

Genauigkeitssteigerung der spanenden Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile mit Industrierobotern mittels Posenoptimierung

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Cornelia Maria Tepper, M.Sc.

aus Lüdinghausen

Berichtersteller: Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold
Mitberichtersteller: Prof. Dr. rer. nat. Debora Clever
Tag der Einreichung: 23.01.2024
Tag der mündlichen Prüfung: 17.04.2024

Darmstadt 2024
D17

Tepper, Cornelia Maria: Genauigkeitssteigerung der spanenden Nachbearbeitung
additiv gefertigter Bauteile mit Industrierobotern mittels Posenoptimierung,
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt.

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2024

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-275080

Tag der mündlichen Prüfung: 17.04.2024

Veröffentlicht unter CC BY 4.0 International

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

ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wird die Steigerung der Genauigkeit bei der Zerspanung von additiv gefertigten Bauteilen durch Änderung der Orientierung des Tool Center Points (TCP) unter Beibehaltung der kartesischen Position untersucht.

Die Kombination von additiven Fertigungsverfahren wie dem drahtbasierten Directed Energy Deposition mit subtraktiven Fertigungsverfahren zu einer hybrid-additiven Fertigungskette in einer Roboterzelle stellt eine vielversprechende Lösung dar, um den Ressourcenverbrauch in der Produktion zu reduzieren. Allerdings stehen Robotersysteme aufgrund geringerer Steifigkeit im Vergleich zu Werkzeugmaschinen vor Herausforderungen bei der Zerspanung additiv gefertigter Bauteile. Unstete Oberflächen und die Mikrostruktur der additiv gefertigten Bauteile resultieren in höheren Fräskräften und Instabilitäten, was die Bauteilqualität in Form von Formabweichungen und Oberflächenqualität beeinträchtigt. Diese Arbeit zielt darauf ab, über die Umorientierung des TCPs die statische und dynamische Nachgiebigkeit der Roboterkinematik im Fräsprozess zu reduzieren, um eine präzisere und stabilere Zerspanung zu erreichen.

In Vorversuchen werden additiv gefertigte Bauteile charakterisiert und deren Zerspanbarkeit untersucht, wobei höhere Fräskräfte und unregelmäßige Prozesse im Vergleich zu konventionellen Bauteilen festgestellt werden.

Anschließend erfolgt eine dynamische Analyse der Roboterstruktur mittels Modalanalysen und Betriebsschwingungsmessungen. Es zeigt sich, dass Rattern aufgrund von Lagekopplung auftritt und die Änderung der Orientierung des TCPs Auswirkungen auf das dynamische Verhalten hat. Es werden vorteilhafte Orientierungen bezüglich des dynamischen Verhaltens identifiziert, die zu stabileren Zerspanprozessen führen.

Danach wird das statische Verhalten der Roboterstruktur untersucht und das Steifigkeitsmodell der Roboterstruktur über den Modellierungsansatz der erweiterten Vorwärtskinematik erstellt. Zur Identifikation der Steifigkeitsparameter wird der optimale Versuchsaufbau über die Bayessche Inferenz verwendet, um so die Anzahl der erforderlichen Experimente zu reduzieren. Auf Grundlage des Steifigkeitsmodells wird anschließend ein Optimierungsmodell aufgebaut, mit dem die Pose des Roboters unter Beibehaltung der kartesischen Position hinsichtlich der Minimierung der Verschiebung des TCPs unter definierter Last optimiert wird.

Abschließend werden die Erkenntnisse aus der Optimierung und der dynamischen Untersuchung in Zerspanversuchen an additiv gefertigten Bauteilen validiert. Hierbei zeigt sich, dass die Verwendung der optimierten Orientierungen die besten Ergebnisse hinsichtlich Formgenauigkeit und Oberflächenqualität erzielen. Die Formabweichung verringert sich je nach Vorschubgeschwindigkeit und Vorschubrichtung um bis zu 0,2 mm im Vergleich zur Ausgangsorientierung. Auch die hinsichtlich der dynamischen Stabilität verbesserten Orientierungen erzielen geringere Formabweichungen als die Ausgangsorientierung.

Die Arbeit zeigt, dass die Umorientierung des TCPs den Fräsprozess genauer und stabiler gestalten kann und einen kostengünstigen und leicht implementierbaren Ansatz aufzeigt, die Genauigkeit und Stabilität der Zerspanung von additiv gefertigten Bauteilen zu verbessern. Die Erkenntnisse tragen dazu bei, die roboterbasierte hybrid-additive

Fertigungskette in die Produktion zu integrieren und die Transformation zu einer flexiblen und ressourcenschonenden Fertigung voranzutreiben.

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Die Ressourceneffizienz spielt eine entscheidende Rolle bei der Klimawende, da sie dazu beiträgt, den Verbrauch natürlicher Ressourcen zu reduzieren und gleichzeitig die Produktivität zu steigern. Durch eine effizientere Nutzung von Rohstoffen, Wasser und Energie können Unternehmen und Gesellschaften ihre Umweltauswirkungen verringern und gleichzeitig Kosten senken. Die Materialeffizienz ist neben der Energieeffizienz ein wesentlicher Baustein zur Ressourceneffizienz. Sie kann durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren deutlich gesteigert werden. In der Luft- und Raumfahrtindustrie beispielsweise, kann das Potenzial der additiven Fertigungsverfahren besonders gut genutzt werden indem große Komponenten ressourcenschonend additiv aufgebaut werden. Im Vergleich zu subtraktiven Fertigungsverfahren weisen additive Fertigungsverfahren jedoch geringere Fertigungsgenauigkeiten und Oberflächengüten auf. Eine spanende Nachbearbeitung additiv gefertigter Komponenten ist häufig zwingend erforderlich. Die Verbindung von additiven und subtraktiven Fertigungsprozessschritten wird als hybride oder auch hybrid-additive Prozesskette bezeichnet.

Hybride Prozessketten können neben klassischen Produktionsmaschinen ebenfalls durch den Einsatz von Industrierobotern realisiert werden, indem an einem Sechs-Achs-Knickarmroboter ein Endeffektorenwechsel zwischen Additivauftragswerkzeug und Frässpindel vorgenommen wird. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber Werkzeugmaschinen sind die deutlich geringeren Investitionskosten. Ein weiterer Vorteil ist der große Arbeitsbereich und die Flexibilität. Allerdings weisen Robotersysteme im Vergleich zu Werkzeugmaschinen eine höhere statische und dynamische Nachgiebigkeit auf, was zu größeren Pfadabdrängungen und zu Prozessinstabilitäten führen kann.

An diesem Punkt setzt die vorliegende Dissertation von Frau Cornelia Tepper auf. Das übergeordnete Ziel ihrer Dissertation ist die Steigerung der Genauigkeit bei der Zerspanung von additiv gefertigten Bauteilen mit Industrierobotern. Dies erfolgt über die Identifikation von stabileren und genaueren Prozesskonstellationen, die gleichzeitig kostengünstig und anwenderfreundlich zu implementieren sind. Dabei soll als Randbedingung die Position der Bauteile im Arbeitsraum sowie die Werkzeug-Werkstückorientierung nicht verändert werden.

Darmstadt, Juni 2024

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

VORWORT DER VERFASSERIN

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

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit und umfassende Unterstützung. Des Weiteren bedanke ich mich bei Frau Prof. Dr. rer. nat. Debora Clever für die Übernahme des Korreferats.

Viele Inhalte dieser Arbeit entstanden im Rahmen des vom BMWK geförderten Forschungsprojekts EnerClad, daher bedanke ich mich sehr bei allen Projektpartnern für die fachlichen und kollegialen Gespräche.

Herzlicher Dank geht an meine Kolleginnen und Kollegen, insbesondere aus der Forschungsgruppe TEC und der ehemaligen WIR, für die spannenden Diskussionen, Anregungen und die offene und konstruktive Zusammenarbeit. Dies hat die Arbeit am PTW zu etwas besonderem gemacht. Besonderer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen Christian Baier, Felix Hähn, Florian Unterderweide, Markus Weber, Patrick Fehn und Leonie Kilian für die fachliche und moralische Unterstützung. Weiterer Dank gilt Christopher Krebs und Willi Wünschel für die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Außerdem möchte ich mich bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des PTW im Support, Buchhaltung, Media, IT und mechanischer Werkstatt für ihre Unterstützung bedanken.

Zudem danke ich den zahlreichen Bacheloranden, Masteranden und studentischen Hilfskräften, die ich während meiner Zeit am Institut betreuen durfte. Besonders danken möchte ich Jonas Zarges, der in meiner Zeit am Institut in vielfältiger Weise zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat. Ohne deine Unterstützung wäre diese Arbeit in vorliegendem Umfang nur schwer möglich gewesen.

Ein besonderer Dank gilt meiner Mutter Martina sowie meinen Geschwistern Corinna und Carsten, die mir ermöglicht haben meinen beruflichen Weg zu gehen und mich mit dem notwendigen Rückhalt und offenem Ohr unterstützt haben.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen engsten Freunden bedanken, auch wenn es euch vielleicht nicht bewusst ist, ihr habt einen entscheidenden Teil zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen. Danke für die schönen und unvergesslichen Momente außerhalb der beruflichen Tätigkeit und das Bestärken weiterzumachen.

Darmstadt, Juni 2024

Cornelia Maria Tepper

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung und Motivation.....	1
2	Grundlagen und Stand der Forschung.....	5
2.1	Zerspanung mit Industrierobotern.....	5
2.1.1	Aufbau von Industrierobotern.....	5
2.1.2	Genauigkeitskenngrößen von Robotern.....	7
2.1.3	Einflussgrößen auf die Genauigkeit von Robotern.....	8
2.1.4	Maßnahmen zur Steigerung der Genauigkeit des Industrieroboters.....	11
2.1.5	Fräsen mit Industrierobotern.....	19
2.2	Hybrid-additive Fertigungsketten und Besonderheiten der Zerspanung additiv gefertigter Bauteile.....	28
2.2.1	Directed Energy Deposition Prozesse für die hybrid-additive Fertigungskette.....	29
2.2.2	Roboterbasierte hybrid-additive Prozesskette.....	32
2.3	Folgerungen aus dem Stand der Technik.....	33
3	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	35
3.1	Problemstellung.....	35
3.2	Zielsetzung und wissenschaftliches Vorgehen.....	36
4	Systembeschreibung und Entwicklungsrahmen.....	39
4.1	Versuchsumgebung.....	39
4.1.1	Roboterzelle.....	39
4.1.2	Werkzeuge und Bahnplanungssoftware.....	41
4.1.3	Bauteilqualität und Messverfahren.....	42
4.2	Versuchsbauteile.....	47
4.2.1	Werkstoff und Bauteileigenschaften.....	47
4.2.2	Besonderheiten additiv gefertigter Bauteile.....	48
4.2.3	Untersuchung der Zerspanbarkeit additiv gefertigter Bauteile.....	51
4.2.4	Schlussfolgerungen und Zusammenfassung der Rahmenbedingungen für die Genauigkeitssteigerung.....	55
5	Untersuchung und Beschreibung des dynamischen Verhaltens.....	56
5.1	Grundlagen der experimentellen Modalanalyse.....	58
5.2	Aufbau und Durchführung der experimentellen Modalanalyse.....	59
5.3	Ergebnisse der Modalanalyse für die Eigenfrequenzen.....	62

5.4	Bestimmung der Eigenmoden	65
5.5	Betriebsschwingungsmessungen.....	68
5.6	Fazit und Einordnung der Ergebnisse	72
6	Aufstellen des Steifigkeitsmodells	75
6.1	Aufbau der Vorwärtskinematik.....	75
6.2	Identifikation der festen DH-Parameter	79
6.3	Erweiterung der Vorwärtstransformation um die Nachgiebigkeit.....	83
6.4	Identifikation der Steifigkeitsparameter.....	85
6.5	Validierung des aufgestellten Steifigkeitsmodells	90
6.6	Fazit.....	92
7	Optimierung der Posen hinsichtlich der Steifigkeit.....	93
7.1	Grundlagen des Optimierungsmodells	94
7.2	Aufbau des Optimierungsmodells zur Optimierung der Roboterpose	95
7.3	Ergebnisse der Optimierung.....	97
8	Experimentelle Validierung.....	106
9	Folgerungen für die Praxis	124
10	Zusammenfassung und Fazit	126
	Literaturverzeichnis	131
	Anhang.....	142

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1: Vergleich der CO ₂ -Äquivalente bei der Herstellung des gleichen Bauteils nach [TEP2023a].....	2
Abbildung 2.1: Ausprägungen des Arbeitsraums unterschiedlicher Robotertypen, angelehnt an [HÄH2020b].	6
Abbildung 2.2: Beispielhafte Darstellung der Pose- und Wiederholgenauigkeit angelehnt an [WEI2008].	7
Abbildung 2.3: Ursachen der Arbeitsunsicherheit angelehnt an [WEI2008; RÖS2014].	9
Abbildung 2.4: Vergleich der Arbeitsräume eines Roboters mit Parallelkinematik, hier der ABB IRB 6660 und eines Vertikalknickarmroboters ohne Versteifung, hier der KUKA KR2500 angelehnt an [ABB2007; KUK2023].....	13
Abbildung 2.5: Darstellung der Vorwärts- und Rückwärtstransformation, angelehnt an [HÄH2020b].	15
Abbildung 2.6: Unterschied zwischen Gleichlaufräsen (links) und Gegenlaufräsen (rechts) nach [KLO2017].	19
Abbildung 2.7: Darstellung der zwei Haupttrattereffekte in der Zerspanung angelehnt an [YUA2018].	23
Abbildung 2.8: Ansätze zur Vermeidung von dynamisch instabilem Verhalten, angelehnt an [YUA2018].	25
Abbildung 2.9: Beispiel für ein Stabilitätsdiagramm nach [YUA2018].	26
Abbildung 2.10: Definition des Begriffs Hybride Fertigung und Erweiterung um die Kombination von konventionellen und additiven Verfahren nach [PRA2021].	29
Abbildung 2.11: Einteilung der DED-Verfahren nach Material und Energiequelle nach [DAS2019]. Markiert sind die in dieser Arbeit verwendete Materialart und Energiequelle.....	30
Abbildung 2.12: Schematische Darstellung des DED-Prozesses.	30
Abbildung 2.13: Bearbeitung innenliegender Bauteilflächen angelehnt an [PRA2021].	31
Abbildung 3.1: Darstellung der Umorientierung des TCPs unter Beibehaltung der Werkzeug-Werkstückorientierung.	37
Abbildung 3.2: Gliederung und Kapitelstruktur der vorliegenden Arbeit.	38
Abbildung 4.1: Roboter ABB 6660 205/1.9 mit wichtigsten Koordinatensystemen angelehnt an [ABB2023].....	40
Abbildung 4.2: Roboterzelle mit Komponenten. Nicht dargestellt ist die lasersichere Außenhülle der Zelle.	41
Abbildung 4.3: In dieser Arbeit verwendetes Schaftwerkzeug nach [GÜH].	42
Abbildung 4.4: Allgemeine Systembeschreibung mit geometrisch bestimmter Schneide nach [KLO2017].	43
Abbildung 4.5: Gestaltabweichungen nach [DIN 4760].	44
Abbildung 4.6: Größenordnung und Längenskala der Oberflächenbestandteile nach [POL2023].....	45

Abbildung 4.7: Verwendeter Scanner und Software zum Vermessen der Formgenauigkeit.	46
Abbildung 4.8: Bauteilschliffproben eines additiv hergestellten Bauteils und eines konventionell hergestellten Bauteils bei 335-facher Vergrößerung [EGO2023]. Die Mikrostruktur des konventionell hergestellten Bauteils ist deutlich homogener.	49
Abbildung 4.9: Schliffbild des additiv hergestellten Blocks mit 34-facher Vergrößerung. Deutlich zu erkennen sind die Poren und Schmelzbadgrenzen [EGO2023].	50
Abbildung 4.10: Vergleich der Oberflächenausprägungen additiv gefertigter Bauteile (links) und konventionell hergestellter Bauteile (rechts) nach [EGO2023].	51
Abbildung 4.11: Zerspankräfte eines additiv aufgebauten Bauteils (rot) und eines konventionell hergestellten Bauteils (blau) nach [EGO2023].	52
Abbildung 4.12: Vergleich der ungefilterten resultierenden Zerspankräfte (links) und die zugehörigen Frequenzgänge (rechts) eines konventionell hergestellten Quaders (blau) und eines additiv hergestellten Quaders (rot) für jeweils eine Seite nach [EGO2023].	53
Abbildung 4.13: Zerspankräfte der ersten Bearbeitung der Oberfläche des additiv gefertigten Bauteils (rot) und des konventionell hergestellten Bauteils (blau) nach [EGO2023].	54
Abbildung 5.1: Lage der Beschleunigungssensoren an der Roboterstruktur.	60
Abbildung 5.2: Lage der untersuchten Posen am Arbeitstisch.	61
Abbildung 5.3: Beschleunigungsfrequenzgänge der Pose M.	62
Abbildung 5.4: Kreuzfrequenzgänge der Pose M (blau), Pose 3 und 4.	64
Abbildung 5.5: Frequenzgänge der Posen 7 und 8.	65
Abbildung 5.6: Pose 9 mit +60° Orientierung (links), Pose M mit 0° Orientierung (Mitte) und Pose 10 mit -60° (rechts).	66
Abbildung 5.7: Fünfte Eigenmode der Pose 9 (links), Pose M (mitte) und Pose 10 (rechts).	67
Abbildung 5.8: Lage der ersten fünf Eigenfrequenzen in Abhängigkeit der Posen.	68
Abbildung 5.9: Erreichte Schnittiefen nach Vorschubrichtung und Orientierung.	70
Abbildung 5.10: Frequenzspektren der stabilen (links) und instabilen (rechts) Prozesse mit Vorschubrichtung X mit 0° Orientierung (oben) und 30° Orientierung (unten).	71
Abbildung 6.1: Lage der Koordinatensysteme für die Vorwärtskinematik.	76
Abbildung 6.2: Kopplung der Achse 2 und 3. Links wird die Beeinflussung des Motors an Achse 2 auf den oberen Arm dargestellt, oben ohne, unten mit Ersatz des passiven Gelenks an Achse 3. Rechts ist die Bewegung des oberen Arms bei Bewegung des Motors 3 dargestellt.	79
Abbildung 6.3: Identifizierte Kreisbahnen der einzelnen Gelenke des Industrieroboters ABB 6660-205/1.9.	82
Abbildung 6.4: Versuchsaufbau zur Messung der Verschiebung unter Last.	85
Abbildung 6.5: Messung der Verschiebung unter Last in Y-Richtung für eine berechneten Orientierung.	89

Abbildung 6.6: Mit unterschiedlichen Steifigkeitsparametern berechnete Verschiebungen im Vergleich mit gemessenen Verschiebungen unter einer Last von 500 N in die jeweilige Richtung.....	91
Abbildung 7.1: Verschiebungen des TCPs unter Last in X- (links) und Y-Richtung (rechts).....	99
Abbildung 7.2: Verschiebung des TCPs in verschiedenen Posen unter Krafteinwirkung in X-Richtung (links) und Y-Richtung (rechts). Verglichen werden Posen basierend auf über Optimierung ermittelte Achswinkel und Posen basierend auf aus der Steuerung extrahierter Achswinkel. Markiert sind die Lagen der Optimierungsergebnisse.	100
Abbildung 7.3: Verschiebung des TCPs unter Belastung in X-Richtung (oben) und Y-Richtung (unten), aufgeteilt auf die Raumrichtungen X (links) und Y (rechts).....	102
Abbildung 7.4: Berechnete Verschiebungen in X-Richtung unter Belastung von 1000 N in X-Richtung (links) und berechnete Verschiebungen in Y-Richtung unter Belastung von 1000 N in Y-Richtung.....	103
Abbildung 8.1: Aufgeschweißter Quader auf Substratplatte.	107
Abbildung 8.2: Beschreibung der Lage des zu bearbeitenden Blocks.	108
Abbildung 8.3: Soll-Ist-Vergleich zweier mit 0° Orientierung bearbeiteter Quader. Die Stirnseite wurde nicht zerspannt, weshalb die Oberseite aufgrund der Oberflächenausprägungen nach dem Additivprozess starke Abweichungen von der Soll-Kontur aufweist.	110
Abbildung 8.4: Soll-Ist-Vergleich der mittels den in den dynamischen Untersuchungen identifizierten Orientierungen zerspannten Quader.	111
Abbildung 8.5: Soll-Ist-Vergleich der mittels optimierten Orientierungen zerspannten Quader.	112
Abbildung 8.6: Erzielte Welligkeiten W_t in den verschiedenen Zerspanversuchen.....	113
Abbildung 8.7: Erzielte Rauheitswerte R_z in den Zerspanversuchen.	114
Abbildung 8.8: Dargestellt sind die während der Zerspannung mit 0° Orientierung aufgezeichneten Kräfte in X- und Y-Richtung über den kompletten Umfang des Quaders von Seite eins bis vier.....	115
Abbildung 8.9: Frequenzgänge der Seiten ein bis vier der Versuche 0° (blau), dynamisch (rot) optimiert (gelb) in X-Richtung.	116
Abbildung 8.10: Frequenzgänge der Seiten ein bis vier der Versuche 0° (blau), dynamisch (rot) optimiert (gelb) in Y-Richtung.	116
Abbildung 8.11: Frequenzgänge der Seiten ein bis vier der Versuche mit erhöhter Vorschubgeschwindigkeit 0° (blau), dynamisch (rot) optimiert (gelb) in X-Richtung.....	117
Abbildung 8.12: Frequenzgänge der Seiten ein bis vier der Versuche mit erhöhter Vorschubgeschwindigkeit 0° (blau), dynamisch (rot) optimiert (gelb) in Y-Richtung.	118
Abbildung 8.13: Zerspannte Quader mit optimierter Orientierung und erhöhter Vorschubgeschwindigkeit (links) und mit 0°-Orientierung zerspannter Quader (rechts).....	119

Abbildung 8.14: Mit Orientierung 0° gefräster Zylinder. Markiert sind die deutlich erkennbaren Instabilitäten des Prozesses. Die Darstellung ist in negative Y-Richtung , sodass auf Quadrant zwei und drei geblickt wird.....	120
Abbildung 8.15: Soll-Ist-Vergleich des mit 0° Orientierung zerspannten Zylinders.	120
Abbildung 8.16: Zylinder mit Orientierungen von $\pm 5^\circ$ zerspannt.....	121
Abbildung 8.17: Frequenzgänge der Zerspannung der Zylinder, oben mit 0° Orientierung, unten mit 5° Orientierung.....	122

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1: Unterschied zwischen regenerativem Rattern und Lagekopplung nach [YUA2018]	24
Tabelle 4.1: Zusammensetzung des verwendeten Werkstoffs nach [UNT2023].	47
Tabelle 4.2: Zerspanparameter nach [LEN2021]	52
Tabelle 5.1: Daten der Beschleunigungssensoren nach [PCB1998].....	60
Tabelle 5.2: Eigenfrequenzen und zugehörige Dämpfungen der Posen M, Posen 9 und 10.	67
Tabelle 5.3: Erreichte Schnitttiefen a_p der unterschiedlichen Vorschubrichtungen unter verschiedenen Orientierungen.....	69
Tabelle 6.1: Berechnete DH-Parameter.	83
Tabelle 6.2: Aus der Dokumentation des Roboters entnommene DH-Parameter [ABB2017].	83
Tabelle 6.3: Anfangsdaten für k_0 aus [COR2019b].....	88
Tabelle 6.4: Berechnete Steifigkeitswerte in $k_i \cdot 10^6$ [Nm/rad]	90
Tabelle 7.1: Obere und untere Grenzen der Achswinkel.....	95
Tabelle 7.2: Über die Optimierung bzw. CAM-Programmierung identifizierte Achswinkel und die berechnete Verschiebung unter Belastung mit einer Kraft von 1000 N in +X- bzw. +Y-Richtung. Die Verschiebung Delta beschreibt die Gesamtverschiebung aller Raumrichtungen.	98
Tabelle 7.3: Berechnete Verschiebungen des TCPs unter Belastung in X- und Y-Richtung unter verschiedenen Orientierungen.....	100
Tabelle 7.4: Ergebnisse der Berechnung der optimalen Pose für die Zerspanung eines Quaders.	104
Tabelle 8.1: Verwendete Zerspanparameter für die Quader der Versuchsreihen 1 und 2.	108
Tabelle 8.2: Verwendete Orientierungen basierend auf den Ergebnissen der dynamischen Untersuchungen.	109

ABKÜRZUNGS- UND FORMELVERZEICHNIS

Abkürzungen

Kurzzeichen	Begriff
Bzw.	Beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CCT	Conservative Congruence Transformation
CIRP	College International pour la Recherche en Productique
DED	Directed Energy Deposition
DH	Denavit Hartenberg
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
FF	Forschungsfrage
FEM	Finite Element Methode
MAP	Maximum a Posterior Schätzung
MSA	Matrix Struktur Analyse
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SQP	Sequential Quadratic Programming
TCP	Tool Center Point

Formelzeichen

Kurzzeichen	Einheit	Größe
a	mm	Strecke zwischen zwei Gelenken entlang xAchse
a_e	mm	Arbeitseingriff
AP	mm	Pose Absolutgenauigkeit
a_p	mm	Schnittiefe
AT	mm	Bahn Absolutgenauigkeit
c	mm	Schwerpunkt der aus der Robotersteuerung aufgezeichneten Punkte
C	-	Dämpfungsmatrix
C_{post}	-	Kovarianzmatrix
d	mm	Abstand zwischen Gelenkpunkten
d_j	mm	orthogonaler Abstand
F	N	Kraft
\vec{F}	N	Kraftvektor
f	mm	Gelenkpunkte
F_a	N	Aktivkraft
F_c	N	Schnittkraft
F_f	N	Vorschubkraft

F_{fn}	N	Vorschubnormalkraft
F_p	N	Passivkraft
F_{res}	N	Resultierende Zerspankraft
f_z	mm	Zahnvorschub
g	-	Ungleichungsbedingung der Optimierung
h	-	Gleichungsbedingung der Optimierung
\mathbf{H}	-	Frequenzgang
\mathbf{J}	-	Jacobi Matrix
\mathbf{K}	-	Steifigkeitsmatrix
k	Nm/rad	Steifigkeitsparameter
\mathbf{K}_θ	-	Steifigkeitsmatrix der Drehsteifigkeiten
\mathbf{K}_c	-	Steifigkeitsterm
\mathbf{K}_K	-	Kartesische Steifigkeitsmatrix
k_0	Nm/rad	Ausgangssteifigkeitsparameterset
lb	-	Untere Grenze des
\mathbf{M}_θ	Nm	Moment
n	U/min	Drehzahl
\mathbf{n}	-	Normalenvektor
p	mm	aufgezeichneter Punkt aus der Robotersteuerung
q	°	Achswinkel
R	µm	Rauheitsprofil
\mathbf{r}	-	Verbindungsvektor
r	mm	Weg
R_a	µm	Mittenrauwert
RP	Mm	Pose Wiederholgenauigkeit
RT	mm	Bahn Wiederholgenauigkeit
R_z	µm	Rautiefe
S	-	Suchraum
\mathbf{TCP}_{ist}	mm	Lage des TCPs des belasteten Systems
\mathbf{TCP}_{soll}	mm	Lage des TCPs des unbelasteten Systems
\mathbf{T}_R	-	Rotatorische Transformationsmatrix
\mathbf{T}_T	-	Translatorische Transformationsmatrix
\mathbf{U}	-	Fouriertransformiertes Eingangssignal
\mathbf{u}	-	Eingangsvariablen in Optimierung
v_c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
\mathbf{W}	-	Matrix der Differenzen der aufgezeichneten Punkte und Schwerpunkt
W_a	µm	Arithmetische mittlere Welligkeit
W_z	µm	Gemittelte Wellentiefe
W_t	µm	Wellentiefe
x	mm	Auslenkung
z	-	Daten
Z	-	Zielraum
α	°	Winkel bei Rotation um x-Achse

β	-	Konstanten der erweiterten Vorwärtskinematik
η	-	erweiterte Vorwärtskinematik
θ	◦	Rotationswinkel um die Z-Achse
$\tilde{\theta}$	◦	Konstruktionsbedingte Rotation um Z-Achse
σ		Singulärwert
ψ	-	Spur der Kovarianzmatrix
ϕ	◦	Winkel zur Begrenzung des Lösungsraums

1 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Die Produktionslandschaft in Deutschland steht aktuell vor vielfältigen Herausforderungen, die mit tiefgreifenden Transformationen einhergehen. Nach KÜPER lassen sich die Transformationen in den vier Dimensionen Dekarbonisierung, Digitalisierung, Demografie und Veränderung der internationalen Verflechtungen beschreiben [KÜP2023].

Im Kontext des Klimawandels erfordert die Dekarbonisierung der Produktion Maßnahmen, die die Vermeidung von Treibhausgasemissionen realisieren. Eine Maßnahme ist die Erhöhung von Ressourceneffizienz der Produktion.

Die Notwendigkeit, ressourceneffizient zu produzieren rückt zunehmend in den Fokus, wobei Ressourceneffizienz nicht nur den Energie- und Ressourcenverbrauch, sondern auch die Effizienz und Qualität der Prozesse umfasst [KÜP2023]. Angesichts sich verteuender Rohmaterial- und Energiekosten, sowie Probleme der Rohstoffknappheit, wird es für die Industrie wichtiger denn je ressourceneffizient zu arbeiten.

In diesem Kontext hat die additive Fertigung und mit ihr die hybrid-additive Fertigung im Sinne der Kombination von additiven Fertigungsverfahren mit subtraktiven Nachbearbeitungsprozessen in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die Implementierung von hybrid-additiven Fertigungsverfahren ist maßgeblich durch die notwendige Ressourcen- und Energieeffizienz der Industrie getrieben. Der endkonturnahe Aufbau von additiv gefertigten Bauteilen geht mit niedrigerem Materialverbrauch einher im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren [WOH2021]. Vor allem große Strukturbauteile in der Luft- und Raumfahrtindustrie werden oftmals mit Zerspanungsvolumina von bis zu 95 % hergestellt. Dies entspricht einem Buy-to-fly-Verhältnis von Rohmaterial- zu Bauteilgewicht von 22 [HÖL2012]. Bei additiv gefertigten Bauteilen hingegen liegt die Rohmaterialausnutzung, je nach Anwendungsfall, bei über 90 %, was einem Buy-to-fly-Verhältnis von ca. 1,1 entspricht [LI2017a]. So ist vor allem durch die bessere Materialausnutzung der CO₂-Fußabdruck der Bauteile geringer als der konventionell hergestellter Bauteile, wie Abbildung 1.1 zeigt [TEP2023a].

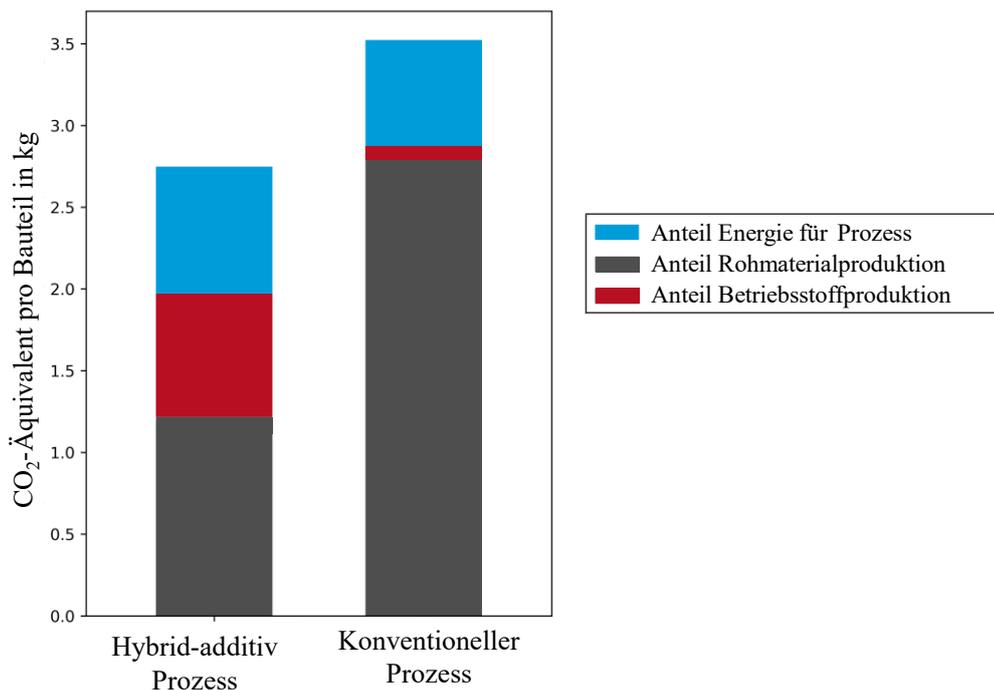


Abbildung 1.1: Vergleich der CO₂-Äquivalente bei der Herstellung des gleichen Bauteils nach [TEP2023a].

Für Bauteile, die mittels Additivverfahren mit hohen Auftragsraten hergestellt werden, ist eine subtraktive Nachbearbeitung obligatorisch, da diese Verfahren eine schlechte Oberflächenqualität implizieren. Die Umsetzung der Additivverfahren mit hohen Auftragsraten auf dem Industrieroboter mit Endeffektoren zur additiven Fertigung bietet einerseits ein großes Potential hinsichtlich der Freiheitsgrade und herstellbaren Geometrien. Zudem kann der Roboter unter Beachtung spezieller Randbedingungen ebenfalls zur subtraktiven Nachbearbeitung eingesetzt werden. In Kombination dieser beiden Produktionstechnologien kann so eine flexible Prozessverkettung in der Produktion integriert werden und Potentiale hinsichtlich der Automatisierung gehoben werden.

Ein Beispiel für die Anwendung der roboterbasierten Nachbearbeitung von aufgeschweißtem Werkstoff ist die Qualitätsschleife im Presswerkzeugbau. Während der Herstellung durchläuft ein Presswerkzeug verschiedene Bereiche im Werkzeugbau. Die mit dem Presswerkzeug tiefgezogenen Bauteile werden zunächst vermessen und auf Toleranzen geprüft, die im Bereich von $\pm 0,05$ mm liegen [ABE2017]. Werden diese Toleranzen nicht eingehalten, durchläuft das Presswerkzeug die sogenannte Qualitätsschleife, bei der die Prozesse Zerspanen und Auftragschweißen mehrmals nacheinander durchgeführt werden, mit Digitalisierungsprozessen in Form von Scanprozessen am Anfang und Ende der Prozesskette. Charakteristisch für die Qualitätsschleife sind die hohen manuellen Bearbeitungsaufwände und der Einsatz von großen und kostenintensiven Bearbeitungszentren [ABE2017]. Durch die Abbildung dieser Prozesskette in einer Roboterzelle können die Prozesse flexibel nacheinander durchgeführt werden mit zwischengeschalteten Digitalisierungsprozessen. Dadurch entfallen hohe Aufwände für Auf- und Abrüsten sowie der Transport der bis zu 15 Tonnen

schweren Presswerkzeuge zwischen den Bearbeitungsstationen und jeder Prozessschritt wird digital abgebildet [ABE2017].

Aufgrund ihrer niedrigen Beschaffungskosten stellen Industrieroboter eine kostengünstige und flexible Alternative zu Werkzeugmaschinen dar. Bedingt durch ihre Universalschnittstelle und mit entsprechenden Endeffektoren können sie verschiedene Aufgaben wie Handhabung, Fügen, Beschichten und Qualitätsprüfung übernehmen [COR2019b]. Obwohl viele Unternehmen bereits Robotersysteme in ihren Produktionshallen nutzen, beschränkt sich ihr Einsatz häufig auf einfache Handhabungsaufgaben. Hier liegt ein ungenutztes Potenzial, die Produktion flexibler zu gestalten und weiter zu automatisieren [PAN2011].

Die Integration von Robotern in Fertigungsprozessen ist in den letzten Jahren erheblich gestiegen, da sie die Möglichkeit bieten, eine Vielzahl von Prozessen abzubilden und flexibel um weitere Anwendungen wie Oberflächenhämmern, Schleifen und Bohren erweiterbar sind. Diese Flexibilität ermöglicht es, Roboterzellen effizient zu nutzen, selbst wenn ein bestimmter Anwendungsfall entfällt, da sie mühelos für andere Prozesse umkonfiguriert werden können.

Ein bedeutender Vorteil von Robotern liegt in ihren vergleichsweise geringen Investitionskosten bezogen auf den Arbeitsraum im Vergleich zu herkömmlichen Bearbeitungszentren [BAI2021]. Den gleichen Anwendungsfall vorausgesetzt kann eine Platzersparnis von bis zu 40 % im Vergleich zu konventionellen Bearbeitungszentren erreicht werden, ohne dabei auf Flexibilität zu verzichten [CEN2017a]. Diese Eigenschaften machen Roboter zu einer vielversprechenden Option für die Realisierung flexibler und effizienter Fertigungsprozesse.

Besonders in der Anwendung subtraktiver Prozesse stellen die geringe Absolutgenauigkeit, die statische und dynamische Steifigkeit am Tool Center Point (TCP) sowie die mangelnde Erfassung der Dynamik im Regelkreis große Herausforderungen für die Prozessführung dar. Die Steifigkeit von Robotern ist im Vergleich zu Werkzeugmaschinen um den Faktor 20-50 geringer, abhängig vom ausgewählten Robotertyp, was insbesondere die Umsetzung von Fräsbearbeitungen erschwert [HÄH2020b]. Dies erweist sich als besonders problematisch bei der Bearbeitung von schwerzerspanbaren Metallen wie Edelstahl oder Nickelbasis-Legierungen, deren Zerspanung jedoch aufgrund ihrer Häufigkeit in industriellen Anwendungen relevant sind. Zusätzlich erschwert die fehlende Einheitlichkeit in der Programmiersprache die Implementierung und Anpassung von Prozessen.

Trotz der genannten Herausforderungen bietet sich die roboterbasierte Zerspanung für die Schruppbearbeitung an, insbesondere für additiv gefertigte Bauteile, da durch die Verknüpfung zur hybrid-additiven Fertigungskette die verschiedenen Fertigungsprozesse in einer Bauteilaufspannung durchgeführt werden können. Dies eliminiert die Notwendigkeit einer wiederholten Vermessung der Bauteillage und reduziert das Risiko von Fehleinmessungen aufgrund unsteter Oberflächen der additiv gefertigten Bauteile.

Der Fokus dieser Dissertation liegt auf der Untersuchung der statischen und dynamischen Steifigkeit der Roboterstruktur und deren Änderung im Zusammenhang mit der

Umorientierung des TCPs. Ziel ist hierbei, ohne zusätzliche Sensorik oder Umbau des Roboters, kostengünstige Prozessanpassungen durchzuführen.

Vor diesem Hintergrund werden die Prozessbedingungen bei der spanenden Bearbeitung von additiv gefertigten Bauteilen analysiert und das Optimierungspotential der roboterbasierten Zerspanung aufgezeigt.

Die Erkenntnisse sollen dazu beitragen, besonders steife Posen der Roboterstruktur zu identifizieren, unter Beibehaltung der kartesischen Position des TCPs und der Werkzeug-Werkstückorientierung. Dies soll stabilere und präzisere Zerspanprozesse ermöglichen, die kosteneffizient und praxisgerecht umgesetzt werden können.

2 GRUNDLAGEN UND STAND DER FORSCHUNG

Im folgenden Kapitel werden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen und der Stand der Forschung im Bereich Zerspanung mit Industrierobotern vorgestellt. Dafür wird zunächst auf die Grundlagen der Industrierobotik eingegangen, ihre Genauigkeit und Ansätze zur Steigerung dieser. Des Weiteren werden Grundlagen zur Zerspanungstechnologie Fräsen aufgezeigt und eine Einführung in die hybrid-additive Fertigung gegeben.

2.1 Zerspanung mit Industrierobotern

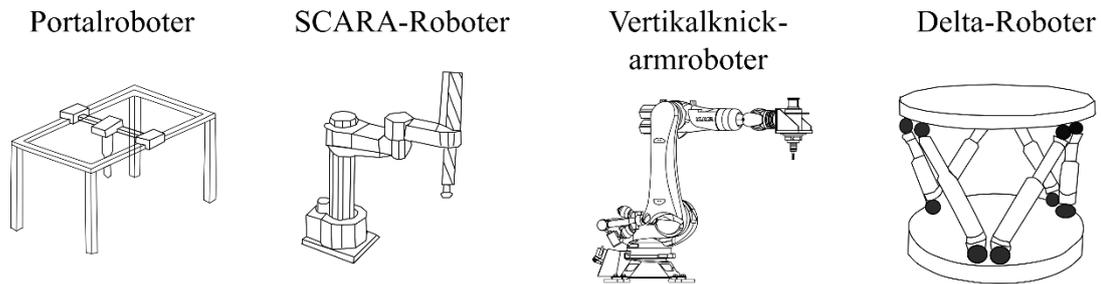
2.1.1 Aufbau von Industrierobotern

Roboter sind in der Industrie stark verbreitet, ihr Absatz verzeichnet nach wie vor jährliche Steigerungen. Hauptanwendungsgebiete liegen vor allem in Bereichen der Handhabungsaufgaben und einfachen Fertigungsoperationen [BAI2021]. Sie werden oftmals als Substitution von Arbeitskräften in unangenehmen, gefährlichen oder ergonomisch ungünstigen Arbeitsbereichen eingesetzt, beispielsweise beim Lackieren, Schweißen oder Heben von schweren Gegenständen [HAU2013].

Allgemein werden Industrieroboter als automatisch gesteuerte, in ihren Bewegungsfolgen frei programmierbare Manipulatoren beschrieben, die über mehrere programmierbare Achsen verfügen [BAU2012]. Sie zeichnen sich durch hohe Flexibilität aus, sowohl bezogen auf ihre ausführbaren Arbeitsaufgaben als auch auf ihren Arbeitsraum [UHL2020]. Industrieroboter können abhängig vom implementierten Endeffektor verschiedene Arbeitsaufgaben verrichten. Dies ermöglicht Applikationen wie Schweißen, Handling, Schleifen, Bohren, Fräsen, Entgraten und weitere Prozesse auf Industrierobotern [HÄH2020b]. Können Endeffektoren über eine entsprechende Schnittstelle des Roboters in der Roboterzelle flexibel ausgetauscht werden, ermöglicht dies die Abbildung verschiedener Fertigungstechnologien in einer Zelle, wodurch eine flexible Verkettung von Prozessen ermöglicht wird. Ein Beispiel hierfür ist die Verknüpfung additiver und subtraktiver Fertigungsprozesse zur hybrid-additiven Fertigungskette [ABE2018]. Diese Flexibilität unterscheidet Industrieroboter deutlich von Werkzeugmaschinen, die meist auf eine Arbeitsaufgabe spezialisiert und dahingehend optimiert sind [COR2019b].

Der mechanische Aufbau des Industrieroboters lässt sich grundlegend als kinematische Kette beschreiben, bestehend aus aneinandergereihten Gliedern [UHL2020]. Diese Glieder sind entweder rotatorisch oder translatorisch über Gelenke miteinander verbunden, die meist nur über einen Freiheitsgrad verfügen. [COR2019b] Der kinematische Aufbau der Roboter, basierend auf der Anordnung der rotatorischen und translatorischen Glieder und Gelenke führt zu unterschiedlichen Ausprägungen des Arbeitsraums, wie Abbildung 2.1 beispielhaft zeigt [HÄH2020b].

Robotertyp



Arbeitsraum

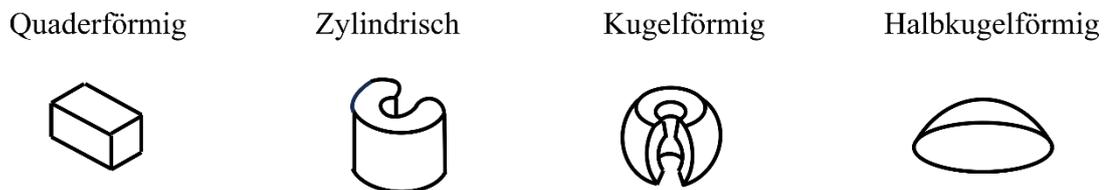


Abbildung 2.1: Ausprägungen des Arbeitsraums unterschiedlicher Robotertypen, angelehnt an [HÄH2020b].

Üblicherweise werden in der Industrie für gängige Einsatzgebiete wie Montage, Schweißen oder Handling Roboter in der Bauweise der seriellen Vertikalknickarmroboter verwendet. Diese Bauweise wird auch typischerweise für die Zerspanung eingesetzt [BAU2012]. Der Vertikalknickarmroboter verfügt über eine serielle Kinematik mit sechs Bewegungsachsen und somit über sechs Freiheitsgrade. Auf Grund der Beweglichkeit und seiner kompakten und steifen Bauweise wird er häufig in der Ausführung als Schwerlastroboter für die Zerspanaufgaben verwendet [HÄH2020b]. Von Schwerlastrobotern wird meist ab einer Traglast oberhalb 250 kg gesprochen [NÖR2016].

Durch die sechs Bewegungsachsen verfügt der Vertikal-Knickarmroboter über einen kugelförmigen Arbeitsraum, siehe Abbildung 2.1 [HÄH2020b]. Hierbei dienen die ersten drei Grundachsen vorrangig der Positionierung im Raum und die drei weiteren Drehachsen der Orientierung des Werkzeugs. [COR2019b].

Für die Bearbeitung von Werkstücken, insbesondere im Kontext der Zerspanung, werden verschiedene Bearbeitungsprinzipien unterschieden, die sich in der Anordnung von Werkzeug und Werkstück und der jeweiligen Bearbeitungsoperation, voneinander abgrenzen. Wird ein Industrieroboter verwendet, führt dieser entweder die Werkzeug- oder die Werkstückhandhabung aus [BAU2012]. Eine weitere Alternative ist die kollaborative Zusammenarbeit der Roboter, bei der mehrere Roboter die Werkstückhandhabung und Werkzeughandhabung realisieren [HÄH2020b]. Werden großvolumige und schwere Werkstücke bearbeitet, die aufgrund der Sicherheitszelligeometrie nicht entsprechend positioniert werden können oder die Traglast der Kinematik überschreiten, übernehmen Roboter in der Regel die Werkzeughandhabung, die Werkstückhandhabung durch den Roboter eignet sich hingegen für kleine und leichte Bauteile, die unterschiedlichen Werkzeugen und

Bearbeitungsoperationen zugeführt werden müssen [HÄH2020b]. Bei der Zerspanung wird der Roboter vorrangig zur Werkzeughandhabung verwendet.

2.1.2 Genauigkeitskenngrößen von Robotern

Geometrisch relevante Kenngrößen im Bereich der Industrierobotik werden in der Norm VDI 2861 beschrieben und dienen unter anderem zur Beurteilung der Genauigkeit der Kinematiken [VDI 2861]. Grundsätzlich werden die geometrisch relevanten Kenngrößen für Industrieroboter in Pose- und Bahnkenngrößen unterschieden, die sich wiederum in Absolut- und Wiederholgenauigkeit unterscheiden lassen. [WEI2008] Der Begriff „absolut“ drückt hierbei den Bezug auf das Weltkoordinatensystem aus [COR2019b]. Der Begriff Pose beschreibt die Lage und Orientierung eines festen Punktes, im Falle des Industrieroboters in der Regel des TCPs, der das Ende der kinematischen Kette darstellt [BEY2005].

Die Posekenngrößen beschreiben die Genauigkeit, mit der der Industrieroboter vorgegebene Lagen und Orientierungen anfährt. Die Posekenngrößen lassen sich in Pose-Absolutgenauigkeit (AP) und Pose-Wiederholgenauigkeit (RP) unterscheiden [WEI2008].

Die AP, auch häufig als Pose-Genauigkeit oder Absolutgenauigkeit bezeichnet, beschreibt die Abweichung zwischen Sollpose und dem Mittelwert der Istposen bei Anfahren aus derselben Richtung [WEI2008]. Sie ist relevant, wenn Offlineprogrammierung verwendet wird, das heißt in virtuellen Zellen und mit Computer Aided Manufacturing (CAM)-Software programmiert wird [BEY2005]. Die RP hingegen gibt die Abweichung zwischen den Istposen beim wiederholten Anfahren derselben Sollpose aus derselben Richtung an. Sie beschreibt somit die Fähigkeit des Industrieroboters seinen TCP an einem programmierten Punkt im Arbeitsraum aus einer vorgegebenen Richtung unter gleich bleibenden Bedingungen zu positionieren [WEI2008]. In Abbildung 2.2 ist die Absolut- und Wiederholgenauigkeit im Vergleich dargestellt.

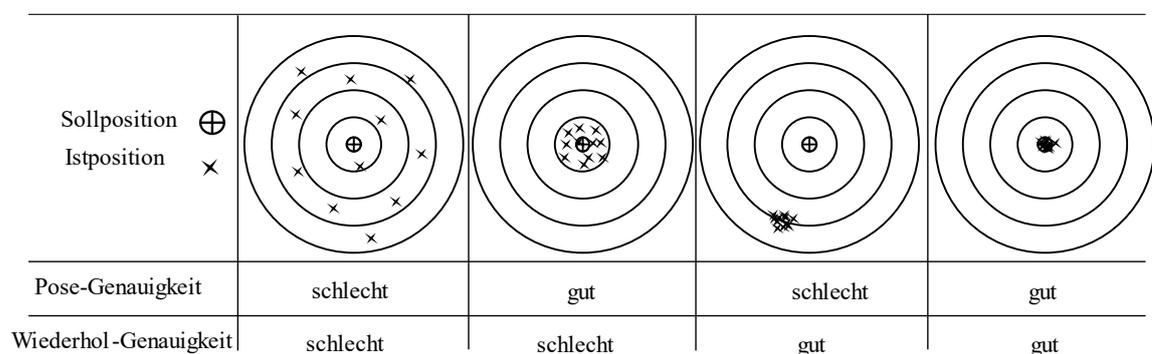


Abbildung 2.2: Beispielhafte Darstellung der Pose- und Wiederholgenauigkeit angelehnt an [WEI2008].

Die Wiederholgenauigkeit ist einer der wichtigsten begrenzenden Faktoren für die Absolutgenauigkeit, da die Wiederholgenauigkeit nicht ohne konstruktive Maßnahmen erhöht werden kann [BEY2005]. Typische Werte für die Absolutgenauigkeit von

Industrierobotern mit einer für Zerspanungsprozesse geeignete Traglast liegen zwischen 0,5 mm und 2 mm, typische Werte für die Wiederholgenauigkeit dieser Industrieroboter liegen im Bereich von 0,06 mm bis 0,5 mm [PAN2011].

Im Gegensatz zu Posekenngrößen, bei denen nur die Positionierung auf einzelne Punkte beschrieben wird, beschreiben die Bahnkenngrößen die Genauigkeit des Industrieroboters entlang einer Geraden oder Kurve im dreidimensionalen Arbeitsraum [PUZ2012]. Hierbei beeinflusst die Dynamik des Industrieroboters die Bahngenauigkeit wesentlich.

Auch hier wird wieder zwischen Bahn-Absolutgenauigkeit (AT) und Bahn-Wiederholgenauigkeit (RT) unterschieden. Die Bahn-Absolutgenauigkeit, auch Bahn-Genauigkeit genannt, gibt an, wie exakt der Industrieroboter eine Bahn n-Mal eine Sollbahn in derselben Richtung abfahren kann [WEI2008]. Die Bahn-Wiederholgenauigkeit gibt dagegen an, wie genau der Industrieroboter Ist-Bahnen wiederholen kann.

2.1.3 Einflussgrößen auf die Genauigkeit von Robotern

In der Historie der Industrieroboter zeigt sich, dass sich die Genauigkeitsanforderungen mit dem Wandel der Anwendungsfälle von Industrierobotern verändert haben.

Zu Beginn des Einsatzes von Industrierobotern konzentrierten sich die Anforderungen hauptsächlich auf die Wiederholgenauigkeit. Dies war insbesondere bei Anwendungen wie Punktschweißen oder Pick-and-Place-Aufgaben von Bedeutung. Später, mit Aufkommen neuer Aufgaben wie Montageprozesse, wurde die Absolutgenauigkeit deutlich priorisiert. Der Einsatz von Industrierobotern für Bearbeitungsaufgaben wie Zerspanung führte zu zusätzlichen Anforderungen hinsichtlich der Bahntreue und Bahngenauigkeit, insbesondere unter Berücksichtigung von Störgrößen wie Prozesskräften [MÖL2019].

Die Genauigkeit der roboterbasierten Bearbeitung ist vorrangig vom System Roboter und dessen Eigenfrequenzen abhängig [REI2018]. Bereits kleine Änderungen und Störungen im System Roboter wirken sich auf das Prozessergebnis aus, beispielsweise im Falle der subtraktiven Bearbeitung durch Rattern. Hierbei muss sowohl die Umgebung, der Roboter selbst als auch der Prozess betrachtet werden [SCH2017]. Einflüsse aus der Umgebung der Roboterzelle können die Arbeitsgenauigkeit des Roboters beeinflussen, da Industrieroboter in der Regel nicht auf einem separaten Fundament montiert sind. So konnte SCHNEIDER beispielsweise Schwingungen benachbarter Anlagen in der gleichen Versuchshalle am Industrieroboter nachweisen [SCH2017]. Auch der jeweilige Aufbau, die Komponenten und Effektoren beeinflussen die Arbeitsgenauigkeit des Industrieroboters. Die Einflussgrößen auf die Genauigkeit von Industrierobotern lassen sich im Allgemeinen in Mechanik, Antrieb, Steuerung und Programmierung, Werkstück, Prozess und Werkzeug unterteilen [PUZ2012]. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Genauigkeitssteigerung der Zerspanung additiv gefertigter Bauteile mit einem handelsüblichen Industrieroboter liegt, werden die direkten Einflussgrößen auf die

Arbeitsgenauigkeit, also das dynamische und statische Verhalten der Roboterstruktur fokussiert, wie Abbildung 2.3 zeigt.

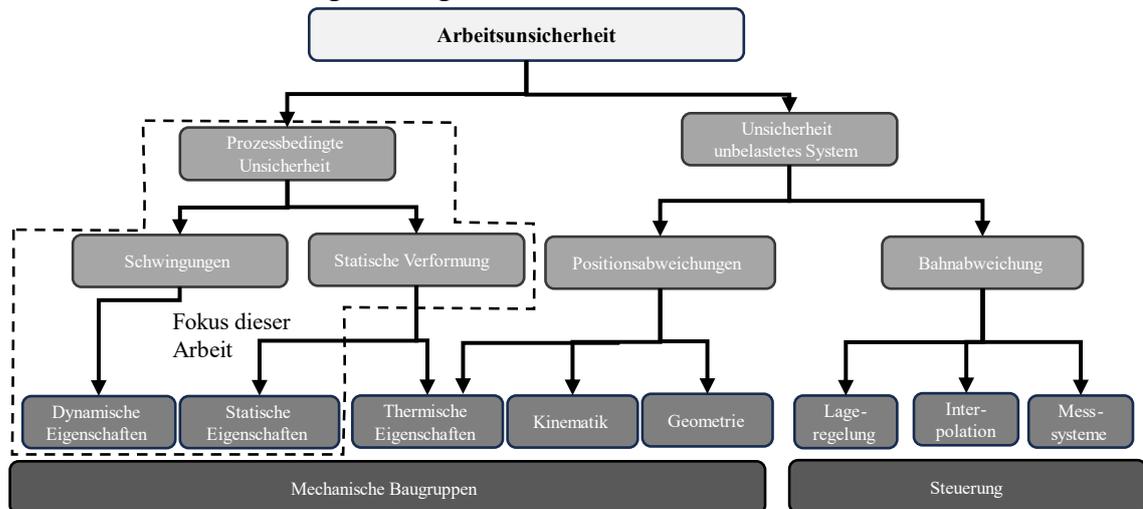


Abbildung 2.3: Ursachen der Arbeitsunsicherheit angelehnt an [WEI2008; RÖS2014]

Grundsätzlich lassen sich die Einflüsse im Bereich der Robotermechanik in geometrische und nicht geometrische Einflüsse einteilen [SCH2017]. Zu den geometrischen Einflüssen zählen Ungenauigkeiten, die aus Fertigung und Montage aufgrund der unvermeidlichen Toleranzen wie Längenabweichungen der Glieder oder Nulllagenfehler der einzelnen Achsen resultieren. Diese geometrischen Ungenauigkeiten führen zu den höchsten Ungenauigkeiten des Robotersystems. Dies resultiert in einer Differenz zwischen dem auf der Steuerung hinterlegten kinematisch-geometrischen Modell und dem realen Roboter. Roboterhersteller minimieren die geometrischen Fehler in der Regel werksseitig durch eine Kalibrierung und Anpassung des auf der Steuerung hinterlegten kinematischen Modells. Industrieroboter, bei denen das kalibrierte Modell auf der Steuerung hinterlegt ist, werden als „absolutkalibriert“ bezeichnet [COR2019b].

Nicht geometrischen Einflüsse auf die Genauigkeit umfassen nichtlineare Effekte wie Haft- und Gleitreibung, Hysterese oder Umkehrspiel in Getrieben beziehungsweise Gelenken. Diese Effekte können meist nicht direkt bei der Prozessplanung berücksichtigt werden, da oftmals abtriebseitige Sensorik fehlt um diese Effekte zu identifizieren [SCH2017]. Der Einfluss von Getriebespiel und Reibung in den Getrieben wird in der Literatur kontrovers bewertet. Während ELATTA den Einfluss auf ca. 0,5-1 % der Gesamtabweichung bewertet, konnte LEHMANN einen maßgeblichen Einfluss auf die Genauigkeit durch das Getriebespiel feststellen [LEH2013; ELA2003]. Die heute in den Industrierobotern verbauten Getriebe weisen nur ein geringes Spiel auf, weshalb bei modernen Robotern der Einfluss des Getriebespiels vernachlässigbar ist [SCH2017].

Zusätzlich zu diesen Effekten sind als weitere Ursachen für mangelnde Präzision im unbelasteten Zustand steuerungstechnische Einflüsse und thermoelastische Verformungen zu nennen. Steuerungstechnische Einflüsse beschreiben das Zusammenwirken der Sensorik, Lageregelung und Bahnplanung inklusive der Interpolation [COR2019b]. Sie können in die Kategorien Software, Hardware und

Kalibrierung eingeteilt werden [MÖL2019]. Als Haupteinfluss hierauf gilt eine hohe Dynamik, da hierbei Regelabweichungen auftreten, die auch als Schleppfehler bezeichnet werden. Sie können durch Methoden der Vorsteuerung reduziert werden [WEB2009]. Steuerungstechnische Einflüsse bezogen auf die Positionierbarkeit des Roboters sind bei modernen Robotern vernachlässigbar [COR2019b].

Auch thermoelastische Verformungen der Roboterstruktur beeinflussen das Arbeitsergebnis des Industrieroboters [BEY2005]. Durch Temperaturänderung kommt es zu thermischen Verformungen in Form von Längenausdehnung oder thermischer Biegung. Hieraus resultieren Abweichungen, die auf der Diskrepanz des auf der Steuerung hinterlegten Modells des Roboters und den realen Gegebenheiten beruhen [COR2019b]. Quelle lokaler Temperaturänderungen können beispielsweise Verluste der Antriebe sein, die als Wärmeenergie abgegeben werden, die Bewegung oder Reibung sowie jahreszeitabhängige Temperaturschwankungen in der Umgebung des Roboters. Diese führen zu einer Längen- und Winkeländerung in der Struktur, die wiederum zu einer Verlagerung des TCPs führen. Thermische Effekte machen ungefähr 0,1 % der Abweichungen am Industrieroboter aus [SCH2017].

Neben diesen Effekten, die im unbelasteten Zustand des Industrieroboters auftreten, hat die reversible Verformung der Struktur während des Zerspanprozesses durch statische Schneidkräfte und die Schwingungsanregung durch Prozesskräfte zentralen Einfluss auf die angestrebten Toleranzen während des Zerspanprozesses [SCH2017].

Die Arbeitsgenauigkeit des Industrieroboters wird vor allem durch die an der Schnittstelle zwischen Werkzeug und Werkstück auftretenden Abweichungen von der vorgegebenen Bahn beziehungsweise Bewegung bestimmt. Die dabei auftretenden Abweichungen resultieren aus statischen und dynamischen Eigenschaften der Roboterstruktur [BRE2016].

Die dynamischen Prozesskräfte führen zu einer Schwingungsanregung der Roboterstruktur, die die Bearbeitungsqualität und Produktionseffizienz beeinflussen [GUO2015].

Nach WEIGOLD sind bei robotergeführten Zerspanprozessen 80 % der geometrischen Fehler am Werkstück auf die statische Nachgiebigkeit der Roboterstruktur zurückzuführen [WEI2008]. Dies resultiert aus den vergleichsweise hohen anliegenden Prozesskräften im Vergleich zu Handhabungsaufgaben [HÄH2020b]. Aufgrund der hohen statischen Nachgiebigkeit des Industrieroboters ist die Abdrängung des TCPs unter Prozesskräften sehr hoch im Vergleich zu Werkzeugmaschinen. Industrieroboterarme haben meist eine Gesamtsteifigkeit, die im Bereich 10^5 N/m bis 10^6 N/m liegen, wohingegen die Steifigkeit einer Werkzeugmaschine durchschnittlich bei 10^8 N/m liegt [CEN2017b]. Ursächlich hierfür sind der Aufbau und somit das elastische Verhalten der Strukturelemente und Getriebe des Industrieroboters. Die Armeile sind meist nicht steifigkeits- und masseoptimal ausgelegt [WEI2008]. Zudem sind bauraumbedingt die Verdrehsteifigkeiten der Getriebe begrenzt, wodurch die Getriebe sehr nachgiebig sind im Vergleich zu den Armelementen und Lagern [SCH2017].

Typisch für die Gesamtnachgiebigkeit des Industrieroboters ist die starke Posen- und Richtungsabhängigkeit.

WEIGOLD zeigt, dass je nach Belastungsrichtung die Getriebe mit einem Anteil von über 50 % je nach Belastungsrichtung den Hauptanteil an der Verlagerung des TCPs darstellen, besonders bei weit auskragendem Roboterarm. Bei Positionen nahe der Basis des Industrieroboters führt vor allem die Strukturnachgiebigkeit zur Verlagerung des TCPs [WEI2008].

SCHNEIDER zeigt, dass die rotatorische Nachgiebigkeit der Gelenke in Z-Richtung, der Drehrichtung des Gelenks, deutlich ausgeprägter sind als in X- oder Y-Richtung, die Kippsteifigkeiten der Gelenke [SCH2017]. Die Elastizität des Gesamtsystems ist folglich überwiegend auf die eingesetzten Getriebe zurückzuführen und diese sind insbesondere in Drehrichtung sehr nachgiebig [COR2019b]. Daraus ergibt sich eine Poseabhängigkeit der Nachgiebigkeit infolge des Kraftangriffs auf die Gelenke [PUZ2012].

Neben der statischen Nachgiebigkeit des Industrieroboters beeinflusst auch das dynamische Verhalten des Systems die Arbeitsgenauigkeit. Dynamische Prozesskräfte und Beschleunigungskräfte regen die Roboterstruktur an, die hierauf mit Schwingungen reagiert. Das dynamische Verhalten von Industrierobotern unterscheidet sich deutlich vom dynamischen Verhalten von Werkzeugmaschinen, insbesondere aufgrund der Kinematik, der Achsantriebe und den Eigenfrequenzen [TUN2021]. Während die dynamische Antwort des Roboters sich mit Bewegung jeder einzelnen Achse verändert, tritt dies bei großen Bearbeitungszentren nur mit der Änderung der Z-Position auf [TUN2021].

Industrieroboter neigen zu Schwingungsanfälligkeit aufgrund der schon beschriebenen Getriebenachgiebigkeit und Komponentenmassen des Roboters [COR2019b]. Das dynamische Nachgiebigkeitsverhalten des Industrieroboters ist abhängig von der Dämpfung des Systems und der schwingungsfähigen Masse. Die erste Eigenfrequenz des Roboters liegt meist bei zwischen 10 Hz und 15 Hz [COR2019a; WEI2008] und somit deutlich unter der ersten Eigenfrequenz von Werkzeugmaschinen, die bei 20 Hz bis 30 Hz liegt [COR2019b]. Das Robotersystem wird so bei der Fräsbearbeitung schon bei niedrigen Frequenzen angeregt, was zu Schwingungen führt. Dieses dynamische Verhalten des Industrieroboters spiegelt sich in der Oberflächenqualität der zerspannten Bauteile wider in Form von Welligkeiten auf der Oberfläche [WEI2008]. Neben der Bauteilqualität werden auch die Zeitspanvolumina beeinflusst sowie die Werkzeugstandzeiten heruntersetzt [COR2019b].

2.1.4 Maßnahmen zur Steigerung der Genauigkeit des Industrieroboters

Um die beschriebenen Einflüsse auf die Genauigkeit des Roboters zu reduzieren, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Genauigkeit von Industrierobotern zu erhöhen [WEI2008]. Die Maßnahmen zur Steigerung der Genauigkeit können in konstruktive, kalibrierende und kompensatorische Maßnahmen unterteilt werden [BEY2005]. Einflüsse aus der Umgebung, wie Schwingungen benachbarter Maschinen oder

Einrichtungen, lassen sich durch angepasste Bahnplanung und schwingungsisoliertes Aufstellen der Roboterzelle reduzieren [SCH2017].

Einen großen Einfluss hat der Roboterhersteller auf die Erhöhung der Gesamtgenauigkeit des Industrieroboters durch konstruktive und kalibrierende Maßnahmen in Fertigung und Montage des Roboters. Konstruktive Maßnahmen, wie die Entkopplung der einzelnen mechanischen Komponenten sowie die Modularisierung der Achsen oder Einsatz von präzisen Getrieben, steigern die Genauigkeit des Industrieroboters [PUZ2012]. Auch die Optimierung der Steuerungen und Steuerungsmodelle in der Entwicklungsphase des Roboters tragen zur Genauigkeitssteigerung bei. Durch Feinjustage kann die genaue Ausrichtung der Nulllagen von Gelenken identifiziert werden sowie durch Einstellen von geeigneten Regelungsparametern und Verwendung einer leistungsstarken Steuerung die Genauigkeit deutlich erhöht werden [HÄH2020b]. Eine zusätzliche Kalibrierung des Roboters und die Anpassung des auf der Steuerung hinterlegten kinematischen Modells durch den Roboterhersteller tragen zusätzlich zu einer deutlichen Erhöhung der Arbeitsgenauigkeit bei [COR2019b]. Hierbei werden die realen Parameterwerte der geometrischen Abmessung des Roboters sowie charakteristische Einflussgrößen bestimmt und implementiert [HÄH2020b]. Somit wird die Absolutgenauigkeit des Roboters erhöht, da die Positionierungsfehler beim Anfahren einzelner Punkte verringert werden [BEY2005].

Eine weitere konstruktive Möglichkeit die Genauigkeit des Industrieroboters zu steigern ist die Implementierung von Zusatzkomponenten an der Roboterstruktur, wodurch Fehler kompensiert werden [PUZ2012]. Um der kraftbedingten Verlagerung des Industrieroboters entgegenzuwirken, kann die Robotermechanik beispielsweise durch Versteifungen modifiziert werden [RÖS2014]. Nachteilig ist hierbei der Mehraufwand, der sich vor allem in Mehrkosten widerspiegelt sowie die meist mit einhergehende Einschränkung der Flexibilität und des Arbeitsraums [RÖS2014]. Zudem resultieren aus der Versteifung des Industrieroboters oft verringerte erreichbare Bahngeschwindigkeiten und einer Abnahme der Dynamik des Roboters. Ein Beispiel für eine modifizierte Robotermechanik ist der speziell für das Fräsen entwickelte Industrieroboter *ABB 6660* [ABB2023]. Bei diesem Robotertypen wird eine Parallelkinematik verwendet, die durch eine Zusatzachse dargestellt wird, die die Roboterstruktur versteift [COR2019b]. Dadurch entsteht eine hybride Roboterstruktur, bei der eine serielle und eine parallele Kinematik kombiniert werden [RÖS2014]. Durch diese Parallelkinematik wird zwar die Steifigkeit erhöht, jedoch geht dies mit einer Verkleinerung des Arbeitsraums einher, wie Abbildung 2.4 zeigt [ABB2007].

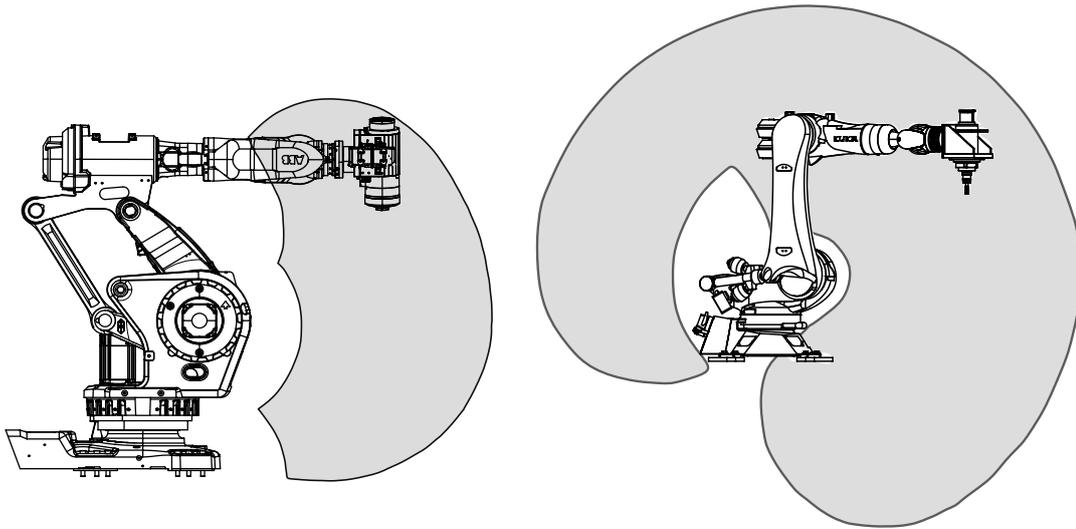


Abbildung 2.4: Vergleich der Arbeitsräume eines Roboters mit Parallelkinematik, hier der ABB IRB 6660 und eines Vertikalknickarmroboters ohne Versteifung, hier der KUKA KR2500 angelehnt an [ABB2007; KUK2023]

Neben diesen, meist vom Roboterhersteller durchgeführten Maßnahmen zur Steigerung der Genauigkeit, liegen weitere Ansätze der Genauigkeitssteigerung im Bereich der Regelungsstrategien. Diese sind dem Bereich der kompensierenden Maßnahmen zuzuordnen. Beispielsweise kann durch kraftgeregelte Bearbeitung die Prozesskraft durch Anpassung der Prozessparameter auf einem definierten Niveau gehalten werden [RÖS2014]. Auch die Positionsregelung, basierend auf Modellierung des Abdrängungsverhaltens des Industrieroboters bei anliegenden Kräften, gehören zu den kompensierenden Maßnahmen [HÄH2020b].

Die Grundlage für kompensierende Verfahren sind entweder Messungen am Industrieroboter selbst, beispielsweise durch Wegmessungen im Arbeitsraum oder Winkelmessungen an den Einzelachsen, oder modellbasierte bzw. simulationsbasierte Berechnungen, die während des Prozesses oder vor dem Prozess durchgeführt werden [HÄH2020b]. Häufig erfordern Messungen am Industrieroboter Messsysteme, die hohe Anschaffungskosten verursachen, vor allem wenn sie robust gegenüber den rauen Umgebungsbedingungen der Einsatzorte der Industrieroboter sein müssen [WEI2008]. Außerdem ist die Implementierung sehr aufwendig, weshalb dieser Ansatz selten in der Praxis verwendet wird. Daher wird vermehrt auf Modellierungs- und Simulationsansätze zurückgegriffen [WEI2008].

Prozessparallele Korrekturen werden als Online-Kompensation bezeichnet, während vorgelagerte Korrekturen der Bahnplanung als Offline-Kompensation bezeichnet werden [HÄH2020b]. Grundlage dieser Ansätze ist die Modellierung von Industrierobotern. Bei der Zerspanung mit Industrierobotern ist die statische Nachgiebigkeit der Haupteinfluss auf die Genauigkeit. Daher wurden in vorangegangenen Arbeiten, unter anderem von [RÖS2014; HÄH2020b; THÜ2006; COR2019b], Steifigkeitsmodelle als Grundlage für die Kompensation verwendet. Die Modelle dienen hierbei der Simulation des Roboterhaltens. Zu unterscheiden sind physikalische Modelle und datengetriebene

Modelle [BUS2022]. Während physikalische Modelle auf klassischen mechanischen Modellierungstechniken beruhen, benutzen datengetriebene Modelle Machine Learning-Algorithmen und sind meist einfacher aufgebaut [BUS2022].

Für die physikalische Modellierung des Roboterhaltens gibt es verschiedene Modellierungsansätze, angefangen vom kinematischen Modell, welches die Roboterstruktur beschreibt, über Nachgiebigkeitsmodelle, die die Steifigkeit des Robotersystems modellieren, und Hysteresemodelle bis hin zu dynamischen Modellen [COR2019b]. Diese Modelle berücksichtigen jeweils die Haupteinflussgrößen auf die Genauigkeit, die nicht durch die herstellerseitige Kompensation eliminiert werden.

Steifigkeitsmodellierung

Die Modellierung des Nachgiebigkeitsverhaltens der Getriebe und Lager des Industrieroboters ist ein häufiger Ansatz zur Beschreibung des Abdrängungsverhaltens und Grundlage für Abdrängungskompensationen [WEI2008]. Da die statische Nachgiebigkeit den größten Einfluss auf die Bearbeitungsgenauigkeit des Roboters hat, liegt hier großes Potential die Genauigkeit des Industrieroboters zu erhöhen. Im Folgenden werden die für diese Arbeit wichtigen Ansätze der Nachgiebigkeitsmodellierung vorgestellt.

Steifigkeitsmodelle haben zum Ziel, das Verhalten des Roboters unter Last zu beschreiben und die Verlagerung des TCPs in Folge dieser Last zu modellieren. Bei der Steifigkeitsmodellierung wird von einem elastischen Werkstoffverhalten ausgegangen, wodurch das Material nach der Entlastung wieder seine ursprüngliche Ausdehnung annimmt [HÄH2020b]. Es wird angenommen, dass die Gesamtnachgiebigkeit des TCPs sich aus den Nachgiebigkeiten der Lager, Getriebe und Struktur zusammensetzt. Durch Identifikation dieser Nachgiebigkeiten und Modellierung des Verhaltens unter Last kann das Gesamtnachgiebigkeitsverhalten des Industrieroboters beschrieben werden [RÖS2014].

Für die Beschreibung des Nachgiebigkeitsverhaltens gibt es verschiedene Ansätze. Hohe Detaillierungsgrade werden häufig über Elastizitätsmodelle erreicht, in denen die Roboterstruktur über die Finite-Elemente Methode (FEM) modelliert wird. Nachteilig an dieser Modellierung ist die lange Rechenzeit und die meist unvollständige Computer Aided Design (CAD)-Datengrundlage. Dieser Modellierungsansatz ist daher für den industriellen Einsatz zu aufwendig und komplex [HÄH2020b]. Die Approximation der Roboterstruktur über Euler-Bernoulli-Balkenelemente stellt einen weiteren Ansatz zur Modellierung der Nachgiebigkeiten dar, sowie das Matrix Struktur Analyse Verfahren (MSA), das zur Modellierung von elastischen Roboterstrukturen angewendet wird [HÄH2020b].

Andere Ansätze verfolgen die reine Modellierung der Gelenke, bei der in komplexen Modellen nichtlineare Steifigkeiten der Gelenke, Dämpfung und Hystere in den Gelenken berücksichtigt wird [HUY2020].

Der am häufigsten verwendete Ansatz ist der Ansatz über die erweiterte Vorwärtskinematik. Die Vorteile der erweiterten Vorwärtskinematik liegen in der einfachen Berechnung und deutlich geringeren notwendigen Rechenleistung im Vergleich zur FEM, da dieser Ansatz auf der Verrechnung von Transformationsmatrizen beruht [HÄH2020b].

Die Vorwärtskinematik, auch direkte Kinematik genannt, ist die eindeutige Abbildung von Gelenkkordinaten auf kartesische Koordinaten [HÄH2020a]. Grundlage der Vorwärtskinematik sind Koordinaten- und Vorwärtstransformationen. Die Rückwärtstransformation hingegen, auch inverse Kinematik genannt, beschreibt mögliche Achsstellungen des Roboters, um einen in kartesischen Koordinaten vorgegebenen Punkt zu erreichen, dargestellt in Abbildung 2.5 [HÄH2020b]. Die zu dem vorgegebenen Punkt gehörigen Gelenkkordinaten sind nicht eineindeutig bestimmt, da es für einige Positionen unendlich viele Lösungen gibt. Es treten Mehrdeutigkeiten und Singularitäten auf. Sind die Gelenkkordinaten im Gegenzug gegeben, ist die Position und Orientierung in kartesischen Koordinaten eindeutig [WEB2009].

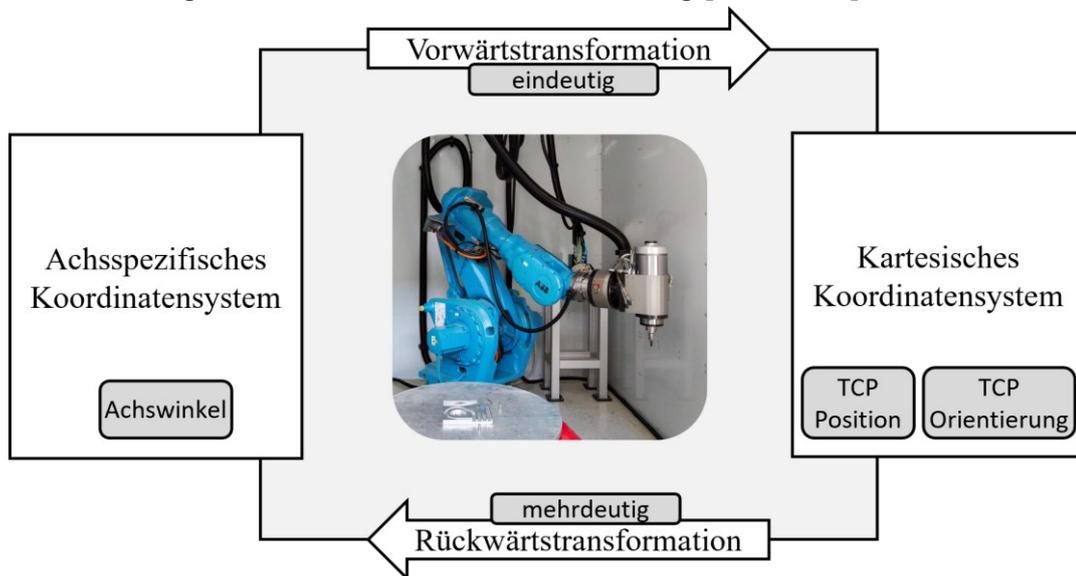


Abbildung 2.5: Darstellung der Vorwärts- und Rückwärtstransformation, angelehnt an [HÄH2020b].

Zur Beschreibung der Lage des TCPs und seiner Orientierung über die Vorwärtskinematik wird jedem Glied ein orthogonales Koordinatensystem zugeordnet. Die Vorwärtskinematik beschreibt dann die Transformation von einem Koordinatensystem in das nächste bis hin zum Endeffektor [SIC2016]. Für die Beschreibung werden Transformationsmatrizen verwendet, die miteinander multipliziert werden. Die Transformationsmatrizen beschreiben jeweils Rotationen oder Transformationen um die Achsen der kartesischen Koordinatensysteme.

Für die Festlegung der Koordinatensysteme am Roboter und die Beschreibung der Beziehungen zueinander, gibt es verschiedene Transformationsvorschriften, die unter anderem [RÖS2014] erläutert. Diese Transformationsvorschriften unterscheiden sich in den durchgeführten Einzeltransformationen, ihrer Reihenfolge und den verwendeten Parametern [RÖS2014].

Der Vorteil der Vorwärtstransformation liegt in der intuitiven Methode, der einfachen Ermittlung der Parameter und dem geringen benötigten Rechenaufwand, aufgrund der einfachen Matrizenberechnung [FAR2019].

Um aus dieser kinematischen Beschreibung, die für idealisierte, unbelastete Roboter gilt, ein Steifigkeitsmodell zu entwickeln, wird die Vorwärtstransformation um die Nachgiebigkeitsberechnung erweitert. Zur Modellierung wird der Ansatz über virtuelle Gelenke verwendet, bei dem elastische Strukturen und Gelenke des Roboters durch starre Körper, verbunden über virtuelle elastische Gelenke, dargestellt werden [HÄH2020b]. Die virtuellen Gelenke werden dann um eine in Drehrichtung wirkende lineare Torsionsfeder mit der Federsteifigkeit $k_{\theta i}$ des jeweiligen Gelenks i erweitert. Die Federsteifigkeit umfasst alle in Drehrichtung wirkenden Elastizitäten des Antriebsstrangs [COR2019b].

Der Detaillierungsgrad der Steifigkeitsmodelle unterscheidet sich vor allem in den berücksichtigten Steifigkeiten des Robotersystems. Grundsätzlich lassen sich diese in Struktur- und Gelenknachgiebigkeiten unterteilen. Die Gelenknachgiebigkeiten umfassen sowohl die Nachgiebigkeiten der Lager als auch der Getriebe. Die Gelenksteifigkeiten werden maßgeblich durch die Steifigkeiten der Getriebe definiert [MÖL2019]. Die Gelenksteifigkeiten beeinflussen die Gesamtsteifigkeit des Industrieroboters deutlich mehr also die Struktursteifigkeiten. Daher berücksichtigen DUMAS und CORDES lediglich die Drehsteifigkeit der Gelenke in ihren Steifigkeitsmodellen [COR2019b]. Deutlich komplexer sind die Steifigkeitsmodelle von RÖSCH und HÄHN, in denen auch die Kippnachgiebigkeiten der Gelenke und der Struktur des Robotersystems berücksichtigt werden [HÄH2020b; RÖS2014].

Werden nur die Drehsteifigkeiten der Gelenke berücksichtigt, kann die Jacobi-Matrix \mathbf{J} zur Berechnung verwendet werden. Die Jacobi-Matrix beschreibt die Abbildung der Gelenkgeschwindigkeiten auf die Lineargeschwindigkeit des TCPs [WEB2009].

Die Abdrängung des TCPs $\Delta\vec{r}$ durch den Kraft- und Momentenvektor \vec{F} kann beschreiben werden über

$$\Delta\vec{r} = \mathbf{K}_K^{-1} \cdot \vec{F} \quad (2.1)$$

\mathbf{K}_K stellt hierbei die kartesische Steifigkeitsmatrix dar, die folgendermaßen berechnet werden kann:

$$\mathbf{K}_K = \mathbf{J}^{-T} \cdot \mathbf{K}_\theta \cdot \mathbf{J}^{-1} \quad (2.2)$$

\mathbf{K}_θ ist eine Diagonalmatrix und stellt hierbei die Steifigkeitsmatrix mit den Drehsteifigkeiten der einzelnen Gelenke dar, auch Gelenksteifigkeitsmatrix genannt [COR2019b]. Die Jacobimatrix \mathbf{J} enthält nichtlineare Funktionen der Achswinkel [HÄH2020b].

Der Ansatz über die Jacobimatrix kann nicht verwendet werden, wenn die Jacobimatrix und die Steifigkeitsmatrix voneinander abgekoppelt sind, wie beispielsweise bei einem Portalroboter. Außerdem wenn der Roboter nicht bewegt wird und unbelastet an der gleichen Position verbleibt [CHE2000]

HÄHN und RÖSCH hingegen verwenden die erweiterte Vorwärtskinematik um die Nachgiebigkeit der Roboterstruktur zu modellieren und können so neben den Gelenknachgiebigkeiten auch die Strukturnachgiebigkeit in ihr Modell einbeziehen [HÄH2020b; RÖS2014]. Hierbei wird die Vorwärtskinematik um Transformationsmatrizen erweitert, die die Nachgiebigkeiten in den Gelenken und Armen abbilden [HÄH2020b].

Ermittlung Steifigkeitsparameter

Sowohl in den Ansätzen der erweiterten Vorwärtskinematik als auch über Jacobi-Matrizen ist die Identifikation der Steifigkeitsparameter des Robotersystems essenzieller Teil der Modelle [HÄH2020b]. Diese sind in der Regel nicht im Roboterhandbuch oder auf der Robotersteuerung angegeben, sondern müssen ermittelt werden. Zur Ermittlung der Steifigkeitsparameter am Industrieroboter werden in verschiedenen Arbeiten unterschiedliche Ansätze verwendet. Sie unterscheiden sich vor allem im Aufwand, sowohl finanziell und zeitlich als auch in der Genauigkeit und Aussagekraft [FAR2019]. Zur Ermittlung der Steifigkeitsparameter unterzieht GERSTMANN beispielsweise die Getriebe statischen Tests auf einem Prüfstand [GER1991]. Hierfür müssen die Getriebe des Industrieroboters ausgebaut werden. Somit können die Steifigkeitsparameter mit einer sehr hohen Präzision ermittelt werden, jedoch ist der zeitliche und finanzielle Aufwand durch Ausbau der Getriebe und Motoren sehr hoch. Zudem können Lagersteifigkeiten, die jedoch nur einen geringen Einfluss haben, nicht mit erfasst werden [MÖL2019]. Grundsätzlich zeigen die Arbeiten von GERSTMANN und EHM, dass Getriebesteifigkeiten nicht linear verlaufen, sondern einen Hystereseverlauf annehmen [EHM2016; GER1991]. Um die Getriebesteifigkeiten dennoch abbilden zu können und die Steifigkeitsberechnung zu vereinfachen, werden diese oftmals als linear angenommen [COR2019b; SCH2017]. Diese Parameter stellen jedoch nur eine Annäherung an die tatsächlichen physikalischen Parameter dar [BUS2022].

Eine weniger aufwendig und kostengünstigere Möglichkeit zur Ermittlung der Steifigkeitsparameter der Getriebe ist, die zu untersuchende Struktur durch definierte Kräfte und Momente zu belasten und die daraus resultierende elastische Deformation messtechnisch zu bestimmen [HÄH2020b]. Hierbei können verschiedene Verfahren unterschieden werden, die sich vor allem in den Punkten Kraftangriffspunkt, eingesetzte Sensorik, Positionierung der Sensorik, Ort der Messung der Abweichung und Anzahl der Wiederholungen der Messungen unterscheiden [HÄH2020b].

WEIGOLD misst beispielsweise 27 Position in einem kubischen Volumen unter Zug-Druck-Belastung, für deren Aufbringung er eine Zug-Druck-Stange verwendet [WEI2008]. Die Abweichung wird hierbei am TCP mit Hilfe einer Messuhr bestimmt. HÄHN vermisst die gesamte Roboterstruktur über beobachtbare Würfel, die über die gesamte Roboterstruktur angebracht sind. Somit wird die Verformung jedes Gelenks und jedes Strukturteils unter Belastung am TCP beobachtet [HÄH2020a]. CORDES hingegen belastet den Endeffektor stufenweise über eine Spannschraube und misst die

Verschiebung des TCPs über einen Laser Tracker. Dabei werden 16 Posen vermessen [COR2017].

Im Allgemeinen zeigt sich, dass zur Ermittlung der Steifigkeitsparameter aufwendige messtechnische Untersuchungen notwendig sind, die eine Vielzahl an Versuchen erfordern.

Einsatz und Verwendung der Steifigkeitsmodelle

Die in verschiedenen Arbeiten aufgestellten Steifigkeitsmodelle werden zur Genauigkeitssteigerung während der Zerspanung verwendet.

So nutzt CORDES das Modell zur Offline-Programmierung bei der Bearbeitung von Kreiskonturen [COR2019b]. Hierbei ist eine Simulation der Prozesskräfte notwendig, um die Verschiebung des TCPs unter Last vorherzusagen. Die Verschiebungen werden dann bei der Bahnprogrammierung berücksichtigt und die Bahn um die Verschiebung korrigiert. Daneben kann die Ermittlung der voraussichtlichen Prozesskräfte auch durch Voruntersuchungen erfolgen. Diese Offline-Kompensation ist im Vergleich zu anderen Methoden kostengünstig, da keine zusätzlichen Sensoren benötigt werden. Jedoch können unvorhergesehene Störungen während des Prozesses, wie Änderungen an Werkstückgeometrie, Materialbeschaffenheit oder Verschleiß am Werkzeug, nicht berücksichtigt werden. Nur zuvor modellierte Effekte werden in der Kompensation berücksichtigt [HÄH2020b].

Ein weiterer Anwendungsfall für Steifigkeitsmodelle ist die Online-Kompensation. Hierbei handelt es sich um eine prozessparallele Maßnahme zur Genauigkeitssteigerung, bei der die Prozesskräfte während der Zerspanung gemessen und die Verschiebungen des TCPs prozessparallel berechnet werden [WEI2008]. Hieraus werden anschließend Korrekturwerte ermittelt, mit denen die Trajektorie optimiert wird. Hierfür sind ein möglichst exaktes Robotermodell, eine schnelle Kommunikation zwischen Robotersteuerung, externer Sensorik und eventuelle externe Rechnerhardware notwendig, wodurch dieser Aufbau kostenintensiver ist als die Offline-Kompensation [HÄH2020b].

Die Kombination der Offline- und Onlinekompensation wird von [HÄH2020b] umgesetzt, wobei die Abweichungen um bis zu 70 % reduziert werden.

Einen anderen Anwendungsfall zeigt GUO durch Berechnung der Verschiebung des TCPs unter Last beim Bohren [GUO2015]. Daraus wird ein Index abgeleitet, anhand dessen die Pose des Roboters optimiert wird unter Beibehaltung der kartesischen Position. Der Bohrprozess findet in der steifsten Roboterpose statt und die Genauigkeit des Prozesses wird um bis zu 0,2 mm gesteigert [GUO2015].

2.1.5 Fräsen mit Industrierobotern

Fräsen ist ein spanabhebendes Verfahren, welches der Hauptgruppe trennender Fertigungsverfahren zugeordnet ist und unter die Gruppe Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide fällt [KLO2017].

Während des Prozesses befinden sich die Schneiden des Werkzeugs nicht kontinuierlich im Eingriff, da der Schnitt bei jeder Werkzeugumdrehung mindestens einmal unterbrochen wird [RÖS2014]. Der Zerspanprozess ist somit ein unterbrochener Schnittprozess, bei dem die Prozesskräfte zusätzlich periodisch mit der Zeit variieren [ALT2012].

Die aus dem Zerspanvorgang resultierenden Zerspankräfte lassen sich grundlegend in die Aktivkraft F_a , die in der Arbeitsebene wirkt und die Passivkraft F_p , die senkrecht zur Arbeitsebene wirkt und keine Leistung beim Zerspanen erzeugt, einteilen [DIN 6584]. Die Aktivkraft, die die Leistung beim Zerspanen erzeugt, lässt sich zudem anhand der Vorschubrichtung in die Vorschubkraft F_f und die senkrecht hierzu angreifende Vorschubnormalkraft F_{fN} unterteilen [DIN 6584].

Die Schnittkraft F_c wirkt in Richtung der Schnittgeschwindigkeit v_c und ist die leistungsführende Komponente der Zerspankraft.

Je nach Kombination von Werkzeugdreh- und Vorschubrichtung wird zwischen Gegenlauf- und Gleichlaufräsen unterschieden, wie Abbildung 2.6 zeigt. Beim Gleichlaufräsen bewegt sich die Schneide im Eingriffsbereich in die Vorschubrichtung des Werkstücks, wodurch die Bewegungsrichtung der Schneide im Eingriff und der Werkstückvorschubvektor in die gleiche Richtung zeigen. Dadurch ist die Kraft bei Schneideneintritt am höchsten und nimmt dann kontinuierlich ab. Beim Gegenlaufräsen hingegen bewegt sich die Schneide im Eingriff entgegen der Vorschubrichtung des Werkstücks, wodurch sich die Kraft langsam aufbaut [KLO2017].

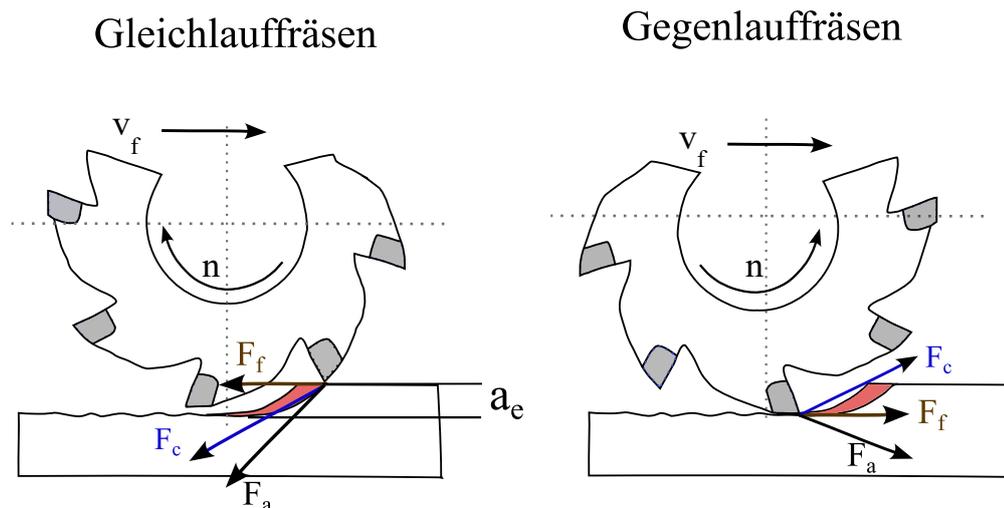


Abbildung 2.6: Unterschied zwischen Gleichlaufräsen (links) und Gegenlaufräsen (rechts) nach [KLO2017].

Besonders bei schwer zerspanbaren Werkstoffen sollte vorzugsweise im Gleichlaufräsen gearbeitet werden, da beim Gegenlaufräsen die Spanbildung mit einer langen Reibphase zwischen Werkzeug und Werkstück einhergeht [KLO2017].

Nach WEIGOLD gibt es bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern drei dominante Prozessstörungen [WEI2008]. Zum einen die statische Abdrängung der geplanten Bearbeitungsbahn, resultierend aus der schon beschriebenen statischen Nachgiebigkeit des Industrieroboters. Sie stellt die Hauptursache der Ungenauigkeit bei der Zerspanung mit Industrierobotern dar.

Als zweite Einflussgröße werden niederfrequente Schwingungen in der Größenordnung < 20 Hz genannt [WEI2008]. Diese treten sowohl in Passivrichtung als auch in Vorschub- und Vorschubnormalenrichtung auf. Hieraus resultieren Welligkeiten auf der Bauteiloberfläche, die ca. 20 % der Amplitude der statischen Abdrängung ausmachen [WEI2008].

Als dritter Effekt treten die hochfrequenten Schwingungen auf, die jedoch eine untergeordnete Bedeutung für die Prozessstörungen haben. Die Amplituden der hochfrequenten Schwingungen sind im Vergleich zu den niederfrequenten Schwingungen deutlich kleiner. Ihr Einfluss ist somit deutlich geringer als der Einfluss der niederfrequenten Schwingungen [WEI2008].

Der Effekt der nieder- und hochfrequenten Schwingungen wird im Folgenden beschrieben.

Dynamische Effekte beim Fräsen

Neben den statischen Prozesskräften, aus denen die statische Abdrängung des Roboters resultiert, führen auch dynamische Effekte zu einer Verringerung der Arbeitsgenauigkeit [COR2019a]. Dynamische Effekte, wie Schwingungen, sind charakterisiert durch zeitlich veränderliche Anteile [MAG2016].

Industrieroboter sind sehr schwingungsanfällig aufgrund der schon beschriebenen Nachgiebigkeit der Getriebe und der Massen der Komponenten des Roboters, was sich in den niedrigen ersten Eigenfrequenzen widerspiegelt [COR2019b]. Das System wird während der Fräsbearbeitung bei niedrigen Frequenzen angeregt, was zu Schwingungen und zum Auftreten von Rattern führt. Dieses dynamische Verhalten des Industrieroboters zeigt sich in der Oberflächenqualität der zerspannten Bauteile in Form von Welligkeiten auf der Oberfläche der Bauteile [WEI2008]. Neben dem Einfluss auf die Bauteilqualität wird auch die Produktivität in Form der Bearbeitungsgeschwindigkeit und Zerspanvolumina sowie die Werkzeugstandzeit herabgesetzt [YUA2018]. Die dynamische Steifigkeit von gekoppelten Systemen, wie sie an einem Industrieroboter vorliegen, sind deutlich schlechter abzuschätzen als die statischen Steifigkeiten, da starke Wechselwirkungen auftreten [BRE2016]. Daher wird im Folgenden auf das dynamische Verhalten des Industrieroboters eingegangen und die Grundlagen der Schwingungsantworten beschrieben.

Die Dynamik beschreibt die Beziehung zwischen Antriebs- und Kontaktkräften und die daraus resultierenden Beschleunigungen und Bewegungen beispielsweise der Roboterstruktur [SIC2016]. Das dynamische Verhalten wird bestimmt durch die räumliche Massenverteilung des Systems, der Steifigkeit und deren räumliche Verteilung sowie der Dämpfung [BRE2016].

Grundsätzlich lassen sich Schwingungen als diskontinuierliche, zeitliche Schwankungen von Zustandsgrößen beschreiben [MAG2016]. In Bezug auf Industrieroboter und Fräsprozesse werden meist mechanische Schwingungen untersucht, die eine zeitliche Änderung der Zustandsgröße Verschiebung beschreiben [MAG2016].

Schwingungen von Strukturen lassen sich hinsichtlich ihres Entstehungsmechanismus grundsätzlich in vier Arten von Schwingungen unterteilen. Dies sind freie Schwingungen, fremderregte Schwingungen, parametererregte Schwingungen und selbsterregte Schwingungen [KUT2019].

Sowohl die freien als auch die selbsterregten Schwingungen gehören zur Kategorie der autonomen Schwingungen, bei denen das System, wie beispielsweise die Roboterstruktur, die Frequenzen der Zeitfunktion bestimmt [KUT2019]. Unter freien Schwingungen wird das Verhalten der Roboterstruktur nach einer Anfangsbedingung, wie einer Störung oder Auslenkung, und der Rückkehr der Struktur in ihren Gleichgewichtszustand aufgrund der Systemdämpfung verstanden [COR2019b]. Die Frequenz, mit der das System schwingt, entspricht einer Eigenfrequenz des Systems [COR2019a]. Ein Beispiel in der Zerspanung mit Industrierobotern ist die Kollision von Werkzeug mit dem Werkstück, was zu einer Auslenkung der Roboterstruktur führt [QUI2011].

Bei selbsterregten Schwingungen hingegen ist eine Energiequelle vorhanden, aus der der Schwinger Energie im Takt seiner Eigenschwingungen entnehmen kann und die Verluste durch Dämpfung ausgleicht [MAG2016]. Die Energiezufuhr wird dabei unter anderem durch den Schwingungsvorgang selbst gesteuert, es findet eine Rückkopplung statt, wodurch die Selbsterregung möglich ist [MAG2016]. Grundsätzlich schwingt das System mit einer oder mehreren Eigenfrequenzen, wobei keine äußeren Störkräfte auf das System einwirken [BRE2016]. Ein Beispiel für selbsterregte Schwingungen ist das Auftreten von Rattern während des Zerspanprozesses. Hier wachsen die Amplituden des Systems nach einer initialen Anregung stark an, bis sich ein Gleichgewichtszustand zwischen abnehmender Energie durch Dämpfung und aufgenommener Energie aus dem Zerspanprozess einstellt [COR2019b]. Das Rattern ist nach QUINTANA die Hauptursache für Instabilitäten im Zerspanprozess und im Vergleich zu anderen Schwingungsarten weitaus weniger zu kontrollieren und regulieren [QUI2011].

Fremderregte Schwingungen gehören zusammen mit den parametererregten Schwingungen zu den heteronomen Schwingungen [KUT2019]. Charakteristisch für diese Schwingungen ist, dass ihre Frequenzen durch äußere Einwirkungen auf das System verursacht werden und das System mit der Frequenz der Einwirkung, also der Erregerfrequenz schwingt [KUT2019]. Diese Arten der Schwingungen können im

Zerspanprozess durch Identifikation und Entkopplung der Erregerquelle verhindert oder abgestellt werden [YUA2018].

Fremderregte Schwingungen sind die Reaktion einer Struktur auf die Einwirkung äußerer, zeitabhängiger Kräfte. Hier antwortet die Struktur nach einem Einschwingvorgang in der Frequenz der äußeren Anregung sowie möglicher harmonischer Anregungen und unabhängig der Eigenfrequenz [COR2019b]. Parametererregte Schwingungen werden durch zeitliche Änderung eines Parameters im schwingungsfähigen System verursacht bei gleichzeitiger Auslenkung um die Gleichgewichtslage [KUT2019].

Selbsterregte Schwingungen in Form von Rattern sind hauptsächlich für Schwingungen während Zerspanprozessen. Für das Rattern lassen sich zwei Haupteffekte als Quelle der Anregung identifizieren, der Regenerativeffekt und die Lagekopplung, wie Abbildung 2.7 zeigt [YUA2018]. Daneben sind weitere Ursachen für Rattern bekannt, wie Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück oder thermomechanische Effekte in der plastischen Verformungszone, die jedoch eine untergeordnete Relevanz für die geometrische Präzision in der Zerspanung haben [QUI2011].

Der Regenerativeffekt beschreibt die Anregung des Systems bei der wiederholten Bearbeitung einer Werkstückoberfläche [COR2019b]. Während des Fräsvorgangs wird bei Kontakt einer Werkzeugschneide die Roboterstruktur angeregt und es entsteht durch den Zahneingriff eine Welligkeit in der Oberfläche des Werkstücks. Bei abermaligem Überfräsen der Werkstückoberfläche variiert daher die Spandicke und hierdurch die Zerspankraft aufgrund der schon vorhandenen Gestaltabweichung der Werkstückoberfläche und der daraus resultierenden Phasendifferenz zwischen der Welligkeit der vorangegangenen Zerspanung. Somit wird die Struktur zu Schwingungen angeregt, die sich wiederum auf der Werkstückoberfläche abbilden [YUA2018]. Das regenerative Rattern gehört zur Kategorie des sekundären Ratterns, da es nicht durch den Schnittprozess selbst, sondern durch vorangegangene Prozesse hervorgerufen wird [QUI2011]. Der Effekt des regenerativen Ratterns ist der Hauptgrund für Instabilitäten beim Zerspanprozess bei der Zerspanung mit Werkzeugmaschinen [YUA2018]. In Bezug auf roboterbasierte Zerspanung tritt regeneratives Rattern typischerweise bei hohen Spindeldrehzahlen auf, beispielsweise bei der Zerspanung von Aluminium. Es wird typischerweise bei höheren Frequenzen als die ersten Eigenfrequenzen der für subtraktive Bearbeitung genutzten Robotersystemen hervorgerufen [PAN2006]. Regeneratives Rattern zeichnet sich durch poseunabhängige Eigenmoden der Roboterstruktur aus [VER2019].

Mehrere Untersuchungen zeigen, dass es sich bei regenerativem Rattern tendenziell um einen lokalen Effekt handelt. Er tritt vor allem am Werkzeug und Werkstück auf, wenn die lokale Struktursteifigkeit nicht hoch genug ist um regenerative Rückkopplungsmechanismen zu unterbinden [YUA2018].

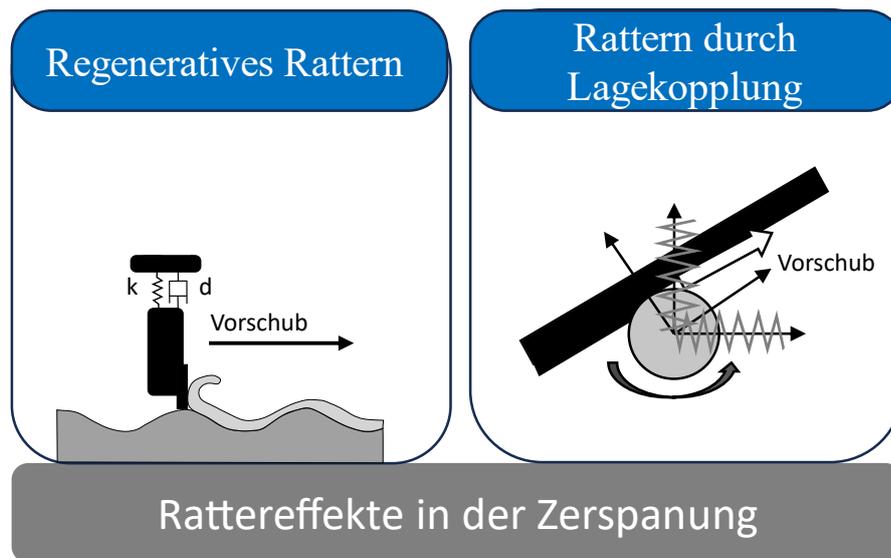


Abbildung 2.7: Darstellung der zwei Hauptrattereffekte in der Zerspanung angelehnt an [YUA2018].

Rattern auf Grund von Lagekopplung hingegen tritt auf, wenn ein System höherer Ordnung unterschiedliche Hauptschwingungsrichtungen hat, deren Eigenfrequenzen jedoch nahe beieinander liegen. Wird die Struktur nahe einer Eigenfrequenz angeregt, beginnen die Strukturelemente mit unterschiedlichen Eigenformen gleichzeitig zu antworten, sodass einzelne Strukturteile in unterschiedliche Richtungen zu schwingen beginnen [YUA2018]. Die Schwingungen haben keine feste Richtung, sondern der TCP folgt ellipsenartig der Bewegung relativ zum Werkstück [COR2019b]. Industrieroboter sind für diesen Effekt deutlich anfälliger als Werkzeugmaschinen aufgrund der niedrigeren Eigenfrequenzen der Roboterstruktur [YUA2018].

Lagekopplung tritt auf, wenn die Gesamtsteifigkeit der Roboterstruktur nicht signifikant höher ist als die Prozesssteifigkeit der Bearbeitungsoperation [YUA2018]. Folglich ist die Anregung der Roboterstruktur in den kritischen Eigenfrequenzen durch Lagekopplung deutlich wahrscheinlicher. Werkzeugmaschinen hingegen werden eher durch den regenerativen Rattereffekt angeregt, da dieser erst im Bereich höherer Eigenfrequenzen auftritt [YUA2018]. Dennoch können bei der spanenden Bearbeitung mit Robotern sowohl regeneratives Rattern, als auch Lagekopplung auftreten [YUA2018].

Das dynamische Verhalten des Industrieroboters wird folglich vor allem durch die niedrigen Eigenfrequenzen der Struktur geprägt [TUN2021].

Tabelle 2.1: Unterschied zwischen regenerativem Rattern und Lagekopplung nach [YUA2018]

	Regeneratives Rattern	Lagekopplung
Ort	Werkstück/Werkzeug	Am Roboter selbst
Steifigkeit	Prozesssteifigkeit < Maschinensteifigkeit	Robotersteifigkeit < Prozesssteifigkeit
Frequenzbereich	Höher im Bereich kHz	Niedriger zwischen 10 und 30 Hz
Prozesskräfte	Geringere Kräfte im Bereich einiger N	Höhere Kräfte im Bereich 100 N
Ratterabmilderung	Prozessparameter anhand von Stabilitätskarten optimieren	Prozesskräfte optimieren, Steifigkeit der Roboterstruktur erhöhen, Prozessausführung optimieren

Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass das Auftreten und die Intensität von Rattern aufgrund von Lagekopplung von der Bearbeitungsrichtung im Fräsprozess abhängig ist. Je nach Bearbeitungsrichtung variiert die Intensität der Schwingungen der Roboterstruktur. Daneben beeinflussen die Posen des Industrieroboters, also die Orientierung der Roboterstruktur zum Bauteil, auch das Schwingungsverhalten des Industrieroboters [PAN2011].

Die Unterschiede zwischen Lagekopplung und dem regenerativen Effekt sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

Methoden und Ansätze zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens

Zur Beschreibung und Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Industrieroboters und zur dynamischen Modellierung gibt es verschiedene Ansätze und Methoden. Grundsätzlich ist hierfür Kenntnis über die dynamischen Eigenschaften des Gesamtsystems notwendig, wie die Eigenfrequenzen und Eigenschwingungen [COR2019b]. Diese Eigenschaften können über Modalanalysen ermittelt werden [MÖS2020] oder über Simulationen [TUN2021]. Daneben gibt es experimentelle Methoden, über die stabile Fräsbereiche identifiziert werden können.

Grundsätzlich gibt es verschiedene Ansätze zur Vermeidung des dynamisch instabilen Verhaltens, wie Abbildung 2.8 zeigt.

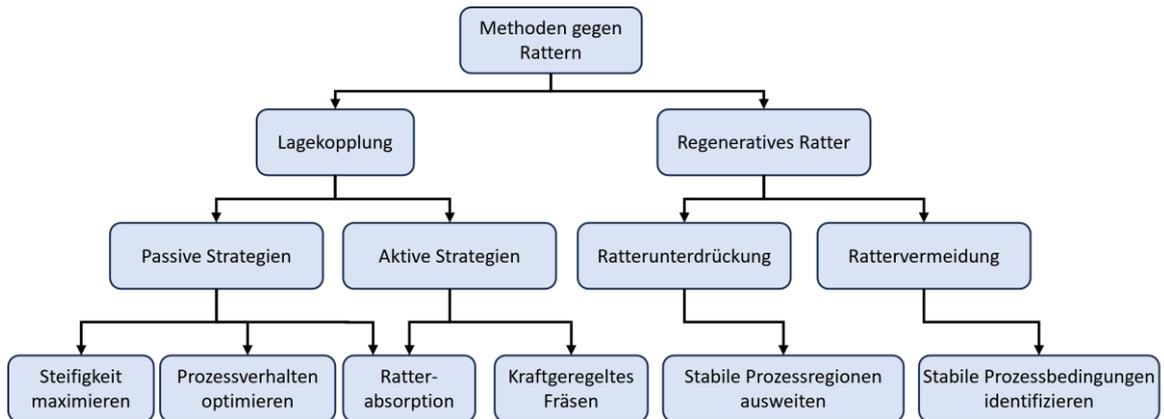


Abbildung 2.8: Ansätze zur Vermeidung von dynamisch instabilem Verhalten, angelehnt an [YUA2018].

Die Arbeitsgenauigkeit des Industrieroboters ist durch die Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Werkstück geprägt. Daher ist prinzipiell eine Stabilitätsvorhersage des Prozesses durch die Modellierung der Wechselwirkung zwischen Fräsprozess und Maschinenstruktur möglich [COR2019b]. Diese Modellierung beinhaltet jedoch totzeitbehaftete Differentialgleichungen mit periodisch zeitabhängigen Koeffizienten, weshalb eine geschlossene Lösung dieser Systeme im Allgemeinen nicht möglich ist [COR2019b]. Daher wird oftmals mit approximierenden Methoden im Frequenz- und Zeitbereich gearbeitet, bei denen die Stabilitätsgrenzen des Fräsprozesses in Abhängigkeit relevanter Prozessparameter in einem Stabilitätsdiagramm angegeben wird [COR2019b]. Zur Prozessauslegung und Ermittlung der Stabilitätsgrenzen des Fräsprozesses insbesondere im Hinblick auf regeneratives Rattern werden Stabilitätskarten gefräst, aus denen ein Stabilitätsdiagramm erstellt werden kann [COR2019b]. Stabilitätskarten zielen darauf ab, den Effekt des regenerativen Ratters vorherzusagen, da hier stabile und instabile Zonen des Fräsprozesses sichtbar werden. Das Erstellen von Stabilitätskarten fällt unter die Strategie der Vermeidung von Ratterentstehung durch Vorhersage [YUA2018]. Die Vorhersage der Grenzschnittiefen ist über Experimente möglich, bei denen in Versuchen bei verschiedenen Spindeldrehzahlen die erreichbaren Grenzschnittiefen ermittelt werden. Zur Erstellung der Stabilitätskarte werden die in Versuchen erreichten Grenzschnittiefen über der Spindeldrehzahl aufgetragen. Die Grenzschnittiefen geben die Schnitttiefe an, bei der bei einer bestimmten Spindeldrehzahl Rattern auftritt [YUA2018]. Daneben ist die Vorhersage auch über mathematische Modellierung möglich, bei der die Spantiefen als Funktion der Drehzahl abgebildet werden [DRE2016].

In Abbildung 2.9 ist der Verlauf einer Stabilitätskurve beispielhaft dargestellt. Typisch ist der girlandenartige Verlauf der Stabilitätskurve, bei dem sich die Minima der Spantiefen aneinanderreihen.

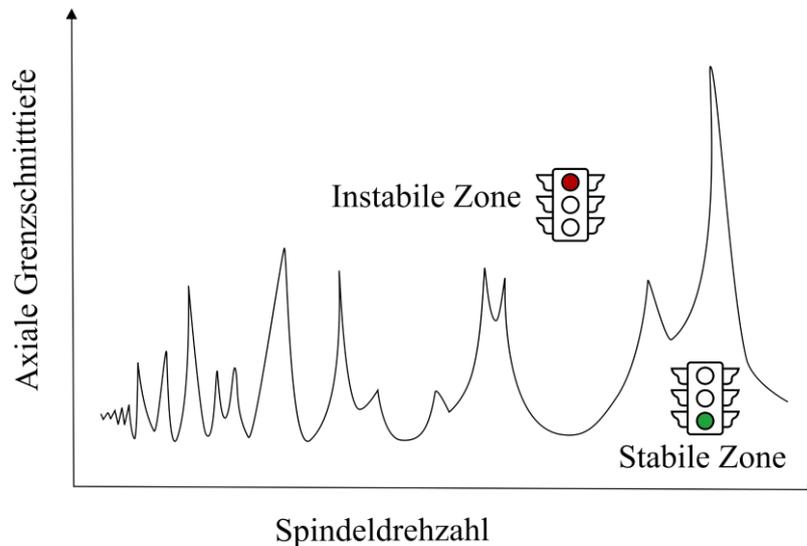


Abbildung 2.9: Beispiel für ein Stabilitätsdiagramm nach [YUA2018].

Überträgt man die experimentelle Erstellung von Stabilitätskarten auf Industrieroboter, zeigt sich, dass eine präzise Vorhersage des Ratterns vergleichbar zu Werkzeugmaschinen nicht möglich ist. Stabilitätskarten werden bei definierten Vorschubgeschwindigkeit und an einer definierten Bearbeitungsposition durchgeführt und sind im Falle von Werkzeugmaschinen für nahezu den gesamten Arbeitsraum gültig. Anders als bei Werkzeugmaschinen hat bei Industrierobotern neben den Fräsparametern wie Spindeldrehzahl, Vorschubgeschwindigkeit oder Schnittgeschwindigkeit auch die Werkzeugbahn, Bearbeitungspose und der Arbeitsbereich sowie die Werkstückpositionierung Einfluss auf das Auftreten von Rattern [LI2017b]. Aufgrund der Änderung des dynamischen Verhaltens, bedingt durch den seriellen Strukturaufbau, Konfiguration und Orientierung im Arbeitsraum sind Stabilitätskarten weniger aussagekräftig [YUA2018]. Bei der Erstellung der Stabilitätskarten analog zum Vorgehen bei Werkzeugmaschinen wird das dynamische Verhalten der Roboterstruktur bei Änderung der Vorschubgeschwindigkeit und Bearbeitungsposition nicht beachtet, welche jedoch nachweislich auftreten [TUN2021]. Zudem wird der Effekt der Lagekopplung nicht berücksichtigt, der maßgeblich das dynamische Verhalten des Roboters beeinflusst [YUA2018].

Neben der Vermeidung regenerativen Ratterns durch Vorhersage instabiler Prozessverhältnisse durch Stabilitätskarten, ist ein weiterer Ansatz die Unterdrückung dieses Effekts [YUA2018]. Hierbei wird das Systemverhalten der Struktur durch Erweiterung der stabilen Bearbeitungsregionen geändert, sodass Rattern unterdrückt wird. Möglichkeiten hierfür sind konstruktive Maßnahmen, wie Erhöhung der Dämpfung oder prozessparallele Regelungsalgorithmen [YUA2018]. Verschiedene Arbeiten zeigen, dass Rattern unterdrückt werden kann, indem der Winkel zwischen der durchschnittlichen Richtung der resultierenden Schnittkraft und Richtung der maximalen Hauptsteifigkeit des Roboters minimiert wird. [CEN2017a]. Allerdings birgt dies die Gefahr der Einschränkung der Flexibilität des Roboters.

Ist die Lagekopplung ursächlich für die Instabilitäten im Fräsprozess, erfährt die gesamte Roboterstruktur Vibrationen. Um dem entgegenzuwirken, können Abmilderungs- bzw. Vermeidungsstrategien eingesetzt werden, die in aktive und passive Strategien unterteilt werden [YUA2018].

Aktive Strategien zielen auf die prozessparallele Anpassung der Prozessparameter ab, beispielsweise durch eine Kraftregelung. Dadurch findet eine aktive Einflussnahme auf den Prozess statt [YUA2018]. Der Prozess wird hinsichtlich der Prozesskräfte anhand von definierten Grenzkraften optimiert. Dadurch können weniger konservative Prozessparameter genutzt werden, wodurch die Produktivität steigt [YUA2018].

Aktive Ratterabsorption kann durch aktive Dämpfungssysteme erfolgen, die an die Roboterstruktur angebracht werden. Diese reagieren je nach detektierter Beschleunigung aktiv auf diese und antworten mit Schwingungen, die dämpfend wirken [YUA2018].

Passive Ansätze hingegen zielen darauf ab, das Robotersystem so zu ändern, dass die Steifigkeit erhöht und somit das Prozessverhalten optimiert wird [YUA2018]. Beispiele hierfür sind die Maximierung der Steifigkeit des Robotersystems, die Optimierung des Prozessverhaltens und die passive Ratterabsorption.

Die Maximierung der Steifigkeit des Robotersystems kann durch Änderungen der Struktur, des Designs oder dem Anbringen von weiteren Komponenten erfolgen. Hierdurch kann mehr Energie aus dem Rattereffekt absorbiert werden [YUA2018].

Die Optimierung des Prozessverhaltens findet über die Auswahl geeigneter Prozessparameter statt, wie Bearbeitungsrichtung, eingesetzte Werkzeuge und Schnittparameter. Dies verändert die Amplitude der auftretenden Prozesskräfte sowie deren Richtung, mit denen sie am Robotersystem angreifen [YUA2018]. Beispielsweise hat die Geometrie des Fräasers großen Einfluss auf die Fräskraft und die Aufteilung in Vorschubnormalkraft und Vorschubkraft [YUA2018]. Auch der Bearbeitungsort und die Positionierung ändern das dynamische Verhalten des Roboters im Prozess aufgrund der Poseabhängigkeit der Steifigkeit des Robotersystems [LI2017b]. Passive Unterdrückung und Absorption der Ratterenergie kann durch Änderungen der Systemstruktur erfolgen, beispielsweise durch passive Schwingungsdämpfungssysteme, die am Roboter angebracht werden [YUA2018]. KALDESTAD zeigt, dass schon durch das Anbringen eines Sandsacks an der Spindel des Robotersystems als passiven Dämpfer die Schwingungen des Robotersystems reduziert werden können [KAL2015].

Eine weitere Möglichkeit der Vorhersage des dynamischen Verhaltens des Industrieroboters ist die Anwendung der Conservative-Congruence-Transformation (CCT). Sie dient dazu, Rattern aufgrund von Lagekopplung vorherzusagen. Hierbei wird die in (2.2) eingeführte Formulierung für das Steifigkeitsmodell um einen weiteren Steifigkeitsterm \mathbf{K}_c erweitert. \mathbf{K}_c berücksichtigt die Effekte der Prozesskräfte und die daraus folgende elastische Verformung der Roboterstruktur [CEN2017a].

$$\mathbf{J}^T \mathbf{K}_K \mathbf{J} = \mathbf{K}_\theta - \mathbf{K}_c \quad (2.3)$$

\mathbf{K}_c ist hierbei eine Funktion der Geometrie und der anliegenden externen Kräfte [CHE2000]. Durch Maximierung des Terms \mathbf{K}_c kann der Kraftangriffswinkel bestimmt

werden, bei dem die Steifigkeit des Systems am höchsten ist und dementsprechend das Bearbeitungssetup angepasst werden [CEN2017a].

Zusammenfassend zeigt sich ein deutlicher Unterschied im dynamischen Verhalten von Robotern im Vergleich zum dynamischen Verhalten von Werkzeugmaschinen. Durch die tiefere Lage der ersten Eigenfrequenzen der Roboterstruktur tritt vor allem bei vergleichsweise niedrigen Schnittgeschwindigkeiten und Spindeldrehzahlen Rattern aufgrund von Lagekopplung auf. Das dynamische Verhalten des Industrieroboters ist allgemein abhängig von der Pose, der Lage im Arbeitsraum und der Roboterstruktur selbst [BUS2022]. Die Vorhersage des Auftretens von Instabilitäten im roboterbasierten Zerspanprozess ist sehr komplex und etablierte Modellierungsansätze aus dem Werkzeugmaschinenbereich sind nicht ausreichend und daher nur schwer übertragbar. Die Eigenmoden des Robotersystems und das dynamische Verhalten des Roboters sind ebenfalls sehr komplex und kaum vergleichbar mit dem dynamischen Verhalten von Werkzeugmaschinen. Die Untersuchungen des dynamischen Verhaltens sind sehr komplex und aufwendig und müssen roboterindividuell durchgeführt werden. Aktuell gibt es keine Methode, die das dynamische Verhalten des Roboters über den gesamten Arbeitsraum hinsichtlich regenerativem Rattern und Lagekopplung beschreibt [HUY2020].

2.2 Hybrid-additive Fertigungsketten und Besonderheiten der Zerspanung additiv gefertigter Bauteile

Unter der hybriden Fertigung wird grundlegend die Kombination von Maschinen bzw. Prozessen verstanden mit dem Ziel, beim hybriden Prozess die Einzelvorteile der Einzelprozesse mehr als zu verdoppeln [LAU2014]. Hybride Technologien ermöglichen neue Bearbeitungsmöglichkeiten von Materialien, erweitern die Designfreiheit bei der Konstruktion von Bauteilen und senken die Produktionskosten. Die kollaborative CIRP-Arbeitsgruppe zum Thema hybride Prozesse definiert hybride Fertigungsverfahren als gleichzeitiges und kontrolliertes Zusammenwirken von Prozessmechanismen und/oder Energiequellen/Werkzeugen, die einen erheblichen Einfluss auf die Prozessleistung haben. Dies beinhaltet, dass die Prozesse beziehungsweise Energiequellen mehr oder weniger gleichzeitig in der gleichen Prozesszone interagieren [LAU2014].

Ursprünglich bezog sich der Begriff nur auf subtraktive Verfahren, der Begriff entwickelte sich jedoch weiter, sodass auch weitere traditionelle Fertigungsverfahren einbezogen wurden [PRA2021]. In den letzten Jahren wurden weitere Prozessrouten definiert, sodass der Begriff hybride Fertigung mittlerweile weiter verstanden wird, als von LAUWERS definiert [PRA2021].

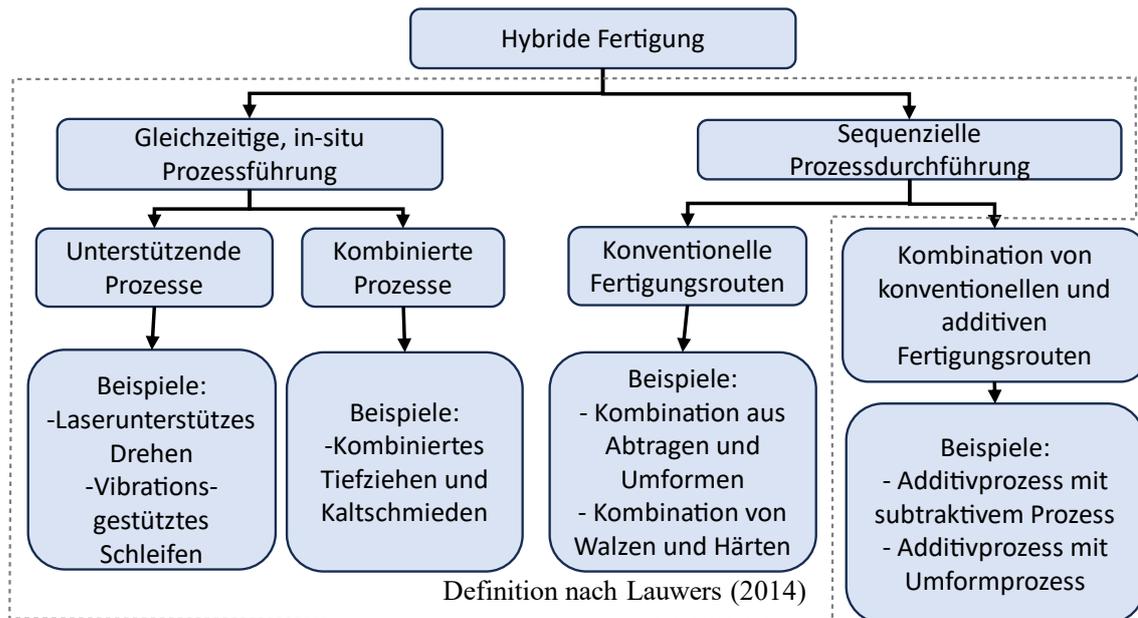


Abbildung 2.10: Definition des Begriffs Hybride Fertigung und Erweiterung um die Kombination von konventionellen und additiven Verfahren nach [PRA2021].

PRAGANA erweitert die Definition von LAUWERS um die Gruppe der kombinierten traditionellen und additiven Fertigungsrouen, unter die auch metallische Additivprozesse kombiniert mit subtraktiven Prozessen fallen, wie in Abbildung 2.10 dargestellt [PRA2021; LAU2014]. Diese Kombination wird dort als hybrid-additive Fertigung bezeichnet. Laut SEALY wird unter hybrid-additive Fertigung die Kombination von additiven Prozessen mit mindestens einem weiteren Prozess oder Energiequelle verstanden [SEA2018]. Ziel der hybrid-additiven Fertigung ist es, die Funktionalität und/oder die Qualität der Bauteile und/oder Prozesse zu beeinflussen. Bei der hybrid-additiven Fertigung entfällt die Gleichzeitigkeit der Prozesse, die verschiedenen Prozesse können also zu einer Fertigungskette kombiniert werden, was zur hybrid-additiven Fertigungskette führt [PRA2021]. Aktuelle hybrid-additive Fertigungskonzepte kombinieren meist Additivprozesse aus dem DED-Bereich mit spanenden Prozessen. Im Folgenden wird das in dieser Arbeit angewendete Additivverfahren vorgestellt.

2.2.1 Directed Energy Deposition Prozesse für die hybrid-additive Fertigungskette

Verfahren aus dem Bereich Directed Energy Deposition (DED) ermöglichen die Erzeugung von Bauteilen durch Aufschmelzen von Material während des Auftrags [GIB2015].

Beim DED-Prozess handelt es sich um einen Prozess, bei dem fokussiert thermische Energie dazu genutzt wird, um Werkstoffe aufzuschmelzen und miteinander während der Abscheidung zu verbinden. Grundsätzlich lassen sich diese additiven Verfahren nach der Energiequelle oder nach der Art des Ausgangsmaterial unterscheiden [LI2017a].

Als Ausgangsmaterial kann Pulver oder Draht zum Einsatz kommen, als Energiequellen werden Laser, Elektronenstrahl oder Lichtbogen eingesetzt, siehe Abbildung 2.11 [DAS2019].

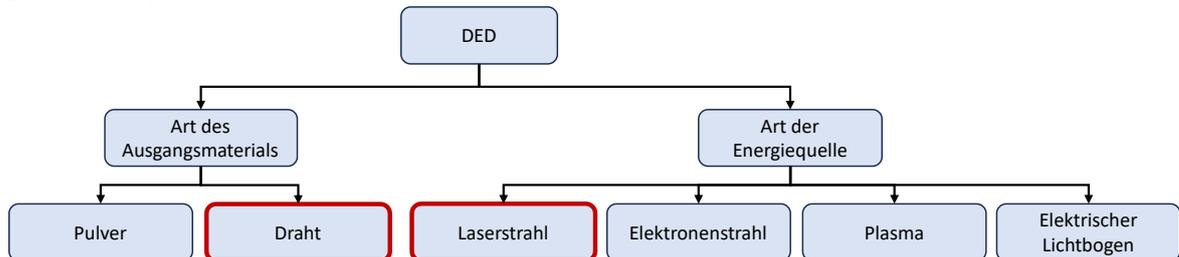


Abbildung 2.11: Einteilung der DED-Verfahren nach Material und Energiequelle nach [DAS2019]. Markiert sind die in dieser Arbeit verwendete Materialart und Energiequelle.

Das in dieser Arbeit verwendete Verfahren ist das Laserdrahtauftragschweißen. Bei diesem Prozess wird ein Draht mittels eines Lasers aufgeschmolzen und so das dreidimensionale Bauteil aufgebaut, wie schematisch in Abbildung 2.12 dargestellt [WOH2021].

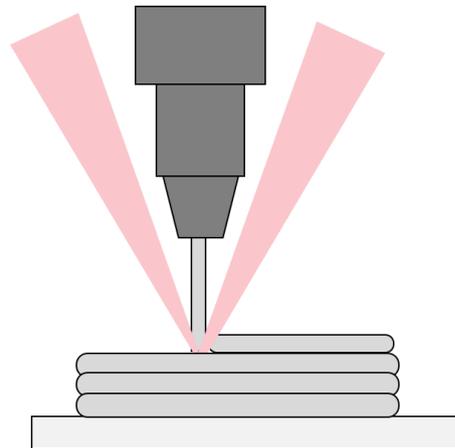


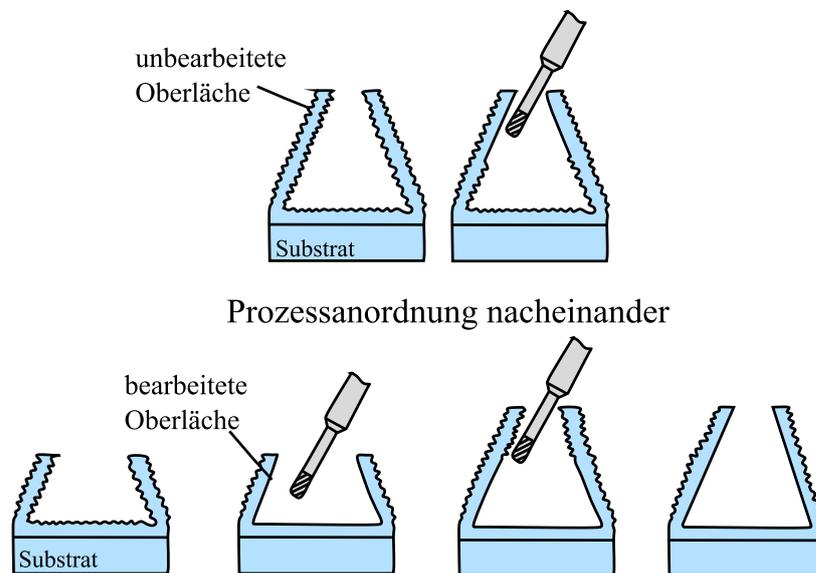
Abbildung 2.12: Schematische Darstellung des DED-Prozesses.

Hierbei wird Draht über einen Drahtförderer der Wärmequelle, in diesem Fall ein Laser, zugeführt und unter Schutzgas aufgeschmolzen [GIB2015]. Das Material scheidet sich in Abscheidungsraupen auf dem Substrat ab und durch die Vorschubbewegung der Düse wird ein linienförmiger bzw. flächiger Auftrag erzeugt [GIB2015]. Die Abkühlraten des Prozesses sind deutlich höher als die konventioneller Gießprozesse, sodass sich die Materialeigenschaften additiv gefertigter Bauteile von denen konventionell hergestellter Bauteile unterscheiden [GIB2015]. Während des Aufbauprozesses erfährt das Material eine Vielzahl an Aufheiz- und Abkühlzyklen mit hohen Temperaturgradienten. Dadurch entsteht eine inhomogene Mikrostruktur und über das Bauteil verteilte inhomogene Bauteileigenschaften [KAL2019].

Der Vorteil des DED-Prozesses liegt in den vergleichsweise hohen Auftragsraten, die mit 0,5 kg/h bis zu 3 kg/h deutlich höher sind als bei anderen additiven Verfahren, der flexiblen Materialkombination und flexiblen Werkstoffzusammensetzung während des Bauprozesses sowie der, je nach Prozesskopf, gegebenen Richtungsunabhängigkeit des Prozesses [WOH2021].

Die Anwendungsfelder des Laserdrahtauftragschweißens liegen zum einen im Materialauftrag auf schon bestehende Bauteile, wie Reparaturprozesse oder dem Hinzufügen von Features und Merkmalen, sowie dem additiven Aufbau von kompletten Bauteilen [WOH2021]. Typische Anwendungen liegen im Automobilbereich, beispielsweise in der Qualitätsschleife der Presswerkzeuge oder in der Luft- und Raumfahrt. Häufig verwendete Materialien sind daher Titan, Inconel oder rostfreier Stahl. Mittels DED hergestellte Bauteile benötigen in der Regel eine Nachbearbeitung, um die vorgegebene Form oder Funktion zu erhalten [GIB2015]. Die Oberflächengüte und geometrische Genauigkeit der additiv gefertigten Bauteile ist für die meisten Anwendungen nicht ausreichend. Die inhomogene Oberfläche und die inhomogenen Bauteileigenschaften erfordern daher eine subtraktive Nachbearbeitung, woraus sich die Notwendigkeit der hybrid-additiven Prozesskette ergibt [WEI2019].

Subtraktive Prozesse in der metallischen hybrid-additiven Fertigung lassen sich in zwei Anwendungen unterteilen. In der ersten Gruppe dient der subtraktive Prozess zur Nachbearbeitung der additiv gefertigten Bauteile, um die geforderte geometrische Bauteilqualität und Oberflächenqualität zu erreichen [PRA2021]. In der zweiten Gruppe wird der subtraktive Prozess in den additiven Prozess integriert, sodass Bauteile mit innenliegenden Features hergestellt werden können, die durch herkömmliche Prozesse nicht fertigbar sind. Ein Beispiel hierfür sind innenliegende Funktionsflächen in Bauteilen, die von außen nicht durch Werkzeuge erreicht werden können, wie Abbildung 2.13 zeigt [PRA2021].



Flexible Prozessfolge in der hybriden Fertigung

Abbildung 2.13: Bearbeitung innenliegender Bauteilflächen angelehnt an [PRA2021].

Der häufigste verwendete subtraktive Prozess zur Nachbearbeitung mittels DED gefertigter Bauteile ist das Fräsen [FLY2016]. Fräsen wird angewendet, da hohe Oberflächengüten erzielt und im Vergleich zu anderen subtraktiven Verfahren hohe Abtragsraten ermöglicht werden [LAL2022].

Wird die hybrid-additive Prozesskette in einer Roboterzelle umgesetzt, können die Prozesse flexibel miteinander in einem großen Arbeitsraum verkettet werden.

2.2.2 Roboterbasierte hybrid-additive Prozesskette

Die Kombination der additiven und subtraktiven Prozesse in einer Roboterzelle ermöglicht die Ausnutzung der Vorteile von Industrierobotern. Die Kombination von hoher Flexibilität hinsichtlich abbildbarer Prozesse durch Endeffektortausch, die hohe Flexibilität der Bearbeitungsorientierung und der große Arbeitsraum des Industrieroboters ermöglichen eine effiziente und ökonomisch sinnvolle Kombination der beiden Prozesse [VER2019]. Die Kombination der Endeffektoren Laserdrahtauftragschweißkopf und Frässpindel in einer Roboterzelle ermöglicht die Ausführung verschiedenster Prozesse und flexible Prozesskombinationen.

Durch die Prozesskombinationen von verschiedenen Additivverfahren, wie DED oder Reibauftragschweißen, mit verschiedenen subtraktiven Verfahren, wie Fräsen, Bohren und Entgraten können endkonturnahe Bauteile flexibel produziert werden [BAI2019b]. Dadurch lassen sich beispielsweise in der Qualitätsschleife von Presswerkzeugen in der Automobilindustrie ressourcenintensive Transport- und Bearbeitungsprozesse einsparen [ABE2018].

Bei der Zerspanung von additiv gefertigten Bauteilen ist das Zerspanvolumen im Vergleich zum Fräsen aus dem Vollen deutlich geringer, da Material durch den Additivprozess endkonturnah aufgebaut wird [TEP2023a]. Aus diesem Grund sind weniger Schnittvorgänge notwendig und die Werkzeugbelastung ist geringer als bei der Zerspanung von Vollmaterial [BAI2021].

Zudem sind die additiv gefertigten Bauteile tendenziell funktionsorientiert designet, sodass eine höhere Flexibilität während des Zerspanvorgangs benötigt wird [WOH2021]. Für das Laserdrahtauftragschweißen in der Roboterzelle eignen sich besonders Werkstoffe, die in einer Atmosphäre mit Sauerstoffanteil gut schweißbar sind, wie nichtrostender Stahl oder Inconel, da das Ausführen des Prozesses in Vakuum oder einer Inertgaskammer sehr aufwendig und kostenintensiv ist [IAN2021].

Diese Materialien zählen zu den schwer zerspanbaren Materialien, deren Zerspanvorgänge mit höheren Zerspankräften einhergehen. Laus ABBASI stellen sich bei der Zerspanung von mit Laserdrahtauftragschweißen hergestellten Bauteilen höhere Zerspankräfte ein, aufgrund der von konventionell hergestellten Bauteilen abweichenden Mikrostruktur [ABB2016].

Zudem zeichnet sich die Zerspanung von mit Laserdrahtauftragschweißen hergestellten Bauteilen durch Schwankungen in der Belastung der Roboterstruktur aus. Dies ist laut ABBASI ein Resultat aus der inhomogenen Mikrostruktur der Bauteile und den inhomogenen Oberflächen [ABB2016].

Diese Eigenschaften der additiv hergestellten Bauteile führen zu einer Verschiebung des TCPs aufgrund der statischen Nachgiebigkeit des Industrieroboters und zu einer dynamischen Anregung der Roboterstruktur [TEP2023b].

2.3 Folgerungen aus dem Stand der Technik

Zusammenfassend avancierte die roboterbasierte Bearbeitung in den letzten Jahren von einem reinen Forschungsgebiet zu einer weitverbreiteten Industrietechnologie, insbesondere im Kontext subtraktiver Verfahren wie Polieren, Entgraten und Bohren. [BAI2019b].

Durch die geringen Investitionskosten bei gleichzeitig hoher Flexibilität werden die Einsatzgebiete immer vielfältiger. Besonders in Kombination mit der additiven Fertigung werden die Vorteile roboterbasierte Zerspanung hinsichtlich Flexibilität und Arbeitsraum ausgespielt. Durch die geringe Materialabnahme der endkonturnah aufgebauten Additivbauteile, müssen nur wenige Millimeter Material abgenommen werden [BAI2021].

Trotz dieser Fortschritte gibt es einige Herausforderungen. Die aktuell erreichbaren Genauigkeiten von marktgängigen Industrierobotern sind nicht mit konventionellen Werkzeugmaschinen vergleichbar, sie sind deutlich geringer [HÄH2020b]. Zudem ist das Verhalten des Industrieroboters poseabhängig und abhängig von der Bearbeitungsposition im Arbeitsraum [GUO2015].

Bei der Bearbeitung von mittels Laserdrahtauftragschweißen hergestellten Bauteilen ist aufgrund der höheren Zerspankräfte die statische Steifigkeit des Roboters wichtig für die Genauigkeit. Daneben muss auch die dynamische Anregung der Roboterstruktur durch die unsteady Zerspanzustände bei der Bearbeitung beachtet werden.

Ansätze zur Verbesserung der statischen und dynamischen Genauigkeit des Industrieroboters werden seit ca. 30 Jahren untersucht. Hierbei wurden Modelle und Methodiken entwickelt, die Grundlage für Kompensationen und Bahnoptimierungen sind, jedoch Schwächen in der Aufstellung und Umsetzung aufweisen. So ist die Identifikation der Steifigkeiten der Roboterstruktur aufwendig und muss für jeden Roboter neu durchgeführt werden, da sich die Steifigkeiten je nach Komponenten und Einsatzumgebung ändern können, auch bei gleichbleibenden Robotertypen. Auch die dynamische Modellierung ist sehr aufwendig in der Umsetzung und viele messtechnische Untersuchungen sind notwendig. Die aufgestellten Modelle sind oftmals nicht hinreichend in ihrer Genauigkeit [BUS2022]. Zudem sind die Modellierungen nicht übertragbar und gelten nur für einen kleinen Arbeitsbereich im Arbeitsraum des Roboters. Daher ist der industrielle Einsatz aktuell nur begrenzt umgesetzt.

Die Komplexität der Ansätze und damit einhergehend die Kosten zur Steigerung der Genauigkeit in der roboterbasierten Zerspanung sind sehr hoch im Vergleich zu den zu erwartenden Ergebnissen und es mangelt an simplen, kostengünstigen Methoden zur Genauigkeitsverbesserung.

Laut GUO ist das Verhalten der Roboterstruktur abhängig vom Kraftangriff auf die Gelenke, weshalb eine Änderung der Orientierung einer Pose unter Beibehaltung der kartesischen Position die Steifigkeit erhöhen kann [GUO2015]. Die stellt einen einfachen Ansatz zur Verbesserung der Arbeitsgenauigkeit dar.

Insgesamt bedarf es innovativer Ansätze, um diese Herausforderungen anzugehen und die Genauigkeit und Stabilität der roboterbasierten Zerspanung mit einfachen und kostengünstigen Methoden zu erhöhen.

3 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE

Im Folgenden wird die Problemstellung hinsichtlich der roboterbasierten, spanenden Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile präzisiert und die Zielsetzung dieser Arbeit erläutert.

3.1 Problemstellung

Die fortschreitende Integration additiver Fertigungsverfahren in industrielle Produktionsprozesse eröffnet neue Möglichkeiten hinsichtlich Ressourceneffizienz, Materialvariation und Design.

Jedoch bringen insbesondere roboterbasierte hybrid-additive Fertigungsketten mit DED-Prozess spezifische Herausforderungen mit sich. Bei mittels DED gefertigten Bauteilen treten unstete Oberflächen in Form von Oberflächenwelligkeiten auf. Daher ist ein Nachbearbeitungsprozess unumgänglich. Um diese Nachbearbeitung möglichst flexibel zu gestalten und potenzielle Fehler durch mehrmaliges Aufspannen und Einmessen der Bauteile zu verhindern, ist es vorteilhaft die Bearbeitung in einer Aufspannung durchzuführen. Eine vielversprechende Option ist die Umsetzung der hybriden Prozesskette in einer Roboterzelle, die nicht nur den Wechsel zwischen den verschiedenen Prozessen effizient und kostengünstig gestaltet, sondern auch das Umspannen der Bauteile eliminiert. Allerdings stellt die erhöhte Nachgiebigkeit von Robotern eine Reihe von Herausforderungen dar, insbesondere im Kontext von additiv gefertigten Bauteilen mit einem endkonturnahen Aufbau.

Die Zerspanung additiv gefertigter Bauteile geht mit größeren Herausforderungen einher als konventionell gefertigte Bauteile. Zum einen durch die unstete Oberflächenstruktur, zum anderen durch die unstete Mikrostruktur. Daher wird angenommen, dass additiv gefertigte Bauteile in der Bearbeitung zu höheren Fräskräften führen als konventionell gefertigte Bauteile und mehr Instabilitäten während der Zerspanung auftreten. Bei der roboterbasierten Bearbeitung erschweren diese erhöhten dynamische Anteile in den Fräskräfte das Aufrechterhalten eines stabilen Zerspanungsprozesses, da die Steifigkeit der Roboterstruktur deutlich niedriger ist im Vergleich zur Werkzeugmaschine.

Durch den endkonturnahen Aufbau der Bauteile ist nur wenig Material abzunehmen, weshalb Störungen wie Werkzeugverschleiß oder -bruch im Prozess schnell zu Schäden an der Soll-Geometrie führen. Angesichts der bereits hohen Produktionskosten der Bauteile vor dem Nachbearbeitungsschritt stellt jede Schädigung des Bauteils in diesem Prozessschritt einen maßgeblichen Kostenfaktor dar.

Für bisherige Nachgiebigkeitskompensationen wird meist eine Simulation der Fräskräfte oder teure Sensortechnik benötigt, um prozessparallel die Kompensation durchzuführen, wie in Kapitel 2 beschrieben. Für additiv gefertigte Bauteile ist keine Simulation der Fräskräfte bekannt.

Zudem wird häufig nur statische Steifigkeit betrachtet und diese durch Veränderung der kartesischen Positionen kompensiert. Jedoch ist auch das dynamische Verhalten wichtig,

da hier die Gefahr von Rattermarken und im Extremfall Werkzeugbruch besteht. Dies gefährdet die Qualität der additiv gefertigten Bauteile deutlich mehr, da hier die Soll-Geometrie verletzt werden kann. Bisherige dynamische Untersuchungen sind von aufwendigen Experimenten, komplexen und kaum übertragbaren Modellen geprägt, die jedoch wenig Rückschlüsse auf die Zerspanung additiv gefertigter Bauteile mittels Industrieroboter zulassen.

Zur Vorhersage des statischen und dynamischen Verhaltens der Roboterstruktur werden oftmals Steifigkeitsmodelle oder dynamische Modelle aufgestellt. Diese Erstellung ist jedoch sehr komplex, kostenintensiv und die Aussagekraft dieser Modelle oft begrenzt. Zudem lassen sich diese meist nicht auf andere Roboter übertragen.

Eine Änderung des Kraftangriffs auf die Gelenke der Roboterstruktur durch Umorientierung des TCPs unter Beibehaltung der kartesischen Position stellt eine vielversprechende und gleichzeitig kostengünstige Möglichkeit der Stabilisierung und Genauigkeitssteigerung des Roboterhaltens dar.

Daher soll in dieser Arbeit das Verhalten des Industrieroboters unter Änderung der Orientierung des TCPs bei der Zerspanung additiv gefertigter Bauteile untersucht werden.

3.2 Zielsetzung und wissenschaftliches Vorgehen

Ziel dieser Arbeit ist, die Erhöhung der Bearbeitungsqualität bei der Zerspanung von additiv gefertigten Bauteilen mit Industrierobotern. Dies soll über die Identifikation von stabileren Posen erfolgen. Diese Methode soll gleichzeitig kostengünstig und einfach zu implementieren sein.

Die Rahmenbedingungen hierfür sind, dass die Bauteile im Arbeitsraum ihre Position nach dem additiven Aufbau nicht verändern und je nach Anwendungsfall die Position der Bauteile festgelegt ist. Teure, den Roboter versteifende Maßnahmen und Umbauten sollten vermieden werden, um den Hauptvorteil der kostengünstigen Fertigung mit Robotern vollständig ausnutzen zu können.

Eine Möglichkeit diese Randbedingungen zu erfüllen, ist die Umorientierung des TCPs um die Werkzeugachse unter Beibehaltung der kartesischen Position und der Werkzeug-Werkstückorientierung, wie in Abbildung 3.1 dargestellt.

Die zentrale Hypothese dieser Arbeit ist, dass durch Optimierung der Orientierung des TCPs unter Beibehaltung der kartesischen Position eine Verbesserung der Arbeitsgenauigkeit des Robotersystems bei der Zerspanung additiv gefertigter Bauteile erzielt werden kann. Zum einen kann so die Verschiebung des TCPs unter Last verringert und zum anderen die Stabilität des dynamischen Verhaltens der Roboterstruktur erhöht werden.

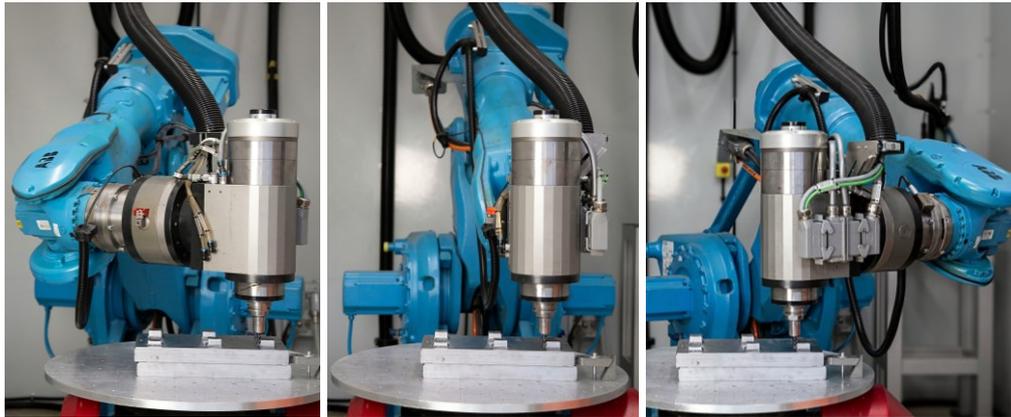


Abbildung 3.1: Darstellung der Umorientierung des TCPs unter Beibehaltung der Werkzeug-Werkstückorientierung.

Daher soll in dieser Arbeit der Einfluss der Umorientierung des Endeffektors um die Werkzeugachse, die gleichzeitig auch die Z-Achse des TCPs darstellt untersucht werden. Hierfür lassen sich folgende fünf Forschungsfragen (FF) ableiten:

FF1: Inwiefern unterscheiden sich die Prozessgrößen, insbesondere die Prozesskraft, bei der roboterbasierten Zerspanung von additiv gefertigten Bauteilen im Vergleich zu konventionell hergestellten Bauteilen?

FF2: Hat die Umorientierung des TCPs um die Z-Achse unter Beibehaltung der kartesischen Positionen im Fräsprozess Einfluss auf die dynamische Stabilität des Prozesses?

FF3: Kann die Erstellung eines Steifigkeitsmodells über die Änderung der Posen unter Beibehaltung der kartesischen Position aufwandsarm durchgeführt werden?

FF4: Kann auf Grundlage des Steifigkeitsmodells mittels Optimierung eine stabilere Pose hinsichtlich der Umorientierung identifiziert werden?

FF5: Führt die Umorientierung des Endeffektors unter Beibehaltung der Werkzeug-Werkstückkonstellation und der kartesischen Positionen zur Erhöhung der aus dem Fräsprozess resultierenden Bauteilqualität?

Zur Beantwortung der aufgestellten Forschungsfragen wird das in Abbildung 3.2 dargestellte Vorgehen verfolgt.

Zunächst wird in Kapitel 4.1 die verwendete Infrastruktur beschrieben, bevor die additiv gefertigten Bauteile in Kapitel 4.2 charakterisiert und ihr Einfluss auf den Zerspanprozess untersucht wird.

Hierbei werden zum einen die Eigenschaften von additiv gefertigten Bauteilen analysiert und anschließend in Zerspanversuchen die gemessenen Prozessgrößen denen konventionell hergestellten Bauteilen gegenübergestellt. Dies dient der Beantwortung der FF1, bei der die Annahme der erhöhten Prozesskräfte und Schwankungen der Prozesskräfte bei der spanenden Bearbeitung additiv gefertigter Bauteile untersucht wird.

In dieser Arbeit wird sich auf das dynamische und statische Verhalten der Roboterstruktur konzentriert. Daher wird in Kapitel 5 der Einfluss der Umorientierung des TCPs auf das dynamische Verhalten der Roboterstruktur im Zerspanprozess untersucht.

Daran anschließend wird in Kapitel 6 mittels der erweiterten Vorwärtskinematik und der Methode des optimalen Versuchsaufbaus das Steifigkeitsmodell der verwendeten Roboterkinematik aufgestellt. Hierbei liegt der Fokus darauf über die Umorientierung des TCPs den Informationsgehalt je Experiment zu erhöhen, sodass die Gesamtanzahl an durchgeführten Experimenten verringert wird.

In Kapitel 7 wird auf Grundlage des entwickelten Steifigkeitsmodells ein Optimierungsmodell aufgebaut, mit dem die Orientierung identifiziert werden soll, bei der die geringste Verschiebung des TCPs vorliegt.

Danach werden auf Grundlage der Erkenntnisse aus Kapitel 6 und 7 Validierungsversuche durchgeführt. Ziel dieser Zerspanversuche an additiv gefertigten Bauteilen ist es, die Erkenntnisse aus den dynamischen Untersuchungen sowie die optimierten Orientierungen der klassischen CAM-Bahnplanung gegenüberzustellen. Zudem wird hier untersucht, inwiefern die optimierten Orientierungen in die Bahnplanung implementiert werden können.

Abschließend werden in Kapitel 9 Folgerungen für die Praxis abgeleitet, bevor in Kapitel 10 die Arbeit zusammengefasst wird und ein abschließendes Fazit gezogen wird.

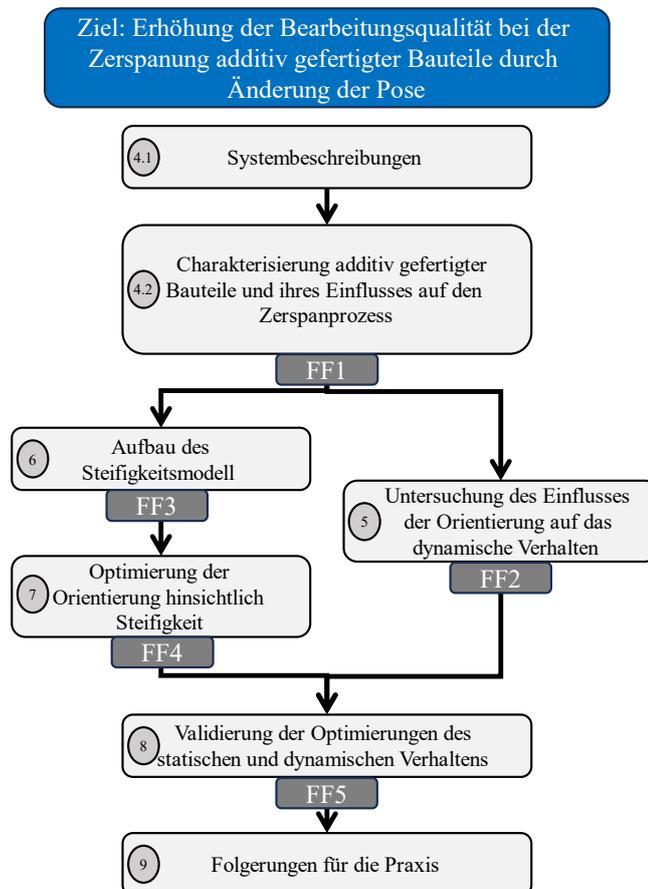


Abbildung 3.2: Gliederung und Kapitelstruktur der vorliegenden Arbeit.

4 SYSTEMBESCHREIBUNG UND ENTWICKLUNGSRAHMEN

Im folgenden Kapitel werden die in dieser Arbeit verwendeten Systeme und die Versuchsumgebung, mit Roboterzelle, Werkstoffen und Messverfahren vorgestellt. Zudem wird auf die erste Forschungsfrage nach der Zerspanbarkeit der additiv gefertigten Bauteile eingegangen.

4.1 Versuchsumgebung

Die Versuchsumgebung wird vorrangig durch die genutzte Roboterzelle beschrieben, in der sowohl der additive Aufbau der Bauteile mittels DED, als auch die Zerspanversuche durchgeführt werden. Daneben werden im Folgenden die verwendeten Werkstoffe und Werkzeuge vorgestellt.

4.1.1 Roboterzelle

Untersuchungsraum dieser Arbeit stellt die Roboterzelle *RobMaxxP* dar, die sowohl additive als auch subtraktive Prozesse ausführen kann. Die Bestandteile und Komponenten dieser Zelle lassen sich in drei Einheiten unterteilen, Komponenten für den Laserdrahtauftragschweißprozess, Komponenten für die Zerspanung und allgemeine Komponenten zum Betreiben des Roboters und der Bestandteile der Zelle.

Hauptbestandteil dieser Roboterzelle ist ein Schwerlastroboter vom Typ *ABB IRB 6660 205/1.9* mit einer *IRC 5* Steuerung. Bei diesem Industrieroboter handelt es sich um einen sechs-Achs-Vertikalknickarmroboter mit rotatorischen Achsen, der über eine Parallelkinematik verfügt, siehe Abbildung 4.1. Dies verleiht dem Roboter eine höhere Steifigkeit, schränkt jedoch gleichzeitig den Arbeitsraum ein.

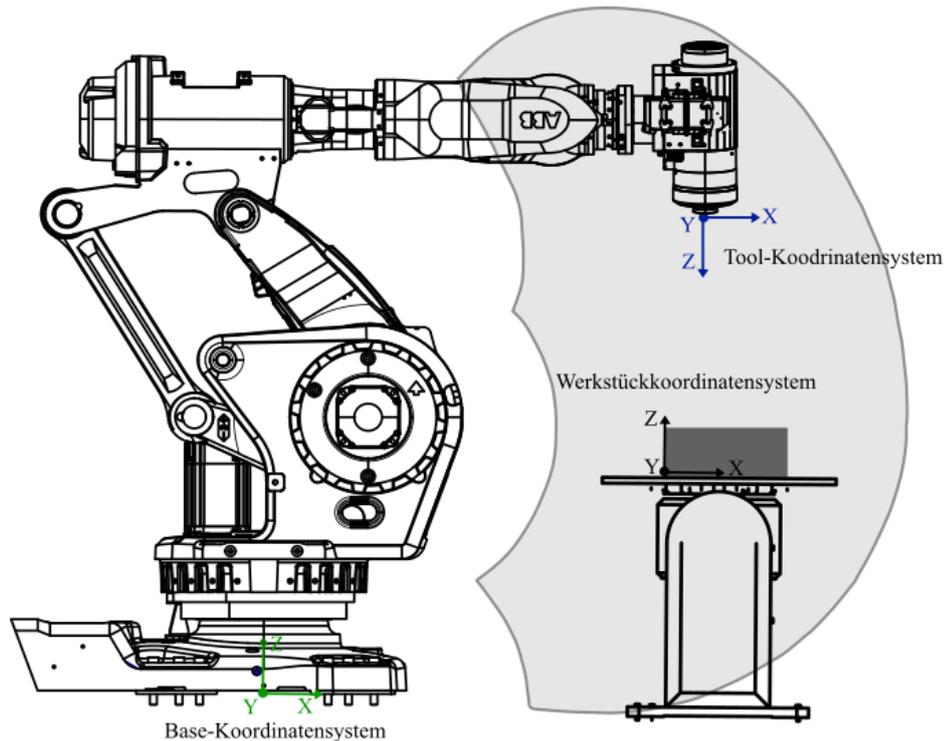


Abbildung 4.1: Roboter ABB 6660 205/1.9 mit wichtigsten Koordinatensystemen angelehnt an [ABB2023].

Laut den Herstellerdaten verfügt der Industrieroboter über eine Positionswiederholgenauigkeit von 0,07 mm und über eine Bahnwiederholgenauigkeit von 0,61 mm [ABB2017].

Die Roboterzelle beinhaltet ein Wechselsystem, sodass der Endeffektor des Industrieroboters ausgetauscht werden kann. Als Endeffektoren stehen eine Fräs- und Bohrspindel und ein Auftragschweißkopf zur Verfügung, wodurch additive und subtraktive Prozesse nacheinander durchgeführt und die hybrid-additiv Prozesskette abgebildet werden kann.

Zur Abbildung des drahtbasierten DED-Prozesses verfügt die Zelle über die Bearbeitungsoptik *CoaxWire* des *Fraunhoferinstituts IWS*. Mit einer Leistung von bis zu 4 kW des Diodenlasers *LDL 4000-30VGP* der Firma *Laserline* können Metalldrähte mit einem Durchmesser von 0,8 mm bis 1,8 mm verarbeitet werden. Die Drahtzufuhr erfolgt über das Drahtfördersystem *DIX FDE-100L* der Firma *Dinse*. Um die Oxidationserscheinungen während des Prozesses zu verringern, wird Schutzgas in Form von Argon in die Prozesszone eingeströmt. Zudem ist ein Kühler verbaut, der den Lasererzeuger extern zusätzlich kühlt.

Der subtraktive Prozess wird über eine Fräs- und Bohrspindel der Firma *Diebold* abgebildet, die über eine Leistung von 15,5 kW und Maximaldrehzahl von 18000 U/min verfügt [DIE2008]. Die Werkzeuge können hier automatisch eingewechselt werden. Zum Einmessen der Länge der Werkzeuge und somit der Lage des TCPs ist zudem die Lasermessbrücke *LC 50* der Firma *Blum* verbaut.

Als Arbeitstisch ist ein Dreh- und Schwenktisch implementiert, der über zwei Achsen verfügt. Die Arbeitsfläche hat einen Durchmesser von 400 mm.

Zwischen Endeffektor und der Roboterstruktur ist zusätzlich der Kraft-Momenten-Sensor *Omega 160 IP65* der Firma *AIT Industrial Automation* angebracht. Über Dehnungsmessstreifen werden hier die an der Spindel angreifenden Kräfte und Momente aufgenommen. Diese Daten werden mit einer Abtastrate von 1984 Hz abgetastet, die Weitergabe der Daten erfolgt jedoch im Interpolationstakt der Robotersteuerung. Daneben verfügt die Zelle über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), über die alle Vorgänge geschaltet werden. Umgeben ist die Zelle von einer lasersicheren Außenhülle. Die Zelle ohne Außenhülle ist schematisch in Abbildung 4.2 dargestellt.

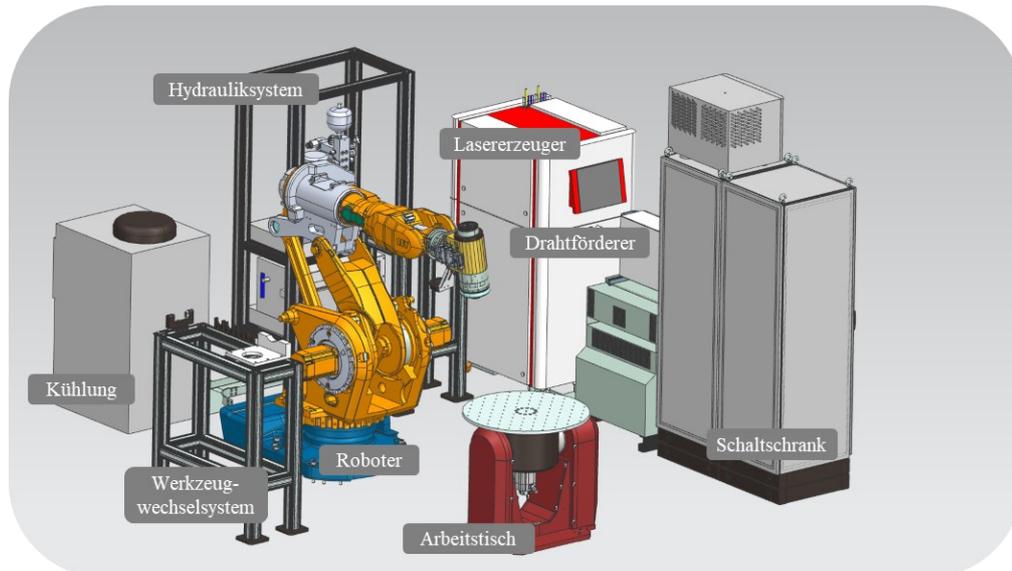


Abbildung 4.2: Roboterzelle mit Komponenten. Nicht dargestellt ist die lasersichere Außenhülle der Zelle.

4.1.2 Werkzeuge und Bahnplanungssoftware

Als Werkzeuge für den subtraktiven Prozess werden in dieser Arbeit vierschneidige Schaftfräser verwendet, bei denen es sich um Vollhartmetallwerkzeuge handelt, wie in Abbildung 4.3 dargestellt. Die Werkzeuge der Firma Gühring haben einen Durchmesser von 12 mm, einen Schneidenradius von 2 mm und verfügen über eine Titan-Aluminium-Nitrid Beschichtung [GÜH2023]. Sie sind zur Bearbeitung von rostfreien Stählen und für Schrappvorgänge ausgelegt, weshalb sie in dieser Arbeit für die Nachbearbeitung der additiv gefertigten Bauteile eingesetzt werden.

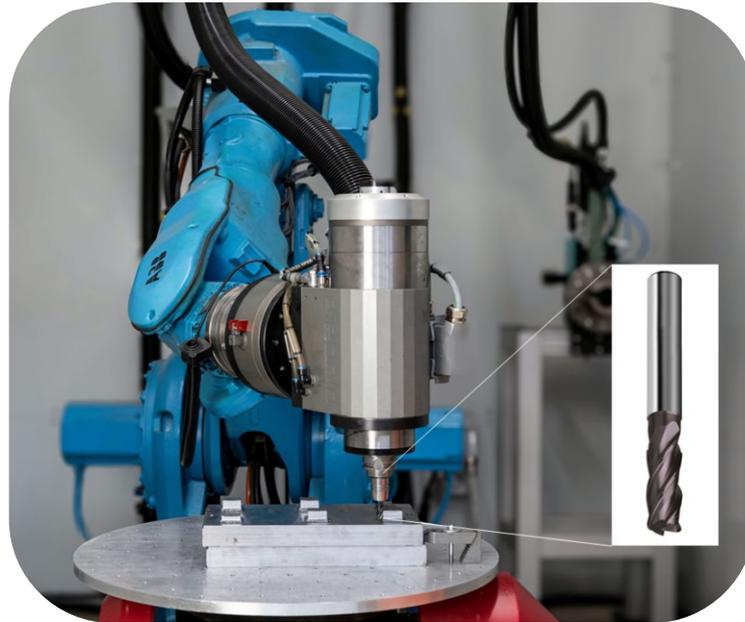


Abbildung 4.3: In dieser Arbeit verwendetes Schaftwerkzeug nach [GÜH].

Zur Bahnplanung wird das CAM-Programm *Mastercam* der Firma *InterCAM* verwendet. Anschließend erfolgt mittels der Software *Robotmaster* der Firma *Robotized*, die eine Simulationssoftware und einen Postprozessor für Roboteranwendungen darstellt. Hier erfolgt die Simulation der Werkzeugbahnen in der virtuellen Roboterzelle und die Ausgabe des Bearbeitungsprogramms in der *ABB*-Sprache *Rapid*. Das entstehende Bearbeitungsprogramm wird anschließend in die Software *RobotStudio* der Firma *ABB* übertragen, über die das Programm auf die Robotersteuerung gespielt wird.

4.1.3 Bauteilqualität und Messverfahren

Ziel dieser Arbeit ist, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, die Erhöhung der Bearbeitungsqualität bei der Zerspaltung additiv gefertigter Bauteile. In dieser Arbeit wird die Evaluierung der Bearbeitungsqualität durch die Bewertung der Bauteilqualität als entscheidendes Kriterium vorgenommen, wobei der Fokus auf dem Einfluss der spanenden Nachbearbeitung liegt. Daher bleiben die Einflüsse des Additivprozesses auf die Bauteilqualität, beispielsweise hinsichtlich Materialfehler durch Einstellung der additiven Prozessparameter, unberücksichtigt.

Qualität wird in der DIN EN ISO 9000 definiert als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“ [DIN 9000]. Abgeleitet hiervon wird Qualität als die Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit hinsichtlich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Anforderungen zu erfüllen, verstanden. Die Qualität beschreibt folglich den Erfüllungsgrad von Anforderungen eines Produkts oder einer Dienstleistung [PAU2008]. Je nach Erfüllungsgrad der Einzelanforderungen wird von guter oder schlechter Qualität gesprochen [FER2023].

Während des Zerspanprozesses interagieren verschiedene mechanische, thermische und chemische Vorgänge, die die Bauteilqualität beeinflussen [FER2023].

Im Bereich der spanenden Fertigung liegt der Fokus auf der Herstellung funktionsfähiger Bauteile, wobei Stellgrößen und Systemgrößen die äußeren Einflüsse auf den Zerspanprozess darstellen, wie in Abbildung 4.4 dargestellt [KLO2017]. Während des Fertigungsprozesses treten zufällige oder systematische Störgrößen auf, wie statische, thermische, kinematische, dynamische Störgrößen, Materialschwankungen oder Werkzeugverschleiß, die sich negativ auf die Qualität von Bauteilen auswirken [AUE2015]. Hieraus folgen Fehler, die unter anderem die mikroskopischen und makroskopischen Eigenschaften der Bauteile beeinflussen. Diese Fehler lassen sich anhand der Ausgangsgrößen des Systems beschreiben, die aufgeteilt sind in Prozessgrößen, Wirkgrößen und Effizienzkriterien [FER2023].

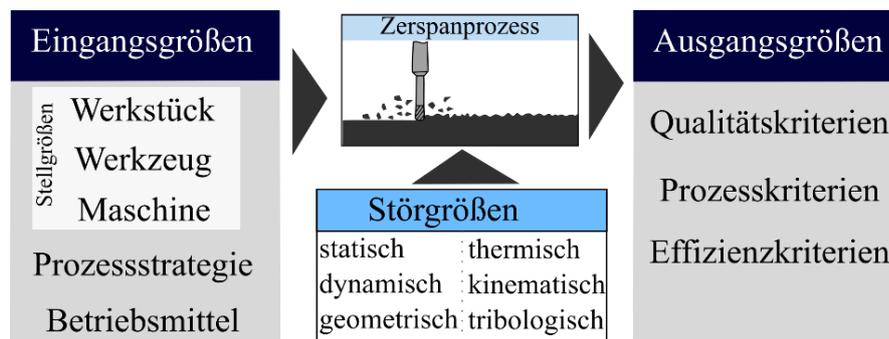


Abbildung 4.4: Allgemeine Systembeschreibung mit geometrisch bestimmter Schneide nach [KLO2017].

Die Wirkzusammenhänge der Eingangsgrößen und Störgrößen im System Zerspanung führen zu Abweichungen von der Soll-Geometrie. Diese Abweichungen der Oberflächenausbildung von der angestrebten Idealform beschreiben die Bauteilqualität und werden zusammengefasst als Gestaltabweichung bezeichnet [KLO2017].

Unter Gestaltabweichungen wird die Gesamtheit aller Abweichungen der Ist-Oberfläche von der Soll- bzw. Idealoberfläche verstanden [DIN 4760]. Sie lassen sich in sechs Gruppen unterteilen, die sich je nach Abweichung überlagern können, wie Abbildung 4.5 zeigt.

Die Gestaltabweichungen erster Ordnung stellen die Form- und Lagetoleranzen dar und sind bei der Betrachtung der gesamten Ist-Oberfläche des Formelements feststellbar. Sie resultieren meist aus systematischen Fehlern, beispielsweise aus Fehlern in der Führung des Werkzeugs und drücken sich in Geradheits-, Ebenheits- oder Rundheitsfehler aus [KLO2017].

Bei Gestaltabweichungen zweiter bis fünfter Ordnung handelt es sich um Welligkeiten oder Rauheiten, die an einem repräsentativen Flächenausschnitt der Istoberfläche eines Formelements feststellbar sind [DIN 4760].

Gestaltabweichung	Beispielhafter Profilschnitt	Beispiel
1. Ordnung: Formabweichung		Fehler in Führungen der Werkzeugmaschine, Durchbiegung der Maschine, Falsche Einspannung des Werkstücks.
2. Ordnung: Welligkeit		Außermittige Einspannung, Form- oder Laufabweichungen eines Fräsers, Schwingungen der Werkzeugmaschine.
3. Ordnung: Rauheit (Rillen)		Form der Werkzeugschneide, Vorschub oder Zustellung des Werkzeugs.
4. Ordnung: Rauheit (Riefen, Schuppen)		Vorgang der Spanbildung, Werkstoffverformungen beim Strahlen.
5. Ordnung: Rauheit (Gefügestruktur)	Nicht mehr in bildlicher Weise darstellbar	Kristallisationsvorgänge, Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung.
6. Ordnung: Gitteraufbau	Nicht mehr in bildlicher Weise darstellbar	Gitteraufbau des Werkstoffs.

Abbildung 4.5: Gestaltabweichungen nach [DIN 4760].

Unter Gestaltabweichungen zweiter Ordnung fallen Welligkeiten, die sich durch überwiegend periodisch auftretende Abweichungen charakterisieren. Sie resultieren unter anderem aus Schwingungen des Werkzeugs oder der Bearbeitungsmaschine. Hier ist es oftmals nicht eindeutig, ob die Fehler systematischer Natur oder zufällig sind [KLO2017].

Gestaltabweichungen dritter Ordnung werden durch die Form der Werkzeugschneide oder Zustellung des Werkzeugs beeinflusst und treten beispielsweise in Form von Rillen auf [KLO2017]. Spanbildungsvorgänge oder Abtragvorgänge beeinflussen die Gestaltabweichung vierte Ordnung, wohingegen beispielsweise chemische Einwirkungen auf die fünfte Ordnung wirken [KLO2017].

Die Gestaltabweichung sechster Ordnung sind durch den Aufbau der Materie bedingte Abweichungen, die durch gebräuchliche Oberflächenmessverfahren nicht erfasst werden können, wie beispielsweise der Gitteraufbau eines Werkstoffes.

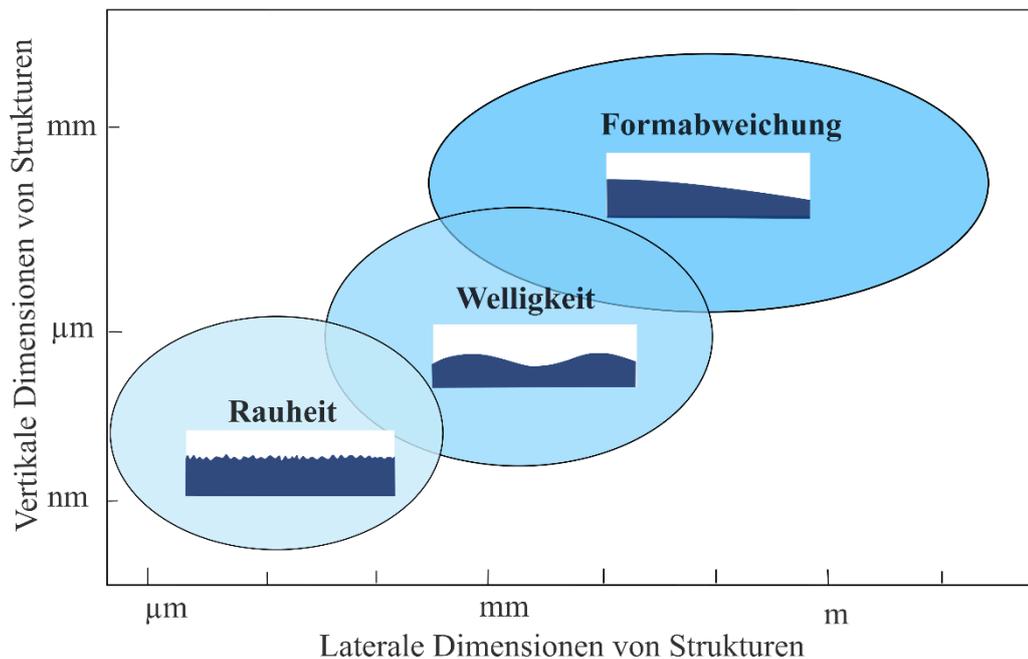


Abbildung 4.6: Größenordnung und Längenskala der Oberflächenbestandteile nach [POL2023]

Zur Bestimmung der Gestaltabweichungen von Bauteilen sind je nach geforderter Genauigkeit, Eignung und Einsatzort verschiedene Messmittel zu unterscheiden. Je nach zu messender Ordnung der Gestaltabweichung werden unterschiedliche Messmittel eingesetzt, da die Gestaltabweichungen in unterschiedlichen Größenordnungen auftreten, wie Abbildung 4.6 zeigt.

Für die Beurteilung der Qualität des Zerspanprozesses und die Bewertung des Einflusses des Robotersystems auf die Bauteilqualität werden in dieser Arbeit die Gestaltabweichungen erster bis dritter Ordnung untersucht.

Gestaltabweichungen erster Ordnung, die durch die Bearbeitungsmaschine hervorgerufen werden, resultieren maßgeblich aus geometrischen und kinematischen Abweichungen sowie der Nachgiebigkeit des Systems, thermisch bedingten Verformungen und Laständerungen während der Bearbeitung [DEN2011]. Die Steifigkeit des Bearbeitungssystems hat auf die Gestaltabweichung erster Ordnung einen großen Einfluss. Die Steifigkeit des Werkstück-Werkzeug-Roboter-Systems beeinflusst, unter anderem auch durch die Steifigkeitsänderung entlang des Vorschubweges, die Maß- und Formgenauigkeit des Werkstücks [DEN2011].

Für die Messung der Gestaltabweichung erster Ordnung werden üblicherweise Geräte und Verfahren der Koordinatenmesstechnik wie Koordinatenmessgeräte oder optische Systeme wie beispielsweise Scanner genutzt [FER2023].

Zur Bestimmung der Gestaltabweichungen erster Ordnung wird in dieser Arbeit ein Soll-Ist-Vergleich zwischen CAD-Bauteilen und den bearbeiteten Bauteilen durchgeführt. Zur Datenaufnahme der realen Bauteile wird der Scanner *KSCAN Magic 3D* der Firma *Scantech* eingesetzt. Der Scanner verfügt über eine Genauigkeit von 0,01 mm nach der Kalibrierung, die vor jeder Vermessung durchgeführt wird. Zur Vermessung wird die

Software *ScanViewer* der Firma *Scantech* verwendet. Der Scanner ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Die über die spanende Bearbeitung mittels Industrieroboter erwartete Genauigkeit liegt im Bereich 0,1 mm bis 1 mm, weshalb die hier erreichbare Genauigkeit des Scanners ausreichend ist [HÄH2020b]. Zudem ermöglicht der Scanner das Vermessen der Bauteile in der Roboterzelle, die Bauteile müssen nicht abgerüstet werden. Der Soll-Ist-Vergleich zwischen CAD-Bauteil und Scan-Daten findet über die Software *GOM-Inspect* statt.



Abbildung 4.7: Verwendeter Scanner und Software zum Vermessen der Formgenauigkeit.

Die Oberflächenqualität, die sich in der Gestaltabweichung zweiter bis dritter Ordnung widerspiegelt, resultiert überwiegend aus Schwingungen und Instabilitäten im Prozess [BAU2014]. Daher lassen diese Gestaltabweichungen Rückschlüsse auf das dynamische Verhalten der Roboterstruktur und die Interaktion zwischen Werkzeug- und Werkstück zu [COR2019b]. Sie charakterisieren sich durch überwiegend periodisch auftretende Abweichungen und können beispielsweise durch Schwingungen des Werkzeugs oder der Bearbeitungsmaschine entstehen. Zur Identifikation dieser Gestaltabweichungen wird das Oberflächenprofil über Profilfilter unterschiedlicher Grenzwellenlängen in das langwellige Welligkeitsprofil W und das kurzwellige Rauheitsprofil R zerlegt [BAU2014].

Die Gestaltabweichungen zweiter bis vierter Ordnung werden über Oberflächenmesstechnik bestimmt. Diese können über optische Messsysteme oder taktile Messsysteme bestimmt werden [WEC2012]. In dieser Arbeit werden zur Bestimmung der Gestaltabweichungen der zweiten bis dritten Ordnung die Rauheits- und Welligkeitsprofile der Bauteile über das Tastschrittverfahren ermittelt. Hierfür wird das Oberflächenmessgerät *MarSurf M400* verwendet. Es verfügt über einen Messbereich von $\pm 250 \mu\text{m}$. Zugehörig ist das Vorschubgerät *MarSurf SD 26*, das eine eingebaute Bezugsebene besitzt, sodass die Vermessung der Oberflächen mobil durchgeführt werden kann. Der Taster *BFW-250* ist fest in das Vorschubgerät integriert und verfügt über einen magnetisch gelagerten Tastarm, über den die Oberfläche abgetastet wird [MAH2010]. Fokus liegt hierbei auf dem Welligkeitsprofil, bei dem die kurzwelligen Anteile entfernt sind. Daneben werden auch Rauheitskennwerte betrachtet, um Qualitätsaussagen über die

Oberfläche treffen zu können. Diese spiegeln die Gestaltabweichung dritter Ordnung wider.

4.2 Versuchsbauteile

In dieser Arbeit werden alle Zerspanversuche an mittels DED gefertigten Bauteilen durchgeführt. Die durch diesen Additivprozess gefertigten Bauteile unterscheiden sich in ihren Eigenschaften von konventionell hergestellten Bauteilen, wodurch die Zerspanbarkeit beeinflusst wird. Daher werden im Folgenden zunächst der verwendete Ausgangswerkstoff vorgestellt, bevor auf die Besonderheiten mittels DED gefertigter Bauteile eingegangen wird und deren Einfluss auf die Zerspanung.

4.2.1 Werkstoff und Bauteileigenschaften

Als Werkstoff wird in dieser Arbeit ein nichtrostender austenitischer Chrom-Nickel-Molybdän-Stahl verwendet, der als Drahtmaterial angeliefert wird. Hierbei handelt es sich um AISI 316L, Werkstoffnummer 1.4404, bezogen von der Firma Durum. Die chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 4.1 zu sehen.

Tabelle 4.1: Zusammensetzung des verwendeten Werkstoffs nach [UNT2023].

Werkstoff	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	N (%)
AISI 316L	≤ 0,03	≤ 1	≤ 2	≤ 0,045	≤ 0,015	16,5 - 18,5	2-2,5	10-13	≤ 0,11

Das Drahtmaterial wird über den DED-Prozess aufgeschmolzen und durch Verfahrbewegungen des Endeffektors in linienförmigen Bahnen, mittels Abscheidungsraupen, zu einem Bauteil aufgebaut. Der Materialaufbau findet auf einer Substratplatte statt. Durch den Schmelzvorgang entstehen Schmelzbäder, die dann erstarren. Aufgrund von Schmelzvorgängen kann die exakte Werkstoffzusammensetzung der Bauteile vom Ausgangsmaterial abweichen. Um die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche möglichst vergleichbar zu gestalten, wird dieselbe Materialcharge verwendet sowie mit gleichen Prozessparametern im Additivprozess gearbeitet.

Nichtrostende austenitische Stähle werden aufgrund ihrer hohen Zugfestigkeit, hohen Duktilität und geringen Wärmeleitfähigkeit als schwer zerspanbar eingestuft [GRZ2017]. Hohe Duktilität führt zu einer Kaltverfestigung während der Bearbeitung, was eine Erhöhung der Härte und Festigkeit zur Folge hat. Dies führt zu einer erhöhten Belastung der Schneide während des Fräsprozesses. Zudem weisen austenitische Stähle eine ausgeprägte Neigung zur Adhäsion mit dem Schneidstoff auf, wodurch es zur Bildung von Aufbauschneiden am Werkzeug kommen kann [KLO2017]. Durch die geringere Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs im Vergleich zu anderen nichtrostenden Stählen wird die Temperaturbelastung der Schneide erhöht [KLO2017].

Da in dieser Arbeit ohne Kühlschmierstoffe gearbeitet wird, aufgrund der Ausstattung der Roboterzelle, ist die Belastung der Werkzeugschneide im Vergleich zur Bearbeitung auf der Werkzeugmaschine zusätzlich erhöht.

4.2.2 Besonderheiten additiv gefertigter Bauteile

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, zeichnen sich additiv gefertigte Bauteile im Vergleich zu konventionell hergestellten Bauteilen durch inhomogene Bauteilqualität und unstete Oberflächen aus, was aus dem Herstellungsprozess resultiert.

Konventionell hergestellter Edelstahl erfährt nach dem Guss verschiedene Bearbeitungen in Form von Umform- und Wärmebehandlungsprozessen.

Edelstahl wird meist über Blockguss abgegossen [SCH2021]. Durch gezielte Einstellung der Gießparameter wird versucht, die Bildung von Poren, Lunkern und Mikrolunkern zu minimieren. Anschließend werden die Gussblöcke durch Warmwalzen oder Schmieden umgeformt. Der in dieser Arbeit verwendete Werkstoff wird nach dem Guss warmgewalzt. Bei diesem Druckumformverfahren wird der Werkstoff zwei oder mehreren sich gegenläufig drehenden Walzen zugeführt. Die Druckkräfte der Walzen führen zu einer plastischen Umformung, bei der vorhandene Lunker und Hohlräume geschlossen werden [SCH2021].

Nach dem Warmwalzen findet ein Kaltziehprozess statt. Hierbei wird der Stahlstab durch den Ziehkanal eines Ziehwerkzeugs gezogen, um die gewünschten Abmessungen und Oberflächeneigenschaften zu erhalten. Die entstehenden Druckkräfte durch die aufbrachten Zugkräfte führen zu einer Verringerung des Bauteilquerschnitts, weshalb dieses Verfahren zu den Zug-Druck-Umformverfahren zählt [SCH2021]. Dieser Umformschritt verbessert die Oberflächenbeschaffenheiten und Toleranzen der Bauteile. Anschließend wird der Werkstoff wärmebehandelt, was zu einer Entfestigung führt. Ziel ist die Verringerung der Sprödigkeit und Härte des Werkstoffs wodurch die Umformbarkeit verbessert wird [SCH2021]. Nach der Wärmebehandlung findet eine Endbearbeitung statt, bei der die finalen Abmaße über subtraktive Verfahren, wie Schleifen oder Polieren eingestellt werden.

Die additiv gefertigten Bauteile werden hingegen endkonturnah im drahtbasierten DED-Prozess aufgebaut. Die entstehende Mikrostruktur und Oberflächenausprägung werden maßgeblich durch den Schweißprozess beeinflusst, der von Parametern wie Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit und Drahtvorschub abhängt [LAL2022].

Während des DED-Prozesses wird das aufgetragene Material aufgrund des schichtweisen Materialauftrags wiederholt thermischen Zyklen ausgesetzt, die eine erneute Erwärmung und Abkühlung bewirken. Diese thermischen Zyklen haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Mikrostruktur des Bauteils, insbesondere auf die Kornstruktur. Sie können Härtegradienten im Bauteil verursachen und zu Eigenspannungen sowie thermischen Verformungen führen [GOR2017]. Zudem treten typische Schweißfehler wie Poren oder Risse auf, ebenso wie nicht vollständig aufgeschmolzene Werkstoffeinschlüsse. Die

Qualität des entstehenden Werkstoffs ist stark abhängig vom thermischen Verhalten während des Prozesses [LAL2022].

Die mikrostrukturellen Eigenschaften der additiv gefertigten Bauteile haben maßgeblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften wie Härte, Festigkeit und Duktilität [BAR2012].

Die additiv gefertigten Versuchsbauteile in dieser Arbeit werden nach dem Prozess nicht wärmebehandelt, da dies mit einer Unterbrechung der hybrid-additiv Prozesskette einher geht. Daher wird eine inhomogene Mikrostruktur innerhalb der Bauteile erwartet. Im Gegensatz zu den additiv gefertigten Bauteilen wurden die konventionell hergestellten Bauteile wärmebehandelt und der Werkstoff hat mehrere Umformprozesse durchlaufen, weshalb eine deutlich homogenere Mikrostruktur mit weniger Fehlern in Form von Poren und Lunkern erwartet wird. Daher wird angenommen, dass sich die spanende Bearbeitung der additiv gefertigten Bauteile von der Zerspanung der konventionell hergestellten Bauteile unterscheidet.

Zur Charakterisierung der Mikrostruktur der Bauteile werden eingebettete Proben der generierten Bauteile geschliffen und geätzt und anschließend mikroskopisch untersucht. Zudem werden Härtemessungen durchgeführt.

In den Schliffen der Bauteile ist erkennbar, dass der schichtweise Materialaufbau mittels Abscheidungsraupen in einer inhomogenen Mikrostruktur resultiert, die durchzogen von Schmelzbadgrenzen ist, wie Abbildung 4.9 zeigt. Der schichtweise Materialauftrag führt zu einer anisotropen Mikrostruktur mit Bereichen grober säulenförmig-dendritischen Körner und Bereichen mit zellulär-dendritischen Körnern führt, siehe Abbildung 4.8. Die säulenförmigen Körner treten vermehrt in den unteren Bereichen der Schmelzbäder auf und besitzen ein gerichtetes Wachstum in Richtung der Schmelzbadmitte. Die feineren zellulären Körner treten dagegen hauptsächlich in den mittleren und oberen Bereichen der Schmelzbäder auf. Erkennbar sind zudem die Schmelzbadgrenzen, die sich aus der Aufbaurichtung während des Additivprozesses ergeben. Des Weiteren sind Poren, die Fehler im Material darstellen, in Abbildung 4.9 zu erkennen.

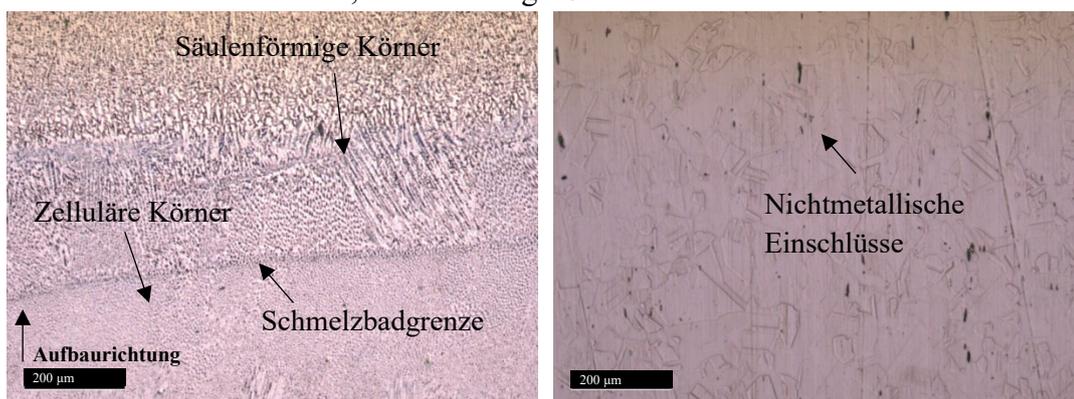


Abbildung 4.8: Geätzte Bauteilschliffproben eines additiv hergestellten Bauteils und eines konventionell hergestellten Bauteils bei 335-facher Vergrößerung [EGO2023]. Die Mikrostruktur des konventionell hergestellten Bauteils ist deutlich homogener.

Die konventionell hergestellten Gussbauteile weisen dagegen eine feinere und homogenere Mikrostruktur auf. Die Körner ähneln sich in ihrer Form. Als Fehler sind kleine Bereiche mit nichtmetallischen Einschlüssen zu erkennen.

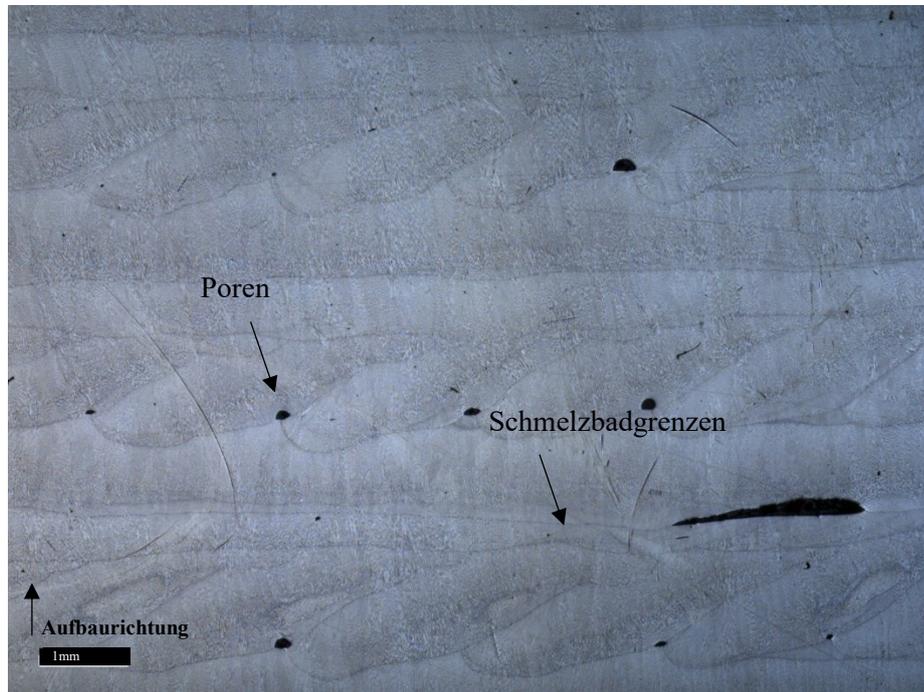


Abbildung 4.9: Geschliffen und geätzter Ausschnitt des additiv hergestellten Blocks mit 34-facher Vergrößerung. Deutlich zu erkennen sind die Poren und Schmelzbadgrenzen [EGO2023].

Die Mikrostruktur der additiv gefertigten Bauteile ist sehr sensitiv gegenüber Veränderungen des Prozesses. Beispielsweise führen eine Erhöhung des Energieeintrags und kürzere Zeitabstände zwischen dem Aufbau der Schichten zu einer reduzierten Abkühlrate und einem hohen Temperaturgradienten, wodurch beispielsweise eine Kornvergrößerung auftritt [GUO2017]. Zudem beeinflussen die thermodynamischen Vorgänge auch die Phasenzusammensetzung der Mikrostruktur. Je nach Erstarrungsgeschwindigkeit bilden sich in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung unterschiedliche Phasenanteile aus, die die Eigenschaften des Werkstoffs beeinflussen [XU2017].

Die Härtemessungen der additiv gefertigten Bauteile, die nach der HV 1 Methode durchgeführt werden, zeigen eine verringerte Härte gegenüber den konventionell hergestellten Bauteilen. Zudem weisen die Bauteile Härtegradienten auf, die Härteverteilung ist inhomogen. Zur Randschicht hin erhöht sich die Härte des Materials, zudem nimmt die Härte in horizontaler Richtung mit zunehmendem Abstand von der Substratplatte ab, steigt jedoch ab der Bauteilmittte wieder an. Damit sind die Härten in den Randbereichen höher als in der Mitte des Bauteils. Die Härte der additiv gefertigten Bauteile liegt zwischen 195 HV bis 203 HV, die der Gussbauteile im 234 HV und Bereich 288 HV [EGO2023]. Die geringere Härte des additiv aufgetragenen Werkstoffs lässt sich auf die größeren Korngrößen im Vergleich zum konventionell hergestellten Bauteil zurückführen. Zudem wird eine Verflüchtigung von Elementen wie Chrom und Mangan vermutet, die während des additiven Prozesses auftritt.

Durch den schichtweisen Aufbau und die einzelnen Abscheidungsraupen ist die Oberflächenwelligkeit der additiv hergestellten Bauteile deutlich höher als die Welligkeit konventionell hergestellter Bauteile, wie Abbildung 4.10 zeigt.

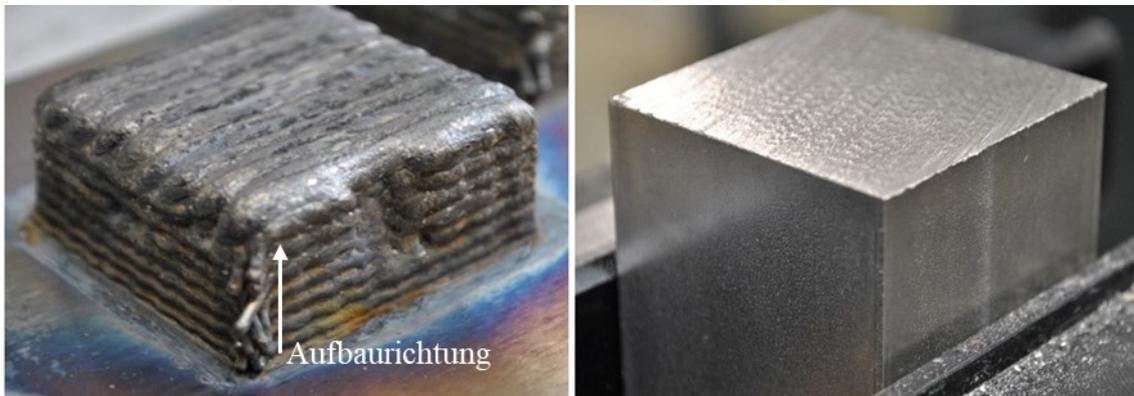


Abbildung 4.10: Vergleich der Oberflächenausprägungen additiv gefertigter Bauteile (links) und konventionell hergestellter Bauteile (rechts) nach [EGO2023].

Die Oberflächenwelligkeiten weisen mit W_a von 92,3 μm und W_z von 166,3 μm in Messungen die 14 bis 26-fachen Oberflächenwelligkeiten von konventionell hergestellten Bauteilen auf.

Die Oberflächenwelligkeiten der additiv gefertigten Bauteile sind abhängig von der Aufbaurichtung und Bearbeitungsstrategie. So ist die Ebene, mit der das Bauteil abschließt und die senkrecht zur Aufbaurichtung liegt, deutlich glatter als die seitlichen Ebenen, wie Abbildung 4.10 zeigt. Die Welligkeiten der senkrecht zur Aufbaurichtung liegenden Ebenen sind um bis zu 5-mal welliger als die Welligkeiten parallel zur Aufbaurichtung.

Die vorgestellten Hauptunterschiede der Charakteristiken in den Bereichen Mikrostruktur, Härte und Oberflächenbeschaffenheit der additiv gefertigten Bauteile im Vergleich zu konventionell hergestellten Bauteilen, weisen auf eine schlechtere Zerspanbarkeit der additiv gefertigten Bauteile hin. Dies wird im Folgenden durch Zerspanversuche untersucht.

4.2.3 Untersuchung der Zerspanbarkeit additiv gefertigter Bauteile

In Vorversuchen wird die Zerspanbarkeit der additiv gefertigten Bauteile im Vergleich zu konventionell hergestellten Bauteilen untersucht und geeignete Zerspanparameter identifiziert.

Dazu werden Quader mit den Abmaßen 42x42x40 mm aus 316L in der Roboterzelle mittels DED hergestellt und anschließend im abgekühlten Zustand zerspannt. Bei der Zerspannung wird ohne Kühl- und Schmiermittel gearbeitet. Um die Unterschiede zur Bearbeitung von konventionell hergestellten Bauteilen aufzuzeigen, werden konventionell hergestellte Quader gleicher Abmessung und aus gleichem Werkstoff bearbeitet. Im Vergleich zu den konventionell hergestellten Bauteilen sind die additiv gefertigten Bauteile nicht wärmebehandelt, da die Gegebenheiten der hybrid-additiv

Prozesskette dargestellt und mit herkömmlichen Zerspanprozessen verglichen werden sollen.

Die in Tabelle 4.2 aufgeführten Zerspanparameter werden sowohl für die Bearbeitung der additiv gefertigten als auch für die konventionell hergestellten Quader verwendet. Die Bearbeitung erfolgt mittels Stirn- und Umfangsfräsen und wird ohne Umorientierung zwischen Werkzeugkoordinatensystem und Base-Koordinatensystem durchgeführt [EGO2023].

Tabelle 4.2: Zerspanparameter nach [LEN2021]

	v_c (m/min)	n (U/min)	f_z (mm)	a_p (mm)	a_e (mm)	Anzahl Werkzeugschneiden
Stirnfräsen	100	2652	0,053	1 (Schruppen) 0,1 (Schlichten)	3	4
Umfangsfräsen	100	2652	0,053	3	1 (Schruppen) 0,1 (Schlichten)	4

Die Zerspankräfte werden mittels des am Industrieroboter implementierten Kraft-Momenten-Sensors mit einer Abtastfrequenz von 1,984 kHz aufgezeichnet und anschließend verarbeitet. Die Daten werden über den gleitenden Mittelwert geglättet und anschließend aus Gründen der Vergleichbarkeit die resultierende Zerspankraft F_{res} ermittelt [EGO2023]. Die resultierende Zerspankraft F_{res} wird berechnet über

$$F_{res} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}. \quad (4.1)$$

Die Analyse der Zerspankräfte zeigt, dass die Amplituden für die Bearbeitung additiv gefertigter Bauteile höher sind als für konventionell hergestellte Bauteile, wie die Kraftverläufe in Abbildung 4.11 zeigen.

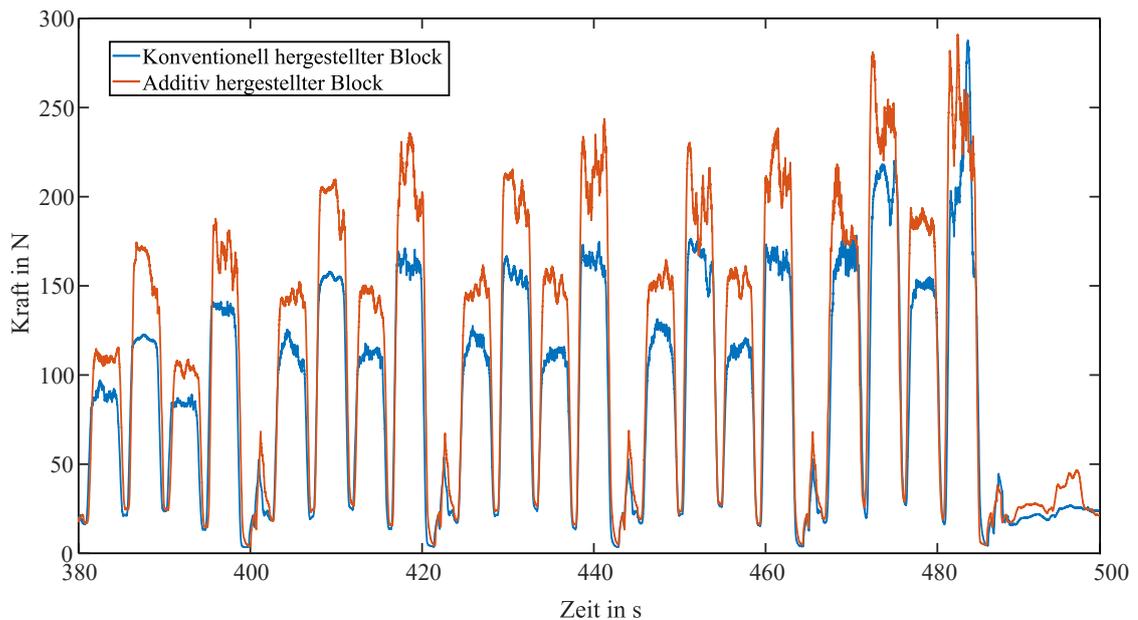


Abbildung 4.11: Zerspankräfte eines additiv aufgebauten Bauteils (rot) und eines konventionell hergestellten Bauteils (blau) nach [EGO2023].

Die Mittelwerte der Zerspankräfte während der Bearbeitung der additiv gefertigten Bauteile liegen durchschnittlich im Bereich von 22 % über den Mittelwerten der konventionell gefertigten Bauteile.

Die ungefilterten Zerspankräfte zeigen, dass die Kraftwerte der Zerspannung der additiv gefertigten Bauteile deutlich höhere Amplituden aufweisen und stärker schwanken als die Kräfte der konventionell hergestellten Bauteile, wie Abbildung 4.12 zeigt.

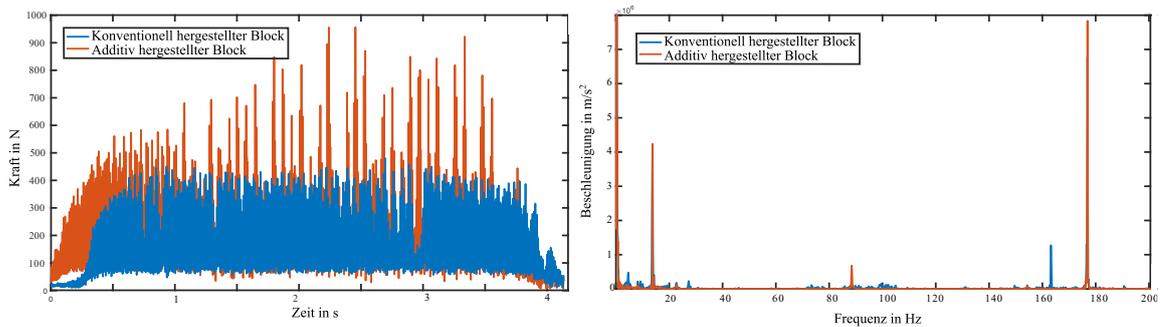


Abbildung 4.12: Vergleich der ungefilterten resultierenden Zerspankräfte (links) und die zugehörigen Frequenzgänge (rechts) eines konventionell hergestellten Quaders (blau) und eines additiv hergestellten Quaders (rot) für jeweils eine Seite nach [EGO2023].

Die Frequenzgänge beider Bearbeitungen sind ähnlich, lediglich die Amplituden des Frequenzgangs der additiv gefertigten Bauteile sind höher, besonders bei der Zahneingriffsfrequenz von 176 Hz. Zudem tritt im Frequenzgang der additiv gefertigten Bauteile eine Amplitude im Bereich der zweifachen Umdrehungsfrequenz von ca. 87 Hz auf, die bei der Zerspannung der konventionell gefertigten Bauteile nicht auftritt.

Eine Erklärung für die erhöhten Zerspankräfte der additiv gefertigten Bauteile liefert die Hall-Petch-Beziehung, laut der es an Schmelzbadgrenzen zu einer Anhäufung von Versetzungen kommt. [HAL1951]. Während des Zerspanvorgangs bewegen sich die Versetzungen durch das Material. Durch das Auftreten von Schmelzbadgrenzen kommt es zu Blockierungen der Versetzungen durch diese Schmelzbadgrenzen, was zu lokalen Materialverfestigungen führt. Dies resultiert in einem höheren notwendigen Kraftaufwand, um den Spanabtrag zu realisieren [ZIM2021].

Bei der Zerspannung der äußeren, unbearbeiteten Flächen der additiv gefertigten Bauteile lassen sich stark schwankende Zerspankräfte beobachten, wie in Abbildung 4.13 zu erkennen. Die Kräfte variieren stark bei der Bearbeitung der Quaderseiten im Vergleich zu den konventionell gefertigten Bauteilen aufgrund der hohen Oberflächenwelligkeiten der Bauteile nach dem Additivprozess. So treten im Zerspanprozess ständig wechselnde Schnitttiefe auf, die zu mechanischen Wechselbelastungen des Werkzeugs und zu Kraftspitzen führen.

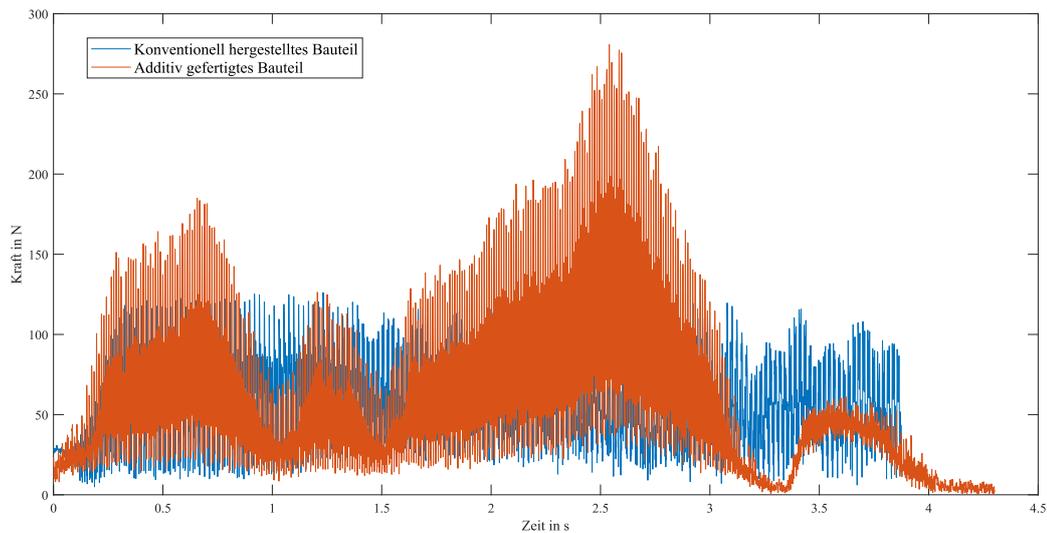


Abbildung 4.13: Zerspankräfte der ersten Bearbeitung der Oberfläche des additiv gefertigten Bauteils (rot) und des konventionell hergestellten Bauteils (blau) nach [EGO2023].

Im weiteren Fräsprozess treten trotz konstanter Schnitttiefe weitere Kraftschwankungen resultierend aus der inhomogenen und anisotropen Mikrostruktur auf, beispielsweise aufgrund der Wechselwirkung von Werkzeug und Schmelzbadgrenzen [ZIM2021]. Auch die im Bauteil vorhandenen Eigenspannungen führen zu einer Erhöhung der Zerspankräfte.

In den konventionell hergestellten Bauteilen treten diese Schmelzbadgrenzen nicht auf. Durch die Umform- und Wärmebehandlungsprozesse während der Herstellung der Bauteile ist die Mikrostruktur deutlich homogener, weshalb die beschriebenen Effekte dort nicht auftreten und die Zerspankräfte geringer sind.

Die höheren und stärker variierenden Schnittkräfte bei der Bearbeitung der additiv gefertigten Bauteile spiegeln sich auch in den Oberflächen der endbearbeiteten Bauteile wider. Die Rauheitswerte R_a und R_z sind um 56 % beziehungsweise 78 % höher als die der bearbeiteten konventionell hergestellten Bauteile bei gleichen Zerspanbedingungen. Die höheren und variierenden Zerspankräfte während der Zerspannung der additiv gefertigten Bauteile führen zu erhöhtem Werkzeugverschleiß, der sich vor allem in Schneidkantenausbrüchen widerspiegelt. Die maximale Ausbruchsbreite der für die additiv gefertigten Bauteile verwendeten Werkzeuge ist bis zu siebenmal höher als die der für den Gussquader verwendeten Werkzeuge.

Allgemein zeichnet sich die Bearbeitung additiv gefertigter Bauteile dadurch aus, dass durch den endkonturnahen Aufbau nur wenig Material abgenommen werden muss, je nach Güte des Additivprozesses. Bei einem stabilen Additivprozess wird meist nur ein Materialaufschlag von 2 mm benötigt, um nach dem Zerspanprozess keine Rückstände der Außenhaut zu haben. Daher sind im Vergleich zur konventionellen Zerspannung weniger Spanvorgänge notwendig. Zudem ist der Schneideneingriff des Werkzeugs deutlich geringer im Vergleich zur Zerspannung aus dem Vollen.

4.2.4 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung der Rahmenbedingungen für die Genauigkeitssteigerung

Die Vorversuche zeigen, dass die Zerspanung von additiv gefertigten Bauteilen mit höheren Prozesskräften und höheren Schwankungen dieser einhergeht im Vergleich zu konventionell gefertigten Bauteilen.

Für die Zerspanung mittels Industrieroboter ist dies aufgrund der Nachgiebigkeit der Roboterstruktur nachteilig, da die höheren Kräfte zu größeren Verschiebungen des TCPs und die Kraftschwankungen zu einem schlechteren dynamischen Prozessverhalten führen.

Für die Untersuchungen werden die folgenden Rahmenbedingungen gesetzt und Annahmen getroffen. Sie sind Grundlage für die in den folgenden Kapiteln durchgeführten Untersuchungen und Modellbildungen.

Alle Versuche werden in der beschriebenen Roboterzelle an mittels DED hergestellten Bauteilen durchgeführt. Dabei finden die Zerspanversuche nur im primären Arbeitsraum, auf dem in der Zelle befindlichen Arbeitstisch statt. Es wird eine endkonturnahe Bearbeitung durchgeführt, was bedeutet, dass nur wenig Material abgenommen werden muss. Daher wird keine Zerspanung aus dem Vollen untersucht.

Mittels DED werden tendenziell schwer zerspanbare Werkstoffe verarbeitet, weshalb in dieser Arbeit mit Edelstahl 316L gearbeitet wird. Hier liegen höhere Prozesskräfte als beispielsweise bei Aluminium vor und der Fräsprozess findet unter niedrigeren Spindeldrehzahlen und Vorschüben statt. Dies begünstigt das Auftreten von Rattern in Folge von Lagekopplung aufgrund der niederfrequenten Anregung im Vergleich zu anderen Fräsprozessen.

Daher wird angenommen, dass die Achsen sich unter quasi statischen Konditionen bewegen. Initialeffekte wie sich verändernde Bedingungen in den Achsen werden nicht beachtet [TUN2021].

Zur Beurteilung der Qualität wird davon ausgegangen, dass die statische Nachgiebigkeit des Industrieroboters die Hauptursache für die Formabweichung der Endbauteile ist, hervorgerufen durch die erhöhten Zerspankräfte.

Treten bei der Zerspanung der additiv gefertigten Bauteile Kraftschwankungen auf, kann dies zu verringerter Oberflächenqualität führen, aufgrund der dynamischen Nachgiebigkeit der Roboterstruktur.

Daher liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Verbesserung der statischen und dynamischen Nachgiebigkeit. Die Qualität der Bauteile wird dabei hinsichtlich der Gestaltabweichung erster bis dritter Ordnung bewertet.

5 UNTERSUCHUNG UND BESCHREIBUNG DES DYNAMISCHEN VERHALTENS

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Änderung der Pose unter Beibehaltung der kartesischen Position und Werkzeug-Werkstückorientierung auf die dynamische Stabilität des Zerspanprozesses untersucht.

Neben den statischen Prozesskräften beeinflussen, wie in Kapitel 2.1.5 beschrieben, auch zeitlich veränderliche Prozesskräfte das Verhalten der Roboterstruktur aufgrund ihrer dynamischen Nachgiebigkeit. Durch die Neigung zur dynamischen Instabilität sind die erzielbaren Zeitspanvolumina begrenzt [COR2019b]. Obwohl Prozessstörungen durch niederfrequente Anregungen nur ca. 20 % der Amplitude des statischen Versatzes des TCPs entsprechen [WEI2008], führen insbesondere bei Industrierobotern niederfrequente Schwingungen zu Instabilitäten während des Fräsprozesses. Dies hat eine reduzierte Oberflächengüte sowie erhöhten Werkzeugverschleiß zur Folge, was potenziell zu Werkzeugbruch führen kann [YUA2018]. Insbesondere für additiv gefertigte Bauteile, die endkonturnah aufgebaut sind, kann dies zu Verletzung der Soll-Geometrie und zu Ausschuss führen. Die Produktionskosten des Bauteils sind im Postprocessing-Schritt bereits hoch, wodurch eine Schädigung des Bauteils in diesem Prozessschritt kostenintensiv ist [WOH2021].

Ziel der dynamischen Modellierung ist die Vermeidung von instabilen Roboterposen, instabilen Prozessbedingungen und ungünstiger Werkstückplatzierungen im Arbeitsraum. Die Vorhersage des Ratterns, insbesondere des regenerativen Ratterns während des Zerspanprozesses dient oftmals zur Optimierung der verwendeten Zerspanparameter und somit der Optimierung der Prozessbedingungen. Die Vorhersage von instabilen Posen und ungünstigen Werkstückplatzierungen im Arbeitsraum dienen dazu stabile Rahmenbedingungen für den Fräsprozess zu erzeugen [YUA2018].

In zahlreichen Arbeiten wurde das dynamische Verhalten des Roboters untersucht und verschiedene Ansätze zur Modellierung des poseabhängigen, dynamischen Verhaltens entwickelt. Grundsätzlich lassen sich die Ansätze in physikalische und datengetriebene Modellierungen unterteilen [BUS2022]. Physikalischen Ansätze basieren auf Bewegungsgleichungen. Allerdings ist die Beschreibung der Parameter solcher physikalischen Modelle oft unzureichend, da sie nur näherungsweise identifiziert werden können und viele Vereinfachungen getroffen werden müssen [BUS2022]. Beispielsweise werden in einigen Modellierungen nur ebene Systeme betrachtet, da in Werkzeugmaschinen, wo diese Modellierungen standardmäßig angewendet werden, die Nachgiebigkeit in axialer Richtung der Spindel vernachlässigbar ist. Diese Annahme ist jedoch nicht für die Roboterstruktur zutreffend [COR2019b].

Viele Modellierungen basieren auf dem von ALTINTAS entwickelten Ansatz zur Modellierung der Stabilität des Zerspanprozesses, der jedoch basierend auf Werkzeugmaschinen entwickelt wurde [ALT2004]. MEJRI modelliert über den Ansatz von ALTINTAS den Stabilitätsbereich des Zerspanprozesses am Industrieroboter, um darauf aufbauend Instabilitäten für verschiedene Zerspanparameter vorherzusagen [MEJ2016]. Hierbei wird jedoch die axiale Prozesskraft vernachlässigt, um ein ebenes

Verhalten zu erhalten. Es wird gezeigt, dass die Stabilität von der Roboterposition und der Kraftanregungsrichtung beeinflusst wird.

CORDES untersucht zwei verschiedene Stabilitätsmethoden, die Semi Diskretisierungsmethode und die dreidimensionale Approximation 0-ter Ordnung, um Rattern vorherzusagen [COR2019b]. Es zeigt sich, dass die Vorhersage von Instabilitäten bei Prozessen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten deutlich präziser ist als bei Prozessen mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten. Bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten beeinflussen insbesondere die Strukturmoden das dynamische Verhalten des Robotersystems [COR2019b].

LI zeigt auf, dass die Lagekopplung bei der roboterbasierten Zerspanung einen deutlich größeren Einfluss auf die Stabilität des Fräsprozesses hat als bei Werkzeugmaschinen [LI2017b]. Daher können die Kreuzterme bei der dynamischen Untersuchung nicht vernachlässigt werden. Zur Untersuchung der Lagekopplung wird oftmals die CCT verwendet [CEN2017b]. Jedoch zeigt sich in diesem Ansatz, dass die Stabilitätsvorhersage nur für bestimmte Bereiche im Arbeitsraum gültig ist.

Neben der Analyse und Modellierung des dynamischen Verhaltens während des Zerspanprozesses in Abhängigkeit der Fräsparameter, wird in vielen Arbeiten auch die Abhängigkeit der Instabilität von der Roboterpose und der Werkstückpositionierung im Arbeitsraum untersucht. So entwickelt HUYNH ein Modell, das das dynamische Verhalten des Roboters in Abhängigkeit von der Pose vorhersagt, mit dem Ziel besonders stabile Posen zu identifizieren [HUY2020]. In den Untersuchungen zeigt sich, dass eine Poseabhängigkeit der Roboterstruktur in den modalen Parametern sichtbar ist. BUSCH entwickelt einen datenbasierten Ansatz, um die modalen Parameter der Posen vorherzusagen [BUS2022]. Auch hier wird die Poseabhängigkeit der modalen Parameter deutlich, die modalen Parameter variieren über den Arbeitsraum [BUS2022]. Modalanalysen verschiedener Posen zeigen, dass sich mit zunehmendem Abstand des TCPs von der Roboterbasis die ersten beiden Eigenfrequenzen nach unten verschieben, während das Dämpfungsmaß größer wird [BUS2022; HUY2020]

Die aufgeführten Arbeiten stellen zudem dar, dass die dynamische Modellierung mit dem Ziel der Vorhersage von Instabilitäten oder der Identifizierung stabiler Posen sehr aufwendig sind. Insbesondere die Nutzung von für Werkzeugmaschinen gängige Modellierungen sind in der roboterbasierten Zerspanung weniger zielführend aufgrund der Strukturmoden des Robotersystems, die das dynamische Verhalten im Prozess beeinflussen [HUY2020]. Die erforderlichen Verfahren zur Modellerstellung sind in der Regel kostenintensiv und aufwendig aufgrund von Software- und Messtechnikequipment und müssen individuell für jeden Roboter durchgeführt werden [BUS2022]. Darüber hinaus haben sie nur eine begrenzte Gültigkeit.

Gegenwärtig existiert keine Methode, mit der das Verhalten des Roboters im gesamten Arbeitsraum hinsichtlich der Lagekopplung und des regenerativen Ratterns umfassend beschrieben werden kann [HUY2020].

Bisher fehlen Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten unter Änderung der Orientierung des TCPs um die Werkzeugachse bei gleichzeitiger Beibehaltung der kartesischen

Position. Untersuchungen zeigen jedoch, dass der Angriffspunkt und die Richtung der Kraft am Werkzeug-Spindel-System sowie an der Roboterstruktur einen signifikanten Einfluss auf die Stabilität des Prozesses haben [MEJ2016].

In diesem Kapitel liegt der Fokus auf der Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Robotersystems, insbesondere hinsichtlich des Stabilitätsverhaltens der Roboterstruktur während des Fräsprozesses in Abhängigkeit der Orientierung um die Werkzeugachse. Die Analyse des dynamischen Verhaltens des Industrieroboters während der spanenden Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile hat zum Ziel, bevorzugte Orientierungen des Endeffektors zu identifizieren, die in stabileren Zerspanprozessen resultieren. Es sollen allgemeingültige Erkenntnisse zu gewonnen werden, um eine bestmögliche Orientierung des TCPs um die Werkzeugachse auszuwählen und so einen stabileren Fräsprozess zu gewährleisten.

Zunächst werden hierfür über die experimentelle Modalanalyse die Modalparameter ermittelt, die das dynamische Verhalten der Roboterstruktur beschreiben. Hieraus lassen sich Rückschlüsse auf das Verhalten des Roboters während der Fräsbearbeitung ziehen [MEJ2016]. Anschließend wird das dynamische Verhalten verschiedener Orientierungen während des Fräsprozesses anhand von Beschleunigungsmessungen an der Roboterstruktur untersucht.

5.1 Grundlagen der experimentellen Modalanalyse

Die experimentelle Modalanalyse dient zur Ermittlung des Eigenschwingungsverhaltens von schwingungsfähigen Systemen und stellt die Grundlage zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens dar [MÖS2020]. Durch die experimentelle Modalanalyse werden die Modalparameter ermittelt, zu denen die Eigenfrequenzen und die Eigenmoden gehören. Hierbei wird das zu untersuchende System mit einer bekannten Größe angeregt und somit in Schwingung versetzt. Die Antwort des Systems wird dabei über Beschleunigungssensoren gemessen und so die Eigenfrequenzen, modale Dämpfungen und Eigenvektoren ermittelt [MÖS2020].

Als Eigenfrequenz wird die Frequenz eines Systems bezeichnet, mit der das System nach einmaliger Anregung schwingt. Liegt eine Anregungsfrequenz in der Nähe einer Eigenfrequenz des Systems antwortet die Struktur mit erhöhter Amplitude auf die Anregung [DRE2016]. Die Eigenform bezeichnet die zur Eigenfrequenz zugehörige Verformung der Struktur, beschreibt folglich die Bewegung mit der die Struktur antwortet [MÖS2020]. Für Systeme mit mehreren Freiheitsgraden, wie sie bei einem Robotersystem vorliegen, ergeben sich für N Freiheitsgrade N verschiedene Eigenfrequenzen mit zugehörigen Eigenvektoren [MÖS2020]. Während Eigenfrequenzen eindeutig sind, trifft dies auf Eigenvektoren nicht zu [MÖS2020]. Die modale Dämpfung ist ein Maß für das Abklingen der zugehörigen Eigenvektoren [DRE2016].

Das dynamische Verhalten des Gesamtsystems Industrieroboter lässt sich grundlegend mit folgendem Gleichungssystem beschreiben [MÖS2020]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t). \quad (5.1)$$

Hierbei stellt $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ die Massematrix dar, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ die Dämpfungsmatrix und $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ die Steifigkeitsmatrix. $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$ ist der Verschiebungsvektor bzw. Vektor der Auslenkung und $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^N$ der angreifende Kraftvektor [MÖS2020]. Der linke Teil der Gleichung 5.1 stellt die Strukturmechanik des Robotersystems an der Werkzeugspitze dar. Die Matrizen haben bei N Freiheitsgraden, die sich auf den Raum des Systems beziehen, die Dimension $N \times N$ [MÖS2020].

Das modale Modell bildet die dynamischen Eigenschaften des Systems über Moden ab. Das dynamische Verhalten des Systems wird dabei als Überlagerung von Moden beschrieben. Dabei wird jede Mode durch eine charakteristische Frequenz, der Eigenfrequenz, der Dämpfung und Eigenform beschrieben [MÖS2020]. Über Nachgiebigkeitsfrequenzgänge ist die Identifikation der modalen Parameter des strukturmechanischen Ersatzmodells möglich [COR2019b].

Der Frequenzgang beschreibt die Reaktion eines zeitinvarianten linearen Systems auf ein Eingangssignal und enthält die wichtigsten Komponenten zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens [MÖS2020]. Er stellt den Zusammenhang zwischen Eingangssignal, in der Bewegungsgleichung die angreifende Kraft, und dem Ausgangssignal, die Schwingungsantwort des Systems dar. Durch die Fouriertransformation der Bewegungsgleichung aus Formel 5.1 ergibt sich

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C} + \mathbf{K})\mathbf{U}(\omega) = \mathbf{F}(\omega) \quad (5.2)$$

Der Frequenzgang $\mathbf{H}(\omega)$, der die dynamischen Eigenschaften des Systems beschreibt, ergibt sich, aus

$$\mathbf{H}(\omega) = \frac{1}{(-\omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C} + \mathbf{K})} = \frac{\mathbf{U}(\omega)}{\mathbf{F}(\omega)} \quad (5.3)$$

Dabei sind $\mathbf{U}(\omega)$ und $\mathbf{F}(\omega)$ die Fouriertransformierten der Eingangs- und Ausgangssignale, wodurch sich das Verhalten des Systems anhand der Eingangs- und Ausgangssignale beschreiben lässt [MÖS2020]. Die Eingangssignale sind die auf die Roboterstruktur einwirkenden Kräfte, bei der Modalanalyse oftmals ein Impuls. Die Ausgangssignale beschreiben die Antwort der Roboterstruktur auf dieses Eingangssignal, beispielsweise in Form von Schwingungen der Struktur, die über Beschleunigungssensoren gemessen werden [COR2019b].

Der Frequenzgang enthält alle Informationen, die zur Bestimmung der modalen Parameter benötigt werden [MÖS2020]. Daher muss zur Identifikation dieser dynamischen Eigenschaften zunächst der Frequenzgang erstellt werden, bevor hieraus die modalen Parameter extrahiert werden.

5.2 Aufbau und Durchführung der experimentellen Modalanalyse

Für die experimentellen Untersuchungen wird das Datenerfassungssystem *LAN-XI* der Firma *Brüel & Kjær* verwendet. Hierbei werden für die Messung der Beschleunigungen triaxiale piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer des Typs 4524-B eingesetzt, die an

zwölf Punkten entlang der Roboterstruktur angebracht werden, wie in Abbildung 5.1 dargestellt. Über die Sensoren kann das dynamische Verhalten der Roboterstruktur beobachtet und aufgezeichnet werden und Aussagen zu Eigenbewegungen der Roboterstruktur getroffen werden können.

Die Sensoren werden so angebracht, dass sie, mit Ausnahme von Sensor zwölf, mit dem Koordinatensystem des Weltkoordinatensystems des Roboters in Grundstellung übereinstimmen. Sensor zwölf muss aufgrund der Zugänglichkeit der Roboterstruktur mit abweichender Orientierung angebracht werden. Die Beschleunigungssensoren verfügen über einen Messbereich von $\pm 500 \text{ m/s}^2$ und einer maximal messbaren Frequenz von 2,7 kHz in der X-Achse und 2 kHz für Y- und Z-Achse.

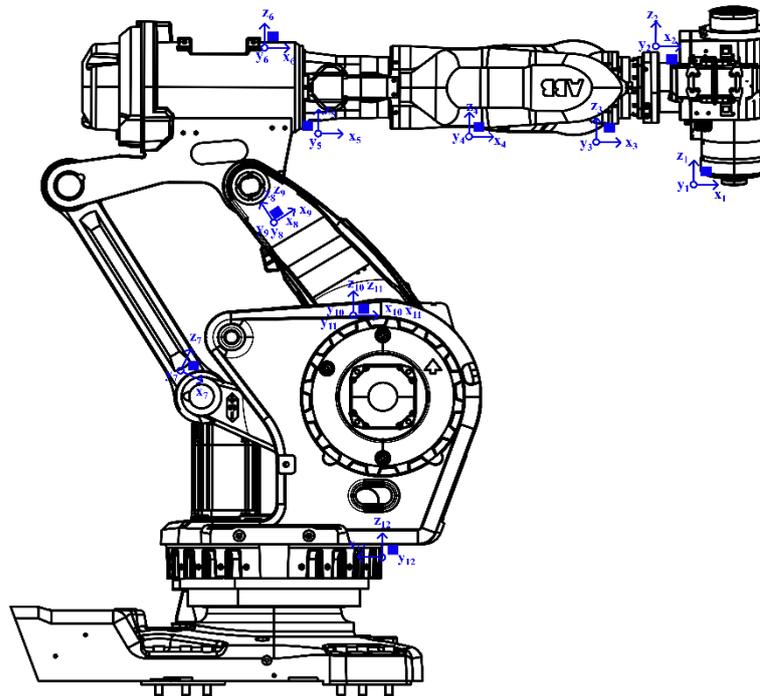


Abbildung 5.1: Lage der Beschleunigungssensoren an der Roboterstruktur.

Die technischen Daten der Beschleunigungssensoren sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1: Daten der Beschleunigungssensoren nach [PCB1998].

Messbereich (m/s^2)	± 500
Amplitudengang	X: 0,2 bis 5000, Y: 0,25
Phasengang	1,5 bis 3000
Eigenfrequenz im montierten Zustand	X: 18, Y:9, Z: 9

Zur Auswertung der Messdaten und Ermittlung des Frequenzgangs wird die Software *B&K Connect* der Firma *Brüel & Kjær* verwendet. Hier werden die Ein- und Ausgangssignale aufgenommen, verarbeitet, ausgewertet und gespeichert. Aus den

aufgenommenen Daten werden über die Software durch Fouriertransformation die Frequenzgänge erstellt.

Zum Aufstellen des Frequenzgangs wird die Roboterstruktur mit einem Modalhammer der Firma *PCB Piezoelectronics Model 086C05* angeregt, der über einen Kraftaufnehmer verfügt. Dieser erzeugt eine breitbandige Anregung mit einem 5dB Pegelabfall bei 2500 Hz laut [PCB1998]. Die zur Anregung der Struktur mit dem Modalhammer aufgebrauchte Kraft wird gemessen und dient als Eingangssignal [MÖS2020]. Die Roboterstruktur erfährt durch den Schlag einen Impuls, der im Zeitbereich einen annähernd halbsinusförmigen Verlauf aufweist [COR2019b]. Die Anregung erfolgt am TCP, wo als Werkzeug anstatt eines Fräsers ein Fräserdummy eingesetzt ist, um den Impuls mit dem Modalhammer genauer durchzuführen und eine Beschädigung des Hammers zu vermeiden.

Das Ziel der ersten Versuchsreihe ist, die Modalparameter des verwendeten Robotersystems zu identifizieren. Dazu wird die Modalanalyse an elf Posen durchgeführt, die nahe am Arbeitstisch der Roboterzelle liegen. Die Posen variieren in Bezug auf den Abstand von der Roboterbasis sowie der Auslenkung des Endeffektors. Bei der Auswahl der Posen liegt das Augenmerk auf den für die Bearbeitung relevanten Arbeitsraum der subtraktiven Bearbeitung [HAD2022].

Die Basisposen H, M und V sind entlang der X-Achse verteilt und liegen nahe des Arbeitstisches, wie in Abbildung 5.2 dargestellt.

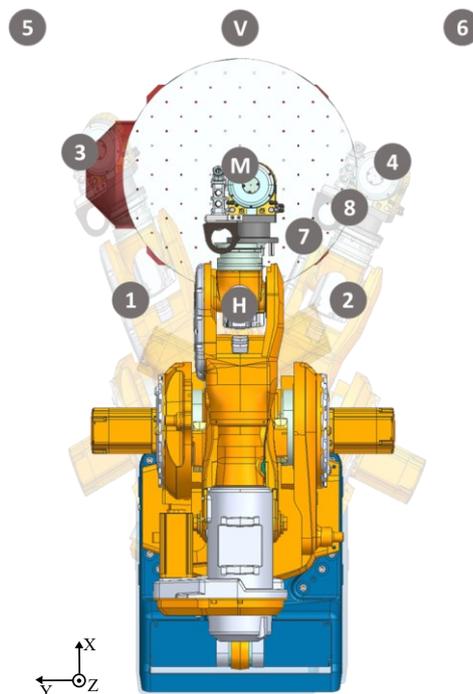


Abbildung 5.2: Lage der untersuchten Posen am Arbeitstisch.

Ausgehend von den drei Grundposen H, M und V werden insgesamt sechs weitere Posen (Pose 1-6) durch Drehung der ersten Achse um $\pm 25^\circ$ untersucht, um den Einfluss der ersten Achse des Roboters auf die Lage der Eigenfrequenzen zu untersuchen.

Zusätzlich werden zwei weitere Posen, Pose 7 und Pose 8, durch Umorientierung des TCPs um die Z-Achse, um -40° und -20° eingestellt, um das dynamische Verhalten unter Beibehaltung der kartesischen Koordinaten bei Umorientierung zu untersuchen.

Die Versuche werden unter gelösten Sicherheitsbremsen durchgeführt, um den geregelten Zustand während der Versuche zu gewährleisten. Die Sicherheitsbremsen wirken motorseitig auf den Antrieb. Laut CORDES liefern sowohl der Zustand mit als auch ohne gelöste Sicherheitsbremsen vergleichbare Ergebnisse, da die Bremsen motorseitig auf den Antrieb wirken und allgemein die Getriebe im dynamischen Lastfall das Nachgiebigkeitsverhalten beeinflussen [COR2019b]. Da angenommen wird, dass die Getriebe das dynamische Verhalten maßgeblich beeinflussen, ist der Einfluss der Bremse gering.

5.3 Ergebnisse der Modalanalyse für die Eigenfrequenzen

Zur Analyse der Eigenfrequenzen des Systems werden zunächst die Beschleunigungsfrequenzgänge des Sensors 1 am Flansch der Spindel ausgewertet. Die am Sensor 1 gemessenen Beschleunigungen sind für die Bewertung des dynamischen Verhaltens besonders interessant, da der Sensor in unmittelbarer Nähe des Werkzeugs angebracht ist. Daher erfasst dieser Sensor das Verhalten nahe des TCPs, was wiederum den Kontakt zwischen Robotersystem inklusive Werkzeug und dem Werkstück repräsentiert.

Die Beschleunigungsfrequenzgänge aus Sensor 1 des Systems für Pose M sind in Abbildung 5.3 zu sehen.

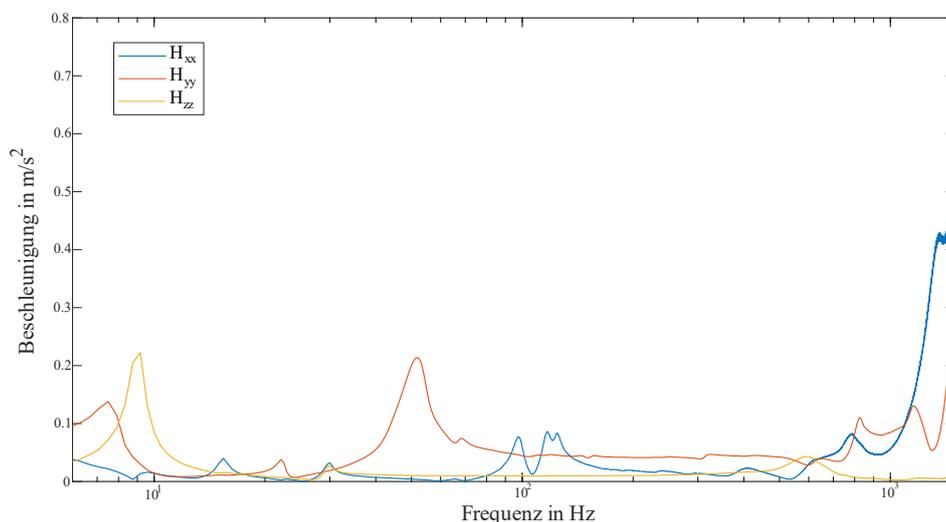


Abbildung 5.3: Beschleunigungsfrequenzgänge der Pose M.

Es ist zu erkennen, dass die ersten Eigenmoden des Roboters niedrige Eigenfrequenzen aufweisen, bei 7 Hz für $H_{YY}(\omega)$ und 9 Hz für $H_{ZZ}(\omega)$ sind jeweils die ersten Eigenmoden in Z-Richtung und Y-Richtung erkennbar. Zwischen 10 Hz und 40 Hz treten mehrere

Amplitudenerhöhungen in X-Richtung auf, die auf Strukturmoden hinweisen [HAD2022].

Es zeigt sich, dass die ersten Eigenmoden in Y-Richtung und Z-Richtung stark miteinander gekoppelt sind. Dies resultiert aus der kinematischen Struktur des Roboters, die Struktur antwortet bei Anregung in eine Richtung auch mit Bewegungen in weitere Raumrichtungen.

Grundsätzlich lassen sich die auftretenden Amplitudenüberhöhungen der drei Hauptfrequenzgänge bis etwa 200 Hz den Strukturmoden des Robotersystems zuordnen. Die Amplitudenüberhöhungen ab etwa 800 Hz sind dem Spindel-Werkzeug-System zuzuordnen, da sich hier ein poseunabhängiges Verhalten zeigt. Zudem liegt in diesem Bereich typischerweise die erste Biegeeigenfrequenz von Spindelsystemen [KRE2008]. Die Analyse der Frequenzgänge unterschiedlicher Posen zeigt, dass diese sich im Bereich bis 200 Hz mit der Pose ändern, während das Verhalten über 200 Hz konstant bleibt. Die Moden über 200 Hz repräsentieren Biege- und Torsionsmoden einzelner Bauteile oder Baugruppen, deren wirkende Massen sich nicht mit der Pose ändern [COR2019b].

Mit zunehmendem Abstand zwischen Roboterbasis und TCP verschiebt sich die erste Eigenmode des Frequenzgangs $H_{YY}(\omega)$ hin zu niedrigeren Frequenzen, während die erste Eigenmode von $H_{ZZ}(\omega)$ nur geringfügig beeinflusst wird.

Die Betrachtung der Kreuzfrequenzgänge der Pose M zeigt eine deutliche Koppelung zwischen den Bewegungsrichtungen, wie Abbildung 5.4 zeigt. Ursächlich hierfür ist der kinematische Aufbau der Roboterstruktur mit seinen rotatorischen Gelenken. Zudem sind die Kreuzterme nicht symmetrisch, was auf Nichtlinearitäten in der Kinematik, Reibungseffekte, nichtlineare Effekte in Gelenken und Getrieben sowie den nicht vollständig symmetrischen Aufbau der Roboterstruktur zurückzuführen ist. Das mechanische System verhält sich nicht reziprok [TEP2023b].

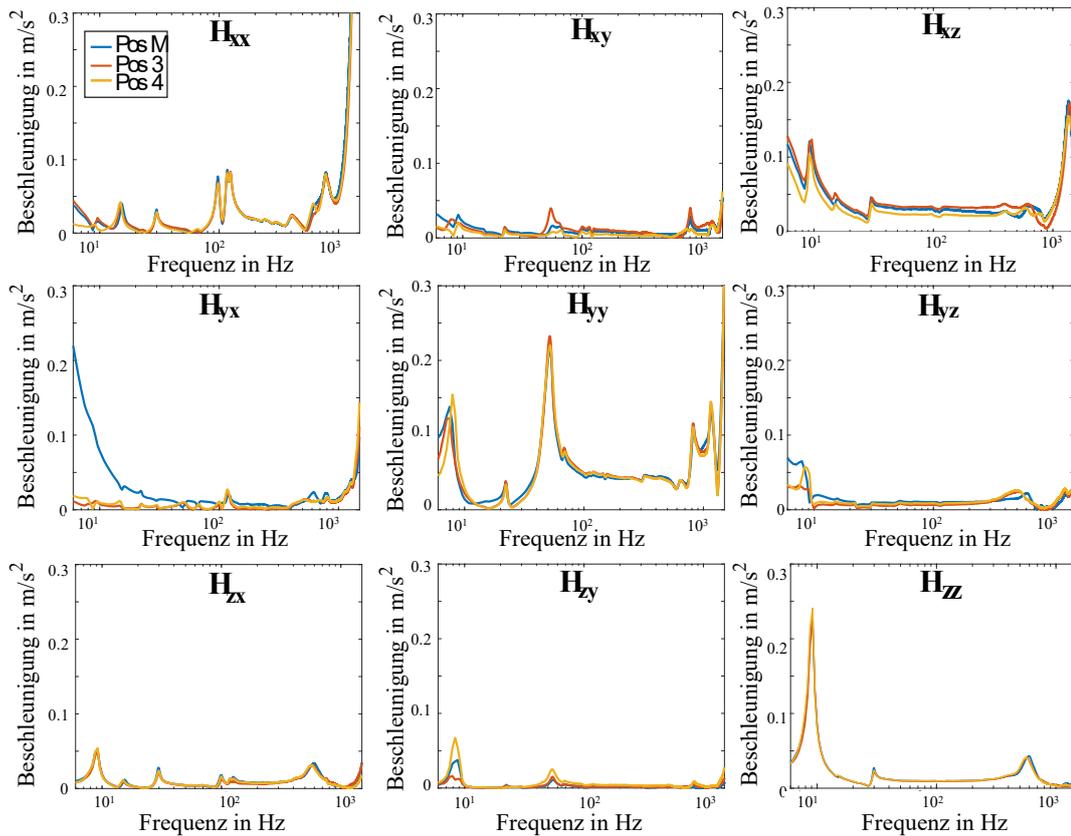


Abbildung 5.4: Kreuzfrequenzgänge der Pose M (blau), Pose 3 und 4.

Die Untersuchung des Einflusses von Achse 1 auf das dynamische Verhalten des Roboters zeigt, dass sich die Frequenzgänge der verschiedenen Posen ähneln. Die größten Unterschiede treten in den Kreuzfrequenzgängen $H_{XZ}(\omega)$, $H_{YX}(\omega)$ und $H_{YZ}(\omega)$ auf, während die Hauptfrequenzgänge insgesamt parallel verlaufen und ähnliche Amplitudenüberhöhungen bei den gleichen Frequenzen aufweisen. Dies zeigt, dass die Orientierung von Achse 1 im Arbeitsraum nahe dem Arbeitsbereich keinen Einfluss auf die Lage der Eigenfrequenzen und nur einen geringen Einfluss auf die Höhe der Amplituden hat.

Änderungen im Achswinkel der ersten Achse haben insgesamt nur geringfügigen Einfluss auf das Eigenverhalten des Roboters, daher kann der Einfluss des Achswinkels der ersten Achse vernachlässigt werden.

Die Untersuchung der Posen 7 und 8, die eine Umlagerung des Endeffektors um die Werkzeugachse darstellen, weisen Unterschiede in den Amplitudengängen im Bereich von 20 Hz bis 100 Hz, in Z- und Y-Richtung auf, während sich die ersten Eigenfrequenzen nicht verschieben, wie in Abbildung 5.5 dargestellt.

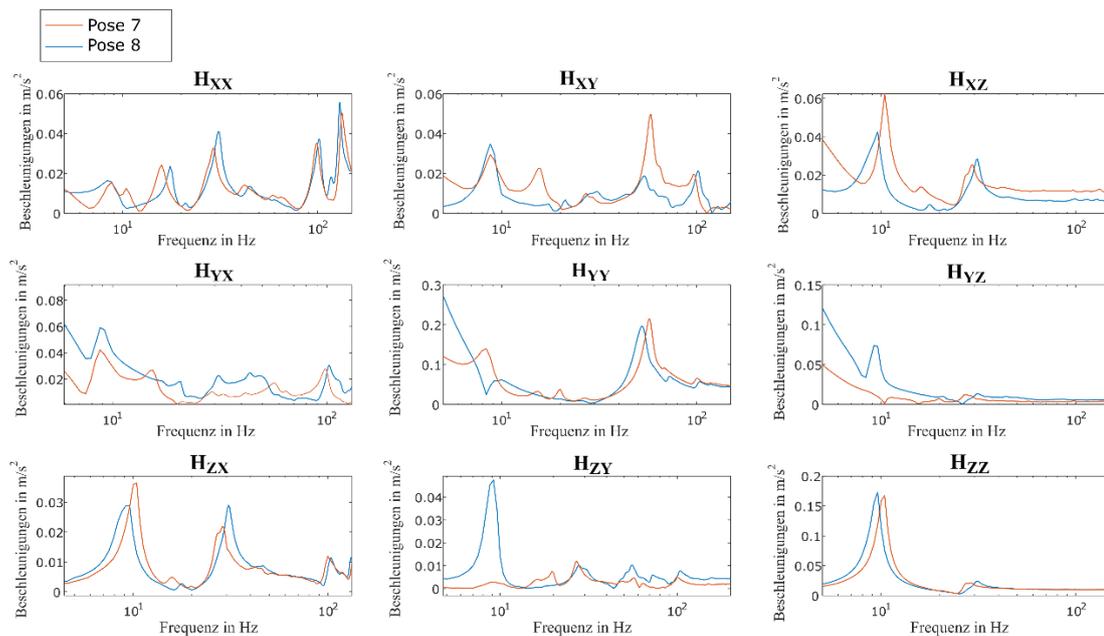


Abbildung 5.5: Frequenzgänge der Posen 7 und 8.

Vor allem die Amplitudenüberhöhung von $H_{XX}(\omega)$ verschiebt sich, mit zunehmender Verdrehung um die Werkzeugachse, im Bereich zwischen 10 Hz und nach oben. Zudem verringern sich die Amplituden von $H_Y(\omega)$ und $H_{ZZ}(\omega)$ im Bereich 10 Hz bis 50 Hz. Die Umorientierung des Endeffektors hat folglich einen Einfluss auf die Stabilität der Roboterstruktur.

Insgesamt zeigt die experimentelle Modalanalyse, dass sich die Frequenzgänge durch die Pose und Verdrehung des Endeffektors verändern. Die ersten Eigenfrequenzen der Roboterstruktur liegen, wie vermutet im niedrigfrequenten Bereich, die Kreuzterme sind ausgeprägt, jedoch nicht symmetrisch. Zudem hat die Veränderung der Achse 1 keine nennenswerte Auswirkung auf die Frequenzgänge. Die Änderung der Orientierung um die Z-Achse beeinflusst hingegen die Frequenzgänge.

Um das dynamische Verhalten weiterführend zu untersuchen, werden im nächsten Schritt in weiteren Versuchen die modalen Parameter wie Eigenformen und Eigendämpfungen ermittelt.

5.4 Bestimmung der Eigenmoden

Über Eigenmoden können die Verformungszustände der Roboterstruktur betrachtet werden und so Rückschlüsse auf das Verhalten der Roboterstruktur gezogen werden.

Um die Eigenmoden zu ermitteln, sind weiterführende Messungen notwendig. Ausgehend von den Erkenntnissen der ersten Modalanalyse, werden die zu messenden Posen verändert und weitere Posen in die Untersuchung aufgenommen. Der Versuchsaufbau, bestehend aus über die Roboterstruktur verteilten Beschleunigungssensoren, bleibt bestehen, zudem wird auch hier das schon beschriebene Messequipment verwendet.

Die Anzahl der zu untersuchenden Posen wird auf fünf Posen reduziert, beibehalten werden die Posen V, M und H. Die Posen 9 und 10 werden in den Versuchsplan aufgenommen. Hierbei handelt es sich um Abwandlungen der Pose M, bei denen die Orientierung um die Z-Achse des TCPs um + bzw. -60° gedreht wird, wie in Abbildung 5.6 zu sehen.

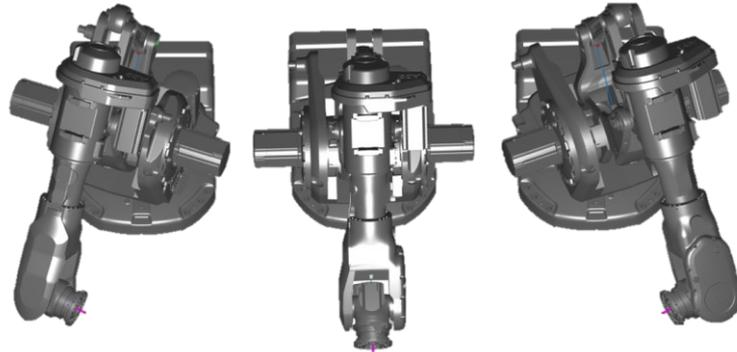


Abbildung 5.6: Pose 9 mit $+60^\circ$ Orientierung (links), Pose M mit 0° Orientierung (Mitte) und Pose 10 mit -60° (rechts).

Mit Hilfe der *B&K-Software Connect* wird ein Drahtmodell des Roboters erstellt, dessen Knotenpunkte die Lage der Beschleunigungssensoren an der realen Roboterstruktur darstellen. Dadurch können die gemessenen Schwingungen grafisch dargestellt und Eigenfrequenzen sowie Eigenvektoren für alle Sensorpositionen ermittelt werden. Das Drahtmodell wird bei den Messungen entsprechend der Pose angepasst, sodass die verschiedenen Posen dargestellt werden können.

Der zu untersuchende Frequenzbereich wird auf 2 Hz bis 100 Hz eingegrenzt, da hier die Hauptstrukturmoden liegen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 dargestellt.

Für die Pose M werden fünf Eigenmoden im Frequenzbereich von 5 Hz bis 35 Hz ermittelt. Die Eigenfrequenzen liegen im Bereich der zuvor identifizierten Amplitudenüberhöhungen in der Übertragungsfunktion.

Die erste Eigenbewegung stellt eine Dreheigenschwingung um die erste Achse des Roboters dar, weshalb eine Verschiebung in der Y-Achse auftritt. Die zweite Eigenmode, die bei einer ähnlichen Eigenfrequenz liegt, führt zu einer TCP-Verschiebung in der Z-Achse, was einer Nickbewegung entspricht. Die dritte Eigenmode ist eine Bewegung des Parallelogramms zwischen der zweiten und dritten Achse, die eine TCP-Verschiebung in X-Richtung bewirkt. Die vierte Eigenmode ist eine Kippbewegung in der ersten Achse, diesmal jedoch in Y-Richtung. Die fünfte Eigenmode ist eine Biegeschwingung des Roboterarms ab Achse 3, bei der sich sowohl Achse 3 als auch Achse 5 verdrehen.

Die Untersuchungen der Posen 9 und 10, bei denen es sich jeweils um die verdrehte Pose M um + oder -60° um die Werkzeugachse handelt, zeigen, dass sich die Lage der Eigenfrequenzen ähneln.

Tabelle 5.2: Eigenfrequenzen und zugehörige Dämpfungen der Posen M, Posen 9 und 10.

	Pose M		Pose 9 (+60°)		Pose 10 (-60°)	
	Frequenz (Hz)	Dämpfung (%)	Frequenz (Hz)	Dämpfung (%)	Frequenz (Hz)	Dämpfung (%)
1	8,35	9,392	8,26	8,81	8,19	8,6
2	8,93	7,832	9,32	6,24	10,41	7,71
3	14,68	4,6126	14,59	5,91	14,27	6,70
4	22,51	3,41	20,05	4,68	20,14	4,25
5	29,34	4,187	28,25	3,63	29,35	4,7

Zudem werden für die Posen 9 und 10 ähnliche Eigenformen wie für Pose M identifiziert. Die ersten drei Eigenformen sind analog zu Pose M, bei der ersten handelt es sich um eine Drehschwingung um die erste Achse, die zweite Eigenform ist eine Nickbewegung, die zu einer TCP-Bewegung in Z-Richtung führt. Die dritte Eigenform ist eine Vor- und Zurückbewegung des Roboters durch das Parallelogramm zwischen zweiter und dritter Achse.

Die darüber liegenden Moden der Posen 9 und 10 weisen ein deutlich komplexeres Verhalten auf, obwohl, die Lage der Eigenfrequenz ähnlich der der Pose M ist. Beispielsweise tritt für die Eigenmode vier hier eine Bewegung entlang der X-Achse auf bei gleichzeitiger gegenläufiger Bewegung der Spindel. Dadurch tritt eine Biegeschwingung der fünften Achse auf.

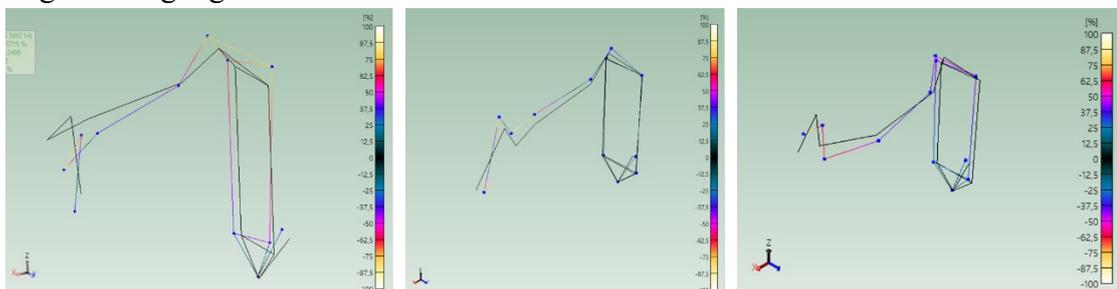


Abbildung 5.7: Fünfte Eigenmode der Pose 9 (links), Pose M (mitte) und Pose 10 (rechts).

Auch bei Eigenmode fünf treten komplexe Verschiebungen am TCP auf, die nicht eindeutig einzelnen Raumrichtungen zuzuordnen sind. Der Vergleich der fünften Eigenmoden der Posen M, 9 und 10 sind in Abbildung 5.7 zu sehen.

Für die Posen 9 und 10 zeigt sich, dass die Eigenfrequenzen in ähnlichen Bereichen liegen und die Eigenmoden sich jeweils gespiegelt voneinander verhalten. Die ersten drei Eigenfrequenzen und Eigenformen ähneln denen von Pose M. Die darüber liegenden Moden haben jedoch komplexere Eigenformen und die Verschiebungen am TCP sind schwer eindeutig Raumrichtungen zuzuordnen.

Die Modalanalysen der Posen M, V und H, die den Einfluss des Abstands des TCPs zur Roboterbasis untersuchen, zeigen, dass die ersten Eigenformen und Eigenfrequenzen weitgehend stabil bleiben. Bei der dritten und fünften Eigenform ist jedoch eine deutliche Posenabhängigkeit zu erkennen. Mit zunehmendem Abstand von der Roboterbasis wird die dritte Eigenfrequenz herabgesetzt. Diese Veränderung der Eigenfrequenz ist auf den veränderten Achswinkel und die Höhe zwischen zweiter und dritter Achse

zurückzuführen, da es sich bei der zugehörigen Eigenform um eine Verdrehung der zweiten Achse handelt. Die fünfte Eigenfrequenz ist nahe der Roboterbasis am höchsten und sinkt dann ab, wie in Abbildung 5.8 dargestellt.

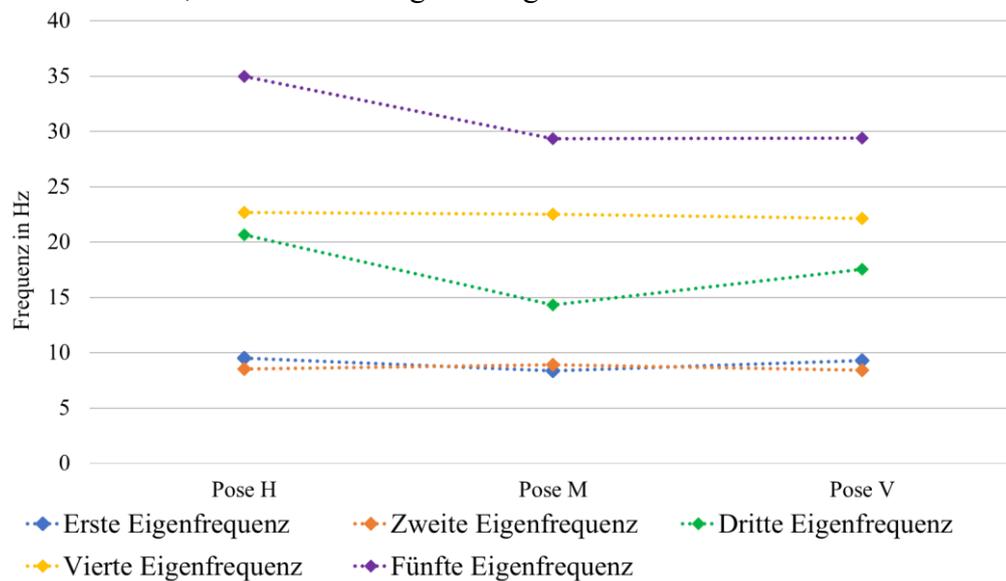


Abbildung 5.8: Lage der ersten fünf Eigenfrequenzen in Abhängigkeit der Posen.

Die Modalanalyse zeigt, dass das Verhalten des Roboters poseabhängig ist und sich das dynamische Verhalten des Roboters mit der Bearbeitungsposition und mit der Orientierung des TCPs ändert.

In der Modalanalyse wurde jedoch nur das Verhalten des Roboters auf Basis von Impulsanregungen der Roboterstruktur untersucht, bei der die Interaktion zwischen Roboterstruktur und Werkstück nicht betrachtet wird. Um Rückschlüsse auf das Verhalten des Robotersystems während des Fräsprozesses zu ziehen, werden im nächsten Schritt Betriebsschwingungsmessungen durchgeführt.

5.5 Betriebsschwingungsmessungen

Betriebsschwingungsmessungen dienen dazu, die im Betriebszustand von Maschinen oder Systemen auftretenden Schwingungen zu erfassen und zu analysieren. Im Gegensatz zur Modalanalyse, die sich auf die Eigenfrequenzen der Roboterstruktur konzentriert, wird bei der Betriebsschwingungsmessung die Dynamik des Roboters unter Interaktion zwischen Werkzeug und Werkstück analysiert und somit auch die Art der Anregung berücksichtigt [KAN2023].

Bei der Betriebsschwingungsmessung werden die Beschleunigungen der Roboterstruktur während des Fräsprozesses gemessen, welche die Reaktionen der Roboterstruktur auf die einwirkenden Fräskräfte darstellen. Hierbei handelt es sich um eine schmalbandige Anregung durch die gegebenen Drehzahlen und Zahneingriffsfrequenzen, im Gegensatz zur breitbandigen Anregung durch den Hammer [COR2019b].

Die während des Fräsprozesses gemessenen Beschleunigungen werden mittels der Software *B&K Connect* fouriertransformiert. Ziel der Untersuchungen ist das Schwingungsverhalten des Roboters während des Fräsprozesses zu analysieren, um das Auftreten von Instabilitäten zu untersuchen.

Die Fräsversuche werden an additiv hergestellten Quadern mit den Maßen $60 \times 60 \times 50$ mm durchgeführt. Bei dem Material handelt es sich um den in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Werkstoff Edelstahl 316L.

Fokus der Untersuchung ist das Verhalten der Roboterstruktur bei Umorientierung des TCPs um die Z-Achse. Dafür werden Orientierungen mit 0° , $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$ und $+80^\circ$ untersucht, ebenso wie verschiedene Bearbeitungsrichtungen.

Instabilitäten in Form von Rattern werden provoziert, indem, bei einem festen Arbeitseingriff a_e von 3 mm und einem definierten Vorschub von 100 m/min sukzessiv die Schnitttiefe erhöht wird. Es wird mit einer Schnitttiefe a_p von 0,4 mm begonnen. Die Versuche werden bei einer Drehzahl von 2636 U/min durchgeführt. Als Fräswerkzeug wird der in Kapitel 4.1.2 vorgestellte vierschneidiger Schaftfräser aus Vollhartmetall mit einem Durchmesser von 12 mm und einem Eckenradius von 2 mm verwendet.

Für jede Orientierung werden die Vorschubrichtungen $\pm X$ und $\pm Y$ im Weltkoordinatensystem untersucht, lediglich für $+80^\circ$ wird nur die positive Y- und X-Richtung untersucht aufgrund der Roboterkinematik.

In den Versuchen werden die Schnitttiefen je Orientierung und Schnittrichtung so lange erhöht, bis Rattern auftritt.

Die Versuche zeigen, dass die Orientierungen des Endeffektors die erreichbaren Schnitttiefen bei gleichbleibenden Schnittparametern deutlich beeinflussen. Tabelle 5.3 und Abbildung 5.9 zeigen die erreichten Schnitttiefen in Abhängigkeit von den Orientierungen und Vorschubrichtung.

Tabelle 5.3: Erreichte Schnitttiefen a_p der unterschiedlichen Vorschubrichtungen unter verschiedenen Orientierungen.

Orientierung des Endeffektors	Vorschubrichtung			
	+X	-X	+ Y	-Y
0°	2,4 mm	0,8 mm	0,6 mm	1,4 mm
-30°	2,4 mm	0,8 mm	0,4 mm	2,8 mm
$+30^\circ$	2,8 mm	0,6 mm	1,0 mm	1,8 mm
-60°	2,0 mm	0,6 mm	1,8 mm	2,6 mm
$+60^\circ$	1,2 mm	0,6 mm	2,8 mm	0,8 mm
$+80^\circ$	1,2 mm	-	2,0 mm	-

Die höchste Schnitttiefe von 2,8 mm wird für die Bearbeitungsrichtung +X mit einer Umorientierung von $+30^\circ$ erreicht, in -Y-Bearbeitungsrichtung mit einer Orientierung von -30° sowie in +Y-Richtung mit einer Orientierung von $+60^\circ$.

Für die Bearbeitungsrichtungen $\pm X$ zeigt sich, dass die Orientierungen 0° und $\pm 30^\circ$ die stabilsten Ergebnisse aufweisen. Zudem ist die Bearbeitungsrichtung +X deutlich stabiler als die Bearbeitungsrichtung -X.

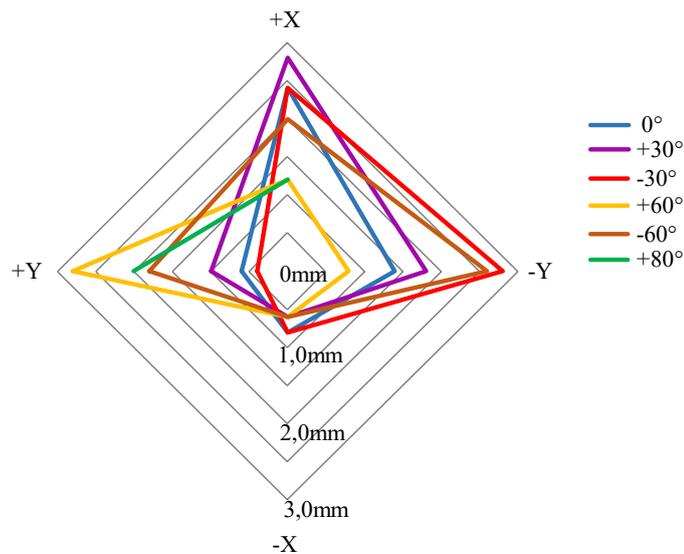


Abbildung 5.9: Erreichte Schnitttiefen nach Vorschubrichtung und Orientierung.

Für die Bearbeitung in $\pm Y$ -Richtung sind die erreichten Schnitttiefen mit Orientierungen von -30° und $\pm 60^\circ$ am höchsten. Hierbei zeigt sich, dass für eine Bearbeitung in $-Y$ -Richtung eine Orientierung in negative Richtung deutlich bessere Ergebnisse erzielt, in $+Y$ -Richtung eine Orientierung in positive Richtung bessere Ergebnisse erzielt.

Bei einer Orientierung von 0° , die meist standardmäßig aus den CAM-Programmen ausgegeben wird, werden in $+X$ die höchsten Schnitttiefen erreicht, gefolgt von der Bearbeitungsrichtung in $-Y$ Richtung. Die erreichten Schnitttiefen in Y -Richtung sind um bis zu 40 % geringer als die in X -Richtung. Dies zeigt sich auch in Versuchen an anderen Robotermodellen [BAI2019a].

Es zeigt sich, dass die höchsten Schnitttiefen je Bearbeitungsrichtung erreicht werden, wenn die Spindel und das Werkzeug während des Fräsvorgangs vom Roboter in Vorschubrichtung geschoben wird.

Dieses Stabilitätsverhalten spiegelt sich in den Frequenzspektren der aufgezeichneten Beschleunigungen wider.

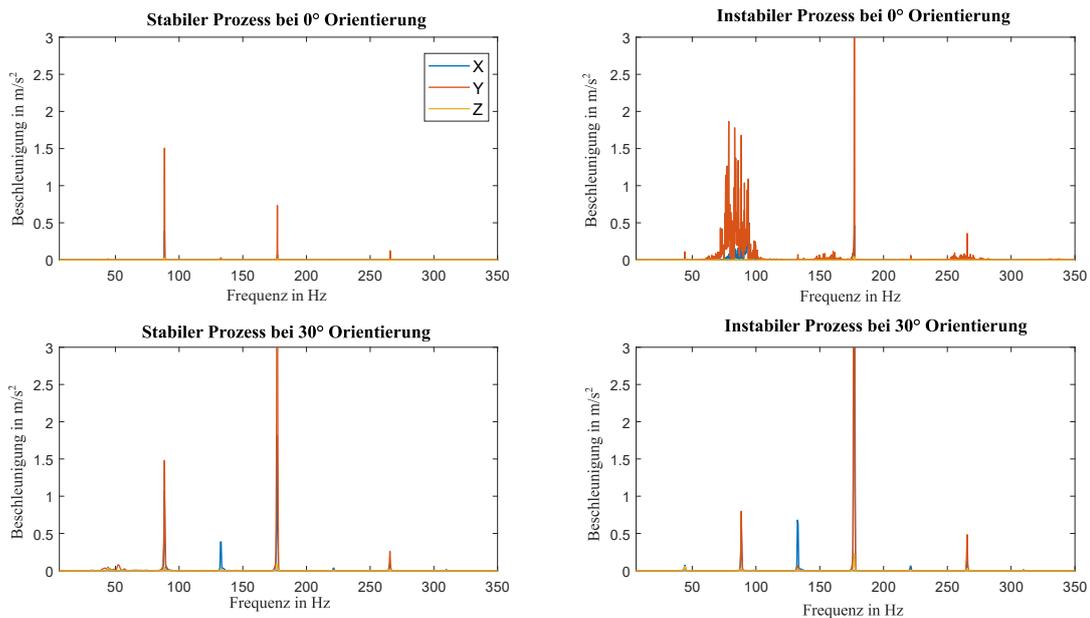


Abbildung 5.10: Frequenzspektren der stabilen (links) und instabilen (rechts) Prozesse mit Vorschubrichtung X mit 0° Orientierung (oben) und 30° Orientierung (unten).

Das Frequenzspektrum in Abbildung 5.10 zeigt das stabile und instabile Verhalten für die Orientierungen 0° und $+30^\circ$ in +X-Richtung. In jedem Frequenzspektrum sind deutlich die Zahneingriffsfrequenz bei etwa 176 Hz als deutliche Überhöhung sowie die Frequenz der Spindeldrehzahl bei etwa 44 Hz erkennbar. Ebenfalls sichtbar sind vielfache der Spindeldrehfrequenz bei 88 Hz und 132 Hz, ihre Überhöhungen sind jedoch deutlich niedriger. Diese Anregungsfrequenzen entstehen durch Unwuchten oder Rundlauffehler des Werkzeug-Spindel-Systems.

Im Vergleich zu stabilen Prozessen zeigen sich Instabilitäten durch einen deutlichen Anstieg der gemessenen Beschleunigungen. Die in der experimentellen Modalanalyse ermittelten gekoppelten Eigenbewegungen sind auch im Frequenzspektrum zu erkennen. So führen beispielsweise Anregungen in Y-Richtung zu Bewegungen in allen drei Raumrichtungen, wobei die zugehörigen Frequenzen im Bereich der Strukturmoden der Roboterstruktur liegen. Zudem treten nahe der Zahneingriffsfrequenz von 176 Hz Seitenbänder mit einem Abstand von 7 Hz auf, die auf Änderungen der Amplitude der Schnittkraft aufgrund der niederfrequenten Schwingungen zurückzuführen sind.

Bei den Versuchen werden zwei Arten von Instabilitäten festgestellt. Einerseits können klare Instabilitäten mit einer bestimmten Grenzschnitttiefe identifiziert werden, wie bei der Orientierung 0° in +X-Richtung, zu erkennen in Abbildung 5.10. Bei anderen Versuchen sind die Grenzschnitttiefen nicht eindeutig identifizierbar und das Verhalten der Roboterstruktur verschlechtert sich mit zunehmender Schnitttiefe kontinuierlich, wie es für die Orientierung $+30^\circ$ in +X-Richtung auftritt. Hier ist die statische Verschiebung des Effektors während der Versuche zu sehen, jedoch treten keine Rattermarken auf und der Prozess scheint stabil abzulaufen. Das Frequenzspektrum weist keine ausgeprägten Instabilitäten bei spezifischen Frequenzen auf.

Die nicht eindeutigen Instabilitäten treten auf, wenn die Drehachse von Achse sechs mit der Vorschubrichtung übereinstimmt. In diesen Fällen werden auch die höchsten Grenzschnittiefen für die jeweilige Pose erreicht. Die Frequenzspektren der Versuche ohne ausgeprägte Instabilitäten zeigen eine breitbandige Anregung.

Die Überhöhungen der Beschleunigungen können keiner spezifischen Frequenz zugeordnet werden, sondern es treten breitbandige Anregungen im Bereich von 55 Hz bis 120 Hz auf. Bei Umkehr der Vorschubrichtung ändert sich das Frequenzspektrum drastisch und die breitbandige Anregung ist sehr schwach ausgeprägt. Hingegen weisen die Spindeldrehfrequenz und die Zahneingriffsfrequenz deutlich ausgeprägte Seitenbänder auf. Die gekoppelten Eigenbewegungen, die in der experimentellen Modalanalyse identifiziert wurden, sind im Frequenzspektrum erkennbar. Beispielsweise führt eine Anregung in Y-Richtung zu Eigenbewegungen in alle drei Raumrichtungen, die zugehörigen Frequenzen liegen im Bereich der Strukturmoden der Roboterstruktur. Die Mehrzahl der Versuche weist selbsterregte Schwingungen im Bereich der Struktureigenmoden auf. Insgesamt zeigt sich in den Betriebsschwingungsanalysen, dass es sich bei den auftretenden Ratterschwingungen um selbsterregte Schwingungen der Struktureigenmoden des Roboters handelt.

Da Rattern auch bei zuvor unbearbeitetem Material auftritt, ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um Rattern aufgrund von Lagekopplung handelt. Die auftretenden Frequenzen sind daher nicht von der Erregerdrehzahl abhängig.

Zur Bestätigung dieser Aussage werden weitere Versuche mit gleichen Parametern aber um 1000 U/min erhöhten Spindeldrehzahlen durchgeführt. Hierbei treten ähnliche Antwortfrequenzen der Roboterstruktur auf. Jedoch wird durch eine Erhöhung der Drehzahl die erreichbare Grenzschnitttiefe erhöht, da durch die erhöhte Drehzahl die Erregerfrequenz nach oben verschoben wird und die niederfrequente Anregung der Roboterstruktur vermindert wird.

5.6 Fazit und Einordnung der Ergebnisse

Die Modalanalyse sowie die Messung der Betriebsschwingungen zeigen, dass die Eigenfrequenzen des Roboters im niedrigen Bereich liegen und das dynamische Verhalten durch die Struktureigenmoden im Bereich zwischen 8 Hz und 35 Hz geprägt ist. Die ersten beiden Eigenfrequenzen liegen mit ca. 8 Hz und je nach Pose zwischen 8 Hz und 10 Hz sehr niedrig. Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den Messungen von CORDES und MEJRI, die ebenfalls Strukturmoden in diesem Frequenzbereich identifiziert haben [COR2019a; MEJ2016].

Insgesamt zeigen die Versuche, dass das Rattern und die Instabilitäten aufgrund des Effekts der Lagekopplung auftreten. Die Analyse des Frequenzspektrums lässt diesen Schluss zu, da die auftretenden Frequenzen nicht von der Schnittgeschwindigkeit abhängen. Bei den verschiedenen untersuchten Schnittgeschwindigkeiten treten jeweils sehr ähnliche Antwortfrequenzen der Roboterstruktur auf. Zudem tritt Rattern auch bei zuvor nicht bearbeitetem Material auf.

Diese Instabilitäten treten vor allem bei niedrigen Drehzahlen und geringen Geschwindigkeiten auf. Typisch für Instabilitäten in Folge von Lagekopplung ist, dass die auftretenden Ratterfrequenzen im Bereich der Strukturmoden des Robotersystems liegen. Eine Änderung der Vorschub- oder Schnittgeschwindigkeit beeinflussen die Lage der Ratterfrequenzen nicht [PAN2006]. Die Richtung des Kraftangriffsvektors beeinflusst das Auftreten von Rattern ebenfalls. Eine Änderung der Vorschubrichtung kann den Fräsprozess stabilisieren [PAN2006]. Dieses Verhalten zeigt sich in den Frequenzspektren der Betriebsschwingungsmessung.

Anhand der Versuche wird deutlich, dass die Umorientierung um die Werkzeugachse einen Einfluss auf das dynamische Verhalten und die Lage der Eigenfrequenzen hat, die Orientierung des Endeffektors beeinflusst das Stabilitätsverhalten des Roboters. Bei einer Drehung um die Werkzeugachse wird der TCP in den kartesischen Koordinatensystemen beibehalten, während die Stabilität verbessert wird. Der Prozess wird stabiler, wenn die Vorschubrichtung des Fräsprozesses und die Drehachse der sechsten Achse der Roboterstruktur in die gleiche Richtung zeigen. In den Experimenten dieser Arbeit werden die stabilsten Prozesse bei einem Winkel von 30° zwischen der Richtung der Drehachse der sechsten Achse und der Vorschubrichtung identifiziert. Der Prozess ist besonders stabil, wenn der Flansch des Robotersystems die Spindel in Vorschubrichtung schiebt. Beim Fräsen in -X-Richtung, wobei das Werkzeug zum Roboter gezogen wird, treten die instabilsten Prozesse auf.

Die Anwendungsfälle für die hybride Fertigungszelle basieren meist auf schwer zu zerspanenden Materialien. Daher werden für die Bearbeitung der additiv gefertigten Teile meist niedrige Prozessgeschwindigkeiten verwendet, wodurch die Wahrscheinlichkeit des Ratterns aufgrund von Lagekopplung erhöht ist.

Wie in Kapitel 2 beschrieben, gestaltet sich die Modellierung des dynamischen Verhaltens schwierig, da das Aufstellen der dynamischen Modelle komplex, zeit- und kostenintensiv ist. Zudem sind sie nicht auf andere Roboter übertragbar, da selbst bei gleichen Robotertypen die Ausstattung, wie bzw. Endeffektor, unterschiedlich ist. Dies beeinflusst das dynamische Verhalten.

Bei der Modellierung müssen die Asymmetrien der Systemmatrizen berücksichtigt werden, zudem wird bei der Modellierung meist nur regeneratives Rattern berücksichtigt und Modelle, die für Werkzeugmaschinen gängig sind, können nicht ohne weiteres auf Roboterstrukturen übertragen werden [MEJ2016]. Lagekopplung ist in der Literatur deutlich weniger untersucht, da diese für Werkzeugmaschinen weniger relevant ist [LI2017b]. Daher soll in dieser Arbeit auf eine Modellierung des dynamischen Verhaltens verzichtet werden. Stattdessen wird sich auf die Identifikation möglichst steifer Posen- und Orientierungen für die Bahnplanung der Zerspanung fokussiert. Dies soll die einfache Implementierung und Übertragbarkeit der Ergebnisse ermöglichen.

Die Modalanalyse zeigt, dass eine Umorientierung um die Werkzeugachse Einfluss auf das dynamische Verhalten und die Lage der Eigenfrequenzen hat. Die Betriebsschwingungsmessungen unterstreichen dieses Verhalten. In Bezug zur FF2 folgt, dass die Umorientierung des TCPs und die Werkzeugachse unter Beibehaltung der

kartesischen Position einen Einfluss auf die dynamische Stabilität des Fräsprozesses hat. Als dynamisch stabilste Orientierungen haben sich für die Vorschubrichtung +Y die Orientierung $+60^\circ$, für -Y die Orientierung -60° , für die Vorschubrichtung +X die Orientierung $+30^\circ$ und für -X die Orientierung -30° erwiesen. Es wird zudem deutlich, dass der Prozess dort am stabilsten ist, wo die Vorschubrichtung mit der Drehachse der Achse sechs übereinstimmt.

Die Genauigkeit des Zerspanprozesses ist neben dem dynamischen Verhalten hauptsächlich vom statischen Nachgiebigkeitsverhalten der Roboterstruktur abhängig. Die Gestaltabweichung in Form von Formabweichung wird stark von der statischen Nachgiebigkeit der Roboterstruktur beeinflusst. Daher soll im nächsten Schritt die Änderung der Orientierung um die Werkzeugachse für das Aufstellen des Steifigkeitsmodells und in der Optimierung der Pose hinsichtlich statischer Steifigkeit berücksichtigt sowie in Validierungsversuchen weiterführend untersucht werden. Die in diesem Kapitel identifizierten Orientierungen werden in Kapitel 8 für die Validierungsversuche verwendet und den über Optimierungsmodellierung identifizierten Orientierungen gegenübergestellt.

6 AUFSTELLEN DES STEIFIGKEITSMODELLS

Nachdem im vorangegangenen Kapitel belegt wurde, dass die Orientierung des TCPs Einfluss auf das dynamische Verhalten der Roboterstruktur im Zerspanprozess hat, soll in diesem Kapitel für die Analyse des statischen Verhaltens das Steifigkeitsmodell aufgestellt werden. In diesem Kapitel wird das Steifigkeitsmodell auf Grundlage der erweiterten Vorwärtskinematik aufgestellt. Ziel ist es, das Modell mit möglich wenigen Experimenten und geringer zusätzlicher Sensorik aufzustellen, sodass die Modellierung und Identifikation der Steifigkeitsparameter möglichst aufwandsarm ist, wie in FF3 dargestellt.

Die beim Zerspanprozess wirkenden Prozessbelastungen zwischen Werkstück und Werkzeug verursachen aufgrund der statischen Nachgiebigkeit des Robotersystems eine Verlagerung des TCPs. Diese Verlagerung ist hauptsächlich für die Gestaltabweichung erster Ordnung nach DIN 4760 des bearbeiteten Werkstücks verantwortlich [WEI2008]. Um die Verlagerung des TCPs aufgrund der statische Prozesslasten zu modellieren und vorherzusagen, existieren verschiedene Modellansätze. Beispiele hierfür sind die FEM, der MSA-Ansatz, die CTT Methode oder die erweiterte Vorwärtskinematik, wie in Kapitel 2.1 beschrieben [HÄH2020b].

Bei der Auswahl der Methodik der Steifigkeitsmodellierung ist zu beachten, dass die für die Nachgiebigkeit relevanten Elemente der Roboterstruktur abgebildet werden [HÄH2020b]. Zudem sollte der Aufwand zur Erstellung des Modells einem ausgewogenem Kosten/Nutzenverhältnis entsprechen [WEI2008]. Auch sollte eine hohe Systemzuverlässigkeit gewährt und die Rechenzeit möglichst gering sein [RÖS2014]. Daher wird in dieser Arbeit die statische Nachgiebigkeit für den genutzten Schwerlastroboter ABB IRB 6660-205/1.9 auf Grundlage der erweiterten Vorwärtskinematik zur Vorhersage der Verlagerung des TCPs genutzt.

Die erweiterte Vorwärtskinematik ist eine Methode, die auf Transformationsmatrizen aufgebaut ist, wodurch eine schnelle Rechenzeit gewährleistet ist. Gleichzeitig ist die Genauigkeit hoch und die notwendigen Daten und Parameter sind meist verfügbar oder ermittelbar. Der Aufwand zur Identifikation der Parameter im Vergleich zu anderen Modellierungsansätzen deutlich geringer [HÄH2020b]. Daher wird in dieser Arbeit die erweiterte Vorwärtskinematik zur Modellierung des Nachgiebigkeitsverhalten der Roboterstruktur verwendet.

In diesem Kapitel wird das Steifigkeitsmodell auf Basis der erweiterten Vorwärtskinematik aufgestellt. Zur Identifikation der notwendigen Steifigkeitsparameter wird der Ansatz der Bayesianischen Inferenz der Steifigkeiten verwendet.

6.1 Aufbau der Vorwärtskinematik

Grundlage des Steifigkeitsmodells ist, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, das kinematische Modell des Industrieroboters. Der Industrieroboter lässt sich vereinfacht als

unverzweigte, offene kinematische Kette darstellen, mit n Gliedern, die über n Gelenke mit jeweils einen Freiheitsgrad verbunden sind [COR2019b].

Um die Lage der Gelenke und Glieder zueinander zu beschreiben, wird die Vorwärtskinematik verwendet [RÖS2014]. Die Vorwärtskinematik, auch direkte Kinematik genannt, ist die eindeutige Abbildung von Gelenkkoordinaten auf kartesische Koordinaten. Die Lage des TCPs im kartesischen Koordinatensystem und seine Orientierung ist eindeutig beschreibbar durch die Gelenkkoordinaten [WEB2009]. Dazu wird jedem Glied ein festes, orthogonales Koordinatensystem zugeordnet. Die Vorwärtskinematik beschreibt die Transformation über Matrizen von einem Koordinatensystem in das nächste bis hin zum Endeffektor [SIC2016]. Hierbei wird die Beschreibung der Transformation auf einen Satz von vier Parametern reduziert [COR2019b].

Für die Zuordnung der Koordinatensysteme wird die Konvention nach Denavit-Hartenberg (DH) verwendet. Die Zuordnung und Lage der Koordinatensysteme am in dieser Arbeit verwendeten Industrieroboter *ABB 6660/205-1.9* ist in Abbildung 6.1 abgebildet.

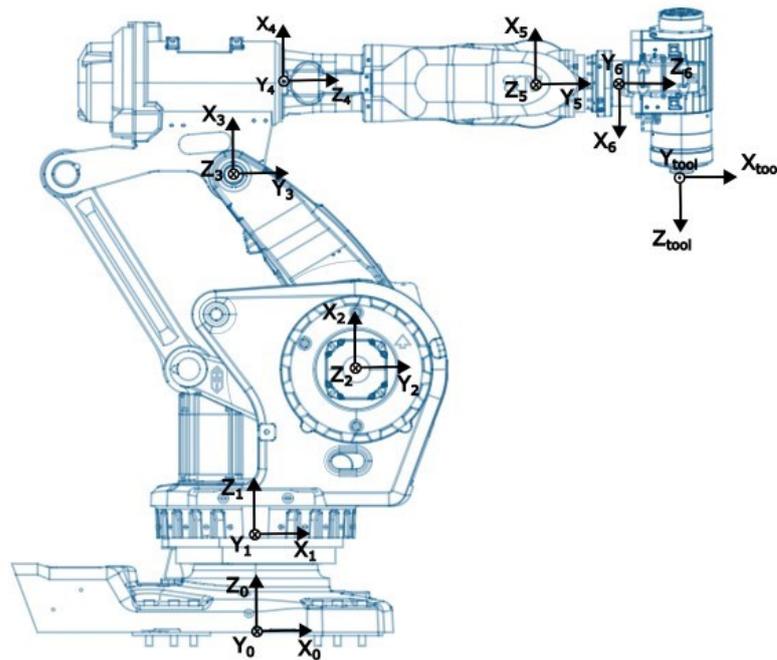


Abbildung 6.1: Lage der Koordinatensysteme für die Vorwärtskinematik.

Zur Beschreibung der Beziehungen der Koordinatensysteme zueinander, gibt es verschiedene Transformationsvorschriften, die unter anderem [RÖS2014] erläutert. Sie unterscheiden sich in den durchgeführten Einzeltransformationen, ihrer Reihenfolge und den verwendeten Parametern [RÖS2014].

Die Positionen und Orientierungen des TCPs werden über Transformationsmatrizen berechnet, die jeweils die Translation und Rotation von einem Koordinatensystem in das nächste der kinematischen Kette darstellen. Die rotatorischen und translatorischen

Beziehungen zwischen den Koordinatensystemen \mathbf{K}_i werden über die Transformationsmatrix \mathbf{T}_i beschrieben:

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{T}_i \cdot \mathbf{K}_{i-1} \quad (6.1)$$

Die Transformationsmatrix \mathbf{T}_i setzt sich hierbei aus einem rotatorischen und einem translatorischen Anteil zusammen.

Zum Aufstellen der Transformationsmatrix \mathbf{T}_i wird in dieser Arbeit die Konvention nach CRAIG genutzt, bei der es sich um eine modifizierte DH-Konvention handelt [CRA2013]. Die Modifizierung durch Veränderung der Reihenfolge der Einzeltransformationen ist notwendig, damit sich die Koordinatensysteme bei der Bewegung der entsprechenden Achsen mitdrehen [RÖS2014].

Um das Steifigkeitsverhalten der Gelenke der Vorwärtskinematik zu implementieren, ist es notwendig, dass die Nachgiebigkeit als Verdrehung der Gelenke eingeht. Dies ist nur möglich, wenn das Koordinatensystem im Gelenkpunkt definiert ist und die z-Achse mit der Gelenkachse übereinstimmt [RÖS2014]. Die in dieser Arbeit verwendeten Konvention nach CRAIG ist wie folgt aufgebaut [CRA2013]:

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{T}_R(\alpha_i) \cdot \mathbf{T}_T(a_i) \cdot \mathbf{T}_R(\tilde{\theta}_i) \cdot \mathbf{T}_T(d_i) \quad (6.2)$$

Die Transformationsmatrix \mathbf{T}_i setzt sich aus zwei Rotationen und zwei Translationen zusammen, beginnend mit der Rotation um den Winkel α_i um die x-Achse des jeweiligen Gelenkkoordinatensystems, worauf eine Translation entlang der x-Achse um den Abstand a_i erfolgt. Anschließend wird eine Rotation um den Winkel $\tilde{\theta}_i$ um die z-Achse des jeweiligen Gelenkkoordinatensystems durchgeführt, bevor die Translation mit dem Abstand d_i entlang der z-Achse erfolgt. Die Einzeltransformationen führen somit zur Transformationsmatrix \mathbf{T}_i :

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_i &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &\quad \cdot \begin{bmatrix} \cos(\tilde{\theta}_i) & -\sin(\tilde{\theta}_i) & 0 & 0 \\ \sin(\tilde{\theta}_i) & \cos(\tilde{\theta}_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.3) \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\tilde{\theta}_i) & -\sin(\tilde{\theta}_i) & 0 & a_i \\ \sin(\tilde{\theta}_i)\cos(\alpha_i) & \cos(\tilde{\theta}_i)\cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i)d_i \\ \sin(\tilde{\theta}_i)\sin(\alpha_i) & \cos(\tilde{\theta}_i)\sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & \cos(\alpha_i)d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Diese Transformationsmatrix wird für jedes Gelenk aufgestellt. In der Vorwärtskinematik werden für die Transformationen homogene Matrizen verwendet, da über diese die Translationen und Rotationen einfach integriert werden können.

Die Parameter α , a und d sind feste Parameter, die die Abstände und Verdrehungen der einzelnen Glieder in der kinematischen Kette des Robotersystems beschreiben, in dieser Arbeit die Lage der Gelenke zueinander. Dagegen setzt sich der Winkel $\tilde{\theta}$ aus einer konstanten, konstruktionsbedingten Rotation um die z-Achse θ und den veränderlichen Gelenkwinkeln q zusammen [CRA2013].

Zur Beschreibung der Lage des TCPs im kartesischen Koordinatensystem müssen die einzelnen Transformationsmatrizen \mathbf{T}_i der Gelenke multiplikativ verknüpft werden. Abschließend wird die Transformationsmatrix des Robotersystems um die Transformation vom Flansch des Roboters zum TCP erweitert, da an der Achse sechs des Robotersystems in der Regel ein Effektor angebracht ist, dessen Arbeitspunkt den TCP darstellt.

$$\mathbf{T}_{gesamt} = \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \dots \cdot \mathbf{T}_n \cdot \mathbf{T}_{tool} \quad (6.4)$$

Die Transformationsmatrix \mathbf{T}_{tool} beinhaltet neben den Rotationen und Translationen um die Achsen Z und X auch eine Rotation und Translation um die Achse Y um den Übergang vom Flansch zum TCP zu beschreiben und ist folgendermaßen aufgebaut:

$$\mathbf{T}_{tool} = \mathbf{T}_R(\alpha_{tool}) \cdot \mathbf{T}_T(a_{tool}) \cdot \mathbf{T}_R(\beta_{tool}) \cdot \mathbf{T}_T(y_{tool}) \cdot \mathbf{T}_R(\tilde{\theta}_{tool}) \cdot \mathbf{T}_T(d_{tool}) \quad (6.5)$$

Um den Industrieroboter *ABB IRB 6660 205/1.9* als offene kinematische Kette zu beschreiben, was Voraussetzung der Vorwärtskinematik ist, muss die Parallelkinematik durch eine Alternativbeschreibung dargestellt werden.

Die Parallelogrammstruktur des Roboters bildet eine geschlossene kinematische Kette, in der die Bewegung eines aktiven Gelenks auf ein passives Gelenk übertragen wird. Die Bewegung des Motors von Achse 2 beeinflusst die Gelenkwinkel der Achsen 2 und 3, wodurch die Orientierung des oberen Arms in Bezug auf das Weltkoordinatensystem konstant bleibt, wie Abbildung 6.2: zeigt. Dagegen führt die Bewegung des Motors der Achse 3 lediglich zu einem Kippen des oberen Arms um die Achse 3, analog zur offenen kinematischen Kette. Um den Industrieroboters *ABB IRB 6660* aus kinematischer Sicht wie eine serielle Struktur zu behandeln, wird ein aktives Gelenk an die Stelle des passiven Gelenks der Achse 3 gesetzt, sodass der Zusammenhang in Formel 6.6 gilt [COR2019b]. Dadurch verkippt der obere Arm mit der Bewegung des Motors der Achse 2, wie Abbildung 6.2 darstellt.

$$q_3 = \hat{q}_3 - q_2 \quad (6.6)$$

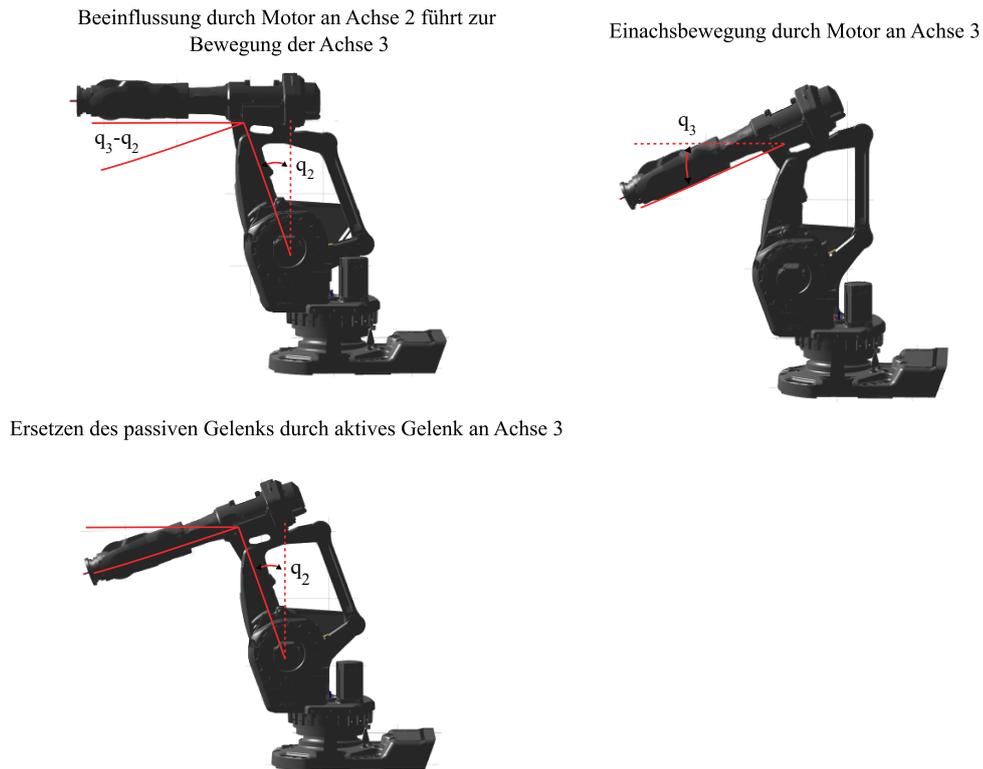


Abbildung 6.2: Kopplung der Achse 2 und 3. Links wird die Beeinflussung des Motors an Achse 2 auf den oberen Arm dargestellt, oben ohne, unten mit Ersatz des passiven Gelenks an Achse 3. Rechts ist die Bewegung des oberen Arms bei Bewegung des Motors 3 dargestellt.

6.2 Identifikation der festen DH-Parameter

Zur Identifikation der konstanten kinematischen Parameter α , a und d existieren diverse Ansätze. Die Parameter sind zum einen im Handbuch des Roboters beschrieben, zum anderen sind sie auch in der Steuerung des Industrieroboters hinterlegt [FAR2019]. Problematisch hierbei ist jedoch, dass die Werte aus dem Handbuch oft lediglich eine Annäherung an die realen Werte darstellen, da individuelle Abweichungen aufgrund von Ungenauigkeiten während der Fertigung und Montage auftreten und die realen Werte nicht exakt mit den Maßen aus dem Handbuch übereinstimmen. Vor der Auslieferung werden je nach Roboterhersteller auf Wunsch die Industrieroboter individuell kalibriert. Die kalibrierten und auf der Steuerung hinterlegten Werte sind, aufgrund der geschlossenen Steuerung, in der Regel nicht zugänglich [FAR2019].

Die konstanten Parameter der Transformationsmatrix des Robotersystems werden in dieser Arbeit auf Grundlage des Vorgehens von [FAR2019] identifiziert.

Dieser Ansatz beginnt mit der Bestimmung der Lage und Ebene der einzelnen Bewegungsachsen und somit der Gelenke. Anschließend werden die DH-Parameter über die Berechnung der relativen Lage zueinander bestimmt.

Zur Identifikation der Bewegungsachsen der Gelenke wird jedes Gelenk sequenziell einzeln um seine Achse bewegt, sodass eine kreisförmige Bewegung des TCPs entsteht.

Die Punkte p des TCPs werden im Base-Koordinatensystem des Roboters aufgezeichnet und aus der Steuerung extrahiert. Die Bewegungsgeschwindigkeit der Gelenke sollte konstant sein, sodass die aufgezeichneten Punkte p gleichmäßig über die Bahn verteilt sind. Da eine Bewegung vollständige Umdrehung der Achsen um 360° nicht möglich ist, werden lediglich Teilbewegungen der kreisförmigen Bahn ausgeführt.

In dieser Arbeit werden für jedes Gelenk 400 Punkte über eine Bahn aufgezeichnet, bei der die Gelenkwinkel jeder Achse von 0° bis 175° bewegt werden. Für jedes Gelenk wird eine Trajektorie aufgezeichnet, sodass n Trajektorien erzeugt werden. Die Aufzeichnung der Punkte erfolgt virtuell über die Robotersteuerung, um eventuelle Kollisionen zu vermeiden und um nicht durch die kinematischen Gelenkwinkelgrenzen eingeschränkt zu werden.

Aus den aufgezeichneten Punkten wird zunächst die Ebene definiert, die die Lage der Punkte bestmöglich für das jeweilige Gelenk abbildet. Durch die orthogonale Distanzregression wird eine Ebene an die extrahierte Punktwolke angepasst. Ziel hierbei ist die Minimierung der orthogonalen Abstände d_j zwischen den einzelnen Punkten und der Ebene.

Diese Ebene wird definiert durch den Normalenvektor \mathbf{n} und dem auf der Ebene liegenden Punkt \mathbf{c} , der den Schwerpunkt der aufgezeichneten Punkte bildet sodass

$$d_j = (\mathbf{p}_j - \mathbf{c}) \cdot \mathbf{n} \quad (6.7)$$

Die bestmöglich an die aufgezeichneten Punkte angepasste Ebene wird durch die Minimierung der orthogonalen Abstände definiert

$$\min_n \sum_{j=1}^m d_j^2 \quad (6.8)$$

Mit

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} p_1 - c \\ \vdots \\ p_m - c \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Folgt daraus

$$n := \arg \min_{\substack{n \in \mathbb{R}^3 \\ |\mathbf{n}|=1}} \|\mathbf{W}\mathbf{n}\|^2 \quad (6.10)$$

Über die Singulärwertzerlegung der Matrix \mathbf{W} folgt

$$\|\mathbf{W}\mathbf{n}\|^2 = \|\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T\mathbf{n}\|^2 \quad (6.11)$$

Die Singulärwertzerlegung wird zur Zerlegung von Matrizen verwendet, wobei die Matrix $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ und $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ orthogonal sind und jeweils die Richtung der Basisvektoren angeben, während $\mathbf{\Sigma} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ diagonal ist [PÜT1994]. Die Diagonalmatrix $\mathbf{\Sigma}$ enthält die Singulärwerte σ_1, σ_2 und σ_3 der Matrix \mathbf{W} , die nach absteigender Größe sortiert sind.

Damit ergibt sich das Minimierungsproblem

$$n := \arg \min_{\substack{n \in \mathbb{R}^3 \\ |\mathbf{n}|=1}} [(\sigma_1 h_1)^2 + (\sigma_2 h_2)^2 + (\sigma_3 h_3)^2] \quad (6.12)$$

Mit

$$\mathbf{h} = \mathbf{V}^T \mathbf{n} \quad (6.13)$$

Dieses Problem wird minimiert für $\mathbf{h}_{min} = [0,0,1]^T$, da σ_3 der kleinste Singulärwert ist, sodass gilt:

$$\mathbf{n} := \mathbf{V} \mathbf{h}_{min} \quad (6.14)$$

Die Richtung von \mathbf{n} wird definiert über

$$\mathbf{n} = \begin{cases} \mathbf{n}, & \text{falls } \mathbf{n} \cdot (\mathbf{p}_m \times \mathbf{p}_1) \geq 0 \\ -\mathbf{n}, & \text{falls } \mathbf{n} \cdot (\mathbf{p}_m \times \mathbf{p}_1) < 0 \end{cases} \quad (6.15)$$

Damit ist die Ebene definiert, die am besten die aufgezeichnete Punktwolke je Gelenk beschreibt [FAR2019]. Aufbauend auf der definierten Ebene wird anschließend der Kreis definiert, der die jeweils aufgezeichneten Punkte am besten beschreibt. Über die Rodrigues Rotationsformel werden zunächst alle Punkte p auf die identifizierte Ebene projiziert [SIC2016]. Aus den projizierten Punkten \mathbf{p}_n wird im zweidimensionalen Raum ein Kreis approximiert. Ein beliebiger Punkt auf dem Kreis, der Kreismittelpunkt k (x_c, y_c) und der Radius r stehen in folgendem Verhältnis:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r^2 \quad (6.16)$$

Aufgelöst nach x und y ergibt sich

$$(2x_c)x + (2y_c)y + (-x_c^2 - y_c^2 + r^2) = x^2 + y^2 \quad (6.17)$$

Diese Gleichung kann in ein lineares System erster Ordnung überführt werden mit den aufgezeichneten und auf die Ebene projizierten Punkten $\mathbf{p}_{n,j} = (x_j, y_j, 0)^T$ zu

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (6.18)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_j & y_j & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 2x_c \\ 2y_c \\ -x_c^2 - y_c^2 + r^2 \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ \vdots \\ x_j^2 + y_j^2 \end{bmatrix}$$

Dieses System wird anschließend über die Methode der kleinsten Quadrate durch Minimierung des Residuums gelöst

$$\min_x \|\mathbf{b} - \mathbf{Ax}\|^2 \quad (6.19)$$

Somit ist der Kreismittelpunkt \mathbf{c} der jeweiligen Punkte definiert, der abschließend noch in den dreidimensionalen Raum transformiert werden muss. Somit sind für jedes Gelenk der Gelenkmittelpunkt sowie die Ebene bestimmt.

Die aufgezeichneten und projizierten Punkte \mathbf{p}_n sowie die berechneten Mittelpunkte \mathbf{c} sind für den in dieser Arbeit verwendeten Roboter in Abbildung 6.3 dargestellt.

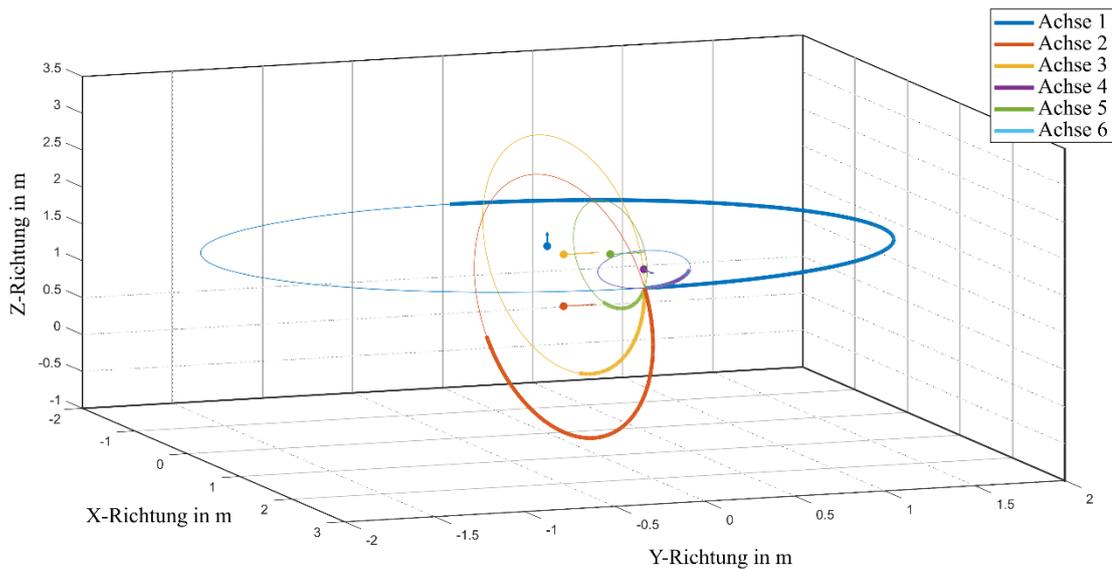


Abbildung 6.3: Identifizierte Kreisbahnen der einzelnen Gelenke des Industrieroboters ABB 6660-205/1.9.

Nachdem der Vektor \mathbf{n} und der Punkt \mathbf{c} für das jeweilige Gelenk i im Base-Koordinatensystem des Roboters identifiziert sind, können die Denavit-Hartenberg Parameter bestimmt werden.

Das Vorgehen besteht aus zwei Schritten, zunächst werden die relativen Koordinatensysteme der einzelnen Gelenke bestimmt, bevor daraus die eigentlichen DH-Parameter identifiziert werden.

Die schon identifizierten Parameterpaare n_i und c_i formen die Basis für die Linie S_i , die in der Drehachse des jeweiligen Gelenks i liegen, sie bilden die z_i Achse.

Zur Festlegung der x_i Achse wird die Lage der Achsen z_{i-1} und z_i zueinander untersucht. Dabei sind folgende Fälle zu unterscheiden

- Falls z_{i-1} und z_i sich schneiden, liegt die Achse x_i in Richtung der Normalen der von z_{i-1} und z_i aufgespannten Ebene
- Falls z_{i-1} und z_i parallel oder windschief sind, liegt die x_i -Achse in Richtung der gemeinsamen Normalen von z_{i-1} und z_i durch den Ursprung von S_i , sodass die x_i -Achse die z_{i-1} -Achse schneidet.

Die y_i -Achse wird anschließend anhand der z_i -Achse und x_i -Achse festgelegt, sodass ein Rechtskoordinatensystem entsteht [WEB2009].

Damit sind die Koordinatensysteme des Robotersystems festgelegt und die Parameter α_i , a_i , d_i und θ_i können bestimmt werden.

Zur Bestimmung von d_i wird der Abstand der Gelenkpunkte \mathbf{f}_i , die über \mathbf{n}_i und \mathbf{c}_i berechnet werden, in z_i -Richtung berechnet

$$d_i = (\mathbf{f}_{i+1} - \mathbf{f}_i) \cdot \mathbf{z}_i \quad (6.20)$$

Die Identifikation von θ_i erfolgt über den Winkel zwischen den x -Achsen der aufeinanderfolgenden Koordinatensysteme. Der Winkel θ_i bezieht sich dabei auf die z_i -Achse

$$\Theta_i = \text{atan}^2((x_i \times x_{i+1}) \cdot z_i, x_i \cdot x_{i+1}) \quad (6.21)$$

Zur Bestimmung von α_i wird der Winkel zwischen der z-Achse des vorherigen und des aktuellen Koordinatensystems um die gemeinsame Normale berechnet über

$$\alpha_i = \text{atan}^2((z_i \times z_{i+1}) \cdot x_i, z_i \cdot z_{i+1}) \quad (6.22)$$

Der Abstand a_i wird ist der Abstand der Gelenkpunkte in x-Richtung und wird berechnet über

$$a_i = (k_{i+1} - k_i) \cdot x_{i+1} \quad (6.23)$$

Die über dieses Verfahren berechneten DH-Parameter sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1: Berechnete DH-Parameter.

Gelenk	d_i (mm)	a_i (mm)	α_i (rad)	Θ_i (rad)
1	813,675	0	0	0
2	-0,324	300,283	-1,570011	-1,5717
3	0,523	700,371	0	0
4	892,685	280,422	-1,570767	0
5	0	-1,142	1,57109	0
6	200,368	0,209	0	3,1416

Der Vergleich mit den DH-Parametern aus dem Handbuch des Roboters, siehe Tabelle 6.2, zeigt, dass die Werte sehr dicht beieinander liegen.

Tabelle 6.2: Aus der Dokumentation des Roboters entnommene DH-Parameter [ABB2017].

Gelenk	d_i (mm)	a_i (mm)	α_i (rad)	Θ_i (rad)
1	814,5	0	0	0
2	0	300,0	-1,5708	-1,5708
3	0	700,0	0	0
4	893,0	280	-1,5708	0
5	0	0	1,5708	0
6	200,0	0	0	3,1416

Die größte Abweichung liegt mit 0,825 mm im Bereich unter einem Millimeter. Da sich die Fehler jedoch entlang der Roboterstruktur aufsummieren, werden die identifizierten DH-Parameter verwendet. Die identifizierten DH-Parameter werden in die aufgestellten Transformationsmatrizen eingesetzt, woraus sich die Vorwärtstransformation ergibt.

6.3 Erweiterung der Vorwärtstransformation um die Nachgiebigkeit

Die aufgestellte Vorwärtstransformation beschreibt die kartesischen Koordinaten und die Orientierung des TCPs im Base-Koordinatensystem des Roboters ohne Einfluss von Störungen, wie beispielsweise dem Anliegen einer statischen Kraft.

Um die Verlagerung des TCPs aufgrund der Nachgiebigkeit des Robotersystems zu beschreiben, wird die elastische Nachgiebigkeit der einzelnen Gelenke als Auslenkung

dargestellt. In dieser Arbeit wird angenommen, dass die Hauptnachgiebigkeiten der Roboterstruktur aus der Drehsteifigkeit der Gelenke resultieren. Daher werden die Strukturnachgiebigkeiten und Kippnachgiebigkeiten der Gelenke vernachlässigt und nur die Drehsteifigkeiten der Gelenke in der Modellierung berücksichtigt.

Zur Implementierung der Auslenkung der Gelenke in Drehrichtung wird die Vorwärtstransformation um eine Rotation im Gelenk erweitert, die die elastische Verformung des Gelenks in Abhängigkeit der Gelenknachgiebigkeit darstellt. Dabei wird die Verformung der Getriebe unter Last als linear angenommen, sodass von konstanten Steifigkeitsparametern ausgegangen wird und die Modellierung durch lineare Drehfedern erfolgen kann [RÖS2014].

Die Verdrehung der Gelenkwinkel Δq_i aufgrund der Krafteinwirkung werden als elastische Verformung analog zum Modell einer elastischen Drehfeder, betrachtet, sodass sie mit Hilfe der Steifigkeitskennwerte k_i berechnet werden können über

$$\Delta q_i = \frac{M_{\Theta_i}}{k_i}, \quad (6.24)$$

angelehnt an die allgemeine Formel für lineare Drehfedern. M_{Θ_i} beschreibt das auf das Gelenk wirkende Moment aufgrund der am TCP wirkenden Prozesskraft.

Die Transformationsmatrizen der einzelnen Gelenke werden um eine rotatorische Transformation erweitert, die eine Verdrehung der Gelenke auf Grund der Krafteinwirkung darstellt, sodass

$$\tilde{\mathbf{T}}_i = \mathbf{T}_i \cdot \mathbf{T}_R(\Delta q_i) \quad (6.25)$$

Wobei

$$\mathbf{T}_R(\Delta q_i) = \begin{bmatrix} \cos(\Delta q_i) & -\sin(\Delta q_i) & 0 & 0 \\ \sin(\Delta q_i) & \cos(\Delta q_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

Die vorliegenden Kräfte, die an der Achse sechs zwischen Roboterstruktur und Endeffektor gemessen werden, liegen im Koordinatensystem des TCPs vor. Daher muss die auf den TCP wirkende Prozesskraft zunächst in das Gelenkkkoordinatensystem transformiert werden [HÄH2020b]. Hierfür wird der Rotationsanteil \mathbf{R}_i der Transformationsmatrix vom Gelenk i bis zum TCP berechnet und mit der wirkenden Prozesskraft multipliziert

$$\vec{\mathbf{F}}_i = \vec{\mathbf{R}}_i \cdot \vec{\mathbf{F}}_{TCP} \quad (6.27)$$

Hieraus lässt sich über den Verbindungsvektor aus der Transformationsmatrix zwischen Gelenk und TCP das auf das Gelenk wirkende Moment berechnen.

$$\mathbf{M}_i = \vec{\mathbf{T}}_i \times \vec{\mathbf{F}}_i \quad (6.28)$$

Da in dieser Arbeit die Drehnachgiebigkeiten der Gelenke als Hauptursache für die Nachgiebigkeit gesehen wird, wird nur der Anteil des Moments berücksichtigt, der in Drehrichtung des Gelenks q_i wirkt. Δq_i ist hierbei von dem Steifigkeitskennwert k_i abhängig. Es wird von einer linearen Abhängigkeit und somit von konstanten Steifigkeitsparametern ausgegangen. Wird eine Nichtlinearität der Steifigkeitsparameter

angenommen, erhöht dies die Komplexität des Systems deutlich, führt jedoch nur zu geringen Genauigkeitssteigerungen [RÖS2014].

Die Berechnung der tatsächlichen Lage und Orientierung des TCPs unter Prozesskraft findet analog zur Berechnung durch die Vorwärtskinematik statt, jedoch mit Erweiterung um die Auslenkung aufgrund der begrenzten Steifigkeit der Gelenke.

$$\tilde{T}_i = T_1 \cdot T_{R1}(\Delta\theta_1) \cdot T_2 \cdot T_{R2}(\Delta\theta_2) \cdot \dots \cdot T_n \cdot T_{Rn}(\Delta\theta_n) \cdot T_{tool} \quad (6.29)$$

Die Abdrängung des TCPs wird aus dem Ergebnis der Vorwärtstransformation, in der der TCP des unbelasteten Systems TCP_{soll} und dem Ergebnis der erweiterten Transformation TCP_{ist} berechnet über

$$\Delta TCP = TCP_{ist} - TCP_{soll} \quad (6.30)$$

Zur Identifikation der Steifigkeitsparameter k_i gibt es verschiedene Ansätze, wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben. Diese sind je nach Ansatz unterschiedlich aufwendig und genau. Im folgenden Kapitel wird eine Vorgehensweise für die Identifikation der Steifigkeitsparameter erläutert, die auf der Optimierung des Versuchsaufbaus beruht.

6.4 Identifikation der Steifigkeitsparameter

Zur Identifikation der Steifigkeitsparameter wird der Ansatz des optimalen Versuchsaufbaus über die Bayessche Inferenz genutzt. Hierbei werden in mehreren Versuchen die Verschiebung des TCPs unter definierter Last gemessen und anschließend aus den gewonnenen Daten die Steifigkeitsparameter abgeschätzt. Dafür wird im Vorfeld über ein optimales Versuchsdesign der beste Versuchsaufbau mit dem höchsten Informationsgehalt ausgewählt. Das genaue Vorgehen ist in [TEP2023c] beschrieben.

Zur Messung der Verlagerung des TCPs unter Last, wird der TCP mit einer definierten Kraft belastet und die Verschiebung des TCPs gemessen. Die Messungen werden an einer Position auf dem Arbeitstisch ausgeführt, die eine typische Arbeitsposition für die spanende Bearbeitung repräsentiert.

Um eine definierte statische Last aufzubringen, wird ein Pneumatikzylinder verwendet, der über einen Kraftsensor verfügt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6.4 zu sehen.

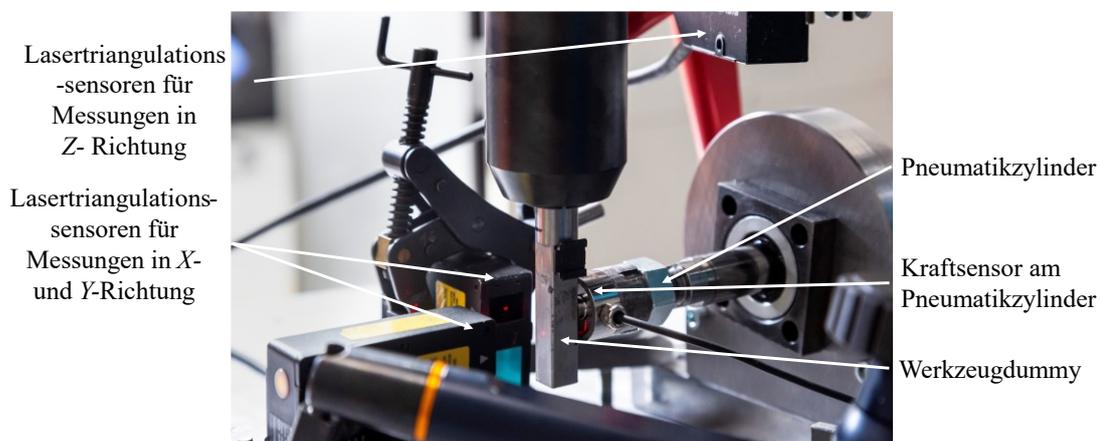


Abbildung 6.4: Versuchsaufbau zur Messung der Verschiebung unter Last.

Zur Messung der Verlagerung des TCPs werden drei Lasertriangulationssensoren des Typs *LK-G32* verwendet, die über einen Messbereich von ± 5 mm verfügen und eine Genauigkeit von $1 \mu\text{m}$ haben [KEY2016]. Sie messen die Verlagerung in den drei Raumrichtungen und sind anhand des Base-Koordinatensystems ausgerichtet. Die durch den Pneumatikzylinder aufgebrachte Last wird neben dem Kraftsensor am Pneumatikzylinder auch vom am Robotersystem implementierten Kraftsensor gemessen, um die Richtung der aufgebrachten Kraft auf die Roboterstruktur zu identifizieren. Die Vorteile dieses Messaufbaus liegen im schnellen und unkomplizierten Aufbau. Es wird nur wenig Messequipment benötigt und es sind keine Umbauten des Robotersystems erforderlich. Zudem werden keine auf der Robotersteuerung liegenden Kompensationen oder Kalibrierungen des Robotersystems verändert bzw. deaktiviert. Insgesamt ist der Messaufbau einfach und kostengünstig gestaltet.

Im Vorfeld der Messungen muss zunächst der bestmögliche Versuchsaufbau in Form von zu vermessenen Posen identifiziert werden. Nach Abschluss der Versuche werden auf Grundlage der ermittelten Daten die Steifigkeitsparameter abgeschätzt, wie in [TEP2023c] näher beschrieben. Das Ziel dieses Vorgehens besteht darin, durch die Identifikation eines bestmöglichen Versuchsaufbaus die Anzahl der notwendigen Versuche zu reduzieren. Der Informationsgewinn pro Versuch wird maximiert, wodurch eine deutlich geringere Anzahl an Versuchen benötigt wird. Der hierfür verwendete Ansatz basiert auf der optimalen Versuchsplanung zur varianzminimalen Bayesschen Inferenz. Aus den Daten des identifizierten Versuchsaufbaus werden nach den Versuchen die Steifigkeitsparameter mit minimaler Varianz abgeschätzt [STU2010]. Da der Messvorgang mit Unsicherheiten behaftet ist, sind auch die geschätzten Parameter mit Unsicherheiten behaftet. Daher wird der Versuchsaufbau so optimiert, dass die mittels der Kovarianzmatrix quantifizierten Unsicherheiten der geschätzten Steifigkeitsparameter minimal wird. Auf Grundlage der Messdaten aus den optimierten Versuchsaufbau werden anschließend die Nachgiebigkeitsparameter in einem Bayesschen Rahmen abgeleitet.

Durch die Bayessche Inferenz kann eine Abschätzung der Parameterwerte angegeben werden, die dem wahrscheinlichsten Wert der Parameter möglichst nahe kommt [TSC2014]. Für diesen Ansatz werden Vorabinformationen mit den aus den Versuchen stammenden Daten verbunden, um neu zu bewerten, wie plausibel Aussagen über die abgeschätzten Werte sind [BÄT2017].

Der wesentliche Unterschied der Bayes Statistik gegenüber der klassischen geschlossenen Statistik ist, dass hier zum Schätzen nicht nur Stichproben zum Testen von Hypothesen verwendet werden, sondern auch zusätzliche Informationen in die Betrachtung einbezogen werden [TSC2014].

Dafür muss zunächst das Bayessche Rahmenwerk definiert werden. Dieses besteht aus dem anfänglichen Wissen oder aus Annahmen über die Verteilung der Parameter, Priorwissen oder Prior π_0 genannt [BÄT2017]. Die Likelihood Verteilung $\pi(\mathbf{z}|\mathbf{k})$ beschreibt, wie plausibel beziehungsweise wahrscheinlich die gemessenen Werte sind für bekannte Parameterwerte.

Die A posteriori-Verteilung $\pi(\mathbf{k}|\mathbf{z})$ ist die aktualisierte Wahrscheinlichkeitsverteilung der gesuchten Parameter, in diesem Fall der Steifigkeitsparameter \mathbf{k} , basierend auf den Daten \mathbf{z} und dem Prior. Er wird durch die Anwendung des Bayesschen Theorems berechnet und gibt die Wahrscheinlichkeit für den Wahrheitsgehalt der Parameterwerte an in Anbetracht der verfügbaren Daten.

Die Bayessche Inferenz wird über die posterior Wahrscheinlichkeitsverteilung $\pi(\mathbf{k}|\mathbf{z})$ der Steifigkeitswerte für gegebene Daten aufgestellt, sodass gilt

$$\begin{aligned}\pi(\mathbf{k}|\mathbf{z}) &= C\pi(\mathbf{z}|\mathbf{k})\pi_0 \\ &= C\exp\left(-\frac{1}{2}\|\mathbf{z} - \boldsymbol{\eta}(\mathbf{k}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\beta})\|_{\boldsymbol{\Sigma}^{-1}}^2 - \frac{\gamma}{2}\|\mathbf{k} - \mathbf{k}_0\|_{\Gamma_0^{-1}}^2\right)\end{aligned}\quad (6.31)$$

wobei C eine Normierungskonstante ist und $\boldsymbol{\eta}$ die erweiterte Vorwärtskinematik darstellt und $\boldsymbol{\beta}$ Konstanten der erweiterten Vorwärtskinematik.

Der dafür notwendige Zusammenhang zwischen Messdaten \mathbf{z} , Steifigkeitsparametern \mathbf{k} und den Eingangsvariablen \mathbf{u} stellt in dieser Arbeit die aufgestellte erweiterte Vorwärtskinematik dar. Sie bildet die Steifigkeitsparameter sowie die Eingangsgrößen Achswinkel und Kraft auf die dreidimensionalen Verschiebungen des TCPs ab, die als Messdaten aus dem Versuchsaufbau ermittelt werden. Der optimale Versuchsaufbau ist durch Änderung der Orientierung des TCPs bei gleichbleibender Position des TCPs gekennzeichnet. Optimiert werden daher die Achsstellungen des Roboters q_i und die aufgebrachte Kraft F in den Versuchen, sodass der Informationsgewinn der Versuche optimiert wird und die Unsicherheit der abgeschätzten Steifigkeitsparameter k_i minimal wird.

Die Posteriorwahrscheinlichkeitsverteilung ist abhängig von der Kovarianzmatrix \mathbf{C}_{post} . Die Kovarianzmatrix des Posteriors ist eine quadratische Matrix, die die Varianz und die Korrelationen zwischen den geschätzten Parametern und somit die Informationen über die Unsicherheit der geschätzten Parameter enthält, basierend auf den verfügbaren Daten und dem anfänglichen Wissen, dem Prior. Die Kovarianzmatrix \mathbf{C}_{post} quantifiziert die Abhängigkeit zwischen den Parametern und gibt an, wie genau die einzelnen Parameter geschätzt werden können. Die Kovarianzmatrix des Posteriors gibt somit Einblick in die Unsicherheit der geschätzten Parameter und ermöglicht es, Konfidenzintervalle und weitere statistische Aussagen über die geschätzten Parameter zu machen. Eine Kovarianzmatrix mit niedrigen Werten deutet auf eine geringere Unsicherheit und eine genauere Schätzung der Parameter hin.

Der Maximum a Posterior (MAP) Schätzer ist ein Punkt in einem Parameterschätzproblem, der den wahrscheinlichsten Wert für die unbekannt Parameter basierend auf den vorliegenden Daten und dem anfänglichen Wissen (Prior) liefert. Durch die MAP-Schätzung wird folglich das Maximum der Wahrscheinlichkeitsverteilung ermittelt, wodurch der wahrscheinlichste Wert der Parameter ermittelt wird [TSC2014].

Um den bestmöglichen Versuchsaufbau zu identifizieren, wird die Kovarianzmatrix minimiert. Die Minimierung erfolgt über die Spur der Kovarianzmatrix Ψ , damit die

Komplexität der Berechnung reduziert und ein ungünstiges Optimierungsproblem vermieden wird.

$$\Psi_A = \text{Spur}(\mathbf{C}_{post}) \quad (6.32)$$

Als Anfangsdaten werden die Anfangswerte \mathbf{k}_0 aus der Arbeit von [COR2019b] genommen, der ein Steifigkeitsmodell für den gleichen Robotertyp erstellt hat. Die Werte sind dargestellt in Tabelle 6.3.

Tabelle 6.3: Anfangsdaten für \mathbf{k}_0 aus [COR2019b]

Gelenk	1	2	3	4	5	6
Steifigkeitswerte $k_0 \cdot 10^6 \left[\frac{Nm}{rad} \right]$	2,03	6,02	1,91	0,45	0,22	0,07

Das allgemeine Minimierungsproblem sieht wie folgt aus:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}} \Psi_A[\mathbf{C}_{post}(\mathbf{k}_0, \mathbf{u})] \\ \text{s. t. } \mathbf{u}_{min} \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}_{max} \\ \mathbf{g}(\mathbf{u}) \leq 0 \\ \mathbf{h}(\mathbf{u}) = 0 \end{aligned} \quad (6.33)$$

Die Bedingungen für die Eingangsvariablen \mathbf{u} sind zum einen durch die Einschränkungen der einzelnen Achswinkel gegeben, die hier mit $\pm 180^\circ$ angenommen werden, sowie dem maximalen Winkel ϕ . Berechnet wird der Winkel mittels des Vektors $\vec{\mathbf{r}}_{Flansch}$, dem Verbindungsvektor zwischen Flansch und TCP der ursprünglichen Ausrichtung und dem Verbindungsvektor $\vec{\mathbf{r}}_{new}$ zwischen dem Flansch der ursprünglichen Ausrichtung und dem Flansch der neuen Umorientierung. Dieser wird auf maximal $\pm 80^\circ$ festgelegt, da dies der maximale Winkel ist, der vom Robotersystem für die Fräsbearbeitung erreichbar ist. Der Winkel ϕ wird berechnet über:

$$\phi = \arccos \left(1 - \left(\frac{(|\vec{\mathbf{r}}_{new}|)^2}{2(|\vec{\mathbf{r}}_{Flansch}|)^2} \right) \right) \quad (6.34)$$

Weitere Einschränkungen der Eingangsvariablen sind für die Kräfte gegeben. Die durch den Pneumatikzylinder auf den TCP aufgebrachten Minimal- und Maximalkräfte werden definiert als -300 N und +300 N, gegeben aus dem Versuchsaufbau.

Aus diesem Optimierungsproblem mit den beschriebenen Eingangsvariablen und Bedingungen werden die Achswinkel des Robotersystems für den bestmöglichen Versuchsaufbau berechnet. Um den Lösungsraum einzuschränken und die Rechenzeit des Optimierungsprogramms deutlich zu reduzieren, wird eine kartesische Position festgelegt, über die das Optimierungsprogramm die Orientierungen des TCPs optimiert. Der abgeschätzte optimierte Versuchsaufbau unter Beibehaltung der kartesischen Position enthält vier verschiedene Orientierungen des Endeffektors und umfasst insgesamt fünf Messungen. Drei Messungen mit verschiedenen Orientierungen werden unter Kraftereinwirkung in Y-Richtung des Weltkoordinatensystems durchgeführt und

zwei Messungen unter verschiedenen Orientierungen des TCPs unter Belastung in X-Richtung des Weltkoordinatensystems. Eine Pose ist für die Messung in Krafrichtung X- und Y-Richtung identisch, weshalb nur vier Orientierungen untersucht werden. Eine beispielhafte Messung einer Orientierung und unter Belastung in Y-Richtung ist in Abbildung 6.5 dargestellt.



Abbildung 6.5: Messung der Verschiebung unter Last in Y-Richtung für eine berechneten Orientierung.

Für jeden Versuch werden die Verschiebungsdaten aus den Lasersensoren, die Kraftdaten aus dem Pneumatikzylinder und die Kraftdaten aus dem Robotersystem in *Matlab* verarbeitet und synchronisiert. Die Daten werden für jede Orientierung und jede Richtung der Krafteinwirkung abgespeichert, sodass nach den Versuchen fünf Datensets zur Verfügung stehen.

Diese Daten werden anschließend als Eingangsdaten für die Abschätzung der tatsächlichen Steifigkeitsparameter mittels der Bayeschen Inferenz verwendet. Diese Abschätzung wird mehrmals mit verschiedenen Anzahlen an Datensets durchgeführt. Drei Berechnungen werden hier beispielhaft vorgestellt. Zum einen die Abschätzung auf Basis aller fünf Datensets, als zweites die Abschätzung der Datensets, die nur unter Krafteinwirkung in Y-Richtung und als drittes die Abschätzung auf Basis der zwei Messungen mit Krafteinwirkung in X-Richtung. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 6.4 dargestellt.

Tabelle 6.4: Berechnete Steifigkeitswerte in $k_i \cdot 10^6$ [Nm/rad]

Gelenk	Steifigkeitswerte $k_0 \cdot 10^6$ $\left[\frac{Nm}{rad}\right]$					
	1	2	3	4	5	6
Berechnet aus allen Messungen	0,96	6,023	1,569	2,965	0,271	0,041
Berechnet aus Messungen mit Belastung in Y-Richtung	0,312	6,017	0,596	1,761	0,313	1,297
Berechnet aus Messungen mit Belastung in X-Richtung	1,998	6,038	2,473	0,418	0,195	0,07

Die abgeschätzten Steifigkeitsparameter unterscheiden sich deutlich voneinander. Während beispielsweise das Parameterset der Krafteinwirkung in X-Richtung dem Initialparameterset aus Tabelle 6.3 ähnelt, weichen die zwei anderen Parametersets stärker davon ab. Dies lässt sich durch die unterschiedlichen Belastungen in den Versuchen erklären. Beispielsweise wird bei der Belastung in X-Richtung die Achse sechs nicht belastet, weshalb keine Informationen über dieses Gelenk in den Daten der Messungen enthalten sind. Daher ist der Steifigkeitswert hier identisch mit den Initialparameter ist.

6.5 Validierung des aufgestellten Steifigkeitsmodells

Zur Validierung der abgeschätzten Steifigkeitsparameter wird die Verschiebung des TCPs unter einer Last von 500 N an verschiedenen Stellen im Arbeitsbereich gemessen. Gleichzeitig wird für die verschiedenen Parametersets die Abweichung über das Steifigkeitsmodell berechnet und vorhergesagt. So können im Nachgang gemessene und berechnete Werte verglichen werden.

Die gemessenen und abgeschätzten Verschiebungen unter Last sind in Abbildung 6.6 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Verschiebungen des TCPs in Y-Richtung besser vorhergesagt werden als die Verschiebungen in X-Richtung. Dies lässt sich durch die höhere Anzahl an Versuchen in Y-Richtung und der größeren Verschiebung erklären. Zudem wurden bei der Belastung in Y-Richtung mehr Gelenke belastet, wodurch der Informationsgehalt dieser Versuche höher ist.

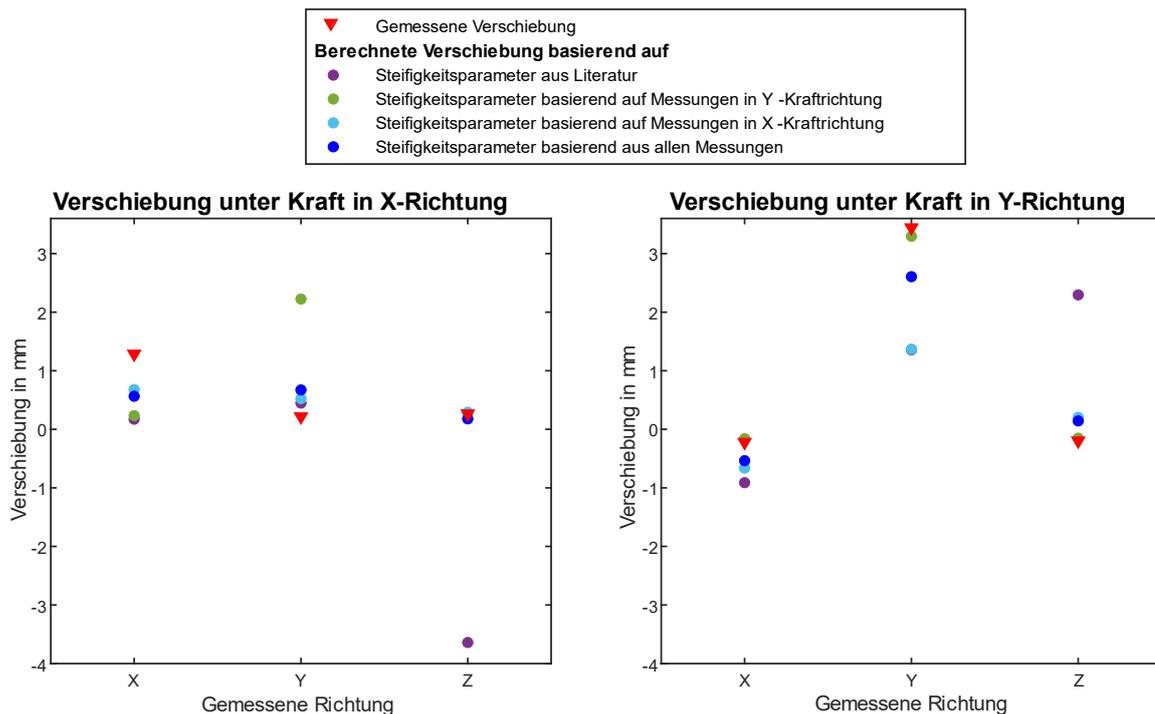


Abbildung 6.6: Mit unterschiedlichen Steifigkeitsparametern berechnete Verschiebungen im Vergleich mit gemessenen Verschiebungen unter einer Last von 500 N in die jeweilige Richtung.

Weiter zeigt sich in den Validierungsversuchen, dass die über die Optimierung abgeschätzten Steifigkeitsparameter bessere Vorhersagen erzielen als die Steifigkeitsparameter aus der Literatur.

Insgesamt erzielen die abgeschätzten Steifigkeitsparameter basierend auf den Daten aus allen Versuchen und den Versuchen in Y-Richtung die genauesten Vorhersagen, während die Berechnungen auf Grundlage der Steifigkeitsparameter aus der Literatur die schlechtesten Vorhersagen erzielen. Jedoch treten Abweichungen zwischen Vorhersage und Messung von bis zu 0,6 mm auf.

Diese Ergebnisse spiegeln sich auch in den Kovarianzmatrizen wider. Die Kovarianzmatrizen der Abschätzung der Steifigkeitsparameter auf Grundlage der Versuche in X-Richtung haben die höchsten Werte, während die für die Abschätzung basierend auf den Versuchen in Y-Richtung in aller Versuche die kleinsten Werte beinhalten. Allgemein haben die Steifigkeitsparameter, die über die Kovarianzmatrix mit den geringsten Werten verfügen, die geringsten Abweichungen von den tatsächlichen Verschiebungen des TCPs unter Last. Die Ergebnisse zeigen, dass der implementierte Ansatz valid ist und mit den berechneten Kovarianzmatrizen eine Schätzung der Qualität der ermittelten Steifigkeitsparametersets vorgenommen werden kann. Daher hilft dieser Ansatz, die Steifigkeitsparameter durch Verwendung eines einfachen Experimentalaufbaus zu identifizieren.

Im Vergleich zum Vorgehen bei [COR2019b] konnte die Anzahl der Versuche um 75 % reduziert werden.

6.6 Fazit

Das erstellte Steifigkeitsmodell dient zur Abschätzung der Verschiebungen des TCPs unter statischer Last. Die statische Nachgiebigkeit ist die Hauptursache für die reduzierte Genauigkeit des roboterbasierten Fräsprozesses.

Über den hier vorgestellten Ansatz können die Steifigkeitsparameter der Gelenke abgeschätzt werden, ohne dass ein komplexer und aufwendiger Versuchsaufbau benötigt wird. Im Vergleich zu anderen Arbeiten kann die Anzahl der Versuche und es Aufwands deutlich reduziert werden. Der Ansatz führt zu einer geringen Anzahl an notwendigen Versuchen bei gleichzeitiger Erhöhung des Informationsgewinns je Versuch.

Das hier vorgestellte Vorgehen kann ohne großen messtechnischen Aufwand auf verschiedene Robotermodelle und individuelle Konfigurationen übertragen werden. Oftmals können Steifigkeitsmodelle gleicher Robotermodelle nicht übertragen werden, wie auch die Validierung zeigt, da unterschiedliche Komponenten angebracht sind, wie Spindel oder Kraftsensoren, die das System hinsichtlich der Steifigkeit und Dynamik beeinflussen.

Da in diesem Versuchsaufbau der TCP nur in X- und Y-Richtung belastet werden konnte, kann die Genauigkeit des Steifigkeitsmodells durch Optimierung des Versuchsaufbaus weiter erhöht werden. Dadurch wird jedoch die Komplexität erhöht.

Zusätzlich kann die Genauigkeit des Modells durch weitere Untersuchungen erhöht werden, indem beispielsweise die Roboterkinematik und der Endeffektor getrennt untersucht werden.

Insgesamt zeigt sich, dass die Genauigkeit der Vorhersagen der Verschiebung als Grundlage für weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der Optimierung der Roboterpose ausreichend ist. Die tatsächlichen Verschiebungen weichen um bis zu 0,6 mm von den prognostizierten Werten ab. Diese Genauigkeit ist nicht ausreichend für eine Offline- oder Onlinekompensation, jedoch sind sie ausreichend, um das Verhalten der Roboterstruktur unter Last zu analysieren, da die Tendenzen übereinstimmen.

7 OPTIMIERUNG DER POSEN HINSICHTLICH DER STEIFIGKEIT

In den vorangegangenen Kapiteln 5 und 6 verdeutlichen die dynamischen Untersuchungen und die Steifigkeitsmodellierung, dass das Verhalten des Roboters stark von der Orientierung der Pose abhängig ist. Daher wird in diesem Kapitel ein Optimierungsmodell aufgestellt, mit dem die Pose mit den geringsten Verschiebungen des TCPs ermittelt wird, unter Beibehaltung der kartesischen Position.

Im Kontext der Industrierobotik unterscheiden sich Sechs-Achs-Roboter von Fünf-Achs-Bearbeitungszentren durch einen redundanten Freiheitsgrad. Diese Redundanz eröffnet eine Vielzahl von Orientierungsmöglichkeiten für den TCP, während die kartesische Position konstant bleibt [GUO2015]. Der Endeffektor kann um die Tool-Achse umpositioniert werden, ohne dabei die Werkzeugposition zu verändern [GUO2015]. Aufgrund der variierenden Steifigkeiten in den einzelnen Gelenken ist die Abdrängung des TCPs unter Last stark vom Kraftangriff auf diesen abhängig.

Bisherige Ansätze in der Literatur fokussierten sich auf die Untersuchung des Arbeitsraums oder die Anpassung der kartesischen Koordinaten um die mittels Steifigkeitsmodellierung ermittelten statischen Abdrängungen in der Bahnplanung unter Beibehaltung der Orientierung. Dies erfordert jedoch präzise Kenntnisse der zu erwartenden Fräskräfte, was wiederum aufwendige Vorabexperimente oder Simulationen notwendig macht. Besonders in der additiven Fertigung gestaltet sich dies als herausfordernd, da es in der Literatur bisher keine Simulationen gibt, die die Oberflächen- und Mikrostruktur der Bauteile nach dem Aufbau mit ausreichender Genauigkeit abbilden, und Vorabexperimente aufgrund der geringen Stückzahl der Bauteile nicht möglich bzw. unverhältnismäßig sind.

Untersuchungen von CEN zeigen, dass die Bearbeitungsgenauigkeit unter anderem von der Kraftangriffsrichtung am TCP abhängig ist. Die reversible Verformung der Roboterstruktur ist je nach Raumrichtung des Kraftangriffs unterschiedlich hoch [CEN2017a]. Dieses Verhalten nutzt GUO für die Genauigkeitssteigerung beim Bohren [GUO2015]. Neben der Anbringung der Spindel am Roboter wird dort auch die Orientierung um die Werkzeugachse mittels Berechnungen über die CCT verbessert, um eine möglichst steife Pose zu realisieren und die Genauigkeit des Bohrprozesses zu erhöhen. Die Genauigkeitssteigerungen liegen im Rahmen von 0,2 mm.

Die Orientierung des Effektors hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Verhalten der Roboterstruktur unter Kraftangriff, wie in Kapitel 5 bei den dynamischen Untersuchungen und in Kapitel 6 bei der Identifizierung der Steifigkeitsparameter verdeutlicht wird. Dieser Ansatz der Verbesserung des Verhaltens der Roboterstruktur während der Zerspanung erfordert keine präzisen Kenntnisse der wirkenden Kräfte oder den Einsatz aufwendiger Sensorsysteme. Es werden keine aufwendigen Simulationen benötigt, da angenommen wird, dass eine grobe Schätzung der Kräfte ausreicht, um die angestrebten Verbesserungen zu realisieren.

Eine zentrale Hypothese dieser Arbeit ist, dass durch die Optimierung des Steifigkeitsmodells unter Beibehaltung der TCP-Koordinaten eine signifikante

Verbesserung des Bearbeitungsprozesses in Form von geringeren Formabweichungen und stabileren Prozessen erreicht werden kann.

Die Identifizierung von steiferen Posen soll über ein Optimierungsproblem erfolgen, als dessen Grundlage das das Steifigkeitsmodell dient. Es wird davon ausgegangen, dass angenäherte Kraftverläufe ausreichen, um die Optimierung durchzuführen und valide Ergebnisse zu identifizieren.

Im Folgenden werden Grundlagen der Optimierung sowie der Aufbau und Umsetzung des Optimierungsproblems vorgestellt.

7.1 Grundlagen des Optimierungsmodells

Der Begriff Optimierung beschreibt allgemein das Bemühen um Verbesserung von beispielsweise Systemen oder Prozessen [PAP2012].

Mathematisch gesehen ist die Optimierung ein Prozess mit dem Ziel durch Ermittlung von Minima oder Maxima einer Zielfunktion das beste Ergebnis zu erzielen, unter Berücksichtigung von Einschränkungen [SCH2018].

Die Grundlage des Optimierungsproblems ist die Zielfunktion. Diese Zielfunktion gibt die Größe an, die optimiert werden soll [GRI2018]. Das Problem wird mit Hilfe von Entscheidungsvariablen über die Zielfunktion beschrieben, die mittels der Optimierung festgelegt werden [GRI2018].

Beschränkungen geben Bedingungen an, die die Entscheidungsvariablen erfüllen müssen und legen so den zulässigen Bereich für die Variablen fest.

Voraussetzung für Optimierungsprobleme ist die mathematische Beschreibbarkeit des Problems [SCH2018]. Für die Optimierung wird zunächst der Suchraum $S \subseteq \mathbb{R}^n$ definiert, der den Raum der Variablen beschreibt. Der Zielraum $Z \subseteq \mathbb{R}$ definiert den Raum der zulässigen Werte der Zielfunktion [GRI2018].

Die Zielfunktion ist dann definiert als Abbildung von S nach Z .

$$f: S \rightarrow Z \quad (7.1)$$

Damit wird das zugehörige Optimierungsproblem beschrieben als:

$$\min(f(x)), \quad \text{mit } x \in S \quad (7.2)$$

Ziel von Optimierungsproblemen ist es, das globale Minimum (oder Maximum) zu finden. Das obige Problem gilt ohne Beschränkung der Allgemeinheit. Das globale Minimum ist die zulässige Lösung, für die mit $x^* \in S$ gilt

$$f(x^*) \leq f(x) \quad \forall x \in S, \quad (7.3)$$

daher ist das globale Minimum die Optimallösung des Optimierungsproblems.

Gilt das beschriebene Verhalten nur für alle x in einer Umgebung von x^* , so wird das Minimum als lokales Minimum bezeichnet.

Das Optimierungsproblem ist meist nicht ausschließlich über die Beziehung von Such- und Zielraum zu beschreiben, da Randbedingungen auftreten, die bestimmte Parametereinstellungen nicht zulassen [GRI2018]. Bezogen auf die Industrierobotik kann

dies beispielsweise eine Pose sein, die aufgrund der Roboterkinematik nicht erreicht werden kann. Über Randbedingungen wird der Suchraum eingeschränkt.

Ist die Zielfunktion eine nichtlineare Funktion oder sind Nebenbedingungen nichtlinear, wird allgemein von einem nichtlinearen Optimierungsproblem gesprochen [GRI2018].

Im Folgenden wird nun zunächst das Optimierungsproblem beschrieben, bevor der Lösungsalgorithmus vorgestellt wird. Anschließend werden die Ergebnisse der Optimierung aufgezeigt und diskutiert.

7.2 Aufbau des Optimierungsmodells zur Optimierung der Roboterpose

Ziel des Optimierungsproblems ist die Minimierung der Verschiebung des TCPs unter statischer Last. Dazu sollen die Achsstellungen \mathbf{q} des Roboters identifiziert werden, die für den jeweiligen kartesischen Koordinatenpunkt die höchste Steifigkeit besitzen. Identifiziert wird diese Steifigkeit über die Abweichungen des Ist-TCPs zum Soll-TCP. Die Berechnung der dieser kartesischen Koordinaten ist in Kapitel 6 beschrieben. Der zu minimierende Wert ist folglich die Abweichung des unter Last berechneten TCPs von dem ursprünglichen TCPs.

$$\min_{\mathbf{q}} \|\mathbf{TCP}_{soll} - \mathbf{TCP}_{ist}\| \quad (7.4)$$

Die Verschiebung des TCPs wird über das in Kapitel 6 aufgestellte Steifigkeitsmodell beschrieben, weshalb die Zielfunktion das Steifigkeitsmodell beinhaltet. Das Steifigkeitsmodell ist ein nichtlineares System, da es trigonometrische Funktionen enthält. Die Entscheidungsvariablen in dem aufzubauenden Optimierungsproblem sind die Achsstellungen q_i , also die Winkel der Achsen. Die Werte, die die Achswinkel q_i , annehmen können, sind durch das reale Verhalten des Roboters und seine Kinematik eingeschränkt. Die Einschränkungen sind über die oberen \mathbf{ub} und unteren Grenzen \mathbf{lb} der Achswinkel gegeben und definiert als:

$$\mathbf{lb} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{ub} \quad (7.5)$$

Die Grenzen der Achswinkel \mathbf{q} sind in Tabelle 7.1 dargestellt.

Tabelle 7.1: Obere und untere Grenzen der Achswinkel.

\mathbf{lb} (°)	\mathbf{q}	\mathbf{ub} (°)
-90	q_1	90
-42	q_2	85
-20	q_3	120
-300	q_4	300
-120	q_5	120
-180	q_6	180

Neben der Einschränkung der Achswinkel sind nichtlineare Nebenbedingungen bei der Optimierung zu berücksichtigen. Zum einen muss der vorgegebene TCP als Ausgangs-TCP beibehalten werden, da es sich andernfalls um eine Kompensation über die

Verschiebung der Trajektorie handelt. Dies wird über folgende Nebenbedingung dargestellt:

$$h_1(\mathbf{q}) = \mathbf{TCP}_{soll} - \mathbf{TCP}_{unbelastet} = 0 \quad (7.6)$$

Eine weitere nichtlineare Nebenbedingung liegt in der Orientierung des Werkzeugs und somit der Spindel gegenüber dem Base-Koordinatensystem. Die Orientierung wird über den Schnittpunkt der Verlängerung der Achse 6 $\mathbf{TCP}_{Drehachse}$ und dem entlang der Werkzeugachse verlagerten TCP angegeben, sodass gilt:

$$h_2(\mathbf{q}) = \mathbf{TCP}_{Drehachse} - \mathbf{TCP}_{hoch} = 0 \quad (7.7)$$

Somit ist das für diese Arbeit aufzustellende Optimierungsproblem definiert als:

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{q}} f(\mathbf{q}) \\ & s. t. \quad \mathbf{lb} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{ub} \\ & \quad h_1(\mathbf{q}) = 0 \\ & \quad h_2(\mathbf{q}) = 0 \end{aligned} \quad (7.8)$$

Das Modell wird in *Matlab* unter Verwendung der *Optimization Toolbox* aufgebaut. Als Solver wird die Funktion *fmincon* verwendet. Hierbei handelt es sich um einen Solver für beschränkte, multivariate, nichtlineare Optimierungsprobleme. Der Solver minimiert die Zielfunktion unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen [THE2023].

Es wird mit dem Algorithmus *Sequential Quadratic Programming* (SQP) gearbeitet, der ein nichtlineares Problem auf ein quadratisches Problem abbildet [BÜN2019].

Die Lösung des Optimierungsproblems wird auf Basis von Ableitungen identifiziert, damit gehört dieser Solver zur Gruppe der gradientenbasierten Optimierungs-Algorithmen. Es handelt sich um eine iterative Methode, bei der das Problem iterativ in lokale Subprobleme unterteilt wird und die daraus extrahierten Informationen zur schrittweisen Optimierung genutzt werden, sodass der Algorithmus zur lokal-optimalen Lösung konvergiert [BÜN2019]. Es lässt sich nachweisen, dass der Algorithmus bei Startwerten, die genügend nahe an der gesuchten Lösung liegt, quadratische Konvergenz aufweist. Ansonsten kann zu Beginn ein divergierendes Verhalten auftreten [PAP2012]. Der SQP-Solver ist somit abhängig von der Güte der Anfangslösung.

Grundlage für den Aufbau des Optimierungsmodells ist das Steifigkeitsmodell, dass in zwei Funktionen aufgeteilt wird. Zum einen in die Berechnung des TCPs über die unbelastete Vorwärtskinematik, zum anderen in die Berechnung des TCPs unter Last über die erweiterte Vorwärtskinematik. Über diese beiden Funktionen in kartesischen Koordinaten wird die Abweichung unter Last berechnet. Diese Abweichung ist das Optimierungsziel und soll minimiert werden, unter Beibehaltung der ursprünglichen kartesischen Koordinaten und vorgegebener Werkzeug-Werkstück-Anordnung, was über die beschriebenen Nebenbedingungen abgebildet wird. Die Optimierung erfolgt punktweise über kartesischen Koordinaten.

Die veränderlichen Variablen sind die Achswinkel des Roboters q_i , die über die Grenzwerte \mathbf{lb} und \mathbf{ub} eingeschränkt werden. Als Startlösung werden die Achswinkel aus

der CAM-Programmierung oder der Robotersteuerung für den definierten kartesischen Punkt verwendet.

Weitere Eingangsvariable ist die Kraft F in den Richtungen des Tool-Koordinatensystems. Dies ist dem Aufbau der erweiterten Vorwärtskinematik geschuldet, bei der die Kraft ebenfalls in Tool-Koordinaten eingegeben wird. Die am TCP anliegende Kraft wird aus vorangegangenen Fräsversuchen genutzt, kann jedoch auch abgeschätzt werden. Bei der Abschätzung der Kraft als Eingangsvariable muss das Verhältnis der Krafrichtungen beibehalten werden, während die Höhe tendenziell zu hoch angegeben werden kann bei der Ermittlung einer möglichst steifen Pose.

Die Optimierung wird als globale Optimierung ausgeführt, da im vorgegebenen Suchraum die bestmögliche Lösung mit der geringsten Verschiebung unter Last gesucht wird. Die globale Optimierung wird durch die Funktion *gs* in *Matlab* implementiert.

Als Ergebnis werden die Achswinkel ausgegeben, bei denen die kleinste Verschiebung des TCPs unter Last identifiziert wird. Die Verschiebung des TCPs unter Last und somit der zu minimierende Wert kann über verschiedene Berechnungen definiert werden. Sollen die Abweichungen in alle Raumrichtungen gleichmäßig einbezogen, kann die Norm der Verschiebung, also die Norm der Differenz zwischen TCP_{ist} und TCP_{soll} , als Optimierungsziel verwendet werden.

Wenn dagegen eine Raumrichtung stärker gewichtet werden soll, beispielsweise um die Formtreue des zu bearbeitenden Bauteils in eine Raumrichtung zu gewichten, ist dies über den zu optimierenden Wert einstellbar.

7.3 Ergebnisse der Optimierung

Die Optimierung wird punktweise durchgeführt, sodass die optimale Lösung für jeden kartesischen Punkt eine optimale Achskonfiguration unter vorgegebener Kraft ausgibt. Für die Zerspanung von Konturen wird für einzelne Punkte entlang der Trajektorie nacheinander die Optimierung durchgeführt und optimale Achswinkel identifiziert.

Zur Bewertung und Vergleich der Optimierungsergebnisse werden in diesem Abschnitt zunächst die Ergebnisse für einzelne Punkte unter Belastung in verschiedene Richtungen dargestellt und mit den Ergebnissen der dynamischen Untersuchung verglichen.

Anschließend werden die Ergebnisse der Optimierung eingeordnet durch Vergleich mit berechneten Verschiebungen bei unterschiedlicher Orientierung. Abschließend wird die Berechnung beispielhaft für die Zerspanung eines Quaders durchgeführt und die Ergebnisse analysiert.

Als Ausgangspunkt für die Optimierung wird ein Punkt auf dem Arbeitstisch genommen, der in der rechten Hälfte des Tisches liegt. Für den Punkt wird die Optimierung mit einer Belastung in X-Richtung von 1000 N und eine weitere Optimierung mit Hauptbelastung in Y-Richtung von 1000 N durchgeführt. Als Anfangslösung werden die Achswinkel des Punktes bei Anfahren des Punktes in der Robotersteuerung übernommen.

Die Ergebnisse der Optimierung zeigen große Unterschiede in den Achswinkeln auf, wie Tabelle 7.2 zeigt. Dargestellt sind neben den einzelnen Achswinkeln auch die

Orientierung um die Z-Achse zum Base-Koordinatensystem, da sich aus den Achswinkeln direkt keine Vorstellung über die Orientierung des Endeffektors lesen lässt. Als Delta sind die Summen der Beträge der Abweichungen in X-Y- und Z-Richtung im Vergleich zum Sollpunkt angegeben.

Tabelle 7.2: Über die Optimierung bzw. CAM-Programmierung identifizierte Achswinkel und die berechnete Verschiebung unter Belastung mit einer Kraft von 1000 N in +X- bzw. +Y-Richtung. Die Verschiebung Delta beschreibt die Gesamtverschiebung aller Raumrichtungen.

Quelle der Achswinkel	q ₁ (°)	q ₂ (°)	q ₃ (°)	q ₄ (°)	q ₅ (°)	q ₆ (°)	Orientierung (°)	Gesamtdelta (mm)
CAM	9,87	8,33	42,99	14,49	-43,26	-10,42	0	4,36
Optimierung hinsichtlich Gesamtabweichung mit Belastung in +Y-Richtung	7,5	7,89	43,31	184,75	43,05	177,14	4,2	4,16
Optimiert hinsichtlich Verschiebung in Y-Richtung unter Belastung in +Y-Richtung	- 13,38	82,55	5,76	88,94	101,27	-96,54	87	4,512
CAM	9,87	8,33	42,99	14,49	-43,26	-10,42	0	2,96
Optimierung hinsichtlich Gesamtabweichung mit Belastung in +X-Richtung	7,29	7,90	43,04	3,41	-42,39	-2,5	5	2,67
Optimiert hinsichtlich Verschiebung in X-Richtung unter Belastung in +X-Richtung	- 13,36	85,00	3,74	89,19	100,17	-93,15	86,8	2,69

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass die Belastung in Y-Richtung zu einer deutlich höheren Gesamtverschiebung führt als in X-Richtung, was schon in Kapitel 6 festgestellt wurde.

Die Orientierung des Endeffektors beeinflusst die berechneten Verschiebungen bei gleichen kartesischen Koordinaten und gleicher anliegender Kraft. Die berechneten Gesamtverschiebungen in Y-Richtung sind bei den optimierten Orientierungen bis zu 4,6 % niedriger und in X-Richtung bis zu 9,8 % niedriger bezogen auf die Gesamtverschiebung. Die Ergebnisse sind bezogen auf die Gesamtverschiebung in alle drei Raumrichtungen. In Abbildung 7.1 sind die Verschiebungen jeweils in die Raumrichtungen X-Y- und Z aufgeschlüsselt dargestellt.

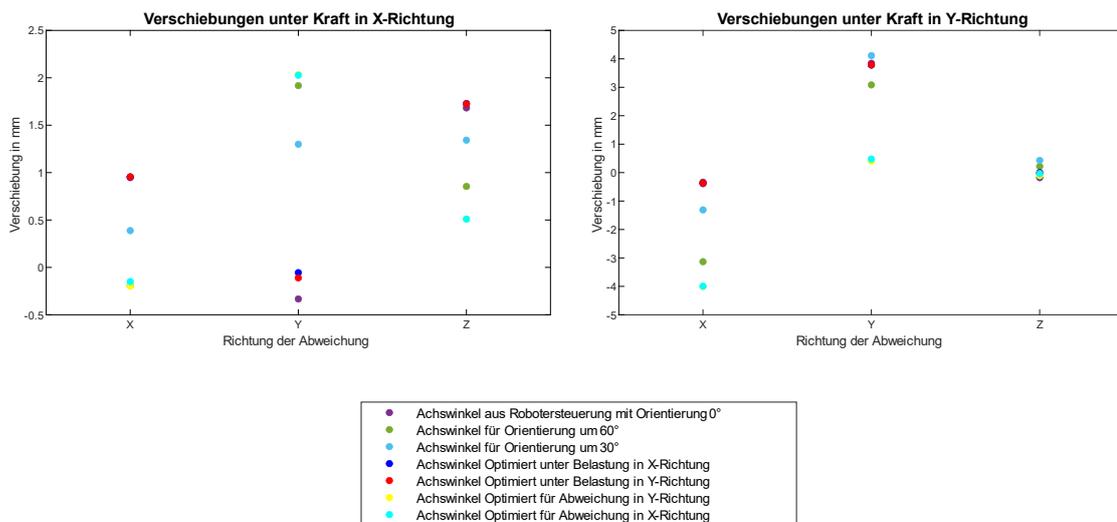


Abbildung 7.1: Verschiebungen des TCPs unter Last in X- (links) und Y-Richtung (rechts).

Es wird deutlich, dass die Verschiebungen in unterschiedliche Richtungen signifikant variieren, abhängig von der gewählten Optimierungsmethode. Zwar erzielen die Optimierungsergebnisse mit Fokus auf einer Raumrichtung in der Gesamtabweichung deutlich schlechtere Ergebnisse, sind aber hinsichtlich der optimierten Raumrichtung deutlich genauer als andere Berechnungen. Die Optimierung bietet folglich die Möglichkeit, die Verschiebung in eine Raumrichtung stark zu verbessern, die Optimierung ist je nach Anwendungsfall einstellbar.

Die Spanne der Abweichungen liegen bei Belastung in X-Richtung bei ca. 2,5 mm und in Y-Richtung bei ca. 4 mm.

Im Vergleich mit den Orientierungen aus der dynamischen Untersuchung, in Abbildung 7.1 als Orientierung um 60° und 30° dargestellt, zeigt sich, dass die berechneten Abweichungen in Krafrichtung deutlich geringer sind als die hinsichtlich der Gesamtverschiebung optimierten Orientierungen, jedoch die Verschiebung in den zwei anderen Raumrichtungen deutlich höher sind.

Im nächsten Schritt wird untersucht, ob und wie die Optimierungsergebnisse für die Bahnprogrammierung verwendet werden können. Da die Programmierung über Achswinkel sehr aufwendig und risikobehaftet ist, soll die Programmierung über die Umorientierung des TCPs erfolgen. Zur Kontrolle, ob die Optimierungsergebnisse mit den Umorientierten tatsächlichen Verschiebungen übereinstimmen, werden diese verglichen.

Dafür werden aus der Robotersteuerung für einen definierten Punkt Achswinkel für alle Orientierungen zwischen -80° und +80° entnommen und die Verschiebungen unter Krafteinwirkung in X bzw. Y-Richtung berechnet. Zum Vergleich wird über ein weiteres Optimierungsproblem Achswinkel für Rotationen von -90° bis +90° ermittelt, um zu analysieren, wie gut die berechneten Achswinkel das Verhalten des Roboters widerspiegeln. Für beide Sets an Achswinkeln werden die Abweichungen unter einer Last

von jeweils 1000 N in X- bzw. Y-Richtung berechnet. Die Daten werden anschließend als Polarplott gezeichnet, welches in Abbildung 7.2 dargestellt ist.

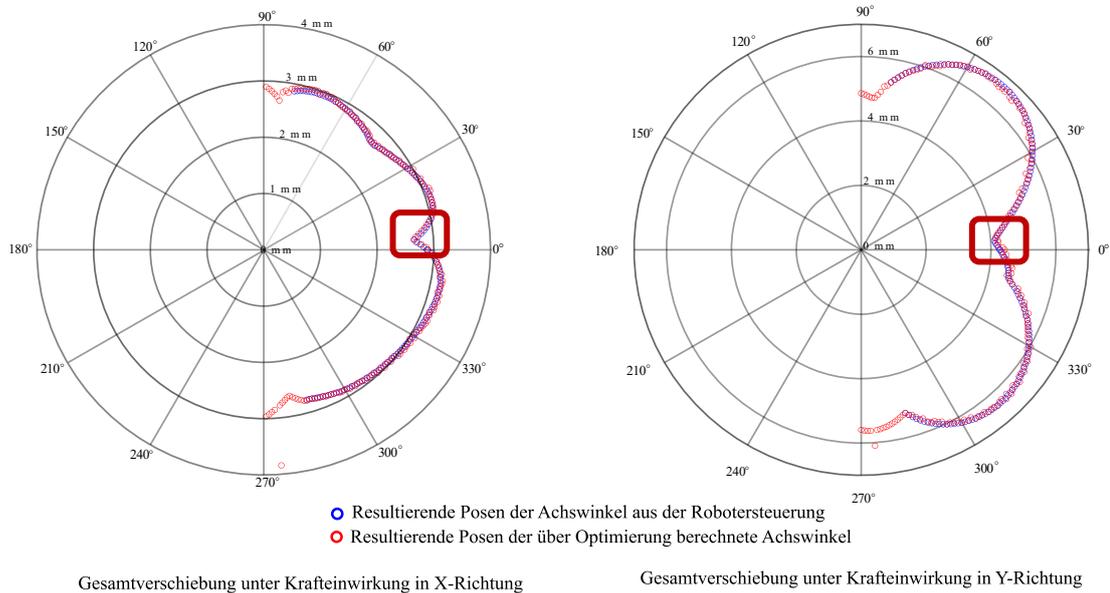


Abbildung 7.2: Verschiebung des TCPs in verschiedenen Posen unter Krafterwirkung in X-Richtung (links) und Y-Richtung (rechts). Verglichen werden Posen basierend auf über Optimierung ermittelte Achswinkel und Posen basierend auf aus der Steuerung extrahierter Achswinkel. Markiert sind die Lagen der Optimierungsergebnisse.

Es ist zu erkennen, dass die über die Optimierung berechneten Achswinkel das Verhalten des Roboters sehr gut widerspiegeln, die Verschiebungen der berechneten Achswinkel und der tatsächlichen Achswinkel unterscheiden sich nur geringfügig.

Zudem wird für den untersuchten Punkt die Optimierung in X- und Y-Richtung mit jeweils 1000 N durchgeführt. Die Optimierungsergebnisse für den untersuchten Punkt sind in Abbildung 7.2 eingezeichnet und in Tabelle 7.3 dargestellt.

Tabelle 7.3: Berechnete Verschiebungen des TCPs unter Belastung in X- und Y-Richtung unter verschiedenen Orientierungen.

	Belastungsrichtung	Gesamtdelta in mm	Orientierung in °
CAM	X-Richtung mit 1000 N	2,84	0
Optimierung unter Belastung in X-Richtung	X-Richtung mit 1000 N	2,64	4,9
CAM	Y-Richtung mit 1000 N	4,28	0
Optimierung unter Belastung in Y-Richtung	Y-Richtung mit 1000 N	4,12	6,0

Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass die über die Optimierung ermittelten Achswinkel und Orientierungen das reale Verhalten des Roboters darstellen. Zudem wird gezeigt, dass über die ausgegebene Orientierung die Bahnplanung durchgeführt werden kann, in dem im CAM-Programm der Orientierungswinkel eingestellt wird. Die

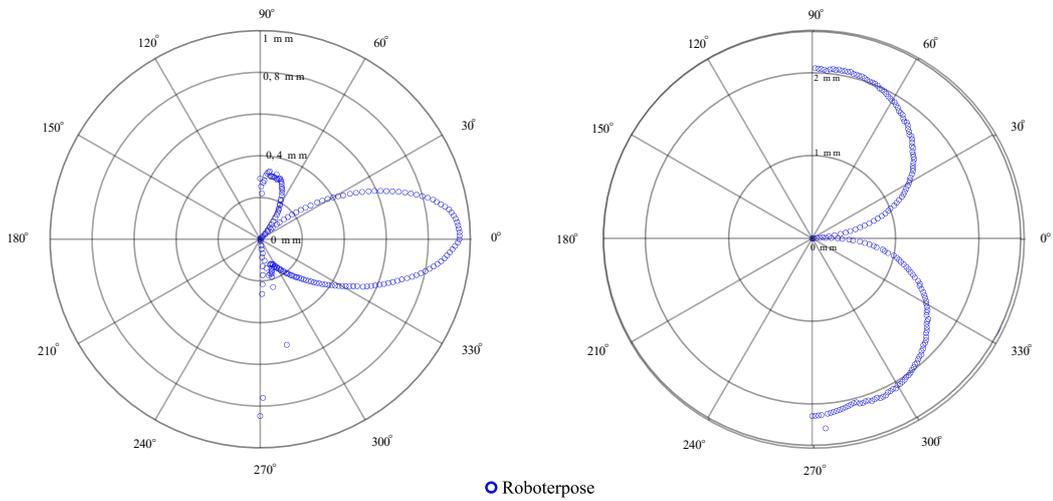
errechneten Achswinkel spiegeln das Verhalten der Achswinkel der Robotersteuerung wider.

Die Untersuchung der Verschiebung des TCPs zeigt, dass der Wert für die geringste Gesamtverschiebung im niedrigen Gradbereich ist, sowohl für Krafteinwirkung in Y- als auch in X-Richtung.

Bei der Untersuchung der Verschiebung in X- und Y-Richtung zeigt sich dagegen, dass sich die Lage der Optima stark unterscheiden.

In Abbildung 7.3 ist die Verschiebung in X- und Y-Richtung unter Krafteinwirkung in jeweils X- und Y-Richtung zu sehen. Es wird deutlich, dass sich die Verschiebungen in einzelne Raumrichtungen deutlich anders verhalten als die Gesamtverschiebung des TCPs unter Last.

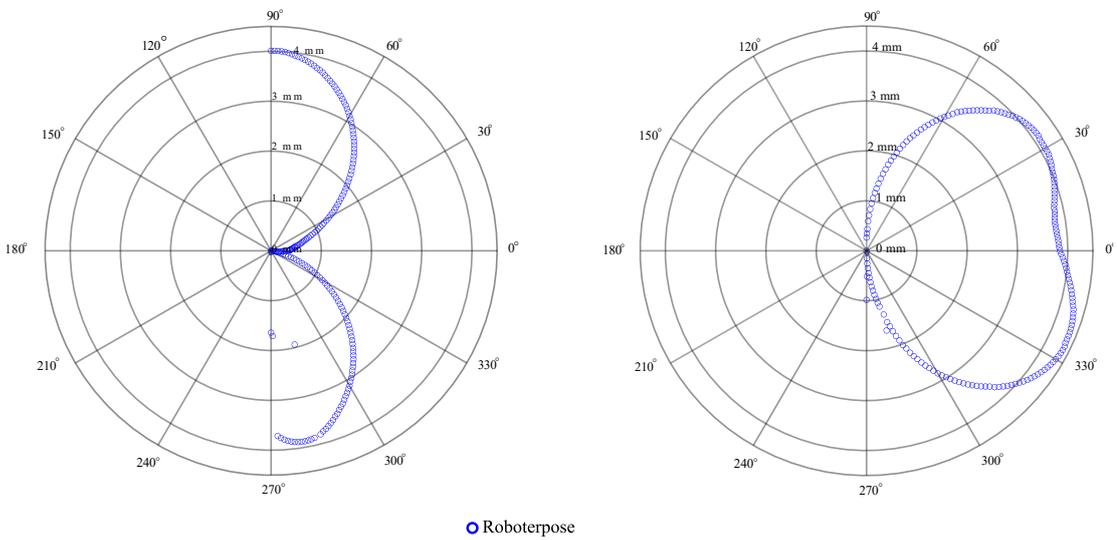
Verschiebung des TCPs unter Kräfteinwirkung in X-Richtung



Verschiebung des TCPs in X-Richtung

Verschiebung des TCPs in Y-Richtung

Verschiebung des TCPs unter Kräfteinwirkung in Y-Richtung



Verschiebung des TCPs in X-Richtung

Verschiebung des TCPs in Y-Richtung

Abbildung 7.3: Verschiebung des TCPs unter Belastung in X-Richtung (oben) und Y-Richtung (unten), aufgeteilt auf die Raumrichtungen X (links) und Y (rechts).

Während in Hauptkraftrichtung jeweils die Verschiebung bei einer Orientierung von 0° mit am höchsten ist, sinkt die Verschiebung in die zwei anderen Richtungen in Richtung 0° ab.

Zudem ist auffällig, dass bei der Verschiebung in X-Richtung und Kraftereinwirkung in X-Richtung bei $\pm 30^\circ$ die Verschiebung deutlich geringer wird, während dies in Y-Richtung und unter Kraftereinwirkung in Y-Richtung ab ungefähr 50° der Fall ist. Bei beiden Richtungen ist das Verhalten beinahe symmetrisch zur 0° -Linie.

Diese Untersuchungen verdeutlichen, dass es je nach Anwendungsfall sinnvoll sein kann, in der Optimierung die Verschiebung in eine Raumrichtung höher zu bewerten, sodass der Prozess hinsichtlich der Hauptkraftrichtung stabiler ist.

Um das Verhalten der Roboterstruktur hinsichtlich des Arbeitsbereichs zu bewerten, werden die Verschiebungen der Randpunkte des Arbeitstisches und des Mittelpunkts untersucht. Dazu werden Verschiebungen in X- und Y-Richtung unter Belastung in jeweils X- und Y-Richtung berechnet und verglichen. Abbildung 7.4 zeigt, dass der Verlauf der Abweichungen sehr ähnlich.

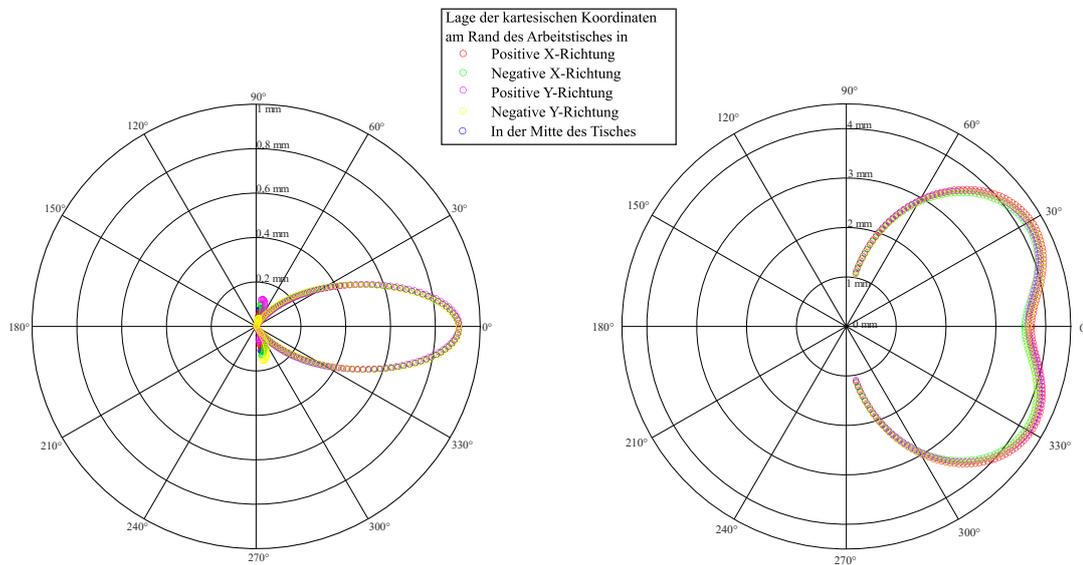


Abbildung 7.4: Berechnete Verschiebungen in X-Richtung unter Belastung von 1000 N in X-Richtung (links) und berechnete Verschiebungen in Y-Richtung unter Belastung von 1000 N in Y-Richtung

Das Verhalten der Roboterstruktur an den unterschiedlichen Punkten ist hinsichtlich der Gesamtverschiebung unter verschiedenen Orientierungen sehr ähnlich, was vermutlich dem kleinen Arbeitsbereich geschuldet ist.

Um zu untersuchen, wie sich das Optimierungsmodell für die Bahnplanung der roboterbasierten Zerspanung verhält, werden im Folgenden die einzelnen Punkte für die Zerspanung eines Quaders optimiert. Hierbei wird davon ausgegangen, dass nur Umfangsfräsen genutzt wird, um weiterhin mit der Umorientierung um die Werkzeugachse arbeiten zu können. Ausgangsbasis für die Eingangsvariablen ist ein Quader mit der Endgeometrie $34 \times 34 \times 20$ mm, der als CAD-Geometrie vorliegt.

Für diese Geometrie wird anschließend über die CAM-Planung die Trajektorie festgelegt. Aus der Simulation der Bearbeitung werden die kartesischen Koordinaten und die Achswinkel des Roboters entnommen und als Ausgangsbasis für die Optimierung verwendet. Für die Berechnung werden die Eckpunkte des Quaders als Ausgangsdaten genommen und hierfür von der Robotersteuerung die Anfangsachswinkel ausgelesen.

Als Eingang für die Belastung in Form von Fräskräften, werden die Mittelwerte der Prozesskräfte aus vorangegangenen Versuchen genutzt. Diese werden für jede Quaderseite berechnet und als Eingangsvariable für das Optimierungsmodell definiert. Zu beachten ist, dass die Fräskräfte hier sehr gering sind aufgrund sehr geringer Vorschübe.

Jeder der vier Punkte wird zweimal optimiert, da jeder Punkt sowohl den Anfang einer Fräsbahn einer Quaderseite darstellt als auch den Endpunkt der vorherigen Fräsbahn, jede Fräsbahn sich aber durch unterschiedliche Prozesskraftverhältnisse unterscheidet.

Zur Berechnung der Bahn wird mit der Orientierung des Koordinatensystems um die Z-Achse im Vergleich zum Base-Koordinatensystem gearbeitet. Die Ergebnisse sind in Tabelle X zu erkennen. Zur besseren Verständlichkeit wird in Tabelle 7.4 auf die Angabe der Achswinkel verzichtet.

Tabelle 7.4: Ergebnisse der Berechnung der optimalen Pose für die Zerspanung eines Quaders.

Seite	Belastung in [X,Y,Z] Richtung in N	Optimierte Orientierungen in °	Delta in mm	Delta Ausgangs- achswinkel in mm
1 Startpunkt	[-410,-75,20]	35°	0,92	1,31
1 Endpunkt	[-10,-750,20]	43°	0,97	1,31
2 Startpunkt	[750,-250,20]	10°	1,23	1,88
2 Endpunkt	[150,-250,20]	10°	1,70	1,98
3 Startpunkt	[300,125,20]	48°	1,18	1,21
3 Endpunkt	[300,125,20]	42°	1,17	1,18
4 Startpunkt	[-45,250,20]	-12°	1,11	1,13
4 Endpunkt	[90,550,20]	-9°	1,10	1,13

Die Ergebnisse zeigen, dass die Winkel der Optimierung des Start- und des Endpunkts je Seite dicht beieinander und maximal 7° auseinander liegen. Die berechnete Reduzierung der Summe der Verschiebungen liegt zwischen 0,02 mm und 1,6 mm. Es wird daher angenommen, dass durch die optimierten Werte der Zerspanprozess stabiler verläuft und die Verschiebungen geringer sind.

Fazit

Die in diesem Kapitel aufgebaute Optimierung berechnet die optimalen Achsstellungen der Roboterkinematik für die die Verschiebung unter definierter Last minimiert wird. Als Eingangsdaten sind eine Anfangslösung für die Achswinkel sowie die am TCP wirkenden Kräfte notwendig. Die Ergebnisse der Optimierung zeigen, dass die Anpassung der

Roboterposen hinsichtlich der Steifigkeit bei konstanten kartesischen Koordinaten zu einer Genauigkeitssteigerung von bis zu 10 % führen kann, abhängig vom Kraftangriff und der Höhe der Kräfte. Die Berechnung der Verschiebung bei verschiedenen Orientierungen zeigt, dass im Mittel eine Verringerung der Verschiebung zwischen 4 % und 10 % möglich ist.

Die Optimierung bezüglich der Gesamtabweichung, in der die Verschiebung in allen drei Raumrichtungen einbezogen wird, erzielt signifikant geringere Werte im Vergleich zum Gesamtdelta der Optimierung in eine Raumrichtung. Jedoch ist bei der Optimierung hinsichtlich einer Raumrichtung die Verschiebung in die definierte Raumrichtung deutlich geringer als die Verschiebung in diese Raumrichtung bei der Optimierung in alle Raumrichtungen.

Die Verschiebungen für die identifizierten Orientierungen aus den dynamischen Untersuchungen zeigen tendenziell eher Übereinstimmungen mit den Ergebnissen der Optimierung in der Raumrichtung der höchsten anliegenden Kraft. Daraus folgt, dass angenommen werden kann, dass die in eine Raumrichtung optimierten Posen zu stabileren Fräsprozessen führen. Obwohl die errechneten Gesamtverschiebungen höher sind als die Optimierung in drei Raumrichtungen, lässt sich davon ausgehen, dass der Fräsprozess insgesamt stabiler verläuft.

Für die Zerspanung der additiv gefertigten Bauteile ist daher vor allem mit einem stabileren Fräsprozess zu rechnen, die erzielbaren Genauigkeitssteigerungen werden auf 0,1 mm bis 0,3 mm eingeschätzt. Zudem wird angenommen, dass die Oberflächenqualität durch Optimierung in eine Raumrichtung verbessert wird, was in der Erhöhung der Stabilität begründet ist.

Für die Zerspanung wird kein zu bevorzugender Arbeitsbereich auf dem Arbeitstisch identifiziert, was jedoch durch den kleinen Arbeitsraum begründet ist.

Im folgenden Kapitel werden die mittels der Optimierung identifizierten Orientierungen und Achswinkel in Zerspanversuchen validiert und mit den Erkenntnissen aus den dynamischen Versuchen verglichen.

8 EXPERIMENTELLE VALIDIERUNG

In diesem Kapitel werden die Optimierungsergebnisse sowie die Erkenntnisse aus der dynamischen Untersuchung anhand additiv hergestellter Bauteile validiert. Ziel der Untersuchungen ist, die hinsichtlich statischer Abweichung optimierten Posen mit der herkömmlichen, nicht modifizierten CAM-Bahnplanung zu vergleichen und die Umsetzbarkeit für die spanende Bearbeitung zu analysieren, wie in FF 5 beschrieben.

Der Schwerpunkt der in dieser Arbeit untersuchten Störgrößen liegt auf der statischen und dynamischen Steifigkeit. Die aus diesen Störgrößen resultierenden Fehler bei der Zerspaltung additiv gefertigter Bauteile können den Gestaltabweichungen erster bis dritter Ordnung zugeordnet werden [PAU2008]. Zur Bewertung der Bearbeitungsqualität werden daher, wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, diese Gestaltabweichungen herangezogen. Untersucht wird die Formabweichung der Bauteile, die Welligkeit und Rauheit [DIN 4760].

Die Bewertung der Formtreue der zerspannten Additivbauteile erfolgt mittels des Abgleichs der Soll-Daten in Form von CAD-Daten mit den Ist-Daten der zerspannten Bauteile. Die Vermessung der Bauteile zur Ermittlung der Ist-Daten erfolgt mittels des in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Scanners.

Die Charakterisierung der Oberflächengüte erfolgt über die Ermittlung des Rauheits- und Welligkeitsprofils. Dies erfolgt über das in Kapitel 4.1.3 beschriebene Messgerät *MahrSurf*.

Der Fokus der Beurteilung der Qualität liegt auf dem Vergleich der verschiedenen Bahnplanungsverfahren und nicht auf der allgemeinen Bearbeitungsqualität des Industrieroboters. Daher werden die Ergebnisse miteinander verglichen, die Gesamtgenauigkeit wird jedoch nicht bewertet.

Für sämtliche Versuche kommen die in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Vollhartmetallwerkzeuge zu Einsatz sowie der schon beschriebene Werkstoff Edelstahl 316L. Der Aufbau der Bauteile erfolgt über den DED-Prozess mittels des Auftragschweißkopfs *CoaxWire*.

Um die Ergebnisse nicht durch zu geringes Aufmaß aus dem Additivprozess zu beeinflussen, erfolgt der Aufbau der Bauteile mit einem Offset von 3 mm an jeder Seite. So ist gewährleistet, dass an jeder Stelle Material abgenommen wird, selbst bei sehr unsteten Oberflächen aus dem Additivprozess. Die relevanten Aufbauparameter sind im Anhang A.2 aufgeführt.

Die Bauteile werden auf einer 40 mm dicken Stahlplatte aufgebracht, um den Verzug des Substrats und der Bauteile zu verhindern.



Abbildung 8.1: Aufgeschweißter Quader auf Substratplatte.

Die Bauteilgeometrien umfassen Quader und Zylinder. Die Quader ermöglichen die Bewertung von Geradheit und Linienprofil, während durch die Bearbeitung der Zylinder Rückschlüsse auf die Rundheit gezogen werden können.

Die Bearbeitung der Bauteile findet an verschiedenen Positionen auf dem Arbeitstisch statt. Die Bearbeitungspositionen variieren, da mehrere Quader auf einer Substratplatte aufgebaut werden und ein Umspannen der Platte zwischen den Versuchen nicht stattfindet. Durch den Additivprozess ist die Position der aufgebauten Bauteile bekannt und das Einmessen der Bauteile nach dem Additivprozess wird vermieden. Beispielhaft ist ein Quader nach dem Auftragschweißprozess auf dem Substratplatte in Abbildung 8.1 dargestellt.

Um die Validität der Optimierungsansätze und dynamischen Untersuchung zu gewährleisten, konzentrieren sich die durchgeführten Versuche ausschließlich auf das Umfangsfräsen der Bauteile. Es werden keine Nuten gefräst oder hohe Zerspanvolumina untersucht, da diese Aspekte für die Bearbeitung von additiv gefertigten Bauteilen als sekundär betrachtet werden. Die Entscheidung, sich auf das Umfangsfräsen zu fokussieren, basiert darauf, dass über diese Bearbeitungsmethode das statische und dynamische Verhalten der Roboterstruktur hinsichtlich der Umorientierung am besten bewertet werden kann. Über diese Bearbeitung kann die Umorientierung um die Werkzeugachse am einfachsten umgesetzt werden und eine Bewertung der Abweichungen in der X-Y-Ebene ist einfacher möglich.

Durchführung der Validierungsversuche

Es werden insgesamt drei Versuchsreihen durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe werden Quader mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 3,35 mm/s zerspannt, in der zweiten Versuchsreihe mit 9,37 mm/s. In der dritten und letzten Versuchsreihe werden Zylinder mit der erhöhten Vorschubgeschwindigkeit zerspannt.

Die ersten zwei Versuchsreihen umfassen die Zerspannung der additiv gefertigten Quader. Die Dimension der additiv gefertigten Quader betragen ca. 40×40×20 mm, die Bauteile

sind sehr unet, weshalb die genaue Bemaßung schwierig ist. Die Sollmaße des Quaders liegen bei $34 \times 34 \times 20$ mm, wodurch an jeder Seite ca. 3 mm Material abgenommen werden muss.

Zur besseren Beschreibung der Versuchsergebnisse, werden die Seiten des Quaders nummeriert, wie in Abbildung 8.2 dargestellt.

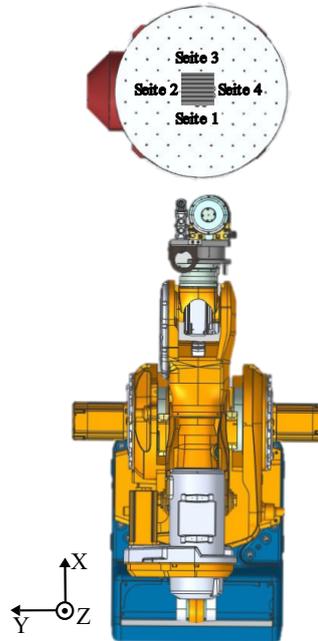


Abbildung 8.2: Beschreibung der Lage des zu bearbeitenden Blocks.

Der Fräsvorgang beginnt bei Seite eins und verläuft entsprechend der Seitennummerierung. Seite eins stellt hierbei die Zerspanung in +Y-Richtung dar, Seite zwei die Zerspanung in +X-Richtung, Seite drei die Zerspanung in -Y-Richtung und Seite vier die Zerspanung in -X-Richtung.

Für alle Bahnplanungsverfahren werden die gleichen Zerspanparameter verwendet. Die ersten neun Versuche werden mit geringerem Vorschub durchgeführt, die weiteren sieben Quader werden mit erhöhtem Vorschub zerspannt. Die Zerspanparameter sind in Tabelle 8.1 dargestellt.

Tabelle 8.1: Verwendete Zerspanparameter für die Quader der Versuchsreihen 1 und 2.

	Spindeldrehzahl in U/min	Vorschub in mm/s	a_p in mm	a_e in mm
Parameter 1	2652	3,35	7,5	0,6
Parameter 2	2652	9,37	7,5	0,6

Jeder Versuch wird viermal an verschiedenen Positionen am Arbeitstisch durchgeführt, um die Ergebnisse vergleichbar zu halten.

In jeder Versuchsreihe werden die Bauteile mit drei verschiedenen Bahnplangsstrategien zerspannt. Die erste Strategie basiert auf der CAM-Bahnplanung. Hier wird standardmäßig die Bahn mit 0° Orientierung des TCPs zum Base-Koordinatensystem ausgegeben.

Das zweite Bahnplanungsverfahren basiert auf den Ergebnissen der dynamischen Untersuchungen. Dabei werden für jede zu bearbeitende Seite die jeweils stabilsten Orientierungen aus den dynamischen Untersuchungen verwendet. Diese sind in Tabelle 8.2 dargestellt. Zur Programmierung der Bahn wird in der Simulation des Programms *Robotmaster* die Orientierung des Endeffektors für jede Seite entsprechend angepasst. Dies ermöglicht eine einfache Programmierung und Umsetzung der Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen.

Tabelle 8.2: Verwendete Orientierungen basierend auf den Ergebnissen der dynamischen Untersuchungen.

Seite	Orientierung in $^\circ$	Berechnete Verschiebung orthogonal zur Bearbeitungsfläche in mm
1	+60	0,17
2	+30	1,2
3	-60	0,34
4	-30	1,0

Zur Identifikation der Orientierungen mittels des Optimierungsmodells basierend auf dem Steifigkeitsmodell, wird das in Kapitel 7.3 beschriebene Vorgehen angewendet, bei dem die Verschiebungen unter Krafteinwirkung für die Eckpunkte des Quaders berechnet werden. Jeder Eckpunkt wird dabei zweimal für die Optimierung genutzt, da er sowohl Anfangs- als auch Endpunkt einer Seite ist. Die Eingangsdaten für die Fräskräfte stammen aus den in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Vorversuchen. Die dort ermittelten Fräskräfte werden für jede Seite des Quaders gemittelt, sodass ein Kraftvektor pro Quaderseite vorliegt. Dieser Kraftvektor wird jeweils für den Anfangs- und Endpunkt als Eingangsvektor in die Optimierung integriert. Je nach Versuch wird in der Optimierung der Zielwert verändert. Es wird zum einen die gesamte Abweichung in alle Raumrichtungen optimiert, aber auch jeweils die Abweichung orthogonal zur Bearbeitungsfläche. Zudem werden Versuche mit gewichteten Raumrichtungen durchgeführt. Die gesamten Orientierungen sind im Anhang A.3 dargestellt.

Ähnlich wie bei der Verwendung der Ergebnisse der dynamischen Untersuchung, werden die Orientierungen der optimierten Posen im Bezug zum Basis-Koordinatensystem berechnet und in die Bahnplanung von *Robotmaster* integriert, da die direkte Verwendung der berechneten Achswinkel zu fehleranfällig ist bei der Umsetzung im Fräsprogramm. Bei Auftreten von Fehlern in der Programmierung, besteht hierbei die Gefahr der Beschädigung des Robotersystems und seiner Komponenten.

Ergebnisse der Zerspannung der Quader

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Zerspannung unter Verwendung von CAM-Bahnplanung, dynamische Verbesserung und Optimierung verglichen.

Die Soll-Ist-Vergleiche der zerspannten Bauteile mit den CAD-Daten aller Versuche zeigen, dass insgesamt über alle Versuche hinweg in der Tendenz zu wenig Material abgenommen wird, der TCP wird folglich abgedrängt. Die Abweichungen liegen größtenteils im positiven Bereich.

Die mit einer Orientierung von 0° zerspannten Quader weisen Profilabweichungen zwischen $+0,04$ mm und $+0,28$ mm auf mit Schwankungen der Profilabweichungen auf einer Seite von bis zu $0,16$ mm. Abbildung 8.3 zeigt zwei mit 0° Orientierung zerspannte Quader. Bei der Betrachtung der Bilder muss berücksichtigt werden, dass lediglich seitlich zerspannt wurde, weshalb die Oberseite sehr hohe Abweichungen aufweist.

Der Vergleich der Abweichungen der einzelnen Seiten zeigt, dass diese sich je nach Seite deutlich voneinander unterscheiden. So sind die Abweichungen der Seiten eins und drei, jeweils mit Vorschubrichtung $\pm Y$ höher, also die der Seiten zwei und vier.

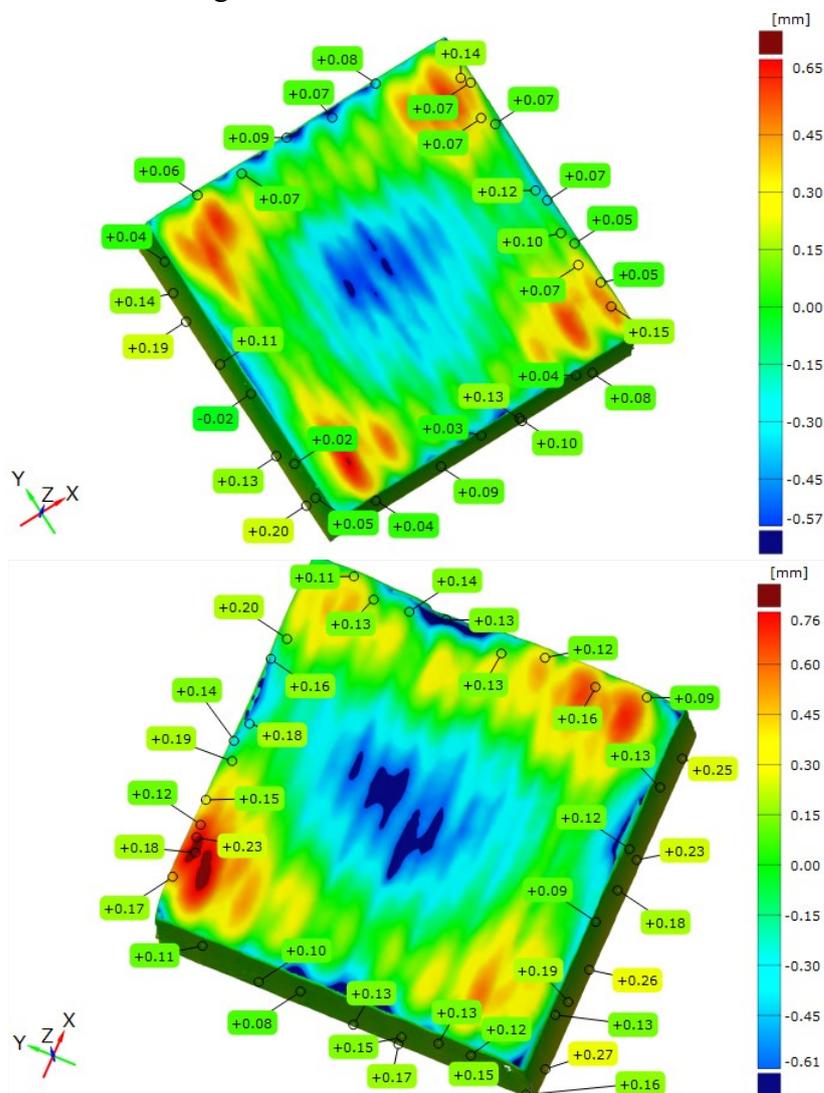


Abbildung 8.3: Soll-Ist-Vergleich zweier mit 0° Orientierung bearbeiteter Quader. Die Stirnseite wurde nicht zerspannt, weshalb die Oberseite aufgrund der Oberflächenausprägungen nach dem Additivprozess starke Abweichungen von der Soll-Kontur aufweist.

Insgesamt scheinen anhand der Profilabweichungen die Zerspanprozesse basierend auf den optimierten Orientierungen am formgenauesten und am stabilsten. Hier sind die Profilabweichungen und die Schwankungen in den Profilabweichungen je Seite am geringsten.

Der Vergleich der Welligkeiten und Rauheiten gibt einen Eindruck über die Stabilität der Prozesse. In Abbildung 8.6 sind die Welligkeiten W_t aufgeteilt nach Bearbeitungsseiten dargestellt für jeweils ein Block.

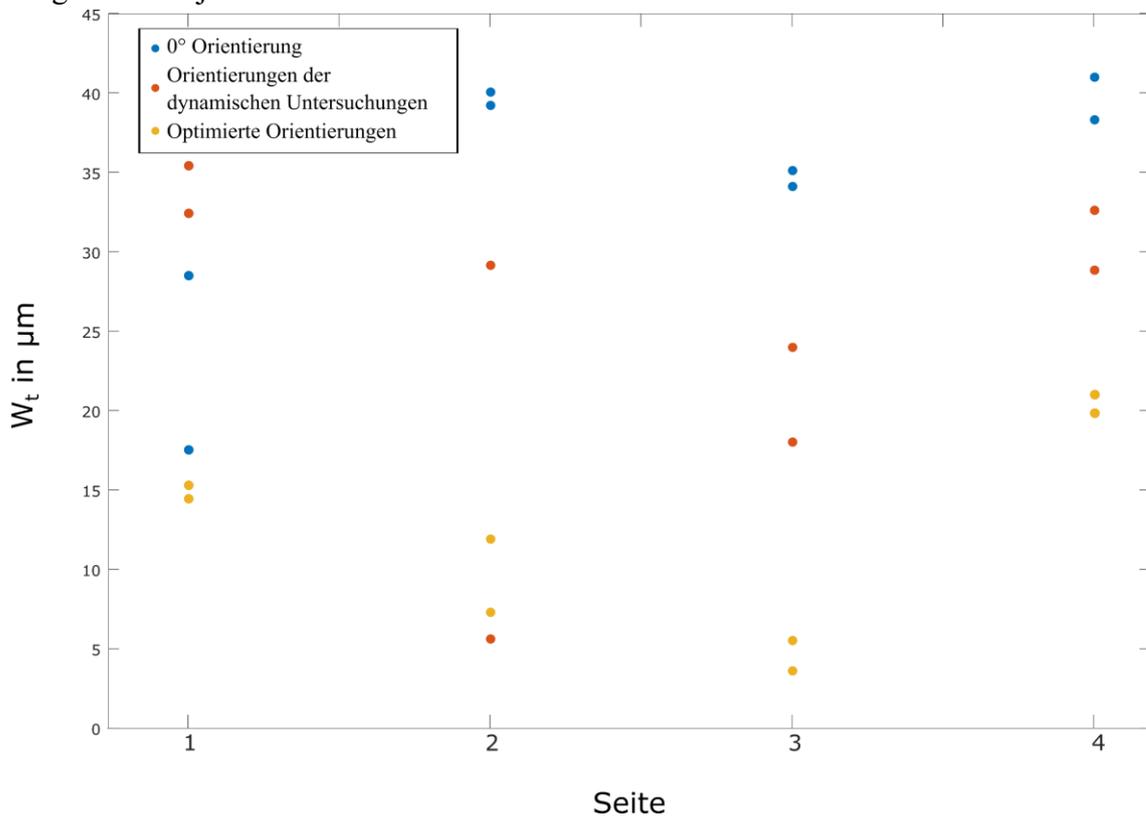


Abbildung 8.6: Erzielte Welligkeiten W_t in den verschiedenen Zerspanversuchen.

Die über die Optimierung identifizierten Orientierungen erzielen die geringsten Wellentiefen W_t . Zu erkennen ist, dass die Bearbeitungsseiten der Quader unterschiedliche Wellentiefen aufweisen. Unter Zerspannung mit Orientierung von 0° werden für die Seiten zwei und vier vergleichsweise hohe Werte erzielt, während für die Zerspannung in $\pm Y$ -Richtung mit den Seiten eins und drei, die Oberflächenkennwerte niedriger sind.

Für die optimierten Werte und die Orientierungen aus den dynamischen Untersuchungen zeigt sich dagegen, dass für die Seiten zwei und drei bessere Werte erzielt werden.

Insgesamt wird bei allen Quadern für die Seite vier die schlechtesten Ergebnisse erzielt. Dies zeigt sich auch im Fräsprozess, hier wurden während der Zerspannung Instabilitäten in Form von Aufschwingen des Werkzeugs beobachtet. Die Seite vier ist die einzige Seite, bei der der Roboter ziehend das Werkzeug führt.

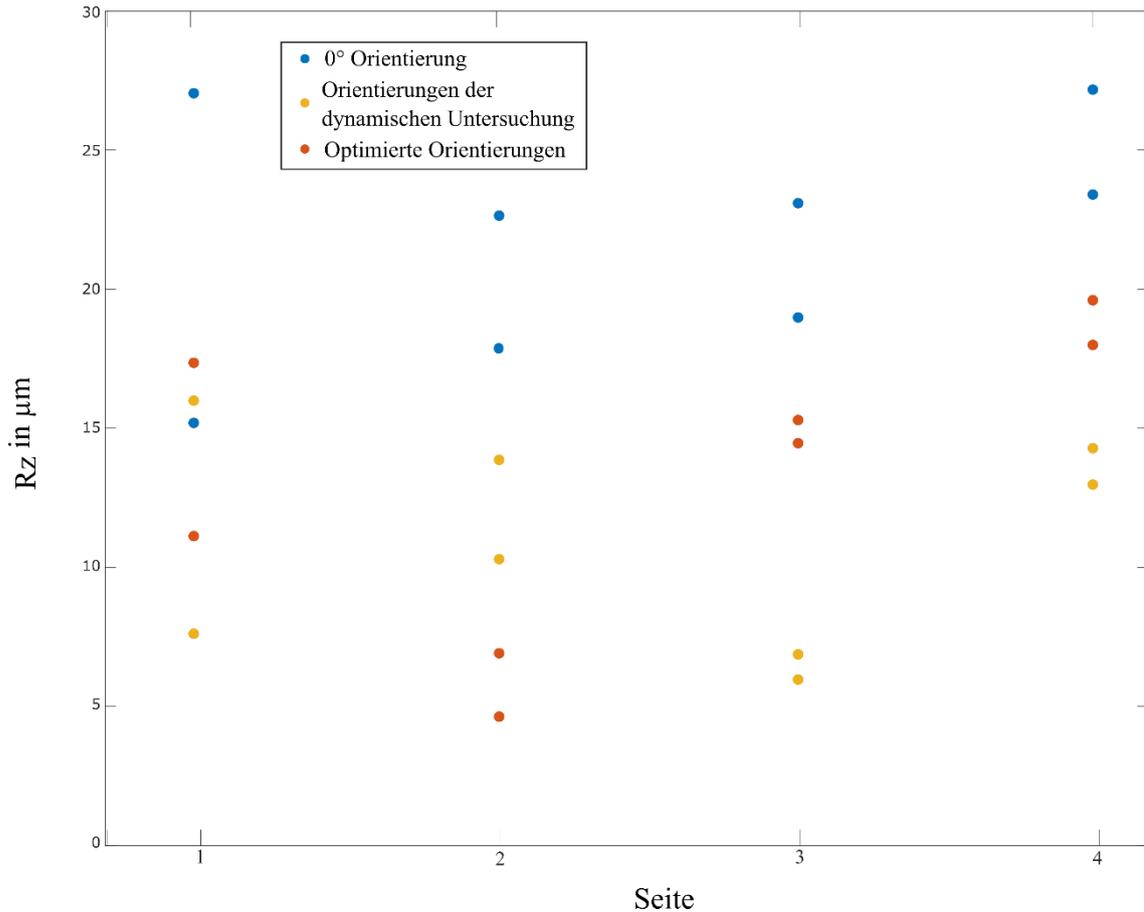


Abbildung 8.7: Erzielte Rauheitswerte R_z in den Zerspanversuchen.

Die Rauheitsmessungen ergeben ein ähnliches Bild. Die R_z -Werte, dargestellt in Abbildung 8.7 zeigen, dass die mit 0° Orientierung zerspannten Bauteile die höchsten R_z -Werte aufweisen und die Zerspannung mit optimierten Orientierungen zu kleineren R_z -Werten führen. Lediglich für Seite zwei erzielen die Orientierung aus der dynamischen Untersuchung bessere R_z -Werte. Auch hier zeigt sich, dass für die Seite vier die schlechtesten Werte erzielt werden.

Die Ergebnisse der Oberflächenuntersuchungen spiegeln sich auch in den Fräskräften wider. Die Fräskräfte wurden entsprechend der Orientierung umgerechnet, sodass sie alle im gleichen Koordinatensystem liegen und vergleichbar sind. Sie zeigen, dass bei der Zerspannung mit Orientierung um 0° die Fräsvorgänge in $\pm Y$ -Richtung, was Seite eins und Seite drei beschreibt, in den Fräskräften in X-Richtung stabiler sind als in Y-Kraftrichtung, wie Abbildung 8.8 darstellt. Dagegen ist in Vorschubrichtung $\pm X$, was Seite zwei und vier entspricht, die Kraftrichtung Y stabiler, während X-Richtung hohe Amplituden aufweist.

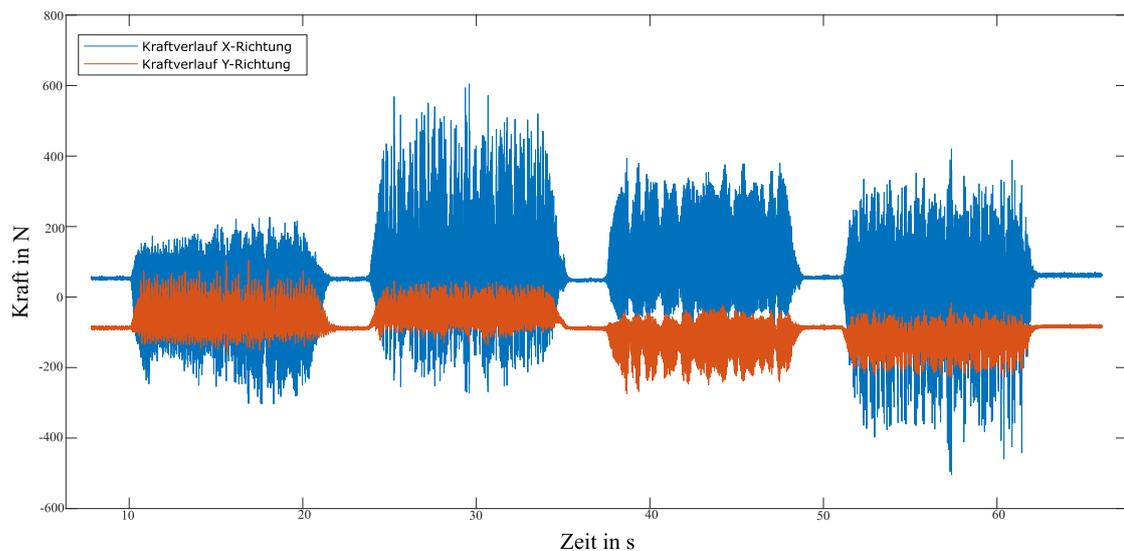


Abbildung 8.8: Dargestellt sind die während der Zerspanung mit 0° Orientierung aufgezeichneten Kräfte in X- und Y-Richtung über den kompletten Umfang des Quaders von Seite eins bis vier.

Dieses Verhalten spiegelt sich auch in den Frequenzgängen wider, welche in Abbildung 8.9 und Abbildung 8.10 dargestellt sind.

Für die Orientierung mit 0° ist in den Frequenzgängen deutlich die Frequenz der Spindeldrehzahl bei 44 Hz sowie die doppelte Frequenz der Drehzahl bei 88 Hz zu erkennen. In den Frequenzgängen treten hier breitbandige Anregungen auf. Dagegen sind diese Frequenzen in beiden Raumrichtungen für die Orientierung der dynamischen Untersuchungen nicht erkennbar. Bei den optimierten Orientierungen treten sie nur bei 88 Hz und in Kraftrichtung X für Seite zwei und vier auf. Dagegen tritt bei den Orientierungen aus den dynamischen Untersuchungen ein Peak bei einer Frequenz von 12 Hz auf, vor allem für die Seiten zwei und vier, mit Vorschubrichtung in X-Richtung. Diese Peaks wurden auch in den dynamischen Untersuchungen in Kapitel 5 beobachtet. Insgesamt zeigt sich, dass die Orientierungen der dynamischen Untersuchungen und die optimierten Orientierungen zu stabileren Prozessen führen. Dagegen sind die Versuche mit 0° Orientierung am instabilsten. Auffällig ist, dass sich die Instabilitäten der optimierten Orientierungen bei 88 Hz für Seite zwei und Seite vier nicht in den Rauheits- und Welligkeitskennwerten abzeichnen.

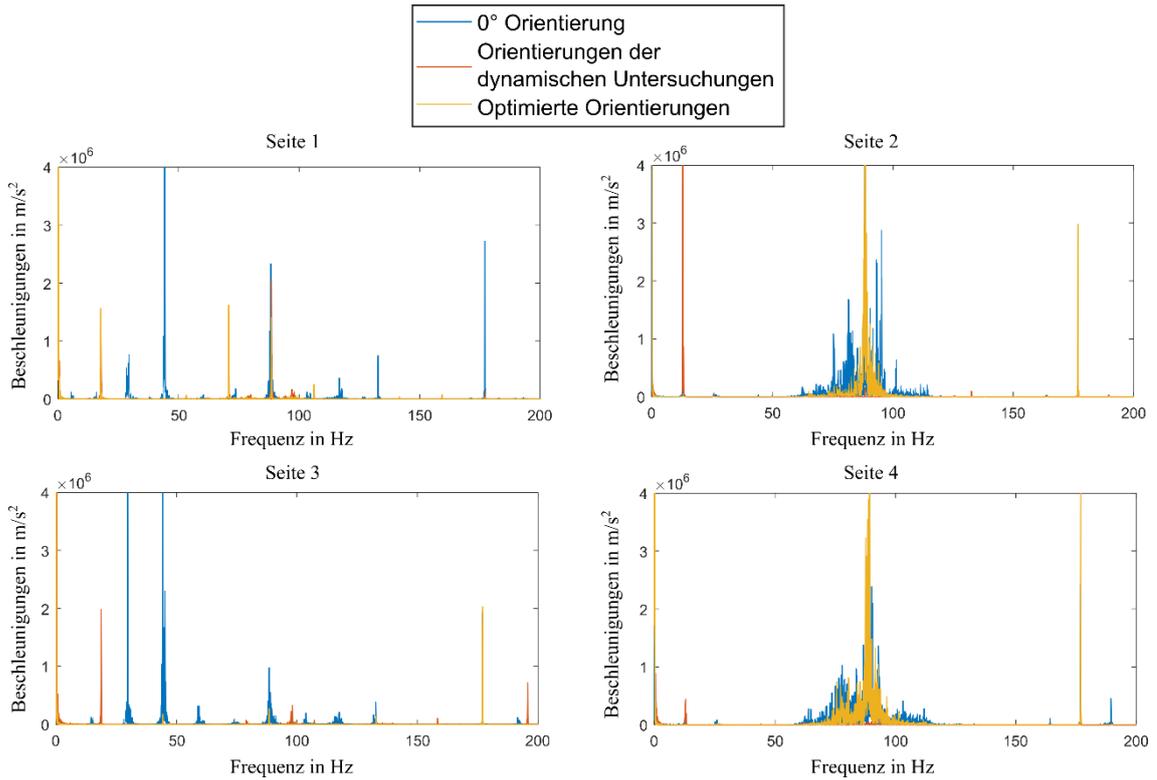


Abbildung 8.9: Frequenzgänge der Seiten ein bis vier der Versuche 0° (blau), dynamisch (rot) optimiert (gelb) in X-Richtung.

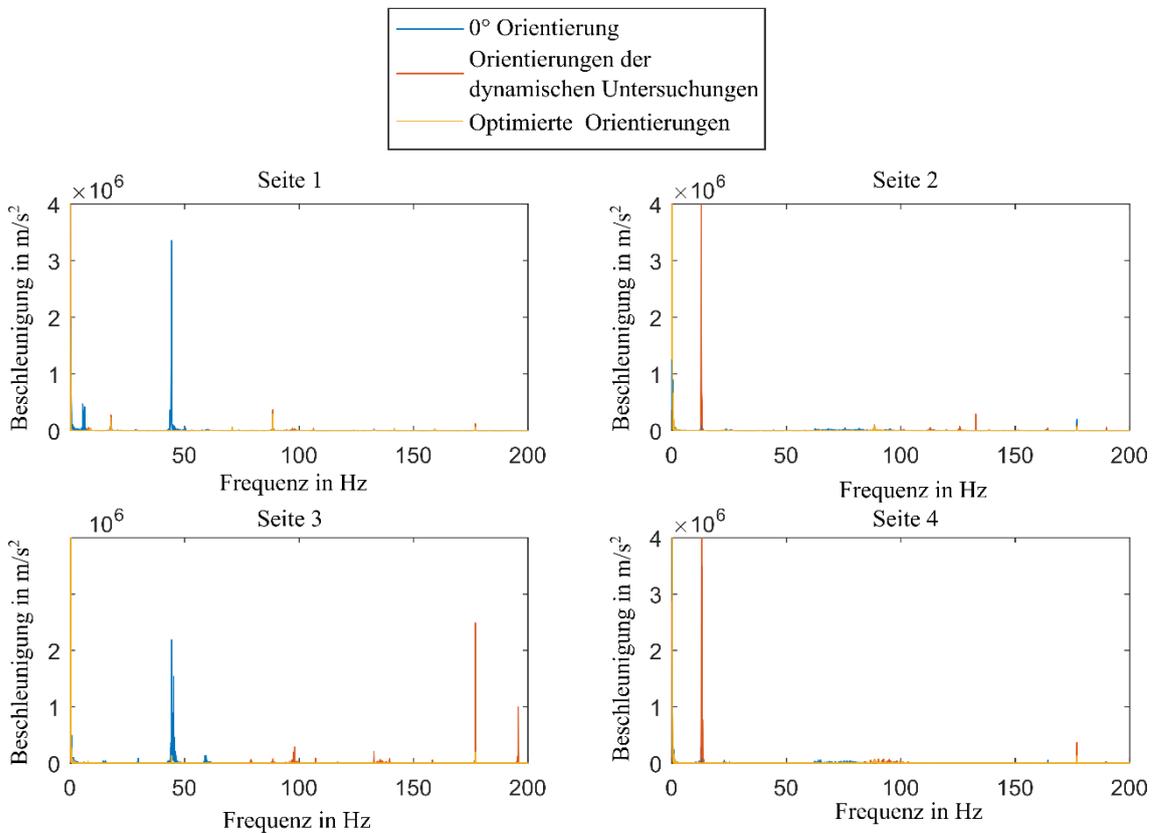


Abbildung 8.10: Frequenzgänge der Seiten ein bis vier der Versuche 0° (blau), dynamisch (rot) optimiert (gelb) in Y-Richtung.

Die Frequenzgänge der Versuchsreihe mit erhöhter Vorschubgeschwindigkeit, die zu höheren Fräskräften und instabileren Prozessen führt, zeigen, dass die Überhöhungen bei 12 Hz auch bei der Orientierung um 0° auftreten. Zudem wird auch bei den Orientierungen der dynamischen Untersuchungen die doppelte Kreisfrequenz mit 88 Hz sichtbar, hier vor allem für Seite eins und drei. Auch die in Kapitel 5 beobachtete Amplitude bei 18 Hz tritt bei den optimierten Orientierungen und denen der dynamischen Untersuchung auf, wie Abbildung 8.11 und Abbildung 8.12 zeigen.

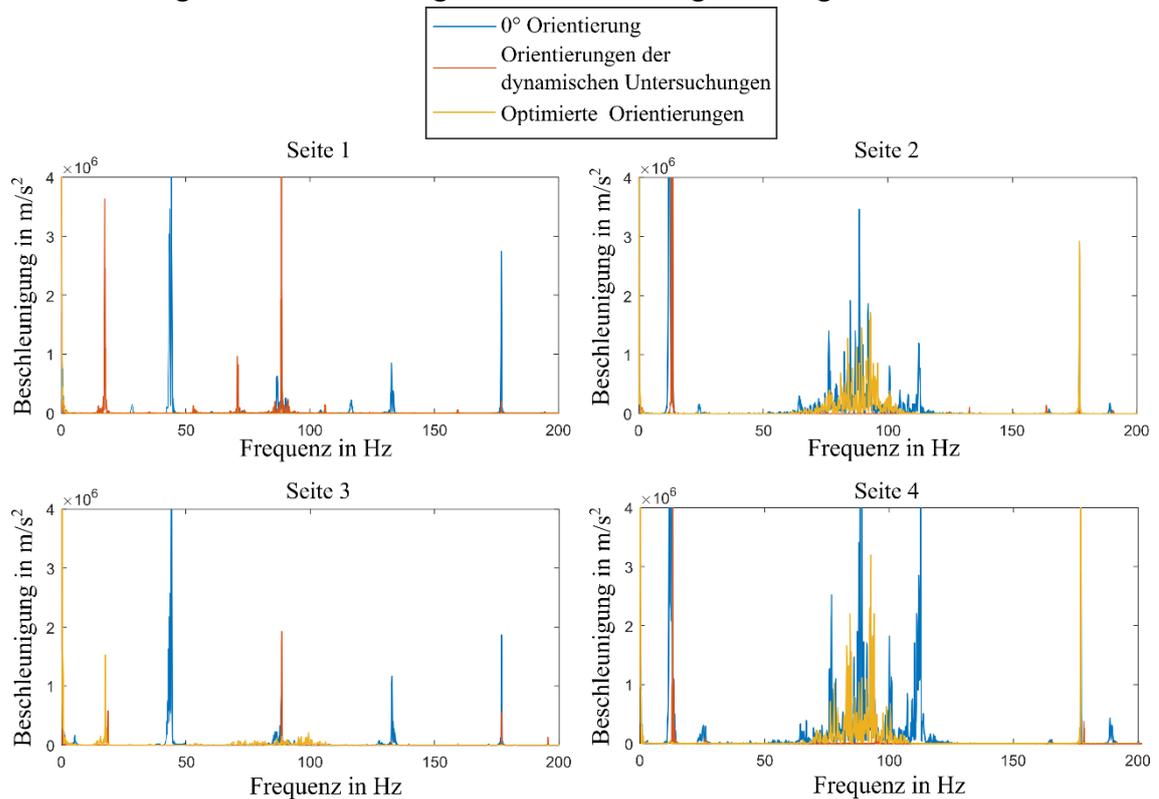


Abbildung 8.11: Frequenzgänge der Seiten ein bis vier der Versuche mit erhöhter Vorschubgeschwindigkeit 0° (blau), dynamisch (rot) optimiert (gelb) in X-Richtung.

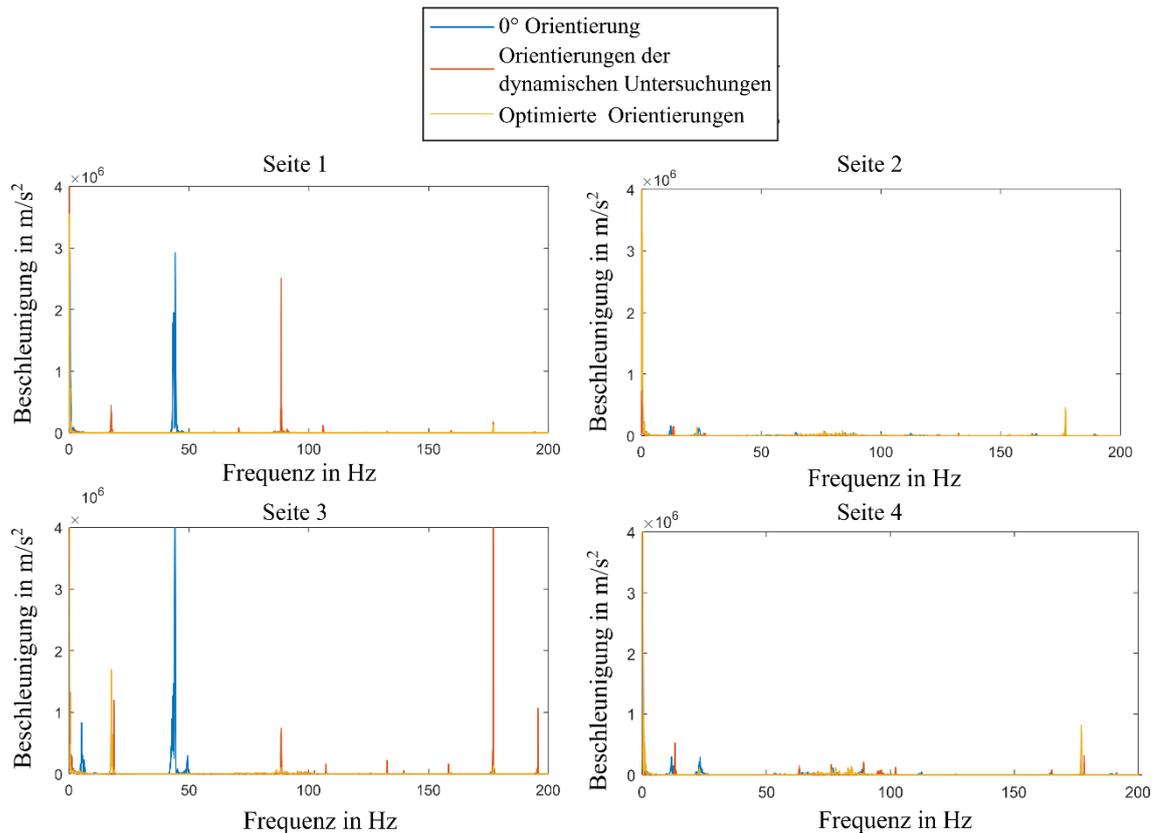


Abbildung 8.12: Frequenzgänge der Seiten ein bis vier der Versuche mit erhöhter Vorschubgeschwindigkeit 0° (blau), dynamisch (rot) optimiert (gelb) in Y-Richtung.

Die Oberflächenparameter der optimierten Orientierungen und der aus der dynamischen Untersuchung stammenden Orientierungen erzielen auch unter höherer Vorschubgeschwindigkeit geringere Werte. Die gesamten Oberflächenkennwerte sind im Anhang A.3 dargestellt.

Ähnlich zu den Oberflächenparametern verschlechtert sich auch die Profilabweichung bei allen Orientierungen unter erhöhter Vorschubgeschwindigkeit. Auffällig ist hierbei, dass die Schwankungen in der Profilabweichung vor allem der Orientierung um 0° deutlich größer werden. Während sie bei der mittels Optimierung identifizierten Orientierungen um 0,08 mm schwanken, liegen sie bei der Orientierung um 0° bei bis zu 0,2 mm. Interessant ist, dass bei den optimierten Orientierungen die Abweichungen in X-Richtung, also für Seite eins und drei mit Abweichungen zwischen 0,23 mm und 0,3 mm deutlich höher sind als in Y-Richtung mit 0,12 mm bis 0,2 mm. Hingegen sind bei der Orientierung um 0° die Abweichungen in Y-Richtung an den Seiten zwei und vier mit 0,15 mm bis 0,29 mm höher. Die Quader sind in Abbildung 8.13 dargestellt.

Insgesamt zeigt sich, dass die Abdrängung in Y-Richtung deutlich höher wird, was sich durch die Nachgiebigkeit der Roboterstruktur in Y-Richtung erklären lässt. Die Abweichungen der Seiten zwei und vier sind mit durchschnittlich 0,15 mm höher als die der Seiten eins und drei.

darstellt die Orientierung -5° . Die Lage der Quadranten ist der Abbildung 8.15 zu entnehmen.

Aus Vorversuchen und Arbeiten der Literatur ist bekannt, dass es sehr häufig und für viele gängige Industrieroboter unter der Orientierung 0° im dritten Quadranten zu Instabilitäten kommt. Diese Instabilitäten treten auch in den hier durchgeführten Versuchen auf. Sie führen zu einem Aufschwingen der Roboterstruktur, was in den Scandaten deutlich sichtbar ist, wie Abbildung 8.14 zeigt.

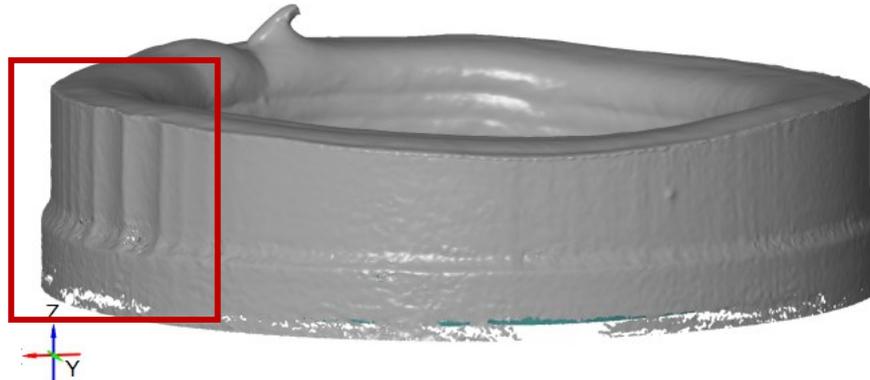


Abbildung 8.14: Mit Orientierung 0° gefräster Zylinder. Markiert sind die deutlich erkennbaren Instabilitäten des Prozesses. Die Darstellung ist in negative Y-Richtung, sodass auf Quadrant zwei und drei geblickt wird.

An der Stelle der Instabilitäten kommt es zu Oberflächenabweichungen von bis zu $-0,29$ mm, während die restliche Oberfläche sich eher durch positive Abweichungen auszeichnet, wie Abbildung 8.15 zeigt. Durch die Instabilitäten wird die Soll-Geometrie des Zylinders verletzt.

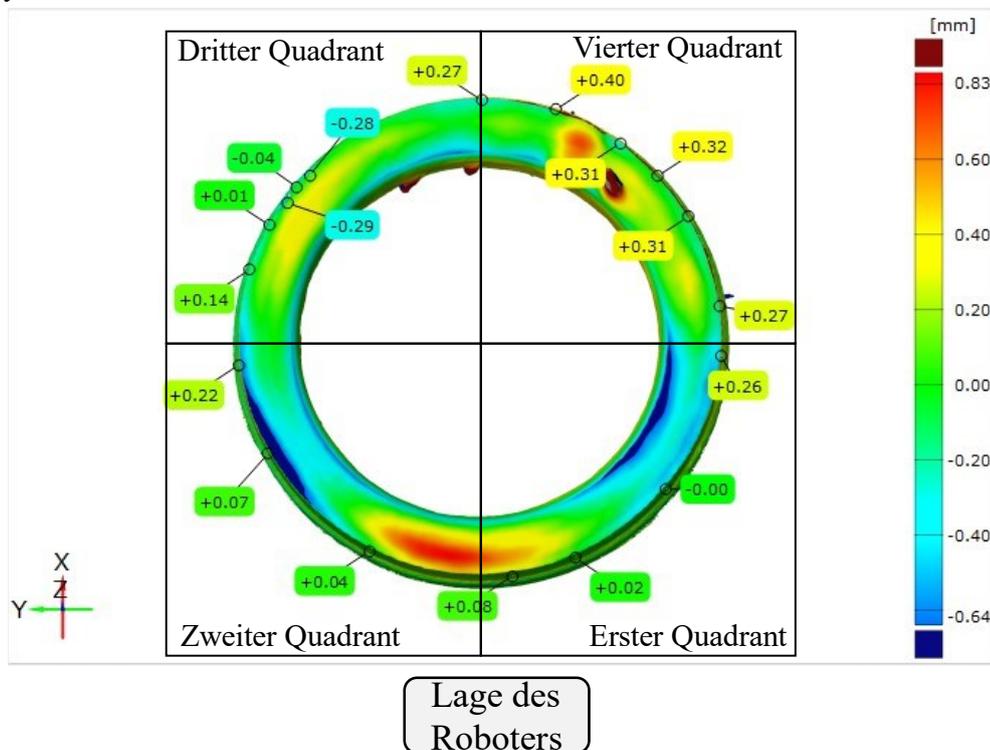


Abbildung 8.15: Soll-Ist-Vergleich des mit 0° Orientierung zerspannten Zylinders.

In den Profilabweichungen des Zylinders gefräst mit Orientierung von $\pm 5^\circ$ treten diese Instabilität nicht auf. Hier kommt es zu Profilabweichungen durch zu viel Material mit bis zu 0,24 mm. Die Ungenauigkeit ist vor allem in den ersten beiden Quadranten des Zylinders hoch, während die dritten und vierten vergleichsweise geringe Profilabweichungen und geringe Schwankungen in den Werten auftreten, wie Abbildung 8.16 zeigt.

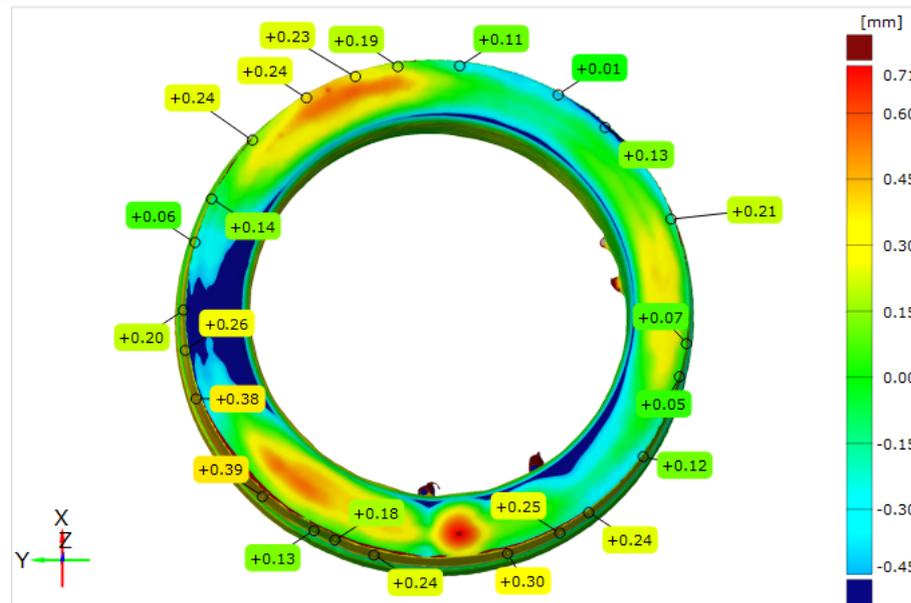


Abbildung 8.16: Zylinder mit Orientierungen von $\pm 5^\circ$ zerspant

In den Frequenzgängen der zweiten Hälfte des mit Orientierung gefrästen Zylinders zeigt sich, dass die Amplitude durch die -5° Orientierung nach oben verschoben wird. Zwar sind die Amplituden bei 88 Hz deutlich höher als bei der 0° Orientierung, jedoch verschwindet die Amplitude bei 12 Hz, wie Abbildung 8.17 zeigt.

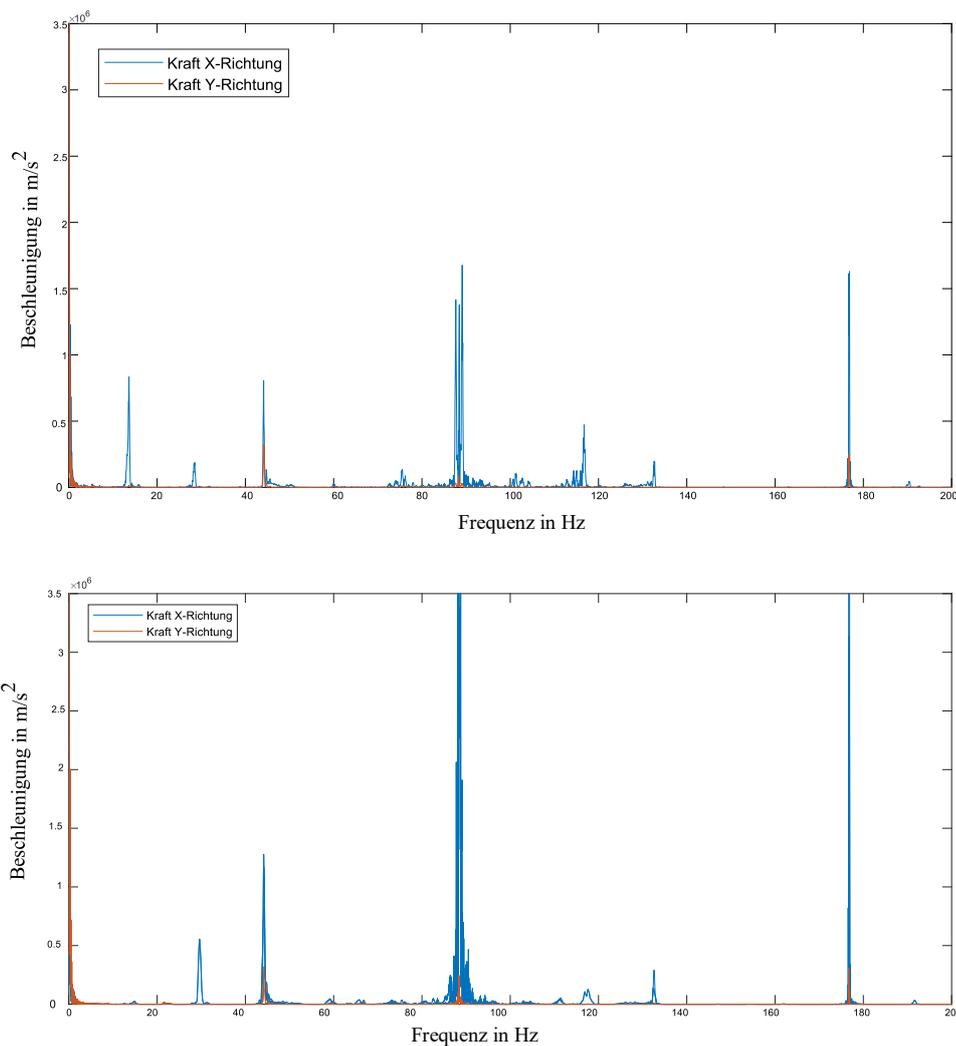


Abbildung 8.17: Frequenzgänge der Zerspanung der Zylinder, oben mit 0° Orientierung, unten mit 5° Orientierung.

Aus diesen Versuchen lässt sich schließen, dass für runde Geometrien schon eine geringe Änderung der Orientierung zu einer höheren Prozessstabilität führen kann. Um die Genauigkeit und Stabilität zu steigern, wird idealerweise die erste Hälfte des Zylinders mit einer Orientierung um 0° und die zweite Hälfte mit einer Orientierung um -5° bearbeitet. Damit werden von beiden Versuchen die Optima verwendet.

Einordnung der Ergebnisse

Die Validierungsergebnisse zeigen, dass die Orientierung des TCPs einen Einfluss auf die Formabweichung und die Oberflächenbeschaffenheit haben. Durch die Umorientierung des TCPs können die Prozesse genauer und stabiler gestaltet werden. Für die Zerspanung der Quader erzielen die optimierten Orientierungen die besten Ergebnisse hinsichtlich Formabweichung und Oberflächengüte. Die Formabweichung ist je nach Vorschubgeschwindigkeit und Vorschubrichtung um bis zu 0,2 mm geringer. Zudem zeigt sich in den Versuchen, dass durch die Umorientierung des TCPs die

Formabweichungen über die Fläche weniger schwanken. Wird für alle Vorschubrichtungen mit der gleichen Orientierung gearbeitet, variieren die Ergebnisse je nach Vorschubrichtung deutlich. Für jede Vorschubrichtung gibt Vorzugsorientierungen. Für die Zerspanung in +Y-Richtung sollte die Orientierung positiv sein und im Bereich 20° bis 30° liegen, für die Bearbeitung in -Y-Richtung dagegen negativ sein und im Bereich -50° bis -60° liegen. Die Bearbeitung in +X-Richtung wird genauer und stabiler mit Orientierungen zwischen 10° und 30° , während für -X-Richtung Orientierungen von -10° bis -30° vorteilhaft sind. Die über das Steifigkeitsmodell berechneten Abweichungen für die Zerspanversuche stimmen nur in der Tendenz mit den erzielten Formabweichungen überein. Jedoch ist das Steifigkeitsmodell ausreichend für die Optimierung der Orientierung und somit für die Genauigkeits- und Stabilitätssteigerung. Es wird gezeigt, dass eine grobe Abschätzung der Fräskräfte und ihr Verhältnis zueinander ausreicht, um die Orientierung der Pose zu optimieren und die Genauigkeit um bis zu 0,2 mm zu steigern bei gleichzeitiger Verringerung der Schwankungen in den Formabweichungen.

Die Zerspanung der Zylinder zeigt, dass schon eine kleine Änderung der Orientierung um den Bereich 0° großen Einfluss auf die Stabilität des Prozesses hat. Über die Umorientierung können Bereiche, in denen typischerweise instabiles Verhalten auftritt, stabilisiert und so eine Verletzung der Soll-Geometrie vermieden werden. Für die Bearbeitung von Kreisgeometrien ist eine zweigeteilte Zerspanung vorteilhaft.

Die Validierungsversuche bestätigen die Annahme, dass die Orientierung des TCPs Einfluss auf die Genauigkeit des Zerspanprozesses haben. Bezogen auf FF5 zeigen die Validierungsversuche, dass unter Beibehaltung der Werkzeug-Werkstückkonstellation und der kartesischen Werkstückposition durch die Umorientierung des Endeffektors die Stabilität des Fräsprozesses gesteigert werden kann.

9 FOLGERUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen dieser Arbeit, dass die Optimierung der Orientierung des TCPs um die Werkzeugachse unter Beibehaltung seiner kartesischen Position einen präziseren und stabileren Zerspanprozess für die Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile ermöglicht. Diese Prozessverbesserung verringert das Risiko der Verletzung der Soll-Geometrie. Dabei wird die Verbesserung unter Beibehaltung der Position der Bauteile im Arbeitsraum erzielt, wodurch die Vorteile der Industrierobotik hinsichtlich des Arbeitsraums und der Flexibilität erhalten bleiben. Auch die Kosteneffizienz des Roboters bleibt erhalten, da für die hier verwendeten Methoden die Notwendigkeit teurer, zusätzlicher Sensorik entfällt.

Durch das implementierte Verfahren wird auf kostengünstige und aufwandsarme Weise mittels anwenderfreundlicher Programmierung eine Steigerung der Bauteilgenauigkeit und Oberflächenqualität erreicht. Insbesondere zu Beginn des Fräsprozesses von additiv gefertigten Bauteilen ist ein stabiler Fräsprozess wichtig, da sich aufgrund der inhomogenen Oberflächen wechselnde Bedingungen im Fräsprozess einstellen, die zu unsteten Prozessbedingungen und somit zu erhöhtem Werkzeugverschleiß führen können.

Aufgrund der erreichbaren Genauigkeiten eignet sich die roboterbasierte Zerspanung nicht für die Komplettbearbeitung von beispielsweise Presswerkzeugen in der Qualitätsschleife. Die hier notwendigen Genauigkeiten von $\pm 0,05$ mm werden von den heute gängigen Robotersystemen nicht erreicht. Jedoch ergeben sich Einsatzmöglichkeiten in der Schruppbearbeitung und Vorbearbeitung der additiv gefertigten Bauteile. Die in dieser Arbeit erreichten Genauigkeiten liegen im Bereich $+0,1$ mm bis $+0,3$ mm. Bei der Schruppbearbeitung muss je nach Anwendung ein Schlichtaufmaß im Bereich von $+0,5$ mm eingehalten werden, weshalb die erzielten Genauigkeiten ausreichend sind und die Soll-Geometrie der Bauteile nicht verletzt wird. Im Vergleich zur Ausgangsorientierung mit 0° ist über die Optimierung der Orientierung die Gefahr des instabilen Prozessverhaltens und somit die Verletzung der Soll-Geometrie reduziert. Zudem kann mittels der Änderung der Orientierung eine höhere Schnitttiefe umgesetzt werden aufgrund der höheren Stabilität des Prozesses. Dies hat Einfluss auf die Dauer des Fräsprozesses und somit auf die Effizienz.

Die Kombination von additiver und subtraktiver Bearbeitung in einer Aufspannung ermöglicht die Herstellung von Oberflächen, die deutlich präziser auf Werkzeugmaschinen einmessbar sind als die unsteten Oberflächen der unbearbeiteten DED-Bauteile. Zudem sind innenliegende Funktionsflächen durch die flexible Prozesskombination herstellbar.

Somit kann die Bearbeitungszeit auf der Werkzeugmaschine verkürzt und lediglich der Schlichtprozess durchgeführt werden. Da Werkzeugmaschinen einen höheren Maschinenstundensatz haben im Vergleich zum Industrieroboter, sinken die Kostenanteile für die Maschinennutzung.

Die erarbeitete Vorgehensweise zeichnet sich durch eine einfache Übertragbarkeit auf andere Robotertypen aus und ist anwenderfreundlich umsetzbar. Zudem ist sie nicht nur für die Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile einsetzbar, sondern auch für die Bearbeitung konventionell hergestellter Bauteile.

Die Änderung der Orientierung des TCPs ist durch Anpassung des Prozesses in der CAM-Bahnplanung effizient möglich. Zudem kann durch reduzierte Versuchsaufwände das Steifigkeitsverhalten des jeweils verwendeten Roboters untersucht werden, um das Steifigkeitsmodell aufzustellen und optimierte Orientierungen für den jeweiligen Roboter zu identifizieren.

Aus der Aufbereitung des Stands der Forschung in dieser Arbeit ist festzustellen, dass trotz unterschiedlicher Robotertypen ähnliche Herausforderung in Zerspanungsanwendungen bestehen. Hier eröffnen sich Möglichkeiten zur Standardisierung. Es wird angenommen, dass für die Bearbeitung bei allen Robotertypen ähnliche Orientierungen des TCPs oder zumindest Orientierungsrichtungen zu Verbesserungen der Genauigkeit und Stabilität der Zerspanprozesse führen. Hierfür sind jedoch weitere Versuche an unterschiedlichen Robotertypen notwendig.

Eine Integration der Methode in CAM-Programme ist aufgrund des geringen Implementierungs- und Umsetzungsaufwands empfehlenswert für Softwarehersteller. Jedoch sind dafür weitere Untersuchungen zur Übertragbarkeit erforderlich.

Insgesamt stellt die vorgestellte Methode somit eine anwenderfreundliche Möglichkeit zur Verbesserung der Arbeitsgenauigkeit der roboterbasierten spanenden Nachbearbeitung von additiv gefertigten Bauteilen für die Industrie dar.

10 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Die Relevanz des Themas Nachhaltigkeit nimmt in der Produktionslandschaft Deutschlands kontinuierlich zu. In diesem Zusammenhang gewinnt die additive Fertigung zunehmend an Bedeutung, da sie das Potential hat, den Ressourcenverbrauch, insbesondere den Materialverbrauch in der Produktion, zu reduzieren. Beispielsweise kann in der Luftfahrt das Buy-to-Fly-Ratio, was das Verhältnis von Rohmaterialgewicht zu Bauteilgewicht im Produkt ausdrückt, signifikant reduziert werden [TEP2023a]. Additivverfahren mit hohen Auftragsraten, insbesondere das Verfahren Directed Energy Deposition, erweisen sich als besonders vielversprechend für die Herstellung und Reparatur großer Bauteile. Diese Verfahren sind jedoch mit erhöhten Nachbearbeitungsaufwänden im Vergleich zu alternativen Additivprozessen wie dem Pulverbettverfahren verbunden.

Die Integration der hybrid-additiven Fertigungskette in einer Roboterzelle ermöglicht die flexible Bearbeitung der über hohe Auftragsraten hergestellten Bauteile. Dabei werden die Vorteile des Roboters hinsichtlich Flexibilität, großem Arbeitsraum bei gleichzeitig geringen Anschaffungskosten im Vergleich zur Werkzeugmaschine ausgenutzt. Die Bearbeitung in einer Zelle mit der Möglichkeit der flexiblen Prozesskombination ermöglicht die synergetische Verknüpfung der Vorteile der additiven und der subtraktiven Fertigungsprozesse.

Allerdings weisen Robotersysteme im Vergleich zu Werkzeugmaschinen eine geringere Steifigkeit auf, was zu einem ungenaueren und instabileren Zerspanprozess führen kann. Zudem geht die Zerspanung additiv gefertigter Bauteile mit größeren Herausforderungen einher im Vergleich zu konventionell gefertigten Bauteilen, resultierend aus unsteten Oberflächenstrukturen und unsteten Mikrostrukturen der additiv gefertigten Bauteile.

Die auftretenden Instabilitäten während der fräsenden Bearbeitung führen zu einer geringeren Oberflächenqualität und Formabweichungen, die die Soll-Geometrie der Additivbauteile verletzen. Dies führt zu erhöhten Kosten durch Ausschuss der additiv gefertigten Bauteile. Daher sind präzisere und stabile Bearbeitungsprozesse zu entwickeln, um die Herausforderungen der roboterbasierten Zerspanung additiv gefertigter Bauteile zu bewältigen.

Ziel dieser Arbeit ist daher, die Steigerung der Genauigkeit bei der Zerspanung von additiv gefertigten Bauteilen mit Industrierobotern. Dies erfolgt über die Identifikation von stabileren und genaueren Prozesskonstellationen, die gleichzeitig kostengünstig und anwenderfreundlich zu implementieren sind. Dabei soll die Position der Bauteile im Arbeitsraum sowie die Werkzeug-Werkstückorientierung nicht verändert werden.

Die Änderung der Orientierung des TCPs um die Werkzeugachse ermöglicht unter Beibehaltung der kartesischen Position und der Werkzeug-Werkstückkonstellation eine Veränderung des statischen und dynamischen Verhaltens der Roboterstruktur während des Fräsprozesses. Ermöglicht wird diese Umorientierung durch Nutzung des zusätzlichen Freiheitsgrades des Robotersystems im Vergleich zur Werkzeugmaschine

Die grundlegende Hypothese dieser Arbeit ist, dass über die Umorientierung des TCPs um die Werkzeugachse der Fräsprozess genauer und stabiler verläuft aufgrund des sich ändernden Kraftangriffs auf die einzelnen Gelenke der Roboterstruktur.

Zur Untersuchung dieser Hypothese wird in Vorversuchen zunächst die Zerspanbarkeit von additiv gefertigten Bauteilen im Vergleich zu konventionell hergestellten Bauteilen analysiert. Hierbei wird ersichtlich, dass die Zerspanung von additiv gefertigten Bauteilen im Vergleich zu konventionell hergestellten Bauteilen mit höheren Kräften einher geht. Zudem sind die Fräskräfte während des Prozesses deutlich unsteter, resultierend aus der unsteten Mikrostruktur und der unsteten Oberflächen der Additivbauteile.

Die Versuche zeigen ebenfalls, dass für die Nachbearbeitung der Bauteile eine Materialabnahme zwischen 2 mm und 3 mm erforderlich ist, um die äußere Schicht der Bauteile vollständig zu entfernen, bedingt durch die unregelmäßige Oberflächenstruktur der Bauteile.

Anschließend erfolgt die Analyse des dynamischen Verhaltens der Roboterstruktur. Initial wird eine Modalanalyse zur Bestimmung der Eigenwerte verschiedener Posen durchgeführt. Diese zeigt, dass die ersten fünf Eigenfrequenzen im Bereich von 8 Hz und 35 Hz dynamische Verhalten ist vor allem durch die Struktureigenmoden in diesem Bereich geprägt.

Durch die Änderung der Orientierung des TCPs um die Werkzeugachse erfolgt lediglich eine geringfügige Verschiebung der ersten Eigenfrequenzen. Jedoch sind die Eigenformen der umorientierten Posen komplexer, wodurch die Verschiebungen am TCP nicht eindeutig Raumrichtungen zuzuordnen sind.

Im Anschluss an die Modalanalyse wird in Betriebsschwingungsmessungen das Verhalten der Roboterstruktur während des Fräsprozesses unter verschiedenen Orientierungen und Vorschubrichtungen untersucht. Hierbei zeigt sich deutlich, dass die Orientierung des TCPs einen erheblichen Einfluss auf das Stabilitätsverhalten des Roboters während des Zerspanvorgangs hat. In Abhängigkeit der Orientierung können bis zu viermal höhere Schnitttiefen erreicht werden als mit der Ausgangsorientierung von 0° . Besonders stabil gestaltet sich der Prozess, wenn der Flansch des Robotersystems die Spindel in Vorschubrichtung schiebt. Am stabilsten ist der Prozess in +X-Richtung mit einer Orientierung von $+30^\circ$, am instabilsten ist die Zerspanung in -X-Richtung. Zudem wird deutlich, dass Instabilitäten in Form von Rattern aufgrund von Lagekopplung auftreten, da die auftretenden Instabilitäten unabhängig von den Schnittgeschwindigkeiten im Prozess sind. Zudem tritt Rattern bei zuvor nicht bearbeitetem Material auf.

Zur Analyse der statischen Steifigkeit des genutzten Roboters und als Grundlage des Optimierungsmodell wird zunächst das Steifigkeitsmodell für den verwendeten Industrieroboter aufgestellt. Dafür wird der Modellierungsansatz der erweiterten Vorwärtskinematik gewählt.

Zur Identifikation der Steifigkeitsparameter wird der optimale Versuchsaufbau über die Bayessche Inferenz ermittelt, um so die Anzahl der erforderlichen Experimente zu reduzieren. Dieser Ansatz sieht vor, über die Umorientierung des TCPs den Informationsgehalt je Experiment zu erhöhen. Aufgrund der je nach Orientierung variierenden Belastungen der Gelenke unter definiertem Kraftangriff spiegeln sich die Steifigkeitsparameter der einzelnen Gelenke in den gemessenen Verschiebungen wider. Die so ermittelten Steifigkeitsparameter der einzelnen Gelenke werden anschließend in die erweiterte Vorwärtskinematik eingefügt. Zur Validierung des Steifigkeitsmodells wird die erwartete Verschiebung unter definierter Belastung mittels des Steifigkeitsmodells berechnet und anschließend mit den in Versuchen ermittelten Verschiebungen verglichen. Die Differenz der aus dem Steifigkeitsmodell ermittelten Verschiebungen und der tatsächlich gemessenen Verschiebungen unter einer Kraft von 500 N liegt im Bereich von maximal 0,6 mm bei einer Gesamtverschiebung von 3,2 mm in Y-Richtung. Es zeigt sich zudem, dass die Vorhersage in Y-Richtung präziser ist als in X-Richtung aufgrund des Versuchsaufbaus und der höheren Verschiebungen in Y-Richtung.

Das erstellte Steifigkeitsmodell bildet anschließend die Grundlage für die Identifikation statisch steiferer Orientierungen des TCPs. Hierfür wird ein Optimierungsmodell in *Matlab* aufgebaut, das die Pose des Roboters hinsichtlich der Verschiebung des TCPs unter definierter Last optimiert. Dies geschieht unter Beibehaltung der kartesischen Position und Orientierung des Werkzeugs um die X- und Y-Achse des Koordinatensystems. Die Optimierung berechnet die optimale Achsstellung des Robotersystems, um die Verschiebung in die einzustellende Raumrichtung oder alle Raumrichtungen zu minimieren.

Die Analyse der Berechnungsergebnisse zeigt, dass die Verschiebungen des TCPs durch die Änderung der Orientierung um bis zu 10 % verringert werden können. Es wird deutlich, dass die Verschiebungen je nach Kraftangriffsrichtung variieren.

Abschließend werden die Erkenntnisse aus der Optimierung und der dynamischen Untersuchung in Zerspanversuchen validiert. Dazu werden Versuche an Quader- und Zylindergeometrien durchgeführt, wobei verschiedene Orientierungen des TCPs verwendet werden. Neben der Ausgangsorientierung von 0° des TCP werden sowohl die in den dynamischen Untersuchungen identifizierten Orientierungen als auch die optimierten Orientierungen angewendet.

Die Versuche zeigen, dass die Verwendung der optimierten Orientierungen die besten Ergebnisse hinsichtlich Formgenauigkeit und Oberflächenqualität erzielen. Die Formabweichung verringert sich je nach Vorschubgeschwindigkeit und Vorschubrichtung um bis zu 0,2 mm im Vergleich zur Orientierung von 0° . Die Bauteiloberflächen, die mit 0° Orientierung erzeugt wurden, weisen höhere Werte in den Gestaltabweichungsmessungen, wie Welligkeiten, Rauheiten und Profilabweichungen, auf, als die Bauteile, die unter verbesserten Orientierungen hinsichtlich ihres

dynamischen und statischen Verhaltens gefertigt wurden. Diese erhöhten Werte weisen auf einen instabileren Prozess hin.

Die Versuche verdeutlichen, dass je Vorschubrichtung vorteilhafte Orientierungen identifiziert werden können. Für die Zerspanung in +Y-Richtung sollte die Orientierung positiv sein und im Bereich von $+20^\circ$ bis $+30^\circ$ liegen, für die Bearbeitung in -Y-Richtung dagegen negativ sein und im Bereich -50° bis -60° liegen. Die Bearbeitung in +X-Richtung wird genauer und stabiler mit Orientierungen zwischen $+10^\circ$ und $+30^\circ$, während für -X-Richtung Orientierungen von -10° bis -30° eine Verbesserung erzielen.

Die über das Steifigkeitsmodell berechneten Abweichungen für die Zerspanversuche stimmen nur tendenziell mit den erzielten Formabweichungen überein. Jedoch ist das Steifigkeitsmodell ausreichend für die Optimierung der Orientierung und somit für die Genauigkeits- und Stabilitätssteigerung. Es zeigt sich, dass eine Abschätzung der Fräskräfte unter Beibehaltung der Kräfteverhältnisse ausreicht, um die Posen zu optimieren und die Genauigkeit zu steigern.

Insgesamt zeigen die durchgeführten Untersuchungen und Modellierungen eine Verbesserung der Genauigkeit und Stabilität der Zerspanprozesse bei additiv gefertigten Bauteilen durch die Umorientierung des TCPs.

Jedoch liegen die erzielten Gesamtgenauigkeiten im Bereich 0,1 mm bis 0,3 mm, was für viele Anwendungsfälle nicht ausreichend ist, um eine Komplettbearbeitung durchzuführen. Der Schlichtvorgang der additiv gefertigten Bauteile muss daher nach wie vor auf der Werkzeugmaschine durchgeführt werden.

Ein weiterer kritischer Aspekt ist, dass nur die Bearbeitung in der X- und Y-Ebene untersucht wurde und nur die Umorientierung um die Z-Achse betrachtet wird. Dies wirft die Frage auf, ob dies eine Limitation des verwendeten Ansatzes ist und inwiefern diese Einschränkung den realen Einsatz der Methode beeinträchtigen könnte. In vorausgegangenen Arbeiten wurde die Änderung der Werkzeug-Werkstückorientierung untersucht, bei der die Spindel um die X-Achse des Base-Koordinatensystems gedreht wurde. Jedoch ist dadurch die Bearbeitung von Freiformflächen nicht möglich.

Zudem wird die Bahnplanung aufwendiger, da für jede Vorschubrichtung gegebenenfalls unterschiedliche Orientierungen verwendet werden müssen, um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen. Daher kommt es häufig zu Umorientierung im Prozess, was die Prozesszeit verlängert und die Bahnplanung komplexer macht.

Außerdem wurde in dieser Arbeit die Absolutgenauigkeit des Roboters nicht berücksichtigt. Diese kann für eine Verringerung der Genauigkeit führen, besonders wenn nur Abschnitte von Bauteilen bearbeitet werden sollen, wie beispielsweise bei der Reparatur von Presswerkzeugen.

Jedoch verdeutlicht diese Arbeit, dass durch die Änderung der Orientierung des TCPs der Fräsprozess genauer hinsichtlich Formabweichungen und stabiler hinsichtlich des dynamischen Verhaltens gestaltet werden kann. Die erreichbare Genauigkeit ist

ausreichend für die Schruppbearbeitung von Bauteilen, sodass in der Produktion Maschinenstunden auf teureren Werkzeugmaschinen eingespart werden können.

Die Gefahr der Verletzung der Soll-Kontur der additiv gefertigten Bauteile aufgrund von auftretenden Instabilitäten wird verringert.

Der vorgestellte Ansatz ist durch das ähnliche Verhalten und des einfachen Aufbaus des Optimierungsmodells auf andere Roboterstrukturen übertragbar. Darüber hinaus erfordert er keine genaue Kenntnis der tatsächlich wirkenden Kräfte, erste Abschätzungen reichen aus.

Insgesamt stellt der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz einen kostengünstigen und einfach zu implementierenden Ansatz dar, um die Genauigkeit und Stabilität der roboterbasierten Zerspanung von additiv gefertigten Bauteilen zu erhöhen.

Damit leistet diese Arbeit einen Beitrag, die additive Fertigung und die subtraktive Nachbearbeitung flexibel in die Produktion zu integrieren und so die Transformation hin zu einer flexiblen und ressourcenschonenden Fertigung weiter voranzutreiben.

LITERATURVERZEICHNIS

- [ABB2007] ABB AB Robotics (2007): Produkthandbuch. IRB 6660. Hg. v. ABB AB Robotics.
- [ABB2023] ABB AB Robotics (2023): IRB 6660. Designed for high performance applications. Online verfügbar unter <https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/knickarmroboter/irb-6660>.
- [ABB2017] ABB Automation GmbH (2017): IRB 6660 Industrieroboter. Friedberg. Online verfügbar unter <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107045A6284&LanguageCode=de&DocumentPartId=&Action=Launch>, zuletzt geprüft am 24.09.2023.
- [ABB2016] Abbasi, Sarwar Ali; Feng, Pingfa; Ma, Yuan; Zhang, Jianfu; Yu, Dingwen; Wu, Zhijun (2016): Influence of microstructure and hardness on machinability of heat-treated titanium alloy Ti-6Al-4V in end milling with polycrystalline diamond tools. In: *Int J Adv Manuf Technol* 86 (5-8), S. 1393–1405. DOI: 10.1007/s00170-015-8245-1.
- [ABE2017] Abele, Eberhard; Baier, Christian; Tepper, Cornelia; Bay, Stephan; Kuhn, Clemens (2017): Bessere Qualitätsschleifen. In: *Form + Werkzeug, Carl Hanser Verlag, München* 26 (4), S. 62–63. Online verfügbar unter <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/90682/>.
- [ABE2018] Abele, Eberhard; Baier, Christian; Kaubisch, Marc; Thieme, Sebastian; Nowotny, Steffen; Rupp, Stefan et al. (2018): Ergebnisbericht zum Verbundvorhaben: hochproduktive generative Produktherstellung durch laserbasiertes, hybrides Fertigungskonzept. Progen : BMBF-Rahmenkonzept Forschung für die Produktion von morgen, Fördermaßnahme "Hochleistungsverfahren für die Produktion von Morgen - Technologieinnovationen auf dem Weg zur intelligenten Fertigung". Hg. v. Steffen Nowotny und Sebastian Thieme. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [ALT2004] Altintas, Y.; Weck, M. (2004): Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding. In: *CIRP Annals* 53 (2), S. 619–642. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60032-8.
- [ALT2012] Altintas, Yusuf (2012): Manufacturing automation. Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- [AUE2015] Auerbach, T.; Gierlings, S.; Veselovac, D.; Seidner, R.; Kamps, S.; Klocke, F. (2015): Concept for a Technology Assistance System to Analyze and

- Evaluate Materials and Tools for Milling. In: Volume 6: Ceramics; Controls, Diagnostics and Instrumentation; Education; Manufacturing Materials and Metallurgy; Honors and Awards. ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. Montreal, Quebec, Canada, 15.06.2015 - 19.06.2015: American Society of Mechanical Engineers.
- [BAI2019a] Baier, Christian; Weigold, Matthias (2019): Robot-Based Hybrid Manufacturing Process Chain. Unter Mitarbeit von The University of Texas at Austin.
- [BAI2019b] Baier, Christian; Hähn, Felix; Tepper, Cornelia; Weigold, Matthias (2019): Robot-Based Hybrid Production Concept. In: Jens Peter Wulfsberg, Wolfgang Hintze und Bernd-Arno Behrens (Hg.): Production at the leading edge of technology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 451–460.
- [BAI2021] Baier, Christian (2021): Fertigung von Luftfahrtstrukturbauteilen mit hybridem Roboterbearbeitungskonzept. Dissertation Shaker Verlag, Düren.
- [BAR2012] Bargel, Hans-Jürgen; Schulze, Günter (Hg.) (2012): Werkstoffkunde. Jetzt mit Aufgaben und Lösungen. 11., bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Springer-Lehrbuch).
- [BÄT2017] Bättig, Daniel (2017): Angewandte Datenanalyse. Der Bayes'sche Weg. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum (Statistik und ihre Anwendungen).
- [BAU2012] Bauer, Jörg (2012): Methoden der Offline- Bahnkorrektur für die spanende Bearbeitung mit Industrierobotern. Berlin: epubli GmbH.
- [BAU2014] Baur, Matthias (2014): Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen. München: utzverlag (Forschungsberichte iw, v.290). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6897348>.
- [BEY2005] Beyer, Lukas (2005): Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern. Zugl.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2004 Shaker, Aachen.
- [BRE2016] Brecher, Christian; Weck, Manfred (2016): Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2. Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung. 9. Aufl. 2016. Berlin, s.l.: Springer Berlin (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://www.springer.com/>.
- [BÜN2019] Bünner, Martin (2019): Optimierung für Wirtschaftsingenieure. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler (Schriften zum Wirtschaftsingenieurwesen).
- [BUS2022] Busch, Maximilian; Zaeh, Michael F. (2022): Multi-Fidelity Information Fusion to Model the Position-Dependent Modal Properties of Milling Robots. In: *Robotics* 11 (1), S. 17. DOI: 10.3390/robotics11010017.

- [CEN2017a] Cen, Lejun; Melkote, Shreyes N. (2017): CCT-based mode coupling chatter avoidance in robotic milling. In: *Journal of Manufacturing Processes* 29, S. 50–61. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.06.010.
- [CEN2017b] Cen, Lejun; Melkote, Shreyes N. (2017): Effect of Robot Dynamics on the Machining Forces in Robotic Milling. In: *Procedia Manufacturing* 10, S. 486–496. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.034.
- [CHE2000] Chen, Shih-Feng; Kao, Imin (2000): Conservative Congruence Transformation for Joint and Cartesian Stiffness Matrices of Robotic Hands and Fingers. In: *The International Journal of Robotics Research* 19 (9), S. 835–847. DOI: 10.1177/02783640022067201.
- [COR2017] Cordes, Marcel; Hintze, Wolfgang (2017): Offline simulation of path deviation due to joint compliance and hysteresis for robot machining. In: *Int J Adv Manuf Technol* 90 (1-4), S. 1075–1083. DOI: 10.1007/s00170-016-9461-z.
- [COR2019a] Cordes, Marcel; Hintze, Wolfgang; Altintas, Yusuf (2019): Chatter stability in robotic milling. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 55, S. 11–18. DOI: 10.1016/j.rcim.2018.07.004.
- [COR2019b] Cordes, Marcel (2019): Modellierung von Bahngenaugigkeit und dynamischer Stabilität beim robotergeführten Fräsen. Dissertation Technische Universität Hamburg, Institut für Produktionsmanagement und -technik, Hamburg.
- [CRA2013] Craig, John (2013): Introduction to Robotics: Pearson New International Edition. Mechanics and Control. 3. Auflage. Harlow: Pearson Education Limited. Online verfügbar unter <https://elibrary.pearson.de/book/99.150005/9781292052526>.
- [DAS2019] Dass, Adrita; Moridi, Atieh (2019): State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design. In: *Coatings* 9 (7), S. 418. DOI: 10.3390/coatings9070418.
- [DEN2011] Denkena, Berend; Tönshoff, Hans Kurt (2011): Spanen. Grundlagen. 3., bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: SPRINGER (VDI-Buch).
- [DIE2008] Diebold (05.2008): Schwenkspindel für Fräsen + Bohren. Jungingen.
- [DRE2016] DRESIG, HANS; Holzweißig, Franz (2016): Maschinendynamik. Berlin, Heidelberg: SPRINGER.
- [EHM2016] Ehm, Alexander (2016): Einsatz von Industrierobotern für die Bohrbearbeitung an automobilen Strukturbauteilen unter Berücksichtigung des thermischen Verlagerungsverhaltens und der Prozessinteraktion TU Darmstadt.

- [ELA2003] Elatta, A. Y.; Li Pei Gen; Fan Liang Zhi; Yu Daoyuan; Luo Fei (2003): An Overview of Robot Calibration. In: *Information Technology J.* 3 (1), S. 74–78. DOI: 10.3923/itj.2004.74.78.
- [FAR2019] Faria, Carlos; Vilaca, Joao L.; Monteiro, Sergio; Erlhagen, Wolfram; Bicho, Estela (2019): Automatic Denavit-Hartenberg Parameter Identification for Serial Manipulators. In: IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Lisbon, Portugal, 14.10.2019 - 17.10.2019: IEEE, S. 610–617.
- [FER2023] Fertig, Alexander Joachim (2023): Datenbasierte, prozessparallele Qualitätsprognose für spanend hergestellte Werkstücke mittels maschinellen LernensTU Darmstadt.
- [FLY2016] Flynn, Joseph M.; Shokrani, Alborz; Newman, Stephen T.; Dhokia, Vimal (2016): Hybrid additive and subtractive machine tools – Research and industrial developments. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 101, S. 79–101. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007.
- [GER1991] Gerstmann, Uwe (1991): Robotergenauigkeit. Der Getriebeeinfluß auf die Arbeits- und Positionsgenauigkeit. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 1991 u.d.T.: Gerstmann, Uwe: Getriebeeinfluß auf die Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Robotern. Düsseldorf: VDI-Verl.
- [GIB2015] Gibson, Ian; Rosen, David; Stucker, Brent (2015): Additive manufacturing technologies. 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. Second Edition. New York, Heidelberg, Dodrecht, London: SPRINGER. Online verfügbar unter <https://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1617/2014953293-b.html>.
- [GOR2017] Gorsse, Stéphane; Hutchinson, Christopher; Gouné, Mohamed; Banerjee, Rajarshi (2017): Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys. In: *Science and technology of advanced materials* 18 (1), S. 584–610. DOI: 10.1080/14686996.2017.1361305.
- [GRI2018] Grimme, Christian; Bossek, Jakob (2018): Einführung in die Optimierung. Konzepte, Methoden und Anwendungen. Wiesbaden: Springer Vieweg (SpringerLink Bücher).
- [GRZ2017] Grzesik, Wit (2017): Advanced machining processes of metallic materials. Theory, modelling and applications. Second edition. Amsterdam, Oxford, Cambridge, MA: Elsevier. Online verfügbar unter <https://www.elsevier.com/books/advanced-machining-processes-of-metallic-materials/grzesik/978-0-444-63711-6>.

- [GÜH] Gühring KG: Navigator. Schnittdaten. Hg. v. Gühring KG. Online verfügbar unter <https://webnavigator.guehring.de/de/tools/9034980120000?d1Code=12&activeGrade=3498&useCase=610&cuttingDataGrade=3498&diameter=12&processingdepth=8&mainGroupId=2&subGroupId=4&steelKey=316L&infeed=2>, zuletzt geprüft am 20.11.2023.
- [GÜH2023] Gühring KG (2023): Fräswerkzeuge. Hg. v. Gühring KG. Albstadt. Online verfügbar unter https://guehring.com/wp-content/uploads/2018/dokumente/Fraesen/Katalog_Fraeswerkzeuge_DE_2017_Internet.pdf, zuletzt geprüft am 16.12.2023.
- [GUO2017] Guo, Peng; Zou, Bin; Huang, Chuanzhen; Gao, Huabing (2017): Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition. In: *Journal of Materials Processing Technology* 240, S. 12–22. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.09.005.
- [GUO2015] Guo, Yingjie; Dong, Huiyue; Ke, Yinglin (2015): Stiffness-oriented posture optimization in robotic machining applications. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 35, S. 69–76. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.02.006.
- [HÄH2020a] Hähn, Felix; Weigold, Matthias (2020): Hybrid compliance compensation for path accuracy enhancement in robot machining. In: *Prod. Eng. Res. Devel.* 14 (4), S. 425–433. DOI: 10.1007/s11740-020-00976-7.
- [HÄH2020b] Hähn, Felix (2020): Modellierung und Kompensation der Bahnabdrängung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern. Dissertation Shaker Verlag, Düren.
- [HAL1951] Hall, E. O. (1951): The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results. In: *Proc. Phys. Soc. B* 64 (9), S. 747–753. DOI: 10.1088/0370-1301/64/9/303.
- [HAU2013] Haun, Matthias (2013): Handbuch Robotik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [HÖL2012] Hölscher, Roland; Stapp, Johanna (2012): Titan in der Luftfahrt. Hg. v. Carl Hanser Verlag. München (Werkstatt und Betrieb). Online verfügbar unter https://res.cloudinary.com/sternwald-systems/raw/upload/v1/hugopr/ARTIKEL_ATTACH/0021CD31_152B4BC46009/c05e8c715ba223017090a212d3349adc89b71eea/WB_2012_12_Titan-in-der-Luftfahrt.pdf, zuletzt geprüft am 06.12.2023.
- [HUY2020] Huynh, Hoai Nam; Assadi, Hamed; Rivière-Lorphèvre, Edouard; Verlinden, Olivier; Ahmadi, Keivan (2020): Modelling the dynamics of industrial robots for milling operations. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 61, S. 101852. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101852.

- [IAN2021] Iantaffi, Caterina; Leung, Chu Lun Alex; Chen, Yunhui; Guan, Shaoliang; Atwood, Robert C.; Lertthanasarn, Jedsada et al. (2021): Oxidation induced mechanisms during directed energy deposition additive manufactured titanium alloy builds. In: *Additive Manufacturing Letters* 1, S. 100022. DOI: 10.1016/j.addlet.2021.100022.
- [KAL2015] Kaldestad, Knut Berg; Tyapin, Ilya; Hovland, Geir (2015): Robotic face milling path correction and vibration reduction. In: 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Busan, South Korea, 07.07.2015 - 11.07.2015: IEEE, S. 543–548.
- [KAL2019] Kallel, A.; Duchosal, A.; Altmeyer, G.; Morandea, A.; Hamdi, H.; Leroy, R.; Meo, S. (2019): Finish Milling Study of Ti-6Al-4V Produced by Laser Metal Deposition (LMD). In: *MM SJ* 2019 (04), S. 3258–3263. DOI: 10.17973/MMSJ.2019_11_2019079.
- [KAN2023] Kang, Jie; Zeng, Shuhong (2023): Uncertainty quantification in operational modal analysis of time-varying structures based on time-dependent autoregressive moving average model. In: *Journal of Sound and Vibration* 548, S. 117549. DOI: 10.1016/j.jsv.2022.117549.
- [KEY2016] Keyence Corporation (2016): Modellreihe LK-G Betriebsanleitung. Osaka, Japan.
- [KLO2017] Klocke, Fritz (2017): Fertigungsverfahren 1. Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- [KRE2008] Kreis, Michael (2008): Zum Eigenverhalten von Motorspindeln unter Betriebsbedingungen. Einflüsse und Konsequenzen für die Prozessstabilität. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2008. Aachen: Shaker (Schriftenreihe des PTW).
- [KUK2023] KUKA Deutschland GmbH (2023): KUKA KR 2500. Hg. v. KUKA Deutschland GmbH. Augsburg. Online verfügbar unter https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/8350ff3ca11642998dbdc81dcc2ed44c/0000334818_en.pdf?rev=5938f2ba18254b5a90333e76b0423c0d&hash=EFEEDB39A2320B3B2B4E62D349011A6D.
- [KÜP2023] Küper, Malte; Schaefer, Thilo; Schmitz, Edgar (2023): Transformationskompass. Herausforderungen und Chancen für Unternehmen in Deutschland. Hg. v. Institut der deutschen Wirtschaft Köln e. V./Institut der deutschen Wirtschaft Köln e. V. Köln. Online verfügbar unter <https://www.iwkoeln.de/studien/malte-kueper-thilo-schaefer-herausforderungen-und-chancen-fuer-unternehmen-in-deutschland.html>.

- [KUT2019] Kuttner, Thomas; Rohnen, Armin (2019): Praxis der Schwingungsmessung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [LAL2022] Lalegani Dezaki, Mohammadreza; Serjouei, Ahmad; Zolfagharian, Ali; Fotouhi, Mohammad; Moradi, Mahmoud; Ariffin, M.K.A.; Bodaghi, Mahdi (2022): A review on additive/subtractive hybrid manufacturing of directed energy deposition (DED) process. In: *Advanced Powder Materials* 1 (4), S. 100054. DOI: 10.1016/j.apmate.2022.100054.
- [LAU2014] Lauwers, Bert; Klocke, Fritz; Klink, Andreas; Tekkaya, A. Erman; Neugebauer, Reimund; Mcintosh, Don (2014): Hybrid processes in manufacturing. In: *CIRP Annals* 63 (2), S. 561–583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
- [LEH2013] Lehmann, Christian; Olofsson, Björn; Nilsson, Klas; Halbauer, Marcel; Haage, Mathias; Robertsson, Anders et al. (2013): Robot Joint Modeling and Parameter Identification Using the Clamping Method. In: *IFAC Proceedings Volumes* 46 (9), S. 813–818. DOI: 10.3182/20130619-3-RU-3018.00226.
- [LI2017a] Li, Fang; Chen, Shujun; Shi, Junbiao; Tian, Hongyu; Zhao, Yun (2017): Evaluation and Optimization of a Hybrid Manufacturing Process Combining Wire Arc Additive Manufacturing with Milling for the Fabrication of Stiffened Panels. In: *Applied Sciences* 7 (12), S. 1233. DOI: 10.3390/app7121233.
- [LI2017b] Li, Jing; Li, Biao; Shen, NanYan; Qian, Hui; Guo, ZiMeng (2017): Effect of the cutter path and the workpiece clamping position on the stability of the robotic milling system. In: *Int J Adv Manuf Technol* 89 (9-12), S. 2919–2933. DOI: 10.1007/s00170-016-9759-x.
- [MAG2016] Magnus, Kurt; Popp, Karl; Sextro, Walter (2016): Schwingungen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [MAH2010] Mahr GmbH (06.10.2010): Mahr Surf M 400 + SD 26. Göttingen.
- [MEJ2016] Mejri, Seifeddine; Gagnol, Vincent; Le, Thien-Phu; Sabourin, Laurent; Ray, Pascal; Paultre, Patrick (2016): Dynamic characterization of machining robot and stability analysis. In: *Int J Adv Manuf Technol* 82 (1-4), S. 351–359. DOI: 10.1007/s00170-015-7336-3.
- [MÖL2019] Möller, Christian (2019): Entwicklung eines hochgenauen Bearbeitungsroboters durch den Einsatz zusätzlicher Messtechnik. Unter Mitarbeit von Wolfgang Hintze. Hamburg: Universitätsbibliothek der Technischen Universität Hamburg-Harburg.
- [MÖS2020] Möser, Michael (2020): Modalanalyse. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- [NÖR2016] Nördinger, Susanne (2016): Schwerlastroboter im Vergleich. Hg. v. Produktion - Technik und Wirtschaft für die deutsche Industrie. Online verfügbar unter <https://www.produktion.de/technik/schwerlastroboter-im-vergleich-108.html#:~:text=Schwerlastroboter%20sind%20die%20starken%20Jungs,schwer%20an%20bestimmten%20Gewichtsklassen%20festlegen.&text=In%20seiner%20Statistik%20arbeitet%20der%20VDMA%20mit%20Traglasten%20oberhalb%20250%20kg>.
- [PAN2011] Pandremenos, John; Doukas, C.; Stavropoulos, Panagiotis; Chryssolouris, George (2011): Machining with Robots: A Critical Review. In: 7th International Conference on Digital Enterprise Technology. Athen, Greece.
- [PAN2006] Pan, Zengxi; Zhang, Hui; Zhu, Zhenqi; Wang, Jianjun (2006): Chatter analysis of robotic machining process. In: *Journal of Materials Processing Technology* 173 (3), S. 301–309. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.11.033.
- [PAP2012] Papageorgiou, Markos; Leibold, Marion; Buss, Martin (2012): Optimierung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [PAU2008] Paucksch, Eberhard; Holsten, Sven; Linß, Marco; Tikal, Franz (2008): Zerspantechnik. Prozesse, Werkzeuge, Technologien ; mit 45 Tabellen. 12., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Studium).
- [PCB1998] PCB PIEZOTRONICS (1998): Installation and Operating Manual ICP Impulse Force Test Hammer. Walden.
- [POL2023] Polytec GmbH (2023): Formabweichung & Rauheit. Formabweichung und Rauheit gemeinsam ermitteln. Online verfügbar unter <https://www.polytec.com/de/oberflaechenmesstechnik/anwendungsbereiche/stahl-aluminium-und-metall/formabweichung-und-rauheit>, zuletzt geprüft am 13.12.2023.
- [PRA2021] Pragana, J.P.M.; Sampaio, R.F.V.; Bragança, I.M.F.; Silva, C.M.A.; Martins, P.A.F. (2021): Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. In: *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* 2, S. 100032. DOI: 10.1016/j.aime.2021.100032.
- [PÜT1994] Pütz, Dieter (1994): Strukturhaltende Interpolation glatter Singulärwertzerlegungen RWTH Aachen University.
- [PUZ2012] Puzik, Arnold (2012): Genauigkeitssteigerung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern durch Fehlerkompensation mit 3D-Piezo-Ausgleichsaktorik. Zugl.: Stuttgart, Universität Stuttgart, Diss., 2011. Stuttgart: Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart (IPA-IAO-Forschung und Praxis, 513). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-69297>.

- [QUI2011] Quintana, Guillem; Ciurana, Joaquim (2011): Chatter in machining processes: A review. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51 (5), S. 363–376. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001.
- [REI2018] Reinkober, Sascha; Uhlmann, Eckart (2018): Fräsbearbeitung von Nickelbasislegierungen mit Industrierobotern. Dissertation Fraunhofer Verlag; Fraunhofer IPK, Berlin; Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart.
- [RÖS2014] Rösch, Oliver (2014): Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern. München, Technische Universität München, Diss., 2014. München: Universitätsbibliothek der TU München. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:91-diss-20141202-1224526-0-7>.
- [SCH2021] Schlegel, Joachim (2021): Die Welt des Stahls. Zur Geschichte, Herstellung und Verwendung eines Basiswerkstoffes. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [SCH2017] Schneider, Ulrich Johannes (2017): Untersuchung von modellbasierter Fehlerkompensation und erweiterter Positionsregelung zur Genauigkeitssteigerung von roboterbasierten Zerspanungsprozessen. Dissertation Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart; Fraunhofer IPA; Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart.
- [SCH2018] Scholz, Daniel (2018): Optimierung interaktiv. Grundlagen verstehen, Modelle erforschen und Verfahren anwenden. Berlin, Germany, Heidelberg: Springer Spektrum (Lehrbuch).
- [SEA2018] Sealy, Michael P.; Madireddy, Gurucharan; Williams, Robert E.; Rao, Prahalada; Toursangsaraki, Maziar (2018): Hybrid Processes in Additive Manufacturing. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 140 (6), Artikel 060801. DOI: 10.1115/1.4038644.
- [SIC2016] Siciliano, Bruno; Khatib, Oussama (2016): Springer Handbook of Robotics. Cham: Springer International Publishing.
- [STU2010] Stuart, A. M. (2010): Inverse problems: A Bayesian perspective. In: *Acta Numerica* (19), S. 451–559. DOI: 10.1017/S0962492910000061.
- [TEP2023a] Tepper, C.; Utsch, J.; Zarges, J.; Weigold, M. (2023): Resource Efficiency of the Robot-Based Hybrid Additive Manufacturing Chain. In: *Solid Freeform Fabrication 2023: Proceedings of the 34th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*, Bd. 34. 34 Bände. Austin, Texas (USA): University of Texas (Solid Freeform Fabrication), S. 1551–1560.

- [TEP2023b] Tepper, Cornelia; Weigold, Matthias (2023): Dynamic Behavior of an Industrial Robot in Milling Additively Manufactured Parts. In: *SSRN Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.4657717.
- [TEP2023c] Tepper, Cornelia; Matei, Alexander; Zarges, Jonas; Ulbrich, Stefan; Weigold, Matthias (2023): Optimal design for compliance modeling of industrial robots with bayesian inference of stiffnesses. In: *Production Engineering* (17), S. 643–651. DOI: 10.1007/s11740-023-01198-3.
- [THE2023] The MathWorks Inc. (2023): Fmincon. Online verfügbar unter <https://de.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>, zuletzt aktualisiert am 10.11.2023, zuletzt geprüft am 10.11.2023.
- [THÜ2006] Thümmel, Michael (2006): Modellbasierte Regelung mit nichtlinearen inversen Systemen und Beobachtern von Robotern mit elastischen Gelenken. Dissertation Technische Universität München, München.
- [TSC2014] Tschirk, Wolfgang (2014): Statistik: Klassisch oder Bayes. Zwei Wege im Vergleich. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum (Springer-Lehrbuch).
- [TUN2021] Tunc, Lutfi Taner; Gonul, Bora (2021): Effect of quasi-static motion on the dynamics and stability of robotic milling. In: *CIRP Annals* 70 (1), S. 305–308. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.04.077.
- [UHL2020] Uhlmann, Eckart; Krüger, Jörg (2020): Industrieroboter. In: Beate Bender und Dietmar Göhlich (Hg.): *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 2: Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1205–1218.
- [UNT2023] Unterstell, Andreas (2023): 1.4404 (AISI 316L). Datenblatt. Hg. v. Metalcor. Online verfügbar unter <https://www.metalcor.de/datenblatt/12/>, zuletzt geprüft am 13.12.2023.
- [VER2019] Verl, Alexander; Valente, Anna; Melkote, Shreyes; Brecher, Christian; Ozturk, Erdem; Tunc, Lutfi Taner (2019): Robots in machining. In: *CIRP Annals* 68 (2), S. 799–822. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.05.009.
- [WEB2009] Weber, Wolfgang (2009): Industrieroboter. Methoden der Steuerung und Regelung. 2., neu bearb. Aufl. München: Hanser. Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/isbn/9783446410312>.
- [WEC2012] Weckenmann, Albert (Hg.) (2012): Koordinatenmesstechnik. Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen. 2., vollständig überarb. Aufl. München, Wien: Hanser.
- [WEI2008] Weigold, Matthias (2008): Kompensation der Werkzeugabdrängung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern. 1. Auflage. Aachen: Shaker (Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik").

- [WEI2019] Weigold, Matthias; Scherer, Timo; Link, Martin; Zielke, Niklas (2019): Hybrid Manufacturing - The Best of Both Worlds. In: Proceedings of the 15th International Conference on High Speed Machining, Prag, Bd. 1, 8.-9. Oktober 2019 (HSM2019-001), S. 9. Online verfügbar unter <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/117657/>.
- [WOH2021] Wohlers, Terry T. author (2021): Wohlers report 2021 : 3D printing and additive manufacturing. Fort Collins, Col.: Wohlers Associates.
- [XU2017] Xu, Xiang; Mi, Gaoyang; Luo, Yuanqing; Jiang, Ping; Shao, Xinyu; Wang, Chunming (2017): Morphologies, microstructures, and mechanical properties of samples produced using laser metal deposition with 316 L stainless steel wire. In: *Optics and Lasers in Engineering* 94, S. 1–11. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2017.02.008.
- [YUA2018] Yuan, Lei; Pan, Zengxi; Ding, Donghong; Sun, Shuaishuai; Li, Weihua (2018): A Review on Chatter in Robotic Machining Process Regarding Both Regenerative and Mode Coupling Mechanism. In: *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 23 (5), S. 2240–2251. DOI: 10.1109/TMECH.2018.2864652.
- [ZIM2021] Zimmermann, Marco; Müller, Daniel; Kirsch, Benjamin; Greco, Sebastian; Aurich, Jan C. (2021): Analysis of the machinability when milling AlSi10Mg additively manufactured via laser-based powder bed fusion. In: *Int J Adv Manuf Technol* 112 (3-4), S. 989–1005. DOI: 10.1007/s00170-020-06391-7.

Normen

- [DIN 6584] DIN 6584, 1982: Begriffe der Zerspantechnik; Kräfte, Energie, Arbeit, Leistungen.
- [DIN 4760] DIN 4760, Juni 1982: Gestaltabweichungen.
- [VDI 2861] VDI 2861, Mai 1988: Montage- und Handhabungstechnik.
- [DIN 9000] DIN 9000, November 2015: Qualitätsmanagementsysteme_ - Grundlagen und Begriffe (ISO_9000:2015).

Studentische Arbeiten

- [EGO2023] Ego, Vincent (2023): Untersuchung der Zerspantung additiv gefertigter Bauteile. Masterthesis.
- [HAD2022] Hadel, Johannes (2022): Analyse und Modellierung des dynamischen Verhaltens eines Industrieroboters. Masterthesis.
- [LEN2021] Lenhardt, Moritz (2021): Aufbau der Prozesskette zur Zerspantung additiv gefertigter Bauteile und Untersuchung der Genauigkeit des Industrieroboters. Masterthesis.

ANHANG

A.1 Vermessene Posen zur Erstellung des Steifigkeitsmodells

Belastungs- richtung	Achse 1 (°)	Achse 2 (°)	Achse 3 (°)	Achse 4 (°)	Achse 5 (°)	Achse 6 (°)
+X	-0,12	-3,14	37,2	180,00	39,49	-180
+X	-21,19	51,92	19,17	87,52	98,58	-111,56
+Y	-18,94	17,12	34,80	108,23	68,45	-130,27
+Y	9,29	0,45	37,19	142,85	46,10	-151,86
+Y	-21,19	51,92	19,17	87,52	98,58	-111,56

A.2 Verwendete Parameter für den additiven Aufbau der Quader und Zylinder

Die verwendeten Parameter für den additiven Aufbau ändern sich je nach Schicht aufgrund der im Bauteil und der Bauteilumgebung entstehenden Wärme.

Quader	Laserleistung	Vorschub	Drahtvorschub	Schichthöhe
Schicht 1	1700 W	11,5 mm/s	1,7 m/min	1,4 mm
Schicht 2-7	1670 W	11,5 mm/s	1,77 m/min	1,4 mm
Schicht 8-11	1640 W	11,5 mm/s	1,77 m/min	1,4 mm
Schicht 12-15	1570 W	11,5 mm/s	1,77 m/min	1,4 mm

Zylinder	Laserleistung	Vorschub	Drahtvorschub	Schichthöhe
Schicht 1-5	1720 W	11 mm/s	1,7 m/min	1,4 mm
Schicht 6-9	1690 W	11,5 mm/s	1,77 m/min	1,4 mm
Schicht 10-12	1685 W	11,5 mm/s	1,77 m/min	1,4 mm
Schicht 13-15	1675 W	11,5 mm/s	1,77 m/min	1,4 mm

A.3 Verwendete Orientierungen in den Zerspanversuchen und Rauheits- und Welligkeitswerte

Quader und Seite	Orientierung des TCPs in °	v_c in mm/s	W_t	R_a	R_z	P_t
1 Seite 1	0	3,35	10,83	1,73	9,70	-
1 Seite 2	0	3,35	15,11	3,48	18,9	-
1 Seite 3	0	3,35	27,52	0,91	6,66	-
1 Seite 4	0	3,35	34,13	4,177	20,37	-
2 Seite 1	0	3,35	18,21	3,31	27,07	-
2 Seite 2	0	3,35	40,09	4,14	22,67	-
2 Seite 3	0	3,35	35,15	4,45	19,01	-
2 Seite 4	0	3,35	39,3	5,07	27,2	-
3 Seite 2	+60	3,35	12,78	1,37	7,02	-
3 Seite 4	+30	3,35	23,06	1,68	7,83	-
3 Seite 1	-60	3,35	26,53	4,97	20,67	-
3 Seite 3	-30	3,35	10,51	7,42	10,8	-
4 Seite 2	+60	3,35	10,3	0,76	4,26	-
4 Seite 3	+30	3,35	20,92	2,80	14,39	-
4 Seite 1	-60	3,35	16,18	2,75	15,96	-
4 Seite 3	-30	3,35	12,7	1,62	8,36	-
5 Seite 1	-60	3,35	14,54	2,36	11,51	24,63
5 Seite 2	+60	3,35	10,92	1,32	4,13	33,86
5 Seite 3	-30	3,35	12,52	1,7	9,83	23,02
5 Seite 4	+30	3,35	37,71	5,15	21,21	70,97
6 Seite 1	-60	3,35	32,57	2,21	11,15	43,37
6 Seite 2	+60	3,35	5,95	1,36	6,93	36,72
6 Seite 3	-30	3,35	18,24	3,29	14,49	44,72
6 Seite 4	+30	3,35	29,07	3,57	18,02	46,91
7 Seite 1	55	3,35	16,06	1,38	7,64	28,55
7 Seite 2	7	3,35	7,62	2,36	13,89	39,78
7 Seite 3	7,6	3,35	3,99	1,03	6	23,62
7 Seite 4	5,5	3,35	20,22	2,98	13	38,23
8 Seite 1	54	3,35	28,56	3,87	20,08	51,73

8 Seite 2	10	3,35	2,88	0,44	2,48	6,11
8 Seite 3	-58	3,35	12,49	1,42	8,03	21,29
8 Seite 4	-25	3,35	31,8	3,7	18,34	62,66
9 Seite 1	19	9,37	12,93	1,61	6,87	23,64
9 Seite 2	-9	9,37	26,56	3,61	16,83	46
9 Seite 3	41	9,37	31,67	4,42	20,62	75,08
9 Seite 4	-10	9,37	22,4	3,68	15,66	46,33
10 Seite 1	+60	9,37	72,09	6,23	32,82	128,5
10 Seite 2	+30	9,37	35,21	2,21	9,76	74,45
10 Seite 3	-60	9,37	19,47	2,5	10,81	62,83
10 Seite 4	-30	9,37	56,51	5,04	20,98	81,27
11 Seite 1	0	9,37	31,5	3,87	17,14	46,37
11 Seite 2	0	9,37	17,98	5,21	22,9	56
11 Seite 3	0	9,37	10,77	5,2	21,76	52,13
11 Seite 4	0	9,37	20,76	3,24	15,9	49,29
12 Seite 1	0	9,37	9,92	3,03	14,61	39,48
12 Seite 2	0	9,37	23,48	4,13	20,87	64,03
12 Seite 3	0	9,37	20,29	6,82	27,96	55,67
12 Seite 4	0	9,37	55,3	5,2	24,35	80,49
13 Seite 1	39	9,37	52,83	6	27,0	89,49
13 Seite 2	3	9,37	16,16	3,21	17	42,26
13 Seite 3	44	9,37	46,37	8,3	37,47	98,23
13 Seite 4	-3	9,37	70,93	6,11	27,2	97,55
14 Seite 1	58	9,37	11,65	1,94	9,07	32,08
14 Seite 2	-23	9,37	16,58	3,33	18,05	55,84
14 Seite 3	-48	9,37	35,93	7,25	29,91	74,33
14 Seite 4	-7	9,37	22,97	3,5	15,57	72,81
15 Seite 1	63	9,37	74,86	6,14	28,79	114,5
15 Seite 2	-19	9,37	47,81	4,85	22,81	69,9
15 Seite 3	-58	9,37	19,65	2,4	11,51	40,21
15 Seite 4	-17	9,37	73,95	6,39	27,29	181,0