automatisierungssysteme.
Berlin : Beuth
- DIN EN 847:2013** Deutsches Institut für Normung. 2013.
Maschinen-Werkzeuge für Holzbearbeitung – Sicherheitstechnische Anforderungen – Teil 1: Fräs- und Hobelwerkzeuge, Kreissägeblätter.
Berlin : Beuth
- DIN EN ISO 4957:2017** Deutsches Institut für Normung. 2017.
Werkzeugstähle.
Berlin : Beuth
- DIN ISO 513:2014** Deutsches Institut für Normung. 2014.
Klassifizierung und Anwendung von harten Schneidstoffen für die Metallzerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden – Bezeichnung der Hauptgruppen und Anwendungsgruppen.
Berlin : Beuth
- Döhl et al. 1989** Döhl, Volker, Altmann, Norbert, Deiß, Manfred & Sauer, Dieter. 1989.
Neue Rationalisierungsstrategien in der Möbelindustrie: Markt und Technikeinsatz Campus Verlag.
Frankfurt/New York : Campus Verlag
- Dornfeld et al. 1990** Dornfeld, David A. & DeVries, M. F. 1990.
Neural Network Sensor Fusion for Tool Condition Monitoring.
CIRP Annals - Manufacturing Technology **39** (1), S. 101–105.
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61012-9
- Dornfeld et al. 2009** Dornfeld, David, Wright, Paul, Helu, Moneer & Vijayaraghavan, Athulan. 2009.
Enabling Manufacturing Research through Interoperability escholarship.org/uc/item/21m926m4.
Laboratory for Manufacturing and Sustainability; UC Berkeley
- Drückhammer 1989** Drückhammer, Jens. 1989.
Rechnergestützte Optimierung des Zerpanprozesses

- beim Fräsen von Spanplatten* : Dissertation TU Braunschweig
- Dubenkropp 1981** Dubenkropp, Gerhard. 1981.
Einsatz eines neuartigen Sensors zur Messung der Kantenqualität als Kenngröße für Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beim Kantenfräsen beschichteter Holzwerkstoffe : Dissertation TU Braunschweig, Schriftreihe des IWF
- Dunky et al. 2002** Dunky, Manfred & Niemz, Peter. 2002.
Holzwerkstoffe und Leime.
Berlin, Heidelberg : Springer.
ISBN 978-3-540-42980-7
- Dyckhof 2003** Dyckhof, Harald. 2003.
Grundzüge der Produktionswirtschaft: Einführung in die Theorie betrieblicher Wertschöpfung.
4. verbesserte Auflage.
Berlin, Heidelberg : Springer.
Springer-Lehrbuch.
ISBN 978-3-662-07620-0
- eApps 2016** eApps - Engineering Apps für die Produktion & Umsetzung in der industriellen Praxis.
Gemeinsamer FuE- Abschlussbericht „eApps4Production“; Flexible Vernetzung intelligenter Engineering Apps zur Maximierung der Maschinen- und Anlagenperformance, zuletzt geprüft am 15. Januar 2018.
Verfügbar: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-477018.html>
- Edstrom 2013** Edstrom, Dave. 2013.
MTCConnect: To Measure Is To Know.
1st Edition.
Ashburn, VA : Virtual Photons Electrons, LLC.
ISBN 978-0989074209
- Eierle et al. 2008** Eierle, Benno, Niedermaier, Peter & Schanda, Ulrich. 2008.
Holzbau der Zukunft: Konstruktionsgrundlagen für den Einsatz von Leichtbauelementen im Innenausbau; Reihe Holzbauforschung; Hochschule Rosenheim.
Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag.
ISBN 978-3816778431
- Enssle 2008** Enssle, Magnus Otto. 2008.
Standwegverlängerung durch gezielte Änderung der Mikrogeometrie an Diamantwerkzeugen für die Holz- und Holzwerkstoffbearbeitung.
Stuttgart : IfW.
Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen /

- Konstruktion und Fertigung; Band 40.
ISBN 978-3000252709
- Eversheim et al. 1991** Eversheim, Walter, Kals, H.J.J., König, W., van Luttervelt, C.-A., Milberg, Joachim, Storr, A., Tönshoff, Hans Kurt, Weck, Manfred, Weule, H. & Zdeblick, W. J. 1991.
Tool Management.
CIRP Annals - Manufacturing Technology **40** (2), S. 631–639.
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61139-1
- Eversheim et al. 1994** Eversheim, Walter, Lenhart, M. & Katzy, Bernhard. 1994.
Information Modelling for Technology-Oriented Tool Selection.
CIRP Annals - Manufacturing Technology **43** (1), S. 429–432.
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62246-X
- Feld 1993** Feld, H. 1993.
Schneidstoffe unter besonderer Berücksichtigung der Holzbearbeitung.
HOB - Die Holzbearbeitung (11), S. 153–157
- Fischer 1996** Fischer, Roland. 1996.
Die mechanische Holzbearbeitung - Überlegungen und Experimente zur theoretischen Grundlage der mechanischen Holzbearbeitung.
HOB - Die Holzbearbeitung (6), S. 64–74
- Fischer 1997** Fischer, Roland. 1997.
Berechnung der Schneidenabstumpfung beim Fräsen.
HOB - Die Holzbearbeitung (6), S. 71–77
- Fischer 2005** Fischer, Roland. 2005.
Die Grenzschicht zwischen Schneide und Werkstoff.
Holztechnologie **46** (3), S. 31–39
- Fritz et al. 2015** Fritz, Alfred Herbert & Schulze, Günter. 2015.
Fertigungstechnik.
11., neu bearbeitete und ergänzte Auflage.
Berlin : Springer Vieweg.
Springer-Lehrbuch.
ISBN 978-3-662-46554-7
- Fuchs 1992** Fuchs, I. 1992.
Maschinennaher Einsatz von Sensorsystemen.
Holz als Roh- und Werkstoff (50), S. 2–4
- Fuss 1995** Fuss, Mathias. 1995.
Fräsen von Holz und Holzwerkstoffen; Verbesserung von Zerspanleistung und Wirtschaftlichkeit; Dissertation TU Braunschweig; Schriftenreihe des IWF.

- Essen : Vulkan-Verl.
ISBN 978-3802786266
- Geib 1997** Geib, Thomas. 1997.
*Geschäftsprozessorientiertes
Werkzeugmanagement.*
Wiesbaden : Springer Gabler.
Schriften zur EDV-Orientierten Betriebswirtschaft.
ISBN 978-3-663-10154-3
- Gerdes et al. 2004** Gerdes, Ingrid, Klawonn, Frank & Kruse, Rudolf.
2004.
*Evolutionäre Algorithmen: Genetische Algorithmen —
Strategien und Optimierungsverfahren —
Beispielanwendungen.*
Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag.
ISBN 978-3-528-05570-7
- Gottlöber 2003** Gottlöber, Christian. 2003.
*Ein Weg zur Optimierung von Spanungsprozessen
am Beispiel des Umfangsplanfräsens von Holz und
Holzwerkstoffen* : Dissertation, TU Dresden
- Gottlöber 2014** Gottlöber, Christian. 2014.
*Zerspanung von Holz- und Holzwerkstoffen:
Grundlagen - Systematik - Modellierung -
Prozessgestaltung.*
München : Carl Hanser.
ISBN 978-3-446-44058-6
- Gottlöber et al. 2017** Gottlöber, Christian & Wagenführ, André. 2017.
Modelling of wood cutting processes – possibilities,
approaches, and visions.
In: Zbiec, Marcin & Orłowski, Kazimierz (Hrsg.): *23rd
International Wood Machining Seminar Proceedings.
28-31 Mai 2017, Warschau, Poland*, S. 176–187.
ISBN 978-83-948046-0-2
- Grübler 2005** Grübler, Till. 2005.
*Einsatz der Bildverarbeitung zur Qualitätssicherung
in der Holzbearbeitung* : Dissertation; TU
Braunschweig, Schriftreihe des IWF
- Harrington 2012** Harrington, Peter. 2012.
Machine learning in action.
Greenwich, Connecticut : Manning.
ISBN 978-1617290183
- Heisel et al. 1997** Heisel, Uwe & Tröger, Johannes. 1997.
Die Schneidstoffpalette ist wieder in Bewegung.
HOB - Die Holzbearbeitung **32** (5), S. 52–57
- Heisel et al. 2011** Heisel, Uwe, Ivanova, Stojanka & Schneider, Marco.
2011.
Zerspanungsverhalten von CVD-

- diamantbeschichteten Holzbearbeitungswerkzeugen.
Wissenschaft & Forschung (3), S. 24–31
- Holland 1975** Holland, John H. 1975.
Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence.
Ann Arbor : University of Michigan Press.
ISBN 978-0472084609
- IfW 2013** Universität Stuttgart - Institut für
Werkzeugmaschinen (IfW). 2013.
Bedienungsanleitung Kantenschartigkeitsmessgerät
„KaScha“
- ISO 3002:1982** International Organization for Standardization. 1982.
*Basic quantities in cutting and grinding - Part 1:
Geometry of the active part of cutting tools - General
terms, reference systems, tool and working angles,
chip breakers.*
Genf : ISO
- ISO 8688:1989** International Organization for Standardization. 1989.
Tool life testing in milling — Part 2: End milling.
Genf : ISO
- ISO13399:2006** International Organization for Standardization. 2006.
*Cutting tool data representation and exchange —
Part 1: Overview, fundamental principles and general
information model.*
Genf : ISO
- Jostmeier 1966** Jostmeier, Hans. 1966.
*Untersuchungen beim Fräsen von Spanplatten und
Schichtstoff-Verbundplatten: Dissertation
TU Braunschweig*
- Kief et al. 2015** Kief, Hans B., Roschiwal, Helmut A. & Schwarz,
Karsten. 2015.
*CNC-Handbuch 2015/2016: CNC, DNC, CAD, CAM,
FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-
Roboter, Antriebe, Energieeffizienz, Werkzeuge,
Industrie 4.0, Fertigungstechnik, Richtlinien, Normen,
Simulation, Fachwortverzeichnis (768 S.).*
München : Carl Hanser.
ISBN 978-3-446-44090-6
- Kivimaa 1952a** Kivimaa, Eero. 1952.
Was ist die Abstumpfung der
Holzbearbeitungswerkzeuge?
Holz als Roh- und Werkstoff **10** (11), S. 426–428
- Kivimaa 1952b** Kivimaa, Eero. 1952.
Die Schnittkraft in der Holzbearbeitung.
Holz als Roh- und Werkstoff **10** (3), S. 94–108

- Klamecki 1979** Klamecki, B. E. 1979.
A review of wood cutting tool wear literature.
Holz als Roh- und Werkstoff **37** (7), S. 265–276.
DOI: 10.1007/BF02607429
- Kletti 2006** Kletti, Jürgen. 2006.
MES - Manufacturing Execution System: Moderne Informationstechnologie zur Prozessfähigkeit der Wertschöpfung.
Berlin : Springer.
ISBN 978-3540280118
- Klocke et al. 2009** Klocke, Fritz, Gorgels, Christof, Bouzakis, Emmanouil & Stuckenberg, Arne. 2009.
Tool life increase of coated carbide tools by micro blasting.
Production Engineering **3** (4-5), S. 453–459.
DOI: 10.1007/s11740-009-0173-1
- Knauf et al. 2013** Knauf, Marcus & Frühwald, Arno. 2013.
Trendanalyse Zukunft Holz; Delphistudie zur Entwicklung der deutschen Holzindustrie, zuletzt geprüft am 15. Januar 2018.
Verfügbar: http://projekt.knauf-consulting.de/files/abschlussbericht_trendanalyse_zukunft_holz.pdf
- Kreidler et al. 2001** Kreidler, Volker, Lagies, Knut & Mutscheller, Wolfgang, 2003.
DE10152765 A1.
Verfahren und System zur elektronischen Bereitstellung von Diensten für Maschinen über eine Datenkommunikationsverbindung
- Kruse et al. 2015** Kruse, Rudolf, Borgelt, Christian, Braune, Christian, Klawonn, Frank, Moewes, Christian & Steinbrecher, Matthias. 2015.
Computational Intelligence: Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze.
2., überarb. und erw. Aufl. 2015.
Wiesbaden : Springer.
ISBN 978-3658109035
- Kuhn et al. 2013** Kuhn, Max & Johnson, Kjell. 2013.
Applied predictive modeling.
New York : Springer.
ISBN 978-1-4614-6848-6
- Lee et al. 1996** Lee, P. & Altıntaş, Yusuf. 1996.
Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data.
International Journal of Machine Tools and

- Manufacture* **36** (9), S. 1059–1072.
DOI: 10.1016/0890-6955(95)00081-X
- Leinhauser 1996** Leinhauser, Ulf. 1996.
Optimierung von Leistungen und Kosten des Werkzeugwesens in spanenden Fertigungen.
Düsseldorf : VDI Verlag.
IFW Produktionstechnik : Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen, Universität Hannover; Nr. 383. ISBN 978-3183383023
- Leitz 2011** Leitz GmbH & Co. KG. 2011.
Das Leitz-Lexikon, Edition 6 - Kapitel 5 Oberfräsen, zuletzt geprüft am 16. Juni 2017.
Verfügbar: <http://www.leitz.org/lexikon-produktseiten.html>
- Leitz GmbH & Co. KG 2016** Leitz GmbH & Co. KG. 2016.
Complete Care für Werkzeuge und Prozesse.
HOB Die Holzbearbeitung (9), zuletzt geprüft am 15. Januar 2018.
Verfügbar: https://hob-magazin.com/special-Plattenaufteiltechnik_sf1+0+130536+1++sfmode-dl+sfdlid-188116+.html
- Lemaster et al. 2000** Lemaster, Richard L., Lu, Liya & Jackson, Steve. 2000.
The Use of Process Monitoring Techniques on a CNC Wood Router.
Forest Products Journal **50** (9), S. 59
- Lenz et al. 2015** Lenz, Jürgen, Rauschecker, Ursula, Görzig, David, Stock, Daniel, Graef, Jürgen, Kisselbach, Andreas & Westkämper, Engelbert. 2015.
Neue Wege zur Werkzeugverschleiß-Erfassung.
wt-online (6), S. 417–421
- Lenz et al. 2016** Lenz, Jürgen, Brenner, Dominik & Westkämper, Engelbert. 2016.
Model for Cutting Tools Usage Tracking by On-line Data Capturing and Analysis.
Procedia CIRP **57**, S. 451–456.
DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.078
- Lenz et al. 2017** Lenz, Jürgen & Westkämper, Engelbert. 2017.
Wear Prediction of Woodworking Cutting Tools based on History Data.
Procedia CIRP **63**, S. 675–679.
DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.098
- Licher 1993** Licher, Eckard. 1993.
Optimierung von Zerspanprozessen mit veränderlichen Randbedingungen am Beispiel der Formatbearbeitung; Dissertation TU Braunschweig; Schriftenreihe des IWF

- Lucke 2014** Lucke, Dominik Martin. 2014.
Ad hoc Informationsbeschaffung unter Einsatz kontextbezogener Systeme in der variantenreichen Serienfertigung.
Stuttgart : Fraunhofer-Verl.
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung; 25.
ISBN 978-3-8396-0665-0
- Lundstrom 2003** Lundstrom, Mark. 2003.
Applied physics. Moore's law forever?
Science **299** (5604), S. 210–211.
DOI: 10.1126/science.1079567
- Maier 2000** Maier, Gerhard. 2000.
Holzspanungslehre.
Würzburg : Vogel Business Media.
ISBN 978-3834332684
- Maßberg et al. 1991** Maßberg, W. & Schlange, H. 1991.
Basiskomponente für das Toolmanagement.
Industrie Anzeiger (16), S. 38–39
- McKenzie 1961** McKenzie, William. 1961.
Fundamental Analysis of the Wood-cutting Process; PhD Thesis.
Ann Arbor, Michigan : The University of Michigan
- McKenzie et al. 1975** McKenzie, William M. & Karpovich, H. 1975.
Wear and blunting of the tool corner in cutting a wood-based material.
Wood Science and Technology **9** (1), S. 59–73.
DOI: 10.1007/BF00351915
- McKenzie et al. 2001** McKenzie, William, Ko, P., Cvitkovic, R. & Ringler, M. 2001.
Towards a model predicting cutting forces and surface quality in routing layered boards.
Wood Science and Technology **35** (6), S. 563–569.
DOI: 10.1007/s002260100115
- Meißner et al. 2016** Meißner, Heinz-Rudolf, Bochum, Ulrich & Pricelius, Maike. 2016.
Brachenanalyse
Holzbearbeitungsmaschinenindustrie, zuletzt geprüft am 31. Juli 2017.
Verfügbar:
https://www.boeckler.de/pdf/p_study_hbs_325.pdf
- Michels et al. 2002** Michels, Kai, Klawonn, Frank, Kruse, Rudolf & Nürnberger, Andreas. 2002.
Fuzzy-Regelung: Grundlagen, Entwurf, Analyse.
Berlin : Springer.
Springer-Lehrbuch.
ISBN 978-3-540-43548-8

- Monostori et al. 1993** Monostori, László & Prohaszka, Janos. 1993.
A Step towards Intelligent Manufacturing; Modelling and Monitoring of Manufacturing Processes through Artificial Neural Networks.
CIRP Annals - Manufacturing Technology **42** (1), S. 485–488.
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62491-3
- Monostori et al. 1996** Monostori, László, Márkus, András, Van Brussel, Hendrik & Westkämper, Engelbert. 1996.
Machine Learning Approaches to Manufacturing.
CIRP Annals. Manufacturing Technology **45** (2), S. 675–712
- Moore 1965** Moore, Gordon E. 1965.
Cramming more components onto integrated circuits.
Electronics **38** (8), S. 114 ff.
DOI: 10.1109/N-SSC.2006.4785860
- Müller 2004** Müller, Ulf. 2004.
Konzeption zur systematischen Planung und Steuerung des Werkzeugwesens im Sinne des ereignisorientierten Tool-Managements.
Aachen : Shaker.
Schriftenreihe des International Universities Research Institute und des Wrangell-Instituts für Umweltgerechte Produktionsautomatisierung; Bd. 2.
ISBN 978-3832225698
- Mumm 1999** Mumm, Andy. 1999.
Analyse und Gestaltung von Werkzeugversorgungssystemen in der spanenden Fertigung.
Essen : Vulkan-Vlg.
Schriftenreihe des ISF; 7.
ISBN 978-3802787058
- Neugebauer 2012** Neugebauer, Reimund. 2012.
Werkzeugmaschinen.
Berlin, Heidelberg : Springer.
ISBN 978-3-642-30077-6
- Nyqvist 2008** Nyqvist, Olof. 2008.
Information Management for Cutting Tools: Doctoral Thesis.
Stockholm, Sweden : KTH Royal Institute of Technology
- O'Donnell et al. 2001** O'Donnell, Garret, Young, Paul, Kelly, Kevin & Byrne, Gerry. 2001.
Towards the improvement of tool condition monitoring systems in the manufacturing environment.
Journal of Materials Processing Technology **119** (1-

- 3), S. 133–139.
DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00928-1
- OPC 2017** OPC Foundation Europe. 2017.
OPC Unified Architecture Specification, zuletzt geprüft am 18. Mai 2017.
Verfügbar: <https://opcfoundation.org/>
- Pahlitzsch et al. 1970** Pahlitzsch, Gotthold & Sandvoß, Eckhard. 1970.
Verschleißuntersuchungen beim Fräsen von Faserhartplatten.
Holz als Roh- und Werkstoff **28** (7), S. 246–254
- Pahlitzsch et al. 1972** Pahlitzsch, Gotthold & Sandvoß, Eckhard. 1972.
Einfluß der Schnittbedingungen auf die Beanspruchung und den Verschleiß der Schneide.
Holz als Roh- und Werkstoff **30** (4), S. 134–143
- Palanisamy et al. 2008** Palanisamy, P., Rajendran, I. & Shanmugasundaram, S. 2008.
Prediction of tool wear using regression and ANN models in end-milling operation.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **37** (1-2), S. 29–41.
DOI: 10.1007/s00170-007-0948-5
- Paterock 2000** Paterock, Lienhard. 2000.
Verschleißarme Schneide – Einfluss der Schneidstoffbeschichtung auf die Leistungssteigerung von Zerspanungswerkzeugen in der Möbelherstellung.
Holz und Kunststoffverarbeitung (9), S. 72–76
- Paucksch et al. 2008** Paucksch, Eberhard, Holsten, Sven, Linß, Marco & Tikal, Franz. 2008.
Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien.
12., vollst. überarb. und erw. Aufl.
Wiesbaden : Vieweg + Teubner.
ISBN 978-3-8348-0279-8
- Picard et al. 1984** Picard, Richard R. & Cook, R. Dennis. 1984.
Cross-Validation of Regression Models.
Journal of the American Statistical Association **79** (387), S. 575–583.
DOI: 10.1080/01621459.1984.10478083
- Piller 2007** Piller, Frank Thomas. 2007.
Mass Customization.
In: Albers, Sönke (Hrsg.): *Handbuch Produktmanagement*.
3., überarb. und erw. Aufl.
Wiesbaden : Gabler, S. 941–968.
ISBN 978-3-8349-0268-9.
DOI: 10.1007/978-3-8349-9517-9_40

- Plinke et al. 2015** Plinke, Wulff, Rese, Mario & Utzig, B. Peter. 2015. *Industrielle Kostenrechnung*. 8. Aufl. 2015. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Vieweg. ISBN 978-3-662-46853-1
- Prokes 1970** Prokes, S. 1970. Abstumpfungsverhalten der Holzbearbeitungswerkzeuge. *HOB - Die Holzbearbeitung* (4), S. 25–29
- Rao et al. 2011** Rao, D. Ganeshwar, Patvardhan, C. & Singh, Ranjit. 2011. Intelligent Tool Management Strategies for Automated Manufacturing Systems. *Intelligent Control and Automation* 2 (4), S. 405–412. DOI: 10.4236/ica.2011.24046
- Rehm 2002** Rehm, Klaus. 2002. *Untersuchungen zur Modellierung des Qualitätsbildungsmechanismus beim Fräsen von Holz unter der Berücksichtigung der Mehrachsbearbeitung: Dissertation, TU Dresden*
- Riegel et al. 2009** Riegel, Adrian & Diedrichs, Stefan. 2009. Kantenschartigkeitsmessung mit Laservorhang – Noch ist die ideale Lösung für die Qualitätsüberwachung des Fräsens von KF-Spanplatten nicht gefunden. *Holz-Zentralblatt* (29), S. 769
- Romberg 1993** Romberg, Andreas. 1993. *Konzept zur systematischen, betriebsspezifischen Analyse und Neustrukturierung des Werkzeugwesens im Sinne des integrierten Toolmanagements : Fertigungstechnik und Betriebsorganisation Univ. FBK produktionstechnische Berichte*
- Röschinger 2014** Röschinger, Marcus. 2014. Werkzeugmanagement in der Cloud. *Industrie Management* 30 (3), S. 52–56
- Röschinger et al. 2015** Röschinger, Marcus, Kipouridis, Kipouridis, Lechner, Johannes & Günthner, Willibald. 2015. AutoID-Konzept für ein cloudbasiertes Werkzeugmanagement. *ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112 (2), S. 59–62
- Sandvoß 1971** Sandvoß, Eckhard. 1971. *Untersuchungen über den Schneidenverschleiß beim Fräsen von Holzwerkstoffen: Dissertation TU Braunschweig*

- Schuh 2006** Schuh, Günther. 2006.
Produktionsplanung und -steuerung.
Berlin, Heidelberg : Springer.
ISBN 978-3-540-40306-7
- Sen et al. 1996** Sen, Pranab K., Aldous, David, Sidak, Zbynek & Moser, William R. 1996.
Linear Models: A Mean Model Approach -Probability and mathematical statistics.
San Diego, Kalifornien : Academic Press.,
ISBN 978-0125084659
- Sick 2001** Sick, Bernhard. 2001.
Tool Wear Monitoring in Turning; A Neural Network Application.
Measurement and Control **34** (7), S. 207–222.
DOI: 10.1177/002029400103400704
- Siebertz 2010** Siebertz, Karl. 2010.
Statistische Versuchsplanung; Design of Experiments (DoE).
Berlin Heidelberg : Springer.
ISBN 978-3-642-05492-1
- Simon 1983** Simon, Herbert A. 1983.
Why Should Machines Learn?
In: Michalski, Ryszard S., Carbonell, Jaime G., & Mitchell, Tom M. (Hrsg.): *Machine Learning.*
Berlin : Springer, S. 25–37.
ISBN 978-3-662-12405-5
- Sitkei 2013** Sitkei, G. 2013.
Similarity study of the energy requirement of saws.
In: Nobuaki, Hattori (Hrsg.): *Proceedings of the 21st International Wood Machining Seminar : August 4 - 7, 2013, Tsukuba, Japan,* S. 199–205.
ISBN 978-4990346799
- Spur 2014** Spur, Günter. 2014.
Handbuch Spanende Fertigung.
2. Auflage.
München : Hanser, Carl.
Editon Handbuch der Fertigungstechnik; 3.
ISBN 978-3-446-42826-3
- Stachowiak 1973** Stachowiak, Herbert. 1973.
Allgemeine Modelltheorie.
Wien : Springer.
ISBN 978-3-211-81106-0
- Stühmeier 1989** Stühmeier, Walter. 1989.
Fräsen von Spanplatten mit hochharten Schneidstoffen: Dissertation. TU Braunschweig
- Szwajka et al. 2006** Szwajka, K. & Górski, J. 2006.
Evaluation Tool Condition of Milling Wood on the

- Basis of Vibration Signal.
Journal of Physics: Conference Series **48**, S. 1205–1209.
DOI: 10.1088/1742-6596/48/1/225
- Szwajka et al. 2008** Szwajka, Krzysztof, Zielinska-Szwajka, Joanna & Gorski, Jaroslaw. 2008.
Neural networks based in process tool wear prediction system in milling wood operations.
In: Tan, Jiubin & Wen, Xianfang (Hrsg.): *Proceedings of the International Symposium on Instrumentation Science and Technology Vol. 7133; 15-18 September 2008, Shenyang, China* : SPIE.
ISBN 978-0819473677.
DOI: 10.1117/12.812090
- Tani et al. 2007** Tani, G, Mantega, C & Mazza, M. 2007.
Cutting Force Prediction in MDF Boards Machining.
In: Taylor, John & Wong, Darrell (Hrsg.): *Proceedings of the 18th International Wood Machining Seminar; May 7-9, 2007, Vancouver, Canada* : FPInnovations – Forintek, S. 221–232
- Taylor 1906** Taylor, Frederick Winslow. 1906.
On the Art of Cutting Metals.
New York : American society of mechanical engineers
- Teti et al. 2010** Teti, Roberto, Jemielniak, Krzysztof, O'Donnell, Garret & Dornfeld, David. 2010.
Advanced monitoring of machining operations.
CIRP Annals - Manufacturing Technology **59** (2), S. 717–739.
DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.010
- Toshiro 2004** Toshiro, Tochigi. 2004.
Overview of Application of Artificial Intelligence to Studies of Wood Science.
In: Stanzl-Tschegg, Stefanie, Gindl, Milojka, & Sinn, Gerhard (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd International Symposium on Wood Machining: Properties of Wood and Wood Composites Related to Machining. 5-7 July 2004, Vienna, Austria*.
Wien : Facultas Verlags und Buchhandels AG, S. 109–122.
ISBN 3-9501315-2-3
- Tröger 1977** Tröger, Johannes. 1977.
Ein Verfahren zur objektiven Beurteilung der Kantenqualität spanend Bearbeiteter OPV- und plastbeschichteter Span- und Faserplatten.
Holztechnologie (12), S. 212–215
- Tröger et al. 2015** Tröger, Johannes & Schneider, Marco. 2015.
Grundlagen und Verfahren der Holzbearbeitung.

- Berlin : Logos.
Grundwissen für Holzingenieure; 5.
ISBN 978-3-8325-4125-5
- Tschätsch et al. 2016** Tschätsch, Heinz & Dietrich, Jochen. 2016.
Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung.
12 Aufl.
Wiesbaden : Vieweg + Teubner.
ISBN 978-3-658-14052-6
- UN 2016** United Nations. 2016.
Food and Agriculture Organization of the United Nations / Forestry Production and Trade.
Verfügbar: <http://faostat3.fao.org/download/F/FO/E>
- Valkyser 2004** Valkyser, Bruno. 2004.
Modulare Werkzeugverwaltung auf Basis offener Steuerungsarchitekturen.
Aachen : Shaker.
Berichte aus der Produktionstechnik; Bd. 2004,1.
ISBN 978-3-8322-2308-8
- VDI 2518:1987** Verein Deutscher Ingenieure. 1978.
Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung - Einführung, Grundlagen.
Frankfurt am Main : VDI
- VDI 3414:2014** Verein Deutscher Ingenieure. 2014.
Blatt 4; Beurteilung von Holz- und Holzwerkstoffoberflächen, Gefräste, gesägte, gehobelte, gebohrte und gedrehte Oberflächen.
Düsseldorf : VDI
- VDI 3423:2011** Verein Deutscher Ingenieure. 2011.
Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen; Begriffe, Zeiterfassung und Berechnung.
Frankfurt am Main : VDI
- VDI 3633:2013** Verein Deutscher Ingenieure. 2013.
Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe.
Berlin : Beuth
- VDI 5600:2013** Verein Deutscher Ingenieure. 2013.
Fertigungsmanagementsysteme - Logische Schnittstelle zur Maschinen- und Anlagensteuerung.
Frankfurt am Main : VDI
- VDM 2017** Verband der deutschen Möbelindustrie e.V. 2017.
Die wirtschaftliche Lage der Möbelindustrie 1.
Halbjahr 2016, zuletzt geprüft am 21. April 2017.
Verfügbar: <http://www.moebelindustrie.de/>
- VDMA 2014** Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau e.V. 2014.
8849;; Maschinen-Werkzeuge für Holzbearbeitung –

- Referenzpunkte.*
Frankfurt am Main : VDMA
- VDMA 2015** Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau e.V. 2015.
Branchenportrait - Holzbearbeitungsmaschinen
- Vijayaraghavan et al. 2008** Vijayaraghavan, Athulan, Sobel, Will, Fox, Armando, Dornfeld, David & Warndorf, Paul. 2008.
Improving Machine Tool Interoperability Using Standardized Interface Protocols: MT Connect
escholarship.org/uc/item/4zs976kx.
Laboratory for Manufacturing and Sustainability; UC Berkeley
- Warnecke 1995** Warnecke, Hans-Jürgen. 1995.
Fabrikstrukturen im Zeitalter des Wandels - welcher Weg führt zum Erfolg?
Berlin, Heidelberg : Springer.
ISBN 978-3-540-60722-9
- Weck 2005** Weck, Manfred. 2005.
Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1: Maschinenarten und Anwendungsbereiche.
6., überarbeitete Auflage.
Berlin, Heidelberg : Springer.
VDI-Buch. ISBN 978-3-642-38744-9
- Weck et al. 2003** Weck, Manfred & Pössel-Dölken, Frank. 2003.
Vertikale Integration.
Werkstattstechnik (5), S. 18–25
- Westkämper 1993** Westkämper, Engelbert. 1993.
Durch industrielles Lernen die Leistung der Produktion steigern.
HOB - Die Holzbearbeitung (11)
- Westkämper 2012** Westkämper, Engelbert. 2012.
Engineering Apps.
wt Werkstattstechnik online **102** (10), S. 718–722
- Westkämper 2014a** Westkämper, Engelbert. 2014.
Towards the Re-Industrialization of Europe.
Berlin, Heidelberg : Springer.
ISBN 978-3-642-38501-8
- Westkämper 2014b** Westkämper, Engelbert. 2014.
Aktuelle Trends in der industriellen Produktion,
zuletzt geprüft am 31.07.2027.
Verfügbar: www.springerprofessional.de/aktuelle-trends-in-der-produktion/5487970.html
- Westkämper et al. 1977** Westkämper, Engelbert & Brüninghaus, G. 1977.
Analyse des Werkzeugeinsatzes.
Industrieanzeiger **99** (81), S. 1565–1568

- Westkämper et al. 2010** Westkämper, Engelbert & Warnecke, Hans-Jürgen. 2010.
Einführung in die Fertigungstechnik.
8 Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner.
ISBN 978-3-8348-9798-5
- Westkämper et al. 2013** Westkämper, Engelbert, Spath, Dieter, Constantinescu, Carmen & Lentjes, Joachim. 2013.
Digitale Produktion.
Berlin Heidelberg : Springer.
ISBN 978-3-642-20258-2
- Westkämper et al. 2016** Westkämper, Engelbert & Löffler, Carina. 2016.
Strategien der Produktion: Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis.
Heidelberg : Springer.
ISBN 978-3-662-48913-0
- Widmann 2013** Widmann, Jürgen, 2013.
EP 2 664 973 B1.
Europäische Patentschrift: Verfahren zum Verwalten von Werkzeugdaten
- Wiendahl 2017** Wiendahl, Hans-Hermann. 2017.
Digitalisierungsimpulse durch MES-Werkzeuge.
software markt (3), S. 5
- Wilkinson et al. 1999** Wilkinson, P., Reuben, R. L., Jones, J.D.C., Barton, J. S., Hand, D. P., Carolan, T. A. & Kidd, S. R. 1999.
Tool Wear Prediction from acoustic Emission and Surface Characteristics via an artificial Neural Network.
Mechanical Systems and Signal Processing **13** (6), S. 955–966.
DOI: 10.1006/mssp.1999.1231
- Wrobel et al. 2013** Wrobel, Stefan, Joachims, Thorsten & Morik, Katharina. 2013.
Maschinelles Lernen und Data Mining.
In: Görz, Günther, Schneeberger, Josef, & Schmid, Ute (Hrsg.): *Handbuch der Künstlichen Intelligenz.*
München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, S. 405–472. ISBN 978-3-48671307-7
- Yang et al. 2006** Yang, D., Jackson, M. R. & Parkin, R. M. 2006.
Inspection of wood surface waviness defects using the light sectioning method.
Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering **220** (7), S. 617–626.
DOI: 10.1243/09596518JSCE175
- Zbieć 2011** Zbieć, Marcin. 2011.
Application of Neural Network in Simple Tool Wear Monitoring and Identification System in MDF Milling.
DRVNA INDUSTRIJA (62), S. 43–54

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Jürgen Herbert Lenz
Geburtsdatum/-ort: 29. Juni 1985 in Aalen

Schulausbildung

1995 – 2001 Ostalb-Gymnasium, Bopfingen
2001 – 2004 Theodor-Heuss Gymnasium, Aalen
Abschluss: *allgemeine Hochschulreife*

Studium

09/2004 – 03/2009 Hochschule Ulm, Produktionstechnik und Organisation
Abschluss: *Diplom-Ingenieur (FH)*
09/2007 – 12/2007 Lawrence Technological University, Southfield, Michigan
09/2010 – 03/2012 Oregon State University, Corvallis, Oregon
Graduate Studies in Industrial Engineering
Abschluss: *Master of Science*
08/2014 – 12/2017 Graduate School of Excellence advanced Manufacturing
Engineering (GSaME) Universität Stuttgart

Zivildienst

05/2009 – 10/2009 Öko-Institut e.V. Freiburg im Breisgau
Bereich: Energie und Klimaschutz

Berufstätigkeit

09/2004 – 04/2009 Heidelberger Druckmaschinen AG
Werkstudent nach dem „Ulmer Modell“
Abschluss: *Industriemechaniker IHK*
04/2012 – 07/2014 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung IPA / Universität Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF
Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung
Fabrikplanung und Produktionsoptimierung
08/2014 – 12/2016 Gesellschaft für Produktionssysteme GmbH Stuttgart
Doktorand

Die moderne Möbelindustrie mit ihrem Trend zur Individualisierung bringt neue Herausforderungen für die Werkzeugeinsatzplanung bei der Holzbearbeitung mit sich. Um wirtschaftlich zu arbeiten, muss die Industrie neue Wege der Digitalisierung finden. Diese Arbeit leistet einen Beitrag dazu, indem sie Möglichkeiten aufzeigt, wie auch bei unbekanntem Werkstoff-Schneidstoffkombinationen Wirkzusammenhänge des Fräsprozesses ermittelt werden können. Ermöglicht wird dies mittels einer Online-Erfassung der Werkzeugmaschinen- und Fertigungsdaten. Durch den Kontext »Werkzeugmaschinensteuerung zum eingesetzten Werkzeug und zum Fertigungsauftrag« wird dabei der Werkzeugeinsatz systematisch generiert. Indem die Prozessgrößen mit Messungen abgeglichen werden, werden die Wirkzusammenhänge in Form von Verschleiß- und Qualitätsfaktoren pro Werkstoff-/Schneidstoff-Kombination erlernt. Das entwickelte Modell wurde anhand eines Fallbeispiels validiert.

