

Ermittlung der Komponentenbelastung aus Antriebsdaten als Kenngröße belastungsorientierter Bezahlmodelle bei Werkzeugmaschinen

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Oliver Maximilian Kohn, M. Sc.

aus Essen

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche
Tag der Einreichung: 23.01.2024
Tag der mündlichen Prüfung: 16.04.2024

Darmstadt 2024
D17

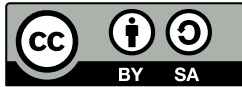
Kohn, Oliver Maximilian: Ermittlung der Komponentenbelastung aus Antriebsdaten als Kenngröße belastungsorientierter Bezahlmodelle bei Werkzeugmaschinen

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUPrints: 2024

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-275037

Tag der mündlichen Prüfung: 16.04.2024



Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

Vorwort des Herausgebers

Mit dem technologischen Fortschritt der Digitalisierung in der Fertigungsindustrie sind aufgrund der zunehmenden Vernetzung von Werkzeugmaschinen heutzutage mehr Informationen direkt aus dem Produktionsprozess verfügbar, die neue Ansätze und Anwendungen für datengetriebene Produktionssysteme ermöglichen. Dabei birgt der Einsatz digitaler Technologien das Potenzial bestehende Geschäftsmodelle fundamental zu verändern und durch neue Ansätze die Entwicklung von physischen Produkten zu serviceorientierten Lösungen voranzutreiben.

Bei klassischen Finanzierungsformen und Bezahlmodellen wird üblicherweise abhängig von einem vertraglich festgelegten monatlichen Betrag abgerechnet. Alternative Ansätze ermöglichen eine flexible Abrechnung und basieren auf einer Nutzungsgebühr pro Betriebsstunde. Bestehende Ansätze bergen allerdings Risiken für den Anbieter, da der Nutzer zur eigenen Gewinnmaximierung eine hohe Auslastung und Nutzung der Werkzeugmaschine bei geringer Bezahlung anstrebt. Anstatt die gegensätzlichen Interessen durch einen Risikoaufschlag zu berücksichtigen, könnte eine Abrechnung anhand belastungsorientierter Kenngrößen zusätzliche Transparenz über die Nutzung der Werkzeugmaschine schaffen und somit dazu beitragen den Interessenskonflikt aufzulösen.

Das Ziel dieser Dissertation ist die Entwicklung und prototypische Implementierung eines Bezahlmodells für Werkzeugmaschinen, bei dem aus der prozessbedingten Belastung Kenngrößen zur Abrechnung abgeleitet werden. Grundlage für die Ermittlung der Belastungen stellen Antriebsdaten dar, die durch die numerische Steuerung erfasst werden. Aus diesen Daten werden komponentenspezifische Belastungen berechnet, die zur Abnutzungsprognose herangezogen werden und anschließend auf Maschinenebene aggregiert werden. Der erarbeitete Lösungsansatz wird unter produktionsnahen Bedingungen anhand Belastungsszenarien evaluiert.

Das entwickelte Vorgehen eröffnet neue Perspektiven für die Entwicklung und Anwendung belastungsorientierter Bezahlmodelle und erhöht durch simulationsgestützte Prognosen der Belastungen die Transparenz über die zu erwartenden maschinenbezogenen Kosten. So können bereits während der Prozessplanung, finanzielle Anreize geschaffen werden, die zu einer schonenden Nutzung der Maschine führen.

Darmstadt, im Mai 2024

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold für die Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung und Ermöglichung dieser Arbeit. Dabei habe ich die Rahmenbedingungen, die angenehme und konstruktive Zusammenarbeit am Institut sowie das entgegengebrachte Vertrauen sehr geschätzt. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche für die Übernahme des Koreferats.

Die Inhalte dieser Arbeit entstanden im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts Pay-per-Stress. Allen beteiligten Partnern, insbesondere Dr. Sebastian Schneider und Thomas Moser, gilt mein Dank für die fachlichen Diskussionen, die wertvollen Beiträge und die Unterstützung. Bei Dr. Patrick Stanula und Dr. Christopher Praetzas bedanke ich mich für die fachlichen Vorarbeiten.

Mein herzlicher Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen, besonders aus der Forschungsgruppe TEC und der ehemaligen Zerspanungstechnologie. Sie haben meine Zeit in Darmstadt nicht nur durch berufliche, sondern auch durch zahlreiche private Unternehmungen unvergesslich gemacht. Ich bin dankbar für die entstandenen Freundschaften und die gemeinsamen Erinnerungen. Ein besonderer Dank geht an meinen Bürokollegen Dr. Alexander Fertig für seine fachliche Unterstützung und die freundschaftliche Zusammenarbeit. Ferner danke ich meinen studentischen Hilfskräften und dem Support-Team am PTW.

Mein weiterer Dank gilt Willi Wünschel, Viktor Berchtenbreiter, Julius Frenzel, Lukas Weber und Dr. Benjamin Brockhaus für die kritische Durchsicht meiner Arbeit und das konstruktive Feedback.

Mein größter Dank gilt meiner Familie und meiner Partnerin für das Vertrauen und die bedingungslose Unterstützung. Ohne den Rückhalt meiner Eltern, Schwester, Freunde und Partnerin wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Herne, im Mai 2024

Oliver Kohn

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Formelzeichen und Abkürzungen | xi |
| Abbildungsverzeichnis | xvii |
| Tabellenverzeichnis | xxi |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Stand der Wissenschaft und Technik | 3 |
| 2.1 Grundlagen Werkzeugmaschine | 3 |
| 2.1.1 Funktion, Komponenten und Betrieb | 3 |
| 2.1.2 Numerische Steuerung | 5 |
| 2.1.3 Maschineninterne Signale der Lage- und Antriebsregelung | 6 |
| 2.2 Instandhaltung, Verfügbarkeit und Ausfallverhalten | 8 |
| 2.2.1 Definition des Abnutzungsvorrates | 8 |
| 2.2.2 Charakterisierung von Einflussfaktoren und Belastung | 9 |
| 2.2.3 Statistisches Ausfallverhalten und -ursachen | 11 |
| 2.3 Lebensdauer von Werkzeugmaschinen und ihren Komponenten | 13 |
| 2.3.1 Belastungs-Zeit-Funktion | 13 |
| 2.3.2 Lebensdauerberechnung | 14 |
| 2.3.3 Grundlagen der Zustandsüberwachung | 18 |
| 2.4 Belastungen einer WZM im Betrieb | 23 |
| 2.4.1 Prozessmodellierung | 23 |
| 2.4.2 Prozesskräfte | 23 |
| 2.4.3 Trägheitskräfte | 25 |
| 2.4.4 Reibung | 26 |
| 2.4.5 Messung von Prozesskräften und Komponentenbelas- | |
| tungen | 28 |
| 2.5 Betreibermodelle im Maschinenbau | 31 |
| 2.5.1 Finanzierung und Leasing | 31 |
| 2.5.2 Equipment-as-a-Service | 32 |
| 2.5.3 Systematische Klassifizierung von Anwendungsbeispi- | |
| len im Maschinenbau | 33 |
| 3 Zielsetzung und Vorgehensweise | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Konzeptentwicklung eines belastungsorientierten Bezahlmodells | 41 |
| 4.1 | Technologische Anforderungen an das System | 41 |
| 4.2 | Anforderungen an die informationstechnische Infrastruktur | 44 |
| 4.3 | Aufbau und Struktur des Bezahlmodells | 45 |
| 4.3.1 | Voraussetzungen und Annahmen | 45 |
| 4.3.2 | Identifikation und Gruppierung relevanter Komponenten | 47 |
| 4.3.3 | Zusammenhang zwischen Belastung, Abnutzung und Kosten | 48 |
| 4.3.4 | Aggregation auf Maschinenebene | 51 |
| 4.4 | Versuchsumgebung und Rahmenbedingungen | 53 |
| 4.4.1 | Eigenschaften der Versuchsmaschine | 53 |
| 4.4.2 | Werkzeuge | 54 |
| 4.4.3 | Messtechnik | 56 |
| 5 | Konzept zur Simulation des Gesamtsystems | 59 |
| 5.1 | Aufbau der Simulation | 59 |
| 5.2 | Simulation der numerischen Steuerung | 60 |
| 5.3 | Simulation des Zerspanprozesses | 61 |
| 5.3.1 | Vorgehensweise zur Berechnung der Prozesskräfte | 61 |
| 5.3.2 | Experimentelle Bestimmung der Kraftkoeffizienten | 63 |
| 5.4 | Belastung der Vorschubachsen | 65 |
| 5.4.1 | Berechnung der am KGT wirkenden Axialkraft | 65 |
| 5.4.2 | Ermittlung der Reibkennlinie | 69 |
| 5.4.3 | Validierung des Belastungsmodells | 70 |
| 5.5 | Belastung an der Hauptspindel | 72 |
| 5.5.1 | Berechnung und Auslegung von Spindellagerungen | 72 |
| 5.5.2 | Simulationsbasierte Ermittlung der Lagerbelastung | 75 |
| 6 | Prototypische Implementierung | 77 |
| 6.1 | Gesamtstruktur des Prototyps | 77 |
| 6.2 | Berechnung der Prozesskräfte aus Antriebsdaten | 77 |
| 6.3 | Erfassung der internen Signale einer NC | 83 |
| 6.3.1 | Einfluss des Abtastintervalls auf die Genauigkeit | 83 |
| 6.3.2 | Edge-Lösungen für Werkzeugmaschinen | 85 |
| 6.4 | Softwaretechnische Realisierung | 86 |
| 6.4.1 | Integration in die informationstechnische Infrastruktur | 86 |
| 6.4.2 | Daten- und Informationsmodelle | 88 |
| 6.4.3 | Modularer Aufbau der Gesamtstruktur | 91 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 7 | Evaluation der Ergebnisse | 95 |
| 7.1 | Experimentelle Untersuchung von Belastungsprofilen | 95 |
| 7.2 | Validierung des Gesamtkonzepts | 100 |
| 7.2.1 | Optimierung von Bearbeitungsprozessen hinsichtlich Be- lastungskenngrößen | 106 |
| 7.2.2 | Implementierung eines Demonstrators | 108 |
| 7.3 | Ergebnisdiskussion | 111 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 113 |
| A | Anhang | 131 |
| A.1 | Ergebnisse experimentelle Ermittlung Kraftkoeffizienten . . . | 131 |
| A.2 | Experimentelle Untersuchungen ermittelter Prozesskräfte . . | 133 |
| A.3 | Übersicht NC-Signale | 135 |
| A.4 | Modellierung der objektorientierten Struktur | 137 |
| A.5 | Maschinenkonfiguration | 138 |

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

| Zeichen | Einheit | Bezeichnung |
|--------------------|------------------|--|
| A | mm ² | Spanungsquerschnittsfläche |
| A_c | % | Abnutzungsindikator |
| $a, a(t)$ | m/s ² | Beschleunigung |
| a_1 | - | Lebensdauerbeiwert für Erlebenswahrscheinlichkeit nach ISO 281 |
| a_e | mm | Eingriffsbreite |
| a_{iso} | - | Lebensdauerbeiwert für Betriebsbedingungen |
| a_p | mm | Schnitttiefe |
| B | N ³ m | Belastungsintegral |
| B_{ref} | N ³ m | Referenz Belastungsintegral |
| b | mm | Spanungsbreite |
| C_{dyn} | N | Dynamische Tragzahl |
| D | mm | Werkzeugdurchmesser |
| dS | mm | Schneidkantenlänge |
| E | € | Erlös |
| $F_{a(1),(2)}$ | N | Tatsächliche richtungsabhängige Axialkraft bei Vorspannung |
| $F_{a,B1}$ | N | Axiale Lagerbelastung |
| F_a | N | Axialkraft an Kugelgewindetrieb oder Spindel |
| F_c | N | Schnittkraft |
| F_f, F_{fm}, F_p | N | Vorschub-, Vorschubnormal-, Passivkraft |
| F_{lim} | N | Äußere axiale Grenzlast bei einem verspannten Mutternsystem |
| F_m | N | Äquivalente dynamische axiale Belastung |
| F_{ma} | N | Tatsächliche äquivalente dynamische axiale Belastung |
| F_P | N | Prozesskraft |
| F_{pr} | N | Vorspannkraft |
| F_R | N | Reibkraft |
| $F_{r,B1}$ | N | Radiale Lagerbelastung |

| Zeichen | Einheit | Bezeichnung |
|--------------------------|-------------------|--|
| F_t, F_r, F_a | N | Tangential-, Radial-, Axialkraft |
| F_x, F_y, F_z | N | Prozesskraft in x,y,z-Richtung |
| f_{ar} | - | Korrekturfaktor für den Einfluss der Zuverlässigkeit aus ISO 3408-5 |
| f_{op} | - | Korrekturfaktor für Vorspannungsverlust während der Lebensdauer |
| f_R | - | Anteil Reibung aufgrund Translation, Rotation |
| f_w | - | Lastfaktor Betriebsbedingungen |
| f_z | mm | Vorschub pro Zahn |
| f_{Zahn} | Hz | Zahneingriffsfrequenz |
| g | m/s ² | Erdbeschleunigung |
| h | mm | Spannungsdicke |
| I | A | Motorstrom |
| i | - | Übersetzungsverhältnis |
| J_{ges} | kgm ² | Gesamträgheitsmoment |
| J_{rot} | kgm ² | Trägheitsmoment durch Rotationsbewegung |
| J_{trans} | kgm ² | Äquivalentes Trägheitsmoment durch translatorische Bewegung |
| K | - | Faktor für Lebensdauerberechnung in Umdrehungen 10 ⁶ |
| K | € | Kosten |
| K_{ges} | € | Gesamtkosten |
| K_h | €/h | Resultierenden Kosten pro Stunde |
| K_L | € | Kosten über Lebensdauer |
| K_{tc}, K_{rc}, K_{ac} | N/mm ² | Spezifische Schnittkraftkoeffizienten |
| K_{te}, K_{re}, K_{ae} | N/mm | Spezifische Reibkraftkoeffizienten |
| K_Q | €/Q | Relative Kosten unter Berücksichtigung der Materialabtragsrate |
| K_{rest} | € | Restliche Kosten (Restwert) |
| k_T | Nm/A | Motorkonstante |
| L | - | Nominelle Lebensdauer in Umdrehungen |
| L_{10} | - | Nominelle Lebensdauer in Umdrehungen für eine Zuverlässigkeit von 90 % |
| L_h | h | Nominelle Lebensdauer in Betriebsstunden |
| L_{hm} | h | Modifizierte Lebensdauer in Betriebsstunden |
| L_m | - | Modifizierte Lebensdauer |

| Zeichen | Einheit | Bezeichnung |
|----------------|--------------------|--|
| l | mm | Werkzeuglänge |
| M_B | Nm | Beschleunigungsmoment; Drehmoment zur Überwindung der Trägheit |
| M_M | Nm | Motormoment |
| M_R | Nm | Reibmoment |
| m | kg | Masse |
| N | 1 | Gesamtumdrehungen |
| n | 1/min | Drehzahl |
| n_m | U/min | Äquivalente Drehzahl |
| P_h | mm | Steigung Kugelgewindetrieb |
| P_L | N | Dynamische äquivalente radiale Lagerbelastung |
| p | - | Lebensdauerexponent (Für Kugellager: $p=3$) |
| Q | mm ³ /s | Materialabtragsrate |
| q_i | - | Gewichtung der Kosten auf Komponentenebene |
| q_j | % | Zeitanteil |
| T | h | Betriebsstunden |
| T | s | Bearbeitungsdauer |
| U | V | Spannung |
| V | cm ³ | Volumen des angetragenen Materials |
| v | m/s | Geschwindigkeit |
| v_c | m/min | Schnittgeschwindigkeit |
| v_f | mm/min | Vorschubgeschwindigkeit |
| v_m | m/min | Äquivalente Geschwindigkeit |
| X | - | Radiallastfaktor |
| $x_{ist,dir}$ | mm | Ist-Position direkte Lagemessung |
| $x_{ist,ind}$ | mm, ° | Ist-Position indirekte Lagemessung |
| x_{soll} | mm | Soll-Position |
| Y | - | Axiallastfaktor |
| z | - | Anzahl der Schneiden |

Griechische Formelzeichen

| Variable | Einheit | Bezeichnung |
|-----------------|--------------------|-----------------------|
| α | rad/s ² | Winkelbeschleunigung |
| Δt | s | Zeitintervall |
| φ | rad | Drehwinkel |
| ω | rad/s | Winkelgeschwindigkeit |

Abkürzungen

| | |
|--------|---|
| ANN | Artificial Neural Network |
| API | Application Programming Interface |
| BTSS | Bedientafelschnittstelle |
| CAD | Computer Aided Design |
| CAM | Computer Aided Manufacturing |
| DBMS | Datenbankmanagementsystem |
| DMS | Dehnungsmessstreifen |
| EaaS | Equipment-as-a-Service |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |
| FFT | Fast-Fourier Transformation |
| HMI | Human Machine Interface |
| HTTP | Hypertext Transfer Protocol |
| IBN | Inbetriebnahme |
| IPC | Industrie-PC |
| IPO | Interpolator |
| JSON | JavaScript Object Notation |
| KGT | Kugelgewindetrieb |
| KMU | Kleine und mittlere Unternehmen |
| LSTM | Long Short-Term Memory Neural Network |
| MAE | Mittlerer absoluter Fehler (engl. Mean Absolute Error) |
| MAPE | Mittlerer absoluter prozentualer Fehler (engl. Mean Absolute Percentage Error) |
| MKS | Maschinenkoordinatensystem |
| NC | Numerische Steuerung (engl. Numerical Control) |
| NCK | NC-Kernel (engl. Numerical Control Kernel) |
| NCU | Hardwareeinheit der NC (engl. Numerical Control Unit) |
| OEM | Original Equipment Manufacturer |
| OPC UA | Open Platform Communications Unified Architecture |
| PTW | Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen |
| R2 | Bestimmtheitsmaß |
| RMSE | Quadratwurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl. Root Mean Squared Error) |
| SPS | Speicherprogrammierbare Steuerung |
| VDW | Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken |
| VNCK | Virtueller NC-Kernel |
| WKS | Werkstückkoordinatensystem |
| WKZ | Werkzeug |
| WZM | Werkzeugmaschine |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Komponenten einer WZM am Beispiel der DMC 850V des Herstellers DMG MORI | 4 |
| 2.2 | Funktion und Aufbau einer numerischen Steuerung | 5 |
| 2.3 | Aufbau einer Lage- und Antriebsregelung für Vorschubachsen einer WZM | 7 |
| 2.4 | Verlauf des Abnutzungsvorrates | 9 |
| 2.5 | Ursache-Wirkungs-Diagramm der Einflussfaktoren auf die Abnutzung einer WZM | 10 |
| 2.6 | Ausfallhäufigkeiten nach Hauptausfallgruppen und Komponenten einer WZM | 12 |
| 2.7 | Charakterisierung der Belastungsarten | 14 |
| 2.8 | Exemplarisches Lastkollektiv für einen KGT | 16 |
| 2.9 | Aufbau von Zustandsüberwachungssystemen | 18 |
| 2.10 | Charakteristischer Verlauf eines Zustandsmerkmals einer Komponente | 20 |
| 2.11 | Datenquellen zur Prognose des Abnutzungsverhaltens | 21 |
| 2.12 | Das System Zerspanprozess | 24 |
| 2.13 | Diskretisierung von Werkzeugen in Zerspankraftmodellen | 26 |
| 2.14 | Übersicht über Reibmodelle aus der Literatur | 27 |
| 2.15 | Leasing-Dreieck | 32 |
| 2.16 | Systematische Einteilung von Bezahlmodellen im Maschinenbau | 34 |
| 3.1 | Das Konzept Pay-per-Stress | 38 |
| 3.2 | Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit | 39 |
| 4.1 | Schematische Darstellung des technologischen Lösungsansatzes | 42 |
| 4.2 | Schematische Struktur des Gesamtsystems | 43 |
| 4.3 | Aufbau informationstechnische Infrastruktur | 45 |
| 4.4 | Gegenüberstellung des klassischen Leasings und belastungsorientierter Bezahlung | 46 |
| 4.5 | Einteilung der Komponenten nach Abnutzungsverhalten | 47 |
| 4.6 | Exemplarischer Verlauf des Belastungsindikators einer Komponente | 49 |
| 4.7 | Blockdiagramm zur Ermittlung des Abnutzungsindikators | 50 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.8 | Aggregation der Abnutzungsindikatoren je Komponente zu einem Abnutzungsindikator auf Maschinenebene | 52 |
| 4.9 | Versuchsmaschine DMC850 des Herstellers DMG MORI | 53 |
| 4.10 | Darstellung der verwendeten Werkzeugtypen | 55 |
| 4.11 | Versuchsaufbau Kraftmesstechnik | 56 |
| 5.1 | Blockdiagramm zur Simulation des Gesamtsystems | 60 |
| 5.2 | Bearbeitungsprozess und Prozessparameter zur Bestimmung der Kraftkoeffizienten für 42CrMo4 | 63 |
| 5.3 | Erfasste Prozesskräfte zur Bestimmung der Kraftkoeffizienten | 64 |
| 5.4 | Validierung der Ergebnisse der Prozesssimulation | 65 |
| 5.5 | Blockdiagramm zur Berechnung der Belastungen an einer Vorschubachse | 66 |
| 5.6 | Schematischer Aufbau einer Vorschubachse | 67 |
| 5.7 | Ermittlung der Reibkennlinie einer Vorschubachse | 70 |
| 5.8 | Bewertung Simulationsmodell Vorschubachse | 71 |
| 5.9 | Blockdiagramm zur Berechnung der Belastung einer Hauptspindel | 72 |
| 5.10 | Schematische Darstellung einer Motorspindel | 73 |
| 5.11 | Verhalten der äquivalenten Lagerbelastung der simulierten Motorspindel | 74 |
| 6.1 | Blockdiagramm zur prototypischen Implementierung | 78 |
| 6.2 | Blockdiagramm zur Berechnung der Belastungen an einer Vorschubachse aus Antriebsdaten | 79 |
| 6.3 | Zeitverlauf der aus Antriebsdaten berechneten Prozesskräfte für den Werkstoff 42CrMo4 | 81 |
| 6.4 | Zeitverlauf der aus Antriebsdaten berechneten Prozesskräfte für den Werkstoff AlCuMgPb | 81 |
| 6.5 | Korrelation ermittelter Prozesskräfte aus Antriebsdaten | 82 |
| 6.6 | Einfluss des Abtastintervalls auf die Genauigkeit bei Positionierbewegungen | 84 |
| 6.7 | Einfluss des Abtastintervalls auf die Genauigkeit bei Schneideneingriff | 85 |
| 6.8 | Architektur zur Erfassung und Verarbeitung der Daten in der Versuchsumgebung am PTW und Integration der Industrial Edge | 88 |
| 6.9 | Allgemeines Informationsmodell der NC-Signale einer WZM mit drei Achsen | 89 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6.10 | Übersicht über die Gesamtstruktur der implementierten Softwarekomponenten | 92 |
| 7.1 | Belastungsprofil Nutenfräsen mit Schaftfräser (D=16 mm) . . | 96 |
| 7.2 | Belastungsprofil Eckfräsen mit Eckfräser (D=32 mm) | 97 |
| 7.3 | Belastungsprofil Planfräsen mit Planfräser (D=63 mm) . . . | 98 |
| 7.4 | Belastungsprofil Bohren mit Bohrer (D=12 mm) | 99 |
| 7.5 | Zeitlicher Verlauf der belastungsorientierter Kosten je Komponente für Belastungsprofil 1 | 102 |
| 7.6 | Anteile der Komponenten an den Gesamtkosten je Belastungsprofil | 104 |
| 7.7 | Vergleich der aus Antriebssignalen, Referenzsensorik und Simulationsdaten berechneten Kosten | 105 |
| 7.8 | Optimierung Schnittparameter Bearbeitungsprozess 1 und 2 beim Vollnutfräsen mit Schaftfräser | 107 |
| 7.9 | Einfluss des Zahnvorschubs auf die Maschinenkosten | 108 |
| 7.10 | Benutzeroberfläche des Softwareprototyps als Webanwendung | 109 |
| 7.11 | Benutzeroberfläche des Softwareprototyps zur Analyse der Bearbeitungsschritte eines Werkstücks | 110 |
| A.1 | Zeitverlauf der aus Antriebsdaten berechneten Prozesskräfte für 42CrMo4 | 133 |
| A.2 | Zeitverlauf der aus Antriebsdaten berechneten Prozesskräfte für AlCuMgPb | 134 |
| A.3 | Klassendiagramm der objektorientierten Struktur | 137 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|-----|
| 4.1 | Spezifikationen der Versuchsmaschine DMC850V | 54 |
| 4.2 | Übersicht über die verwendeten Werkzeuge des Herstellers Kennametal | 55 |
| 4.3 | Technische Spezifikation des Mehrkomponenten-Dynamometers | 57 |
| 5.1 | Metriken zur Bewertung der Ergebnisse | 71 |
| 5.2 | Parametervariation | 74 |
| 5.3 | Metriken zur Bewertung der Genauigkeit der Modelle | 75 |
| 6.1 | Zuordnung der NC-Signale für ein 3-Achs-Bearbeitungszentrum | 90 |
| 7.1 | Ergebnisse des belastungsorientierten Bezahlmodells für die Belastungsprofile | 100 |
| 7.2 | Ergebnisse des belastungsorientierten Bezahlmodells über die Nutzungsdauer einer WZM | 101 |
| A.1 | Versuchsplan für den Werkstoff 42CrMo4 | 131 |
| A.2 | Versuchsplan für den Werkstoff AlCuMgPb | 131 |
| A.3 | Ermittelte Kraftkoeffizienten | 132 |
| A.4 | Ermittelte Kraftkoeffizienten unter Berücksichtigung der Mittelwerte und Amplituden | 132 |
| A.5 | Zuordnung NC-Signale (\$axis = Achsindex) | 135 |
| A.6 | Übersicht NC-Signale für ein 3-Achs-Bearbeitungszentrum . . | 136 |

1 Einleitung

Die verarbeitende Industrie ist mit einem Anteil von etwa einem Fünftel der gesamten Bruttowertschöpfung im Jahr 2022 eine der zentralen Säulen der deutschen Wirtschaft [Eur23]. Dabei führt der stetige Wettbewerb auf internationalen Märkten zu einem hohen Kostendruck bei steigenden Kundenanforderungen. Der Trend verkürzter Produktlebenszyklen infolge zunehmend individualisierter Produkte und neuer Innovationen stellt Unternehmen vor immer schwieriger zu beherrschende Herausforderungen [Fis18]. Hinzu kommen die Folgen der aktuellen gesellschaftlichen und ökologischen Probleme, sodass sich Unternehmen in einem zunehmend volatilen Marktumfeld befinden und mit den Auswirkungen unvorhersehbarer Rahmenbedingungen umzugehen haben [Ver23]. Dies bedeutet, dass die Fähigkeit, rechtzeitig auf Veränderungen reagieren zu können, ein wesentlicher Erfolgsfaktor für produzierende Unternehmen darstellt.

Die mit dem technologischen Fortschritt der Digitalisierung einhergehenden Chancen ermöglichen Unternehmen neue Handlungsalternativen zu generieren, um den Herausforderungen zu begegnen und langfristig in einem dynamischen Marktumfeld zu bestehen. Für produzierende Unternehmen bedeutet dies, die sich daraus ergebenden Möglichkeiten zur Steigerung der Effektivität und Effizienz durch kontinuierliche Verbesserung von Prozessen zu nutzen. Darüber hinaus besteht das Potenzial, durch den Einsatz digitaler Technologien bestehende Geschäftsmodelle fundamental zu verändern. Im Maschinen- und Anlagenbau ist die Digitalisierung ein Treiber für den Wandel von physischen Produkten hin zu Nutzenversprechen in Form gebündelter Dienstleistungen. [Sch22b]

Hier nimmt die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie eine zentrale Rolle ein, da die Produkte und Dienstleistungen branchenübergreifend für die Herstellung von Investitions- und Verbrauchsgütern eingesetzt werden und die hohen Anschaffungskosten besonders für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) eine finanzielle Herausforderung darstellen. Die Investitionen werden in der Regel über einen Kreditkauf oder Leasing realisiert, wobei die Abrechnung unabhängig vom Nutzungsverhalten über einen vertraglich festgelegten monatlichen Betrag erfolgt. Leasing ist in Deutschland und der Europäischen Union eine etablierte Form der Finanzierung von Investitionsgütern wie Werkzeugmaschinen, bei der dem Leasingnehmer das Wirtschaftsgut für einen begrenzt-

ten Zeitraum zur Nutzung überlassen und anschließend durch den Leasinggeber verkauft wird [Bei12]. Daher strebt der Leasinggeber einen möglichst hohen Verkaufserlös nach Ende der Leasingdauer an, während der Leasingnehmer eine maximale Auslastung zum Erreichen der eigenen wirtschaftlichen Ziele anstrebt. Die gegensätzlichen Interessen führen dazu, dass Leasinggeber einen geringeren Restwert infolge überdurchschnittlich hoher Belastung durch einen entsprechenden Risikoaufschlag in der Leasingrate berücksichtigen.

Als Alternative ergeben sich flexible Betreiber- oder Bezahlmodelle, die aufgrund des transparenten Nutzungsverhaltens Vorteile für Hersteller und Nutzer versprechen. Voraussetzung für solche Modelle ist ein Voranschreiten der Digitalisierung und eine unternehmensübergreifende Infrastruktur zum Datenaustausch. In diversen Branchen sind bereits sogenannte Pay-per-X-Modelle in verschiedenen Ausprägungen etabliert, bei denen sich die Bezahlung nicht durch einen fixen monatlichen Betrag, sondern aus einem gemessenen Indikator X ableitet. In anderen Branchen, wie z. B. der IT-Branche sind Nutzungs- und Finanzierungskonzepte wie Pay-per-Use bereits etabliert, um Cloud-Dienste flexibel, ohne hohe Investitionskosten anzubieten. Im Gegensatz zu Werkzeugmaschinen ist bei solchen Diensten die Unabhängigkeit des Standortes der Investitionsgüter ein großer Vorteil und vereinfacht die Umsetzung. Weiterhin lassen sich aus bestehenden Informationen Kenngrößen ableiten, nach denen die tatsächliche Nutzung abgerechnet werden kann. Ein weiteres Beispiel sind Telematik-Tarife aus der Versicherungsbranche. Hier ist die Versicherungsrate eines Fahrzeuges abhängig vom Fahrverhalten des Versicherungsnehmers.

Aufgrund der hohen Anzahl an Freiheitsgraden bei dem Betrieb von Werkzeugmaschinen sind Betreibermodelle basierend auf einfachen Indikatoren wie Betriebsstunden hauptsächlich in einer Serienproduktion bei gleichbleibenden Bearbeitungsprozessen geeignet. Da bei einer Einzelteilproduktion abhängig vom individuellen Bearbeitungsprozess stark abweichende Belastungen auftreten können, ist es sinnvoll weitere Einflussgrößen als Indikatoren in das Bezahlmodell aufzunehmen. Somit können diese Indikatoren Transparenz in der Nutzung sowohl für Anwender als auch für Anbieter schaffen. Für Hersteller der Maschine oder einzelner Komponenten ermöglichen diese Informationen zum einen das Nutzungsverhalten der Kunden besser kennenzulernen und zum anderen aufbauend darauf neue Dienstleistungen anzubieten. Eine Kopplung der Kosten an die tatsächliche Belastung der Maschine schafft zusätzlich auch finanzielle Anreize für eine nachhaltige Nutzung der Maschine. Hier bieten vor allem disruptive Ansätze von innovativen Betreibermodellen mit nutzungsabhängiger Abrechnung das Potenzial, die Stellung der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie am Weltmarkt weiter auszubauen.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Das Ziel des folgenden Kapitels ist es, den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik der für die Arbeit relevanten Themen vorzustellen. Dies umfasst insbesondere die Grundlagen von spanenden Werkzeugmaschinen als Forschungsobjekt der Arbeit, sowie die Ermittlung der Belastungen im Betrieb und die Lebensdauerberechnungen auf Komponenten- und Maschinenebene. Anschließend folgt eine Übersicht etablierter Bezahlmodelle und aktueller Entwicklungen von Subskriptionsmodellen für Werkzeugmaschinen.

2.1 Grundlagen Werkzeugmaschine

Als Forschungsobjekt liegt der Fokus dieser Arbeit auf Werkzeugmaschinen (WZM), die in der Literatur als „mechanisierte und mehr oder weniger automatisierte Fertigungseinrichtungen, die durch relative Bewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück eine vorgegebene Form oder Veränderung am Werkstück erzeugen“ definiert werden [DIN69651-1]. Eine Einteilung orientiert sich an den Fertigungsverfahren für den avisierten Verwendungszweck der WZM. Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf das Fertigungsverfahren Fräsen, welches der Gruppe Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden und somit der Hauptgruppe Trennen zuzuordnen ist [DIN8580].

2.1.1 Funktion, Komponenten und Betrieb

Neben der Einteilung nach Fertigungsverfahren oder Bauform wird für eine nähere Bezeichnung nach dem Automatisierungsgrad unterschieden. Eine konventionelle WZM umfasst den wesentlichen Kern und besteht aus mechanischen Komponenten wie Strukturbauteilen, Führungen, Lagerungen oder Gewindetrieben sowie Haupt- und Nebenantrieben, die zum Erzeugen einer definierten Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug erforderlich sind. Im Vergleich zu konventionellen WZM steuert bei einer NC-Maschine die numerische Steuerung (engl.: Numerical Control; NC) den Ablauf der Bewegungen und Maschinenfunktionen, basierend auf eingelesenen NC-Programmen, die in Schalt- und Steuerbefehle übersetzt werden [DIN2806].

Mit zunehmendem Automatisierungsgrad durch die Integration einer Werkzeugwechseinrichtung werden die WZM als Bearbeitungszentrum und im

nächsten Schritt durch Werkstückwechseinrichtungen als Fertigungszelle bezeichnet. Verknüpfungen mehrerer Bearbeitungszentren mit Transport- und Lagersystemen werden als flexible Fertigungssysteme bezeichnet. [Bre18]

Bei den in dieser Arbeit betrachteten WZM handelt es sich um Fräs-Bearbeitungszentren, deren wesentliche Baugruppen und Komponenten in Abbildung 2.1 exemplarisch für eine WZM der Baureihe DMC 850V des Herstellers DMG MORI dargestellt sind. Aufgrund der großen Vielfalt verbauter Komponenten wird die Darstellung auf diejenigen beschränkt, die für diese Arbeit relevant sind. In der vorliegenden Fahrständerbauweise ermöglicht die WZM 3-Achs Bearbeitung mit einer vertikal angeordneten Spindel, in die über eine entsprechende Schnittstelle das Werkzeug gespannt wird. Als Hauptantrieb erzeugt die Motorspindel die rotatorische Bewegung des Werkzeugs mit der Schnittgeschwindigkeit v_c . Die Nebenantriebe bestehen im Wesentlichen aus Kugelgewindetrieb (KGT), Führungen, Schlitten und Servomotor, die die Verfahrbewegungen mit der Vorschubgeschwindigkeit v_f erzeugen.

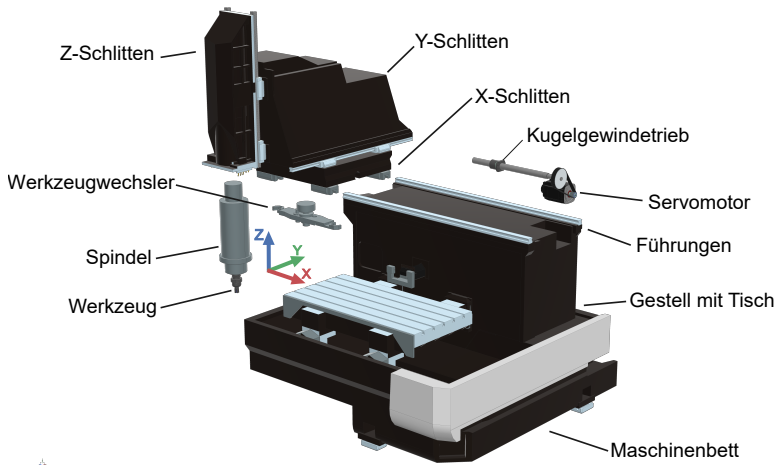


Abbildung 2.1: Komponenten einer WZM am Beispiel der DMC 850V des Herstellers DMG MORI

Die Auslegung und Konstruktion der Komponenten einer WZM erfolgt abhängig von der Funktion und den zu erwartenden Betriebsbedingungen, um die fertigungstechnischen Anforderungen im Betrieb erfüllen zu können [Bre19c]. Dabei können sich die Betriebsbedingungen abhängig vom Anwendungsfall des Betreibers der WZM bedingt beispielsweise durch Geometrie und Mate-

rial des Werkstücks oder die Fertigungsart stark unterscheiden. Besonders bei Großserien erfolgt eine Steigerung der Produktivität durch eine Optimierung der Hauptzeit und Reduzierung unproduktiver Nebenzeiten, was zu einem variierenden Verhältnis der Betriebszustände führen kann.

2.1.2 Numerische Steuerung

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, ist die Aufgabe der NC, Eingangsinformationen aus NC-Programmen zu interpretieren und synchronisiert als Schalt- und Steuerbefehle an die Antriebe und die SPS weiterzugeben, sodass die programmierten Bewegungsabläufe und Maschinenfunktionen sequenziell umgesetzt werden (siehe Abbildung 2.2). Die grundlegenden Befehle von NC-Programmen sind durch die Normen DIN 66025 und ISO 6983 definiert und werden durch maschinenspezifische Befehle ergänzt.

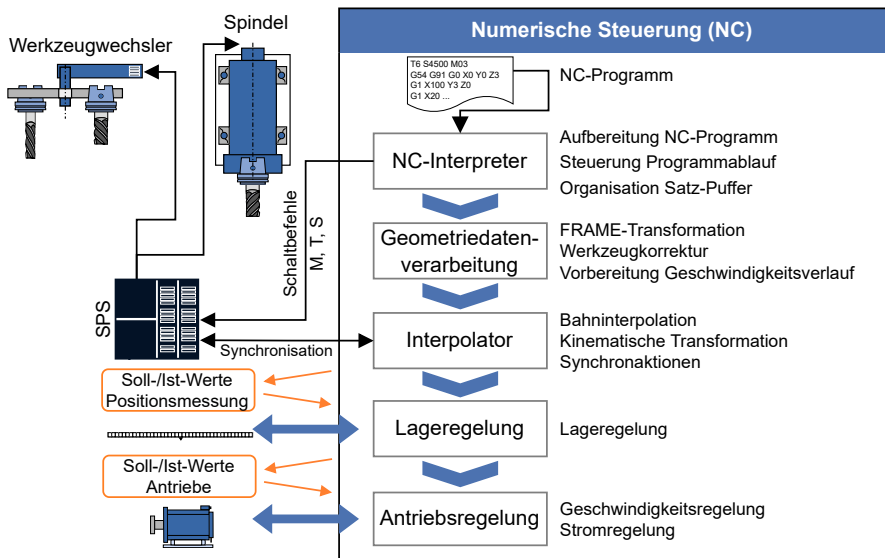


Abbildung 2.2: Funktion und Aufbau einer numerischen Steuerung [Bre21]

Die Informationen aus dem NC-Programm werden zunächst durch einen NC-Interpreter decodiert und zur weiteren Verarbeitung in geometrische und technologische Daten, sowie Schaltbefehle getrennt. Die Schaltbefehle werden an eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) weitergegeben, um typi-

sche Funktionen der Maschine wie beispielsweise Werkzeugwechsel, Steuerung der Kühlmittelzufuhr oder die Steuerung weiterer Aggregate zu realisieren. Eine Synchronisierung mit den Geometriedaten stellt den Ablauf der korrekten Funktionen sicher. [Wol09]

Unter dem Begriff Geometriedatenverarbeitung werden die Schritte zur Aufbereitung der geometrischen und technologischen Daten zusammengefasst. Die eingehenden Daten beinhalten dabei die Lage der Eckpunkte, Bewegungsart und Vorschubgeschwindigkeit des jeweiligen programmierten NC-Satzes. Da die Positionen im Werkstückkoordinatensystem (WKS) angegeben sind, ist zunächst eine Korrektur aufgrund der Werkzeuggeometrie, eine Nullpunktverschiebung basierend auf der Lage des realen Bauteils und ggf. geometrische Transformationen für eine Umrechnung ins Maschinenkoordinatensystem (MKS) notwendig. Anschließend erfolgt die Berechnung der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile aus den technologischen Daten im Rahmen der Geschwindigkeitsführung. Dabei werden die Randbedingungen der Maschine wie die Dynamik der Antriebe berücksichtigt. [Bre21]

Basierend auf den Vorgaben der Geschwindigkeitsführung berechnet der Interpolator (IPO) Positionssollwerte der einzelnen Maschinenachsen zu diskreten Zeitpunkten, welche zur Koordination der Verfahrbewegungen als Führungsgröße an die Antriebsregelung weitergegeben werden [Bre21]. Die dabei geltende Taktzeit wird als IPO-Takt bezeichnet und beträgt ein ganzzahliges Vielfaches des Lageregeltaktes [Sie22a]. Bei Siemens-Steuerungen wird der Lageregeltakt auch als Servo-Takt bezeichnet [Sie21]. Bei der zu betrachtenden Maschine entspricht der IPO-Takt mit 4 ms dem doppelten Wert des Lageregeltaktes (2 ms), was der Konfiguration aktueller Steuerungen von WZM entspricht. Der Takt des Regelkreises für die Stromregelung des Antriebes hingegen liegt bei 125 μ s [Sie22a].

2.1.3 Maschineninterne Signale der Lage- und Antriebsregelung

Um die in der NC berechneten Sollwerte wie Position und Geschwindigkeit der Vorschubachsen umzusetzen, kommt eine Lageregelung zum Einsatz, welche die im Prozess auftretende Störeinflüsse wie z. B. Schnittkräfte ausregelt. Im Vergleich zu einer Steuerung erfolgt bei der Regelung eine Rückführung der Regelgröße auf den Eingang zum Sollwert in einer Kreisstruktur [Sch15]. Somit werden in einem Regelsystem die Regelabweichungen zur entsprechenden Anpassung der Regelgröße erfasst. In Abbildung 2.3 ist eine kaskadierte Regelstruktur der Lageregelung mit unterlagerter Drehzahl- und Stromrege-

lung für eine Vorschubachse dargestellt. Die Regelstrecke des Antriebssystems ist vereinfacht visualisiert und besteht aus einem Servomotor und den mechanischen Übertragungselementen wie KGT, Maschinenschlitten und Getriebe. Der Frequenzumrichter, der zur Bereitstellung der notwendigen Energie für den Antrieb erforderlich ist, ist nicht dargestellt. In der Regel verfügt jede Vorschubachse über einen eigenen Lageregelkreis, der unabhängig von den anderen Achsen ist [Bre21]. Die Führung der Bewegung entlang einer berechneten Werkzeugbahn und die Erzeugung der Relativbewegung erfolgen durch die Ansteuerung der jeweiligen Haupt- und Nebenantriebe mittels der NC [Kie17]. Im Gegensatz zu den Vorschubantrieben erfolgt die Regelung des Hauptantriebes im Steuerbetrieb über einen Drehzahlregelkreis mit unterlagertem Stromregelkreis. Ist eine genaue Positionierung des Winkels der Spindel erforderlich, wird eine Lageregelung über den Drehgeber am Motor durchgeführt.

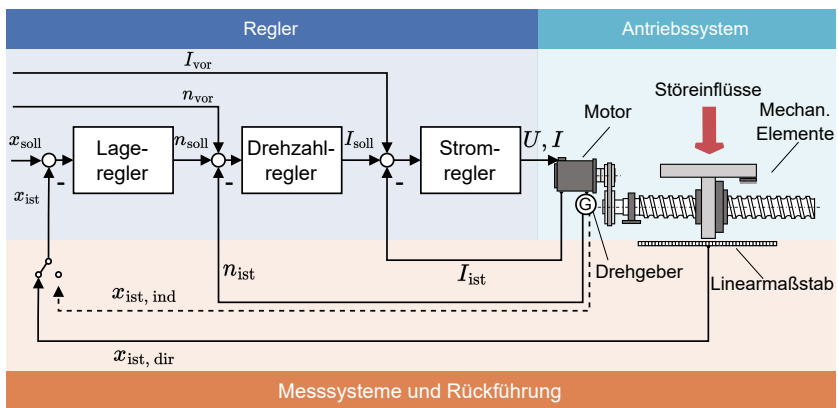


Abbildung 2.3: Aufbau einer Lage- und Antriebsregelung für Vorschubachsen einer WZM in Anlehnung an [Bre21]

Die vom Interpolator vorgegebenen Sollwerte x_{soll} stellen die Führungsgröße des Lageregelkreises dar und werden zur Ermittlung der Regeldifferenz mit der aktuellen Lage des Maschinenschlittens x_{ist} verglichen. Für die Rückführung der Regelgröße erfolgt die Erfassung der Ist-Position der jeweiligen Achse über interne Sensorik, entweder indirekt über einen Drehgeber am Motor oder direkt über einen Linearmaßstab am Maschinenschlitten. Bei modernen WZM wird hauptsächlich die direkte Positionsmessung für die Lageregelung eingesetzt, da im Gegensatz zu indirekten Drehgebern zusätzliche Abwei-

chungen im Antriebsstrang erfasst werden können, was die Genauigkeit der Positionierung steigert. Die ermittelte Stellgröße wird an den unterlagerten Geschwindigkeitsregler weitergegeben, der wiederum die daraus berechnete Stellgröße an den unterlagerten Stromregler weitergibt. Eine Rückführung des Drehzahl-Istwertes erfolgt über numerische Differentiation des über den Drehgeber gemessenen Positionssignals. Zur Messung der Antriebsströme am Motor eignen sich verschiedene Messprinzipien. Beispielsweise kann die Messung mit Hilfe eines Hallelementes oder des Transformatorprinzips für Wechselstrommessungen durchgeführt werden. [Bre21]

Durch eine zusätzliche Vorsteuerung kann das Führungsverhalten der Lage- und Antriebsregelung verbessert werden, indem die Sollwerte über eine Vorsteuerfunktion direkt auf den Streckeneingang geschaltet werden. Dazu werden über die Vorsteuerfunktion die mathematischen Zusammenhänge zwischen Position, Drehzahl und Strom abgebildet, sodass der jeweilige Regler nur noch die Störgrößen in seinem Regelkreis ausregeln muss. [Sch15]

2.2 Instandhaltung, Verfügbarkeit und Ausfallverhalten

Für den Erhalt oder die Wiederherstellung des funktionsfähigen Zustandes einer WZM werden während des Lebenszyklus Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt. Vor dem Hintergrund der Instandhaltung werden im folgenden Kapitel der Abnutzungsvorrat definiert, sowie Einflussfaktoren auf die Abnutzung und das Ausfallverhalten beschrieben.

2.2.1 Definition des Abnutzungsvorrates

Im Allgemeinen wird der vorhandene Vorrat eines Objektes zur Erfüllung der vorbestimmten Funktion bei bestimmungsgemäßer Verwendung als Abnutzungsvorrat bezeichnet. Dabei beschreibt der Begriff Abnutzung Vorgänge, die durch unterschiedliche Beanspruchungen hervorgerufen werden und den Abbau des Abnutzungsvorrates zur Folge haben. Solche Vorgänge sind beispielsweise Reibung, Alterung oder Ermüdung. Besonders bei Komponenten, die an der Durchführung von Bewegungen direkt beteiligt sind, tritt betriebsbedingte Abnutzung auf, die durch physikalische Vorgänge hervorgerufen wird und das Ausfallverhalten sowie die Lebenszykluskosten beeinflusst. Ein möglicher Verlauf des Abnutzungsvorrates ist in Abbildung 2.4

dargestellt und wird durch den Ausgangszustand nach Herstellung und die Abnutzungsgrenze als Mindestwert begrenzt. [DIN31051]

Der zeitliche Verlauf des Abnutzungsvorrates ist abhängig vom Abnutzungsverhalten eines Objektes und den tatsächlich auftretenden Betriebsbedingungen. So lässt sich eine mögliche Kurve bei gleichbleibenden Betriebsbedingungen einer Großserienfertigung durch eine lineare oder annähernd lineare Modellierung (Zeitverlauf 2) abbilden, dessen Steigung von den Betriebsbedingungen abhängt, aber sich nicht verändert. Bei stark wechselnden Betriebsbedingungen z. B. bei einer Einzelteilfertigung oder schwankender Auslastung variiert der zeitliche Verlauf (Zeitverlauf 1 & 3).

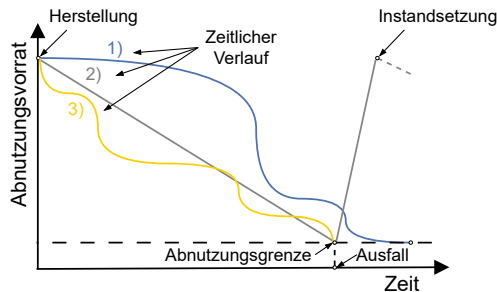


Abbildung 2.4: Verlauf des Abnutzungsvorrates in Anlehnung an [DIN31051]

Um den funktionsfähigen Zustand zu erhalten oder wiederherzustellen, werden während des Lebenszyklus eines Objekts technische und administrative Maßnahmen durchgeführt, die unter dem Begriff Instandhaltung zusammengefasst werden [DIN13306]. Der Zeitpunkt der Durchführung ist abhängig von der Instandhaltungsstrategie. Im Gegensatz zu einer reaktiven Instandhaltungsstrategie werden bei einer präventiven Instandhaltung (eng. Predictive Maintenance) die Maßnahmen vor dem Ausfallzeitpunkt durchgeführt, um ungeplante Stillstandszeiten zu vermeiden [DIN31051].

2.2.2 Charakterisierung von Einflussfaktoren und Belastung

Im Betrieb unterliegen WZM und deren Komponenten diversen Einflussfaktoren, die eine Abnutzung begünstigen oder direkt zu Abnutzung führen und somit eine Reduzierung der verbleibenden Lebensdauer zur Folge haben. Die Komplexität und die Vielzahl an Freiheitsgraden bei der Zerspanung mit WZM resultieren in einer großen Anzahl von Einflussfaktoren, die unter-

schiedliche Auswirkungen auf die Lebensdauer der Komponenten haben. Nach [Stä17] erfolgt eine Unterscheidung der Einflussfaktoren in maschinenbedingte, prozessbedingte, werkstückbedingte und betriebsbedingte Belastungen, die von [Abe06] um den Faktor Mensch ergänzt werden. In Abbildung 2.5 werden die Einflussfaktoren in einem Ursache-Wirkungs-Diagramm zusammengefasst.

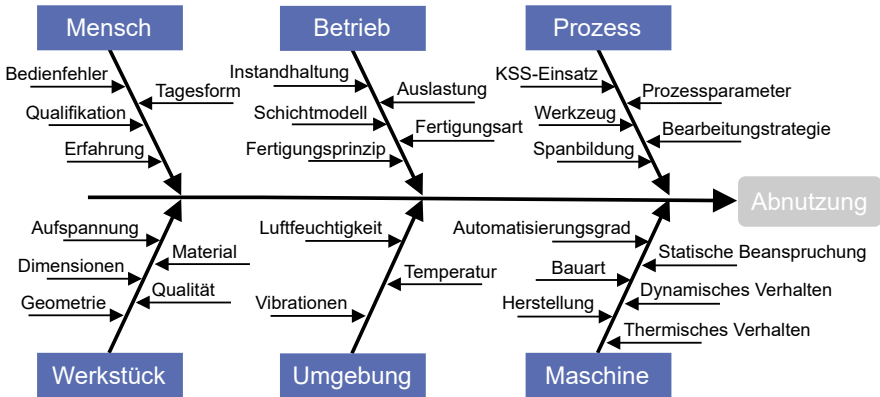


Abbildung 2.5: Ursache-Wirkungs-Diagramm der Einflussfaktoren auf die Abnutzung einer WZM

Maschinenbedingte Faktoren ergeben sich aufgrund der Konstruktion, so dass Anpassungen während der Nutzungsphase durch den Anwender mit einem hohen Aufwand verbunden sind. Dabei ist anzumerken, dass identische Maschinen infolge von Fertigungstoleranzen bei der Herstellung unter gleichen Betriebsbedingungen variierende Abnutzungserscheinungen aufweisen können. Die Einflussfaktoren der Umgebung beziehen sich auf mechanische, thermische und chemische Faktoren aus dem Umfeld der Maschine. Zu den menschlichen Faktoren zählen beispielsweise Bedienfehler, die bei geringer Qualifikation und Erfahrung mit erhöhter Wahrscheinlichkeit auftreten. Werkstückbedingte Faktoren beziehen sich auf das herzustellende Produkt. Dabei hat beispielsweise der Werkstoff einen Einfluss auf die wirkende Belastung oder die Komplexität der Werkstückgeometrie bedingt die Anzahl der erforderlichen Prozessschritte. Betriebsbedingte Faktoren wie Schichtmodell oder Fertigungsart beschreiben organisatorische Aspekte bei der Produktionsplanung und haben daher einen Einfluss auf die Auslastung der Maschine. Prozessbedingte und technologische Einflussfaktoren beschreiben die Stell-

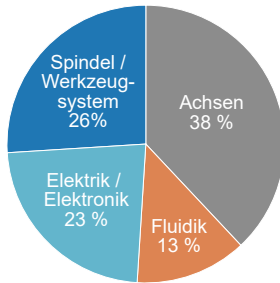
größen des Zerspanprozesses und werden bei der Prozessauslegung durch den Anwender festgelegt. Dabei erfolgt eine Optimierung der Prozessparameter hinsichtlich wirtschaftlicher und technischer Zielgrößen.

Im Hinblick auf die Zielstellung dieser Arbeit, nämlich der Umsetzung eines belastungsorientierten Bezahlmodells, wirken sich sämtliche Einflussfaktoren auf die Belastung und Abnutzung einer WZM aus. Sie stellen aber keine objektiv quantifizierbaren Kenngrößen für die Abrechnung dar, da diese die tatsächliche Belastung der Komponenten nur unzureichend abbilden. Zusätzlich beschreiben viele dieser Kenngrößen die System- und Stellgrößen in der Zerspannung, welche sensible Informationen zum Produktionsprozess beinhalten können und daher nur eingeschränkt mit anderen Unternehmen geteilt werden.

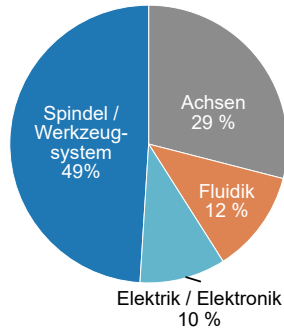
2.2.3 Statistisches Ausfallverhalten und -ursachen

Die Gesamtlebensdauer eines technischen Systems resultiert aus der Lebensdauer der einzelnen Komponenten, welche aufgrund von Abnutzungsverhalten und Belastungen variieren. Infolgedessen existieren kritische Komponenten, die im Lebenszyklus einer WZM häufiger ausfallen und somit einen stärkeren Einfluss bei der Implementierung neuer Geschäftsmodelle haben. Die Identifizierung relevanter Komponenten basierend auf ihrer Ausfallhäufigkeit erfolgt auf Basis verschiedener Studien aus der Fachliteratur. Dabei ist zu beachten, dass die Eigenschaften der in den Studien untersuchten WZM und die verfügbare Datenbasis einen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Zudem kann auch bei der Nutzung gleicher Betriebsmittel die individuelle Belastung der Anwender zu unterschiedlichem Ausfallverhalten führen. Trotz eines variierenden Ausfallverhaltens der in Abbildung 2.6 dargestellten Studien zeigen die Ergebnisse, dass es sich bei den Hauptausfallgruppen einer WZM um die Achsen und die Spindel handelt. In [Fle07] zählen die Achsen mit einem Anteil von 38 %, sowie die Spindel mit 26 % zu den Hauptausfallgruppen einer WZM, während die Anteile in [Den09] für die Spindel 49 % und für die Achsen 29 % betragen. Auch bei einer differenzierteren Betrachtung der Komponenten stellen die Spindel und die Achsen die Gruppen mit der höchsten Ausfallhäufigkeit dar [Koh22]. Als Gründe für die Ausfälle werden in [Den09] mangelhafte Instandsetzung, Bedienfehler, Verschleiß, Materialermüdung, Materialfehler oder Konstruktionsfehler genannt. Auf Grundlage der Analyse der Ausfallursachen einer WZM in [Abe09], stellt Verschleiß neben den nicht zuzuordnenden Gründen die Hauptursache für Ausfälle dar.

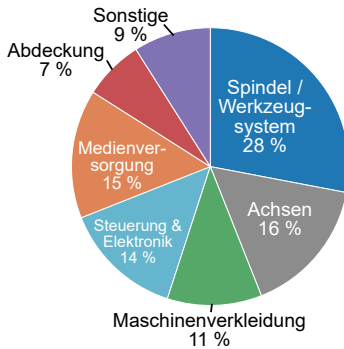
a) Ausfallverhalten WZM [Fle07]



b) Ausfallverhalten WZM [Den09]



c) Ausfallverhalten WZM [Koh22a]



d) Ausfallverhalten Vorschubachse [Sch09]

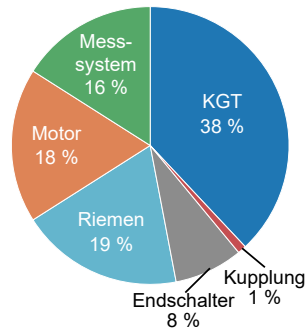


Abbildung 2.6: Ausfallhäufigkeiten nach Hauptausfallgruppen und Komponenten einer WZM

In Abbildung 2.6 d) ist das Ausfallverhalten der Komponenten einer Vorschubachse dargestellt. Nach [Sch09] und [Kle01] stellt der KGT mit 38 % die Komponente mit der höchsten Ausfallhäufigkeit dar. Ergänzend zu den dargestellten Ergebnissen weisen in [Fle07] Führungen und Schutzabdeckungen ebenfalls einen signifikanten Anteil auf. In [Abe06] werden als Ausfallursache für die Hautspindel die Lagerung sowie die Werkzeugschaltung als die Komponenten mit der höchsten Relevanz abgeleitet. Letztendlich existieren mehrere grundlegende Komponenten, bei denen das Ausfallverhalten unmittelbar mit dem Einsatz der Maschine und somit ihrer Belastung im laufenden Betrieb korreliert.

Im Rahmen der Arbeit wird der Fokus auf Komponenten mit einem ähnlichen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Belastung und Abnutzung gelegt. Aus den untersuchten Studien werden als übergeordnete Hauptausfallgruppe mechanische Übertragungselemente abgeleitet, die primär Elemente mit Wälzkontakten aufweisen. Dazu gehören unter anderem Komponenten wie der KGT und die Wälzlagerung der Baugruppen Hauptspindel und Vorschubachse. Obwohl die Ausfälle elektronischer Bauteile einen signifikanten Anteil ausmachen, ist die in Abschnitt 2.3.2 beschriebene Vorgehensweise zur Berechnung der Lebensdauer aufgrund eines abweichenden Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs zwischen Belastung und Abnutzung nicht anwendbar. Weiterhin ist die Instandsetzung mechanischer Komponenten im Vergleich zu elektronischen Bauteilen zumeist zeitintensiver [Sch21b]. Bei Baugruppen wie Maschinenbett oder Gestell handelt es sich in der Regel nicht um Verschleißteile, weshalb Sie keine ausfallkritischen Komponenten darstellen.

2.3 Lebensdauer von Werkzeugmaschinen und ihren Komponenten

Im folgenden Kapitel wird der aktuelle Stand der Forschung und Technik hinsichtlich der Diagnose und Prognose der Lebensdauer von WZM dargestellt. In diesem Zusammenhang wird zunächst auf die Lebensdauerberechnung bei der Auslegung von Komponenten einer WZM eingegangen, woran sich eine Beschreibung von Methoden, die zur Erfassung der Zustände von Komponenten einer WZM dienen, anschließt.

2.3.1 Belastungs-Zeit-Funktion

In der Betriebsfestigkeit ist die Voraussetzung für eine lebensdauerorientierte Auslegung von Bauteilen die Annahme von Belastungen bzw. Beanspruchungen unter möglichst realitätsnahen Betriebsbedingungen, die in einer Belastungs-Funktion beschrieben werden können [San21; Rad07]. Da das Ziel der Arbeit die Entwicklung eines belastungsorientierten Bezahlmodells ist, stehen die Belastungs-Zeit-Funktion und daraus abgeleitete Belastungskollektive im Fokus der Arbeit.

Die während des Betriebs einer WZM auftretenden Belastungen wie z. B. Kräfte oder Momente werden durch die Belastungs-Zeit-Funktion beschrieben und können wie in Abbildung 2.7 nach dem zeitlichen Verlauf charakterisiert werden. Im Gegensatz zu statischen Belastungen sind dynamische Be-

lastungen zeitlich veränderlich und führen durch die periodische Anregung zu Schwingungen im betrachteten System. Bei quasistatischen Belastungen handelt es sich um eine Kombination aus einer statischen Grundlast und einem im Verhältnis kleinen dynamischen Anteil, während eine impulsartige Belastung von kurzer Dauer ist. Da der Zeitlauf der ersten vier Belastungsarten eindeutig mathematisch beschreibbar ist, werden deren Belastungs-Zeit-Funktionen als deterministisch bezeichnet. Dagegen werden Belastungs-Zeit-Funktionen mit einem Zeitverlauf aus variablen und nicht periodischen Amplituden als stochastisch bezeichnet. Diese sind nicht durch mathematische Gleichungen, sondern mit Hilfe der deskriptiven Statistik zu beschreiben. [Köh12]

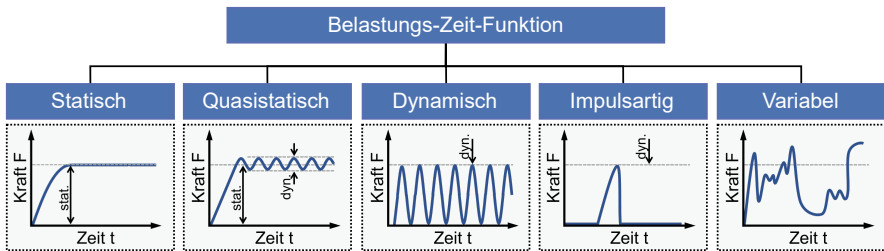


Abbildung 2.7: Charakterisierung der Belastungsarten in Anlehnung an [Bux92; San18]

In der Praxis resultiert die Belastung in der Regel aus einer Kombination überlagerter Einzelbelastungen. Abhängig von der zu betrachtenden Komponente und dem Zustand der WZM treten beispielsweise Gewicht-, Vorspann-, Trägheits-, Reib- oder Prozesskräfte einzeln oder in Kombination auf.

2.3.2 Lebensdauerberechnung

Die Auslegung von Komponenten einer WZM erfolgt auf Grundlage von Vorschriften, Normen oder Regeln, die den Zusammenhang zwischen Belastungen und zu erwartender Lebensdauer abbilden. Grund dafür ist der hohe Aufwand, die Eignung von Komponenten für verschiedene Anwendungsfälle durch Erprobung mit einer ausreichenden Anzahl an Stichproben festzustellen [ISO281]. Je nach Komponente wirken im Betrieb aufgrund physikalischer oder chemischer Prozesse verschiedene Belastungen, die zu einem unterschiedlichen Abnutzungsverhalten führen. Die Belastungen lassen sich nach [Stä17] in mechanische, thermische, korrosive und tribologische Belastungen einteilen.

In der Tribologie bezeichnet Verschleiß den progressiven Materialverlust, der durch mechanische Beanspruchung bei Relativbewegungen zwischen zwei in Kontakt befindlichen Körpern entsteht. Verschleißmechanismen in der Tribologie werden in Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung (Ermüdung) und tribochemische Reaktionen eingeteilt. [Det17]

Nicht tribologische Belastungen führen auch zu Materialermüdung oder chemischer Alterung, jedoch durch andere Verschleißmechanismen, die nicht auf Reibung zwischen Körpern beruhen. Die Verschleißmechanismen und Einflussfaktoren auf die Lebensdauer sind vielseitig und in der Gesamtheit im Rahmen eines belastungsorientierten Bezahmodells nicht abbildbar. Daher wird im Folgenden eine standardisierte Methode, die bei der Auslegung von Bauteilen zur Vermeidung von Ausfällen durch Materialermüdung zum Einsatz kommt, erläutert. Die Berechnung der nominellen Lebensdauer ist für KGT in DIN ISO 3408-5 und für Wälzlager in ISO 281 beschrieben [ISO3408; ISO281], deren Grundlagen auf der linearen Schädigungshypothese von Lundberg und Palmgren beruhen [Lun49]. Die nominelle Lebensdauer L_{10} ist definiert als die Anzahl der Umdrehungen bevor Anzeichen einer Materialermüdung auftreten [ISO281]. Die Berechnung erfolgt basierend auf der dynamischen Tragzahl C und der wirkenden Belastung P entsprechend Gleichung (2.1). Die dynamische Tragzahl C stellt einen Kennwert zur Beschreibung der Ermüdungsgrenzbelastung dar und ist den Katalogen der KomponentenhHersteller zu entnehmen. Ermittelt wird die dynamische Tragzahl in Lebensdauerersuchen durch eine statistisch abgesicherte große Anzahl identischer Lager, die unter konstanter Belastung eine nominelle Lebensdauer von einer Millionen Umdrehungen erreichen [Sch21a]. Der Lebensdauerexponent ist abhängig von der Wälzkörpergestalt zu wählen (Kugellager: $p = 3$, Rollenlager $p = \frac{10}{3}$).

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (2.1)$$

Für eine Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen wird die nominelle Lebensdauer um Lebensdauerbeiwerte modifiziert. Nach [ISO281] werden Lebensdauerbeiwerte für die Erlebenswahrscheinlichkeit a_1 und Betriebsbedingungen a_{iso} berücksichtigt. In [ISO3408] ist lediglich ein Korrekturfaktor f_{ar} für den Einfluss der Zuverlässigkeit beschrieben. Aus diesem Grund sind in [Yag14] weitere Faktoren, wie zum Beispiel der Korrekturfaktor f_w zur Berücksichtigung des Einflusses von Stoßbelastungen, beschrieben.

Bei Wälzlagern, die Kräfte in axialer Richtung F_a und radialer Richtung F_r aufnehmen können, wird die äquivalente axiale Gesamtbelastung P nach Gleichung (2.2) berechnet. Der Radiallastfaktor X und der Axiallastfaktor Y sind entsprechenden Normen oder Produkttabellen der Komponentenhersteller zu entnehmen.

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (2.2)$$

Bei der Auslegung durch den Maschinenhersteller werden die im Betrieb wirkenden Belastungen abgeschätzt und eine gewünschte Lebensdauer (z. B. $L_{10h} = 20.000 h$) bestimmt [Bro12]. Basierend darauf wird eine für die Gewährleistung notwendige dynamische Tragzahl zur Auswahl einer geeigneten Komponente bestimmt. Sind die über die Lebensdauer abgeschätzten Belastungen und Geschwindigkeiten nicht konstant, ist aus dem Last- und Geschwindigkeitsprofil eine äquivalente Belastung F_m und Geschwindigkeit v_m zu berechnen. In Abbildung 2.8 ist exemplarisch ein Lastkollektiv für einen KGT dargestellt, bei dem die Belastungen für Positionierbewegungen im Eilgang, sowie Schrupp- und Schlichtprozessen abgeschätzt werden. Aus den angegebenen prozentualen Zeitanteilen q_j der Belastung F_j und Geschwindigkeit v_j , erfolgt die Berechnung nach den Gleichungen (2.3) und (2.4).

$$F_m = \sqrt[p]{\sum_{j=1}^n F_j^p \cdot \frac{v_j}{v_m} \cdot \frac{\Delta t_j}{\Delta t_{\text{ges}}}} \quad (2.3)$$

$$v_m = \sum_{j=1}^n v_j \cdot \frac{\Delta t_j}{\Delta t_{\text{ges}}} \quad (2.4)$$

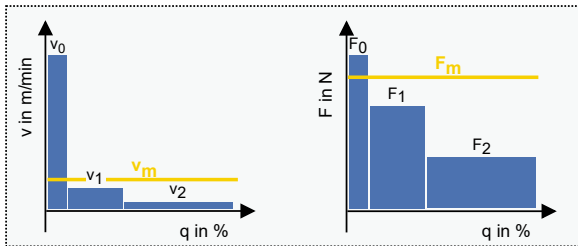


Abbildung 2.8: Exemplarisches Lastkollektiv für einen KGT

In wissenschaftlichen Arbeiten wird dieses Verfahren zur Prognose der Lebensdauer basierend auf realen Daten aus dem Prozess eingesetzt [Huf12; Bro12; Rød18; Koh21]. Basierend auf entsprechenden Prozessdaten wird die Berechnung der äquivalenten Belastung aus dem zeitlich variablen Verlauf der

Kraft $F(t)$ und Geschwindigkeit $v(t)$ über Zeitraum T in Integralschreibweise wie folgt ausgedrückt:

$$F_m = \sqrt[p]{\frac{\int_0^T |F(t)|^p \cdot |v(t)| dt}{\int_0^T |v(t)| dt}} \quad (2.5)$$

2.3.3 Grundlagen der Zustandsüberwachung

Hervorgerufen durch unzureichende Instandhaltung, verursachen ungeplante Stillstände von Maschinen hohe Kosten durch einen gestörten Ablauf im Produktionsbetrieb [Sch20]. Ziel der Instandhaltung ist daher eine möglichst störungsfreie Nutzung der eingesetzten Maschinen bei geringem Aufwand [Str12]. Folglich besteht an der Zustandsüberwachung (engl. Condition Monitoring) von WZM und deren Komponenten ein wirtschaftliches Interesse und ist zentrales Forschungsthema wissenschaftlicher Untersuchungen. Zur weiteren Ausführung werden zunächst die grundlegenden sechs Schritte des Aufbaus von Zustandsüberwachungssystemen nach ISO 13374 erläutert (siehe Abbildung 2.9).

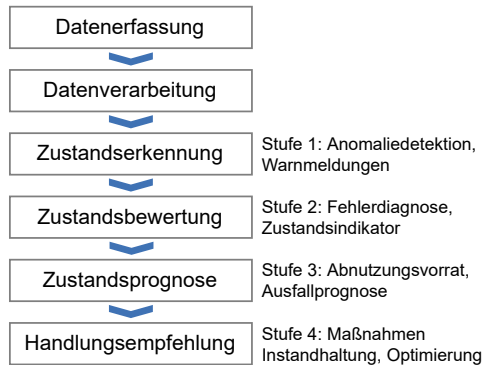


Abbildung 2.9: Aufbau von Zustandsüberwachungssystemen in Anlehnung an [ISO13374-1]

Die ersten drei Schritte beinhalten die grundlegenden Methoden für die Ermittlung des Zustandes einer Komponente und stellen die erste Ausbaustufe dar. Die Datenerfassung im ersten Schritt beschreibt alle Funktionen, die zur Erfassung von Sensorsignalen notwendig sind. Anschließend findet die Datenverarbeitung statt, welche aus verschiedenen Algorithmen zur Signalanalyse besteht. Das Ziel ist aus den Rohdaten charakteristische Merkmale für die Zustandserkennung zu extrahieren, welche die Grundlage für die nachfolgenden Schritte darstellen. Zu wichtigen Verfahren zählen beispielsweise Algorithmen zur Transformation zwischen Zeit- und Frequenzbereich (z. B. Fast-Fourier Transformation, FFT), die Anwendung von Filtern, Normalisierung oder Integration (z. B. Berechnung der Verschiebung durch zweifache

Integration der Beschleunigung). Darauf aufbauend findet bei der Zustandserkennung als erste Stufe eine Auswertung der Merkmale durch Überwachung von Grenzwerten oder statistische Analysen statt. In der zweiten Stufe erfolgt die Zustandsbewertung, bei der aus den verfügbaren Informationen ein Zustandsindikator abgeleitet wird und mögliche Fehlerursachen oder Ausfälle diagnostiziert werden. Die dritte Stufe umfasst Verfahren der Zustandsprognose. Durch den Einsatz von Prognosemodellen und deren Algorithmen werden basierend auf Betriebsbedingungen der Abnutzungsvorrat oder der zukünftige Ausfallzeitpunkt ermittelt. Als letzter Schritt werden in der vierten Stufe Handlungsempfehlungen abgeleitet, um Instandhaltungsmaßnahmen einzuleiten oder den Betrieb beispielsweise durch Anpassung von Prozessparametern zu optimieren. [ISO13374-2]

In der Forschung und Industrie existieren zahlreiche Ansätze, die abhängig vom technologischen Reifegrad der gewählten Methode verschiedene Stufen der Abbildung 2.9 erreichen. Für einen zusammenfassenden Einblick in die Forschungslandschaft wird auf die Literaturübersichten von [Bau20; But22; Wen22] verwiesen. Der Fokus liegt im Folgenden auf den Komponenten, bei denen das Ausfallverhalten unmittelbar mit der Belastung im laufenden Betrieb zusammenhängt. Dazu stellen ergänzend die Forschungsarbeiten von [Kle01], [Wal11], [Huf12], [Hen13], [Mai15] und [Hel18] grundlegende Entwicklungen zur Zustandsüberwachung von KGT dar. In weiterführenden Arbeiten kommen zunehmend datenbasierte Methoden wie das maschinelle Lernen zur Diagnose oder Prognose des Zustands zum Einsatz [Vei20; Sch21b; Ben22]. Während bei den Ansätzen zur Zustandsüberwachung von KGT unterschiedliche Sensorkonzepte zum Einsatz kommen, wird zur Überwachung der Lagerungen einer Hauptspindel überwiegend das Schwingungsverhalten über Beschleunigungssensoren erfasst [Bin13; El-15; Fra22]. Eine Ausnahme stellt die Zustandsüberwachung mittels Temperatursensorik und Modellierung des thermischen Verhaltens der Hauptspindel dar [Bre19b].

Für viele Ansätze der Zustandsüberwachung stellt sich der in Abbildung 2.10 dargestellte charakteristische Verlauf des Zustandsmerkmals während des Lebenszyklus heraus [Sch09; Hen13; Fra22]. Dieser lässt sich in drei Phasen einteilen. Während in der ersten Phase keine signifikante Veränderung des Zustandsmerkmals zu erkennen ist, folgt in der zweiten Phase ein leichter und in der dritten Phase ein drastischer Anstieg des Merkmals [Her13]. Je früher eine signifikante Veränderung des Zustandsmerkmals vor Ausfall eintritt, umso besser ist der Ansatz für eine Zustandsüberwachung geeignet und ermöglicht eine Optimierung der Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten. Im Hinblick auf Betreibermodelle sind Zustandsmerkmale, die über den Lebens-

zyklus einen solchen charakteristischen Verlauf aufweisen, als Indikator zur Abrechnung ungeeignet, da nur die Wirkung und nicht die Ursache der Zustandsveränderung betrachtet wird. Daher ist das Ziel im weiteren Verlauf der Arbeit aus bestehenden Datenquellen einen geeigneten Indikator zu ermitteln, der den Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Belastung und Abnutzung darstellt.

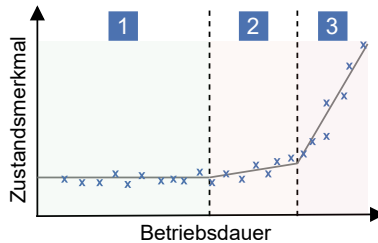


Abbildung 2.10: Charakteristischer Verlauf eines Zustandsmerkmals einer Komponente

Für die Modellierung des Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs zwischen Belastung und Abnutzung ist die Verfügbarkeit von Daten, die als Last- oder Zustandsindikatoren geeignet sind, Voraussetzung. Abbildung 2.11 zeigt zusammenfassend relevante Datenquellen. Heutzutage werden in vielen produzierenden Unternehmen durch die Digitalisierung Softwaresysteme eingesetzt. Dies sind beispielsweise ERP-Systeme (Enterprise Resource Planning) für die Ressourcenplanung auf Unternehmensebene oder Fertigungssteuerungssysteme (engl.: Manufacturing Execution System, MES) zur Unterstützung der Produktionssteuerung. Zu den Aufgaben von MES gehört auch die Erfassung und Bereitstellung aller relevanten Daten aus einem Produktionsbetrieb [VDI5600]. In der Literatur beschreibt der Begriff Betriebsdaten allgemein „die im Laufe eines Produktionsprozesses anfallenden Daten“ [Ros87]. Eine Unterscheidung erfolgt zwischen auftragsbezogenen Betriebsdaten, die grundsätzlich auftragsspezifische Informationen wie beispielsweise Auftragszeiten enthalten und ressourcenbezogenen Betriebsdaten, die einer Ressource wie zum Beispiel einer WZM zugeordnet werden [Win09]. Nach dieser Einteilung sind Maschinendaten Teil der ressourcenbezogenen Betriebsdaten, bei denen zwischen Produkt- und Prozessdaten unterschieden wird [Sch22a].

Im Kontext dieser Arbeit werden unter Betriebsdaten allgemeine Größen verstanden, die während des Betriebs einer Werkzeugmaschine in einem MES

verarbeitet und gespeichert werden. Diese umfassen beispielsweise Betriebsdauer, Laufleistung, Menge produzierter Bauteile, verwendete Werkstoffe oder Maschinenauslastung. Bei stark variierenden Betriebsbedingungen reichen die Daten als Lastindikator für eine aussagekräftige Analyse nicht aus, sodass zusätzliche Informationen aus dem Prozess, wie beispielsweise wirkende Kräfte, Drehzahlen, Vibrationen oder Temperaturen notwendig sind. Diese werden entweder aus der Steuerung ausgelesen oder über externe Sensorik erfasst und im Rahmen der Arbeit als Prozessdaten bezeichnet. Da diese Daten im Vergleich zu Betriebsdaten eine größere Abtastrate aufweisen, erfolgt in der Regel aufgrund der größeren Datenmengen keine umfassende Verarbeitung und Speicherung im MES. Als eine weitere Datenquelle können Belastungskollektive als Lastindikator herangezogen werden, die entsprechend des in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Vorgehens aus den Prozessdaten aggregiert werden.

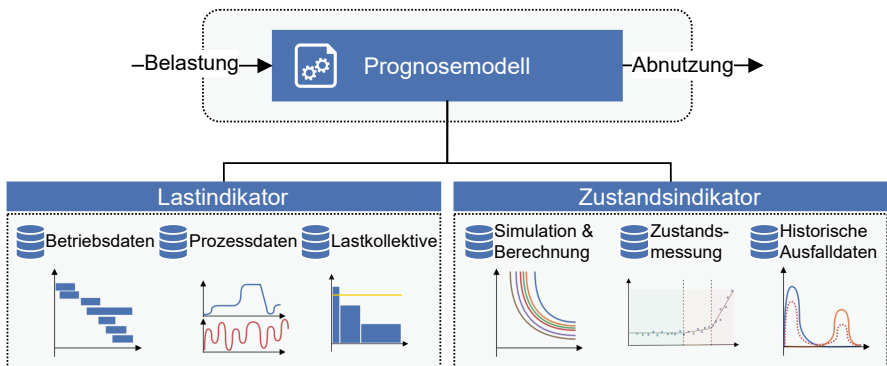


Abbildung 2.11: Datenquellen zur Prognose des Abnutzungsverhaltens

Neben Betriebsdaten sind in modernen Systemen auch Wartungs- und Instandhaltungsdaten integriert, die mit historischen Ausfalldaten verknüpft werden können. Hier ist allerdings bei vorausbestimmten Instandhaltungsstrategien ohne anschließende Bewertung des Zustandes kein zusätzlicher Informationsgewinn zu erwarten. Eine weitere Datenquelle stellen Zustandsüberwachungssysteme dar. Sind diese Optionen nicht verfügbar, kann auf Ansätze und Methoden zur Berechnung und Simulation des Abnutzungsverhaltens zurückgegriffen werden.

In der Praxis stellt die Datenverfügbarkeit in der Werkzeugmaschinenbranche eine zentrale Herausforderung dar. Dies ist zum einen auf den aktuellen Stand

der Digitalisierung und dem Aufwand zur kontinuierlichen Erfassung der Prozessdaten zurückzuführen. Zum anderen resultiert dies aus einer fehlenden Systematik bei der Datenerfassung, sowie dem mangelnden Datenaustausch zwischen Anwendern, Maschinenherstellern und Komponentenlieferanten.

2.4 Belastungen einer WZM im Betrieb

Beim Betrieb einer WZM treten verschiedene Belastungen auf, die einen Einfluss auf den Fertigungsprozess und die Abnutzung haben. Im Rahmen dieses Kapitels werden daher die Grundlagen zur Modellierung des zu betrachtenden Systems eines Zerspanprozesses dargestellt und der Stand der Technik zur Messung der Belastungen an Komponenten einer WZM beschrieben.

2.4.1 Prozessmodellierung

Für eine systemtechnische Betrachtung des Zerspanungsprozesses lassen sich die relevanten Eingangs- und Ausgangsgrößen wie in Abbildung 2.12 veranschaulicht unterscheiden. Eine weitere Unterteilung der Eingangsgrößen erfolgt in System- und Stellgrößen. Während Systemgrößen unveränderliche oder über einen längeren Zeitraum invariante Bedingungen des Prozesses abhängig von Werkzeug, Werkstück, Maschine beschreiben, werden unter Stellgrößen Parameter der Bearbeitungsstrategie zusammengefasst. Dazu gehören beispielsweise Schnittgeschwindigkeit, Vorschub, Eingriffsgrößen oder der Einsatz von Kühlschmierstoff. Bei den Ausgangsgrößen unterscheidet DENKENA zwischen Prozess- und Wirkgrößen. Während Prozessgrößen wie Kräfte, Leistungen, Temperaturen oder Schwingungen nur während des Prozesses messbar sind und deswegen für die Überwachung des Prozesses eingesetzt werden, werden Wirkgrößen beispielsweise in Form von Qualitäts- oder Abnutzungskennwerten nach Ende des Prozesses an Werkstück, Werkzeug oder Maschine ermittelt. [Den11]

Die Systembeschreibung eines Zerspanungsprozesses wird von AUERBACH und KLOCKE um Störgrößen erweitert, die das Prozessergebnis und somit die Ausgangsgrößen beeinflussen. Daneben erfolgt eine Differenzierung der Wirkgrößen nach Wirtschaftlichkeits- und Qualitätskriterien. [Aue15; Klo18]

2.4.2 Prozesskräfte

Die Prozesskräfte ergeben sich aus dem Zusammenspiel zwischen Werkzeug und Werkstück. Sie stellen somit nicht nur eine grundlegende technologische Kenngröße des Bearbeitungsprozesses dar, sondern sind auch ein wesentlicher Bestandteil der Belastung einer WZM im Betrieb. Dementsprechend ist die Modellierung der komplexen Zusammenhänge und Wechselwirkungen in der Zerspanung eine wesentliche Grundlage für Anwender, sowie Maschinen- und Werkzeughersteller zur Auslegung und Optimierung der Bearbeitungs-

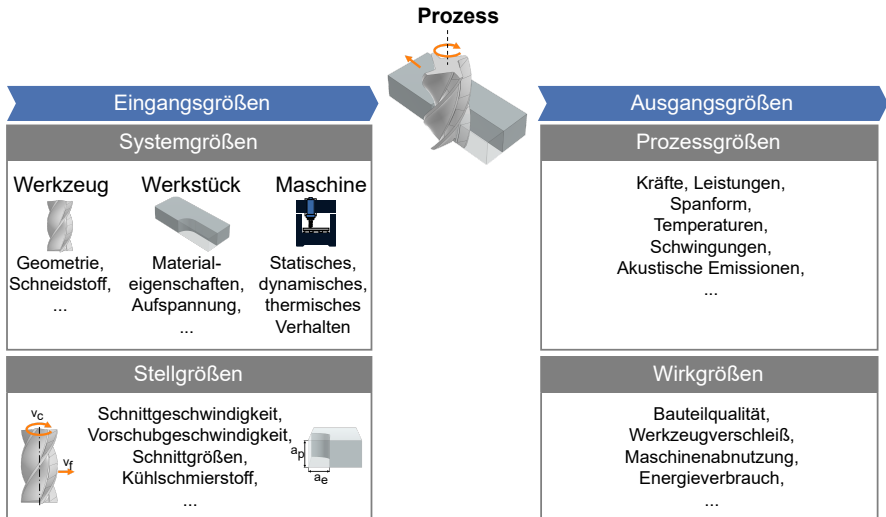


Abbildung 2.12: Das System Zerspanprozess in Anlehnung an [Den11]

prozesse [Arr13]. Im Folgenden wird daher auf die für diese Arbeit relevanten Grundlagen zur Modellierung der Prozesskräfte eingegangen. Eine Unterscheidung der Ansätze in physikalisch basierte und empirische Modelle erfolgt anhand der Modellierungsgrundlage, wobei zusätzlich zwischen analytischen und numerischen Verfahren zur Lösung der Modelle differenziert wird [Cla05; Pap20].

Bei **physikalisch basierten Modellen** erfolgt die Ermittlung der Zerspankräfte basierend auf der Beschreibung physikalischer Zusammenhänge zwischen Prozessparametern, Werkzeuggeometrie und Werkstoffeigenschaften. Für den orthogonalen Schnitt wurde der erste analytische Ansatz basierend auf dem Scherebenenmodell von ERNST und MERCHANT vorgestellt [Ern41]. Die Prozesskräfte werden dabei aus den in der Scherzone entstehenden Spannungen abgeleitet.

Als ein numerisches Lösungsverfahren fungiert die Finite-Elemente-Methode (FEM) als wichtiges Hilfsmittel bei der Simulation mechanischer oder thermischer Größen wie beispielsweise Prozesskräfte, Spangeometrie, Spannungen oder Temperaturen während der Spanbildung [Arr13]. Trotz der technologischen Möglichkeiten dieser Methode wird dieser Ansatz aufgrund der hohen Ressourcenanforderungen im Rahmen der Arbeit nicht weiterverfolgt.

Empirische Modelle beschreiben im Gegensatz zu physikalisch basierten Modellen den Zusammenhang zwischen der Geometrie des Spannungsquerschnitts und den Prozesskräften anhand experimentell ermittelter spezifischer Parameter einer Regressionsfunktion. Sind diese für die zu betrachtenden Eingriffsbedingungen verfügbar, ist der vergleichsweise geringe Berechnungsaufwand ein signifikanter Vorteil zu anderen Ansätzen [Reh09]. Zu bekannten Ansätzen in der Literatur zählen die Schnittkraftmodelle nach *Taylor* [Tay07], *Kienzle* [Kie52], *Koenigsberger* [Koe61] oder *Altintas und Lee* [Alt96]. Dabei wird für das Fräsen in der Literatur das Schnittkraftmodell von *Altintas und Lee* häufig eingesetzt, da es gegenüber alternativen Modellierungsmethoden eine im Verhältnis zum Modellierungsaufwand hohe Genauigkeit bietet [Krü14]. Die an einem Schneidensegment wirkenden differentiellen Prozesskräfte dF_i werden nach [Eng01] durch die Gleichung (2.6) beschrieben und ergeben sich aus einem Schnittkraft- und Reibkraftanteil.

$$\begin{pmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} dF_t \\ dF_r \\ dF_a \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} K_{tc} \cdot h(t) \cdot db + K_{te} \cdot dS \\ K_{rc} \cdot h(t) \cdot db + K_{re} \cdot dS \\ K_{ac} \cdot h(t) \cdot db + K_{ae} \cdot dS \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Der Schnittkraftanteil ist proportional zu den Schnittkraftkoeffizienten K_{ic} und der Spannungsquerschnittsfläche $A = h(t) \cdot db$, während der Reibkraftanteil aus dem Reibkraftkoeffizienten K_{ie} und der sich im Eingriff befindenden Schneidkantenlänge dS des Segments berechnet wird. Die an einem Schneidpunkt wirkenden Prozesskräfte teilen sich, wie in Abbildung 2.13 dargestellt, in eine tangentiale, radiale und axiale Komponente auf. Somit ergeben sich für die Kraftkomponenten insgesamt 6 spezifische Kraftkoeffizienten. Die Ermittlung der resultierenden Prozesskräfte F_x , F_y und F_z bezogen auf das Werkzeugkoordinatensystem erfolgt durch die Integration der differentiellen Anteile der Tangentialkraft dF_t , der Radialkraft dF_r und der Axialkraft dF_a über die sich im Eingriff befindenden Schneidensegmente und die Projektion der resultierenden Zerspankraft mittels Transformationsmatrix \mathbf{T} in die kartesischen Richtungen x , y und z .

2.4.3 Trägheitskräfte

Neben den Prozesskräften stellen Beschleunigungskräfte durch die Antriebe eine relevante Belastung dar. Bei modernen WZM werden Beschleunigungen bis 20 m/s^2 und Geschwindigkeiten bis 120 m/min erreicht [Bre21]. Durch die Beschleunigung der Massen der Komponenten entstehen im System Trägheitskräfte, die zu mechanischen Belastungen im Antriebsstrang führen und

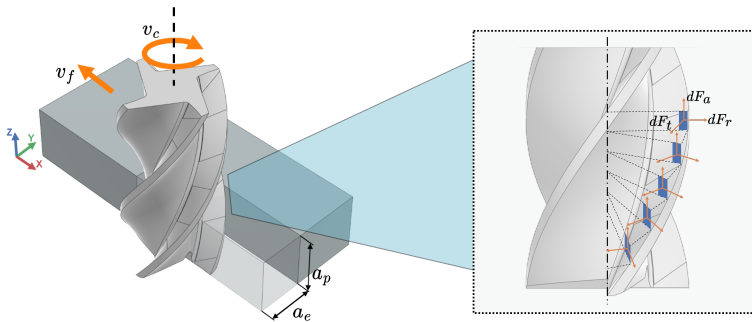


Abbildung 2.13: Diskretisierung von Werkzeugen in Zerspankraftmodellen

somit als Kenngröße in einem belastungsorientierten Bezahlmodell zu berücksichtigen sind. Für die Auslegung der mechanischen Komponenten sind daher die zu beschleunigenden Massen und Trägheitsmomente zu bestimmen, um das dynamische Kräftegleichgewicht aufzustellen und den Einfluss der Beschleunigung auf das Systemverhalten abzuleiten. Die aufgrund von Trägheit auftretenden Belastungen lassen sich dabei über die internen Antriebsdaten der NC ermitteln [Huf12].

2.4.4 Reibung

Eine weitere relevante Belastungsgröße im Betrieb einer WZM stellt die Reibung dar, welche durch Relativbewegungen zwischen in Kontakt stehenden Körpern hervorgerufen wird. Die dabei im tribologischen System resultierende Reibungskraft und -art wird durch die Eigenschaften von Grund- und Gegenkörper, sowie dem eingesetzten Zwischenstoff beeinflusst. Unterschieden wird dabei anhand der Bewegungszustände zwischen Haftreibung, welche überwunden werden muss, um einen ruhenden Körper in Bewegung zu setzen und der Bewegungsreibung, die zur Aufrechterhaltung der Bewegung ausgeglichen werden muss. Weitere Unterscheidungsmerkmale der Reibungsarten sind die Art der Bewegung (Gleit-, Roll- oder Wälzreibung) und der Aggregatzustand der beteiligten Stoffbereiche (Festkörper-, Flüssigkeits- oder Gasreibung). Durch die Kombination verschiedener Reibungsarten können Mischformen auftreten. [Det17]

Abhängig vom Anwendungsfall und den Anforderungen an die Genauigkeit eignen sich verschiedene Modellierungsansätze, um das Reibverhalten zu beschreiben. Abbildung 2.14 zeigt die klassischen bzw. statischen Reibmodelle,

zu denen a) die Coulomb-Reibung, b) eine Kombination aus Coulomb-, Haft- und viskoser Reibung und c) die Stribeck-Kurve zählen [Sch15]. Da in der Realität meist eine Kombination verschiedener Reibungsarten auftritt, ist die Stribeck-Kurve als Darstellungsform bei hydrodynamischen Gleitführungen und -lagern am meisten verbreitet und stellt die Reibungskraft F_R für verschiedene Reibungszustände in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit v dar [Bre19c]. Der in Abbildung 2.14 c) dargestellte Verlauf der Stribeck-Kurve wird nach Überwinden der Haftreibung abhängig von der Geschwindigkeit in Grenzreibung, Mischreibung und Flüssigkeitsreibung eingeteilt.

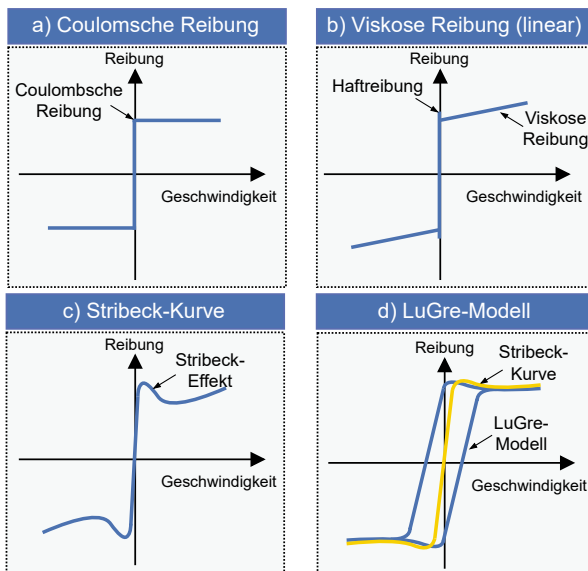


Abbildung 2.14: Übersicht über Reibmodelle aus der Literatur [Sch15; Asl18]

In der Fachliteratur werden verschiedene Ansätze für die Implementierung des durch Reibung entstehenden Antriebsstroms bei Vorschubbewegungen einer WZM beschrieben. Zum einen erfolgt die mathematische Beschreibung anhand von Gleichungen, die durch Messdaten parametrisiert werden [Bre09; Bro12; Rud14]. Zum anderen kann das Reibverhalten mittels einer Lookup-Tabelle [Huf12; Krä13] oder datengetriebenen Modellen implementiert werden.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Reibungsmodellierung der Antriebssysteme von WZM ist die Beschreibung des Übergangsverhaltens zwischen Stillstand und Bewegung [Kae05]. Da bei der statischen Reibungsmodellierung Probleme durch die Unstetigkeit und Haftreibung auftreten, sowie weitere auftretende physikalische Phänomene nicht abgebildet werden können, werden zunehmend dynamische Modelle wie das LuGre-Modell verwendet [Krä13; Alt17; Pia19]. Das LuGre-Modell (LUND und GRENOBLE), vorgestellt in [Can95], entspricht einer näheren Abbildung der tatsächlich wirkenden physikalischen Effekte und basiert auf der Vorstellung, dass das Verhalten der Reibung in Form sich verbiegender Borsten beschrieben werden kann. Durch den Modellierungsansatz weist der Verlauf der Reibkurve, wie in Abbildung 2.14 d) LuGre-Modell dargestellt, eine Hysterese auf.

2.4.5 Messung von Prozesskräften und Komponentenbelastungen

Für eine zuverlässige Überwachung einer WZM im Betrieb ist die kontinuierliche Erfassung der Belastungen unter realen Bedingungen Voraussetzung. Hierzu existieren in der Literatur und Praxis verschiedene Ansätze, die eine direkte oder indirekte Messung von Prozesskräften oder Belastungen an Komponenten ermöglichen. Für eine direkte Messung der Belastung eignen sich Kraftsensoren wie piezoelektrische Kraftaufnehmer oder Dehnungsmessstreifen (DMS), welche im Kraftfluss der Maschine möglichst nah am Wirkungsort der zu überwachenden Belastung integriert werden.

Ein etabliertes Messsystem ist das piezoelektrische Mehrkomponenten-Dynamometer, auf dem je nach Ausführung das Werkstück oder das Werkzeug montiert wird, um die wirkenden Prozesskräfte direkt zu messen [Smi08]. Aufgrund der hohen Kosten und des negativen Einflusses auf die Maschineneigenschaften, insbesondere auf die Steifigkeit des Systems, kommt das Dynamometer hauptsächlich unter Laborbedingungen, jedoch nicht im produktiven Betrieb zum Einsatz.

Aus diesem Grund werden alternative Ansätze entwickelt, um die Prozesskräfte durch in der Motorspindel integrierte Sensorik zu erfassen [Abe10]. Eine dieser Methoden stellt die Messung der relativen Verlagerung zwischen rotierender Spindelwelle und Spindelgehäuse infolge der am Werkzeug wirkenden Prozesskräfte dar. In [Alb05] konnten durch die Integration kapazitiver Abstandssensorik aus den Verlagerungen der Spindel die Prozesskräfte indirekt erfasst werden, wobei neben den Prozesskräften auch Unwucht, Rundheitsfehler oder Ausdehnung aufgrund von Temperaturschwankungen die gemessene

Verlagerung beeinflussten. Basierend auf diesem Ansatz wurden in [Bre19a] fünf Wirbelstromsensoren in radialer und axialer Richtung angeordnet, um die Verlagerung und Verkippung der fünf gesperrten Freiheitsgrade der Spindelwelle zu erfassen. Vorteilhaft ist der berührungslose Einsatz, sodass im Vergleich zum Dynamometer die Maschineneigenschaften nicht negativ beeinflusst werden.

Als industrietaugliches Kraftmesssystem wird in [Bou22] die Messung der Prozesskräfte über vier am vorderen Lager der Spindel integrierte DMS vorgeschlagen. Durch eine entsprechende Kombination der Messwerte der vier Sensoren und eine Kalibrierung des Systems können die drei Komponenten der Prozesskraft mit einer hohen Empfindlichkeit bestimmt werden. Ein Ansatz, der ebenfalls auf der Integration von DMS basiert und die Belastung am Werkzeug erfasst, wird vom Sensorhersteller PRO-MICRON unter dem Namen SPIKE angeboten [Wun18]. Dieses Messsystem ist als fest in der Spindel integrierte oder als mobile, im Werkzeughalter integrierte Variante verfügbar. Eine Übersicht der aktuellen Entwicklungen aus Industrie und Forschung zur Integration von Sensorik in das Werkzeugsystem einer WZM wird in [Ble23] gegeben.

Neben Sensorik zur Erfassung der Prozesskräfte sind in vielen modernen WZM Schwingungsdiagnose-Systeme verbaut, die mittels Beschleunigungssensorik an der Spindel das Schwingungsverhalten im Betrieb kontinuierlich überwachen. Diese werden eingesetzt, um durch eine Auswertung der Effektiv- und Maximalwerte der Schwinggeschwindigkeit und -beschleunigung zu starke Vibrationen im Bearbeitungsprozess oder Kollisionen zu erfassen [Bin13]. Bei Überschreiten festgelegter Grenzwerte wird die Maschine zum Schutz abgeschaltet. Basierend auf integrierter Beschleunigungssensorik kann durch Kombination mit einem dynamischen Modell der Spindel der Zusammenhang zwischen Prozesskräften und gemessenen Schwingungen ausgenutzt werden, um die Prozesskräfte zu bestimmen [Pos19]. In [Mos21] wird zusätzlich über eine Sensordatenfusion der Antriebsstrom der Motorspindel bei der Modellierung der Prozesskräfte berücksichtigt.

Darüber hinaus existieren Entwicklungen, die darauf abzielen, Belastungen auf der Ebene einzelner Komponenten zu erfassen. Ein Beispiel dafür ist ein Sensorkonzept, das auf dem Zusammenhang zwischen der radialen Lagerbelastung und der gemessenen elektrischen Impedanz eines Wälzlagers beruht [Sch18b].

Eine zentrale Problematik der vorgestellten Ansätze besteht darin, dass diese zur Erfassung der Belastungen die Integration zusätzlicher Sensorik er-

fordern, einen negativen Einfluss auf die Eigenschaften der Maschine haben oder aufgrund verschiedener Faktoren nicht für den dauerhaften Einsatz im produktiven Betrieb geeignet sind. Zudem sind am Markt verfügbare Messsysteme bedingt durch hohe Anschaffungskosten nur in bestimmten Anwendungsfällen wirtschaftlich einsetzbar. Um diese Problematik zu lösen, existieren alternative Ansätze, die sich auf verfügbare Informationen aus der NC und den Antrieben beschränken. Durch Modellierung des Antriebssystems der Vorschubachsen können aus den in der Lage- und Antriebsregelung verfügbaren Informationen die Prozesskräfte abgeleitet und für eine Prozessüberwachung genutzt werden [Alt92; Kim96; Kae05]. Da durch den Antrieb neben den Prozesskräften auch Einflüsse aufgrund der Trägheit oder Reibung der mechanischen Komponenten überwunden werden, sind diese zu kompensieren. Darüber hinaus wird in [Asl18] ein Ansatz vorgestellt, bei welchem mit Hilfe einer dynamischen Kompensation der Antriebsströme Einflüsse des strukturdynamischen Übertragungsverhaltens reduziert werden und der sich ebenso für die Erfassung der Prozesskräfte bei fünffachsignen Bearbeitungsoperationen eignet. Wird bei einer Vorschubachse die Position über zwei Encoder beispielsweise direkt über einen Linearmaßstab und indirekt über einen Drehgeber erfasst, können mit der Differenz der Encoder-Signale und der Steifigkeit des Antriebsstrangs die Prozesskräfte abgeschätzt werden [Xi21]. Diese Ansätze können über Schnittstellen moderner WZM und Edge-Geräte in einem industriellen Umfeld implementiert und zur Prozessüberwachung eingesetzt werden [Sch21c].

Anstatt der physikalischen Modellierung des Antriebssystems und der Kompensation der Störeinflüsse existieren alternative Ansätze, um den Zusammenhang zwischen Antriebsdaten und Prozesskräften abzubilden. In einem hybriden Ansatz erfolgt die prozessparallele Abschätzung der Prozesskräfte mit Hilfe eines künstlichen neuronalen Netzwerkes (engl. Artificial Neural Network, ANN) basierend auf erfassten NC-Signalen in Kombination mit einer echtzeitfähigen Prozesssimulation [Kön17]. Ziel ist dabei zusätzlich zu den NC-Signalen, bestehend aus Encoderpositionen, Spindeldrehzahl und Spindelstrom, durch die Prozesssimulation die realen Eingriffsbedingungen des Bearbeitungsprozesses abzubilden. Für eine übertragbare Anwendung ist für das Training ein Datensatz notwendig, der mögliche Einflussfaktoren abbildet. Auch für Vorschubachsen mit einem Linearmotor existieren Ansätze, wirkende Prozesskräfte mit Hilfe eines Long Short-Term Memory Neural Network (LSTM) zu rekonstruieren [Den20].

2.5 Betreibermodelle im Maschinenbau

Die Entwicklung von produkt- zu dienstleistungsorientierten Geschäftsmodellen in der verarbeitenden Industrie ist integraler Bestandteil des strategischen Wandels der Hersteller. Im Folgenden wird der aktuelle Stand hinsichtlich flexibler Betreibermodelle wie Equipment-as-a-Service (EaaS) oder Pay-per-X-Modellen im Maschinenbau und deren Bedeutung bei der Investition in WZM erläutert.

2.5.1 Finanzierung und Leasing

Aufgrund der hohen Investitionskosten bestehen verschiedene Ansätze zur Finanzierung von WZM. Neben dem kreditfinanzierten Kauf ist Leasing eine bedeutende Methode zur Finanzierung von WZM, welche aufgrund der verschiedenen Möglichkeiten zur Ausgestaltung nicht einheitlich definiert ist [Bei12]. Allgemein wird unter dem Begriff Leasing eine „[...] zeitlich begrenzte Nutzungsüberlassung von Wirtschaftsgütern gegen Entgelt [...]“ verstanden [Bei12]. Im Gegensatz zur Miete ist der Leasingnehmer grundsätzlich während der Vertragslaufzeit auch für die Wartung und Instandhaltung des Leasingobjekts verantwortlich [Heß21]. Diese Leistungen können aber im Rahmen eines Full-Service-Leasings abgedeckt werden, bei dem je nach Vertrag die Übernahme der im Betrieb anfallenden Aufwände für Wartung, Instandhaltung oder Versicherungen als komplementäre Dienstleistung zum Leasingobjekt angeboten wird [Bei12; Heß21].

Die Beziehung zwischen den beteiligten Parteien Hersteller, Leasingnehmer und Leasinggeber wird durch das Leasing-Dreieck beschrieben (siehe Abbildung 2.15). Der Hersteller produziert und liefert das vom Leasinggeber bestellte Produkt, welches mit dem Leasingnehmer vereinbart wurde. Dafür wird der Hersteller vom Leasinggeber über dem im Kaufvertrag festgelegten Kaufpreis vergütet. Oftmals nimmt der Hersteller gleichzeitig auch die Rolle des Leasinggebers ein. Der Leasinggeber überlässt als Eigentümer dem Leasingnehmer das Leasingobjekt im Rahmen eines Leasingvertrages zur Nutzung für eine festgelegte monatliche Leasingrate. Nach Ablauf der Leasingdauer erfolgt die Rückgabe an den Leasinggeber. Dadurch entsteht ein Interessenskonflikt zwischen dem Leasingnehmer, der durch eine maximale Auslastung des Leasingobjektes eine Maximierung des eigenen Gewinns anstrebt, und dem Leasinggeber, der Ertrag durch einen möglichst hohen Restwert erzielt [Bos21]. Entsprechend divergierende Ziele zwischen den Vertragsparteien

und asymmetrisch vorliegende Informationen sind Untersuchungsgegenstand der Prinzipal-Agent-Theorie [Sta20].

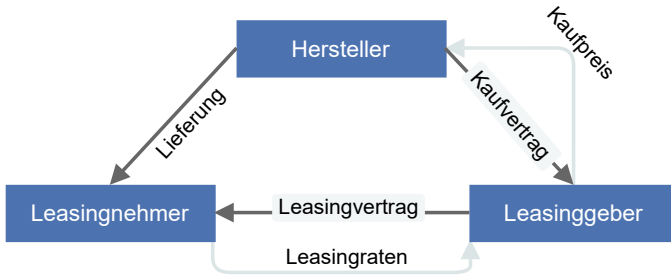


Abbildung 2.15: Leasing-Dreieck nach [Heß21]

2.5.2 Equipment-as-a-Service

Als Alternative zu konventionellen Finanzierungsformen haben sich in vielen Branchen neue Betreiber- und Geschäftsmodelle mit verschiedenen Ausprägungen etabliert [Lay03]. In der Praxis und Literatur werden diese unter anderem den Begriffen Equipment-as-a-Service (EaaS), Subskriptionsmodell (engl. Subscription Model), leistungs-basierte Verträge (engl. Performance-Based Contracts) oder Pay-per-X-Modell zugeordnet. Inhaltlich können sich die Ansätze aufgrund ihrer Ausprägung unterscheiden, werden aber oft als Synonym verwendet, da es in der Literatur keine einheitliche Definition gibt [Sta23]. Übergreifend beschreiben die Begriffe Geschäftsmodelle, bei denen Unternehmen anstelle des Besitzes eines Produktes dessen Nutzung als Dienstleistung anbieten. Das Ziel in dem Kontext ist nicht primär neue Formen zur Finanzierung des Leasingobjektes zu schaffen, sondern die zunehmend relevanter werdenden komplementären Services und Leistungen zu ermöglichen, um die ökonomischen Grundprinzipien Kostenminimierung, Risikominimierung und Gewinnoptimierung zu adressieren [See21].

Das bedeutet für den Betreiber einer WZM, dass er ohne Eigentumsübergang ausschließlich für die Nutzung zahlt und somit keine hohen Investitionen tätigen muss. Kennzeichnend im Gegensatz zu konventionellen Finanzierungsformen und bindenden Langzeitverträgen ist eine höhere Flexibilität für den Kunden [Del21]. Ein weiteres Merkmal ist eine variable Kostenstruktur, bei der abhängig von der Ausgestaltung des Geschäftsmodells für die Verfügbar-

keit, die Nutzung oder das produzierte Ergebnis basierend auf leistungsbezogenen Preismetriken gezahlt wird [Sch21d]. Besonders in volatilen Märkten mit schwankenden Aufträgen bietet die Flexibilität der Bezahlmodelle Vorteile gegenüber festen Raten [Sar21].

Vorteile ergeben sich nicht nur auf der Kundenseite, sondern auch auf der Anbieterseite. Diese steht zunehmend vor der Herausforderung, angesichts geringerer werdender Gewinnspannen beim Neugeschäft durch steigenden Wettbewerbsdruck neue Einkommensströme zu generieren [Del21]. Schon heute stellen die angebotenen Dienstleistungen nach dem Kauf eine der wichtigsten Einnahmequellen dar [Cus15]. Hier kann durch Transformationen zu innovativen Betreibermodellen eine enge und langfristige Kundenbindung aufgebaut werden, mit dem Potenzial einen kontinuierlich stabilen Umsatz bei geringerem Risiko zu generieren [Sch21d].

2.5.3 Systematische Klassifizierung von Anwendungsbeispielen im Maschinenbau

Die Berechnungsvorschrift und die Bezugsgröße des Bezahlmodells sind entscheidend für die Risiken, Verantwortungen und Kosten. Durch eine innovative Ausgestaltung können verschiedene Anreize gesetzt werden, was es dem Anbieter ermöglicht zusätzliche Leistungsversprechen zu geben. Eine systematische Klassifizierung verschiedener Ansätze im Hinblick auf die Ausgestaltung und das Leistungsversprechen erfolgt in Verfügbarkeits-, nutzungs-, ergebnis- und erfolgsorientierte Bezahlmodelle (Abbildung 2.16). [Rot14]

Mit **verfügbarkeitsorientierten Bezahlmodellen** wird unabhängig von der tatsächlichen Nutzung eine Leistungsgarantie vereinbart, die mit Hilfe von Verfügbarkeitskenngrößen festgelegt wird. Da der Anbieter keine zusätzlichen Gewinne durch Wartung oder Reparaturen erwirtschaftet, ist es in seinem Interesse, die Anlage möglichst ausfallsicher und langlebig zu gestalten [Hyp10]. Ein Beispiel dafür ist der Service Fleet Management des Bohrmaschinenherstellers HILTI, welcher gegen eine fixe monatliche Gebühr die Verfügbarkeit einer funktionsfähigen Maschine gewährleistet [Pau11].

Bei **nutzungsorientierten Bezahlmodellen** wie Pay-per-Use wird lediglich die vom Kunden in Anspruch genommene Leistung abhängig von der Nutzungsintensität bezahlt. Die Bezugsgröße ist dabei variabel und wird durch das Nutzungsverhalten vom Kunden beeinflusst. Eines der bekanntesten Beispiele aus dem Maschinenbau ist das Power-by-the-Hour Modell von ROLLS-

ROYCE, bei dem die Turbinen eines Flugzeugs nicht verkauft, sondern nach der Nutzungsdauer abgerechnet werden [Lii16].

Im Vergleich dazu wird bei **ergebnisorientierten Bezahlmodellen** nicht nach Nutzung, sondern nach dem Ergebnis durch Nutzung wie beispielsweise der Anzahl gefertigter Produkte bezahlt. Als Hersteller von WZM zur Blechbearbeitung bietet TRUMPF mit pay-per-part ein Bezahlmodell an und ermöglicht so dem Kunden die Zahlung einer Gebühr pro produziertem Teil [Tru23]. Dies ist ein Anreiz für den Hersteller, durch aktive Unterstützung möglichst effiziente Prozesse mit hoher Qualität zu gestalten. Auch der Hersteller HEIDELBERGER DRUCKMASCHINEN AG bietet mit pay-per-outcome ein Bezahlmodell, bei dem neben einer festen monatlichen Grundgebühr zusätzlich pro gedrucktem Bogen abgerechnet wird [Hei21].

Einen größeren Teil des Risikos übernimmt der Anbieter bei **erfolgsorientierten Bezahlmodellen**, da nach ökonomischen Kenngrößen wie Kosten oder Anzahl verkaufter Produkte abgerechnet wird. Das heißt konkret, dass die Bezahlung beispielsweise wie im Programm cost-per-part von KENNAMETAL anteilig an den durch die in Anspruch genommene Dienstleistung eingesparten Kosten pro Bauteil erfolgt [Ken23].


| Bezahlmodell | Beispiel | Bezugsgröße | Leistungsversprechen |
|--------------------------|----------------------|---|---|
| Verfügbarkeitsorientiert | Pay-for-Availability | Verfügbarkeitsgrößen |  Risikotübernahme |
| Nutzungsorientiert | Pay-per-Use | Nutzungsintensität (Häufigkeit, Betriebsstunden) | |
| Ergebnisorientiert | Pay-per-Part | Output (Menge produzierter Teile) | |
| Erfolgsorientiert | Pay-per-Sold-Product | Ökonomische Größen (Kosten, Gewinn) | |

Abbildung 2.16: Systematische Einteilung von Bezahlmodellen im Maschinenbau in Anlehnung an [Rot14]

Auch bei Herstellern von WZM für die spanende Bearbeitung hat in den letzten Jahren durch die voranschreitende Digitalisierung eine Entwicklung hin zu neuen Geschäftsmodellen stattgefunden. Neben der WZM als physisches Produkt werden zunehmend digitale Services mit zusätzlichem Wertversprechen angeboten. Beispiele dafür sind GROB-NET4Industry [GRO23] von GROB oder CELOS Machine & Manufacturing [DMG23a] von DMG MORI.

Darüber hinaus haben einige Hersteller wie EMAG oder WFL nutzungsorientierte Bezahlmodelle angekündigt [Bie18; WFL19]. DMG MORI hingegen bietet seit 2021 mit PAYZR (pay-with-zero-risks) ein innovatives Geschäftsmodell an, welches zusätzliche Leistungsversprechen wie Maschinenversicherung oder Ertragsausfallversicherung beinhaltet [DMG23b]. Die Abrechnung erfolgt auf Basis einer monatlichen Grundgebühr in Kombination mit einer Nutzungsgebühr pro Betriebsstunde der Spindel. Mit HELLER4Use bietet HELLER als weiterer Hersteller ein Bezahlmodell mit einer nutzungsabhängigen Rate in verschiedenen Stufen an [HEL17]. Auch ARTERY Pay-per-Use des Maschinenherstellers WEISSER ermöglicht eine flexible Abrechnung der tatsächlichen Nutzung der Maschine [WEI21].

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Zielsetzung

Basierend auf dem Stand der Technik und der Wissenschaft wird im folgenden Kapitel der Handlungsbedarf hinsichtlich der Entwicklung belastungsorientierter Kenngrößen als Grundlage neuer Bezahlmodelle für Werkzeugmaschinen abgeleitet und die Zielsetzung formuliert. Im Hinblick auf das Bezahlmodell sind in Literatur und Praxis Pay-per-X-Modelle bereits bekannt. Bei diesen besteht allerdings ein Interessenskonflikt zwischen dem Nutzer, der aufgrund der eigenen Gewinnmaximierung einen hohen Nutzen bei geringer Bezahlung anstrebt und den Interessen des Anbieters. Die in bisherigen Pay-per-X-Modellen für WZM berücksichtigten Kenngrößen lösen aufgrund fehlender Transparenz über das Nutzungsverhalten die gegensätzlichen Interessen der Vertragsparteien nur unzureichend auf oder limitieren die Flexibilität bei der Nutzung der WZM. Die Einführung belastungsorientierter Kenngrößen schafft zusätzliche Transparenz über die tatsächliche Nutzung einer WZM und ermöglicht die Auflösung des Interessenskonfliktes beider Vertragsparteien. Für die Verwendung der prozessbedingten Belastung als Bemessungskenngröße bei Betreibermodellen ist das notwendige Wissen bisher nicht verfügbar, woraus sich die folgende Arbeitshypothese dieser Arbeit ergibt:

Die Auswertung prozessbedingter Belastungen in zerspanenden Fertigungsprozessen mittels Antriebsdaten aus einer Numerischen Steuerung (NC) ermöglicht die Umsetzung eines belastungsorientierten Bezahlmodells.

Das Gesamtkonzept Pay-per-Stress ist in Abbildung 3.1 dargestellt und beschreibt die Interaktion zwischen den beteiligten Parteien. Der Anbieter des Bezahlmodells, in diesem Fall der Leasinggeber, finanziert die WZM und überlässt sie dem Anwender in Form einer Dienstleistung zur Nutzung. Dabei erfolgt die Abrechnung basierend auf im Vorfeld vertraglich festgehaltenen Belastungskenngrößen. Prämisse für eine wirtschaftliche Realisierung ist die Hypothese, dass der Wertverlust über den Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Belastung und Abnutzung durch die ermittelten Belastungskenngrößen mit einer ausreichenden Genauigkeit abgebildet werden kann.

Eine weitere Voraussetzung ist eine sichere und vertrauenswürdige Infrastruktur zur Übertragung und Verarbeitung der Daten, die zum einen den Schutz von Betriebsgeheimnissen des Anwenders und zum anderen eine manipulationsichere Verarbeitung der Belastungskenngrößen ermöglicht. Basierend auf einer solchen Infrastruktur kann der Hersteller komplementäre datenbasierte Services zur Prozessoptimierung oder prädiktiven Instandhaltung anbieten oder auch die Informationen über die Nutzung der Kunden für eine Optimierung der eigenen Produkte einsetzen. Da der Aufbau einer vertrauenswürdigen Infrastruktur nicht Inhalt dieser Arbeit ist, wird an dieser Stelle auf die Ergebnisse des Forschungsprojektes KOSMoS verwiesen [Bux22]. Darüber hinaus ist das Ziel der Gaia-X Initiative die Grundlagen für ein dezentrales und sicheres Daten-Service-Ökosystem in Europa zu schaffen [Bon21].

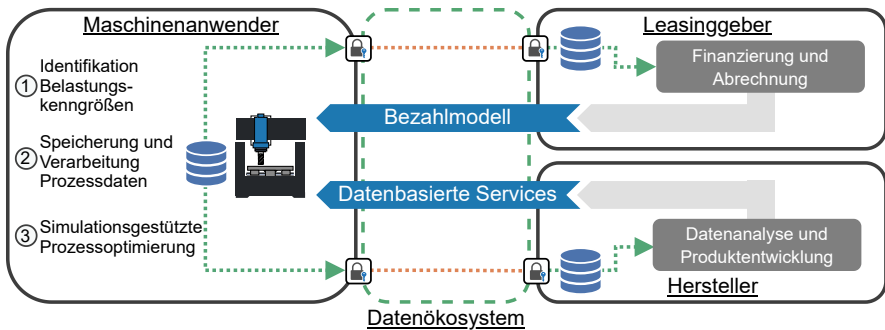


Abbildung 3.1: Das Konzept Pay-per-Stress in Anlehnung an [Bos21]

Als Zielsetzung für die Arbeit leitet sich daraus die Entwicklung und prototypische Umsetzung eines Bezahlmodells für Werkzeugmaschinen ab, bei dem die prozessbedingte Belastung aus Antriebsdaten als Indikator zur Abrechnung dient. Dabei werden die Grundlagen für die Umsetzung des Gesamtkonzeptes untersucht, wobei die Erfassung und Verarbeitung der Prozessdaten, das Ableiten und Bewerten der relevanten Belastungskenngrößen und die simulationsgestützte Prozessoptimierung als wesentliche Teilziele betrachtet werden. Daraus ergeben sich die folgenden Hauptanforderungen, die im Rahmen dieser Arbeit adressiert werden:

- 1) Identifikation relevanter Belastungskenngrößen aus den Antriebsdaten einer WZM, die als Abrechnungsindikator eines Betreibermodells für die praktische Implementierung im Betrieb geeignet sind.

- 2) Entwicklung eines simulationsgestützten Prognosemodells für Belastungskenngrößen, um eine a priori Analyse der Kosten im Rahmen der Prozessplanung zu ermöglichen.
- 3) Einfache Integration in die informationstechnische Infrastruktur im Produktionsumfeld durch Nutzung vorhandener Informationsquellen der NC einer WZM.

Durch die Flexibilität der Vertragsgestaltung ergibt sich eine Vielzahl an Möglichkeiten bei der Ausgestaltung des Betreibermodells. Da der Fokus auf der prototypischen Umsetzung liegt, ist eine umfangreiche Berechnung der Lebenszykluskosten sowie die Aufstellung eines Kostenrechnungssystems nicht Inhalt dieser Arbeit. Für eine ausführliche Ausführung der Kostenrechnung wird an dieser Stelle auf [Sta23] verwiesen.

Vorgehensweise

Um die Zielsetzung zu erreichen, werden das weitere Vorgehen und der Aufbau dieser Arbeit gemäß der in Abbildung 3.2 dargestellten Teilschritte Konzeptentwicklung, Modell & Prototyp und Evaluation gegliedert. Diese folgen den Phasen Entwurf, Implementierung und Validierung.

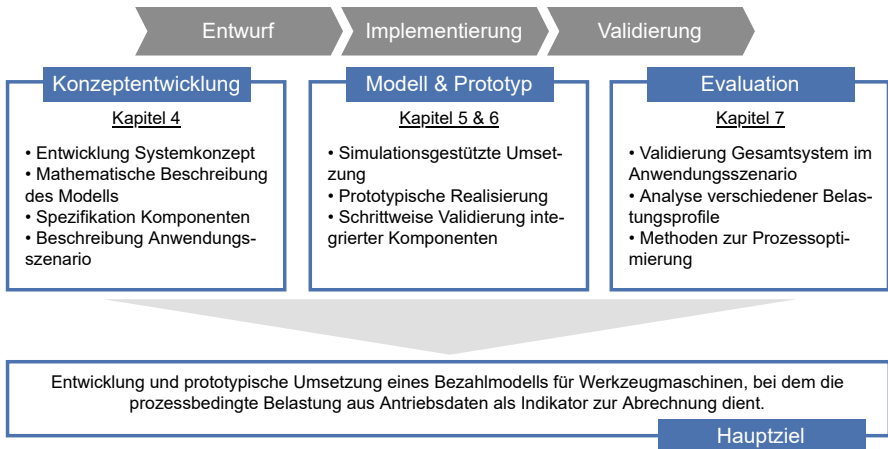


Abbildung 3.2: Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Im ersten Schritt erfolgt der Entwurf des Gesamtkonzepts, welcher die Entwicklung des Gesamtkonzepts basierend auf den Anforderungen der Zielsetzung und der Beschreibung der Rahmenbedingungen des Anwendungssze-

narios beinhaltet. Dabei wird nach dem Top-down-Prinzip vorgegangen, bei dem ausgehend vom ganzheitlichen Systemkonzept eine Differenzierung der Komponenten vorgenommen wird, bis eine schrittweise Detaillierung dieser Komponenten erreicht wird.

Der zweite Schritt gliedert sich in zwei Teilbereiche. Zunächst wird eine modellbasierte Umsetzung des Ansatzes durch die Auswahl geeigneter Methoden durchgeführt. Dieser Teilbereich ermöglicht einerseits die theoretische Verifizierung des Ansatzes in einer Simulationsumgebung und schafft andererseits Grundlagen, die es ermöglichen, die zu erwartenden Belastungskenngrößen bereits in der Prozessauslegung abzuschätzen. Im nächsten Teilbereich wird die praktische Implementierung eines Prototypen im Produktionsumfeld vorgenommen. Für beide Teilbereiche erfolgt eine Verifizierung der einzelnen Komponenten nach dem Bottom-up-Prinzip mit der Implementierung und Integration.

Im letzten Schritt erfolgt die Validierung und Evaluation des Gesamtsystems im Anwendungsszenario.

4 Konzeptentwicklung eines belastungsorientierten Bezahlmodells

Im folgenden Kapitel wird das Konzept des belastungsorientierten Bezahlmodells vorgestellt. Dabei wird zunächst ausgehend von der Vorgehensweise und der Zielsetzung ein Lösungsansatz für das Gesamtsystem abgeleitet. Anschließend erfolgt schrittweise die Konzeption der Komponenten, sowie die Beschreibung des Entwicklungsrahmens und Anwendungsszenarios.

4.1 Technologische Anforderungen an das System

Die Zusammenhänge des technologischen Lösungsansatzes sind in Abbildung 4.1 veranschaulicht. Die bei der Maschinennutzung variierenden Eingangsgrößen setzen sich aus den Aspekten Werkstück, Werkzeug und NC-Programm zusammen und sind Grundlage für die systemtechnische Betrachtung des Zerspanungsprozesses und des Verhaltens der WZM. Bei technologischen Untersuchungen, die die Wechselwirkung zwischen Werkzeug und Werkstück analysieren, wird das Maschinenverhalten auf das Wesentliche reduziert und nur vereinfacht abgebildet. Um die Analyse maschinenunabhängig zu gestalten, wird für Simulationen eine standardisierte Einheitsmaschine eingesetzt. Diese ermöglicht eine Generierung des Bewegungsprofils, sodass Schnittparameter wie Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit erreicht werden. Auf diese Weise können die prozessspezifischen Schnittkräfte ermittelt werden, die aus der Wechselwirkung zwischen Werkzeug und Werkstück resultieren und einen maschinenunabhängigen Teil der Belastung darstellen. Weitere Einflüsse wie beispielsweise das Beschleunigungsverhalten können im Vergleich zur realen Maschine abweichen.

Da die Eingangsgrößen einen unterschiedlichen Einfluss auf das Verhalten der WZM haben, sind die Wechselwirkungen zwischen dem Zerspanprozess, der Maschinenstruktur und der Steuerungs-, Regelungs- und Antriebstechnik zu berücksichtigen, um die maschinenspezifische Belastung zu bestimmen. Im nächsten Schritt werden daraus die Belastungsreaktionen auf Komponentenebene abgeleitet. Die Unterscheidung zwischen Prozess und Maschine ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der Belastungen und stellt eine we-

sentliche Grundlage dar, um die Auswirkungen des prozessspezifischen Lastkollektivs auf die Belastung verschiedener Maschinen vergleichen zu können.

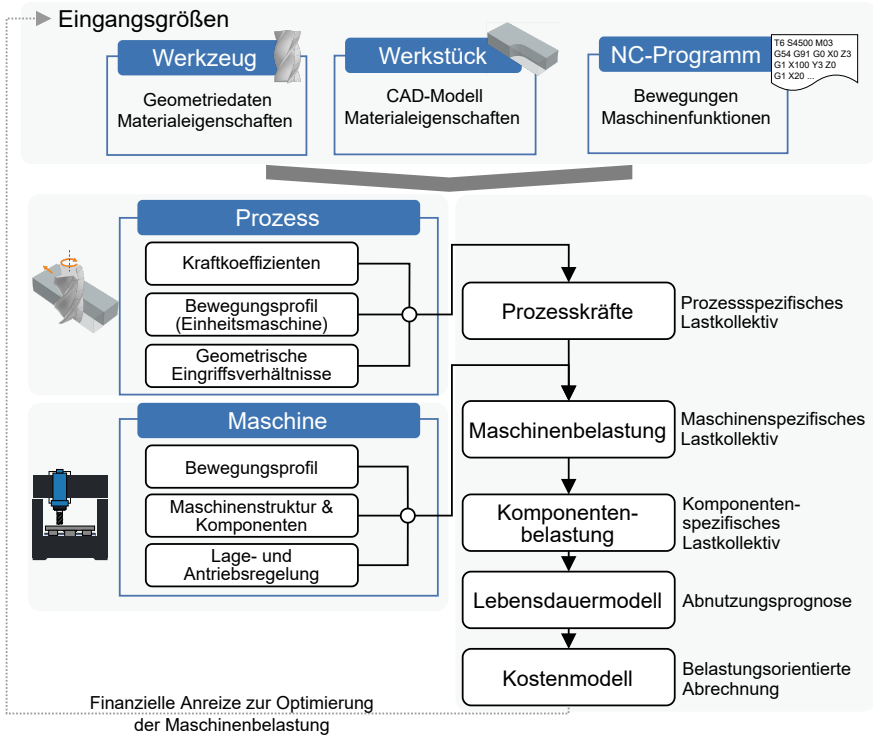


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des technologischen Lösungsansatzes

Die Lebensdauermodellierung im nächsten Schritt stellt einen Zusammenhang zwischen dem komponentenspezifischen Lastkollektiv und der Abnutzung der jeweiligen Komponente her und ist ein wesentlicher Zwischenschritt für die Aufstellung eines Kostenmodells. Voraussetzung zur Ermittlung zuverlässiger Abnutzungsindikatoren ist die Erfassung der relevanten Belastungskenngrößen. Mit der Ermittlung des Abnutzungsindikators wird die relative Abnutzung über einen definierten Zeitraum prognostiziert. Im Kostenmodell werden den relevanten Komponenten die dazugehörigen Kosten zugeordnet, die basierend auf der relativen Abnutzung über einen definierten Zeitraum eine belastungsorientierte Abrechnung ermöglichen. Durch den skizzierten Lösungs-

ansatz erfolgt eine Zuordnung von Kosten zu den aus den Eingangsgrößen entstehenden Belastungen. Somit werden finanzielle Anreize zur Optimierung der Maschinenbelastung geschaffen.

Ausgehend vom technologischen Lösungsansatz erfolgt eine Aufteilung der notwendigen Teilschritte und eine Einordnung in das Gesamtsystem. Im Mittelpunkt der Abbildung 4.2 steht die maschinenspezifische Belastungs-Zeit-Funktion als zentrale Eingangsgröße für die nachfolgenden Teilschritte des belastungsorientierten Bezahlmodells.

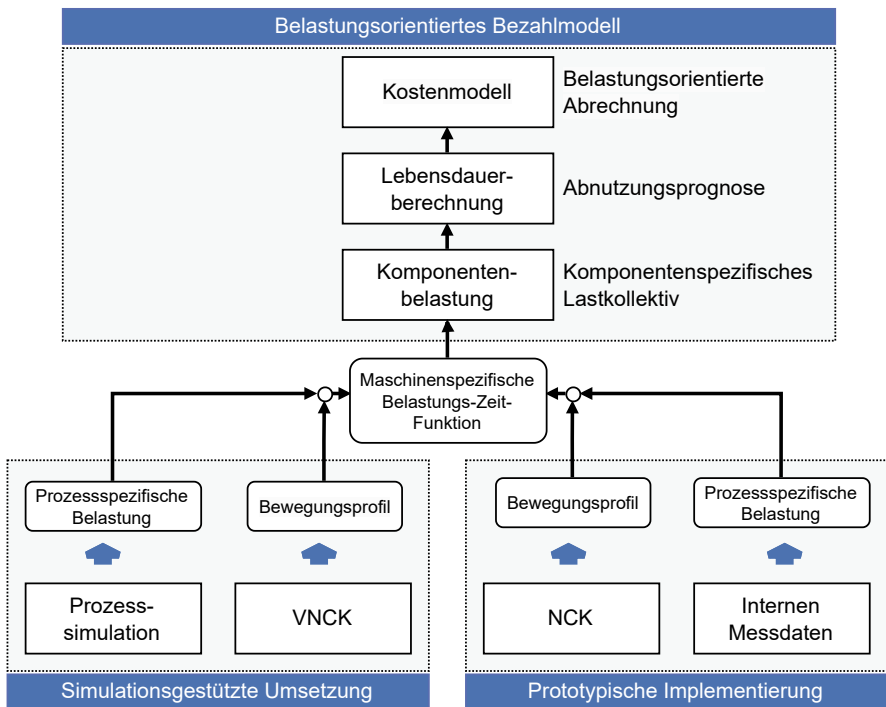


Abbildung 4.2: Schematische Struktur des Gesamtsystems

Eine einheitliche Beschreibung der maschinenspezifischen Belastungs-Zeit-Funktion leitet sich aus den Anforderungen der vorherigen Teilschritte zur Berechnung der Komponentenbelastung ab und kann entweder über die simulationsgestützte Umsetzung abgeschätzt werden oder direkt durch eine prototypische Umsetzung an der realen Maschine erfasst werden. Die simu-

lationsgestützte Umsetzung ermöglicht dabei durch die Prognose der Belastungskenngrößen eine a priori Analyse der Kosten bei der Prozessplanung und unterstützt im Rahmen der Arbeit durch frühzeitige Validierung bei der Entwicklung des belastungsorientierten Bezahlmodells. Die Erfassung der Belastungskenngrößen an der realen Maschine stellt hingegen die Grundlage bei der praktischen Implementierung für den Betrieb dar.

Bei der Erfassung der maschinenspezifischen Belastungs-Zeit-Funktion einer realen WZM stellt der NC-Kern (NCK) die wichtigste Datenquelle dar, da dort alle Informationen zur Ausführung der Bewegungsanweisungen und Maschinenfunktionen verarbeitet werden. Über vorhandene Schnittstellen, die in Kapitel 6 näher erläutert werden, ist ein Zugriff auf die internen Messdaten zur Ermittlung der Positionen und Antriebsströme möglich. Bei der Simulation ermöglicht ein virtueller NC-Kern (VNCK) die Berechnung des Bewegungsprofils der realen Maschine. Die Abschätzung der Maschinenbelastung erfolgt anschließend über die Kopplung von Prozesssimulation und VNCK.

4.2 Anforderungen an die informationstechnische Infrastruktur

Für die Realisierung des Prototyps ist eine nahtlose Integration in das lokale Netzwerk des Anwenders erforderlich. Der zusätzliche Aufwand muss minimal sein und die Kalkulation der Abrechnungsgrößen automatisch erfolgen. Abbildung 4.3 zeigt auf Systemebene die notwendigen Basisfunktionalitäten. Dies beginnt mit Konnektoren zur Feldebene, die über geeignete Schnittstellen Daten von der NC oder externen Sensoren bereitstellen. Die primären Funktionen sind neben Anwendungen zur Datenverarbeitung und Visualisierung, die Speicherung und Archivierung der Daten. Dabei sollte die Datenverarbeitung in unmittelbarer Nähe zum Ort der Datengenerierung durchgeführt werden, um das Risiko einer Manipulation des Systems oder potenzielle Datenverluste bei der Übertragung der Rohdaten zu minimieren.

Bei einer Integration in das maschineninterne Netzwerk und Versorgung über denselben Netzanschluss ist der Betrieb auch beim Ausfall der Kommunikation beispielsweise über das Fabriknetzwerk nicht eingeschränkt. Voraussetzung ist ein Zwischenspeicher, der anschließend bei Wiederherstellung der Verbindung eine Synchronisation der nicht gesendeten Daten mit Leasinggeber und Hersteller ermöglicht.

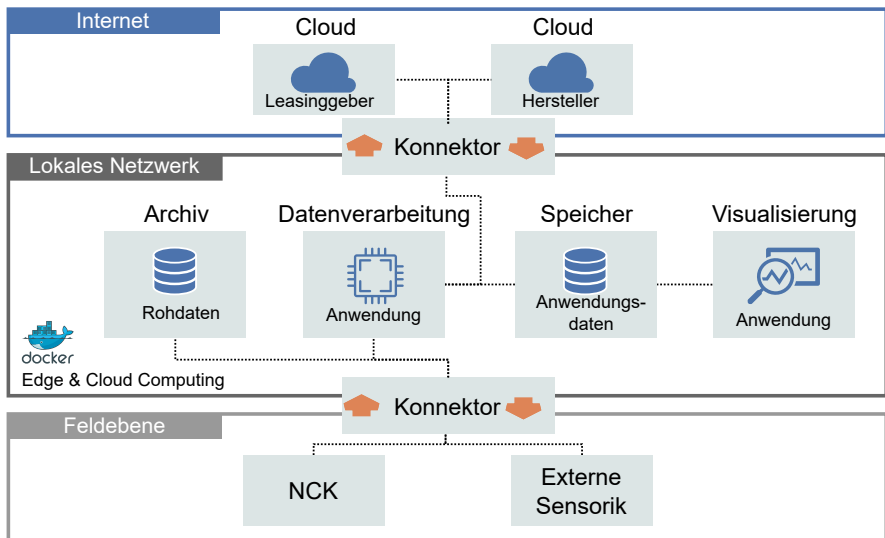


Abbildung 4.3: Aufbau informationstechnische Infrastruktur

Abhängig von der Architektur der NC bietet diese auch Funktionen, das Gesamtsystem direkt auf der Steuerung zu integrieren, was allerdings aufgrund herstellerspezifischer Funktionen zu einem erhöhten Implementierungsaufwand führen kann. Ein externes Edge-System hingegen bietet hinsichtlich verfügbarer Hardwareressourcen und Herstellerunabhängigkeit Vorteile.

Im lokalen Netzwerk können Rechenressourcen über Cloud- und Edge-Systeme bereitgestellt werden. Eine Differenzierung einzelner Funktionen und Systemkomponenten ermöglicht eine isolierte Virtualisierung in Containern. Open-Source-Software, wie beispielsweise Docker, ermöglicht so eine flexible, skalierbare und automatisierbare Bereitstellung der Container. Diese Vorgehensweise unterstützt einen modularen Aufbau.

4.3 Aufbau und Struktur des Bezahlmodells

4.3.1 Voraussetzungen und Annahmen

Im Hinblick auf die Realisierung der Zielstellung werden die getroffenen Annahmen anhand der Gegenüberstellung eines klassischen Leasingmodells und

eines belastungsorientierten Bezahlmodells in Abbildung 4.4 erläutert. Eine grundlegende Voraussetzung ist die Annahme, dass bei einer höheren Belastung B) gegenüber einer durchschnittlichen Belastung A) der Restwert der WZM sinkt. Dies kann im Extremfall zu Verlusten beim Leasinggeber führen, da der kalkulierte Erlös E_{Fix} über den Leasing-Zeitraum unter Berücksichtigung des Restwertes nicht erwirtschaftet wird. Das Restwertrisiko kann durch einen Risikozuschlag oder ein eingeschränktes Belastungsprofil reduziert werden. Umgekehrt bedeutet eine geringe Belastung C) einen höheren Restwert und ermöglicht einen potenziell höheren Gewinn, was die bestehenden Interessengensätze verdeutlicht.

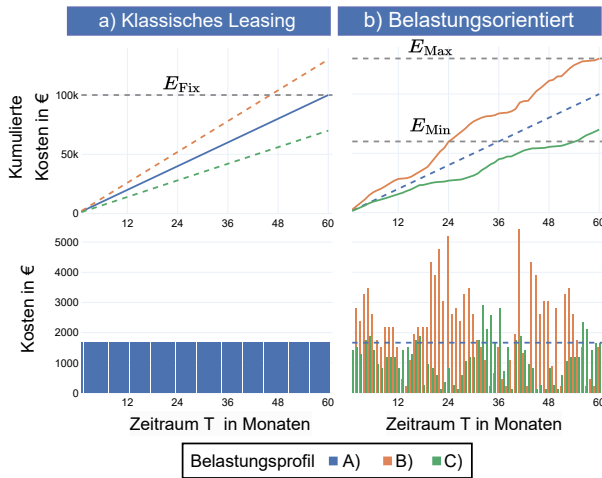


Abbildung 4.4: Gegenüberstellung des klassischen Leasings und belastungsorientierter Bezahlung

Aus der Annahme leitet sich die variable Abrechnung in Abhängigkeit von der Belastung ab. Der Anbieter garantiert bei bestimmungsgemäßem Gebrauch einen definierten Abnutzungsvorrat über den vereinbarten Nutzungszeitraum. Um das finanzielle Risiko des Anbieters zu reduzieren, ist es erforderlich, einen minimalen Abnutzungsvorrat und somit einen planbaren minimalen Erlös E_{Min} festzulegen, der über den Nutzungszeitraum mindestens in Anspruch zu nehmen ist. Dadurch ist der Einsatz des Bezahlmodells erst ab einer bestimmten Auslastung für den Anwender wirtschaftlich. Auf der anderen Seite ist ein maximaler Abnutzungsvorrat und somit ein maximaler Erlös E_{Max} des Anbieters im Nutzungszeitraum vertraglich festzuhalten, um

die Wirtschaftlichkeit aus Sicht des Anwenders gegenüber anderen Ansätzen sicherzustellen.

Für die Umsetzung im weiteren Verlauf wird ein vereinfachtes Kostenmodell angenommen. Zusätzliche Einflussfaktoren auf den Restwert, wie beispielsweise Marktpreisänderungen oder Risiko durch technische Überalterung [Gla18], werden nicht durch den Zerspanprozess beeinflusst und daher im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Für eine ausführliche monetäre Bewertung des belastungsbasierten Leasings für WZM wird an dieser Stelle auf [Sta23] verwiesen.

4.3.2 Identifikation und Gruppierung relevanter Komponenten

Aufgrund der Komplexität einer WZM und des heterogenen Verschleißverhaltens der Komponenten ist eine Unterscheidung verschiedener Abnutzungsindikatoren auf Komponentenebene notwendig. Hierzu erfolgt eine Unterscheidung der Komponenten zwischen direkt belastungsabhängigen, indirekt belastungsabhängigen und belastungsunabhängigen Abnutzungsindikatoren (siehe Abbildung 4.5). Der ersten Gruppe, der direkt belastungsabhängigen Komponenten, werden beispielsweise die Hauptspindel und Vorschubachsen zugeordnet. Die Belastung dieser Komponenten variiert abhängig vom Bearbeitungsprozess und hat somit einen signifikanten Einfluss auf das Abnutzungsverhalten.

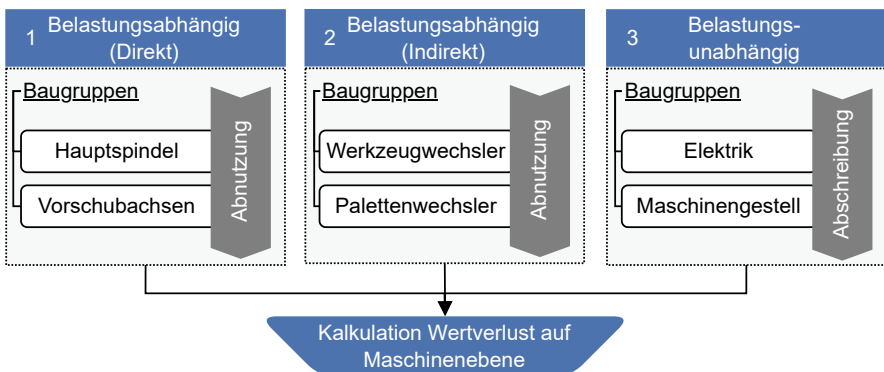


Abbildung 4.5: Einteilung der Komponenten nach Abnutzungsverhalten

Indirekt belastungsabhängige Komponenten zeichnen sich durch ein Abnutzungsverhalten aus, welches nicht unmittelbar von den auf die WZM wirkenden Prozessbelastungen abhängt, sondern durch einen anderen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang beschrieben werden. Für diese Komponenten ist die Beschreibung der Abnutzung durch weniger komplexe Indikatoren wie Nutzungsdauer oder Häufigkeit von Ereignissen möglich. Dies lässt sich am Beispiel des Werkzeugwechslers verdeutlichen, dessen Abnutzungsverhalten vereinfacht über die Anzahl der Werkzeugwechsel beschrieben werden kann, da die Prozesskräfte keinen Einfluss haben.

Die belastungsunabhängige Gruppe umfasst alle Komponenten, die keiner anderen Gruppe zugeordnet werden können. Das sind zum einen Komponenten, deren Abnutzungsverhalten nicht modellierbar ist oder die ein zufälliges Ausfallverhalten aufweisen. Zum anderen sind das Komponenten, die keiner signifikanten Abnutzung unterliegen oder einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Wertverlust der WZM haben. Dieser Gruppe werden beispielsweise die Elektronik oder Strukturbauteile wie Maschinengestell oder Maschinenbett zugeordnet.

4.3.3 Zusammenhang zwischen Belastung, Abnutzung und Kosten

Aufbauend auf den Voraussetzungen wird im folgenden Abschnitt das Zusammenwirken von Belastung, Abnutzung und Kosten an dem in Abbildung 4.6 dargestellten exemplarischen Verlauf eines Belastungsindikators $B(t)$ erläutert. Dieser wird als Messgröße der Belastungs-Zeit-Funktion eingeführt und kann, abhängig von der jeweiligen Komponente und dem betrachteten Verschleißmechanismus, durch verschiedene Messgrößen wie beispielsweise Lastwechsel, Betriebsstunden oder einem Belastungsintegral beschrieben werden. Die Abnutzung $A(t)$ wird als einheitlicher Abnutzungsindikator relativ zum Belastungsindikator ermittelt. Somit ist zu Beginn der Nutzungsdauer T_0 bei einer neuwertigen Maschine mit einem Belastungsindikator $B_0 = 0$ der Abnutzungsindikator $A_0 = 0$. Um den relativen Abnutzungsindikator zu ermitteln, wird ein Grenzwert des Belastungsindikators B_{\max} festgelegt, der einen vollständig aufgebrauchten Abnutzungsvorrat beschreibt. In diesem Zustand beträgt die relative Abnutzung $A_{\max} = 1$. Der Grenzwert garantiert beispielsweise eine festgelegte Anzahl von Lastwechseln über den Nutzungszeitraum T_n .

Der Verlauf der kumulierten Kosten $K(t)$ wird in diesem Ansatz proportional zur relativen Abnutzung $A(t)$ und zum Belastungsindikator $B(t)$ ent-

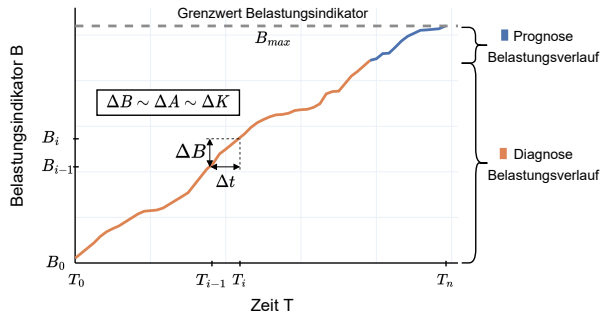


Abbildung 4.6: Exemplarischer Verlauf des Belastungsindikators einer Komponente

sprechend Gleichung (4.1) berechnet. Demzufolge entspricht der maximal zu erzielende Erlös der Belastungsgrenze ($E_{\max} \hat{=} B_{\max}$). Aufgrund der Proportionalität können die Kosten ΔK über einen Abrechnungszeitraum Δt aus der Differenz der Kostenfunktion zwischen zwei Zeitpunkten ermittelt werden.

$$K(t) = K_{\text{ges}} \cdot A(t) = K_{\text{ges}} \cdot \frac{1}{B_{\max}} \cdot B(t) \quad (4.1)$$

Für mechanische Komponenten wie beispielsweise Spindellager kann der Belastungsindikator durch ein Belastungsintegral entsprechend Gleichung (4.2) beschrieben werden, welches die wirkende äquivalente Lagerbelastung $F(t)$ und die Drehzahl $n(t)$ berücksichtigt. Je nach Einsatzgebiet werden Komponenten wie KGT oder Spindellager für eine bestimmte nominelle Lebensdauer L_{10h} ausgelegt. Die Komponenten von WZM werden dabei häufig für ca. 20.000 Betriebsstunden ausgelegt [Hir12; Ber20]. Über die äquivalente Drehzahl n_m erfolgt die Umrechnung der in Umdrehungen angegebenen nominellen Lebensdauer L_{10} in Stunden L_{10h} (Gleichung (4.3)).

$$B = \int_0^T |F(t)|^3 \cdot |n(t)| dt \quad (4.2)$$

$$L_{10h} = \left(\frac{C}{F_m} \right)^3 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{n_m} \quad (4.3)$$

Die Umstellung nach der äquivalenten Belastung F_m , wie in Gleichung (4.4), beschreibt den Zusammenhang der Größen. Der Maximalwert des Belastungs-

integrals am Ende der Lebensdauer ergibt sich entsprechend Gleichung (4.5). So kann in Abhängigkeit von der dynamischen Tragfähigkeit C das maximale Belastungsintegral B_{\max} als Grenzwert ermittelt werden.

$$F_m^3 = \sum_{j=1}^n \left(F_j^3 \cdot \frac{n_j}{n_m} \cdot \frac{\Delta t_j}{\Delta t_{\text{ges}}} \right) = C^3 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{n_m \cdot L_{10h}} \quad (4.4)$$

$$B_{\max} = C^3 \cdot 10^6 \quad (4.5)$$

Der für die Realisierung zu implementierende Ablauf ist als Blockdiagramm in Abbildung 4.7 dargestellt. Aus der erfassten Komponentenbelastung und der Drehzahl wird das aktuelle Belastungsintegral berechnet und zu dem historischen Belastungsintegral addiert, um den aktuellen Abnutzungsindikator anhand der Belastungsgrenze zu ermitteln. Der historische Verlauf des Belastungsintegrals wird nach jedem Zeitschritt in einer Datenbank abgespeichert.

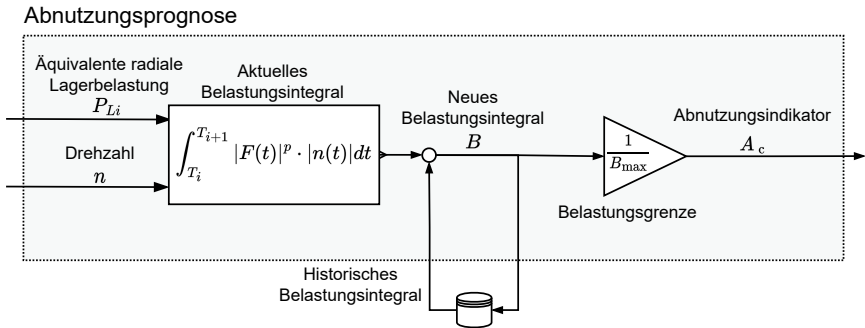


Abbildung 4.7: Blockdiagramm zur Ermittlung des Abnutzungsindikators

4.3.4 Aggregation auf Maschinenebene

Bei der WZM handelt es sich um ein Mehrkomponentensystem, deren Komponenten im Betrieb nicht nur unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt sind, sondern sich ebenfalls durch ein abweichendes Abnutzungsverhalten unterscheiden. Demnach ist eine Ermittlung der Belastungskenngrößen auf Komponentenebene und eine anschließende Aggregation auf Maschinenebene erforderlich. Da die Belastungen in unterschiedlichen Einheiten erfasst werden können, wird für die Aggregation der relative Abnutzungsindikator A_C auf Komponentenebene eingeführt.

Um den Abnutzungsindikator A_M für ein komplexes Gesamtsystem wie die WZM zu ermitteln, ist es notwendig, die Indikatoren A_C jeder relevanten Komponente mit einer entsprechenden Gewichtung q_i zu berücksichtigen. Wie in Abbildung 4.8 dargestellt, werden die Komponenten einer WZM in Baugruppen- und Komponentenebenen aufgegliedert und entsprechend der Gleichung (4.6) über die Anzahl der Komponenten q_i aufsummiert.

$$A_M = \sum_{i=0}^n q_i \cdot A_C \quad (4.6)$$

Abhängig von der Struktur der Maschine werden je nach ausgefallener Komponente in der Praxis ganze Baugruppen ausgetauscht, da die Montage im Feld mit zu hohem Aufwand verbunden oder unmöglich ist. Dieser Zusammenhang zwischen den Komponenten einer Baugruppe wird durch eine Verknüpfung über eine Maximumsfunktion dargestellt. Der Abnutzungsindikator der Baugruppe A_i wird aus dem Maximalwert der untergeordneten Komponenten $A_{i,j}$ entsprechend Gleichung (4.7) berücksichtigt.

$$A_i = \begin{cases} \sum_{j=0}^n (q_{i,j} \cdot A_{i,j}), & \text{falls Verknüpfung über Addition} \\ \max(A_{i,j}, \dots, A_{i,n}), & \text{falls Verknüpfung über Maximumsfunktion} \end{cases} \quad (4.7)$$

Die Festlegung der Gewichtungsfaktoren q_i hat somit einen entscheidenden Einfluss auf die Anreizwirkung des Bezahlmodells. Eine Möglichkeit der Bestimmung der Gewichtungsfaktoren basiert auf dem Verhältnis der tatsächlich entstandenen Herstellkosten der einzelnen Komponenten. Gemäß der Kostenaufteilung aus [Koh22] entfallen für den dargestellten Anwendungsfall nur 21 % der Herstellkosten auf belastungsrelevante Komponenten. Folglich

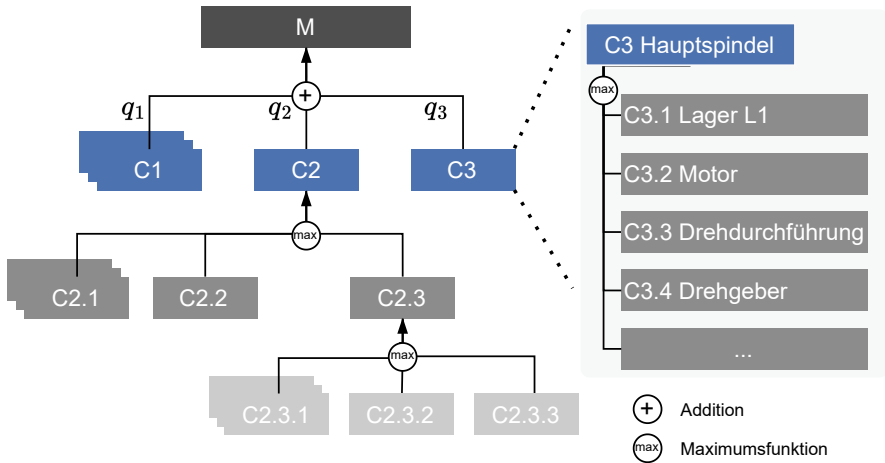


Abbildung 4.8: Aggregation der Abnutzungsindikatoren je Komponente zu einem Abnutzungsindikator auf Maschinenebene

ist der belastungsunabhängige Teil deutlich größer, was eine geringere Anreizwirkung zur schonenden Nutzung der Maschine zu Folge hat. Ein alternativer Ansatz besteht darin, bei der Ermittlung der Gewichtungsfaktoren das Ausfallverhalten oder die im Betrieb entstehenden Kosten der jeweiligen Komponente zu berücksichtigen. Ist dies nicht möglich, können die Gewichtungsfaktoren basierend auf Expertenwissen geschätzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Komponenten entsprechend einer maximalen Anreizwirkung zur schonenden Nutzung der Baugruppen Hauptspindel und Vorschubachsen gewählt. Dementsprechend werden die angenommenen Gesamtkosten $K_{\text{ges}} = 250.000 \text{ €}$ über Gewichtungsfaktoren mit 0,4 für die Hauptspindel und 0,2 je Vorschubachse aufgeteilt, sodass die Summe der Gewichtungsfaktoren aller Komponenten 1 ist.

4.4 Versuchsumgebung und Rahmenbedingungen

Die Implementierung erfolgt unter den im folgenden Kapitel vorgestellten Rahmenbedingungen. Es werden die genutzte WZM sowie die für die durchgeführten Zerspanungsversuche eingesetzten Werkzeuge und Messtechnik beschrieben.

4.4.1 Eigenschaften der Versuchsmaschine

Die experimentellen Untersuchungen wurden auf dem in Abbildung 4.9 dargestellten Bearbeitungszentrum DMC850V von DMG MORI durchgeführt. Es handelt sich dabei um ein Vertikal-Bearbeitungszentrum mit drei Vorschubachsen in Fahrständerbauweise. Somit ist der Tisch unbeweglich und ermöglicht eine Bearbeitung von Werkstücken mit einem Gewicht von bis zu 1.000 kg. Die Maschine ist für Einzelteilerfertigung und Kleinserien mit Werkstücken aus unterschiedlichen Materialien geeignet. Ausgestattet ist die Maschine mit der Steuerung Sinumerik 840D sl des Herstellers Siemens. [DEC19]



Abbildung 4.9: Versuchsmaschine DMC850 des Herstellers DMG MORI

Die Hauptspindel verfügt über eine HSK-A63-Schnittstelle und ist für Drehzahlen bis 20.000 min^{-1} ausgelegt. Das maximale Drehmoment im Dauerbetrieb (Betriebsart S1) beträgt 86 Nm , während bei einer Einschaltdauer von 40 % (Betriebsart S6) ein maximales Drehmoment von 130 Nm angegeben ist. Anhand der Kennlinie des Hauptantriebes werden die Bearbeitungsprozesse so ausgelegt, dass das maximale Drehmoment im Dauerbetrieb nicht überschritten wird. Die Vorschubachsen erreichen eine maximale Vorschubgeschwindigkeit von 42.000 mm/min . Für die Achsen ist eine maximale Vorschubkraft von $6,5 \text{ kN}$ angegeben, wobei der begrenzende Faktor bei der Pro-

zessauslegung die maximale Belastung der Hauptspindel ist. Eine Übersicht der Spezifikationen der Versuchsmaschine ist in Tabelle 4.1 angegeben.

Tabelle 4.1: Spezifikationen der Versuchsmaschine DMC850V

| Hauptspindel | | Verfahrenweg | |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|--------|
| Drehzahl | 20.000 min ⁻¹ | X-Achse | 850 mm |
| Antriebsleistung | 25 (35) kW | Y-Achse | 520 mm |
| Drehmoment | 86 (130) Nm | Z-Achse | 475 mm |
| Werkzeugaufnahme | HSK-A63 | | |
| Vorschubantriebe | | Steuerung | |
| Vorschubkraft | 6,5 kN | Siemens Sinumerik 840D sl | |
| Vorschubgeschw. | 42.000 mm/min | IPO-Takt | 4 ms |
| Beschleunigung | 5 m/s ² | Lageregeltakt | 2 ms |

4.4.2 Werkzeuge

Für die in dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen kommen verschiedene Werkzeuge zum Einsatz, die in Abbildung 4.10 dargestellt sind. Die Auswahl der Werkzeuge zielt darauf ab, durch Variation der Prozessparameter die verschiedenen auftretenden Belastungen einer WZM im Betrieb abzubilden, um den Einfluss auf das entwickelte belastungsorientierte Bezahlmodell bewerten zu können. Eingesetzt werden ein Vollhartmetallschaftfräser zur Bearbeitung von Stahl, sowie ein vergleichbarer Schaftfräser zur Bearbeitung von Aluminium-Werkstoffen, um auch Bearbeitungsoperationen unter hohen Drehzahlen durchzuführen. Weiterhin kommen Eckfräser mit Wendeschneidplatten und Zylinderschaft zum Einsatz, die aufgrund der Prozesskräfte eine hohe radiale Belastung der Spindel ermöglichen. Mit einem Aufsteckfräser von 63 mm Durchmesser werden zusätzlich Bearbeitungsprozesse mit einem hohen Drehmoment abgebildet. Für die Betrachtung der axialen Belastung der Spindel kommen Bohrer zum Einsatz. Eine Zusammenfassung der Werkzeuge findet sich in Tabelle 4.1.

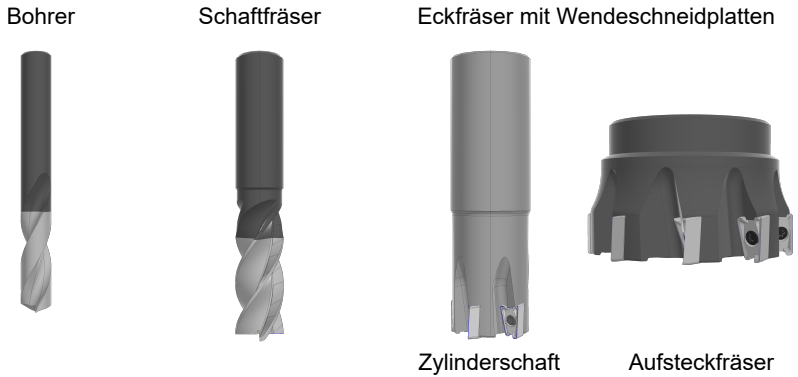


Abbildung 4.10: Darstellung der verwendeten Werkzeugtypen

Tabelle 4.2: Übersicht über die verwendeten Werkzeuge des Herstellers Kennametal

| Bezeichnung | Durchmesser | Schneiden | Katalognummer |
|--------------------|-------------|-----------|----------------------|
| Schaftfräser | 16 mm | 4 | H1TE4SE1600N032HAM |
| Schaftfräser | 16 mm | 3 | F3AA1600AWL45 |
| Eckfräser | 32 mm | 5 | M4D032Z05A32LN11L110 |
| Eckfräser | 63 mm | 9 | M4D063Z09S22LN11 |
| Wendeschneidplatte | | | LNGU110408SRGE |
| Wendeschneidplatte | | | LNGU110408ERLEJ |
| Bohrer | 12 mm | | B041A12000CPG |

4.4.3 Messtechnik

Zur Validierung der Ansätze wird die Messung der Prozesskräfte mit einem Mehrkomponenten-Dynamometer des Typs 9255C der Firma Kistler durchgeführt. Es handelt sich dabei um ein piezoelektrisches 3-Komponenten-Dynamometer zur Erfassung der drei orthogonalen Komponenten einer Kraft. Der Versuchsaufbau der Kraftmesstechnik ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Das Dynamometer wird dabei so ausgerichtet, dass eine Messung der drei Kraftkomponenten im Maschinenkoordinatensystem erfolgt. Die aufgrund der wirkenden Prozesskraft erzeugten Ladungen werden je Kraftkomponente durch einen Ladungsverstärker des Typs 5015A der Firma Kistler in ein proportionales Spannungssignal gewandelt. Dieses wird anschließend mithilfe von Hardware zur Datenerfassung des Herstellers National Instruments (cDAQ-9174 mit NI-9215) mit einer Abtastrate von 30 kHz diskretisiert. Die Umrechnung des Spannungssignals in eine Kraft erfolgt mit den im Kalibrierschein des Herstellers angegebenen Empfindlichkeiten je Kraftkomponente.

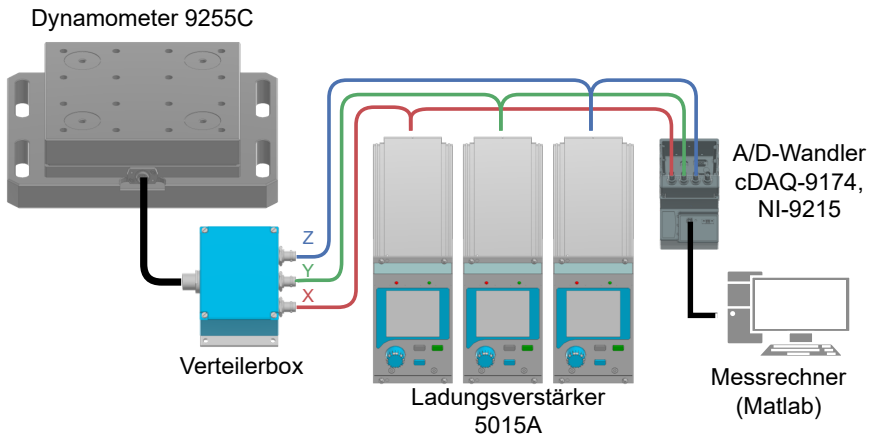


Abbildung 4.11: Versuchsaufbau Kraftmesstechnik

Die technischen Spezifikationen des Dynamometers sind in Tabelle 4.3 aufgeführt. Der Messbereich wird durch die maximale Belastung der Motorspindel auf 5 kN eingestellt. Gemäß der Betriebsanleitung und unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten lässt sich mit der aufgebauten Messkette eine Genauigkeit von 1 bis 2 % des Messbereiches erreichen. Das entspricht bei dem gewählten Messbereich einem Messfehler von 100 N. Durch die Steifigkeit

des Messsystems ergeben sich Eigenfrequenzen, die je nach Bearbeitungsprozess auch eine Erfassung des dynamischen Verhaltens der Prozessbelastung ermöglichen. Der Amplitudenfehler ist dabei abhängig von der maximalen Frequenz des Signals. Bei 10 % der Eigenfrequenz ist als Richtwert eine Genauigkeit von 1 % angegeben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die angegebenen Eigenfrequenzen durch die zusätzliche Masse des Werkstückes absinken. Insbesondere bei hohen Zahneingriffsfrequenzen infolge hoher Drehzahlen steigt der dynamische Fehler und ist bei 30 % der Eigenfrequenz mit 10 % angegeben. [Kis15]

Tabelle 4.3: Technische Spezifikation des Mehrkomponenten-Dynamometers [Kis18]

| Bezeichnung | Formelzeichen | Einheit | Wert |
|--------------------------|---------------|------------------|-----------------|
| Kalibrierter Messbereich | F_x, F_y | kN | 0...30 |
| | F_z | kN | 0...60 |
| Linearität | | % | $\leq \pm 0,5$ |
| Hysterese | | % | $\leq 0,5$ |
| Steifheit | c_x, c_y | N/ μm | ≈ 2.000 |
| | c_z | N/ μm | ≈ 3.000 |
| Eigenfrequenzen | $f_n(x)$ | kHz | $\approx 2,2$ |
| | $f_n(y)$ | kHz | $\approx 1,8$ |
| | $f_n(z)$ | kHz | $\approx 2,3$ |

5 Konzept zur Simulation des Gesamtsystems

Das Ziel leistungsfähiger Simulationen ist es, komplexe Zusammenhänge abzubilden, um das Verhalten eines realen Systems analysieren zu können. Infolgedessen werden in diesem Kapitel die für das Gesamtsystem erforderlichen Methoden zur Simulation von NC, Zerspanprozess und WZM beschrieben. Basierend auf den Simulationsergebnissen wird anschließend die Vorgehensweise zur Ermittlung der Maschinen- und Komponentenbelastung dargelegt. Das Vorgehen ermöglicht eine a priori Analyse der Kosten des belastungsorientierten Bezahlmodells im Rahmen der Prozessplanung.

5.1 Aufbau der Simulation

Für die Umsetzung des Gesamtsystems ist eine Verknüpfung der verschiedenen Simulationsmethoden und Modelle erforderlich. Da aufgrund spezifischer Anforderungen und unterschiedlicher Simulationsverfahren keine etablierte Möglichkeit einer integrierten Gesamtsimulation mit einer ausreichenden Genauigkeit besteht, erfolgt eine Durchführung der Methoden zur Simulation des Zerspanprozesses und der NC unabhängig voneinander in der jeweiligen Systemumgebung. Dies geschieht basierend auf den dafür benötigten technologischen Eingangsgrößen. Eine Integration der eingesetzten Simulationsmethoden ist technisch realisierbar, erfordert allerdings einen entsprechenden Implementierungsaufwand. Die Simulationsergebnisse der Systeme stellen die Eingangsgröße für die im nächsten Schritt zu ermittelnde Maschinen- und Komponentenbelastung dar. Die Implementierung der dafür notwendigen Berechnungsschritte erfolgt in der Programmiersprache Python. Dabei werden die berechneten Simulationsergebnisse der Prozesssimulation und VNCK über definierte Datenmodelle importiert. Somit werden die Berechnungsschritte modular aufgebaut und die Eingangsgrößen so definiert, dass die in Python implementierten Berechnungen ebenfalls bei einer prototypischen Umsetzung an der realen Maschine eingesetzt werden können.

Zur Veranschaulichung der Gesamtstruktur ist das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten als Blockdiagramm in Abbildung 5.1 dargestellt. Die für die Modellierung der Lebensdauer notwendigen Eingangsgrößen für Spindel

und Vorschubachse ergeben sich aus den im vorherigen Kapitel beschriebenen Grundlagen zur Berechnung des Belastungsintegrals. Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Komponentenbelastung wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

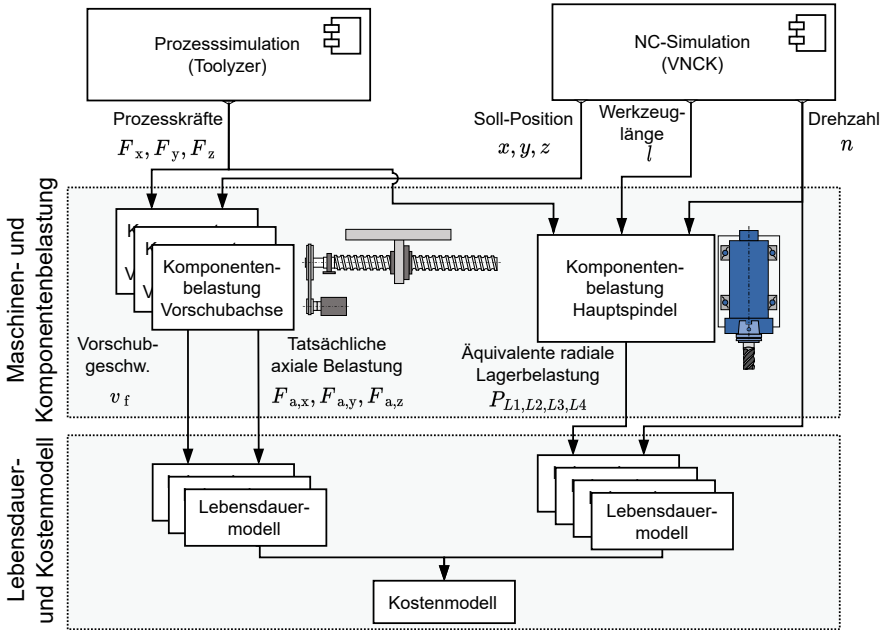


Abbildung 5.1: Blockdiagramm zur Simulation des Gesamtsystems

5.2 Simulation der numerischen Steuerung

Die Erstellung von NC-Programmen erfolgt im Rahmen der CAD/CAM-Prozesskette. Die CAM-Software erlaubt eine generelle Beschreibung und Simulation der Bearbeitungsschritte, die über einen maschinenspezifischen Postprozessor in ein NC-Programm für die entsprechende Maschine übersetzt werden [Die20]. Im Gegensatz zur allgemeinen Simulation der Bearbeitungsschritte in der CAM-Software ist das Ziel der NC-Simulation, die in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Funktionen möglichst realitätsnah abzubilden. Je nach CAM-Software besteht die Möglichkeit, die Funktionen der NC-Simulation zu integrieren.

Bei der in der Arbeit betrachteten WZM erfolgt die Simulation durch die Software Run MyVNCK, die die Funktionalitäten der Steuerung über einen virtuellen NC-Kern (VNCK) nachgebildet. Die NC-Simulation kann über eine Benutzeroberfläche, die dem Human Machine Interface (HMI) der realen Maschine entspricht, oder eine Programmierschnittstelle gesteuert werden. Das Simulationsmodell kann über das Inbetriebnahme-Archiv (IBN) der realen Steuerung erstellt werden. Aufgrund fehlender Rückmeldung der Sensorik sind Signale wie Ist-Positionen der Encoder, Antriebsströme, Drehmomente oder Leistungen über den VNCK nicht verfügbar. Die realitätsnahe Simulation der zeitdiskreten Steuerungs- und Positionswerte erfolgt, indem der Lageregler der gesteuerten Achsen durch ein PT1-Glied approximiert wird. Weitere Limitierungen ergeben sich beispielsweise aus dem Fehlen der SPS, was jedoch für die nächsten Schritte der Gesamtsimulation nicht relevant ist [Sie07].

5.3 Simulation des Zerspanprozesses

Für eine simulationsgestützte Umsetzung des Gesamtsystems ist die Abschätzung der werkstückspezifischen Prozesskräfte ein elementarer Bestandteil der Komponentenbelastung und somit essenziell für die Prognose der zu erwartenden Kosten. Ziel des Abschnitts ist daher die Erläuterung des Vorgehens zur Berechnung der Prozesskräfte und die experimentelle Ermittlung der Kraftkoeffizienten.

5.3.1 Vorgehensweise zur Berechnung der Prozesskräfte

Im ersten Schritt erfolgt für die Prozesssimulation¹ eine geometrische Simulation in Form einer kinematischen Durchdringungssimulation zur Ermittlung der geometrischen Kenngrößen des Werkzeugeingriffs. Dabei wird der Werkzeugeingriff basierend auf dem NC-Programm, sowie den CAD-Daten des Werkzeugs und Werkstückes berechnet, sodass der Werkzeugeingriff für beliebige Bearbeitungsoperationen abgebildet werden kann. Die Vorhersage der Prozesskräfte erfolgt anschließend auf Grundlage des Kraftmodells von *Altintas und Lee* unter Berücksichtigung der Schnittkraftkoeffizienten (siehe Gleichung 2.6). Ergänzend mit der in [Eng01] beschriebenen mathematischen Formulierung werden die axialen, radialen und tangentialen Kraftkomponenten der einzelnen Schneidensegmente über eine Transformationsmatrix in das

¹Die Prozesssimulation wird mit der von Tetralytix GmbH entwickelten Software Toolzyzer zur Analyse beliebiger Werkzeuggeometrien und Zerspanprozesse durchgeführt.

Maschinenkoordinatensystem (MKS) transformiert. Aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren in der Zerspanung ist die Simulation von Prozesskräften immer mit Unsicherheiten verbunden. Um die Genauigkeit der simulierten Prozesskräfte zu erhöhen, ist eine experimentelle Ermittlung der spezifischen Kraftkoeffizienten unter möglichst vergleichbaren Bedingungen durchzuführen. Die Übertragbarkeit der Kraftkoeffizienten ist von verschiedenen Einflussfaktoren wie Werkstoff, Werkzeuggeometrie und Prozessstellgrößen abhängig, sodass diese für vergleichbare Kombinationen aus Werkzeug, Werkstück und Prozess verwendet werden können. [Pap20; Den21; Tet22]

Es gibt zudem weitere Aspekte, wie beispielsweise Werkzeugverschleiß, die einen Einfluss auf die Genauigkeit der simulierten Prozesskräfte haben, aber nicht modelliert werden.

Da der Fokus der Simulationssoftware auf der Analyse und Optimierung von Zerspanprozessen und Werkzeugen liegt, erfolgt eine maschinenunabhängige Prognose der Prozesskräfte. Eine Interpretation des NC-Programms zur Generierung der Werkzeugbahn ist möglich, stellt aber keine vollständige Simulation der NC dar. Somit können verschiedene Prozessschritte und Schneideneingriffe eines Werkzeugs simuliert werden. Da Werkzeugwechsel nicht implementiert werden, sind für eine vollständige Simulation eines Werkstückes mit verschiedenen Werkzeugen mehrere Simulationen durchzuführen. Darüber hinaus erfolgen die Berechnungen der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile ohne Simulation der NC, sodass die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile der Positionierbewegungen von den der realen Maschine abweichen. Somit ist für eine Ermittlung der maschinenspezifischen Belastung die Verknüpfung der prognostizierten Prozesskräfte mit den Ergebnissen aus der NC-Simulation erforderlich. Dies erfolgt für einzelne Prozessschritte über den Zeitpunkt des berechneten Schneideneintritts.

Neben der zeitlichen Synchronisierung der Daten über die Position des Schneideneintritts ist eine Konvertierung der unterschiedlichen Abtastraten erforderlich. Während die Abtastrate der Simulationsergebnisse des VNCK durch den Lageregeltakt festgelegt wird, wird bei der Prozesssimulation die Zeitschrittweite abhängig von den zu simulierenden Prozessparametern gewählt. Für die betrachteten Bearbeitungsprozesse ist die Berechnung mit einer Zeitschrittweite, die einer Drehung des Werkzeugs von 1° zwischen zwei Zeitschritten entspricht, hinreichend [Tet23]. Bei der Datenverarbeitung wird daher ein Upsampling der Simulationsergebnisse aus dem VNCK mittels linearer Interpolation durchgeführt.

5.3.2 Experimentelle Bestimmung der Kraftkoeffizienten

Für eine simulationsgestützte Untersuchung der Belastungsprofile werden für die in Abschnitt 4.4.2 vorgestellten Werkzeuge die spezifischen Kraftkoeffizienten ermittelt. Grundlage für die Berechnung stellt das in [Bud96] beschriebene Vorgehen dar. Erweitert wird dieses Vorgehen durch den in [Pap20] beschriebenen Ansatz, der eine Ermittlung der Kraftkoeffizienten auch für komplexe Werkzeuge ermöglicht, bei denen eine analytische Beschreibung der Eingriffsbedingungen nicht vorhanden ist. Darüber hinaus werden in dem Ansatz zusätzlich zur Mittelwertbildung die Amplituden einzelner Zahneingriffe betrachtet.

Die Vorgehensweise bei den experimentellen Untersuchungen wird im Folgenden beispielhaft für den Schaftfräser vom Typ H1TE4SE1600N032HAM des Werkzeugherstellers Kennametal beschrieben. Eine vollständige Darstellung des Versuchplans und der ermittelten Ergebnisse befindet sich in Anhang A.1 für die in der Arbeit betrachteten Werkzeug- und Werkstoff-Kombinationen. Basierend auf den im Versuchsplan angegebenen Variationen der Prozessstellgrößen werden die experimentellen Untersuchungen entsprechend der Darstellung in Abbildung 5.2 durchgeführt.

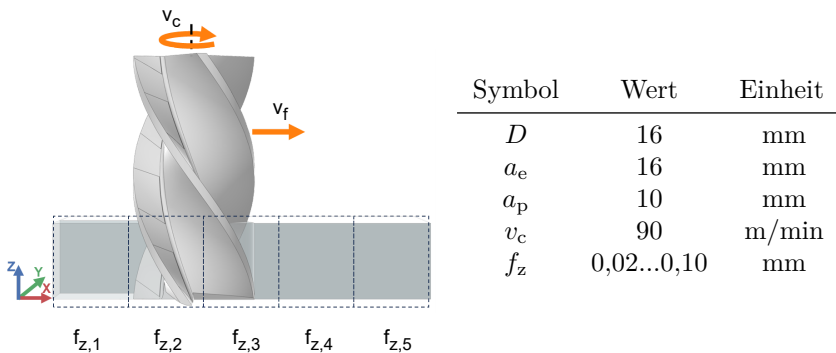


Abbildung 5.2: Bearbeitungsprozess und Prozessparameter zur Bestimmung der Kraftkoeffizienten für 42CrMo4

Für die experimentelle Ermittlung der Kraftkoeffizienten werden die Prozesskräfte bei einer stufenweisen Erhöhung des Vorschubs in fünf Schritten aufgezeichnet. In Abbildung 5.3 ist der zeitliche Verlauf einer Messung dargestellt, aus dem die entsprechenden Mittelwerte und maximalen Amplituden in

Abhängigkeit vom Zahnvorschub ermittelt werden. Aufgrund der gleichbleibenden Eingriffsbedingungen ist für den betrachteten Prozess der dynamische Anteil der Prozesskräfte gering, was zu einer kleinen Differenz der Mittelwerte und Amplituden führt. Basierend auf den gemessenen Prozesskräften werden nach dem in [Pap20] beschriebenen Ansatz die spezifischen Kraftkoeffizienten ermittelt.

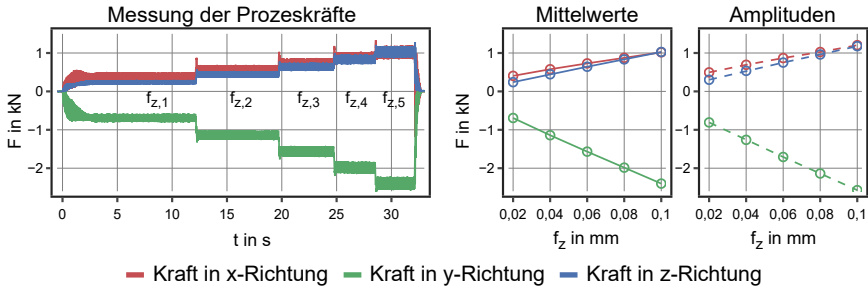


Abbildung 5.3: Erfasste Prozesskräfte zur Bestimmung der Kraftkoeffizienten

In Abbildung 5.4 ist zur Validierung der Ergebnisse der zeitliche Verlauf der Schneideneingriffe und die Korrelation der Mittelwerte dargestellt. Mit den in Anhang A.1 experimentell ermittelten Kraftkoeffizienten werden die Prozesskräfte für verschiedene Kombinationen der Prozessparameter simuliert. Dabei ist der zeitliche Verlauf der Schneideneingriffe exemplarisch für den Vorschub $f_{z,4}$ aus Abbildung 5.3 dargestellt. Der Toleranzbereich von 10% des Messwertes ist farblich markiert. Auch bei den dynamischen Anteilen zeigt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Prozesskraft. Neben Abweichungen durch Messunsicherheiten zwischen Simulation und gemessenen Werten können ebenfalls Abweichungen durch eine idealisierte Darstellung des Werkzeugs in der Simulation auftreten. Fertigungstoleranzen des Werkzeugs oder Unsicherheiten bei der Montage und Einspannung von Werkzeugen haben einen Einfluss auf die tatsächlich wirkenden Prozesskräfte.

Des Weiteren sind 55 Mittelwerte der simulierten und experimentell ermittelten Prozesskräfte für verschiedene Prozessparameter in Abbildung 5.4 dargestellt. Die ideale Korrelation ist mit einem Toleranzbereich von ± 150 N visualisiert, was Abweichungen aufgrund angegebener Messunsicherheiten darstellt. Die Abbildung verdeutlicht neben den Ergebnissen für das Bestimmtheitsmaß R^2 die Genauigkeit der simulierten Prozesskräfte.

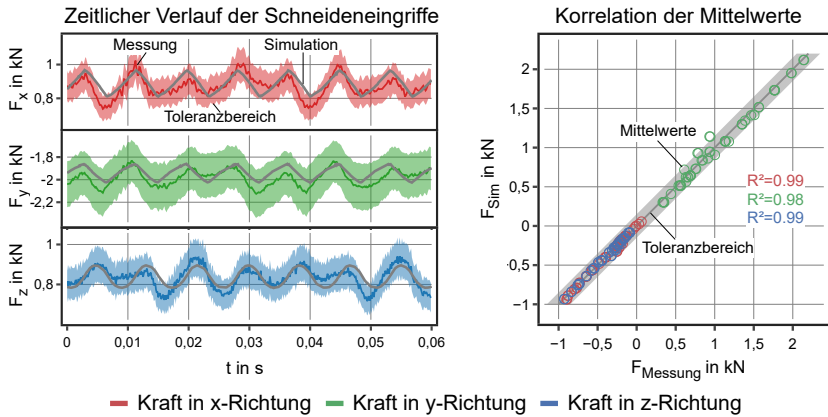


Abbildung 5.4: Validierung der Ergebnisse der Prozesssimulation

5.4 Belastung der Vorschubachsen

Basierend auf den Anforderungen ist das Ziel dieses Kapitels, die Belastung der Vorschubachsen zu ermitteln. Diese ergibt sich aus der am KGT auftretenden axialen Belastung und kann aus den in der NC verfügbaren Informationen ermittelt werden. Ein Vorteil des Ansatzes ist, dass diese Signale in der NC über offene Schnittstellen für eine Weiterverarbeitung verfügbar sind und die Integration zusätzlicher Sensorik nicht erforderlich ist. Die für die Berechnung der tatsächlichen axialen Belastung am KGT einer Vorschubachse angewandten Schritte sind im Blockdiagramm in Abbildung 5.5 dargestellt und werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Die Soll-Positionen aus der NC-Simulation und die Prozesskräfte aus der Prozesssimulation stellen die Eingangsgrößen dar.

5.4.1 Berechnung der am KGT wirkenden Axialkraft

Zur Berechnung der am KGT wirkenden Axialkraft wird entsprechend Gleichung 5.1 das Kräfte- und Momentengleichgewicht für das Antriebsmoment des Motors M_M aufgestellt. Da das Antriebsmoment nicht direkt gemessen wird, erfolgt die Berechnung aus dem momentenbildenden Antriebsstrom I und der Motorkonstante k_T , sowie der je nach Aufbau des Antriebes zu berücksichtigenden Übersetzung i . Die zu berücksichtigenden Größen werden anhand des schematischen Aufbaus einer Vorschubachse in Abbildung 5.6

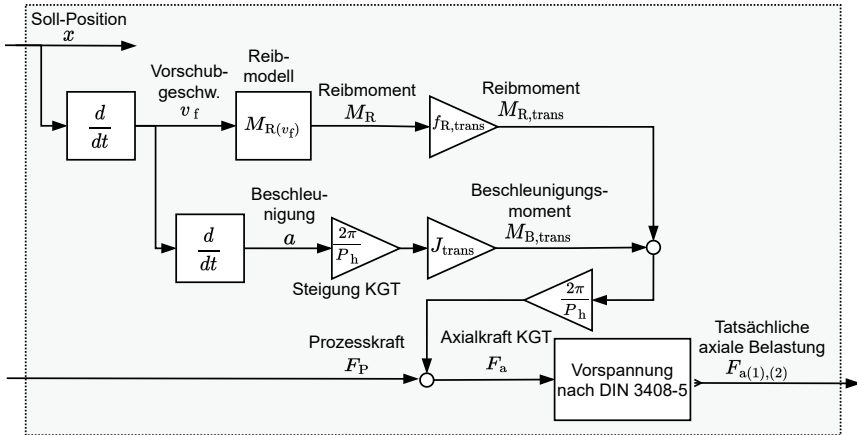


Abbildung 5.5: Blockdiagramm zur Berechnung der Belastungen an einer Vorschubachse

dargestellt und setzen sich aus den Massenträgheiten resultierenden Beschleunigungsmoment M_B , dem Reibmoment M_R und dem durch externe Einflüsse wirkenden Moment M_P zusammen. Zu externen Einflüssen zählen die Prozesskräfte. Abhängig vom Aufbau der Achse sind auch die aufgrund der Gewichtskräfte wirkenden Drehmomente M_G zu berücksichtigen.

Ist beim Antrieb $M_{M,an}$ der Maschine aufgrund eines Getriebes die Übersetzung zu berücksichtigen, werden alle Größen auf den Abtrieb $M_{M,ab}$ bezogen. Dies erleichtert den Vergleich zwischen Maschinen mit und ohne Übersetzung. Zur einfacheren Darstellung wird daher im Folgenden der Index für den Abtrieb weggelassen, sodass $M_{M,ab}$ zu M_M vereinfacht wird.

$$M_M = I \cdot k_T \cdot i = (M_B + M_R + M_P + M_G) \quad (5.1)$$

Trägheitskräfte

Das Beschleunigungsdrehmoment M_B ist auf den Abtrieb bezogen und resultiert aus translatorischen und rotatorischen Beschleunigungen:

$$M_B = J_{red} \cdot \alpha_{ab} = (J_{rot} + J_{trans}) \cdot \alpha_{ab} \quad (5.2)$$

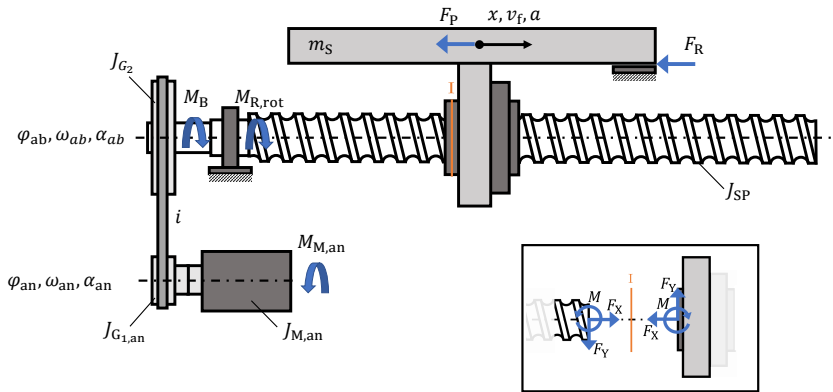


Abbildung 5.6: Schematischer Aufbau einer Vorschubachse

Die Berechnung der auf den Abtrieb reduzierten Trägheitsmomente J_{red} von Motor J_M , Getriebe $J_{G_{1|2}}$, Spindel des KGTs J_{SP} und der Masse des Schlittens m_S erfolgt über den Satz der Energieerhaltung

$$E_{\text{kin}} = \text{konst.} = \sum_{i=0}^n \frac{1}{2} \cdot J_i \cdot \omega_i^2 \quad (5.3)$$

nach Gleichung 5.4. Je nach Bauweise der Maschine sind weitere Trägheiten aufgrund der Massen von Tisch m_T oder Werkstück m_W zu berücksichtigen.

$$J_{\text{red}} = \underbrace{(J_M + J_{G_1}) \cdot i^2 + J_{G_2} + J_{SP}}_{=J_{\text{rot}}} + \underbrace{m_S \cdot \left(\frac{P_h}{2\pi}\right)^2}_{=J_{\text{trans}}} \quad (5.4)$$

Reibungskräfte

Durch das Zusammenspiel mehrerer Komponenten in einer Vorschubachse sind verschiedene Reibungsverluste aufgrund der rotatorischen und translatorischen Bewegung in M_R zu berücksichtigen. Dabei sind wie in Gleichung 5.5 dargestellt die Reibungsverluste von Schlittenführung, Schutzabdeckung, Lagerungen, Kugelumlaufmutter, Abstreifern und Dichtungen zusammengefasst. Da eine separate Messung der Reibungsverluste nicht möglich ist, wird das gesamte Reibmoment M_R experimentell ermittelt und der Anteil

der jeweiligen Komponenten basierend auf Herstellerangaben und Kennwerten aus der Literatur abgeschätzt. In [Huf12] wurden die Anteile für eine vergleichbaren Maschinentyp angegeben, woraus ein Anteil von 32 % für das translatorische und 68 % für das rotatorische Reibmoment ermittelt wurde.

$$M_R = \underbrace{M_{R,\text{Lager}} + M_{R,\text{Mutter}} + M_{R,\text{Dichtung}}}_{M_{R,\text{rot}}} + \underbrace{M_{R,\text{Führung}} + M_{R,\text{Abdeckung}}}_{M_{R,\text{trans}}} \quad (5.5)$$

Das aus der externen Kraft F_p resultierende Drehmoment bezogen auf den KGT berechnet sich mit der Spindelsteigung P_h nach Gleichung 5.6. Für weitere am Schlitten angreifende Kräfte wie Reib- oder Beschleunigungskräfte erfolgt die Umrechnung analog.

$$M_P = \frac{P_h}{2\pi} \cdot F_p \quad (5.6)$$

Durch Umformen der Gleichung (5.1) und Einsetzen kann nach der Prozesskraft F_p aufgelöst werden:

$$F_p = \frac{2\pi}{P_h} (i \cdot I \cdot k_T - (J_{\text{rot}} + J_{\text{trans}}) \cdot \alpha_{ab} - M_{R_{\text{rot}}} - M_{R_{\text{trans}}}) \quad (5.7)$$

Aus den Schnittgrößen an der in Abbildung 5.6 markierten Stelle zwischen Gewindespindel und Gewindemutter, kann die am KGT wirkenden Axialkraft F_a berechnet werden (Gleichung 5.8).

$$F_a = \frac{2\pi}{P_h} (i \cdot I \cdot k_T - J_{\text{rot}} \cdot \alpha_{ab} - M_{R_{\text{rot}}}) \quad (5.8)$$

Die Berechnung der Axialkraft kann auch in Abhängigkeit von der Prozesskraft ausgedrückt werden:

$$F_a = F_p + \frac{2\pi}{P_h} (J_{\text{trans}} \cdot \alpha_{ab} + M_{R_{\text{trans}}}) \quad (5.9)$$

Vorspannung

Je nach Anwendungsfall ist eine zusätzliche axiale Belastung am KGT durch die Vorspannung zu berücksichtigen. Bei WZM werden KGT aufgrund der hohen Anforderungen an die Genauigkeit vorgespannt, um die Steifigkeit zu

erhöhen und die Positioniergenauigkeit durch Eliminierung von Umkehrspielen zu verbessern. Die Folge ist ein höherer Verschleiß und eine geringere Lebensdauer [Sch21b]. Abhängig von der Vorspannungsart ist die dadurch entstehende zusätzliche Belastung nach einer in ISO3408-5 angegebenen Formel zu berücksichtigen. Bei einem vorgespannten KGT ist die Richtung der Belastung zu beachten, da abhängig von der aufgebrachten axialen Belastung eine Seite zusätzlich belastet, während die andere entlastet wird [ISO3408].

5.4.2 Ermittlung der Reibkennlinie

Zur Bestimmung der relevanten Belastungskenngrößen ist die Beschreibung der durch Reibung auftretenden Belastung erforderlich (siehe Kapitel 2.4.4). Dabei wird über die Reibkennlinie das Reibungsverhalten des Gesamtsystems und somit die Summe aller wirkenden Reibungseffekte beschrieben. Die experimentelle Messung an der Versuchsmaschine erfolgt mit Hilfe eines Referenzprogramms, in dem die Achsen mit unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten verfahren werden. Da es zu einer Beeinflussung der Motorströme beispielsweise durch simultane Verfahrbewegungen in anderen Achsen kommen kann, werden die Hubbewegungen der Vorschubachsen sequenziell ausgeführt. Um weitere Einflüsse wie Temperatur zu reduzieren und gleiche Startbedingungen zu schaffen, werden vor den Messfahrten Vorschubbewegungen zum Aufwärmen über den kompletten Verfahrensweg durchgeführt.

In Abbildung 5.7 sind auf der linken Seite Zeitreihen einer Hubbewegung in positiver und negativer Vorschubrichtung dargestellt. Die Bereiche mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit sind markiert. Hier fließt der Antriebsstrom, welcher zur Aufrechterhaltung der Geschwindigkeit erforderlich ist. Der Mittelwert entspricht einem Punkt auf der Reibkennlinie auf der rechten Seite der Abbildung. Dabei werden die maximalen und minimalen Werte durch den grauen Bereich dargestellt. Die Kennlinie weist einen typischen Verlauf der Stribeck-Kurve auf und kann durch Parametrierung der analytischen Ansätze in Kapitel 2.4.4 modelliert werden. Mit den aus den Reibversuchen verfügbaren Messpunkten wird die Modellierung der Reibkennlinie durch eine lineare Interpolation der Messwerte realisiert.

Über die Lebensdauer kann unter anderem aufgrund von Verschleiß der Dichtungen oder Abnahme der Vorspannung eine Veränderung des Reibungsverhaltens auftreten, weshalb eine regelmäßige Messung der Reibkennlinie erforderlich ist.

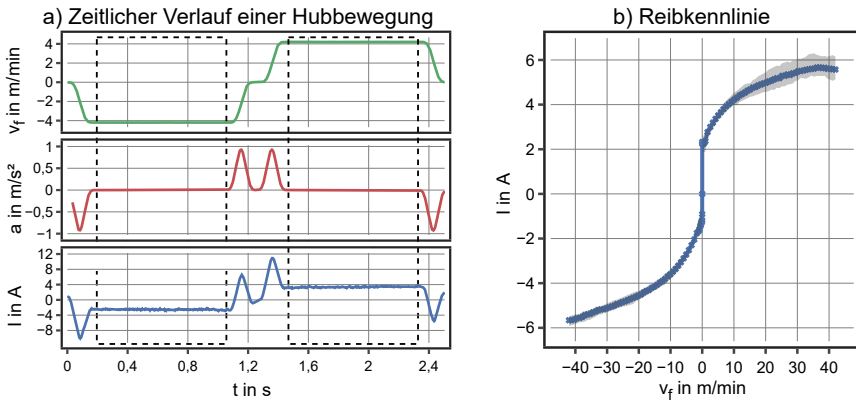


Abbildung 5.7: Ermittlung der Reibkennlinie einer Vorschubachse

5.4.3 Validierung des Belastungsmodells

Im folgenden Abschnitt erfolgt eine Validierung der Methoden zur Berechnung der Belastung der Vorschubachsen anhand einer um 15° zur x-Achse rotierten Kreisbahn, sodass alle Vorschubachsen gleichzeitig aktiv sind. Dafür ist in Abbildung 5.8 a) der zeitliche Verlauf des gesamten Drehmomentes aller drei Vorschubachsen dargestellt. Als Referenz wird das tatsächliche Drehmoment über den Antriebsstrom an der Maschine ermittelt und mit der Simulation verglichen. Das simulierte Drehmoment ergibt sich aus den im VNCK berechneten Größen sowie dem Reibmodell, ohne einen externen Einfluss durch die Prozesskraft. Der qualitative Vergleich zeigt, dass der Ansatz geeignet ist, den Verlauf des gemessenen Antriebsmomentes zu modellieren. Die Metriken zur Bewertung sind in Tabelle 5.1 aufgeführt und bestätigen die Eignung durch hohe Werte ($> 0,9$) für das Bestimmtheitsmaß R^2 , sowie geringe Werte des mittleren absoluten Fehlers (eng. Mean absolute error, MAE). Dabei weist die x-Achse im Vergleich die größten Abweichungen sowohl für die Metrik MAE, als auch für den quadratischen Mittelwert (eng. Root mean square, RMS) und den maximalen absoluten Fehler (MaxError) mit 2,881 Nm auf.

Für eine genaue Betrachtung der höchsten Abweichungen ist exemplarisch der in Abbildung 5.8 a) markierte Bereich in 5.8 b) vergrößert dargestellt. Hohe Abweichungen treten vorwiegend in den Umkehrpunkten oder bei kurzen Verweilzeiten zwischen Beschleunigungsvorgängen auf. Vor allem die Bereiche

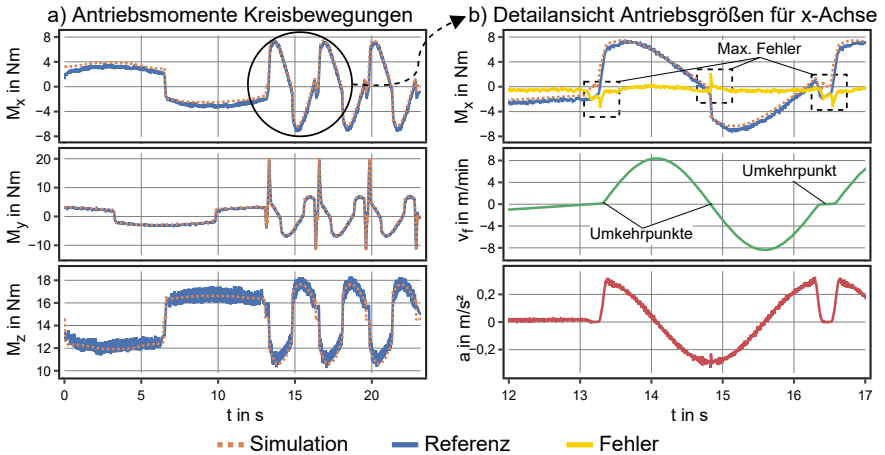


Abbildung 5.8: Bewertung Simulationsmodell Vorschubachse

Tabelle 5.1: Metriken zur Bewertung der Ergebnisse

| Achse | R2 | MAE | RMSE | MaxError |
|-------|-------|----------|----------|----------|
| X1 | 0,971 | 0,562 Nm | 0,644 Nm | 2,881 Nm |
| Y1 | 0,994 | 0,252 Nm | 0,333 Nm | 2,380 Nm |
| Z1 | 0,964 | 0,377 Nm | 0,449 Nm | 2,100 Nm |

mit Verweilzeit zeigen ein von der Geschwindigkeit unabhängiges Verhalten, welches durch das implementierte Modell nicht abgebildet wird. Da die wirkenden Kräfte im statischen Zustand bei $v_f = 0$ auf die äquivalente Belastung (Gleichung 2.3), die abhängig vom Produkt aus Geschwindigkeit und der dritten Potenz der Kraft ist, keinen Einfluss haben, können die Abweichungen bei der Berechnung der nominellen Lebensdauer von KGTs vernachlässigt werden. Um Abweichungen zu reduzieren und somit die Ergebnisse der Simulation beispielsweise für die Berechnung der Zerspankräfte zur Prozessüberwachung oder zur Berechnung der Belastung an der Motorspindel einzusetzen, sind entsprechende Methoden in Kapitel 6.2 beschrieben. Über diesen Ansatz wird das aufgestellte Momentengleichgewicht validiert, indem die mit einer Kraftmessplattform gemessenen Prozesskräfte mit den nach Gleichung 5.7 berechneten Prozesskräften verglichen werden (siehe Kapitel 6.2).

5.5 Belastung an der Hauptspindel

Zu den Aufgaben der Hauptspindel zählen die Rotation des Werkzeugs und die Übertragung der für die Zerspanung erforderlichen Energie in die Schneidzone, weshalb die Hauptspindel einen starken Einfluss auf das realisierbare Zeitspanvolumen und die Qualität der produzierten Werkstücke hat [Abe10]. Da es sich um ein komplexes Spindel-Lager-System mit mechanischen, elektrischen und hydraulischen Komponenten handelt, wird das Betriebsverhalten durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Dabei zählt die Spindellagerung mit den höchsten Ausfallraten [Abe06; Yan19] und durch die Aufnahme der axial und radial wirkenden Prozesskraft zu den ausfallkritischsten Komponenten der Hauptspindel. Daher wird im Folgenden der in Abbildung 5.9 visualisierte Ablauf zur Berechnung der Belastungen einer Hauptspindel erläutert.

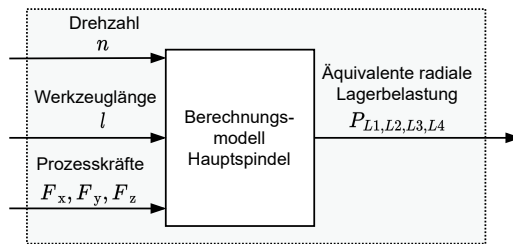


Abbildung 5.9: Blockdiagramm zur Berechnung der Belastung einer Hauptspindel

5.5.1 Berechnung und Auslegung von Spindellagerungen

Für eine anwendungsorientierte Auslegung ist die Berechnung des Spindel-Lager-Systems erforderlich. In der Industrie wird für die Auslegung solcher Systeme kommerzielle Berechnungssoftware wie beispielsweise BEARINX von Schaeffler [Sch12] oder MESYS Wellenberechnung von MESYS AG [MES22] eingesetzt. Da die in der Literatur beschriebenen Ansätze und Methoden zur Berechnung der Kinematik von Wälzlagern oder der Wechselwirkung zwischen einzelnen Lagern und der Welle nicht Fokus dieser Arbeit sind, erfolgt an dieser Stelle keine ausführliche Beschreibung der Berechnungsgrundlagen. Stattdessen wird auf [Abe10; Sch11; Fal19] für weitere Informationen verwiesen.

Basis für eine Auslegung der Spindellagerung ist eine Modellierung des Spindel-Lager-Systems, die Informationen wie die geometrische Beschreibung der Komponenten, die Lageranordnung, Materialeigenschaften, sowie die Vorspannung umfasst. Der in Abbildung 5.10 dargestellte schematische Aufbau entspricht den Gegebenheiten an der Versuchsmaschine.

In der Auslegungsphase eines Spindel-Systems werden ausgehend von festgelegten Betriebsbedingungen (Kräften, Drehzahlen, Wellengeometrie, Temperaturen und Umgebungseinflüssen) schrittweise die Lageranordnung, Schmierung, Lagertyp und -größe hinsichtlich der zuvor definierten Anforderungen an die Anwendung bestimmt. Für die Überprüfung zulässiger Betriebsbereiche und die Bewertung der Lebensdauer werden mit Hilfe der Berechnungssoftware die resultierenden Belastungen, die Lagerkinematik (Bohr-Roll-Verhältnis, Kugelvor- und -nachlauf) und Flächenpressungen für die Auslegungsgrenzen ermittelt. Liegt die Belastung unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze des Werkstoffs, ist eine Lebensdauerberechnung nicht notwendig, da diese keine zuverlässige Vorhersage der Gebrauchsdauer ermöglicht. Weiterhin ist eine rechnerische Untersuchung der Steifigkeit und der Eigenfrequenzen möglich. [Sch18a]

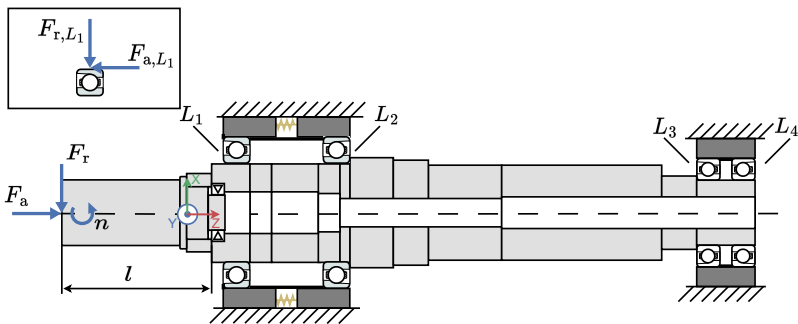


Abbildung 5.10: Schematische Darstellung einer Motorspindel

Somit stellt das bei der Auslegung erstellte Berechnungsmodell eine wesentliche Grundlage dar, um mit Hilfe der Berechnungssoftware den Einfluss der Prozessgrößen Axialkraft F_a , Radialkraft F_r , Werkzeuglänge l und Spindeldrehzahl n auf die resultierende Belastung der einzelnen Lager zu bestimmen. Für die Berechnung der äquivalenten radialen Lagerbelastung P im Betrieb werden die Simulationen für die in Tabelle 5.2 angegebene Para-

Tabelle 5.2: Parametervariation

| Parameter | Min | Max | Schrittweite |
|-----------------------------------|------|--------|--------------|
| Werkzeuiglänge l in mm | 0 | 300 | 50 |
| Drehzahl n in min^{-1} | 0 | 20.000 | 1.000 |
| Axialkraft F_a in kN | -2,0 | 2,0 | 0,2 |
| Radialkraft F_r in kN | 0,0 | 4,0 | 0,2 |

metervariation durchgeführt.² Das ermittelte Betriebsverhalten ist in Abbildung 5.11 exemplarisch bei einer Drehzahl von $n = 20.000 \text{ min}^{-1}$ und einer Werkzeuiglänge von $l = 150 \text{ mm}$ für Lager L1, Lager L2 und Lager L3 dargestellt, um das Betriebsverhalten zu veranschaulichen. Da Lager L3 und Lager L4 in der Darstellung ein vergleichbares Verhalten zeigen, wird in Abbildung 5.11 auf die Darstellung des Lagers verzichtet. Alle vier Lager weisen bei zunehmender Radialkraft F_r eine steigende Lagerbelastung P auf, wobei die größten Belastungen über Lager L1 aufgenommen werden. Ausgenommen davon sind Belastungen mit negativer Axialkraft F_a , die zu einer Entlastung von Lager L1 und einer stärkeren Belastung von Lager L2 führen.

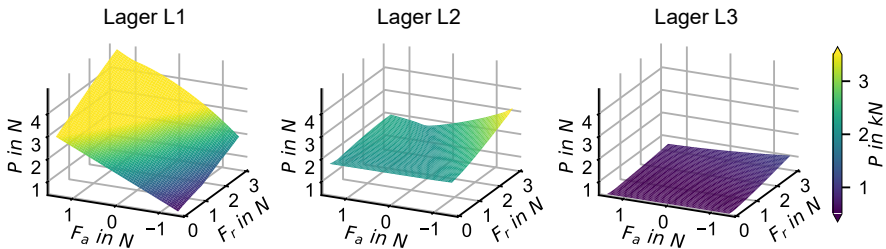


Abbildung 5.11: Verhalten der äquivalenten Lagerbelastung der simulierten Motorspindel

²Die Simulationsergebnisse basieren auf einem von Schaeffler erstellten Berechnungsmodell für die Motorspindel der Versuchsmaschine. Die Simulationen wurden im Rahmen des Forschungsprojektes Pay-per-Stress mit der Software BEARINX durchgeführt.

5.5.2 Simulationsbasierte Ermittlung der Lagerbelastung

Die Berechnung der Belastung der einzelnen Lager ist nicht in Echtzeit erforderlich, muss aber für die Umsetzung des Gesamtsystems mit den weiteren Berechnungsschritten gekoppelt werden. Mit der für die Auslegung eingesetzten kommerziellen Berechnungssoftware konnte im Rahmen der Arbeit keine systemübergreifende Kopplung des vom Hersteller erstellten Berechnungsmodells mit den anderen Berechnungsschritten realisiert werden. Allerdings können über die Variation der Simulationsparameter aus Tabelle 5.2 die Belastungen unter diesen Betriebsbedingungen im Vorfeld berechnet werden. Basierend auf dem statischen Datensatz kann mittels Verfahren des maschinellen Lernens das Verhalten abgebildet und so mit den folgenden Berechnungsschritten gekoppelt werden. Ein Vorteil dabei ist, dass vor allem bei komplexen Simulationen mit einem hohen Rechenaufwand die Daten nicht erneut berechnet werden müssen, sondern durch ein angeleitetes statisches Modell abgebildet werden. Durch den reduzierten Berechnungsaufwand können die Ergebnisse schnell und effizient bereitgestellt werden.

Mit 80 % der Simulationsdaten wurde je Lager ein ANN mit der Lagerbelastung P als Ausgangsgröße trainiert. In Tabelle 5.3 sind Metriken zur Bewertung der Genauigkeit der Regression für die gesamten Simulationsdaten aufgeführt. Die höchstmöglichen Werte für R^2 und geringen Werte für MAE zeigen, dass die trainierten Modelle für alle Lager die Zusammenhänge aus den Simulationsdaten abbilden.

Tabelle 5.3: Metriken zur Bewertung der Genauigkeit der Modelle

| Lager | R2 | MAE | RMSE | MaxError |
|-------|-------|---------|---------|----------|
| L1 | 1,000 | 4,635 N | 6,166 N | 51,541 N |
| L2 | 1,000 | 3,440 N | 5,027 N | 45,947 N |
| L3 | 1,000 | 1,284 N | 1,609 N | 10,785 N |
| L4 | 1,000 | 1,480 N | 2,002 N | 15,991 N |

6 Prototypische Implementierung

In diesem Kapitel werden die notwendigen Schritte zur Implementierung des Prototyps beschrieben. Dabei werden die erforderlichen Anpassungen zur Kopplung des im vorherigen Kapitel vorgestellten Modells mit den realen Daten einer WZM erläutert. Zusätzlich wird der Aufbau der technischen Infrastruktur zur Erfassung und Verarbeitung der Daten beschrieben.

6.1 Gesamtstruktur des Prototyps

Bei der Implementierung des Prototyps erfolgt im Vergleich zum in Abschnitt 5.1 vorgestellten Aufbau eine Kopplung mit den Datenquellen der realen WZM anstelle der Simulationen (siehe Abbildung 6.1). Dabei wird der VNCK durch die reale NC ersetzt, sodass unter anderem die zurückgeführten Ist-Positionen und die Antriebsströme der jeweiligen Achsen verfügbar sind, die zur Ermittlung der Belastungen genutzt werden. Die Prozesssimulation wird durch ein Modell zur Berechnung der Prozesskräfte aus den NC-Daten ersetzt.

6.2 Berechnung der Prozesskräfte aus Antriebsdaten

Wie in Kapitel 5.4 bereits erläutert, können die über die NC verfügbaren internen Antriebsdaten zur Ermittlung der axialen Belastung der Vorschubachsen genutzt werden. Für die Überwachung der Belastung anderer Komponenten wie der Hauptspindel, ist es erforderlich, die Prozesskräfte isoliert, ohne die in der Vorschubachse zusätzlich wirkenden Belastungen, zu ermitteln. Beispielsweise sind bei Simulation der Lagerbelastungen mit Hilfe des Spindelmodells nur die Prozesskräfte als Eingangsgrößen relevant, weshalb Belastungen in den Vorschubachsen durch Beschleunigungsvorgänge oder Reibung herauszurechnen sind. Die Berechnung der Prozesskraft ist entsprechend der Versuchsmaschine für ein 3-Achs-Bearbeitungszentrum in Fahrständerbauweise umgesetzt. Bei der Übertragung auf weitere Maschinentypen sind abhängig von der Bauweise zusätzliche Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Bei 5-Achs-

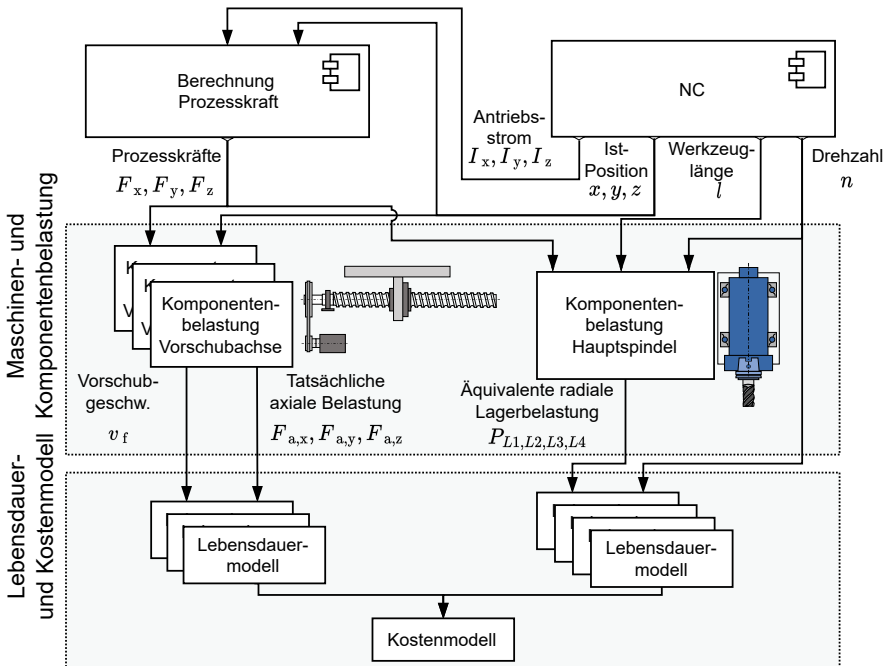


Abbildung 6.1: Blockdiagramm zur prototypischen Implementierung

Bearbeitungen wird das zu betrachtende kinematische Modell durch die zusätzlichen Achsen komplexer, was den Aufwand entsprechend erhöht [Asl18].

Als Ersatz der Prozesssimulation stellt die Ermittlung der Prozesskraft somit einen zusätzlichen Berechnungsschritt dar. In Abbildung 6.2 sind die notwendigen Anpassungen zur Implementierung in Form eines Blockdiagramms dargestellt. Im Gegensatz zur Simulation wird basierend auf dem Antriebsstrom I der jeweiligen Vorschubachse die Prozesskraft F_P und die tatsächlich wirkende axiale Belastung $F_{a(1),(2)}$ ermittelt. Für die Berechnung der Prozesskräfte ist das gesamte Reibmoment M_R und Beschleunigungsmoment M_B vom erfassten Antriebsmoment M_M abzuziehen. Die dafür notwendigen Kenngrößen sind im Simulationsmodell bereits abgebildet. Um Ungenauigkeiten vor allem bei Positionierbewegungen im Eilgang zu reduzieren, wird eine kontextbasierte Filterung auf Basis der aktiven G-Funktionen implementiert. Grundlegende Annahme dafür ist, dass es sich beim programmierten Vorschub im Eilgang

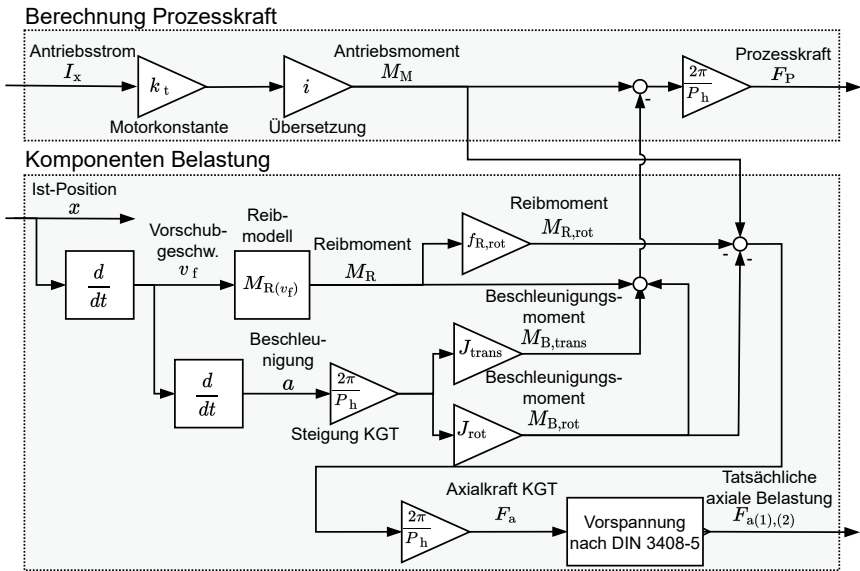


Abbildung 6.2: Blockdiagramm zur Berechnung der Belastungen an einer Vorschubachse aus Antriebsdaten

mit G0 um eine Positionierbewegung und keinen Bearbeitungsprozess mit Materialeingriff handelt, sodass keine Prozesskräfte wirken.

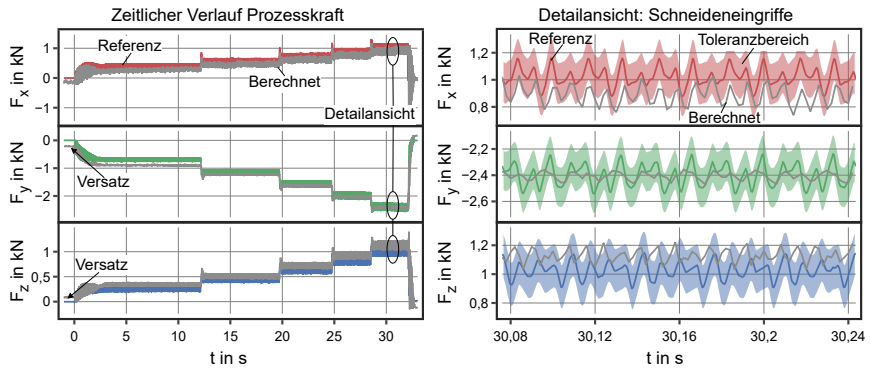
Bei der Berechnung der Prozesskräfte aus den Antriebsdaten können aufgrund verschiedener Einflussfaktoren Abweichungen auftreten. Zur Analyse der Ungenauigkeiten während des Bearbeitungsprozesses wurden bei der experimentellen Ermittlung der Kraftkoeffizienten in Kapitel 5.3.2 zusätzlich die internen Antriebsdaten der NC aufgezeichnet. Die mit Hilfe der Kraftmessplattform erfassten Prozesskräfte stellen dabei unter Berücksichtigung der in der Messkette auftretenden Ungenauigkeiten die Referenzgröße zur Validierung der ermittelten Prozesskraft dar. In Abbildung 6.3 und Abbildung 6.4 sind exemplarisch die zeitlichen Verläufe der berechneten Prozesskräfte für das Vollnutfräsen mit dem Schaftfräser $D = 16$ mm und den angegebenen Schnittparametern abgebildet. Der dargestellte Bearbeitungsprozess zeichnet sich durch einen hohen statischen Anteil der Prozesskraft und einem geringen dynamischen Anteil aus. Darstellungen weiterer Bearbeitungsoperationen der durchgeführten Versuchsreihen befinden sich im Anhang A.2.

Der zeitliche Verlauf der berechneten Prozesskräfte zeigt bei beiden Werkstoffen eine hohe Übereinstimmung. Allerdings weisen die ermittelten Prozesskräfte bereits vor dem Eintritt in das Material einen Versatz auf. Dieser ergibt sich aus dem Antriebsstrom, da auch in Stillstandsphasen, abhängig von der Bewegungshistorie der jeweiligen Vorschubachse, die Antriebsströme unterschiedliche Werte aufweisen können. In den analysierten Daten wurde bei gleichen Prozessbedingungen ein Versatz von bis zu 200 N festgestellt, sodass für eine genauere Erfassung geringer Prozesskräfte zusätzliche Maßnahmen notwendig sind, die nicht aufgrund der Prozesskraft wirkenden Einflüsse zu kompensieren. Hierzu werden in der Literatur verschiedene Ansätze genannt, wie beispielsweise eine in [Kae05] vorgestellte Stillstandskorrektur zur Reduzierung abweichender Signale des Antriebsstroms im Stillstand durch einen gleitenden Mittelwert.

In der Detailansicht ist der bedingt durch die Schneideneingriffe dynamische Anteil der Prozesskraft dargestellt. Es zeigt sich, dass bei der Bearbeitung des Vergütungsstahls 42CrMo4 der dynamische Anteil der Prozesskraft abgebildet werden kann, da die Zahneingriffsfrequenz ($f_{\text{Zahn}} = 120 \text{ Hz}$) deutlich unterhalb der halben Abtastfrequenz der verfügbaren Antriebsdaten liegt. Die Bearbeitung von Aluminium AlCuMgPb stellt hingegen aufgrund der hohen Schnittgeschwindigkeit und resultierend hoher Werkzeugdrehzahl einen Prozess dar, bei dem die Zahneingriffsfrequenz ($f_{\text{Zahn}} = 895 \text{ Hz}$) deutlich oberhalb der Abtastfrequenz von 500 Hz liegt und der dynamische Anteil in den berechneten Prozesskräften nicht mehr abgebildet wird.

Zur Verifizierung des vorgestellten Ansatzes werden die Mittelwerte und Amplituden bei konstanten Eingriffsbedingungen für die betrachteten Werkzeug-Werkstoff-Kombinationen mit verschiedenen Schnittparametern ausgewertet. Dafür sind in Abbildung 6.5 die mit Hilfe der Kraftmessplattform ermittelten Kräfte als Referenz über den berechneten Kräften für jeweils 195 Prozessschritte aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen qualitativ eine hohe Korrelation in allen Achsen für beide Werkstoffe. Es ist jedoch anzumerken, dass die Amplituden für 42CrMo4 die höchsten Abweichungen aufweisen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 bestätigt als Kennzahl für die Anpassungsgüte einen signifikanten Zusammenhang zwischen aus den Antriebsdaten ermittelten Prozesskräften und den mittels Dynamometer erfassten Prozesskräften als Referenzgröße.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Vergleich die gemessenen Belastungen für den Aluminiumwerkstoff geringer sind. Das Bestimmtheitsmaß weist für diesen Werkstoff eine deutlich geringere Anpassungsgüte auf. Ein möglicher Grund dafür ist, dass die Amplituden bei 42CrMo4 für alle betrachteten Bearbei-



Prozess: Vollnutfräsen

Material: 42CrMo4

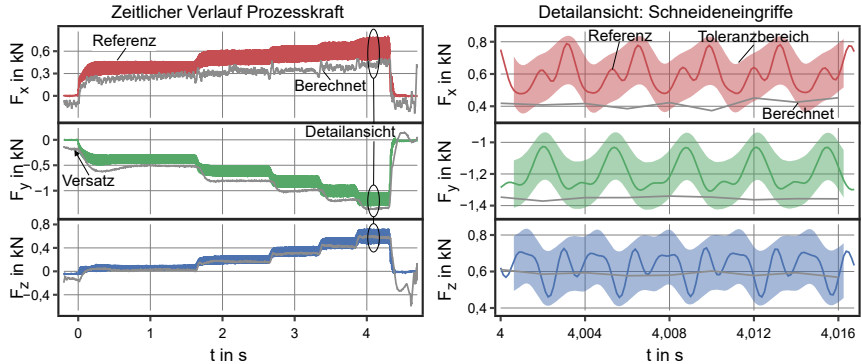
Werkzeug: Schaftfräser

Schnittparameter:

$a_e = 16 \text{ mm}$ $v_c = 90 \text{ m/min}$

$a_p = 10 \text{ mm}$ $f_z = 0,02 \dots 0,10 \text{ mm}$

Abbildung 6.3: Zeitverlauf der aus Antriebsdaten berechneten Prozesskräfte für den Werkstoff 42CrMo4



Prozess: Vollnutfräsen

Material: AlCuMgPb

Werkzeug: Schaftfräser

Schnittparameter:

$a_e = 16 \text{ mm}$ $v_c = 800 \text{ m/min}$

$a_p = 10 \text{ mm}$ $f_z = 0,02 \dots 0,10 \text{ mm}$

Abbildung 6.4: Zeitverlauf der aus Antriebsdaten berechneten Prozesskräfte für den Werkstoff AlCuMgPb

tungsprozesse im Gegensatz zum Aluminiumwerkstoff erkennbar außerhalb

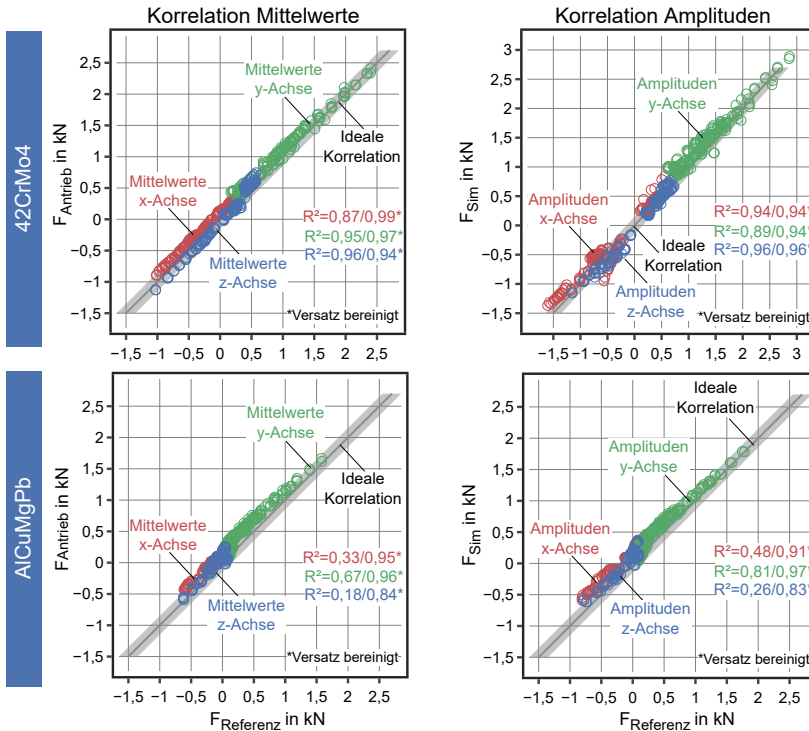


Abbildung 6.5: Korrelation ermittelter Prozesskräfte aus Antriebsdaten

des Bereiches von ± 200 N liegen, während das bei dem Aluminiumwerkstoff nicht der Fall ist. Dieser Unterschied führt dazu, dass der Versatz in den Werten der Antriebsströme von bis zu 200 N das Bestimmtheitsmaß beeinflusst und in einer erheblich reduzierten Anpassungsgüte resultiert. Um eine bessere Bewertung der Korrelation zu ermöglichen, wurden die Ergebnisse für AlCuMgPb um den Versatz vor Materialeintritt bereinigt. Dafür wurde ein Mittelwert der Antriebsströme über mehrere Zeitschritte vor Materialeintritt gebildet und von der jeweiligen Zeitreihe subtrahiert, sodass die berechnete Prozesskraft keinen Versatz aufweist. Dieses Vorgehen führt zu einem höheren Bestimmtheitsmaß und zeigt ähnlich zu dem Werkstoff 42CrMo4 einen signifikanten Zusammenhang.

Zusammenfassend zeigt die Analyse, dass der Ansatz eine zuverlässige Aussage über die wirkenden Prozesskräfte ermöglicht. Einschränkungen ergeben sich dabei durch den Versatz der Antriebsströme im unbelasteten Zustand und die aufgrund der Abtastfrequenz eingeschränkte Abbildung hochfrequenter Anteile der Prozesskraft. Die daraus resultierenden Abweichungen für die Analyse der Belastung einzelner Komponenten werden für den betrachteten Anwendungsfall vernachlässigt, da der Einfluss der maximal auftretenden Belastungen unter Berücksichtigung der Vorspannung größer ist. Falls erforderlich kann die Genauigkeit durch die Implementierung verschiedener Maßnahmen, wie zum Beispiel Trigger im NC-Programm zur Kompensation des Versatzes oder die Integration zusätzlicher Sensorik, gesteigert werden [Kae05; Koh22].

6.3 Erfassung der internen Signale einer NC

Für die prototypische Umsetzung ist die kontinuierliche Erfassung der internen Signale einer NC eine wesentliche Grundlage. Daher wird im folgenden Abschnitt zunächst der Einfluss des Abtastintervalls auf die Genauigkeit der ermittelten Belastung untersucht. Basierend auf den Ergebnissen wird anschließend eine Edge-Lösung zur Erfassung der internen Signale der NC präsentiert.

6.3.1 Einfluss des Abtastintervalls auf die Genauigkeit

Für die Auswahl einer geeigneten Schnittstelle zur Erfassung der internen Signale wird zunächst der Einfluss des Abtastintervalls auf die Genauigkeit des berechneten Belastungsintegrals respektive auf die äquivalente Belastung untersucht. Dabei wird exemplarisch das Belastungskollektiv, sowie die äquivalente Belastung in zwei Szenarien betrachtet. Im ersten Szenario wird die dynamische Belastung einer Achse während einer Positionierbewegung im Eilgang (42 m/min) aufgenommen. Das Abtastintervall wird dabei von dem minimal verfügbaren Abtastintervall im Lageregeltakt (2 ms) bis zu einem Abtastintervall von 100 ms variiert, was der höchstmöglichen Abtastrate des verfügbaren OPC UA Servers entspricht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.6 visualisiert und zeigen den Verlauf der abgetasteten Zeitpunkte der Vorschubgeschwindigkeit und der am KGT wirkenden Axialkraft, sowie die daraus resultierenden Belastungskollektive mit der äquivalenten Belastung. Größere Abtastintervalle können dazu führen, dass der Einfluss der Beschleunigung nicht in notwendiger Genauigkeit abgebildet werden kann. Aufgrund des grö-

beren Abtastintervalls wird die Beschleunigung unterschätzt, was zu einer höheren äquivalenten Belastung führt. Grund dafür ist, dass bei der Berechnung der Axialkraft aus dem Motorstrom das Beschleunigungsmoment entsprechend Gleichung (5.9) unterschätzt wird und dadurch die äquivalente Belastung bei einem Abtastintervall von 100 ms um 34 % zunimmt.

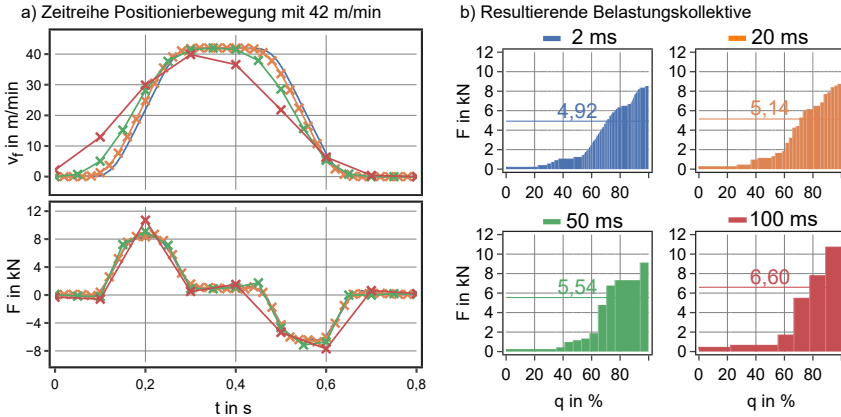


Abbildung 6.6: Einfluss des Abtastintervalls auf die Genauigkeit bei Positionierbewegungen

Im zweiten Szenario wird der Einfluss des Abtastintervalls auf die Genauigkeit der äquivalenten Belastung für einen Bearbeitungsprozess exemplarisch untersucht. Für die in Abbildung 6.7 dargestellte radiale Prozesskraft liegt die Zahnengriffsfrequenz f_{Zahn} bei 136,41 Hz und ergibt sich aus der Anzahl der Schneiden am Werkzeug und der Drehzahl. In der Detailansicht ist der Verlauf für eine Werkzeugumdrehung mit 9 Schneiden dargestellt und zeigt, dass entsprechend dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem die Schneideneingriffe bei zu großen Abtastintervallen nicht mehr rekonstruiert werden können [Nyq28]. Dies zeigt sich ebenfalls in Abweichungen zwischen den berechneten Belastungskollektiven für eine Werkzeugumdrehung. Wird hingegen ein Zeitraum betrachtet, der die Dauer einer Werkzeugumdrehung um ein Vielfaches übersteigt, ist bei konstanten Eingriffsbedingungen die Differenz der Belastungskollektive vernachlässigbar. Anzumerken ist allerdings, dass das Verhalten des untersuchten Prozesses nicht auf alle Signalverläufe übertragbar ist. Daher werden bei der Prozesssimulation und bei der Aufzeichnung der Prozesskräfte Abtastintervalle gewählt, die mindestens den Abtastintervallen

der Antriebsregelung von $125 \mu\text{s}$ entsprechen. Über die NC sind die Antriebs-signale allerdings nur mit einem Abtastintervall im Lageregeltakt von 2 ms verfügbar, wodurch der dynamische Anteil aller möglichen Bearbeitungsprozesse nicht vollständig abgedeckt wird.

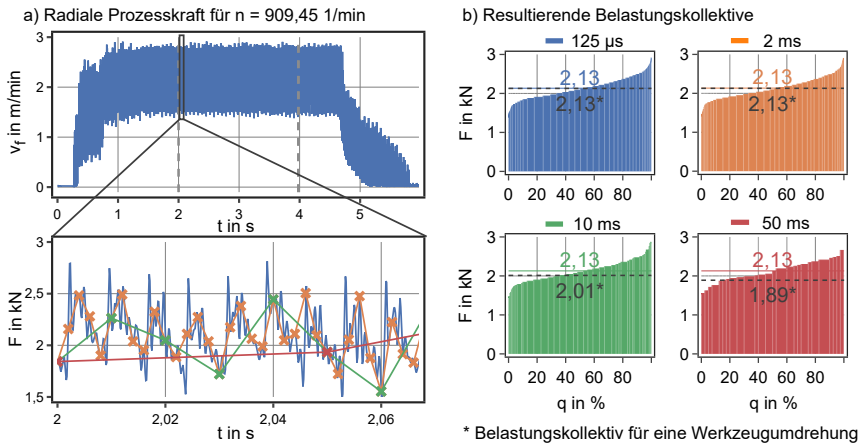


Abbildung 6.7: Einfluss des Abtastintervalls auf die Genauigkeit bei Schneideneingriff

6.3.2 Edge-Lösungen für Werkzeugmaschinen

Zur Erfassung der internen Signale einer NC bestehen bei modernen WZM verschiedene Möglichkeiten. Eine hersteller- und plattformunabhängige Kommunikation ist über den Standard Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) möglich, bei dem eine semantische Beschreibung der Daten als spezifische Informationsmodelle in OPC UA Companion Specifications erfolgt [OPC22; VDM23]. Einschränkungen ergeben sich allerdings durch das minimale Abtastintervall, welches bei den für eine SINUMERIK 840D verfügbaren OPC UA Servern bei 100 ms limitiert ist [Sie22b].

Eine Alternative stellen herstellerspezifische Schnittstellen dar. Bei Steuerungen des Herstellers Siemens existiert eine solche Schnittstelle mit dem Namen *SinumerikAdapter*, der als Anwendung auf der *Industrial Edge for Machine Tools* (im Folgenden als *Industrial Edge* bezeichnet) eine Verbindung zu einer SINUMERIK-Steuerung aufbaut und die internen Daten auf dem Edge-System

bereitstellt. Die Industrial Edge ist eine von Siemens entwickelte Edge Computing Plattform für WZM, die unter einem Linux-Betriebssystem auf industrietauglicher Hardware betrieben wird. Eine Anwendungs-Hosting-Engine ermöglicht die Bereitstellung und das Management von Edge Apps (Anwendungen auf der Industrial Edge). Über verschiedene als Edge Apps verfügbare Adapter können Datenströme verschiedener Automatisierungssysteme erfasst und in containerbasierten Edge Apps werkstattnah verarbeitet werden. Für die Erfassung der internen Daten einer SINUMERIK-Steuerung kommuniziert der *SinumerikAdapter* über das maschineninterne Netzwerk mit dem auf der Hardwareeinheit der NCU (engl. Numerical Control Unit, NCU) installierten Compilezyklus *HF-Probe*. Physisch wird der Industrie-PC (IPC) über die X120 Schnittstelle der NCU verbunden. Das Application Software Development Kit (im Folgenden AppSDK bezeichnet) beschreibt die APIs für die Entwicklung von *Edge Apps*. Mit Hilfe des *AdapterFrameworks* werden Datenquellen auf dem internen Datenbus für andere Edge Apps bereitgestellt. Der Zugriff erfolgt über den *Parameter-Service* als synchroner Anfrage/Antwort-Kommunikationsbroker oder als ereignisgesteuerte Kommunikation über den *Subscription-Service*. Der *SinumerikAdapter* ermöglicht einen niederfrequenten Zugriff auf die Variablen der Bedientafelschnittstelle (im Folgenden als BTSS-Variablen bezeichnet) der verbundenen SINUMERIK Steuerung durch die Implementierung einer Provider-Instanz des *Parameter-Service*. Die Implementierung des *Subscription-Services* ermöglicht hingegen eine hochfrequente Erfassung von bis zu 100 Signalen mit konstanten Zeitabständen im Lageregeltakt von 2 ms. Die hochfrequenten Daten werden im JSON-Format als Datenpaket alle 200 ms bereitgestellt. [Sie22c; Sie22d]

6.4 Softwaretechnische Realisierung

In den vorangegangenen Teilen dieser Arbeit erfolgte die Entwicklung der grundlegenden Komponenten und der Aufbau der Gesamtstruktur. Auf dieser Grundlage widmet sich der nachfolgende Abschnitt der konkreten Realisierung der prototypischen Umsetzung und der Integration in die bestehende informationstechnische Infrastruktur.

6.4.1 Integration in die informationstechnische Infrastruktur

Für die Verarbeitung und Speicherung der Antriebsdaten und weiterer Signale aus der NC erfolgt die Integration der Industrial Edge entsprechend Abbildung 6.8 in die informationstechnische Infrastruktur des PTWs.

Mithilfe der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Edge App *MachiningContextAdapter* werden über den *Subscription-Service* die hochfrequenten Antriebsdaten der Steuerung erfasst und mit niederfrequenten Kontextinformationen aus der NC über die Taktzählvariable *CYCLE* verknüpft. Der *PtwExportServer* stellt die aufbereiteten Daten im .csv-Format als HTTP-basierte API bereit und ist aus dem Werkstattnetzwerk über einen Reverse Proxy erreichbar. Dieser gehört zu technischen Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheitsanforderungen, wie beispielsweise der Isolation des internen Maschinennetzwerkes (X2) vom externen Werkstattnetzwerk (X1) [Sie22d]. Durch den Einsatz der Containertechnologie können die zu implementierenden Anwendungen isoliert und modular in Containern direkt auf der Industrial Edge oder auf zusätzlicher Hardware im Cloud-Edge-Kontinuum ausgeführt werden. Für eine möglichst unabhängige Implementierung des Prototyps erfolgt die weitere Verarbeitung der Daten auf einem externen virtuellen Server im Rechenzentrum der Universität. Dabei kommt zur Erstellung und Containerisierung der Anwendungen die Docker-Engine¹ als Open-Source-Containertechnologie zum Einsatz.

Die Softwarekomponenten, die für die Realisierung der Konnektivität, der Speicherung, der Verarbeitung und der Visualisierung eingesetzt werden, sind in Abbildung 6.8 illustriert. Der offene Aufbau stellt das grundlegende Konzept der Systemarchitektur dar und ermöglicht die Realisierung weiterer Anwendungsfälle und Forschungsaktivitäten.

Als quelloffenes Datenbankmanagementsystem (DBMS) ist die Zeitreihendatenbank InfluxDB² speziell für Zeitreihen optimiert und erfüllt somit die Funktionen zur effizienten Speicherung der Daten. Die Umsetzung der Funktion Konnektivität erfolgt durch den serverbasierten Agenten Telegraf³, welcher das Sammeln, Aggregieren und Schreiben von Metriken basierend auf einem Plugin-System ermöglicht. Über das bereitgestellte HTTP-Input-Plugin werden kontinuierlich die kontextualisierten Daten der API des *PtwExportServers* abgefragt und zyklisch über das InfluxDB-Output-Plugin in die Datenbank geschrieben. Grafana⁴ ermöglicht als Open-Source-Anwendung die grafische Darstellung von Daten aus verschiedenen Datenquellen. Funktionen, die dar-

¹Weitere Informationen zur Docker-Engine unter: <https://docs.docker.com/engine/>.

²InfluxDB ist eine Zeitreihendatenbank von InfluxData. Weitere Informationen in der Dokumentation unter: <https://docs.influxdata.com/influxdb/>.

³Telegraf ist ein serverbasierter Agent von InfluxData zum Sammeln und Schreiben von Metriken. Weitere Informationen in der Dokumentation unter: <https://docs.influxdata.com/telegraf/>.

⁴Grafana ist eine Open-Source-Software zur Darstellung von Daten. Weitere Informationen in der Dokumentation unter: <https://grafana.com/docs/grafana/>.

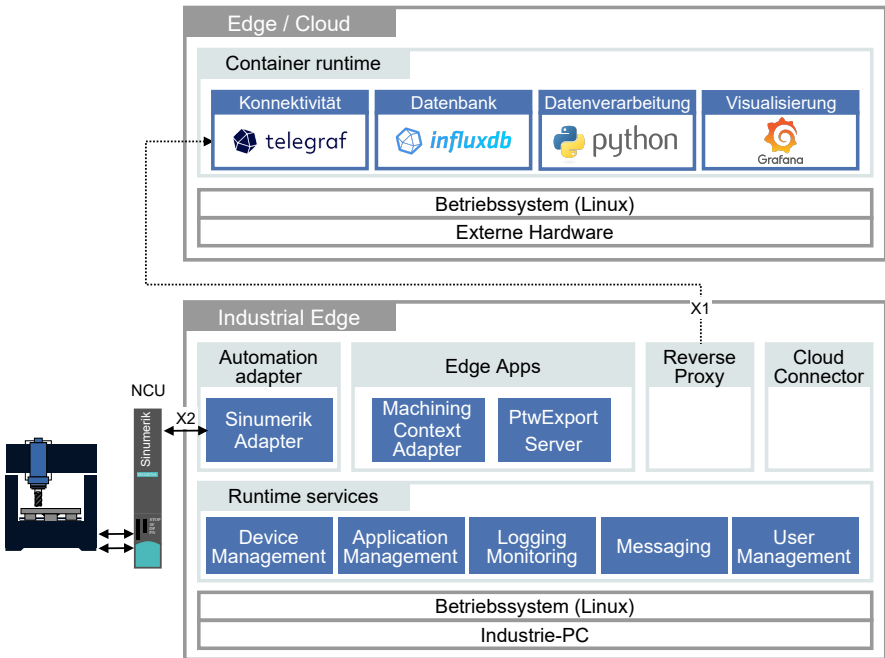


Abbildung 6.8: Architektur zur Erfassung und Verarbeitung der Daten in der Versuchsumgebung am PTW und Integration der Industrial Edge aus [Sie22c]

über hinaus zur Datenverarbeitung oder Visualisierung benötigt werden, sind als eigenständige Anwendung beispielsweise in der Programmiersprache Python implementiert.

6.4.2 Daten- und Informationsmodelle

Die Bezeichnungen der Antriebsdaten und NC-Signale können sich nicht nur herstellerübergreifend unterscheiden, sondern auch beim Zugriff innerhalb der NC eines Herstellers über unterschiedliche Schnittstellen variieren. Beispielsweise unterscheidet sich das Schema der Bezeichnung der über den *HF-Probe* verfügbaren hochfrequenten Datenpunkte zu den entsprechenden BTSS-Variablen. Damit die entwickelte Lösung unabhängig vom Steuerungshersteller oder der genutzten Schnittstelle ist, werden die erfassten NC-Signale

in einem generischen Datenmodell in die Zeitreihendatenbank geschrieben. Dabei basiert das Datenmodell auf dem in der OPC UA Companion Specification für CNC-Systeme definierten Informationsmodell, welches von einer gemeinsamen Arbeitsgruppe der OPC Foundation und dem Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW) erstellt wurde [OPC17].

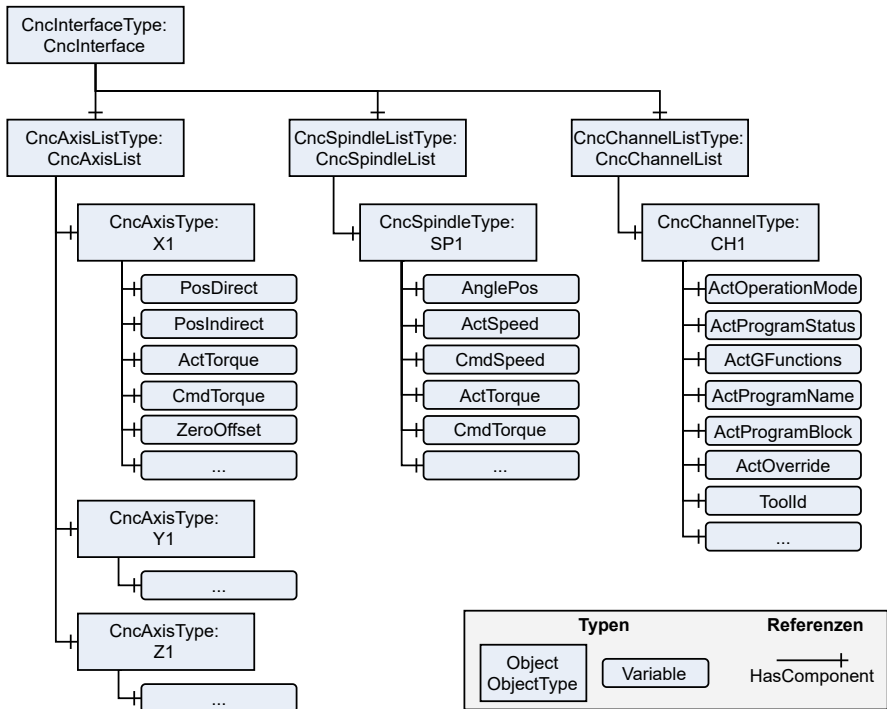


Abbildung 6.9: Allgemeines Informationsmodell der NC-Signale einer WZM mit drei Achsen nach [OPC17]

Ein wesentliches Ziel der Spezifikation besteht darin, einen schnellen und einfachen Zugriff auf die Daten aus einer NC zu ermöglichen. Hierzu stellt das Informationsmodell Objekttypen zur Strukturierung und Beschreibung der Komponenten einer NC bereit. Als übergeordnetes Objekt wird die Gesamtstruktur im CncInterfaceType abgebildet. Die in Abbildung 6.9 visualisierte Struktur entspricht der Struktur eines 3-Achs-Bearbeitungszentrums.

Aus einem verallgemeinerten Objekt für Antriebe (CncDriveType) leiten sich die Objekte für Vorschubachsen (CncAxisType) und Hauptspindeln (CncSpindleType) ab, die als Listen strukturiert werden. Zu den jeweiligen Antriebsobjekten werden die dazugehörigen Variablen referenziert, die unter anderem Signale mit dem Präfix Cmd (engl. command) für die Sollwerte und Signale mit dem Präfix Act (engl. actual) für Istwerte umfassen. Die Achsen der NC werden über den Kanal (engl. channel) organisiert, der durch das Objekt CncChannelType mit allen erforderlichen Variablen beschrieben wird.

Basierend auf der hierarchischen Struktur in Abbildung 6.9 erfolgt die Modellierung der Zeitreihendaten in der Datenbank. Die Zuordnung der herstellereigenen Bezeichnung erfolgt bei der Vorverarbeitung der Daten. Tabelle 6.1 beinhaltet die wesentlichen NC-Signale für die prototypische Implementierung an der Versuchsmaschine. Eine vollständige Übersicht der vereinheitlichten Bezeichnungen der NC-Signale aus der OPC UA Companion Specification für CNC-Systeme, sowie eine Zuordnung der Bezeichnungen zu den Datenquellen befindet sich in Anhang A.3.

Tabelle 6.1: Zuordnung der NC-Signale für ein 3-Achs-Bearbeitungszentrum

| Prefix | Bezeichnung | Herstellerspezifische Bezeichnung | Beschreibung |
|----------|------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| CH1 | ActProgramStatus | progStatus[u1] ^a | Programmzustand |
| CH1 | ActGFunctions | ncFktAct[u1,1] ^a | Aktive G-Funktion |
| CH1 | ToolLength | actToolLength1[u1,1] ^a | Werkzeuglänge in mm |
| SP1 | AnglePos | ENC_POS \$axis ^b | Ist-Winkelposition in ° |
| SP1 | CmdSpeed | CMD_SPEED \$axis ^b | Drehzahlsollwert in °/s |
| SP1 | ActCurrent | CURRENT \$axis ^b | Stromistwert in A |
| X1,Y1,Z1 | PosDirect | ENC2_POS \$axis ^b | Position Encoder 2 in mm |
| X1,Y1,Z1 | PosIndirect | ENC1_POS \$axis ^b | Position Encoder 1 in mm |
| X1,Y1,Z1 | ActCurrent | CURRENT \$axis ^b | Stromistwert in A |
| X1,Y1,Z1 | CmdTorque | TORQUE \$axis ^b | Drehmomentsollwert in Nm |
| - | Cycle | CYCLE | Zykluszähler |

^a Gekürzte BTSS-Variablen (Vollständiger Pfad im Anhang A.3)

^b \$axis entspricht der jeweiligen Achsnummer (X1=1, Y1=2, Z1=3, SP1=6)

6.4.3 Modularer Aufbau der Gesamtstruktur

Die softwaretechnische Implementierung des Prototyps basierend auf der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Vorgehensweise erfolgt modular in der Programmiersprache Python. Dabei unterstützt der modulare Aufbau aus Funktionen, Klassen, Modulen und Paketen bei einer übersichtlichen Strukturierung und flexiblen Erweiterung zusätzlicher Systemfunktionalität. Hierzu werden die in Abbildung 6.10 dargestellten Komponenten der Gesamtstruktur in vier Gruppen eingeteilt:

- **Datenquellen** repräsentieren Komponenten, die die erforderlichen Informationen beinhalten oder bereitstellen. Dazu gehören beispielsweise Datenbanken oder externe Simulationssoftware.
- **Schnittstellen** dienen als grundlegende Konnektoren und ermöglichen so die Kommunikation mit den Datenquellen über definierte Methoden.
- **Dienste** integrieren die erforderlichen Funktionalitäten als jeweils eigenständige Einheit, die eine technische Realisierung des Prototyps im Modul *prototype.py* und der Simulation im Modul *simulation.py* ermöglichen.
- Die **Bibliotheken** umfassen Implementierungen der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Lösungsansätze.

Die implementierten Funktionen und Klassen der Bibliotheken sind im Wesentlichen in zwei übergeordneten Python-Pakete strukturiert. Im Paket *machines* werden die notwendigen Klassen zum Aufbau der hierarchischen Struktur einer WZM bereitgestellt. Dabei wird der übergeordneten Klasse *MachineTool* eine Liste der relevanten Komponenten zugeordnet. Eine Übersicht der modellierten Klasse ist in Anhang A.4 dargestellt. Aus der abstrakten Klasse *Component*, die übergreifende Attribute und Methoden einer Komponente beinhaltet, leiten sich die implementierten Klassen *LinearAxis*, *Spindle* und *Bearing* ab. Jede Komponente kann dabei weitere Unterkomponenten enthalten, sodass auch die hierarchische Beziehung zwischen Baugruppen und Komponenten einer WZM abgebildet werden kann. Beispielsweise sind im betrachteten Szenario die Lager als Komponente der Baugruppe Spindel zugeordnet.

Die Klasse *MachineTool* besitzt die Methode *preprocessing_cnc_data()* zur Vorverarbeitung der Antriebsdaten und Berechnung der maschinenspezifischen Belastung, aus der über die Methode *get_load()* die komponentenspezifische Belastung aller untergeordneten Komponenten berechnet wird. Ent-

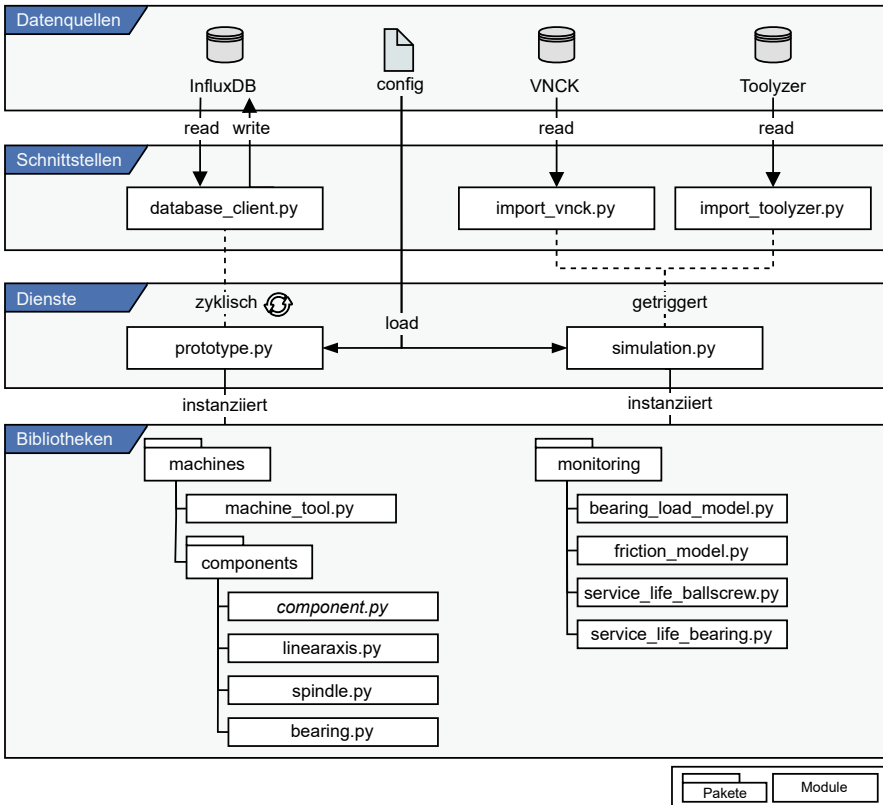


Abbildung 6.10: Übersicht über die Gesamtstruktur der implementierten Softwarekomponenten

sprechend der in Kapitel 4.3.4 beschriebenen Vorgehensweise erfolgt die Aggregation der Belastungs- und Abnutzungsindikatoren auf Maschinenebene in der Methode `get_life()`. Basierend darauf erfolgt anschließend die Berechnung der belastungsorientierten Kosten in `get_machine_costs()`.

Während die Module des Pakets *machines* die Eigenschaften einer WZM und deren Komponenten repräsentieren, liegt der Fokus des Pakets *monitoring* auf der Implementierung von Modellen zur Überwachung und Analyse. Die Ermittlung der Lagerbelastung im Modul `bearing_load_model.py` wird basierend auf der in Kapitel 5.5 beschriebenen Vorgehensweise mit einem

MLPRegressor der Software-Bibliothek Scikit-learn [Lar23] umgesetzt. Das Paket beinhaltet ebenfalls die Module des Reibmodells (*friction_model.py*), sowie die Module zur Berechnung der nominellen Lebensdauern von Lagern und KGTs (*service_life_bearing.py*, *service_life_ball screw.py*).

Die Instanziierung der gesamten WZM erfolgt auf Basis einer Konfigurationsdatei und stellt die gemeinsame Grundlage der beiden im Zentrum stehenden Dienste dar. Der Aufbau der Konfigurationsdatei zur Initialisierung der betrachteten WZM ist exemplarisch im Anhang A.5 beschrieben.

Modul Simulation (simulation.py)

Der Dienst zur simulationsgestützten Analyse des belastungsorientierten Bezahlmodells integriert die Schnittstellen zu den externen Simulationskomponenten VNCK und Toolyzer. Über die Schnittstellen wird eine konsistente Datenverarbeitung sichergestellt. Die Simulationsergebnisse werden beim Importieren zeitlich synchronisiert.

Modul Prototyp (prototype.py)

Die kontinuierliche Bereitstellung der Berechnungsergebnisse für den Prototyp erfolgt über das Modul *prototype.py*. Dieses Modul wird als containerisierte Anwendung auf externer Hardware mit Zugriff auf die InfluxDB ausgeführt. Zyklisch werden die aktuellen Antriebsdaten der letzten 5 Sekunden abgefragt. Nach Durchführung aller Berechnungsschritte und Ermittlung der Kosten werden die historischen Zähler aktualisiert. Anschließend werden die aktualisierten Daten zurück in die Datenbank geschrieben.

7 Evaluation der Ergebnisse

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Methodik und die notwendigen Schritte zur prototypischen Implementierung des vorgestellten Ansatzes dargelegt. Aufbauend auf den beschriebenen Lösungsansätzen erfolgt in diesem Kapitel die Evaluation des entwickelten Gesamtkonzepts im betrachteten Anwendungsszenario. Zur Validierung werden die Ergebnisse anhand repräsentativer Referenzprozesse untersucht. Darüber hinaus erfolgt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Simulation des Gesamtsystems und der prototypischen Implementierung an der realen Maschine. Abschließend erfolgt die Diskussion der Ergebnisse.

7.1 Experimentelle Untersuchung von Belastungsprofilen

Für die Evaluation werden zunächst die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen in Form von vier Referenzprozessen zur Darstellung verschiedener Belastungsprofile vorgestellt. Dabei wurden sämtliche Referenzprozesse für zwei verschiedene Werkstoffe durchgeführt, sodass eine möglichst breite Auswahl an Schnittparametern und resultierenden Belastungen abgebildet wird und die Belastungs- und Leistungsgrenzen der Maschine ausgeschöpft werden. Die Versuchsumgebung basiert auf den in Kapitel 4.4 beschriebenen Rahmenbedingungen.

Belastungsprofil 1: Vollnutfräsen

Belastungsprofil 1 umfasst verschiedene Bearbeitungsoperationen zum Fräsen von Nuten mit einem Schaftfräser ($D = 16$ mm). Der Werkzeugpfad und die Antriebssignale der Vorschubachsen sind in Abbildung 7.1 abgebildet. Hier zeigen die Antriebssignale Spitzenwerte bei Beschleunigungsvorgängen im Eilgang und verdeutlichen den höheren Vorschub bei der Zerspanung von AlCuMgPb durch die kürzere Bearbeitungsdauer. Die Belastungs- und Leistungsgrenzen des Belastungsprofils stellen dabei die hohe radiale Belastung der Motorspindel für den Werkstoff 42CrMo4 und hohe Drehzahlen der Spindel für den Werkstoff AlCuMgPb dar. Dies ist in den Belastungskollektiven der Drehzahl n und Prozesskräfte F_x und F_y in Abbildung 7.1 dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass bei der vertikalen Nut in Abbildung 7.1 der Vor-

schub nur in der y-Achse programmiert ist, während bei den schrägen Nuten beide Vorschubachsen aktiv sind. Im Hinblick auf die äquivalente Belastung und das berechnete Belastungsintegral wird die Belastung einer passiven Achse bei der Berechnung nicht berücksichtigt, da die Vorschubgeschwindigkeit null ist.

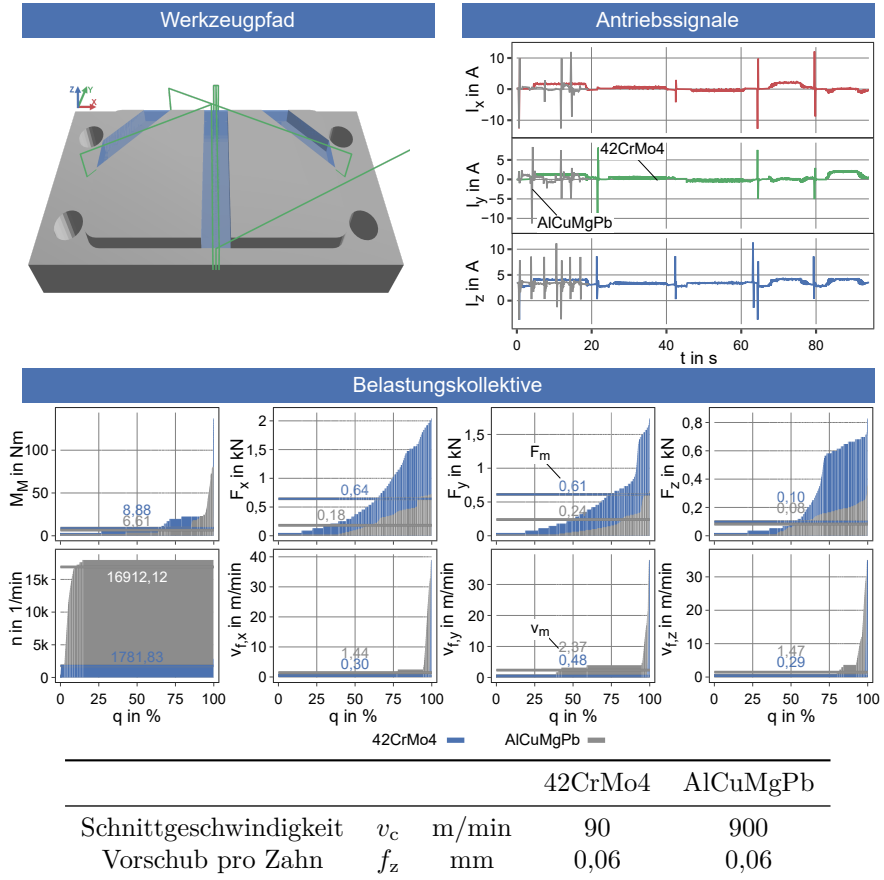


Abbildung 7.1: Belastungsprofil Nutenfräsen mit Schaftfräser (D=16 mm)

Belastungsprofil 2: Eckfräsen

Für Belastungsprofil 2 kommt ein Eckfräser mit Wendeschneidplatten und einem Zylinderschaft zum Einsatz, der einen Durchmesser von $D = 32$ mm hat. Der Werkzeugpfad und die Antriebssignale der Vorschubachsen sind in Abbildung 7.2 visualisiert. Die Belastungsgrenze stellt ebenfalls die radiale Belastung der Motorspindel dar, wobei im Gegensatz zu Belastungsprofil 1 aufgrund des Werkzeugs eine Bearbeitung mit höheren Vorschüben möglich ist.

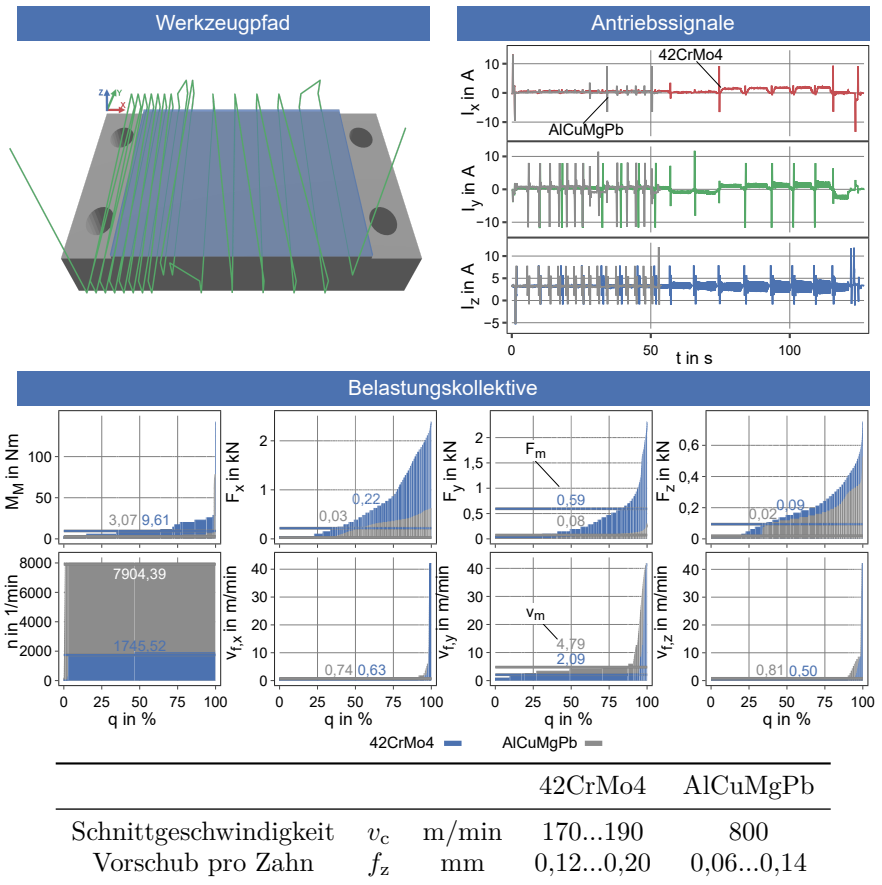


Abbildung 7.2: Belastungsprofil Eckfräsen mit Eckfräser ($D=32$ mm)

Belastungsprofil 3: Planfräsen

Belastungsprofil 3 umfasst einen Bearbeitungsprozess zum Planfräsen mit einem Aufsteck-Planfräser, der 9 Wendeschneidplatten hat. Der Werkzeugpfad und die Antriebssignale der Vorschubachsen sind in Abbildung 7.3 visualisiert. Im Vergleich zu Belastungsprofil 2 werden aufgrund des Werkzeugdurchmessers ($D = 63 \text{ mm}$) und der Anzahl an Schneiden eine hohe Schnittleistung erreicht, sodass neben der maximalen radialen Belastung auch das Drehmoment der Hauptspindel die Leistungsgrenze des Prozesses darstellt.

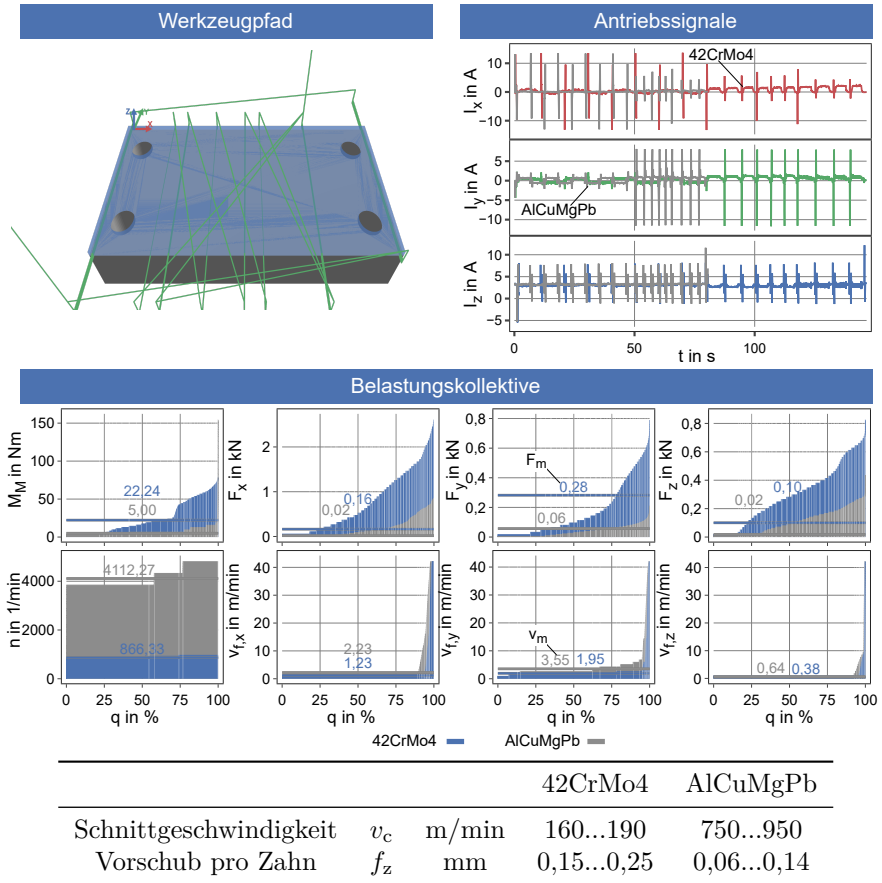


Abbildung 7.3: Belastungsprofil Planfräsen mit Planfräser ($D=63 \text{ mm}$)

Belastungsprofil 4: Bohren

Belastungsprofil 4 umfasst einen Bohrprozess mit einem Bohrer und Durchmesser $D = 12$ mm. Der Werkzeugpfad und die Antriebssignale der Vorschubachsen sind in Abbildung 7.4 visualisiert. Gegenüber den anderen Belastungsprofilen unterscheidet sich der Bohrprozess durch eine hohe axiale Belastung der Hauptspindel ohne hohe radiale Belastungen.

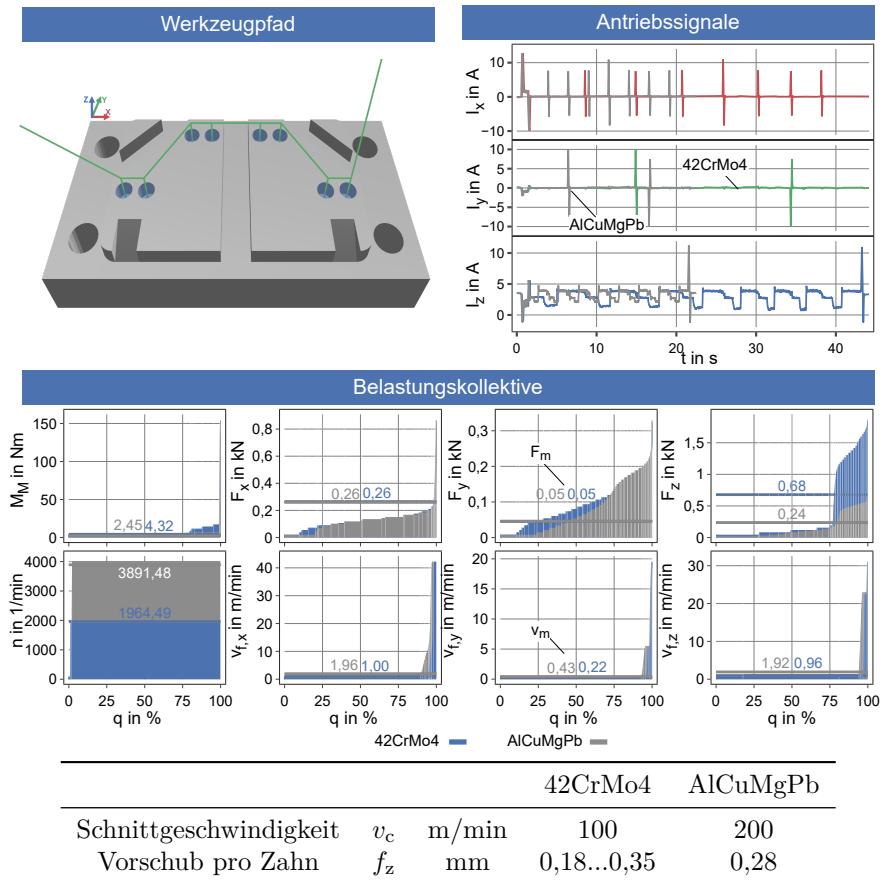


Abbildung 7.4: Belastungsprofil Bohren mit Bohrer ($D=12$ mm)

7.2 Validierung des Gesamtkonzepts

Da die Implikationen eines belastungsorientierten Bezahlmodells sowohl für Anwender und Anbieter weitreichend sind, wird der Einfluss der verschiedenen Belastungsprofile auf die Kosten untersucht. Grundlage hierfür stellt die prototypische Implementierung dar, die eine Evaluation des Konzepts an einer realen WZM ermöglicht. Die Ergebnisse des belastungsorientierten Bezahlmodells sind für die Belastungsprofile in Tabelle 7.1 zusammengefasst. Aufgrund der geringen Bearbeitungsdauer T von wenigen Minuten sind die Gesamtkosten K_{ges} der einzelnen Belastungsprofile entsprechend gering. Ein Vergleich der jeweiligen Belastungsprofile zwischen den Werkstoffen zeigt, dass die resultierenden Kosten K_{ges} auf einem ähnlichen Niveau liegen. Allerdings führen die unterschiedlichen Schnittparameter, bedingt durch die Zerspanbarkeit des jeweiligen Werkstoffs, zu einer variierenden Bearbeitungsdauer T . Diese weicht je nach Belastungsprofil um den Faktor 1,8 bis 5,0 ab, was in einer entsprechend höheren Produktivität resultiert.

Tabelle 7.1: Ergebnisse des belastungsorientierten Bezahlmodells für die Belastungsprofile

| Werkstoff | Profil | V cm ³ | T s | K_{ges} € | K_{h} €/h | Q mm ³ /s | K_Q €/Q · 10 ⁶ |
|-----------|--------|------------------------|----------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 42CrMo4 | 1 | 38,10 | 94,18 | 0,1256 | 4,80 | 404,6 | 310,5 |
| | 2 | 43,20 | 126,71 | 0,1460 | 4,15 | 340,9 | 428,3 |
| | 3 | 118,74 | 146,57 | 0,1249 | 3,07 | 810,1 | 154,2 |
| | 4 | 0,90 | 44,15 | 0,0287 | 2,34 | 20,5 | 1.401,6 |
| AlCuMgPb | 1 | 38,10 | 19,20 | 0,1085 | 20,35 | 1.984,9 | 54,7 |
| | 2 | 43,20 | 53,72 | 0,1482 | 9,93 | 804,2 | 184,3 |
| | 3 | 118,74 | 80,54 | 0,1594 | 7,13 | 1.474,4 | 108,1 |
| | 4 | 0,90 | 22,47 | 0,0287 | 4,60 | 40,3 | 713,1 |

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Belastungsprofilen zu ermöglichen, werden die Kosten pro Stunde K_{h} angegeben. Die Ergebnisse zeigen höhere Kosten pro Stunde bei der Bearbeitung von AlCuMgPb, sodass für Belastungsprofil 1 mit 20,35 €/h die höchsten Kosten entstehen, während die Kosten pro Stunde bei Belastungsprofil 1 für 42CrMo4 4,80 €/h betragen. Bei dieser Betrachtung wird die Produktivität nicht berücksichtigt, weshalb zusätzlich die Materialabtragsrate Q , die aus dem abgetragenen Volumen V und der Bearbeitungsdauer T resultiert, als Kenngröße für eine relative Ver-

gleichbarkeit herangezogen wird. Da das gesamte Belastungsprofil betrachtet wird, schließt die Bearbeitungsdauer auch die Anteile technischer Nebenzeiten mit ein, bei denen sich die Schneide nicht im Eingriff befindet. Die relativen Kosten K_Q unter Berücksichtigung der Materialabtragsrate sind hingegen für 42CrMo4 signifikant höher.

Für eine Beurteilung der Kosten über den Nutzungszeitraum einer WZM, werden in Tabelle 7.2 basierend auf den Kosten pro Stunde K_h die Kosten K_L für 20.800 Betriebsstunden hochgerechnet, was einer geschätzten Nutzungsdauer einer WZM bei Einschichtbetrieb über 10 Jahre entspricht. Zur Beurteilung aus der Perspektive des Anbieters wird der Anteil der Kosten $K_{L,p}$ im Hinblick auf den zu erzielenden Anschaffungswert von 250.000 € angegeben. Der Restwert K_{rest} gibt an, welcher Betrag vom Anbieter nach der vereinbarten Nutzungsdauer durch einen Verkauf zu erwirtschaften ist, um auf den Anschaffungswert zu kommen und das Geschäftsmodell rentabel betreiben zu können.

Tabelle 7.2: Ergebnisse des belastungsorientierten Bezahlmodells über die Nutzungsdauer einer WZM

| Werkstoff | Profil | K_L € | $K_{L,p}$ % | K_{rest} € |
|-----------|--------|------------|----------------|-----------------|
| 42CrMo4 | 1 | 99.865,53 | 39,95 | 150.134,47 |
| | 2 | 86.281,92 | 34,51 | 163.718,08 |
| | 3 | 63.824,06 | 25,53 | 186.175,94 |
| | 4 | 48.708,23 | 19,48 | 201.291,77 |
| AlCuMgPb | 1 | 423.282,63 | 169,31 | -173.282,63 |
| | 2 | 206.595,78 | 82,64 | 43.404,22 |
| | 3 | 148.213,19 | 59,29 | 101.786,81 |
| | 4 | 95.644,59 | 38,26 | 154.355,41 |

Dabei zeigt sich eine starke Differenz zwischen den Belastungsprofilen bei den Kosten K_L über die Lebensdauer. Das Minimum stellt Belastungsprofil 4 (42CrMo4) mit berechneten Kosten in Höhe von 19,48 % des Anschaffungswertes dar, sodass nach der Nutzungsdauer ein Restwert K_{rest} von 201.291,77 € verbleiben würde. Das andere Extrem stellt Belastungsprofil 1 (AlCuMgPb) dar, bei dem über die Nutzungsdauer 169,3 % des Anschaffungswertes der Maschine berechnet werden. Dabei stellt der negative Restwert K_{rest} von -173.282,63 € den erwirtschafteten Überschuss dar und nicht einen bei Veräu-

ferung zu zahlenden Betrag. Je nach Anwendungsszenario und Nutzungsverhalten bedeutet dies einen Nachteil für Anbieter oder Maschinenanwender. Durch eine vertragliche Regelung einer Kostenunter- und -obergrenze kann ein solches Risiko reduziert werden.

Um im nächsten Schritt eine detaillierte Evaluation der belastungsorientierten Kosten durchführen zu können, wird der zeitliche Verlauf der resultierenden Kosten dargestellt. Das Diagramm in Abbildung 7.5 zeigt den zeitlichen Verlauf der aus der Belastung resultierenden Kosten pro Stunde als gestapeltes Liniendiagramm. Die Anteile einzelner Komponenten an den Kosten sind farblich markiert und stellen die Ergebnisse der prototypischen Implementierung basierend auf den Antriebsdaten der NC für Belastungsprofil 1 dar.

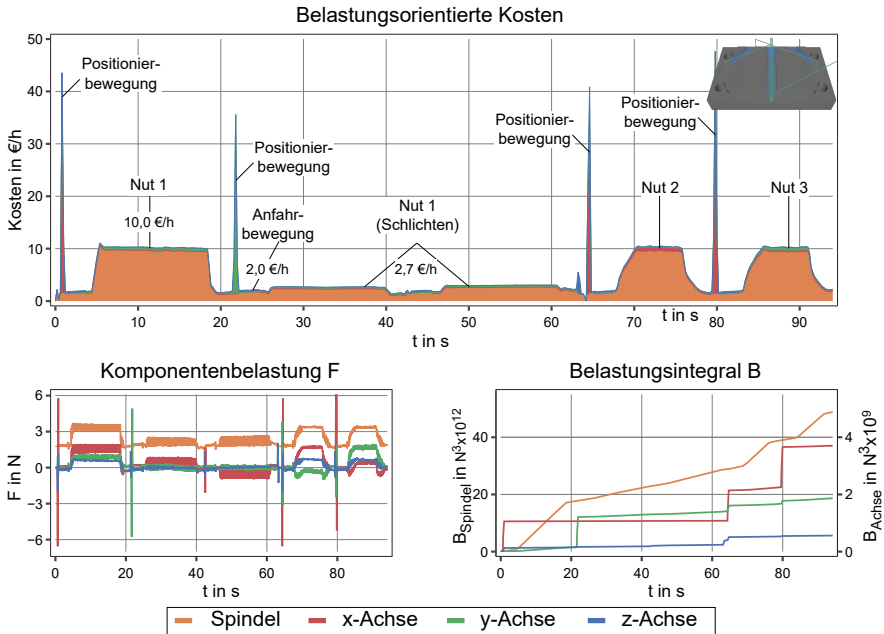


Abbildung 7.5: Zeitlicher Verlauf der belastungsorientierter Kosten je Komponente für Belastungsprofil 1

Die Abbildung veranschaulicht, dass die Spindel kontinuierlich einen substantiellen Anteil an den Kosten ausmacht, wohingegen die Anteile der Kosten der

Vorschubachsen besonders bei Positionierbewegungen kurzzeitig, allerdings im Verhältnis zur Spindel, hoch sind. Weiterhin verdeutlicht die Abbildung, dass der variierende Verlauf der Kosten mit den wirkenden Belastungen der Komponenten verknüpft ist. In Prozessschritten ohne Materialeingriff, wie beispielsweise bei Anfahrbewegungen, betragen die Kosten der Spindel aufgrund der durch die Vorspannung wirkenden Lagerbelastung und der Drehzahl 1,6 €/h. Dazu kommen die Kosten der aktiven Vorschubachse von ca. 0,4 €/h. Die Kosten der Spindel steigen aufgrund der Prozesskräfte beim Materialeingriff für Nut 1, Nut 2 und Nut 3 auf 10 €/h. Bei Bearbeitungsoperationen mit deutlich geringeren Prozesskräften wie dem Schlichten von Nut 1 steigen die Kosten nicht so stark. Dies entspricht dem qualitativen Verlauf der Komponentenbelastung und zeigt sich ebenfalls durch die unterschiedliche Steigung im Verlauf des Belastungsintegrals (siehe Abbildung 7.5).

Durch die anteiligen Kosten der Vorschubachsen werden kurzzeitig Maximalwerte von über 40 €/h bei Positionierbewegungen im Eilgang erreicht. Während der Bearbeitungsprozesse im Vorschub ist im Belastungsintegral der Vorschubachsen ein beständiger Anstieg zu beobachten. Die daraus resultierenden Kosten liegen allerdings unterhalb von 1,0 €/h und machen somit einen vergleichsweise geringeren Anteil aus. Grund dafür sind die hohen dynamischen Belastungen bei der Positionierbewegung mit maximalen Geschwindigkeiten im Eilgang von bis zu $v_f = 42$ m/min und wirkenden Trägheitskräften von bis zu 6 kN. Der programmierte Vorschub für das Belastungsprofil hingegen liegt bei $v_f = 0,43$ m/min mit Prozesskräften von bis zu 2 kN.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse aus Abbildung 7.5, dass es sich bei dem betrachteten Belastungsprofil im Hinblick auf die Prozesskräfte bei der Spindel um die kritischere Komponente der aufgezeigten Versuchsmaschine handelt, was in höheren Kosten resultiert. Bei dynamischen Positionierbewegungen, zum Beispiel im Eilgang, wirken hohe Belastungen an den Vorschubachsen, wodurch auch die Kosten entsprechend steigen. Dies kann jedoch abhängig vom Belastungsprofil unterschiedlich sein. So zeigt Abbildung 7.6, dass im Belastungsprofil 1 die anteiligen Kosten der Spindel an den Gesamtkosten im Vergleich zu den Belastungsprofilen 2 und 3 deutlich höher sind.

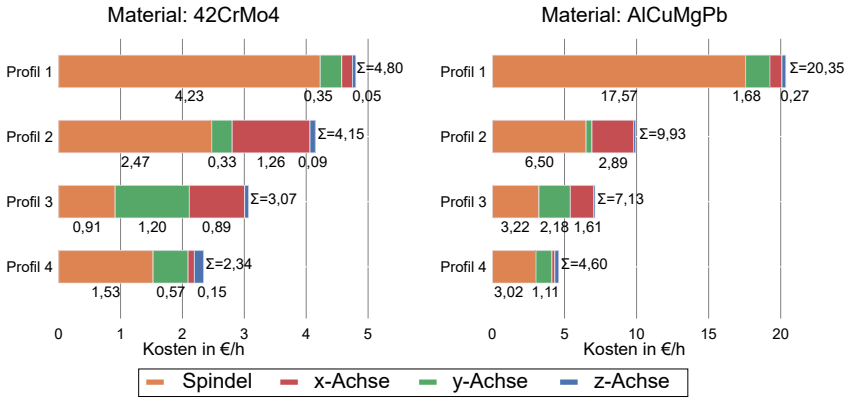


Abbildung 7.6: Anteile der Komponenten an den Gesamtkosten je Belastungsprofil

Zur Validierung des gewählten Ansatzes werden die berechneten Kosten, basierend auf den Belastungen der Simulation, der prototypischen Implementierung und der Referenzsensorik (Dynamometer) miteinander verglichen. Abbildung 7.7 zeigt, dass die aus den Antriebsdaten ermittelten Belastungen für die untersuchten Belastungsprofile Abweichungen von bis zu 3,0 % zur Referenzsensorik aufweisen. Somit ist die gewählte Methode zur Ermittlung der Belastungen für die betrachteten Anwendungsszenarien geeignet. Allerdings können über die Lebensdauer 3,0 % Abweichung einen relevanten Betrag ausmachen, sodass abhängig vom Anwendungsfall eine differenzierte Betrachtung erforderlich ist.

Neben der prototypischen Implementierung ist für die Umsetzung eines belastungsorientierten Bezahlmodells eine möglichst realitätsnahe Simulation der zu erwartenden Kosten notwendig, um eine transparente Planung zu ermöglichen. Die Ergebnisse weisen für die meisten Belastungsprofile geringe Abweichungen im Vergleich zu den aus den Antriebsdaten ermittelten Kosten auf. Die höheren Abweichungen für den Werkstoff 42CrMo4 bei den Belastungsprofilen 2 und 3 lassen sich auf Abweichungen zwischen den simulierten Prozesskräften und den aus den Antriebssignalen ermittelten Prozesskräften zurückführen. Einflüsse aufgrund von Verschleiß oder geometrischen Abweichungen des Werkzeugs können zu entsprechend hohen Abweichungen führen. Bei den Belastungsprofilen für den Werkstoff AlCuMgPb sind die Abweichungen der resultierenden Kosten aus den Simulationsdaten geringer. Der Grund

dafür ist, dass die Prozesskräfte, welche bei der Simulation die größten Unsicherheiten aufweisen, im Vergleich zu anderen Belastungen aufgrund von Trägheit, Vorspannung und Reibung geringer sind.

Die Ergebnisse der simulierten Belastungsprofile zeigen, dass die implementierten Ansätze für eine Abschätzung der zu erwartenden Kosten geeignet sind. Allerdings ist dabei zu beachten, dass nicht alle Einflussfaktoren berücksichtigt werden und Abweichungen zwischen simulierter und realer Belastung eine Differenz in den Kosten zur Folge haben.

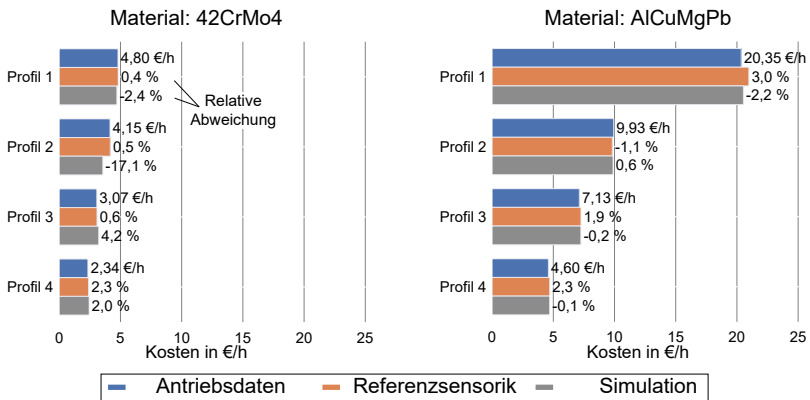


Abbildung 7.7: Vergleich der aus Antriebssignalen, Referenzsensorik und Simulationsdaten berechneten Kosten

7.2.1 Optimierung von Bearbeitungsprozessen hinsichtlich Belastungskenngrößen

Nachdem das Gesamtkonzept im vorherigen Kapitel validiert wurde, wird der Ansatz für die simulationsgestützte Ermittlung der Belastungskenngrößen zur Optimierung von Bearbeitungsprozessen vorgestellt. Allgemein sind die Ziele der Prozessoptimierung in der Zerspanung, die Produktivität des Bearbeitungsprozesses zu steigern und die Stückkosten zu senken. Dabei ist eine Steigerung der Produktivität nicht zwangsweise mit einer höheren Kosteneffizienz verbunden. Durch die Anwendung eines belastungsorientierten Bezahlmodells in Kombination mit einer simulationsgestützten Berechnung der Komponentenbelastung ergeben sich neue Methoden die Produktivität und die resultierenden Kosten zu bewerten.

Das allgemeine Vorgehen dabei folgt dem Ablauf der Simulation des Gesamtsystems. Basierend auf den Eingangsgrößen des Bearbeitungsprozesses wie Werkstück, Werkzeug und NC-Programm werden die Prozesskräfte und Belastungen der Komponenten simuliert, um die nach dem belastungsorientierten Bezahlmodell entstehenden Kosten zu erhalten. Durch Variation der Eingangsgrößen, wie zum Beispiel Anpassung der Schnittparameter, kann der Einfluss der Eingangsgrößen auf die Belastung und somit die Kosten untersucht werden. Dieses Vorgehen wird exemplarisch für zwei Fräsprozesse erläutert. Ziel dabei ist, im Rahmen der vom Werkzeughersteller empfohlenen Schnittparameter, den kostenoptimalen Vorschub zu ermitteln. An dieser Stelle werden nur die kostenoptimalen Schnittparameter hinsichtlich des belastungsorientierten Bezahlmodells betrachtet. Weitere Betriebskosten wie beispielsweise Energie- oder Werkzeugkosten sind dabei nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Simulation sind für beide Prozesse unter gleichen Eingriffsbedingungen ($a_p = 10 \text{ mm}$, $a_e = 16 \text{ mm}$) in Abbildung 7.8 dargestellt. Hier zeigen sich bei der Bearbeitung des Werkstoffs 42CrMo4 signifikant höhere Prozesskräfte. Weiterhin sinkt mit zunehmendem Vorschub pro Zahn f_z die Bearbeitungsdauer T und führt somit zu einer höheren Produktivität, sowie steigenden Prozesskräften. Die Kosten pro Maschinenstunde K_h sind beim belastungsorientierten Bezahlmodell nicht konstant, sondern nehmen mit steigender Belastung zu. Die Prozesskräfte sind bei der Bearbeitung des Werkstoffes 42CrMo4 zwar um den Faktor 2-3 größer, allerdings sind bei der Bearbeitung von AlCuMgPb die Drehzahl der Spindel um den Faktor 10 und die resultierende Vorschubgeschwindigkeit um den Faktor 7,5 größer. Dies führt trotz geringerer Belastung zu höheren Kosten pro Maschinenstunde.

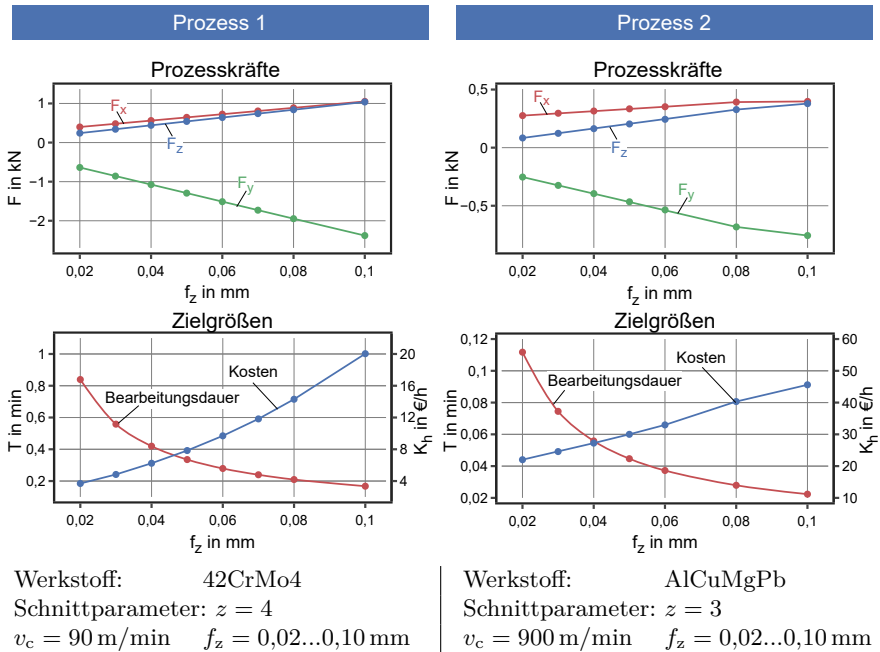


Abbildung 7.8: Optimierung Schnittparameter Bearbeitungsprozess 1 und 2 beim Vollnutfräsen mit Schaftfräser

Zur Auswertung des kostenoptimalen Vorschubs werden die berechneten Kosten für das Fräsen einer Nut mit der Länge von 120 mm verglichen. Für Prozess 1 zeigt Abbildung 7.9 ein Minimum der Kosten bei einem Zahnvorschub von $f_z = 0,04 \text{ mm}$. Bis dahin sorgt die geringere Bearbeitungsdauer und somit steigende Produktivität für eine kürzere zeitliche Belastung der Komponenten. Hier ist der Anteil der Belastung, der durch Reibung und Vorspannung entsteht, im Verhältnis zur Prozesskraft signifikant größer. Daher hat die kürzere Belastungsdauer aufgrund des höheren Vorschubs einen stärkeren Einfluss auf die Kosten als die Prozesskraft. Ab einem Vorschub von $f_z = 0,04 \text{ mm}$ verändert sich das Verhalten und steigende Produktivität durch höheren Vorschub führt gleichzeitig zu ansteigenden Kosten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Anteil der Prozesskraft an der gesamten Komponentenbelastung zunimmt. Da die Belastung kubisch in die Berechnung des Belastungsintegrals eingeht, überwiegt ab diesem Punkt der Einfluss der Prozesskraft gegenüber der gleichbleibenden Grundbelastung durch

Vorspannung und Reibung. Infolgedessen steigen, verursacht durch die Prozesskraft, die Kosten wieder an. Die Ergebnisse durchgeführter Bearbeitungsprozesse spiegeln den qualitativen Verlauf der Simulationsergebnisse wider, fallen allerdings größer als die simulierten Kosten aus. Gründe dafür sind Vereinfachungen bei der Prozesssimulation, Unsicherheiten bei der Erfassung oder zusätzliche Einflüsse wie Werkzeugverschleiß.

Die Kosten K von Prozess 2 zeigen hingegen einen monoton fallenden Verlauf, sodass zur Optimierung ein möglichst hoher Vorschub zu wählen ist. In diesem Fall bedeutet eine Steigerung der Produktivität auch eine höhere Kosteneffizienz. Dies liegt an den vergleichsweise geringen Prozesskräften bei der Bearbeitung von Aluminium.

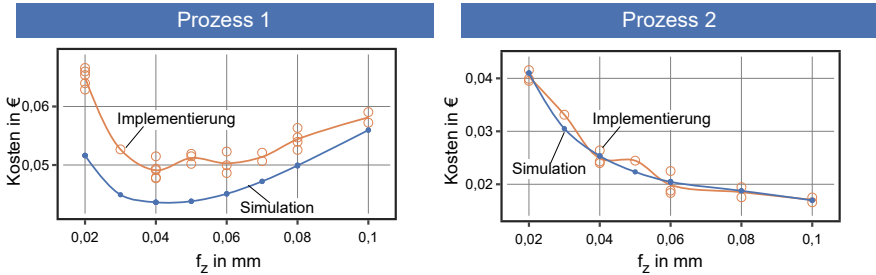


Abbildung 7.9: Einfluss des Zahnvorschubs auf die Maschinenkosten

7.2.2 Implementierung eines Demonstrators

Zur praxisorientierten Demonstration der Ergebnisse erfolgt die prototypische Implementierung des belastungsorientierten Bezahlmodells exemplarisch für das vorgestellte Anwendungsszenario. Die Entwicklung und Implementierung der Benutzeroberfläche erfolgt auf Basis der in Kapitel 6.4 beschriebenen Architektur und verfügbaren Softwarekomponenten. Die webbasierte Benutzeroberfläche wird mit Hilfe des Frameworks Plotly Dash¹ erstellt, welches als Low-Code-Framework eine einfache und schnelle Erstellung datenbasierter Visualisierungen in Python ermöglicht. Abbildung 7.10 zeigt einen Bildschirmausschnitt der Startseite der Benutzeroberfläche, die alle zur Übersicht

¹Weitere Informationen zu Plotly Dash unter: <https://dash.plotly.com/>.

für den Anwender grundlegenden Kennwerte visuell aufbereitet. Im oberen Bereich befindet sich die Navigationsleiste.

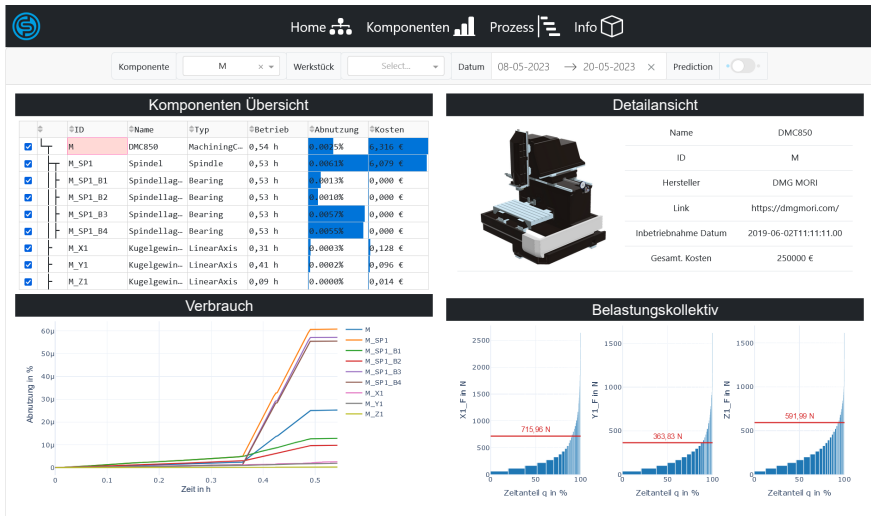


Abbildung 7.10: Benutzeroberfläche des Softwareprototyps als Webanwendung

Der zentrale Inhalt der Startseite ist in vier Bereiche aufgeteilt. In der Komponenten Übersicht ist die hierarchische Struktur der Baugruppen und Komponenten der WZM tabellarisch dargestellt. Zu diesen werden die aktuellen Kennwerte wie Betriebsdauer, Abnutzungsindikator und Kosten angezeigt. Durch Auswahl einer Komponente in der Übersicht werden in der Detailsicht die hinterlegten Informationen angezeigt. Statische Daten werden durch das Laden der Konfigurationsdatei über die in Abschnitt 6.4.3 beschriebenen Bibliotheken umgesetzt. Aktuelle und historische Daten werden im Backend über direkte Anfragen an die Datenbank realisiert. Im Bereich Verbrauch ist der historische Verlauf des Abnutzungsindikators aller Komponenten dargestellt. Unter Belastungskollektiv werden die Histogramme der Belastungskenngrößen der ausgewählten Komponente dargestellt. Auf Maschinenebene werden die Histogramme der Prozesskräfte dargestellt. Bei den Komponenten hingegen werden bei der Spindel Drehzahl, Radial- und Axialkraft angezeigt, während bei den Vorschubachsen die am KGT wirkende Axialkraft und Vorschubgeschwindigkeit dargestellt werden.

Für die transparente Aufbereitung der belastungsorientierten Kosten für den Anwender zur Prozessoptimierung ist eine Analyse der Prozessinformationen einzelner Werkstücke entsprechend Abbildung 7.11 realisiert. Voraussetzung dafür ist die Verfügbarkeit von Kontextinformationen aus der NC, die zeitlich den berechneten Belastungskenngrößen zugeordnet werden können. Die Informationen zum aktiven NC-Programm und NC-Satz können zur Strukturierung der Zeitreihendaten genutzt werden. Darüber hinaus können ergänzend durch benutzerdefinierte Variablen im NC-Programm explizit einzelne Prozessschritte konsistent kontextualisiert werden [Fer21]. Der Vorteil besteht darin, dass diese unabhängig vom NC-Programm und NC-Satz strukturiert werden [Fer23].

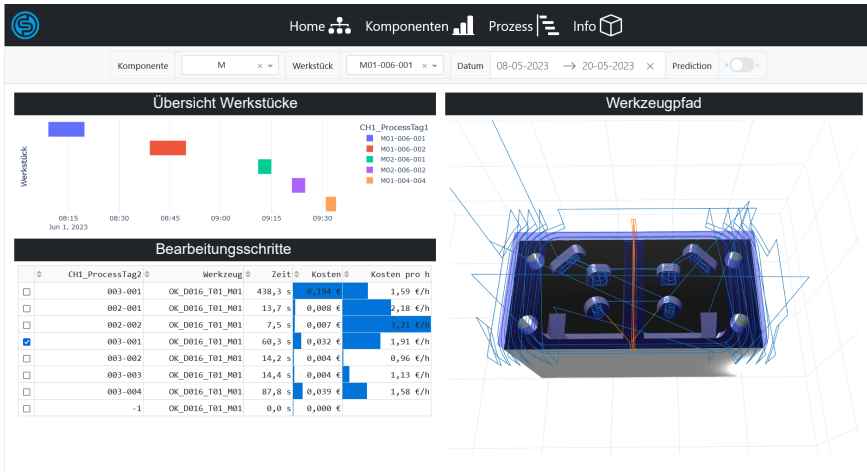


Abbildung 7.11: Benutzeroberfläche des Softwareprototyps zur Analyse der Bearbeitungsschritte eines Werkstücks

In Übersicht Werkstücke werden die produzierten Werkstücke als Gantt-Diagramm dargestellt. Durch Auswahl eines Werkstücks wird der Werkzeugpfad mit Werkstück geladen und eine tabellarische Übersicht der einzelnen Bearbeitungsschritte erstellt. Zur Darstellung einzelner Prozessschritte können diese in der Tabelle zur farblichen Hervorhebung im Werkzeugpfad ausgewählt werden, um kostenintensive Prozessschritte zu identifizieren.

7.3 Ergebnisdiskussion

Im Rückblick auf die in Kapitel 3 formulierte Zielsetzung wurden im Rahmen dieser Arbeit die Entwicklung und Umsetzung eines belastungsorientierten Bezahlmodells für WZM wissenschaftlich untersucht. Die vorgelegten Resultate zeigen die Umsetzbarkeit des Lösungsansatzes als praxisorientiertes Gesamtkonzept unter Berücksichtigung der definierten Teilziele.

Konkret wurde dabei das Teilziel verfolgt, basierend auf den Antriebsdaten der NC, Belastungskenngrößen der relevanten Komponenten einer WZM abzuleiten, welche die Grundlage für das Bezahlmodell bilden. Durch Variation der Eingangsgrößen des Bearbeitungsprozesses wurden die Auswirkungen diverser Belastungsprofile auf die Beanspruchung einzelner Komponenten und die daraus resultierenden Kosten analysiert. Hierbei wurden über die Stellgrößen Werkzeug, Werkstück und NC-Programm ein möglichst breites Spektrum an Einsatzszenarien innerhalb der Belastungs- und Leistungsgrenzen der WZM betrachtet. Die aus den Antriebsdaten ermittelten Belastungskenngrößen konnten durch Referenzmessungen mittels 3-Komponenten-Dynamometer validiert werden.

Die Analyse der Belastungsprofile ergab eine zu erwartende signifikante Differenz zwischen den Referenzprozessen mit hoher und geringer Belastung. Hochgerechnet auf die Lebensdauer der WZM impliziert dies, dass eine dauerhaft geringe Belastung aus Perspektive des Anbieters ökonomisch nicht tragbar ist, wohingegen eine übermäßige Belastung für den Anwender über die Nutzungsdauer im Vergleich mit konventionellen Finanzierungsmodellen zu höheren Kosten führt. Dieses beidseitige Risiko kann durch das Festlegen von Kostenober- und -untergrenzen reduziert werden. Im untersuchten Fallbeispiel hängen die Kosten vollständig von den Belastungskenngrößen ab, um eine maximale Anreizwirkung zu erzielen. Da dies nicht in allen Anwendungsszenarien optimal ist, ist es in solchen Fällen sinnvoll, den Ansatz durch die Integration einer zeitlichen Komponente im Bezahlmodell, z. B. über Betriebsstunden, zu ergänzen.

Neben den Gewichtungsfaktoren einzelner Komponenten an den Gesamtkosten zur Aggregation der Kosten auf Maschinenebene haben die Lösungsansätze zur Abnutzungsprognose, basierend auf den Belastungen, einen wesentlichen Einfluss. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist anzumerken, dass die in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Limitationen der Berechnungsgrundlagen bei der Auslegung der Komponenten zu berücksichtigen sind und somit keine allgemeingültige Prognose des Verschleißverhaltens ermöglichen. Eine Erhöhung der Genauigkeit kann durch die Berücksichtigung weiterer Einflussfak-

toren aufgrund von betriebsbedingten Schwingungen, Oberflächenpressung oder Kurzhubbewegungen erreicht werden [Yag14]. Andere Faktoren wie Sauberkeit oder Wartung und Pflege können einen Einfluss auf den zu erzielenden Restwert haben, sind aber hinsichtlich des Ausfallverhaltens schwierig objektiv zu quantifizieren.

Im Rahmen der Arbeit wurde der Fokus auf Komponenten gelegt, die entweder bedingt durch die Maschinennutzung stark variierenden Belastungen unterliegen oder aufgrund des Abnutzungsverhaltens als relevant eingeordnet werden können. Abhängig vom Anwendungsfall ist die Liste der zu betrachteten Komponenten um zusätzliche Komponenten wie Führungen, Werkzeugmagazin oder Palettenwechsler zu erweitern.

Die Ergebnisse im Hinblick auf das zweite Teilziel zeigen die Umsetzung einer simulationsgestützten Methode zur Prognose der Belastungskenngrößen und der darauf aufbauenden Kostenermittlung. Durch die Kombination der Simulation einer NC und dem Zerspanprozess konnten hohe Genauigkeiten der prognostizierten Kosten erreicht werden. Hier ist vor allem die Leistungsfähigkeit der Simulation der Prozesskräfte in der Zerspanung ein wichtiger Faktor, dessen Prognosegüte im Wesentlichen von den Kraftkoeffizienten abhängt. Simulationssoftware wie Toolzyer ermöglichen die Analyse beliebiger Werkzeuggeometrien und Zerspanprozesse. Im Hinblick auf die Anwendbarkeit in der Praxis ist eine integrierte Lösung in einer CAM-Software anzustreben, um den manuellen Aufwand zur Auswertung der Simulationsergebnisse zu reduzieren.

Der entwickelte Prototyp zeigt, dass moderne WZM im realen Produktionsumfeld die in der NC verarbeiteten Informationen über verschiedene Schnittstellen bereitstellen. Aktuelle Implementierungen herstellerunabhängiger Standards wie OPC UA weisen allerdings eine geringere Leistungsfähigkeit hinsichtlich der erreichbaren Abtastrate auf, sodass aktuell eine hohe Genauigkeit nur über herstellereigenspezifische Schnittstellen zu erreichen ist. Diese Schnittstellen ermöglichen aber auf externer Hardware eine einfache Realisierung von Anwendungen, bei denen keine strikte Echtzeitfähigkeit erforderlich ist.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und prototypische Umsetzung eines belastungsorientierten Bezahlmodells für WZM durch Auswertung prozessbedingter Belastungen mittels verfügbarer Antriebsdaten. Hintergrund ist die steigende Nachfrage nach flexiblen Bezahlmodellen im Maschinenbau. Mit dem entwickelten neuen Lösungsansatz soll der bestehende Interessenskonflikt klassischer Finanzierungsmodelle zwischen Leasingnehmer und Leasinggeber durch transparente Belastungskenngrößen während der Nutzungsdauer reduziert werden.

Im vorgestellten Gesamtkonzept werden zunächst die Anforderungen an den technologischen Lösungsansatz formuliert. Dieser beschreibt den Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen des Bearbeitungsprozesses und den berechneten Kosten. Dabei wird zwischen prozessspezifischer Belastung durch das Zusammenwirken von Werkzeug und Werkstück und maschinenspezifischer Belastung unterschieden. Letztere berücksichtigt zusätzlich die Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess, Maschinenstruktur und Komponenten der Steuerungs-, Regelungs- und Antriebstechnik. Aufbauend darauf wird im nächsten Schritt die Belastung der einzelnen Komponenten ermittelt, um basierend auf etablierten Normen zur Auslegung mechanischer Komponenten die Lebensdauer zu modellieren. Der implementierte Prototyp beschränkt sich auf die Spindel und Vorschubachsen als zentrale Komponenten, da diese bedingt durch die Maschinennutzung stark variierenden Belastungen unterliegen oder aufgrund des Abnutzungsverhaltens als relevant eingeordnet werden können. Die Abnutzungsprognosen der Lebensdauermodelle werden auf Maschinenebene aggregiert, um durch ein hinterlegtes Kostenmodell schließlich eine belastungsorientierte Abrechnung zu ermöglichen.

Im ersten Teil der Arbeit erfolgt eine Validierung des Gesamtsystems mittels simulationsgestützter Methoden, um bereits im Voraus eine Prognose der zu erwartenden Belastung und Kosten zu ermöglichen. Die Ergebnisse leistungsfähiger Software zur Simulation der Prozesskräfte in Kombination mit einem virtuellen NC-Kern zeigen unter den bekannten Limitationen eine hohe Genauigkeit. Mit der prototypischen Umsetzung an einer realen Maschine konnte im zweiten Teil der Arbeit ein belastungsorientiertes Bezahlmodell basierend

auf den Antriebsdaten erfolgreich erprobt werden. Dabei legen die erarbeiteten Ergebnisse den Grundstein für die Anwendbarkeit im industriellen Kontext und zeigen das Potenzial auf die Belastung der Maschine zukünftig bei der Prozessoptimierung zu berücksichtigen.

Ausblick

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Lösungen liefern wichtige Grundlagen für die industrielle Anwendung belastungsorientierter Bezahlmodelle in der Werkzeugmaschinenbranche. Eine mögliche wissenschaftliche Weiterentwicklung ist die Verknüpfung mit weiteren Modellen, um beispielsweise die Energie- oder Werkzeugkosten zu berücksichtigen und deren Wechselwirkungen bei der Prozessauslegung transparenter darzustellen.

Durch die Entwicklung der Digitalisierung und Vernetzung in der Produktion sind die technischen Voraussetzungen gegeben und ermöglichen so neue Gestaltungsmöglichkeiten des Geschäftsmodells. Insbesondere ermöglicht die Ausgestaltung als Full-Service-Modell dem Anwender einen direkten Vergleich der entstehenden Kosten mit Maschinen verschiedener Hersteller. Eine Integration entsprechender Simulationsmodelle der WZM zur Berechnung der Kosten in eine CAM-Software schafft zusätzliche Transparenz der entstehenden Betriebskosten.

Das aus der Lebensdauerberechnung abgeleitete Belastungsintegral stellt eine Kenngröße dar, um den Nutzungsverlauf abzubilden und die Ausfallwahrscheinlichkeit aufgrund von Materialermüdung zu bewerten. Mit der wachsenden Verfügbarkeit von Informationen über wirkende Belastungen in Kombination mit Zustandsmessungen oder historischen Ausfalldaten können Prognosemodelle durch datengetriebene Ansätze kontinuierlich verbessert werden. Besonders Ansätze des föderalen Lernens (engl. Federated Learning) als Teilbereich des maschinellen Lernens (engl. Machine Learning) bieten enormes Potenzial die Prognosemodelle durch eine größere zur Verfügung stehende Trainingsdatenmenge zu verbessern.

Eine zentrale Herausforderung dabei ist der Datenaustausch über Unternehmensgrenzen hinweg. Dafür ist es notwendig ein Daten- und Serviceökosystem aufzubauen, das einen souveränen Umgang mit Daten gewährleistet und durch standardisierte Informationsmodelle eine einheitliche Semantik fördert.

Literatur

- [Abe06] E. Abele, M. Dervisopoulos und M. Kreis. „Beeinflussbarkeit von Lebenszykluskosten durch Wissensaustausch“. In: *wt Werkstattstechnik online* 7/8 (2006), S. 447–454. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/29927/>.
- [Abe09] E. Abele, M. Dervisopoulos und B. Kuhrke. „Bedeutung und Anwendung von Lebenszyklusanalysen bei Werkzeugmaschinen“. In: *Lebenszykluskosten optimieren*. Hrsg. von S. Schweiger. Wiesbaden: Gabler, 2009, S. 51–80.
- [Abe10] E. Abele, Y. Altintas und C. Brecher. „Machine tool spindle units“. In: *CIRP Annals* 59.2 (2010), S. 781–802.
- [Alb05] A. Albrecht, S. S. Park, Y. Altintas und G. Pritschow. „High frequency bandwidth cutting force measurement in milling using capacitance displacement sensors“. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45.9 (2005), S. 993–1008.
- [Alt17] Y. Altintas und D. Aslan. „Integration of virtual and on-line machining process control and monitoring“. In: *CIRP Annals* 66.1 (2017), S. 349–352.
- [Alt92] Y. Altintas. „Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements“. In: *Journal of Engineering for Industry* 114.4 (1992), S. 386–392.
- [Alt96] Y. Altintas und P. Lee. „A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills“. In: *CIRP Annals* 45.1 (1996), S. 59–64.
- [Arr13] P. J. Arrazola, T. Özel, D. Umbrello, M. Davies und I. S. Jawahir. „Recent advances in modelling of metal machining processes“. In: *CIRP Annals* 62.2 (2013), S. 695–718.
- [Asl18] D. Aslan und Y. Altintas. „Prediction of Cutting Forces in Five-Axis Milling Using Feed Drive Current Measurements“. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 23.2 (2018), S. 833–844.

- [Aue15] T. Auerbach, S. Gierlings, D. Veselovac, R. Seidner, S. Kamps und F. Klocke. „Concept for a Technology Assistance System to Analyze and Evaluate Materials and Tools for Milling“. In: Proceedings of the ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. New York: ASME, 2015.
- [Bau20] M. Baur, P. Albertelli und M. Monno. „A review of prognostics and health management of machine tools“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107.5-6 (2020), S. 2843–2863.
- [Bei12] M. Beigler. Analyse der Vorteilhaftigkeit zwischen Leasing und kreditfinanziertem Kauf. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012.
- [Ben22] M. Benker und M. F. Zaeh. „Condition monitoring of ball screw feed drives using convolutional neural networks“. In: *CIRP Annals* 71.1 (2022), S. 313–316.
- [Ber20] T. Bergs, C. Brecher, R. Schmitt und G. Schuh. Internet of Production - Turning Data into Value- Statusberichte aus der Produktionstechnik 2020. Aachen: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, 2020.
- [Bie18] E. Biedermann. Pay-per-Use-Kredit: Emag-Maschinen werden nach Nutzung bezahlt. Hrsg. von WEKA Industrie Medien GmbH. 2018. URL: <https://factorynet.at/artikel/pay-per-use-kredit-emag-maschinen-werden-nach-nutzung-bezahlt/> (Zuletzt geprüft am: 06.08.2023).
- [Bin13] A. Binasch. Automatisierter Maschinenschutz- MPC - Machine Protection Control. Hrsg. von ifm electronic gmbh. Essen, 2013. URL: <https://www.ifm.com/obj/konstruktion-ifm-2013-09-10.pdf>.
- [Ble23] F. Bleicher, D. Biermann, W.-G. Drossel, H.-C. Moehring und Y. Altintas. „Sensor and actuator integrated tooling systems“. In: *CIRP Annals* 72.2 (2023), S. 673–696.
- [Bon21] F. Bonfiglio. Vision & Strategy. 2021. URL: <https://gaia-x.eu/wp-content/uploads/2021/12/Vision-Strategy.pdf> (Zuletzt geprüft am: 15.08.2023).

- [Bos21] L. F. Bossler, T. Rogalski, P. Stanula, E. Lang, O. Kohn, J. Metternich, M. Weigold, J. Krönung und A. Buchwald. „Pay-per-Stress – Belastungsorientierte Leasingmodelle im Maschinenbau“. In: *Wirtschaftsinformatik & Management* 13.6 (2021), S. 466–475.
- [Bou22] H. Boujnah, N. Irino, Y. Imabeppu, K. Kawai und M. Mori. „Spindle-integrated, sensor-based measurement system for cutting forces“. In: *CIRP Annals* 71.1 (2022), S. 337–340.
- [Bre09] C. Brecher und T. Rudolf. „Signalvorverarbeitung zur Anwendung steuerungsintegrierter Prozessüberwachung, Digitale Antriebssignale zur robusten und flexiblen Prozessdiagnose“. In: *wt Werkstattstechnik online* 99 (2009), S. 479–486.
- [Bre18] C. Brecher und M. Weck. *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1 - Maschinenarten und Anwendungsbereiche*. 9. Aufl. 2019. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018.
- [Bre19a] C. Brecher, H.-M. Eckel, T. Motschke, M. Fey und A. Eppele. „Estimation of the virtual workpiece quality by the use of a spindle-integrated process force measurement“. In: *CIRP Annals* 68.1 (2019), S. 381–384.
- [Bre19b] C. Brecher, S. Ihlenfeldt, S. Neus, A. Steinert und A. Galant. „Thermal condition monitoring of a motorized milling spindle“. In: *Production Engineering* 13.5 (2019), S. 539–546.
- [Bre19c] C. Brecher und M. Weck. *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2 - Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung*. 9. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2019.
- [Bre21] C. Brecher und M. Weck. *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3 - Mechatronische Systeme, Steuerungstechnik und Automatisierung*. 9. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021.
- [Bro12] A. Broos. „Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen“. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Inst. für Technologie, 2012.
- [Bud96] E. Budak, Y. Altintas, und E. J. A. Armarego. „Prediction of Milling Force Coefficients From Orthogonal Cutting Data“. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 118.2 (1996), S. 216–224.

- [But22] Q. Butler, Y. Ziada, D. Stephenson und S. Andrew Gadsden. „Condition Monitoring of Machine Tool Feed Drives: A Review“. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 144.10 (2022), S. 624.
- [Bux22] T. Bux und A. Lechler. KOSMoS – Kollaborative Smart Contracting Plattform für digitale Wertschöpfungsnetze. Düsseldorf: VDI Verlag, 2022.
- [Bux92] O. Buxbaum. Betriebsfestigkeit - Sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile. 2., erw. Aufl. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1992.
- [Can95] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K. J. Astrom und P. Lischinsky. „A new model for control of systems with friction“. In: *IE-EE Transactions on Automatic Control* 40.3 (1995), S. 419–425.
- [Cla05] M. Clausen. „Zerspankraftprognose und -simulation für Dreh- und Fräsprozesse“. Dissertation. Hannover: Leibniz Universität Hannover, 2005.
- [Cus15] M. A. Cusumano, S. J. Kahl und F. F. Suarez. „Services, industry evolution, and the competitive strategies of product firms“. In: *Strategic Management Journal* 36.4 (2015), S. 559–575.
- [DEC19] DECKEL MAHO Seebach GmbH, Hrsg. Betriebsanleitung - DMG MORI DMC850V. 2019.
- [Del21] Deloitte, Hrsg. Equipment-as-a-Service: From Capex to Opex – new business models for the machinery industry. 2021.
- [Den09] B. Denkena, P. Blümel und J. Röbbing. „Den Maschinenzustand im Fokus*-Instandhaltung von Werkzeugmaschinen unter Verwendung von Zustandsüberwachungssystemen“. In: *wt Werkstattstechnik online* 99.(7/8) (2009), S. 470–478.
- [Den11] B. Denkena und H. K. Tönshoff. Spanen- Grundlagen. 3rd ed. VDI-Buch Ser. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Den20] B. Denkena, B. Bergmann und D. Stoppel. „Reconstruction of Process Forces in a Five-Axis Milling Center with a LSTM Neural Network in Comparison to a Model-Based Approach“. In: *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 4.3 (2020), S. 62.

- [Den21] B. Denkena, A. Krödel, O. Pape, A. Mücke und L. Ellersiek. „Identification of rake and flank face engagement parameters using a dexel-based material removal simulation with an oriented sweep volume“. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 35 (2021), S. 146–157.
- [Det17] L. Deters, A. Fischer, E. Santner und U. Stolz. GfT-Arbeitsblatt 7 Tribologie Verschleiß, Reibung- Definitionen, Begriffe, Prüfung. Aachen, 2017.
- [Die20] J. Dietrich und A. Richter. Praxis der Zerspantechnik- Verfahren, Prozesse, Werkzeuge. 13. überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [DIN13306] DIN EN 13306:2017-11. Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung
- [DIN2806] DIN ISO 2806:1996-4. Industrielle Automatisierungssysteme - Numerische Steuerung von Maschinen - Begriffe
- [DIN31051] DIN 31051:2019-6. Grundlagen der Instandhaltung
- [DIN69651-1] DIN 69651-1:1981-3. Werkzeugmaschinen für die Metallbearbeitung - Begriffe
- [DIN8580] DIN 8580:2022-12. Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung
- [DMG23a] DMG MORI. CELOS Machine & Manufacturing. 2023. URL: <https://de.dmgmori.com/produkte/digitalisierung/celos> (Zuletzt geprüft am: 06.08.2023).
- [DMG23b] DMG MORI. Equipment-as-a-Service- „Abo & All-In“ anstatt Investition und Kauf. 2023. URL: <https://de.dmgmori.com/produkte/payzr/equipment-as-a-service> (Zuletzt geprüft am: 06.08.2023).
- [El-15] I. El-Thalji und E. Jantunen. „A summary of fault modelling and predictive health monitoring of rolling element bearings“. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 60-61 (2015), S. 252–272.
- [Eng01] S. Engin und Y. Altintas. „Mechanics and dynamics of general milling cutters“. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41.15 (2001), S. 2195–2212.
- [Ern41] B. H. Ernst und M. E. Merchant. „Chip formatin, Friction and High Quality Machined Surfaces“. In: *ASM Symposium, The Surface Treatment of Metals* 29 (1941), S. 298–337.

- [Eur23] Eurostat, the statistical office of the European Union, Hrsg. Gliederung des Bruttoinlandsprodukts und Einkommens nach Wirtschaftsbereichen. 2023. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NAMA_10_A10__custom_1058892/bookmark/table?bookmarkId=a641148c-6316-4e42-aa1f-495f15777c76 (Zuletzt geprüft am: 14.07.2023).
- [Fal19] J. Falker. „Analyse des Betriebsverhaltens von Hochgeschwindigkeits-Wälzlagern unter radialen Lasten“. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen, 2019.
- [Fer21] A. Fertig, O. Kohn, B. Brockhaus und M. Weigold. „Consistent Contextualisation of Process and Quality Information for Machining Processes“. In: *Production at the Leading Edge of Technology*. Hrsg. von B.-A. Behrens, A. Brosius, W.-G. Drossel, W. Hintze, S. Ihlenfeldt und P. Nyhuis. Lecture Notes in Production Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 195–202.
- [Fer23] A. J. Fertig. „Datenbasierte, prozessparallele Qualitätsprognose für spanend hergestellte Werkstücke mittels maschinellen Lernens“. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt, 2023.
- [Fis18] J. Fisel, G. Lanza, P. Nyhuis, N. Stricker, A. Jacob, M. Schmidt und L. Nielsen. *Wandlungsfähige, menschenzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0*. 2018.
- [Fle07] J. Fleischer, M. Schopp, A. Broos und J. Wieser. „Datenbasis für lastabhängige Prozesseingriffe - Modularisierung und Analyse von Ausfallursachen zur Erhöhung der Verfügbarkeit von Werkzeugmaschinen“. In: *wt Werkstattstechnik online* 97.7/8 (2007), S. 491–497.
- [Fra22] D. Franke. *Wälzlagerdiagnose an Maschinensätzen- Diagnose und Überwachung von Wälzlagerfehlern und -schäden*. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2022.
- [Gla18] C. Glaser. *Risikomanagement im Leasing*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [GRO23] GROB. GROB-NET4Industry. 2023. URL: <https://www.grobgroup.com/produkte/produktbereiche/digitalisierung/> (Zuletzt geprüft am: 06.08.2023).

- [Hei21] Heidelberger Druckmaschinen AG. „Equipment as a Service“ wächst - Heidelberg will mit Munich Re Subskriptionsgeschäft deutlich ausbauen. 2021. URL: https://www.heidelberg.com/global/de/about_heidelberg/press_relations/press_release/press_release_details/press_release_174016.jsp (Zuletzt geprüft am: 06.08.2023).
- [HEL17] HELLER. HELLER4Use - Das neue Nutzungsmodell für mehr Flexibilität in Ihrer Fertigung. 2017. URL: <https://www.heller.biz/de/maschinen-und-loesungen/heller4use> (Zuletzt geprüft am: 06.08.2023).
- [Hel18] N. J. Helwig. „Zustandsbewertung industrieller Prozesse mittels multivariater Sensordatenanalyse am Beispiel hydraulischer und elektromechanischer Antriebssysteme“. Dissertation. Saarbrücken: Universität des Saarlandes, 2018.
- [Hen13] H. Hennrich. „Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe“. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Inst. für Technologie, 2013.
- [Her13] S. Herder. „Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptronischen Kugelgewindetriebe“. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Inst. für Technologie, 2013.
- [Heß21] Y. Heß. „Leasing – Eine Kapitalgebersicht“. In: Praxishandbuch Finanzierung von Innovationen. Hrsg. von C. Hoppe. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 309–320.
- [Hir12] A. Hirsch und A. Hellmich. „Aufbau und Auslegung funktionsbestimmender Werkzeugmaschinen-Baugruppen“. In: Werkzeugmaschinen. Hrsg. von R. Neugebauer. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 289–461.
- [Huf12] A. Huf. „Kumulative Lastermittlung aus Antriebsdaten zur Bewertung des Zustands von Werkzeugmaschinenkomponenten“. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2012.
- [Hyp10] P. Hypko, M. Tilebein und R. Gleich. „Clarifying the concept of performance-based contracting in manufacturing industries“. In: *Journal of Service Management* 21.5 (2010), S. 625–655.

- [ISO13374-1] ISO 13374-1:2003-3. Condition monitoring and diagnostics of machine systems - Data processing, communication and presentation- General guidelines
- [ISO13374-2] ISO 13374-2:2007-7. Condition monitoring and diagnostics of machines - Data processing, communication and presentation- Part 2: Data processing
- [ISO281] DIN ISO 281:2010-10. Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life
- [ISO3408] DIN ISO 3408-5:2011-4. Kugelgewindetriebe- Teil 5: Statische und dynamische axiale Tragzahl und Lebensdauer
- [Kae05] M. Kaever. „Steuerungsintegrierte Fertigungsprozeßüberwachung bei spanender Bearbeitung“. Diss. Aachen: RWTH Aachen, 2005.
- [Ken23] Kennametal. Cost Per Part Program. 2023. URL: <https://www.kennametal.com/ca/en/services/cost-per-part-program.html> (Zuletzt geprüft am: 06.08.2023).
- [Kie17] H. B. Kief, H. A. Roschiwal und K. Schwarz. CNC-Handbuch. 30. überarbeitete Auflage. Bd. 2017/2018. München: Hanser, 2017.
- [Kie52] O. Kienzle. „Die bestimmung von kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen“. In: *VDI-Z* 94.11 (1952), S. 299–305.
- [Kim96] T.-Y. Kim und J. Kim. „Adaptive cutting force control for a machining center by using indirect cutting force measurements“. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 36.8 (1996), S. 925–937.
- [Kis15] Kistler. Betriebsanleitung - Quarzkristall 3-Komponenten Dynamometer Typ 9255C. 2015.
- [Kis18] Kistler. Datenblatt Mehrkomponenten-Dynamometer, Typ 9255C. 2018.
- [Kle01] W. H. Klein. „Zustandsüberwachung von Rollen-Profileschienenführungen und Kugelgewindetrieben“. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen, 2001.
- [Klo18] F. Klocke. *Fertigungsverfahren 1- Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide*. 9. Aufl. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018.

- [Koe61] F. Koenigsberger und A. Sabberwal. „An investigation into the cutting force pulsations during milling operations“. In: *International Journal of Machine Tool Design and Research* 1.1-2 (1961), S. 15–33.
- [Köh12] M. Köhler, S. Jenne, K. Pötter und H. Zenner. *Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [Koh21] O. Kohn, P. Stanula, E. Lang, M. Weigold und J. Metternich. „Development of a Stress Factor as an Indicator for Stress-Based Payment Models for Machine Tools“. In: *Production at the Leading Edge of Technology*. Hrsg. von B.-A. Behrens, A. Brosius, W.-G. Drossel, W. Hintze, S. Ihlenfeldt und P. Nyhuis. *Lecture Notes in Production Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 239–247.
- [Koh22] O. Kohn, E. Lang, M. Körner, L. Bossler, J. Lippert, S. Schneider und S. Wunderlich. *Pay-per-Stress - Belastungsorientierte, datenbasierte Bezahlmodelle für Werkzeugmaschinen: Gemeinsamer Ergebnisbericht des BMWK Verbundprojektes Pay-per-Stress*. 2022.
- [Kön17] M. Königs, F. N. Wellmann, M. Wiesch, A. Epple und C. Brecher. „A scalable, hybrid learning approach to process-parallel estimation of cutting forces in milling applications“. In: *7. WGP-Jahreskongress Aachen*, 5.-6. Oktober 2017 / Herausgeber: Robert Schmitt, Günther Schuh. Aachen: Apprimus Verlag, 2017, S. 425–432.
- [Krä13] A. Krämer und J. Kempkes. „Modellierung und Simulation von nichtlinearen Reibungseffekten bei der Lageregelung von Servomotoren“. In: *FHWS Science Journal* 1.2 (2013), S. 47–57.
- [Krü14] M. Krüger. *„Modellbasierte Online-Bewertung von Fräsprozessen“*. Hochschulschrift. Hannover: Leibniz Universität Hannover, 2014.
- [Lar23] I. H. Laradji, A. Mueller und J. Qian. *Multi-layer Perceptron regressor*. 2023. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.neural_network.MLPRegressor.html (Zuletzt geprüft am: 25.10.2023).

- [Lay03] G. Lay, H. Meier, J. Schramm und A. Werding. „Betreiben statt Verkaufen: Stand und Perspektiven neuer Geschäftsmodelle für den Maschinen- und Anlagenbau“. In: *Industrie Management* Vol. 19 No. 4 (2003), S. 9–13.
- [Lii16] J. Liinamaa, M. Viljanen, A. Hurmerinta, M. Ivanova-Gongne, H. Luotola und M. Gustafsson. „Performance-based and functional contracting in value-based solution selling“. In: *Industrial Marketing Management* 59 (2016), S. 37–49.
- [Lun49] G. Lundberg und A. Palmgren. „Dynamic Capacity of Rolling Bearings“. In: *Journal of Applied Mechanics* 16.2 (1949), S. 165–172.
- [Mai15] D. Maier. „Sensorlose online Zustandserfassung von Vorschubantriebskomponenten in Werkzeugmaschinen“. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2015.
- [MES22] MESYS AG, Hrsg. MESYS Berechnungssoftware Benutzerhandbuch. 2022. URL: <https://www.mesys.ch/doc/MESYS-Manual-DE.pdf>.
- [Mos21] H. Mostaghimi, C. I. Park, G. Kang, S. S. Park und D. Y. Lee. „Reconstruction of cutting forces through fusion of accelerometer and spindle current signals“. In: *Journal of Manufacturing Processes* 68.1–3 (2021), S. 990–1003.
- [Nyq28] H. Nyquist. „Certain Topics in Telegraph Transmission Theory“. In: *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 47.2 (1928), S. 617–644.
- [OPC17] OPC 40502-1:2017-7. CNC Systems
- [OPC22] OPC 10000-1:2022-11. OPC Unified Architecture - Part 1 :Overview and Concepts
- [Pap20] O. Pape. „Entwicklung von Fräswerkzeugen durch geometrische Simulationen“. Dissertation. Hannover: Leibniz Universität Hannover, 2020.
- [Pau11] A. Paul. „Hilti Flottenmanagement – Service-innovationen am Beispiel von Elektrowerkzeugen“. In: *Serviceinnovationen in Industrieunternehmen erfolgreich umsetzen*. Hrsg. von S. Schweiger, K. Dressel und B. Pfeiffer. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2011, S. 103–120.

- [Pia19] J. Piasek, R. Patelski, D. Pazderski und K. Kozłowski. „Identification of a Dynamic Friction Model and Its Application in a Precise Tracking Control“. In: *Acta Polytechnica Hungarica* 16.10 (2019), S. 83–99.
- [Pos19] M. Postel, D. Aslan, K. Wegener und Y. Altintas. „Monitoring of vibrations and cutting forces with spindle mounted vibration sensors“. In: *CIRP Annals* 68.1 (2019), S. 413–416.
- [Rad07] D. Radaaj und M. Vormwald. Ermüdungsfestigkeit- Grundlagen für Ingenieure. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [Reh09] S. Rehling. „Technologische Erweiterung der Simulation von NC-Fertigungsprozessen“. Dissertation. Hannover: Leibniz Universität Hannover, 2009.
- [Rød18] H. Rødseth, P. Schjøberg, M. Wabner und U. Frieß. „Predictive Maintenance for Synchronizing Maintenance Planning with Production“. In: *Advanced Manufacturing and Automation VII*. Hrsg. von K. Wang, Y. Wang, J. O. Strandhagen und T. Yu. Bd. 451. Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2018, S. 439–446.
- [Ros87] K. Roschmann. „Betriebsdatenerfassung“. In: *CIM-Handbuch: Wirtschaftlichkeit durch Integration* (1987), S. 89–102.
- [Rot14] S. Roth und E. Stoppel. „Preissysteme zur Gestaltung und Aufteilung des Service Value“. In: *Service Value als Werttreiber*. Hrsg. von M. Bruhn und K. Hadwich. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 183–204.
- [Rud14] T. M. Rudolf. „Adaptierbare Parametrierung von Diagnosesystemen durch Verwendung digitaler Antriebssignale in der Prozessüberwachung“. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen, 2014.
- [San18] M. Sander. Sicherheit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen- Konzepte und Methoden zur Lebensdauervorhersage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018.
- [San21] M. Sanders, T. Xi, P. Dahlem, M. Fey, R. H. Schmitt und C. Brecher. „On-Machine Measurements im Internet of Production“. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116.4 (2021), S. 259–262.

- [Sar21] E. Sarikaya, B. Brockhaus, A. Fertig, H. Ranzau, P. Stanula, J. Walther, M. Weigold und J. Metternich. Data Driven Production – Application Fields, Solutions and Benefits. 2021.
- [Sch09] M. Schopp. „Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben“. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Inst. für Technologie, 2009.
- [Sch11] A. Schiffler. „Steuerungsintegrierte Prozessüberwachung bei der Zerspanung mit Motorspindeln“. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt, 2011.
- [Sch12] Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Hrsg. Bearinx® BEARINX-online Wellenberechnung. 2012. URL: https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/brochure/downloads_1/pbo_de_de.pdf.
- [Sch15] D. Schröder. Regelung von Antriebssystemen. 4. Auflage. Elektrische Antriebe. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.
- [Sch18a] Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Hrsg. Hochgenauigkeitslager - Spindellager. 2018. URL: https://www.schaeffler.de/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/catalogue_1/downloads_6/sp1_de_de.pdf.
- [Sch18b] T. Schirra, G. Martin, S. Vogel und E. Kirchner. „Ball Bearings as Sensors for Systematical Combination of Load and Failure Monitoring“. In: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference. Design Conference Proceedings. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia und The Design Society, Glasgow, UK, 2018, S. 3011–3022.
- [Sch20] G. Schuh, C. Kelzenberg, J. de Lange, M. Busch, F. Stracke und C. Frey. Predictive Maintenance- Entwicklung vorausschauender Wartungssysteme für Werkzeugbaubetriebe und Serienproduzenten : WerkPriMa. 1. Edition. Aachen: RWTH Aachen University, 2020.
- [Sch21a] Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Hrsg. Schaeffler Technisches Taschenbuch. 2021.

- [Sch21b] A. Schmidt. „Multivariate Vorspannungsüberwachung von Kugelgewindetrieben auf Basis steuerungsinterner Informationen“. Dissertation. Hannover: Leibniz Universität Hannover, 2021.
- [Sch21c] B. Schmucker, F. Trautwein, T. Semm, A. Lechler, M. F. Zaeh und A. Verl. „Implementation of an Intelligent System Architecture for Process Monitoring of Machine Tools“. In: *Procedia CIRP* 96.2 (2021), S. 342–346.
- [Sch21d] G. Schuh, J. Frank, L. Holst, D. Müller, T. Leiting und L. Bruhns. „Digitalization as an Enabler of Subscription Business Models in the Manufacturing Industry“. In: *Digital Business Models in Industrial Ecosystems*. Hrsg. von K.-I. Voigt und J. M. Müller. *Future of Business and Finance*. Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 49–70.
- [Sch22a] P. Schlegel. „Bewertung und Optimierung der Vollständigkeit von Betriebsdaten im Kontext der Fehlerprädiktion“. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen, 2022.
- [Sch22b] G. Schuh, V. Zeller und V. Stich, Hrsg. *Digitalisierungs- und Informationsmanagement*. Bd. 9. *Handbuch Produktion und Management*. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2022.
- [See21] U. G. Seebacher. *Assets-as-Service: Service statt Produkte - so gelingt der Einstieg in die Service-Economy*. Essentials. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Gabler, 2021.
- [Sie07] Siemens, Hrsg. *SINUMERIK 840D Virtueller NCK für die Simulation Einschränkungen - Funktionshandbuch*. 2007.
- [Sie21] Siemens, Hrsg. *SINUMERIK 840D sl, SINUMERIK Operate - Inbetriebnahmehandbuch*. 2021.
- [Sie22a] Siemens, Hrsg. *SINUMERIK 840D sl, SINAMICS S120 - Maschinendaten und Parameter*. 2022.
- [Sie22b] Siemens, Hrsg. *SINUMERIK 840D sl/828D SINUMERIK Access MyMachine /OPC UA*. 2022.
- [Sie22c] Siemens, Hrsg. *SINUMERIK EDGE - Operating Manual*. 2022.
- [Sie22d] Siemens, Hrsg. *SINUMERIK EDGE - Programming Manual*. 2022.
- [Smi08] G. T. Smith. *Cutting Tool Technology- Industrial Handbook*. London: Springer-Verlag, 2008.

- [Stä17] T. Stähr und G. Lanza. „Ausfallanalyse von Werkzeugmaschinen-Total Cost of Ownership 2.0 in Bezug auf den Anwendungsfall“. In: *wt Werkstattstechnik online* 107.7/8 (2017), S. 507–510.
- [Sta20] P. Stanula, C. Praetzas, O. Kohn, J. Metternich, M. Weigold und A. Buchwald. „Stress-oriented, data-based payment model for machine tools“. In: *Procedia CIRP* 93.5 (2020), S. 1526–1531.
- [Sta23] P. Stanula. „Monetäre Bewertung des belastungsbasierten Leasings für Werkzeugmaschinen“. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt, 2023.
- [Str12] M. Strunz. Instandhaltung: Grundlagen - Strategien - Werkstätten. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2012.
- [Tay07] F. W. Taylor. „On the art of metal cutting“. In: *Trans. ASME* 28 (1907), S. 31–35.
- [Tet22] Tetralytix GmbH, Hrsg. Toolzyzer Leistungsbeschreibung. 2022.
- [Tet23] Tetralytix GmbH, Hrsg. Toolzyzer User’s Guide - Version 1.3. 2023.
- [Tru23] Trumpf. Pay per Part – damit Ihre Kosten zu Ihrer Auslastung passen. 2023. URL: https://www.trumpf.com/de_DE/produkte/services/services-maschinen-systeme-und-laser/pay-per-part/ (Zuletzt geprüft am: 06.08.2023).
- [VDI5600] VDI 5600:2016-10. Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems – MES)
- [VDM23] VDMA und PTW, TU Darmstadt, Hrsg. Industrie 4.0 Interoperabilität durch OPC UA mit Companion Specifications-Mehrwerte für Stakeholder des Maschinen- und Anlagenbaus. 2023. URL: https://vdma.org/documents/34570/77803117/VDMA_Leitfaden_Mehrwerte_DE.pdf/4bd334d9-3bb3-be2e-5c83-6fa31bebd2be (Zuletzt geprüft am: 18.12.2023).
- [Vei20] M. Veith, A. Zimmermann, J. Hillenbrand und J. Fleischer. „Detektion des Vorspannungsverlusts in Kugelgewindtrieben/-Detection of preload loss in ball screw drives – Optimization of machine tool maintenance with the Guard Plus system“. In: *wt Werkstattstechnik online* 110.07-08 (2020), S. 485–490.

- [Ver23] Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V., Hrsg. Marktbericht 2022: Die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie und ihre Stellung im Weltmarkt. Frankfurt, 2023.
- [Wal11] M. Walther. „Antriebsbasierte Zustandsdiagnose von Vorschubantrieben“. Diss. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2011.
- [WEI21] WEISSER. ARTERY - Multifunktionales horizontales Bearbeitungszentrum. 2021. URL: https://www.weisser-web.com/wp-content/uploads/2021/09/ARTERY_2021_DE_web.pdf (Zuletzt geprüft am: 06.08.2023).
- [Wen22] Y. Wen, M. Fashiar Rahman, H. Xu und T.-L. B. Tseng. „Recent advances and trends of predictive maintenance from data-driven machine prognostics perspective“. In: *Measurement* 187 (2022), S. 110276.
- [WFL19] WFL. Smarte Technologien für die Produktion von Morgen. 2019. URL: <https://www.wfl.at/newsroom/news/detail/smar-te-techno-logien-fuer-die-produktion-von-morgen> (Zuletzt geprüft am: 06.08.2023).
- [Win09] A. Winkelmann und S. Kässens. Fachkonzeptionelle Spezifikation einer Betriebsdatenerfassungskomponente für ERP-Systeme. Bd. 124. Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik. 2009.
- [Wol09] J. Wolf. „Steuerungsintegrierte, adaptive Programmausführung einer aufgabenorientierten Programmierung in STEP-NC“. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen, 2009.
- [Wun18] R. Wunderlich, M. Lang und L. Carré. „Verfahren zur Einrichtung und/oder Überwachung von Betriebsparametern einer Werkstückbearbeitungsmaschine- Patent“. 50 2015 004 616.3. 2018. URL: <https://register.dpma.de/DPMRegister/pat/register?AKZ=E151534898>.
- [Xi21] T. Xi, I. M. Benincá, S. Kehne, M. Fey und C. Brecher. „Tool wear monitoring in roughing and finishing processes based on machine internal data“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 113.11-12 (2021), S. 3543–3554.
- [Yag14] T. Yagmur. „Analyse, Verbesserung und Beschreibung des Verschleißverhaltens von Kugelgewindetrieben für Werkzeugmaschinen“. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen, 2014.

- [Yan19] Z. Yang, X. Li, C. Chen, H. Zhao, D. Yang, J. Guo und W. Luo. „Reliability assessment of the spindle systems with a competing risk model“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability* 233.2 (2019), S. 226–234.

A Anhang

A.1 Ergebnisse experimentelle Ermittlung Kraftkoeffizienten

Übersicht Versuchsplan zur Ermittlung der Kraftkoeffizienten

Tabelle A.1: Versuchsplan für den Werkstoff 42CrMo4

| VersuchsID | Werkzeug | D mm | a_e mm | a_p mm | v_c $\frac{m}{min}$ | f_z/f_U mm |
|------------|--------------|-----------|-------------|-------------|--------------------------|-----------------|
| 1.1 | Schaftfräser | 16 | 16 | 10 | 90 | 0,02...0,10 |
| 1.2 | Eckfräser | 32 | 20 | 2 | 160 | 0,12...0,24 |
| 1.3 | Eckfräser | 63 | 60 | 2 | 170 | 0,12...0,20 |
| 1.4 | Bohrer | 12 | - | - | 100 | 0,18...0,28 |

Tabelle A.2: Versuchsplan für den Werkstoff AlCuMgPb

| VersuchsID | Werkzeug | D mm | a_e mm | a_p mm | v_c $\frac{m}{min}$ | f_z/f_U mm |
|------------|--------------|-----------|-------------|-------------|--------------------------|-----------------|
| 2.1 | Schaftfräser | 16 | 16 | 15 | 800 | 0,02...0,10 |
| 2.2 | Eckfräser | 32 | 20 | 6 | 900 | 0,04...0,12 |
| 2.3 | Eckfräser | 63 | 60 | 2 | 900 | 0,04...0,14 |
| 2.4 | Bohrer | 12 | - | - | 200 | 0,24...0,30 |

Ergebnisse der ermittelten Kraftkoeffizienten

Tabelle A.3: Ermittelte Kraftkoeffizienten nach [Bud96]

| VersuchsID | $\frac{K_{tc}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}$ | $\frac{K_{rc}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}$ | $\frac{K_{ac}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}$ | $\frac{K_{te}}{\frac{N}{\text{mm}}}$ | $\frac{K_{re}}{\frac{N}{\text{mm}}}$ | $\frac{K_{ae}}{\frac{N}{\text{mm}}}$ |
|------------|--|--|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1.1 | 2.134,05 | 766,39 | 770,528 | 21,863 | 206,322 | 2,481 |
| 2.1 | 1.040,258 | 280,17 | 546,213 | 13,602 | 28,386 | -3,505 |

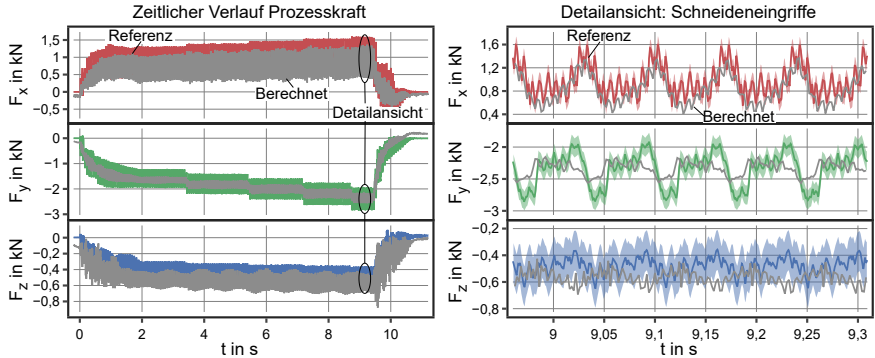
Anmerkung: Negative Kraftkoeffizienten sind Folge der Überlagerungen verschiedener Effekten beim Fräsprozess, wie beispielsweise der Überlagerung der resultierenden Prozesskräfte aufgrund der Stirn- und Umfangsschneiden. Für eine genauere Bestimmung der Kraftkoeffizienten sind die experimentellen Versuche so anzupassen, dass nur der Eingriff der Umfangsschneiden untersucht wird.

Tabelle A.4: Ermittelte Kraftkoeffizienten nach [Pap20] unter Berücksichtigung der Mittelwerte und Amplituden

| VersuchsID | $\frac{K_{tc}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}$ | $\frac{K_{rc}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}$ | $\frac{K_{ac}}{\frac{N}{\text{mm}^2}}$ | $\frac{K_{te}}{\frac{N}{\text{mm}}}$ | $\frac{K_{re}}{\frac{N}{\text{mm}}}$ | $\frac{K_{ae}}{\frac{N}{\text{mm}}}$ |
|------------|--|--|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1.1 | 2.118,476 | 791,819 | 651,508 | 13,145 | 15,227 | 1,501 |
| 1.2 | 1.421,169 | 150,975 | 0,00 | 98,463 | 191,704 | 0,0 |
| 1.3 | 1.749,995 | 306,916 | 0,00 | 71,218 | 146,313 | 0,0 |
| 1.4 | 10.000,0 | 92,277 | 0,007 | 110,473 | 110,473 | 266,630 |
| 2.1 | 918,230 | 250,264 | 280,978 | 7,522 | 17,828 | 0,0 |
| 2.2 | 955,336 | 0,0 | 76,362 | 0,0 | 16,266 | 0,0 |
| 2.3 | 727,497 | 123,682 | 84,154 | 8,123 | 12,312 | 4,606 |
| 2.4 | 5.332,329 | 0,0 | 2.838,538 | 0,0 | 53,991 | 0,0 |

Anmerkung: Für die Ermittlung der Koeffizienten nach Pape sind beim Optimierungsalgorithmus Grenzen von 0 bis 10.000 gesetzt. Die Ergebnisse zeigen ebenfalls eine Überlagerung verschiedener Effekte beim Fräsprozess. Bei der Bestimmung der Kraftkoeffizienten des Bohrers zeigt sich, dass die Prozesskräfte in x- und y-Richtung keinen relevanten Einfluss haben und dadurch zu hohe Ergebnisse ermittelt werden. Hier ist das Vorgehen so anzupassen, dass man zur Berechnung das Schnittmoment und die Axialkraft heranzieht.

A.2 Experimentelle Untersuchungen ermittelter Prozesskräfte



Prozess: Planfräsen

Material: 42CrMo4

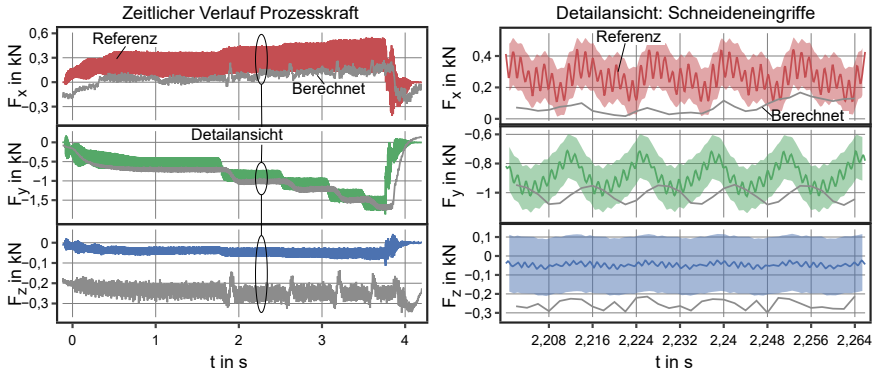
Werkzeug: Planfräser

Schnittparameter:

$a_e = 60 \text{ mm}$ $v_c = 170 \text{ m/min}$

$a_p = 2 \text{ mm}$ $f_z = 0, 12 \dots 0, 20 \text{ mm}$

Abbildung A.1: Zeitverlauf der aus Antriebsdaten berechneten Prozesskräfte für 42CrMo4



Prozess: Planfräsen
 Material: AlCuMgPb
 Werkzeug: Planfräser

Schnittparameter:
 $a_e = 60 \text{ mm}$ $v_c = 900 \text{ m/min}$
 $a_p = 6 \text{ mm}$ $f_z = 0,04 \dots 0,14 \text{ mm}$

Abbildung A.2: Zeitverlauf der aus Antriebsdaten berechneten Prozesskräfte für AlCuMgPb

A.3 Übersicht NC-Signale

Tabelle A.5: Zuordnung NC-Signale (§axis = Achsindex)

| Bezeichnung | Sinumerik-Adapter | BTSS |
|------------------|-------------------|---|
| ActOperationMode | | /Bag/State/opmode[u1] |
| ActProgramStatus | | /Channel/State/progStatus[u1] |
| ActGFunctions | | /Channel/SelectedFunctions/ncFktAct[u1,1] |
| ActProgramName | | /Channel/ProgramInfo/progName[u1,1] |
| ActProgramBlock | | /Channel/ProgramInfo/block[u1,2] |
| ActOverride | | /Channel/State/acTotalOvr[u1,1] |
| ToolId | | /Channel/State/actToolIdent[u1,1] |
| ToolLength | | /Channel/State/actToolRadius[u1,1] |
| ToolRadius | | /Channel/State/actToolLength[u1,1] |
| AnglePos | | /Channel/Spindle/cmdAngPos[u1,\$axis] |
| CmdSpeed | ENC_POS\$axis | /Channel/Spindle/cmdSpeed[u1,\$axis] |
| ActPower | POWER\$axis | /Channel/MachineAxis/aaPower[u1,\$axis] |
| ActCurrent | CURRENT\$axis | /Channel/MachineAxis/aaCurr[u1,\$axis] |
| CmdTorque | TORQUE\$axis | /Channel/MachineAxis/aaTorque[u1,\$axis] |
| PosDirect | ENC2_POS\$axis | /Channel/MachineAxis/valm2[u1,\$axis] |
| PosIndirect | ENCL_POS\$axis | /Channel/MachineAxis/valm2[u1,\$axis] |
| CmdPos | CTRL_POS\$axis | /Channel/MachineAxis/cmdContrPos[u1,\$axis] |
| CmdSpeed | CMD_SPEED\$axis | /Channel/GeometricAxis/cmdFeedRate[u1,\$axis] |
| ActPower | POWER\$axis | /Channel/MachineAxis/aaPower[u1,\$axis] |
| ActCurrent | CURRENT\$axis | /Channel/MachineAxis/aaCurr[u1,\$axis] |
| CmdTorque | TORQUE\$axis | /Channel/MachineAxis/aaTorque[u1,\$axis] |
| ZeroOffset | | /Channel/ActualFrame/linShift[u1,\$axis] |
| Cycle | CYCLE | |

Tabelle A.6: Übersicht NC-Signale für ein 3-Achs-Bearbeitungszentrum

| Prefix | Bezeichnung | Datentyp | Abtastrate | Einheit | Beschreibung |
|----------|------------------|----------|------------|------------|-------------------------------|
| CH1 | ActOperationMode | Int | > 50 ms | - | Aktive Betriebsart |
| CH1 | ActProgramStatus | Int | > 50 ms | - | Programmzustand |
| CH1 | ActGFunctions | String | > 50 ms | - | Aktive G-Funktion |
| CH1 | ActProgramName | String | > 50 ms | - | Aktives NC-Programm |
| CH1 | ActProgramBlock | String | > 50 ms | - | Aktueller NC-Satz |
| CH1 | ActOverride | Double | > 50 ms | % | Gesamter Bahnoverride |
| CH1 | ToolId | Int | > 50 ms | - | WerkzeugId |
| CH1 | ToolLength | Double | > 50 ms | mm | Werkzeuglänge |
| CH1 | ToolRadius | Double | > 50 ms | mm | Werkzeugradius |
| SP1 | AnglePos | Double | 2 ms | ° | Ist-Winkelposition |
| SP1 | CmdSpeed | Double | 2 ms | °/s, U/min | Drehzahlsollwert |
| SP1 | ActPower | Double | 2 ms | W | Antriebswirkleistung |
| SP1 | ActCurrent | Double | 2 ms | A | Stromistwert |
| SP1 | CmdTorque | Double | 2 ms | Nm | Antriebsmomentensollwert |
| X1,Y1,Z1 | PosDirect | Double | 2 ms | mm | Ist-Position Encoder 2 im MKS |
| X1,Y1,Z1 | PosIndirect | Double | 2 ms | mm | Ist-Position Encoder 1 im MKS |
| X1,Y1,Z1 | CmdPos | Double | 2 ms | mm | Lagesollwert |
| X1,Y1,Z1 | CmdSpeed | Double | 2 ms | mm/s | Geschwindigsollwert |
| X1,Y1,Z1 | ActPower | Double | 2 ms | W | Antriebswirkleistung |
| X1,Y1,Z1 | ActCurrent | Double | 2 ms | A | Stromistwert |
| X1,Y1,Z1 | CmdTorque | Double | 2 ms | Nm | Antriebsmomentensollwert |
| X1,Y1,Z1 | ZeroOffset | Double | > 50 ms | mm | Nullpunktverschiebung |
| - | Cycle | Int | 2 ms | - | Zykluszähler |

A.4 Modellierung der objektorientierten Struktur

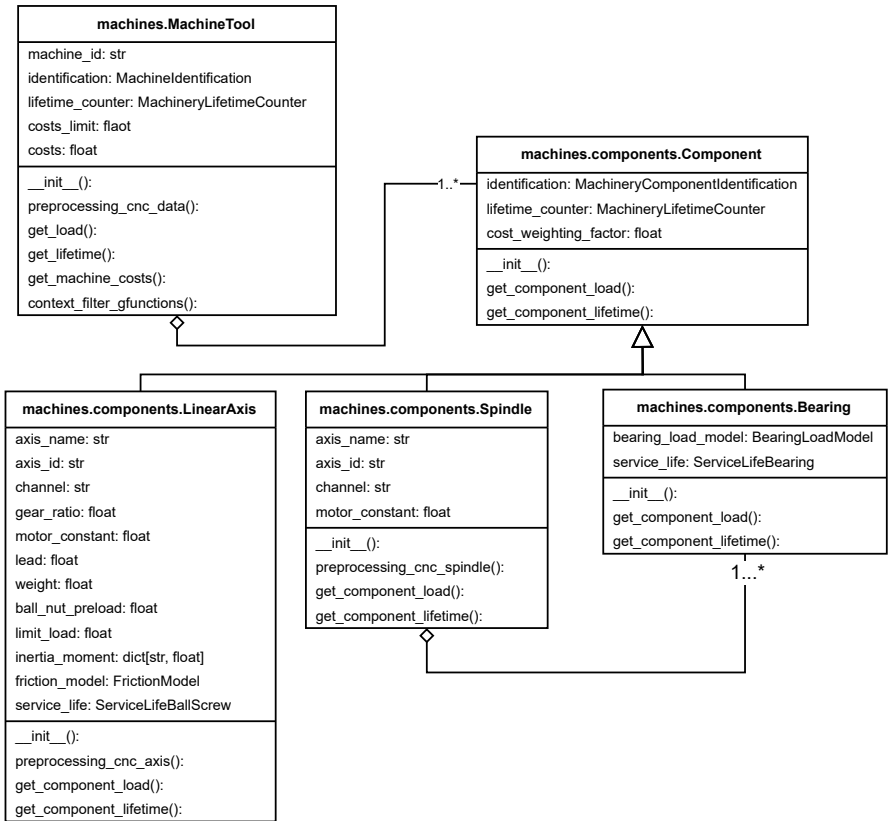


Abbildung A.3: Klassendiagramm der objektorientierten Struktur

A.5 Maschinenkonfiguration

Exemplarische machine_config.json:

```
{
  "identification": {
    "asset_id": "MI",
    "component_name": "DMC850",
    "manufacturer": "DMG MORI",
    "manufacturer_uri": "https://dmgmori.com/",
    "model": "DMC850V",
    "serial_number": "2019123123",
    "device_class": "MachiningCentre",
    "initial_operation_date": "2019-06-02",
    "year_of_construction": 2018,
    "month_of_construction": 12,
    "location": "TU Darmstadt PIW TEC-LAB"
  },
  "costs_limit": 0.0,
  "costs": 0.0,
  "lifetime_counter": {
    "consumed_life": 0.0
  },
  "components": [
    {
      "identification": {
        "asset_id": "SP1",
        "component_name": "Spindel",
        "manufacturer": "DMG MORI",
        "manufacturer_uri": "https://dmgmori.com/",
        "model": "Spindle",
        "serial_number": "2019-12312321",
        "device_class": "Spindle",
        "initial_operation_date": "2019-06-02",
        "year_of_construction": 2018,
        "month_of_construction": 12
      },
      "axis_id": 6,
      "axis_name": "SP1",
      "channel": 1,
      "cost_weighting_factor": 0.4,
      "speed_max": 20000.0,
      "motor_constant": 1.0,
      "lifetime_counter": {
```



```

    "consumed_life": 0.0,
    "load_integral": 0.0
  },
  "components": [
  {
    "identification": {
      "asset_id": "B1",
      "component_name": "Spindellager",
      "manufacturer": "",
      "manufacturer_uri": "",
      "model": "Spindle",
      "serial_number": "2019-12312321",
      "device_class": "Bearing",
      "initial_operation_date": "2019-06-02"
    },
    "cost_weighting_factor": 1.0,
    "bearing_load_model": {
      "asset_id": "B1",
      "path": "20230504_SP1_Lager_1_Model_3.sav"
    },
    "service_life": {
      "C_dyn": 0.0,
      "a_1": 0.093,
      "a_iso": 1.0,
      "duty_cycle_reference": "6_dutyCycle.csv"
    },
    "lifetime_counter": {
      "consumed_life": 0.0,
      "load_integral": 0.0
    }
  },
  {
    "identification": {
      "asset_id": "B2",
      "component_name": "Spindellager",
      "manufacturer": "",
      "manufacturer_uri": "",
      "model": "Spindle",
      "serial_number": "2019-12312321",
      "device_class": "Bearing",
      "initial_operation_date": "2019-06-02"
    },
    "cost_weighting_factor": 1.0,

```

```

    "bearing_load_model":{
      "asset_id": "B2",
      "path": "20230504_SP1_Lager_2_Model_1.sav"
    },
    "service_life": {
      "C_dyn": 0.0,
      "a_1": 0.093,
      "a_iso": 1.0,
      "duty_cycle_reference": "6_dutyCycle.csv"
    },
    "lifetime_counter": {
      "consumed_life": 0.0,
      "load_integral": 0.0
    }
  },
  {
    "identification": {
      "asset_id": "B3",
      "component_name": "Spindellager",
      "manufacturer": "",
      "manufacturer_uri": "",
      "model": "Spindle",
      "serial_number": "2019-12312321",
      "device_class": "Bearing",
      "initial_operation_date": "2019-06-02"
    },
    "cost_weighting_factor": 1.0,
    "bearing_load_model":{
      "asset_id": "B3",
      "path": "20230504_SP1_Lager_3_Model_2.sav"
    },
    "service_life": {
      "C_dyn": 0.0,
      "a_1": 1.0,
      "a_iso": 1.0,
      "duty_cycle_reference": "6_dutyCycle.csv"
    },
    "lifetime_counter": {
      "consumed_life": 0.0,
      "load_integral": 0.0
    }
  }
},
{

```

```

    "identification": {
      "asset_id": "B4",
      "component_name": "Spindellager",
      "manufacturer": "",
      "manufacturer_uri": "",
      "model": "Spindle",
      "serial_number": "2019-12312321",
      "device_class": "Bearing",
      "initial_operation_date": "2019-06-02"
    },
    "cost_weighting_factor": 1.0,
    "bearing_load_model": {
      "asset_id": "B4",
      "path": "20230504_SP1_Lager_4_Model_1.sav"
    },
    "service_life": {
      "C_dyn": 0.0,
      "a_1": 1.0,
      "a_iso": 1.0,
      "duty_cycle_reference": "6_dutyCycle.csv"
    },
    "lifetime_counter": {
      "consumed_life": 0.0,
      "load_integral": 0.0
    }
  }
]
},
{
  "identification": {
    "asset_id": "X1",
    "component_name": "Kugelgewindetrieb",
    "manufacturer": "",
    "manufacturer_uri": "",
    "model": "FeedAxis",
    "serial_number": "2019-12312321",
    "device_class": "LinearAxis",
    "initial_operation_date": "2019-06-02",
    "year_of_construction": 2018,
    "month_of_construction": 12
  },
  "axis_id": 1,
  "axis_name": "X1",

```

```

"channel": 1,
"cost_weighting_factor": 0.2,
"lead": 0.03,
"gear_ratio": 3.54,
"motor_constant": 1.37,
"weight": 0.0,
"inertia_moment": {
  "total": 0.0545,
  "rot": 0.02346,
  "trans": 0.03106
},
"ball_nut_preload": 0.0,
"service_life": {
  "C_dyn": 0.0,
  "f_ar": 0.21,
  "f_op": 0.6,
  "f_w": 1.5,
  "duty_cycle_reference": "1_dutyCycle.csv"
},
"friction_model": {
  "friction_measurement": "20230116_X1_Friction.sav",
  "friction_component_factor": {
    "trans": 0.32,
    "rot": 0.68
  }
},
"lifetime_counter": {
  "consumed_life": 0.0,
  "load_integral": 0.0
}
},
{
  "identification": {
    "asset_id": "Y1",
    "component_name": "Kugelgewindetrieb",
    "manufacturer": "",
    "manufacturer_uri": "",
    "model": "FeedAxis",
    "serial_number": "2019-12312321",
    "device_class": "LinearAxis",
    "initial_operation_date": "2019-06-02",
    "year_of_construction": 2018,
    "month_of_construction": 12
  }
}

```

```

    },
    "axis_id": 2,
    "axis_name": "Y1",
    "channel": 1,
    "cost_weighting_factor": 0.2,
    "lead": 0.03,
    "gear_ratio": 3.54,
    "motor_constant": 1.37,
    "weight": 0.0,
    "inertia_moment": {
      "total": 0.04956,
      "rot": 0.02273,
      "trans": 0.02683
    },
    "ball_nut_preload": 0.0,
    "service_life": {
      "C_dyn": 0.0,
      "f_ar": 0.21,
      "f_op": 0.6,
      "f_w": 1.5,
      "duty_cycle_reference": "1_dutyCycle.csv"
    },
  },
  "friction_model": {
    "friction_measurement": "20230116_Y1_Friction.sav",
    "friction_component_factor": {
      "trans": 0.32,
      "rot": 0.68
    }
  }
},
"lifetime_counter": {
  "consumed_life": 0.0,
  "load_integral": 0.0
}
},
{
  "identification": {
    "asset_id": "Z1",
    "component_name": "Kugelgewindetrieb",
    "manufacturer": "",
    "manufacturer_uri": "",
    "model": "FeedAxis",
    "serial_number": "2019-12312321",
    "device_class": "LinearAxis",

```

```

    "initial_operation_date": "2019-06-02",
    "year_of_construction": 2018,
    "month_of_construction": 12
  },
  "axis_id": 3,
  "axis_name": "Z1",
  "channel": 1,
  "cost_weighting_factor": 0.2,
  "lead": 0.03,
  "gear_ratio": 3.13,
  "motor_constant": 1.37,
  "weight": 311.25,
  "inertia_moment": {
    "total": 0.02660,
    "rot": 0.01847,
    "trans": 0.00813
  },
  "ball_nut_preload": 0.0,
  "service_life": {
    "C_dyn": 0.0,
    "f_ar": 0.21,
    "f_op": 0.6,
    "f_w": 1.5,
    "duty_cycle_reference": "1_dutyCycle.csv"
  },
  "friction_model": {
    "friction_measurement": "20230116_Z1_Friction.sav",
    "friction_component_factor": {
      "trans": 0.32,
      "rot": 0.68
    }
  },
  "lifetime_counter": {
    "consumed_life": 0.0,
    "load_integral": 0.0
  }
}
]
}

```