

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Benedikt Klee

**Analyse von Phaseninformationen in
Videodaten zur Identifikation von
Schwingungen in Werkzeugmaschinen**

Band 253



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Benedikt Klee

**Analyse von Phaseninformationen in Videodaten
zur Identifikation von Schwingungen in
Werkzeugmaschinen**

Band 253

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

M.Sc. Benedikt Klee
aus Recklinghausen

Tag der mündlichen Prüfung: 21.03.2022
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8628-7

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferent. Professor Dr.-Ing Jürgen Fleischer hat mir einerseits stets viel Freiheit und Vertrauen bei meiner Arbeit entgegengebracht. Die kreative Entfaltung und Möglichkeit, über den Tellerrand der Produktionstechnik hinauszuschauen war für mich immer besonderer Antrieb. Andererseits versteht er es, mit den richtigen Fragen und Impulsen zum richtigen Zeitpunkt einer Arbeit den notwendigen Fokus zu geben. Dafür möchte ich Ihm aufrichtig danken. Weiter möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats herzlich danken. Seine Unterstützung meiner Arbeit und Forschung bedeutet mir sehr viel.

Meinen Kolleginnen und Kollegen sowie den Ehemaligen des wbk, insbesondere aus dem Bereich „Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung“, danke ich für die freundschaftliche Atmosphäre am Institut und die vielen schönen Momente, an die ich mich gerne zurückerinnere. Auch möchte ich mich bei allen Sekretariaten, Service-Centern und insbesondere der Werkstatt für die tatkräftige Unterstützung sowie die freundschaftliche und produktive Zusammenarbeit während meiner Zeit am Institut danken. Besonderer Dank gebührt Aaron Schmidt für seine Unterstützung der Versuchsreihen.

Ebenso möchte ich den studentischen und wissenschaftlichen Hilfskräften, den Abschlussarbeiterinnen und Abschlussarbeitern, die viel Zeit und Arbeit in die Untersuchung und Weiterentwicklung des anspruchsvollen Themenkomplexes steckten großen Dank aussprechen: Leo Flohr, Almila Günseven, Felix Hess, Hanqiu Jiang, Maximilian Kleinert, Marcel Parth, Mohammad Rahimi, Yiru Xie und Kunyu Zhang.

Bedanken möchte ich mich besonders auch bei meinen Arbeitskollegen und Freunden Dr.-Ing. Jörg Bauer und Paul Ruhland, deren fachliches Feedback für mich immens wichtig war.

Zuletzt bedanken möchte ich mich bei meiner Familie und meiner Lebenspartnerin, die während meiner Arbeit stets an meiner Seite standen, mich in entscheidenden Momenten motivierten und tatkräftig unterstützten.

Karlsruhe, im April 2021

Benedikt Klee

Abstract

The dynamic behavior of a cutting machine tool has strong influence on the quality of workpieces and how economically it can be used. But whether or when vibrations actually occur is often not directly apparent.

Common approaches to determine vibration frequencies and amplitudes are, however, associated with high costs for data acquisition and evaluation.

High-speed cameras with high frame rates are an alternative data source for the acquisition of dynamic machine and component movements. In contrast to classical accelerometers, a camera can not only capture a single point of a component, but entire components and machine areas. Furthermore, a camera does not have to be attached to the object to be examined.

For the evaluation of video data for small movement analysis, such as vibrations, a number of promising algorithms exist, such as the approach of phase-based video analysis, which allows quantitative statements about vibration characteristics and qualitative visualizations of these vibrations. However, when using video-based vibration analysis in the context of cutting machine tools, a number of influencing factors occur which make vibration analysis difficult.

The aim of this work is therefore to identify relevant influencing variables in video recording and data evaluation and to derive measures for video recording in the context of machine tools. In addition, influencing variables specific to cutting machine tools need to be identified and measures for mitigating and compensating for these specific effects need to be derived.

For this purpose, experiments with high speed recordings of a vibrating piezo actuator, with synthetic video data, as well as with video data from a dry cutting milling machining center were recorded. Specific influencing variables such as flying chips, changes in brightness, and axis movements were investigated. Corresponding solutions, e.g. algorithms for axis movement compensation or chip compensation were derived and validated.

In the validation with video data of milling tests, vibration frequencies of workpiece and machine spindle could be identified despite small amplitudes and disturbing influences such as axis movements. Whether the minimum analyzable amplitudes are sufficient depends on the respective application (e.g. roughing or finishing). At the same time, the achievable amplitudes depend strongly on the parameters of the recording such as illumination, object properties or resolution of the recording. The suitability of the approach must therefore be tested on a case-by-case basis.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	IV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Forschung und Technik	7
2.1 Einführung relevanter Begriffe der Schwingungslehre	7
2.2 Einführung relevanter Grundlagen der Signalanalyse	9
2.2.1 Spektralanalyse für eindimensionale Signale	9
2.2.2 Spektralanalyse für zweidimensionale Signale	12
2.2.3 Bildpyramiden und Wavelets	14
2.2.4 Unsicherheiten bei der Analyse von Phaseninformationen	16
2.2.5 Korrelation als Qualitätsmerkmal und zur Filterung von Signalen	18
2.3 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen	20
2.3.1 Grundlagen des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen	20
2.3.2 Schwingungsarten und Ursachen in Werkzeugmaschinen	22
2.4 Schwingungsanalyse von Werkzeugmaschinen	25
2.4.1 Datenquellen zur Schwingungsanalyse	26
2.4.2 FEM-Simulationen zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens	29
2.4.3 Experimentelle Modalanalyse	30
2.4.4 Betriebsschwingungsanalyse	32
2.4.5 Zusammenfassung	34
2.5 Methoden zur Analyse von Bewegungen in Bildfolgen	35
2.5.1 Kamerakalibrierung	36
2.5.2 Template Matching	38
2.5.3 Feature Point Matching	39
2.5.4 Optischer Fluss	40

2.5.5	Phasenbasierte Bewegungsanalyse	41
2.5.6	Zusammenfassung der Analyse von Bewegungen in Bildfolgen	48
2.6	Defizite im Stand der Forschung und Technik	51
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	53
3.1	Zielsetzung	53
3.2	Vorgehensweise	53
4	Hardware zur Datengenerierung	57
4.1	Kamerasystem	57
4.2	Kamerabefestigung und Bestimmung von Kamerabewegungen	58
4.3	Beleuchtung	60
4.4	Hardware zur Datenerfassung und Versuchssteuerung	61
5	Allgemeine Einflussgrößen der Videoaufnahme und Datenauswertung	63
5.1	Vorgehensweise	63
5.2	Allgemeine Einflussgrößen bei der Videoaufnahme	66
5.3	Einfluss der Pixel-Auswahl auf die Datenanalyse	70
5.3.1	Zusammenhang zwischen Amplitude, Phase und Objektbewegung	71
5.3.2	Einfluss der Region of Interest auf die Bewegungsanalyse	74
5.4	Vermeidung von Störeinflüssen in der Werkzeugmaschinenanwendung	77
6	Werkzeugmaschinenspezifische Einflussgrößen und Maßnahmen	82
6.1	Vorgehensweise	83
6.2	Späne im Bildbereich	84
6.2.1	Einfluss von Spänen auf die Analyse von Werkstückschwingungen	85
6.2.2	Kompensation von Spänen bei der Analyse von Werkstückschwingungen	87
6.3	Einfluss und Vermeidung von Fluktuationen der Beleuchtung	92
6.3.1	Einfluss von Fluktuationen der Beleuchtung durch Werkzeugrotation	93
6.3.2	Vermeidung des Einflusses der Werkzeugrotation auf die Beleuchtung	96
6.4	Vermeidung des Einflusses der Werkzeugrotation	97
6.5	Kompensation von Achsbewegungen in Werkzeugmaschinen	100
6.5.1	Kompensation von Achsbewegungen durch Tracking	101

6.5.2	Kompensation von Achsbewegungen durch Achsdaten	104
6.6	Zusammenfassung von Ansätzen zur Kompensation von Störeinflüssen	108
7	Validierung in Zerspanversuchen	110
7.1	Analyse von Werkstückschwingungen	110
7.1.1	Vorgehensweise	111
7.1.2	Versuche mit hoher Spindeldrehzahl und hohem Zahnvorschub	116
7.1.3	Versuche mit niedriger Spindeldrehzahl und niedrigem Zahnvorschub	121
7.1.4	Varianz von Videosignalen unter gleichen Schnittparametern	126
7.2	Analyse von Maschinenschwingungen mit Relativbewegung	128
7.2.1	Vorgehensweise	129
7.2.2	Schwingungsanalyse mit durch Achsdaten stabilisierten Videos	131
7.2.3	Schwingungsanalyse mit durch Tracking stabilisierten Videos	133
7.3	Verstärkung von ausgewählten Bewegungsfrequenzen	134
8	Bewertung	140
8.1	Allgemeine Einflussgrößen bei der Videoaufnahme und Datenauswertung	140
8.2	Einflussgrößen bei der Analyse von Videodaten aus Werkzeugmaschinen	142
8.3	Validierung in Zerspanversuchen	144
8.3.1	Analyse von Werkstückschwingungen	144
8.3.2	Analyse von Maschinenschwingungen mit Relativbewegung	146
8.3.3	Verstärkung von ausgewählten Bewegungsfrequenzen	147
9	Zusammenfassung und Ausblick	149
9.1	Zusammenfassung	149
9.2	Ausblick	151
10	Literaturverzeichnis	153
	Abbildungsverzeichnis	I
	Tabellenverzeichnis	VIII

Abkürzungen

Formelzeichen	Größe	Einheit
DIC	Digital Image Correlation	-
f	Frequenz	Hz
FPS	Frames pro Sekunde	1/s
ROI	Region of Interest	-
FFT	Fast Fourier-Transformation	-
DFT	Diskrete Fourier-Transformation	-
1D-DFT	Eindimensionale Diskrete Fourier-Transformation	-
2D-DFT	Zweidimensionale Diskrete Fourier-Transformation	-
FEM	Finite Elemente Methode	-
DIC	Digital Image Correlation	-
KLT (Tracker)	Kanade Lucas Tomasi (Tracker)	-
WZM	Werkzeugmaschine	-
Px	Pixel	-
$\underline{X}(n)$	Diskrete-Fourier-Transformation aus dem Zeit- in den Frequenzbereich	-
ZNCC	Zero-Mean Normalised Cross Correlation	-

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die mit Werkzeugmaschinen erzielbaren Fertigungsgenauigkeiten haben sich historisch rasant entwickelt und reichen oft bis in den Mikrometer-Bereich. So erreichen typische Fräsbearbeitungszentren heute Positioniergenauigkeiten von 5 μm und weniger¹. Ebenso verhält es sich mit der Entwicklung erzielbarer Schnittgeschwindigkeiten, die sich durch Fortschritte bei Werkzeugen und Werkstoffen stetig weiterentwickelt haben (Brecher & Weck 2019). Parallel wachsen auch die Anforderungen von Maschinenanwendern stetig. Sie bewegen sich im Spannungsfeld aus Zeit, Qualität und Kosten, um Kundenanforderungen möglichst schnell und kostengünstig zu erfüllen.

Wie gut die Anforderungen in Form von Fertigungsgenauigkeit und Oberflächengüte bei gleichzeitig hoher Produktivität erfüllt werden können, ist entscheidend abhängig vom statischen, thermischen und dynamischen Verhalten einer Werkzeugmaschine und der im Krafffluss liegenden Bauteile der Werkzeugmaschine (Brecher & Weck 2019). Während das statische Verhalten von Maschinen durch Simulationsverfahren weitgehend vorhergesagt werden kann und auch das thermische Verhalten in vielen Anwendungsgebieten ausreichend kontrollierbar ist, stellt das dynamische Verhalten gerade bei ständig wechselnden Prozessen eine Herausforderung dar. So ist die Simulation des dynamischen Verhaltens durch große Unsicherheiten bei Steifigkeiten und Dämpfungsverhalten oft ungenau. Eine Vorhersage dynamischer Verlagerungen zwischen Werkzeug und Werkstück, die insbesondere die Oberflächenqualität, den Maschinen- und den Werkzeugverschleiß negativ beeinflussen, ist daher nicht immer zielführend. (Brecher & Weck 2017)

Wenn im Prozess unerwünschte Schwingungen auftreten, ist die Ableitung von geeigneten Lösungen durch die Vielzahl möglicher Ursachen oft mit nicht unerheblichem Aufwand verbunden. So können Schwingungen fremderregt durch Messereingriffsstöße oder Unwuchten sowie auch selbsterregt durch das Grundrauschen der Schnittkräfte und damit einhergehende Regenerativeffekte ausgelöst werden. (Brecher & Weck 2017)

¹ DMG MORI AG (2021), DMU Monoblock 75. <https://at.dmgmori.com/produkte/maschinen/fraesen/5-achs-fraesen/dmu-monoblock/dmu-75-monoblock> [04.07.2021]

Um die für den jeweiligen Anwendungsfall effektivste und kostengünstigste Lösung für ein auftretendes dynamisches Problem umsetzen zu können, ist daher die Kenntnis über die Ursache der Schwingung essentiell. Eine Analyse der Schwingungscharakteristika gibt hier Aufschluss. Die Erfassung der im Betrieb auftretenden dynamischen Verlagerungen zwischen Werkstück und zerspanendem Werkzeug ist jedoch mit hohem Aufwand verbunden. So werden im Rahmen von Betriebsschwingungsanalysen zur Analyse dynamischer Betriebsschwingungen wie auch bei Modalanalysen zur Bestimmung dynamischer Eigenschaften wie Eigenschwingungsverhalten heute vorrangig Beschleunigungssensoren eingesetzt und an Werkstücken beziehungsweise an Maschinenbauteilen angebracht. Hierfür sind zunächst die Bauteile und Positionen auszuwählen, an denen die Sensoren angebracht werden sollen. Die Montage und das Verkabeln der Sensoren sind mit weiterem Aufwand verbunden, insbesondere bei der Betriebsschwingungsanalyse, also bei der Schwingungsanalyse im realen, zerspanenden Betrieb der Maschine. Sofern die Analyse der Daten der Beschleunigungssensoren kein eindeutiges Ergebnis liefert, müssen Sensoren erneut positioniert und Versuche wiederholt werden. Anzustreben ist folglich ein Ansatz, der Wissen über die tatsächlichen in einer Werkzeugmaschine auftretenden Schwingungen mit möglichst niedrigem Aufwand über einen großem räumlichen Bereich und mit beliebigen nicht diskret-punktuellen Messpunkten liefern kann.

Die Anwendung einer Videokamera als Datenquelle könnte im Vergleich zu klassischen Beschleunigungssensoren eine Reihe von Vorteilen bieten. So kann eine Videokamera nicht nur Bewegungen an einzelnen Punkten erfassen, sondern kann mit jedem Einzelbild, beziehungsweise Videoframe, einen großen Bereich eines zu analysierenden Objekts abbilden. Die Position, an der Bewegungen beziehungsweise Schwingungen ausgewertet werden sollen, kann damit auch bei der späteren Analyse noch verändert werden. Ebenso müssen keine Sensoren am zu analysierenden Objekt physisch angebracht oder verkabelt werden.

Der Preisverfall von vielen Schlüsselkomponenten für Videokameras macht Videos als Datenquelle zudem immer preisgünstiger. Qualitativ hochwertige und hochauflösende Bildsensoren, Optiken und leistungsfähige Komponenten zur Bildverarbeitung und -speicherung machen diese in immer mehr Bereichen konkurrenzfähig. Nicht zuletzt deshalb wächst auch der Markt für industrielle Bildverarbeitung dynamisch. So

konnte die deutsche Bildverarbeitungsindustrie ihre Umsätze zwischen 2008 und 2018 verdoppeln².

Damit einher geht eine hohe Dynamik bei der Forschung an Algorithmen, die Videodaten verarbeiten und interpretieren. Im Kontext der Schwingungsanalyse mit Videodaten stellt die Analyse und Verstärkung von kleinen Bewegungen in Videos basierend auf (Wu et al. 2012) und (Wadhwa et al. 2013) einen vielversprechenden Ansatz dar. Neben den eingangs beschriebenen Vorteilen von Videos als Datenquellen liefern insbesondere die Ansätze zur optischen Verstärkung kleiner Bewegungen in Videos Vorteile durch eine intuitive Darstellung von kleinen Bewegungen und Schwingungen. Hierfür können Bewegungen in realen Videodaten verstärkt und damit anschaulich dargestellt werden. Die Übertragung auf industrielle Anwendungsfälle ist gleichwohl mit Herausforderungen verbunden. So existieren in Werkzeugmaschinen zahlreiche mögliche Störfaktoren, die die Analyse optisch aufgenommener Daten erschweren und bisher nicht Gegenstand der Forschung waren.

1.2 Zielsetzung

Zielsetzung der Arbeit ist es daher, die Tauglichkeit der videobasierten Schwingungsanalyse für die Anwendung in Werkzeugmaschinen zu untersuchen und Ansätze abzuleiten, die eine Schwingungsanalyse in Werkzeugmaschinen trotz vorhandener Störgrößen erlauben. Die Arbeit fokussiert insbesondere spanende Werkzeugmaschinen. So sind spanende Prozesse, insbesondere durch unterbrochene Schnitte und die dadurch resultierende Anregung von Maschine und Werkstück, häufig anfällig für dynamische Probleme. Spanende Prozesse stellen durch Störfaktoren wie das Vorhandensein von umherfliegenden Spänen in Videoaufnahmen aber gleichzeitig eine besondere Herausforderung für eine videobasierte Schwingungsanalyse dar.

Die erwarteten Ergebnisse sind zum einen geeignete Randbedingungen für die Aufnahme von Videodaten in Werkzeugmaschinen zur Schwingungsanalyse, etwa bezüglich Aufnahmeparametern und Kameraaufstellung.

² Wendel (2018), Industrielle Bildverarbeitung auf Rekordniveau, VDMA Industrielle Bildverarbeitung, Frankfurt. <https://ibv.vdma.org/viewer/-/v2article/render/27036181> [22.06.2020]

Zum anderen sollen Ansätze zur Vorverarbeitung und Filterung von Videodaten abgeleitet werden, die die videobasierte Schwingungsanalyse unter den in Werkzeugmaschinen auftretenden Störfaktoren ermöglichen beziehungsweise zur Verbesserung der Analysequalität dienen können.

1.3 Aufbau der Arbeit

Abbildung 1-1 stellt den Aufbau der Arbeit mit Fokus auf die Vorgehensweise und die daraus abgeleiteten Ergebnisse dar.

Zum Erreichen der Zielsetzung werden in Kapitel 2.1 bis 2.3 zunächst die Grundlagen über Schwingungen und das dynamische Verhalten von Produktionsmaschinen erläutert, um den fokussierten Anwendungsfall der videobasierten Analyse näher zu beschreiben und die Anforderungen abzuleiten. Daneben werden grundlegende Algorithmen und relevante mathematische Zusammenhänge zur Analyse von Schwingungen beschrieben.

Kapitel 2.4 bis 2.6 widmen sich dem Stand der Technik. Hierfür werden zunächst die heute vorherrschenden, konkurrierenden Verfahren zur Schwingungsanalyse in Werkzeugmaschinen beschrieben. Anschließend wird der aktuelle Stand bei Verfahren zur Analyse kleiner Bewegungen in Videodaten beschrieben, welche die Rekonstruktion von Schwingungen aus Videodaten ermöglichen. Hierfür werden zunächst relevante Grundlagen zur Filterung von Bild- und Videodaten eingeführt. Anschließend werden verschiedene Algorithmen zur Rekonstruktion von Schwingungen aus Videodaten beschrieben und bezüglich ihrer Vorteile und Nachteile eingeordnet. Aus den abgeleiteten Defiziten werden in Kapitel 3 die Forschungsfragen und die Vorgehensweise der Arbeit hergeleitet.

Zur Erreichung der Zielsetzung ist die Vorgehensweise in drei übergeordnete Schritte aufgeteilt. Zunächst werden an einem Versuchsstand sowie mit synthetischen Videodaten, losgelöst von einer realen Werkzeugmaschine Einflussgrößen für die videobasierte Schwingungsanalyse untersucht (Kapitel 5). Ziel ist es, im Rahmen einer statistischen Versuchsplanung die für eine zielführende Analyse der Videodaten notwendigen Randbedingungen der Aufnahme, etwa zu bevorzugende Aufnahmeparameter, isoliert von weiteren Einflussgrößen realer Anwendungsumgebungen abzuleiten. Anschließend werden diese Ergebnisse in einem zweiten Schritt auf die Datenaufnahme und Datenanalyse bei realen spannenden Werkzeugmaschinen übertragen. So treten in spannenden Werkzeugmaschinen zahlreiche weitere Störfaktoren und Hindernisse auf, die

eine direkte Auswertung von Phaseninformationen aus Videodaten verhindern, beispielsweise durch den Bildbereich fliegende Späne oder Schwingungen überlagernde Achsbewegungen. Daher werden Ansätze zur Vorverarbeitung und Filterung der Videodaten entwickelt, die die Analyse von Videodaten aus spanenden Werkzeugmaschinen ermöglichen sollen (Kapitel 6). Diese Ansätze werden im dritten Schritt anhand von Videodaten aus einem Fräsbearbeitungszentrum validiert (Kapitel 7).

Kapitel 8 ordnet die Ergebnisse der Arbeit anschließend mit Blick auf die Zielsetzung der Arbeit ein. Kapitel 9 fasst die Kernaussagen zusammen.

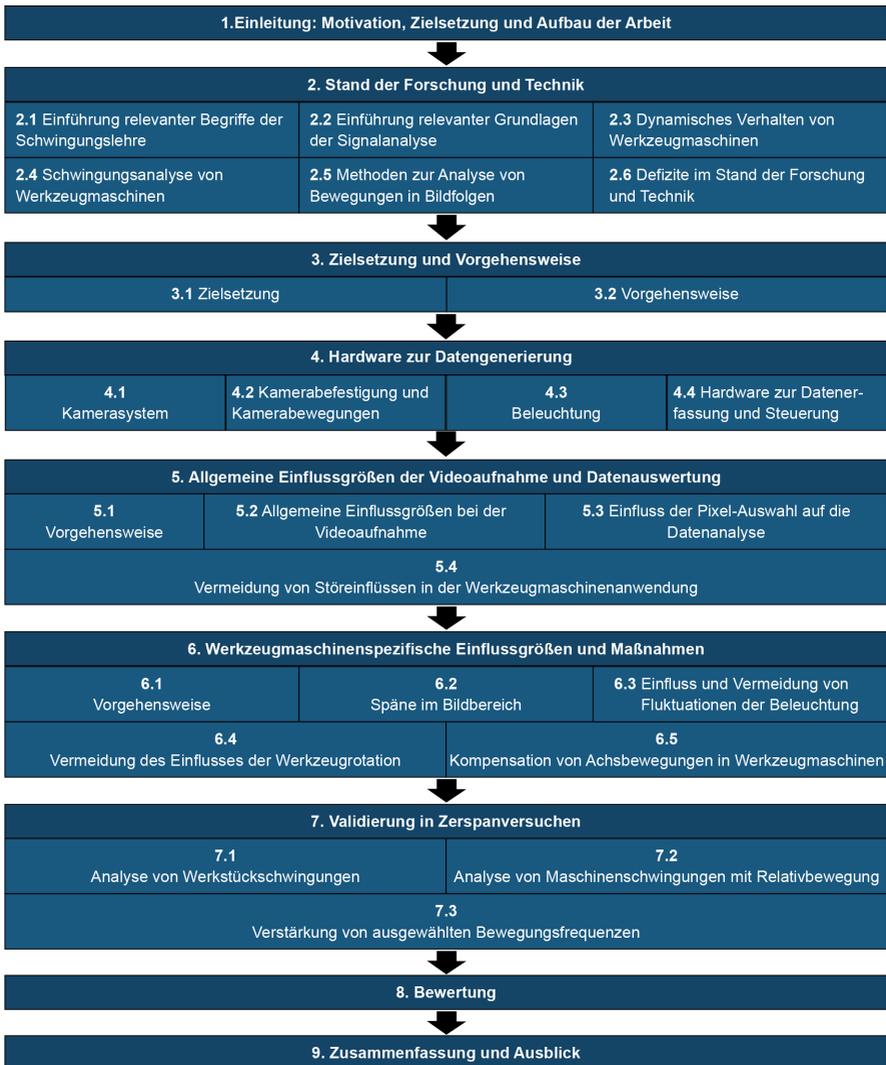


Abbildung 1-1: Schematische Übersicht des Aufbaus der Arbeit

2 Stand der Forschung und Technik

Im folgenden Kapitel werden zunächst für die Arbeit relevante Grundlagen aus dem Bereich der Schwingungslehre (Kapitel 2.1) und Signalanalyse (Kapitel 2.2) eingeführt. Anschließend wird zur Einordnung des in dieser Arbeit fokussierten Anwendungsgebiets der Stand der Forschung und Technik in den Bereichen dynamisches Verhalten und Schwingungsanalyse von Werkzeugmaschinen (Kapitel 2.3 und 2.4) beschrieben. Abschließend werden Methoden zur Analyse von Bewegungen in Bildfolgen sowie auch der Ansatz zur phasenbasierten Videoanalyse erläutert (Kapitel 2.5). Die abschließende Zusammenfassung der Defizite im Stand der Forschung und Technik (Kapitel 2.6) bildet die Überleitung zur Zielsetzung der Arbeit.

2.1 Einführung relevanter Begriffe der Schwingungslehre

Schwingungen bezeichnen in der Mechanik zyklisch wiederholende Bewegungen, bei denen eine Zustandsgröße, etwa eine Position oder ein Winkel, abwechselnd zu- und wieder abnehmen. Mechanische Schwingungssysteme werden darüber hinaus durch weitere Systemparameter wie die Masse, welche die Trägheit des Systems bestimmt, die Feder, welche die Rückstellung bestimmt und den Dämpfer, der die Dämpfung bestimmt, charakterisiert. (Jäger, Mastel & Knaebel 2016)

Grundsätzlich ist bei Schwingungen zwischen autonomen Schwingungen, bei denen die Frequenzen der Schwingung ausschließlich vom System selbst bestimmt werden und heteronomen Schwingungen, bei denen die Frequenzen auch von äußeren Einwirkungen bestimmt werden, zu unterscheiden. Erzwungene Schwingungen bilden die wichtigste Gruppe heteronomer Schwingungen. Durch Messereingriffsstöße in Werkzeugmaschinen erzeugte Schwingungen, vor allem beim weit verbreiteten Fräsen, stellen hierfür ein Beispiel dar. Selbsterregte Schwingungen dagegen sind autonome Schwingungen, bei denen dem schwingenden System im Takt der Schwingung Energie zugefügt wird. Das regenerative Rattern bei Werkzeugmaschinen ist hierfür ein Beispiel. (Jäger, Mastel & Knaebel 2016; Brecher & Weck 2017)

Harmonische Schwingungen stellen einen weiteren grundlegenden Begriff in der Schwingungslehre dar. Harmonische Schwingungen sind Schwingungen, die sich durch harmonische Zeitfunktionen beziehungsweise im Verlauf ihrer Amplitude durch eine einzelne Sinusfunktion mit einer Frequenz beschreiben lassen. Periodische Schwingungen zeichnet aus, dass sie sich im Zeitverlauf jeweils nach einer Zeitspanne T , Periodendauer genannt, wiederholen. Solche periodischen Schwingungen können durch die Fourier-Reihe als

Summe harmonischer Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzen dargestellt werden, was die Grundlage der Schwingungsanalyse mit der sogenannten Fourier-Transformation bildet (vgl. Kapitel 2.2.1). (Jäger, Mastel & Knaebel 2016)

Zur Darstellung von solchen Schwingungen wird häufig die Abbildung eines Vektors in der komplexen Zahlenebene angewandt, da sie bei der mathematischen Behandlung Vorteile bietet. Auch für die Analyse von nicht zeitlich, sondern von räumlich veränderlichen Signalen ist diese Darstellung hilfreich, weshalb sie hier kurz eingeführt wird. Ein wichtiges Beispiel für solche räumlich veränderlichen Signale sind Bilddaten, die sich entlang von Achsen in der Bildebene verändern können. Die harmonische Schwingung wird in der komplexen Zahlenebene als Kreisbewegung eines Punktes um den Koordinatenursprung und seine Projektion auf die reelle Achse (meist auf der x-Achse dargestellt) sowie die imaginäre Achse beschrieben (meist auf der y-Achse dargestellt, vgl. Abbildung 2-1). (Kuttner & Rohnen 2019)

Die Phase beziehungsweise der Phasenwinkel φ variiert als Funktion der Zeit ($\varphi = \omega \cdot t$ mit $\omega = \frac{2\pi}{T}$ als Kreisfrequenz) und gibt damit die Position des Schwingers im periodischen Ablauf an. Die Anwendung dieser Darstellungsform von Schwingungen in der komplexen Zahlenebene wird in Kapitel 2.2.4 näher betrachtet.

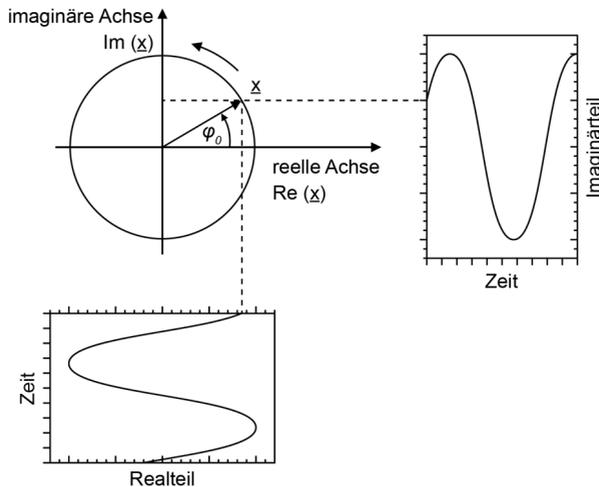


Abbildung 2-1: Darstellung einer harmonischen Schwingung in der komplexen Zahlenebene nach (Kuttner & Rohnen 2019)

Im vorangegangenen Abschnitt wurden kurz die für diese Arbeit relevanten Begriffe zur Beschreibung von Schwingungen eingeführt. So werden im späteren Verlauf durch Videodatenanalyse die Charakteristika von an Werkzeugmaschinen auftretenden Schwingungen, insbesondere erzwungenen Schwingungen untersucht. Die Zerlegung dieser Schwingungen in eine Summe harmonischer Schwingungen (Fourier-Reihe) dient dann der Analyse und Interpretation der auftretenden Schwingungen. Der Begriff der Phase wurde hier zunächst im Kontext zeitlich verändernder Signale beziehungsweise Schwingungen eingeführt. Er ist jedoch, wie im Fokus dieser Arbeit, ebenso auf räumlich veränderliche Signale (Bildraten) und deren zeitliche Veränderungen (Videodaten) anwendbar.

2.2 Einführung relevanter Grundlagen der Signalanalyse

Um Schwingungen erfassen und später interpretieren zu können, werden in der Produktionstechnik und bei Werkzeugmaschinen mit Sensoren Daten gesammelt. Ziel bei Werkzeugmaschinen ist es insbesondere, Problemursachen zu identifizieren oder Prozessparameter zu regeln. In Abhängigkeit der eingesetzten Sensorik können Signale eindimensional und zeitabhängig, wie bei einem Temperatursensor sein oder auch mehrere Dimensionen haben, wie bei mehrachsigen Beschleunigungssensoren. Ein weiteres Beispiel für mehrdimensionale Signale sind Daten von Bildsensoren, die in typischerweise zwei Dimensionen (x- und y-Achse der Bildebene) ein räumliches Signal liefern und in Videoaufnahmen Aufschluss über zeitliche Veränderungen liefern (zeitliche Achse der aufeinanderfolgenden Videoframes). Zur Analyse solcher zeitlichen und räumlichen Signale existieren verschiedene Ansätze, wie die eindimensionale und zweidimensionale Fourier-Transformation, die mit Fokus auf die in dieser Arbeit relevanten Datenquellen in den folgenden Kapiteln 2.2.1 und 2.2.2 beschrieben werden. Darüber hinaus werden in diesem Kapitel das Konzept der Bildpyramiden, das bei der phasenbasierten Videoanalyse Anwendung findet, eingeführt (Kapitel 2.2.3) und die Grundlagen der Analyse von Phaseninformationen (Kapitel 2.2.4) sowie die Korrelation zum Vergleich und zur Filterung von Signalen beschrieben (Kapitel 2.2.5).

2.2.1 Spektralanalyse für eindimensionale Signale

Neben der Darstellung eines sich zeitlich verändernden Signals als Zeitfunktion „im Zeitbereich“ kann ein Signal auch „im Frequenzbereich“, also mit den Amplituden und Phasen der am Aufbau des Signals beteiligten Frequenzen dargestellt werden (Kuttner & Rohnen 2019). Durch die Frequenzanalyse eines periodischen Signals kann somit

das sogenannte Leistungsspektrum bestimmt werden, das die Leistung des Signals in unterschiedlichen Frequenzbereichen darstellt. Auch die Phasen der am Signalaufbau beteiligten Frequenzen können untersucht werden. Die Überführung in den Frequenzbereich kann einerseits der Analyse der Signalcharakteristika dienen, andererseits kann sie auch zur Filterung von einzelnen Signalanteilen genutzt werden. Anwendungsfälle, bei denen das Amplitudenspektrum, also die Amplituden der jeweiligen Frequenzen, von besonderem Interesse ist, sind die Identifikation von Erregerfrequenzen und Eigenfrequenzen von Systemen. Auch wenn Aussagen über Schwingungsursachen gesucht werden, etwa bei der Zustandsüberwachung, wird häufig das Amplitudenspektrum untersucht. Ein Anwendungsfall, bei dem das Phasenspektrum, also die Information über die Lage der am Signalaufbau beteiligten Frequenzen zueinander von besonderem Interesse ist, ist beispielsweise die Auswuchttechnik. (Kuttner & Rohnen 2019)

Wie eingangs beschrieben, müssen Signale nicht zeitlich veränderlich sein, sondern können auch, wie im Falle der in dieser Arbeit untersuchten Bilddaten räumlich veränderlich sein. Damit ist der Frequenzbegriff (wie auch die Begriffe von Amplitude und Phase) nicht nur im Zusammenhang mit zeitlich veränderlichen Signalen zu sehen. Linien in zweidimensionalen Bildern (sowohl horizontale, vertikale als auch beliebige andere Linien) können als 1-dimensionale Signale aufgefasst werden. Die Signallänge digitaler Bilder entspricht dann der Anzahl der Pixel auf der jeweiligen Linie. (Beyerer, Puente León & Frese 2016)

Im Folgenden wird daher die Spektralanalyse, also die Analyse des Frequenzspektrums eines Signals, zunächst anhand von zeitlich veränderlichen Signalen erklärt, die Prinzipien sind jedoch ebenso auf räumliche Signale übertragbar, wie später in Kapitel 2.2.2 gezeigt wird.

Grundlage der Darstellung im Frequenzbereich ist, dass Signale auch als gewichtete, additive Überlagerung von phasenverschobenen, harmonischen Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzen betrachtet werden können. (Kuttner & Rohnen 2019)

Ansätze zur Spektralanalyse, wie etwa die Fast-Fourier-Transformation, kurz FFT, können daher vereinfacht als eine Zerlegung des ursprünglichen Signals in seine verschiedenen Frequenzbereiche (mithilfe einer Vielzahl von Bandpassfiltern für die unterschiedlichen Frequenzbereiche) aufgefasst werden. Die Darstellung der Leistung des Signals für die unterschiedlichen Frequenzbereiche beschreibt dann das sogenannte

Spektrum des Signals, das je nach Anwendungsfall bezüglich seines Betrags (Amplitudenspektrum) oder seiner Phase (Phasenspektrum) analysiert werden kann. (Meyer 2017) Die Analyse der Phaseninformation von Bildern ist für den weiteren Verlauf dieser Arbeit besonders relevant.

Die Fast-Fourier-Transformation ist in diesem Zusammenhang ein effizienter Algorithmus zur Berechnung der Fourier Transformation für diskrete Signale (Meyer 2017). Bei Signalen mit diskreten Stützstellen kann diese Diskrete-Fourier-Transformation, kurz DFT, durch Formel 2-1 beschrieben werden. $x(k)$ steht dabei für eine Reihe von Zahlen, häufig für das Signal im Zeitbereich, k ist Zählindex von 0 bis zur Anzahl von $N-1$ abgetasteten Signalwerten. Die Transformation erfolgt dann blockweise und jeweils für alle Abtastwerte. Durch N diskrete Frequenzwerte ergibt sich dann ein Linienspektrum für die jeweiligen Frequenzen mit komplexwertigen Zahlen. Formel 2-1 gibt damit die Gleichung zur Transformation von diskreten Signalen vom Zeit- in den Frequenzbereich an. Der Betrag dieser Fourier-Transformierten wird als Betragsspektrum oder Amplitudenspektrum, die Phase als das Phasenspektrum bezeichnet (vergleiche Darstellung von Phase und Amplitude in der komplexen Zahlenebene in Abbildung 2-1). Eine Rücktransformation vom Frequenz- in den Zeitbereich ist ebenso möglich. (Kuttner & Rohnen 2019)

$$\underline{X}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \quad 2-1$$

Bei der Transformation wird angenommen, dass das abgetastete Signal außerhalb der vorhandenen Abtastwerte $X(k)$ periodisch fortgesetzt werden kann (zum Beispiel mit weiteren Abtastwerten am Anfang und Ende eines gemessenen zeitlichen Signals oder mit weiteren Pixeln außerhalb eines analysierten Bildes). Diese periodische Fortsetzung führt jedoch häufig zu Unstetigkeiten an den Stellen der Fortsetzung. Unstetigkeiten wirken sich wie Impulse aus, die ein breitbandiges Frequenzspektrum anregen (Kuttner & Rohnen 2019). Solche Impulse im Zeitbereich können (ebenso wie Impulse im ursprünglichen Signal) die Analyse im Frequenzbereich erschweren. Resultat sind Frequenzen im Spektrum, die im ursprünglichen Signal nicht vorhanden sind. Dieser Effekt wird also sogenannter Leck-Effekt oder Leakage bezeichnet. Ansätze zur Reduktion des Leck-Effekts sind die Nutzung eines längeren Signals (sofern möglich) oder die sogenannte Fensterung des Signals zur Umgehung oder Abschwächung der Unstetigkeiten in den Randbereichen. (Kuttner & Rohnen 2019)

2.2.2 Spektralanalyse für zweidimensionale Signale

Die diskrete Fourier-Transformation kann auch auf zweidimensionale Signale wie beispielsweise digitale Bilddaten erweitert werden. Im Folgenden wird daher am Beispiel von Bilddaten die Berechnung und Anwendung der zweidimensionalen DFT, wie sie auch bei der späteren Analyse von Videodaten Anwendung findet, erläutert.

In der praktischen Anwendung wird die 2D-DFT durch eine zunächst zeilen- und dann spaltenweise 1D-DFT oder spalten- und dann zeilenweise 1D-DFT durchgeführt. Das heißt, dass die Werte der einzelnen Pixel in den Zeilen beziehungsweise Spalten des Bildes als eindimensionale Signale aufgefasst und dann wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben mit einer eindimensionalen DFT in den Frequenzbereich transformiert werden. Die am Bildaufbau beteiligten Signale werden auch als räumliche Frequenzen oder Ortsfrequenzen bezeichnet. (Beyerer, Puente León & Frese 2016)

Ebenso wie die eindimensionale DFT besteht das Spektrum der zweidimensionalen DFT aus komplexwertigen Zahlen, die den Betrag beziehungsweise die Amplitude sowie die Phase der am Bildaufbau beteiligten Signale beschreiben. Die Bedeutung des Amplituden- und Phasenbegriffs für Bilddaten wird im Folgenden kurz erläutert und an einem Beispiel dargestellt (Abbildung 2-2).

Das Amplitudenspektrum beziehungsweise die Amplituden der am Bildaufbau beteiligten räumlichen Frequenzen geben an, welchen Anteil niedrige Frequenzen oder hohe Frequenzen am Bildaufbau haben. Wenn niedrige Frequenzen starken Einfluss haben, kann die Bildstruktur als langwellig beziehungsweise „glatt“ beschrieben werden. Wenn hohe Frequenzen einen starken Anteil haben, ihre Amplituden also hoch sind, ist die Bildstruktur hochfrequent beziehungsweise „rau“. Das Phasenspektrum enthält die Information über die Lage der am Bildaufbau beteiligten Signale zueinander. Bei Bilddaten ist diese Information von großer Bedeutung, da sie die Lage von Bildstrukturen beschreibt. Eine Verschiebung des Bildes ändert nur die Phase des Spektrums, nicht aber seine Amplitude. (Beyerer, Puente León & Frese 2016)

Die Analyse von Phasenverschiebungen über mehrere Bilder eines Videos hinweg bildet die Grundlage der in dieser Arbeit verfolgten Vorgehensweise zur Analyse von Schwingungen in Videodaten.

Die Darstellung der 2D-DFT erfolgt in der Regel in einem zweidimensionalen Plot mit hohen Frequenzen an den Bildrändern und niedrigen Frequenzen in der Bildmitte. Abbildung 2-2 (b) stellt hierzu das Amplitudenspektrum der Abbildung eines Werkstücks mit Riefenstruktur dar (Abbildung 2-2 a). (Beyerer, Puente León & Frese 2016)

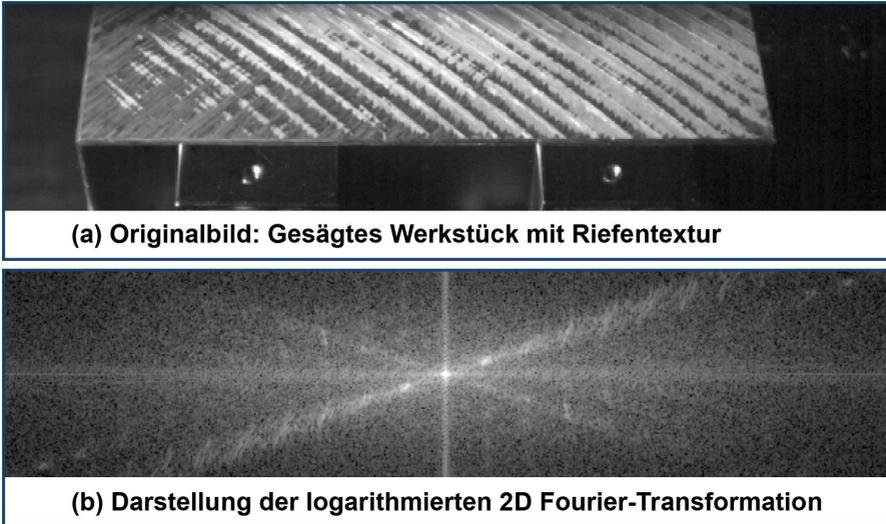


Abbildung 2-2: Originalbild (oben) und zweidimensionale DFT (unten) eines gesägten Werkstücks mit periodischer Riefentextur; hohe Frequenzen an den Bildrändern und niedrige Frequenzen in der Bildmitte

Abbildung 2-2 veranschaulicht die in diesem und in Kapitel 2.2.1 beschriebene Fourier-Transformation anhand von räumlichen Signalen: Die Riefenstruktur des gesägten Werkstücks in Abbildung 2-2 a) entspricht einem zweidimensionalen Signal mit deutlichen periodischen Anteilen normal zur Riefenstruktur. Die Richtung dieser räumlichen, periodischen Signale entspricht etwa einer horizontalen Achse, die um 30° im Gegenzeigersinn gedreht ist. Das logarithmierte Amplitudenspektrum der zweidimensionalen Fourier-Transformation zeigt daher deutliche Signalanteile mit räumlichen Frequenzen in dieser Richtung (helle, diagonal verlaufende Linie in Abbildung 2-2 b, normal zur Riefenstruktur in Abbildung 2-2 a)) und gibt damit Auskunft über die Orientierung der am Bildaufbau beteiligten Signale. Helligkeitsunterschiede auf dieser Linie zeigen die Gewichtung der räumlichen Frequenzen der periodischen Riefen (niedrige Frequenzen

nah am Ursprung, höhere Frequenzen weiter vom Ursprung entfernt, höhere Amplituden heller dargestellt, niedrigere dunkler). Neben der Wirkung der gesägten Riefen des Werkstücks ist im Amplitudenspektrum eine deutliche vertikale Linie erkennbar. Der kontrastreiche Übergang an der unteren Werkstückkante ruft hier eine breitbandige Anregung hervor, die sich in einer vertikalen Linie niederschlägt.³

2.2.3 Bildpyramiden und Wavelets

Die sogenannte Multiskalenanalyse ist ein Konzept in der Signalanalyse, bei der Signale, wie etwa Bilddaten in unterschiedlichen Auflösungsstufen analysiert werden. So können je nach zu untersuchenden Strukturen, etwa der Ausprägung von Kanten in einem Bild, unterschiedliche Auflösungen zur Analyse zielführend sein. Die Analyse grober Strukturen erfordert beispielsweise eine häufig geringere Auflösung mit entsprechend reduziertem Rechenaufwand. Wie eine Objektstruktur im Bild abgebildet wird, hängt dabei von den Aufnahmeparametern wie Brennweite, Objektiv und Entfernung von Objekt und Kamera ab, sodass sich dieselbe Struktur je nach Aufnahmeparametern in unterschiedlichen Auflösungen niederschlagen kann.

Bildpyramiden sind in diesem Zusammenhang ein Konzept zur effizienten Analyse von Bildstrukturen, bei dem ein Bild ausgehend von der sogenannten Pyramidenbasis, in der das Ausgangsbild vorliegt, iterativ gefiltert und unterabgetastet wird. Abbildung 2-3 zeigt beispielhaft eine Bildpyramide mit einer Tiefpassfilterung je Ebene auf die halbe Bandbreite. Das Signal wird anschließend entsprechend um den Faktor 2 unterabgetastet, sodass eine entsprechende Pyramide entsteht. (Beyerer, Puente León & Frese 2016)

Die unterste Ebene mit der höchsten Auflösung wird dabei als Ebene 1 definiert, höheren Ebenen werden entsprechend fortlaufend nummeriert. Die maximale Anzahl Ebenen wird durch die Auflösung des Ursprungsbildes (bei nicht quadratischen Bildern die jeweils kürzere Kantenlänge) sowie die durch die Filterung bestimmte Pyramidensteigung bestimmt.

³ Dabei ist zu beachten, dass auch durch die für die DFT notwendige Fortsetzung des Bildes an den Bildrändern Diskontinuitäten beziehungsweise Helligkeitssprünge an den Bildrändern entstehen können. Ein Teil der vertikalen und horizontalen Linie ist daher auf diese Diskontinuitäten zurückzuführen, vgl. Beyerer, Puente León & Frese (2016).

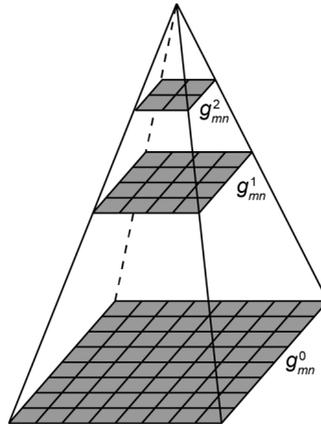


Abbildung 2-3: Bildpyramide (Originalbild g_{mn}^0 in der Pyramidenebene) nach (Beyerer, Puente León & Frese 2016)

Neben reduziertem Rechenaufwand hat die Reduktion der Auflösung in den oberen Pyramidenebenen zur Folge, dass je nach Pyramidenebene grobe oder auch feine Bildstrukturen mit lokal begrenzten Operatoren ausgewertet werden können, was bei der späteren Analyse von Phaseninformationen in Videodaten von Vorteil ist. So können Strukturen in den oberen Ebenen durch die Auflösungsreduktion mit einer lokal eng begrenzten Auswertung erfasst werden, auch wenn sie bei einer Auswertung in den unteren Ebenen keine oder nur eine begrenzte Wirkung haben. (Beyerer, Puente León & Frese 2016)

Je nach Vorgehensweise zur Berechnung der Bilddaten in den Pyramidenebenen oberhalb der Pyramidenbasis können unterschiedliche Arten von Bildpyramiden für verschiedene Anwendungsfälle unterschieden werden. Gauß-Pyramiden stellen ein Beispiel unter Anwendung des Gauß-Filters zur Berechnung der Pyramidenebenen dar. (Beyerer, Puente León & Frese 2016)

Ein weiteres Beispiel für Bildpyramiden stellen komplex steuerbare Bildpyramiden dar. Sie können bei der Analyse von Bewegungen in Videos eingesetzt werden, wo lokale Information von Bildstrukturen von Bedeutung ist, vgl. (Wadhwa et al. 2013). So transformieren die steuerbaren Pyramiden nach (Simoncelli & Freeman 1995; Simoncelli et al. 1992) sowohl in Abhängigkeit der räumlichen Orientierung der Signalanteile im Bild (Steuerbarkeit), als auch abhängig vom Ortsfrequenzbereich. Die Darstellung

komplexer Zahlenwerte in dieser Pyramide hat den Vorteil, dass der für bestimmte Analysen benötigte Phasenwinkel direkt abgeleitet werden kann. Mit so extrahierten Phaseninformationen können mit hoher Genauigkeit Kanten in verschiedenen Orientierungen detektiert beziehungsweise Verschiebungen in aufeinanderfolgenden Videoframes berechnet werden, vgl. (Gautama & van Hulle 2002; Fleet & Jepson 1990). Die Analyse von so extrahierten Phaseninformationen bildet im späteren Verlauf der Arbeit die Basis für die Analyse kleiner Bewegungen in Videodaten.

Ein weiteres Instrument der Multiskalenanalyse sind sogenannte Wavelets. Wavelets stellen eine Gruppe von Funktionen dar und können ein- und zweidimensional formuliert werden. Ein Anwendungsfall liegt in der orts aufgelösten Darstellung feiner und grober Strukturen von Bildern. Ähnlich wie harmonische Schwingungen (wie Sinus-Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzen und Phasen) bei der Fourier-Transformation zur Zerlegung und damit zur Beschreibung von Signalen genutzt werden können, werden Wavelets somit als Basis zur Beschreibung ein- oder mehrdimensionaler Signale genutzt. Dadurch, dass Wavelets im Vergleich zu den unendlich langen harmonischen Basisfunktionen der Fourier-Transformation (typischerweise Sinusfunktionen) lokal begrenzt sind (Wavelet englisch für „kleine Welle“), können Wavelets besonders zur orts aufgelösten Darstellung von Signalen genutzt werden. Auch bei der Abbildung von abrupten Übergängen zwischen konstanten und hochfrequenten Signalanteilen, wie sie in Bilddaten zum Beispiel an Kanten vorkommen, können Wavelets Vorteile bieten. (Beyerer, Puente León & Frese 2016; Abmayr 1994)

Im Rahmen der phasenbasierten Analyse von Bewegungen in Videodaten finden Wavelets als Basisfunktionen für die Transformation von Bilddaten in den Frequenzbereich Anwendung (Wadhwa et al. 2013).

2.2.4 Unsicherheiten bei der Analyse von Phaseninformationen

Ist es Ziel, die Phase beziehungsweise die Veränderung der Phase eines Signals zu analysieren, kann zur Veranschaulichung auf die bereits in Kapitel 2.1 beschriebene komplexe Zahlenebene zurückgegriffen werden. Die Phase wird dann durch den Winkel zwischen reeller Achse und Zeiger beschrieben. Veränderungen des Real- und Imaginärteils beeinflussen damit den Phasenwinkel.

Beim Blick auf die komplexe Zahlenebene für den Spezialfall einer Amplitude von null (Punkt im Koordinatenursprung) kann der Phasenwinkel jedoch nicht bestimmt werden.

Auch für kleine Amplituden (Abstände vom Koordinatenursprung) reagiert der Phasenwinkel mit größeren Abweichungen auf Änderungen des Real- und Imaginärteils als für größere Amplituden, die einen größeren Abstand vom Koordinatenursprung haben, vgl. Abbildung 2-4. Für die Analyse von Phaseninformationen ergibt sich hieraus, dass sie nur für Signale beziehungsweise Signalanteile mit ausreichend hohen Amplituden zielführend ist. In Bereichen mit niedriger Amplitude ist die Phasenvariation größeren Unsicherheiten ausgesetzt. Abbildung 2-4 illustriert den Zusammenhang anhand eines Störeinflusses (roter Vektor), der auf zwei Vektoren mit gleichem Phasenwinkel (grün dargestellt) aber unterschiedlicher Amplitude addiert wird. Die Veränderung des Phasenwinkels durch den Störeinfluss ist umso größer desto kleiner die Amplitude ist.

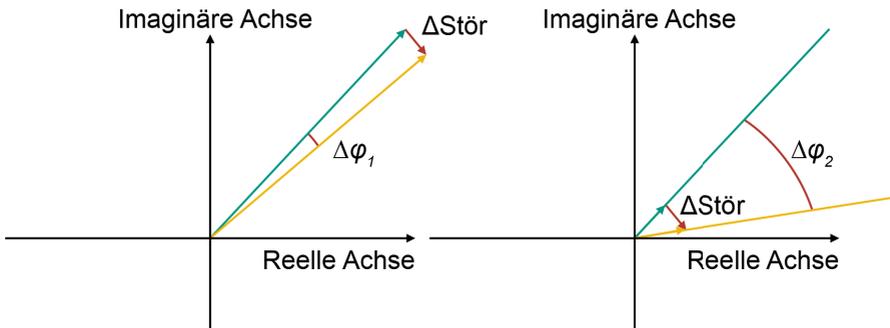


Abbildung 2-4: Einfluss der Amplitude auf Sensitivität des Phasenwinkels: Ein addierter Störeinfluss (roter Vektor) hat größeren Einfluss auf den Phasenwinkel φ , wenn die Amplitude gering ist: $\Delta\varphi_1 < \Delta\varphi_2$

Die Herkunft des Signals ist wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben zunächst unerheblich. So kann das Signal, zu dem ein Phasenwinkel berechnet werden soll, sowohl ein zeitlich wie auch ein räumlich änderndes Signal sein, zum Beispiel das Signal eines Bildes in einer bestimmten Richtung. (Wadhwa et al. 2017) zeigen entsprechend, dass auch bei der Analyse von räumlichen Phaseninformationen eine ausreichende Amplitude, etwa durch einen entsprechenden Kontrast im analysierten Raumfrequenzbereich, notwendig ist. Falls die Amplitude dagegen nicht ausreichend groß ist, haben Störgrößen wie Rauschen einen so großen Effekt, dass keine aussagekräftige Phaseninformation gewonnen werden kann.

2.2.5 Korrelation als Qualitätsmerkmal und zur Filterung von Signalen

Korrelation und Autokorrelation werden in der Signalanalyse und Schwingungsanalyse in unterschiedlichen Anwendungsfällen wie dem Vergleich von Signalen sowie zur Filterung von Rauschen eingesetzt. Im Kontext dieser Arbeit sind sowohl die Rauschfilterung (für verrauschte Phaseninformationen) als auch der Vergleich von Signalen (zum Vergleich von Beschleunigungssensor-Referenzsignalen mit videobasiert gewonnenen Signalen) relevant. Die für diese Arbeit relevanten Anwendungen werden daher im Folgenden zusammenfassend beschrieben.

Die Korrelation von zwei Signalen beschreibt die Ähnlichkeit dieser Signale in Abhängigkeit einer zeitlichen Verschiebung der Signale zueinander. Umso höher der Wert der Korrelation ist, umso größer ist die Ähnlichkeit der beiden Signale. Die sogenannte Autokorrelation beschreibt die Ähnlichkeit eines Signals, beispielsweise des Signals einer Schwingung, mit einer zeitlich verschobenen Kopie desselben Signals. Ein globales Maximum erreicht die Autokorrelationsfunktion entsprechend für eine Verschiebung von $t=0$, also wenn keine Verschiebung des Signals zu sich selbst vorliegt. Periodische Funktionen haben daher ebenfalls einen periodischen Verlauf der Autokorrelationsfunktion. Die Periodendauer ist gleich der Periodendauer der ursprünglichen Funktion. Die Fourier-Transformierte der Autokorrelation wird auch als spektrale Leistungsdichte oder Power Spectral Density, kurz PSD, bezeichnet. (Kuttner & Rohnen 2019; Brecher & Weck 2017)

Abbildung 2-5 zeigt hierzu die Autokorrelation eines verrauschten Sinussignals.

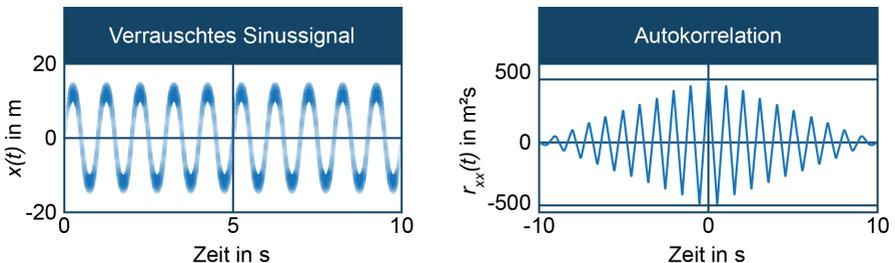


Abbildung 2-5: Autokorrelation eines verrauschten Sinussignals nach (Brecher & Weck 2017)

Die Korrelation findet Anwendung bei der Identifikation von gemeinsamen Signalanteilen, die in Signalen auftreten. So kann auf Basis der Korrelation die sogenannte Kohärenz beziehungsweise das Kohärenzspektrum bestimmt werden, mit dem die Ähnlichkeit von zwei Signalen im Frequenzbereich, also bezüglich unterschiedlicher Frequenzanteile, beschrieben werden kann (Randall 1987). Die Kohärenz stellt ein Maß für die lineare Abhängigkeit von zwei Signalen bzgl. ihrer Frequenzen dar. Frequenzbereiche mit Kohärenz weniger als 1 deuten entweder darauf hin, dass unkorreliertes Rauschen vorhanden ist, es eine nichtlineare Abhängigkeit zwischen den Signalen gibt, bei der Überführung der Signale in den Frequenzbereich Leck-Effekte aufgetreten sind, die ihr wahres Spektrum verfälschen oder es eine große zeitliche Verschiebung der Signale gibt. Die Kohärenz wird oft angewendet, um die Qualität von Messungen (im Vergleich zu Referenzsignalen) zu überprüfen, also insbesondere um unkorreliertes Rauschen sowie nichtlineare Abhängigkeiten zu identifizieren. Das Kohärenzspektrum dient im Rahmen dieser Arbeit daher zum Abgleich von Referenzsignalen von Beschleunigungssensoren mit aus Videodaten extrahierten Signalen. (Randall 1987)

Darüber hinaus kann die Autokorrelation bei der Ermittlung der Periodendauer bei verrauschten Signalen eingesetzt werden. So kann unkorreliertes Rauschen durch Autokorrelation reduziert werden, die Autokorrelation eines (unendlich langen) verrauschten Sinussignals würde erneut ein harmonisches Signal ergeben. Hierdurch können bei ausreichender Signallänge die Periodendauer beziehungsweise Frequenzanteile von verrauschten Signalen extrahiert werden. Im Kontext dieser Arbeit findet die Autokorrelation bei der Reduktion von Störsignalen in verrauschten Signalen aus Videodaten Anwendung. (Kuttner & Rohnen 2019; Brecher & Weck 2017)

Als Grundlage für die spätere Anwendung von Phaseninformationen aus Videodaten zur Schwingungsanalyse haben die vorangegangenen Abschnitte sowohl die Spektralanalyse für eindimensionale Daten (z.B. zeitabhängige Daten eines Beschleunigungssensors, Abschnitt 2.2.1), als auch für zweidimensionale Daten (relevant für räumlich abhängige Daten wie Bilddaten, Abschnitt 2.2.2) erläutert. Darauf aufbauend wurde das Konzept der Bildpyramiden für die Analyse von Bilddaten eingeführt (Abschnitt 2.2.3), sowie die für die spätere Analyse von Phaseninformationen wichtige Beziehung von Phaseninformationen und Amplitudenhöhe beschrieben (Abschnitt 2.2.4). Abschließend wurde mit der Korrelation ein Konzept eingeführt, das im weiteren Verlauf der Arbeit einerseits zur Filterung von Rauschen, andererseits zum Vergleich von Referenzsignalen mit Phaseninformationen aus Videodaten eingesetzt wird.

2.3 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen

Wie in der einleitenden Motivation angedeutet, hat das dynamische Verhalten von Werkzeugmaschinen für Maschinenanwender eine große Bedeutung. Grund dafür sind die immens hohen Genauigkeitsanforderungen im Mikrometerbereich und Anforderungen an Oberflächenqualitäten bei gleichzeitig hohen Ansprüchen an die Produktivität. So sind Werkzeugmaschinen bei der Bearbeitung neben statischen Kräften insbesondere dynamischen Kräften ausgesetzt, welche die Maschinenstruktur anregen und zu ungewünschten Verlagerungen zwischen Werkstück und Werkzeug führen können. Beispiele solcher dynamischer Belastungen sind die Stöße durch den Zahneingriff rotierender Fräswerkzeuge oder selbsterregte Schwingungen durch die gegenseitige Beeinflussung von Prozess und Maschinenstruktur während der Bearbeitung. (Brecher & Weck 2017)

Die aus solchen Schwingungen resultierenden Mittenrauwerte von Werkstückoberflächen beim Fräsen liegen je nach Prozess, Werkzeugen und Prozessparametern in der Größenordnung von $0,4\ \mu\text{m}$ (z.B. dynamisch beanspruchte Dichtflächen) bis $25\ \mu\text{m}$ (funktionslose Oberflächen) (Labisch & Weber 2013).

Das dynamische Verhalten hat damit entscheidenden Einfluss auf die erzielbare Bauteilqualität, den Verschleiß von Maschine und Werkzeug und auf die Produktivität der Bearbeitung. Im folgenden Kapitel werden daher die Grundlagen des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen sowie typische dynamische Effekte mit Fokus auf Fräsprozesse beschrieben.

2.3.1 Grundlagen des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen

Werkzeugmaschinen bestehen aus einer Vielzahl verschiedener Baugruppen und Maschinenteile und können daher als Mehrmassenschwinger-Systeme betrachtet werden. Gleichwohl kann das Maschinenverhalten bei dynamischer Belastung in vielen Fällen durch entkoppelte Einmassenschwinger beschrieben werden, sodass zur vereinfachten Veranschaulichung der dynamischen Maschineneigenschaften auch das Modell eines Einmassenschwingers genutzt werden kann, siehe Abbildung 2-6.

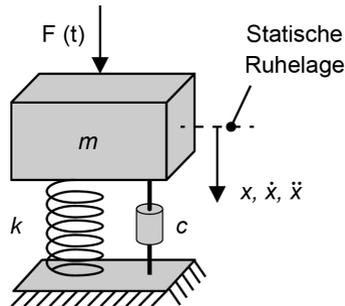


Abbildung 2-6: Prinzipbild eines Einmassenschwingers nach (Brecher & Weck 2017)

Bei Annahme geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung kann die Bewegungsgleichung des Einmassenschwingers im Zeitbereich wie folgt dargestellt werden (mit $m\ddot{x}(t)$: Massenkraft, $c\dot{x}(t)$: Dämpfungskraft, $kx(t)$: Federkraft und $F(t)$: Störkraft) (Brecher & Weck 2017):

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad 2-2$$

Hieraus kann der sogenannte Nachgiebigkeitsfrequenzgang $G(j\omega)$ hergeleitet werden. Der Nachgiebigkeitsfrequenzgang erlaubt die Beschreibung des dynamischen Verhaltens in Abhängigkeit von Masse, Dämpfung und Steifigkeit (Brecher & Weck 2017):

$$G(j\omega) = \frac{\frac{1}{k}}{(j\omega)^2 + 2D \cdot j \cdot \frac{\omega}{\omega_n} + 1} \quad \text{mit } \omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad \text{und } D = \frac{c}{2m\omega_n} \quad 2-3$$

Abbildung 2-7 zeigt beispielhaft Nachgiebigkeitsfrequenzgänge eines Einmassenschwingers für unterschiedliche Dämpfungsmaße „D“. Welche Amplitude die periodische Anregung einer Werkzeugmaschine hervorruft, ist folglich insbesondere auch von der Anregungsfrequenz abhängig. (Brecher & Weck 2017)

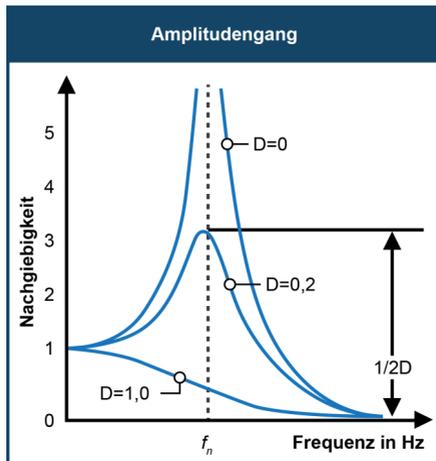


Abbildung 2-7: Nachgiebigkeitsfrequenzgänge eines Einmassenschwingers (hier: in Abhängigkeit des Dämpfungsmaßes) nach (Brecher & Weck 2017)

Das dynamische Verhalten einer Werkzeugmaschine hängt damit vorrangig erstens von ihrer statischen Steifigkeit (im Nachgiebigkeitsfrequenzgang bei Frequenz 0) und Steifigkeitsverteilung, zweitens der Masse und Massenverteilung sowie drittens der Systemdämpfung, die insbesondere von Koppelstellen bestimmt wird, ab. Bei der Konstruktion der Maschine besteht jedoch ein Spannungsfeld aus hoher erforderlicher Steifigkeit, leichter Konstruktion beweglicher Bauteile für hohe Achsbeschleunigungen sowie guten Dämpfungseigenschaften, insbesondere in den Richtungen von Eigenschwingungen der Maschine. Dämpfungseigenschaften können durch gut dämpfende Maschinenelemente wie Verschraubungen oder geeignete Achsführungen erzielt werden. Hier wird oft ein Kompromiss aus guter Dämpfung, die gerade durch Relativbewegungen in den Fügstellen einer Maschine erzielt werden kann und hoher zu erzielender statischer Steifigkeit, die solchen Relativbewegungen zuwider läuft, gesucht. (Brecher & Weck 2017)

2.3.2 Schwingungsarten und Ursachen in Werkzeugmaschinen

Schwingungen von Werkzeugmaschinen können, wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, in fremderregte Schwingungen, das heißt erzwungene Schwingungen und selbst-erregte Schwingungen unterteilt werden.

Charakteristisch für fremderregte Schwingungen ist, dass diese bei einer periodischen Anregung die Frequenz der erregenden Kräfte haben. Insbesondere wenn diese Frequenzen in Bereichen mit hoher dynamischer Nachgiebigkeit liegen, also zum Beispiel im Bereich von Eigenfrequenzen der Maschine, können hierdurch große Amplituden entstehen. Beispiele für fremderregte Schwingungen sind unterbrochene Schnitte, etwa Messereingriffsstöße von Fräswerkzeugen oder durch Drehen von nicht vollständig rotationssymmetrischen Bauteilen hervorgerufene Schwingungen. Die bei Fräsprozessen durch Messereingriffsstöße auftretenden Frequenzen hängen von der gewählten Spindeldrehzahl sowie der Anzahl der Schneiden des gewählten Werkzeugs ab und liegen typischerweise bei Frequenzen von wenigen Hertz bis hin zu einigen 100 Hz. Die Reduktion von fremderregten Schwingungen kann entweder durch Abstellen der Anregungsquelle oder durch Verändern der anregenden Frequenz erreicht werden, sodass das System in einem Bereich mit geringerer dynamischer Nachgiebigkeit angeregt wird. Insbesondere nicht vermeidbare fremderregte Schwingungen, wie der Messereingriffsstoß beim Fräsen, erfordern besonderes Augenmerk und können negativen Einfluss auf den Zerspanprozess haben. (Brecher & Weck 2017)

Selbsterregte Schwingungen sind dadurch gekennzeichnet, dass die Maschine mit der Frequenz einer oder mehrerer ihrer Eigenfrequenzen schwingt. Äußere Störkräfte wie bei fremderregten Schwingungen sind nicht vorhanden. Ein wichtiges Beispiel solcher selbsterregten Schwingungen stellen Schwingungen durch den sogenannten Regenerativeffekt dar. Dabei tritt durch das Grundrauschen der Schnittkräfte und die nicht vermeidbare Nachgiebigkeit der Maschine eine Welligkeit auf der Oberfläche des zerspannten Werkstücks auf. Diese Welligkeit wird durch die geringere Nachgiebigkeit bei den Eigenfrequenzen der Maschine insbesondere mit eben diesen Frequenzen in das Werkstück eingebracht. Wird diese Welligkeit erneut unter gleichen Bedingungen zerspannt, wie es etwa bei einem Drehprozess der Fall ist, treten neben dem Grundrauschen der Schnittkräfte nun auch Schnittkraftveränderungen durch die Welligkeit der Oberfläche auf. Diese Schnittkraftveränderungen haben wiederum Frequenzen, die bevorzugt mit den Eigenfrequenzen der Maschine zusammenfallen. Bei ungünstigen Kombinationen von Schnittparametern und Nachgiebigkeitsfrequenzgang des Maschinensystems kann der Bearbeitungsprozess daher instabil werden und große Schwingungsamplituden hervorrufen. (Brecher & Weck 2017)

Abbildung 2-8 gibt einen Überblick für Beispiele selbsterregter und fremderregter Schwingungen in Werkzeugmaschinen und stellt den typischen Verlauf für auftretende Schwingungsamplituden bei einem Stirnfräsprozess abhängig von der Schnitttiefe dar.

Die Amplituden selbsterregter Schwingungen nehmen zunächst linear mit der Schnitttiefe und der damit ansteigenden Schnittkraft zu, können dann durch das Auftreten einer Instabilität jedoch sprunghaft ansteigen. Die Frequenz der resultierenden Schwingung liegt dann in der Nähe von Maschineneigenfrequenzen. Bei noch höherer Schnitttiefe steigen die Amplituden weiter linear an.

Fremderregte Schwingungen zeigen typischerweise eine bezogen auf die Schnitttiefe lineare Zunahme der Amplituden. Grund sind die mit der Schneidkantenlänge näherungsweise linear zunehmenden Schnittkräfte. Die Abhängigkeit der Amplitude von der Anregungsfrequenz ist dem Zusammenhang der dynamischen Nachgiebigkeit und Anregungsfrequenz geschuldet. Die Frequenzen solcher fremderregten Schwingungen sind gleich mit der Anregungsfrequenz und gegebenenfalls der Harmonischen der Anregungsfrequenz. (Brecher & Weck 2017)

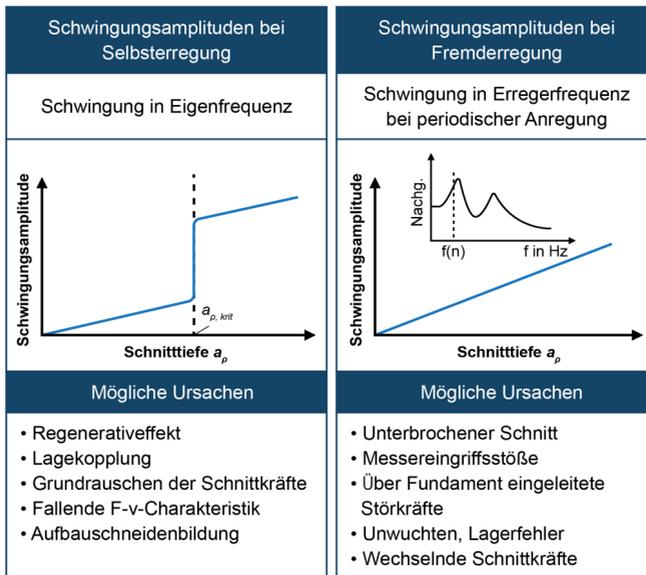


Abbildung 2-8: Schwingungen spanender Werkzeugmaschinen nach (Brecher & Weck 2017)

Zu dem Mehrmassenschwinger-System einer Werkzeugmaschine gehören nicht nur die Maschinenbauteile selbst, auch das zu zerspanende Werkstück bildet mit den Spannmitteln, durch die es an der Maschine fixiert ist, ein schwingendes System, in dem sich Teile des Werkstücks zueinander elastisch verformen. Insbesondere bei weit auskragenden Werkstücken, Werkstücken mit dünnen Wandstärken oder geringer Steifigkeit können Probleme durch große Schwingungsamplituden auftreten. Der Materialabtrag durch die Zerspanung hat hier einen weiteren Effekt: Er verringert einerseits die Masse des Werkstücks, reduziert andererseits aber auch dessen Steifigkeit. Durch die Reduktion der Steifigkeit sinken einerseits die Eigenfrequenzen und Resonanzamplituden steigen an, vgl. Formel 2-3. Die Reduktion der Masse hat hingegen zur Folge, dass die Eigenfrequenzen steigen und Resonanzamplituden sinken. Im Regelfall hat die Reduktion der Steifigkeit jedoch einen deutlich größeren Effekt als die Massereduktion, sodass Eigenfrequenzen tendenziell sinken und Schwingungsamplituden zunehmen. (Klocke 2018)

Zu erzielende Oberflächengüten, Werkzeugverschleiß oder reproduzierbare Arbeitsergebnisse stellen nur einige der Gründe dar, weshalb Schwingungen von Werkzeugmaschinen einen wichtigen Themenkomplex und ein großes Forschungsfeld darstellen. In den vorangegangenen Abschnitten wurden daher zunächst kurz Grundlagen des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen beschrieben (Abschnitt 2.3.1) und anschließend die möglichen Schwingungsarten und ihre Ursachen in Werkzeugmaschinen dargestellt (Abschnitt 2.3.2). Damit wurde der Bezugsrahmen für die mit der phasenbasierten Schwingungsanalyse zu untersuchenden Maschinen beschrieben und die grundlegenden Zusammenhänge, die zu analysierende Schwingungen verursachen, erläutert.

2.4 Schwingungsanalyse von Werkzeugmaschinen

Werkzeugmaschinen als Untergruppe von Produktionsmaschinen stellen den Fokus dieser Arbeit dar. Insbesondere spanende Werkzeugmaschinen sind als Mehrmassenschwinger durch den Eingriff des spanenden Werkzeugs, die damit verbundenen Prozesskräfte und Schwankungen der Prozesskräfte oft anfällig für Schwingungen, weshalb die Schwingungsanalyse gerade zur qualitativen Bewertung, zur Identifikation von Schwingungsursachen und damit zur Ableitung von Lösungsansätzen relevant ist. Im

Folgenden werden daher zunächst unabhängig vom Ansatz der videobasierten Schwingungsanalyse gängige Datenquellen und Verfahren zur Schwingungsanalyse in Werkzeugmaschinen dargestellt sowie Vor- und Nachteile bewertet.

2.4.1 Datenquellen zur Schwingungsanalyse

Zur späteren Einordnung von Videokameras als alternative Datenquellen für Schwingungsanalysen an Werkzeugmaschinen werden im Folgenden die gängigen Datenquellen beschrieben, untergliedert, sowie prinzipbedingte Vor- und Nachteile beschrieben.

Schwingungsaufnehmer, wie sie in der anschließend beschriebenen Modal- und Betriebsschwingungsanalyse eingesetzt werden, dienen dazu, die Eingangsgröße, eine Schwingung, in eine meist elektrische Ausgabegröße umzusetzen. Neben Bauteilen zur Messgrößenumwandlung entsprechend der Übertragungsfunktion beinhalten Schwingungsaufnehmer häufig auch bereits Komponenten zur Signalaufbereitung, siehe Abbildung 2-9. Die Schwingung wird dabei in der Regel am Ort des Schwingungsaufnehmers und hier als translatorische, rotatorische oder deformatorische Bewegung gemessen. (Kuttner & Rohnen 2019)

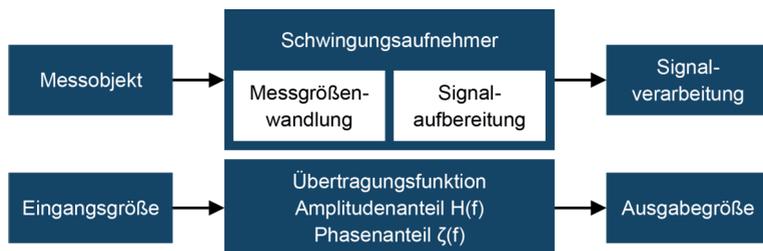


Abbildung 2-9: Zusammenwirken von Messobjekt und Schwingungsaufnehmer nach (Kuttner & Rohnen 2019)

Unterschieden werden können je nach Messprinzip relative und absolute Schwingungsaufnehmer. Relativaufnehmer, die hier zunächst beschrieben werden, erfassen die Messgröße relativ zu einem festen Bezugssystem und messen damit die Differenz zwischen Messobjekt und Aufnehmer (siehe Abbildung 2-10 links). Ein Beispiel stellen Wegaufnehmer dar, die sowohl berührend als auch berührungslos arbeiten können. Vorteil von Relativaufnehmern gegenüber Absolutaufnehmern (Abbildung 2-10 rechts) ist,

dass sie kein schwingungsfähiges System im Aufnehmer benötigen und sie eine praktisch frequenzunabhängige Übertragungsfunktion, auch für sehr niedrige Frequenzen, haben. Die Beeinflussung des zu messenden Objekts ist durch die geringen zusätzlichen Massen bei berührender Messung niedrig, bei berührungsloser Messung nicht vorhanden. Das Herstellen eines festen Bezugspunktes für den Relativaufnehmer kann in der Praxis jedoch eine Herausforderung darstellen.

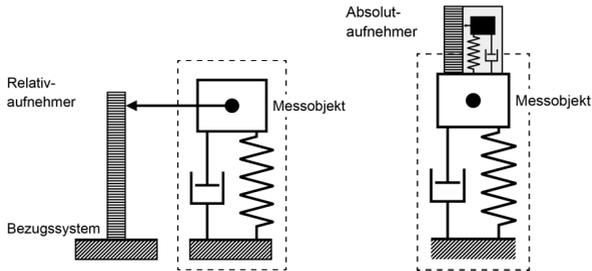


Abbildung 2-10: Messprinzip eines Relativaufnehmers (links) und eines Absolutaufnehmers (rechts) nach (Kuttner & Rohnen 2019)

Beispiele für Relativaufnehmer sind induktive, kapazitive oder berührende, potenziometrische Wegmesssysteme sowie Laservibrometer. Die Funktionsweise von Laservibrometern wird im Folgenden kurz beschrieben.

Laservibrometer beeinflussen durch ihr berührungsloses Messprinzip das Messobjekt nicht durch eine angebrachte Masse. Sie nutzen stattdessen eine Laserquelle, deren Laserstrahl vom Messobjekt reflektiert wird. Die Reflektion hat durch die Geschwindigkeit des relativ bewegten Messobjekts und den dadurch hervorgerufenen Doppler-Effekt eine zum ausgesendeten Laserstrahl verschobene Frequenz. Die indirekte Erfassung dieser Differenz ermöglicht eine exakte Bestimmung der Geschwindigkeit beziehungsweise Geschwindigkeitsänderung des Messobjekts in Richtung des Laserstrahls. Eine korrekte Anwendung und Kompensation von Umgebungseinflüssen wie Lufttemperatur, -feuchtigkeit, -druck und Berücksichtigung der Aufwärmphase des Lasers werden dabei vorausgesetzt. Für mehrachsige Messungen sind mehrere Laserquellen und Sensoren notwendig. (Zeller 2018; Brecher & Weck 2017)

Wie andere optische Messverfahren können zudem auch Laservibrometer von optischen Einflüssen wie umherfliegenden Spänen oder Kühlschmierstoffen gestört werden.

Im Gegensatz zu Relativaufnehmern erfassen Absolutaufnehmer die Messgröße bezüglich eines ortsfesten Bezugssystems. Absolutaufnehmer stellen selbst ein schwingungsfähiges System dar und nutzen die Trägheit ihrer schwingfähigen Masse aus. So gibt die bei einer Beschleunigung resultierende Verlagerung der Masse Auskunft über die wirkende Kraft beziehungsweise Beschleunigung. Nachteil von Absolutaufnehmern ist ihr frequenzabhängiges Übertragungsverhalten und daher die Notwendigkeit, den Aufnehmer durch eine entsprechende Federrate für die schwingende Masse auf den zu analysierenden Frequenzbereich abzustimmen. (Kuttner & Rohnen 2019)

Abbildung 2-10 (rechts) stellt das Messprinzip eines Absolutaufnehmers schematisch dar. Beispiele für Absolutaufnehmer sind piezokeramische, kapazitive oder die vergleichsweise kostengünstigen MEMS-Beschleunigungssensoren (Brecher & Weck 2017).

Die Auswahl des Messverfahrens hängt von unterschiedlichen Faktoren wie dem zu analysierenden Frequenzspektrum, dem verfügbaren Messequipment oder der Zugänglichkeit der Messstelle ab. So spielen klassische, absolutaufnehmende Beschleunigungssensoren gerade bei hohen Frequenzen ihre Vorteile aus, da trotz geringer Amplituden oft ausreichend große Beschleunigungen wirken. Wegmessende, relativ-aufnehmende Systeme sind umgekehrt bei niedrigen Frequenzen besser geeignet, wenn tendenziell größere Amplituden aber geringere Beschleunigungen auftreten. Bei hohen Frequenzen werden dagegen die Amplituden meist so gering, dass sie relativ-messend nicht mehr sicher erfasst werden können. Abbildung 2-11 illustriert dazu den Zusammenhang von Amplitude und Frequenz für eine Beschleunigung von 1g. (Kuttner & Rohnen 2019)

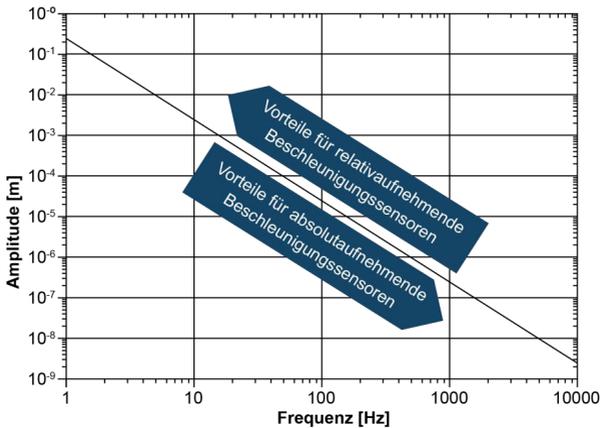


Abbildung 2-11: Amplitude in Abhängigkeit der Frequenz bei 1g Beschleunigung nach (Kuttner & Rohnen 2019)

Neben dem Frequenzspektrum und der Zugänglichkeit der Messstelle kann der Aufwand zur Beschaffung von Equipment und zur Durchführung der Messungen eine große Rolle spielen. So können hohe Kosten und Messaufwände, wie bei der Anwendung von Laservibrometern, die Anwendbarkeit von Messverfahren einschränken.

2.4.2 FEM-Simulationen zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens

Die Finite-Elemente-Methode, kurz FEM, stellt ein universell einsetzbares Verfahren zur Bestimmung von numerischen Näherungslösungen für Gleichungssysteme dar, das für vielfältige Anwendungen im Maschinen- und Werkzeugmaschinenbau wie der Berechnung von Verschiebungen, Spannungen oder Temperaturfeldern eingesetzt werden kann (Brecher & Weck 2017). Auch zur Analyse des dynamischen Verhaltens von Körpern kann die FEM eingesetzt werden und wird daher im Folgenden mit ihren Vor- und Nachteilen kurz beschrieben.

Grundlage der FEM ist die Annahme, dass beliebig komplexe Bauteile in eine endliche Anzahl weniger komplexer Körper, die finiten Elemente, aufgeteilt werden können. Die Elemente werden zur Berechnung durch Knoten miteinander verbunden, an denen die zu bestimmenden Größen, etwa eine Verschiebung, berechnet werden. Die Anzahl der Elemente hat sowohl Einfluss auf Genauigkeit wie auch Rechenaufwand der FEM. (Brecher & Weck 2017)

Ausgangspunkt zur Durchführung einer FEM-Analyse von Werkzeugmaschinen stellt in der Regel ein vorhandenes CAD-Modell der zu untersuchenden Maschine dar. Hiermit wird, basierend auf der Zielsetzung der Analyse, ein für die FEM geeignetes, in der Regel vereinfachtes Modell abstrahiert. Zur Erstellung der für die FEM erforderlichen miteinander verknüpften Elemente sind die Strukturelemente der Maschine anschließend zu vernetzen, das heißt in eine endliche Zahl geeigneter Körper aufzuteilen. Darüber hinaus sind in ausgewählten Knoten einzelne Freiheitsgrade zu fixieren (beispielsweise im Maschinenfundament) sowie Kräfte einzubringen (beispielsweise eine Prozesskraft am Tool Center Point). Komplexere Maschinenelemente wie Führungen sind ebenso geeignet zu approximieren. Die softwaregestützte Berechnung der resultierenden Systemantwort, beispielsweise Verlagerungen einzelner Maschinenbauteile und die Visualisierung und Analyse der Ergebnisse bildet den Abschluss der FEM-Analyse. (Brecher & Weck 2017; Kollmann, Schösser & Angert 2006)

Gerade die Modellerstellung stellt häufig einen großen Arbeitsaufwand der FEM dar und kann bis zu 70% des gesamten Zeitbedarfs der FEM-Analyse ausmachen (Brecher & Weck 2017).

Bei der Analyse des dynamischen Verhaltens werden neben statischen Größen auch Trägheits- und Dämpfungskräfte berücksichtigt. Im allgemeinen wird ein eingeschwungener Zustand des Systems angenommen (Kollmann, Schösser & Angert 2006). Im Vergleich zur Berechnung des statischen Verhaltens mit FEM ist die Bestimmung des dynamischen Verhaltens durch die Anzahl der im Zeitbereich erforderlichen Rechenoperationen jedoch deutlich aufwändiger (Brecher & Weck 2017). Eine weitere Herausforderung stellt die zuverlässige Bestimmung der Dämpfungsparameter des Systems dar. Während Massen und Steifigkeiten der Baugruppen und Elemente einer Werkzeugmaschine mit vergleichsweise hoher Genauigkeit bestimmt werden können, stellt die Bestimmung von Dämpfungsparametern gerade in den Fügstellen von Baugruppen weiterhin eine große Herausforderung dar. (Brecher & Weck 2017)

2.4.3 Experimentelle Modalanalyse

Ziel der experimentellen Modalanalyse ist es, basierend auf in Experimenten ermittelten Messdaten ein dynamisches Modell eines untersuchten Körpers beziehungsweise einer untersuchten Maschine aufzubauen und damit Kenntnis über Eigenfrequenzen, Eigenschwingungsformen (Moden) und Dämpfungsparameter zu gewinnen. Die

Modalanalyse ist dabei als Prozess zu verstehen, der aus Messmethoden und Funktionen zur Analyse der Messdaten besteht. Aus den gewonnenen Messdaten werden die zunächst unbekanntesten Parameter zur Beschreibung des (Mehr-)Massenschwingers (vgl. Kapitel 2.3) abgeleitet. Messdaten sind meist Beschleunigungssignale, die zeit-synchron erfasst werden und die in Frequenzspektren und anschließend in Frequenzgänge überführt werden. Um eine Weg- oder Beschleunigungsantwort der Maschinenstruktur messen zu können, muss die Maschinenstruktur entsprechend angeregt werden. In der Regel erfolgt diese Anregung durch Impulshammer oder Shaker, die entsprechende Kräfte einbringen und diese auch quantitativ messen können. (Kuttner & Rohnen 2019; Brecher & Weck 2017)

Die allgemeine Vorgehensweise bei der Modalanalyse beginnt mit der Auswahl des Messobjekts. Anschließend ist, falls durch Aufbau und Position des Messobjekts nicht festgelegt, eine Lagerung des Messobjekts zu definieren und gegebenenfalls die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bei der entsprechenden Lagerung zu überprüfen. Im Falle von Modalanalysen ganzer Werkzeugmaschinen ist die Lagerung durch die Aufstellung in der Regel vorbestimmt. (Kollmann, Schösser & Angert 2006; Brecher & Weck 2017)

Im dritten Schritt der Modalanalyse, der Diskretisierung, wird die Oberfläche des Messobjekts mit einem Netz aus Messpunkten überzogen, welches die Objektstruktur approximiert und an denen die späteren Messungen (häufig Messungen mit Beschleunigungssensoren) durchzuführen sind. Anhaltspunkte für die Feinheit des Netzes geben maximale zu analysierende Frequenzen sowie gegebenenfalls Wissen über die Schwingungsformen des zu analysierenden Objekts. Neben der Festlegung der Messpunkte sind die Position und Anzahl der Anregungspunkte in Abhängigkeit von Messobjekt, Zielsetzung der Modalanalyse und genutztem Auswerteverfahren festzulegen. Die Festlegung der Messpunkte ist durch die Vielzahl möglicher Einflussfaktoren mit Erfahrungswissen verbunden. Auch durch die Zugänglichkeit der Messstellen können Einschränkungen auftreten. Die Durchführung der Anregung erfolgt dann häufig als Impulshammermessung an einem oder mehreren Anregungspunkten mit paralleler Messung an den vorher festgelegten Messpunkten. Alternativ werden auch entsprechende Shaker zur Anregung der Struktur eingesetzt. (Kollmann, Schösser & Angert 2006; Kuttner & Rohnen 2019)

Anschließend wird auf Basis der Gleichungen zur Beschreibung des Schwingungsverhaltens von Einmassenschwingern (vgl. Kapitel 2.3.1) ein Modell für das zu analysierende Objekt gebildet. Die Parameter dieses Modells werden anschließend mithilfe verschiedener Rechenverfahren, die in der Regel in entsprechenden Softwarelösungen zur Modalanalyse umgesetzt sind, auf Basis der Messdaten geschätzt. (Kollmann, Schösser & Angert 2006)

Zur Visualisierung werden die Ergebnisse der Modalanalyse abschließend durch Animationen oder Verformungsplots für unterschiedliche Schwingungsformen bei unterschiedlichen Frequenzen verstärkt dargestellt. (Kollmann, Schösser & Angert 2006; Brecher & Weck 2017)

Die Modalanalyse ist als mächtiges Werkzeug zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Systemen zu betrachten. Der große messtechnische und experimentelle Aufwand sowie das große erforderliche Knowhow zur Durchführung einer zielführenden experimentellen Modalanalyse schränken die Anwendbarkeit, insbesondere im industriellen Einsatz, jedoch ein. Zudem gibt die Modalanalyse keinen Aufschluss über die tatsächlich auftretenden Schwingungen bei einer realen Anwendung. Daher werden in vielen Fällen Betriebsschwingungsanalysen durchgeführt, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

2.4.4 Betriebsschwingungsanalyse

Bei der Betriebsschwingungsanalyse werden im Vergleich zur experimentellen Modalanalyse Schwingungen unter realen Bedingungen des (Maschinen-)Betriebs erfasst. Das Messobjekt wird folglich nicht durch einen Shaker oder Impulshammer sondern durch die im realen Prozess auftretenden Kräfte angeregt. Folglich werden erzwungene Schwingungen erfasst, die aufgrund der Erregung durch den Betrieb mit entsprechendem Werkstück und Werkzeug auftreten.

Die Betriebsschwingungsanalyse kommt insbesondere dann zum Einsatz, wenn eine rechnerische oder experimentelle Modalanalyse zu aufwändig ist oder eine reale Anregung durchgeführt werden soll. Im Gegensatz zur Modalanalyse werden nicht die inhärenten, von der Anregung unabhängigen Eigenschaften der Struktur erfasst. (Kollmann, Schösser & Angert 2006)

Die durch die anregenden Kräfte resultierenden Schwingungen setzen sich aus Linearkombinationen der Eigenschwingungsformen des dynamischen Systems (Maschine,

Werkstück und Werkzeug) zusammen, die Amplituden sind vom Betrag der im Betrieb auftretenden Kräfte abhängig. (Kollmann, Schösser & Angert 2006)

Die sich einstellende Form der Betriebsschwingung wird von der Schwingungsform einer Eigenschwingung beziehungsweise einer Schwingungsmode dominiert, wenn die anregende Frequenz nahe der Eigenfrequenz mit entsprechender Schwingungsmode liegt, wenn der Frequenzabstand zu anderen benachbarten Eigenfrequenzen groß ist und die Anregungsstelle nicht in einer Knotenlinie dieser Mode liegt. (Kollmann, Schösser & Angert 2006)

Ebenso wie bei der Modalanalyse muss zur Identifikation von Schwingungsformen bei der Betriebsschwingungsanalyse eine ausreichende Anzahl an Messpunkten und Messrichtungen erfasst werden. Hierfür kommen analog zur Modalanalyse Sensoren wie Beschleunigungssensoren oder Wegaufnehmer zum Einsatz. Durch die im Betrieb auftretenden Einflüsse, z.B. Späne, Kühlschmierstoffe und hohe Temperaturen in spannenden Werkzeugmaschinen, muss zudem eine entsprechende Robustheit des Sensorsystems gegeben sein.

Die Auswertung kann entweder im Zeitbereich, mit zeitlich synchroner Erfassung an den festgelegten Sensorpositionen, oder im Frequenzbereich erfolgen. Wenn die Analyse spezifischer Frequenzen im Vordergrund steht, kann die Analyse im Frequenzbereich durchgeführt werden. Stationäre Betriebsbedingungen und ein lineares Strukturverhalten in den Messungen vorausgesetzt, können dann auch mehrere Messpunkte nacheinander erfasst werden, sofern ein Referenzmesspunkt in allen Messungen erfasst wird. Durch einen geeignet gewählten Referenzmesspunkt können die an verschiedenen Messpunkten erfassten Daten anschließend in Beziehung zueinander gesetzt und damit die für die Schwingungsformen benötigte Phaseninformation gewonnen werden. (Kollmann, Schösser & Angert 2006; Brecher & Weck 2017)

Gerade bei Werkzeugmaschinen mit häufig wechselnden Konfigurationen, die das dynamische Verhalten beeinflussen, beispielsweise bei häufig ändernden, schwingungsanfälligen Werkstücken und Spannvorrichtungen, hat die aufwandsärmere Betriebschwingungsanalyse deutliche Vorteile. Die Anregung des Systems durch die realen Prozesskräfte fokussiert zudem die Auswertung auf tatsächlich auftretende Schwingungen. Durch die vom Prozess abhängige Anregung der Maschinenstruktur ist der Informationsgehalt gleichwohl deutlich weniger umfassend als bei der klassischen

Modalanalyse. Eine anschauliche Visualisierung der Ergebnisse gestaltet sich ohne geeignete Modellierung der Maschine zudem schwierig. Darüber hinaus schränkt wie bei der Modalanalyse die eingangs festzulegende Auswahl der Messpunkte die Anwendbarkeit der Betriebsschwingungsanalyse zum Teil ein.

2.4.5 Zusammenfassung

Um das dynamische Verhalten beziehungsweise auftretende Schwingungen von Werkzeugmaschinen zu charakterisieren existieren eine Vielzahl möglicher Datenquellen und Ansätze. Die gängigste Datenquelle stellen absolutaufnehmende Schwingungsaufnehmer („klassische“ Beschleunigungssensoren) dar, die in ihrem Anwendungsfeld hohe Genauigkeiten und eine vergleichsweise einfache Anwendbarkeit bieten, jedoch den Nachteil haben, dass sie jeweils nur an diskreten Messpunkten messen können und prinzipbedingt bei niedrigen Frequenzen größere Messunsicherheiten aufweisen. Relativaufnehmer dagegen müssen je nach Messprinzip nicht mit dem Messobjekt in Kontakt gebracht werden und haben dann auch keinen Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Messobjekts. Die Positionierung von Messstellen kann dadurch ebenfalls vereinfacht werden. Auf das jeweilige Messprinzip wirkende Störgrößen, wie zum Beispiel umherfliegende Späne, sowie das Herstellen eines festen Referenzpunktes für den Sensor (z.B. ruhige Aufstellung eines Laservibrometers) stellen jedoch Nachteile dar.

Neben der reinen Datengenerierung existieren zur Bestimmung des Schwingungsverhaltens verschiedene Analysemethoden. Die rechnergestützte Finite Elemente Methode zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens hat den Vorteil, dass sie theoretisch ohne experimentelle Messdaten auskommt und unterschiedliche Anregungen abbilden kann. Nachteilig ist, dass hierfür großzügige Annahmen getroffen werden müssen, zum Beispiel bezüglich des Dämpfungsverhaltens in Koppelstellen. Die Aussagekraft ist daher oft nicht ausreichend.

Ziel der Modalanalyse ist es, den Nachgiebigkeitsfrequenzgang, zugehörige Eigenschwingungsformen und Dämpfungsparameter zu ermitteln. Die Durchführung einer Modalanalyse ist jedoch mit hohem Aufwand verbunden und erfordert ebenso wie die Interpretation der Ergebnisse viel Know-How.

Die Betriebsschwingungsanalyse fokussiert dagegen das im tatsächlichen Betrieb auftretende dynamische Verhalten. Die Aussagekraft ist daher gegenüber der Modalanalyse auf den konkreten Anwendungsfall eingeschränkt, der Aufwand zur Durchführung jedoch in der Regel geringer.

Den experimentellen Verfahren gemein ist der hohe Aufwand zur Auswahl von Messpunkten. Eine nachträgliche Änderung von Messpunkten erfordert weitere Messungen und damit ggfs. weitere Zerspanversuche. Die Analyse und Interpretation der Messdaten beziehungsweise Ergebnisse erfordert ebenso fundiertes Expertenwissen.

2.5 Methoden zur Analyse von Bewegungen in Bildfolgen

Auch Videodaten beziehungsweise Folgen von aufgenommenen Bildern bieten die Möglichkeit zur Analyse von Objektbewegungen. So ist die Bewegung in einer Bildfolge die Projektion von dreidimensionalen Bewegungen relativ zum Bildsensor auf die zweidimensionale Bildebene (Beauchemin & Barron 1995). Zur Identifikation und Analyse solcher Bewegungen, beispielsweise von Schwingungen eines Körpers, existieren verschiedene Ansätze, die sich die Wirkungen der Bewegungen auf die Bildfolgen zunutze machen.

Der typische Ablauf von Ansätzen zur Videoverarbeitung für die Analyse von Strukturbewegungen beginnt mit einer Kamerakalibrierung, die erforderlich ist, wenn Verzerrungen des Kamerasystems zu kompensieren sind und wenn exakte Amplituden bestimmt werden sollen. Anschließend werden Methoden zum „Target Tracking“, also dem Verfolgen des dynamisch bewegenden Objekts angewandt.

Den Kern dieser Arbeit bildet die Weiterentwicklung solcher Methoden mit geeigneter Vorverarbeitung der Videodaten aus Werkzeugmaschinen.

Auf Basis des Target Trackings werden im dritten Schritt die Bewegungen zwischen Bildframes berechnet und auf geeignete Weise interpretiert. (Xu & Brownjohn 2018)

Im folgenden Kapitel werden nach einer einführenden Erläuterung der Kamerakalibrierung die wichtigsten Ansätze des Target Tracking mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen erläutert. Den Kern bildet der phasenbasierte Ansatz zur Analyse von Bewegungen in Videodaten, der im Rahmen dieser Arbeit bei der Analyse von Videodaten aus Werkzeugmaschinen Anwendung findet.

2.5.1 Kamerakalibrierung

Die Kamerakalibrierung hat zum Ziel, eine dreidimensionale Objektbewegung im Raum zu ihrer zweidimensionalen Abbildung in der Bildebene in Beziehung zu setzen. Dadurch können auf Basis der gewonnenen Koordinaten in der Bildebene Rückschlüsse auf die tatsächlichen (Welt-)Koordinaten von Objekten im Raum gezogen werden. (Xu & Brownjohn 2018)

So wird bei der Durchführung der Kamerakalibrierung die sogenannte Projektionsmatrix der Kamera bestimmt, die die Parameter zur Umrechnung von Welt- in Kamera- und Bildkoordinaten enthält. Die Freiheitsgrade der Projektionsmatrix sind die sogenannten extrinsischen Freiheitsgrade, die intrinsischen Freiheitsgrade und der Skalierungsfaktor. Die intrinsischen Freiheitsgrade beschreiben die Eigenschaften von Bildsensor und Optik des Kamerasystems, die extrinsischen Parameter die Lage und Orientierung der Kamera im Raum. (Beyerer, Puente León & Frese 2016)

Abbildung 2-12 stellt hierzu den Zusammenhang zwischen Bildebene, Kamerakoordinatensystem und Weltkoordinatensystem dar.

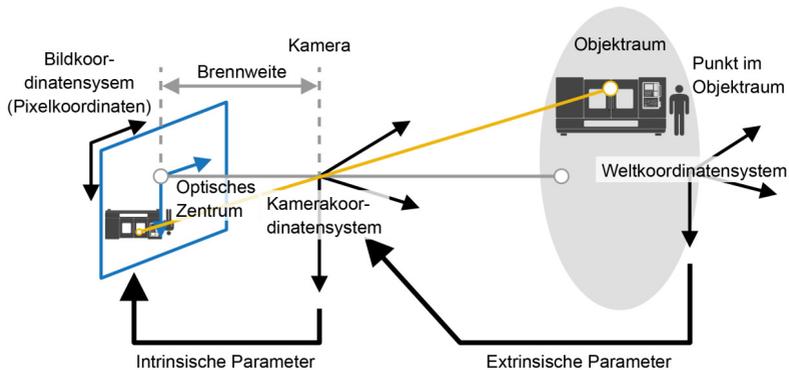


Abbildung 2-12: Extrinsische und intrinsische Parameter zur Umrechnung zwischen Bildkoordinatensystem, Kamerakoordinatensystem und Weltkoordinatensystem nach The MathWorks⁴

Die Kamerakalibrierung wird in der Regel durch die Bestimmung von korrespondierenden Welt- und Bildpunkten durchgeführt, mit denen anschließend die Projektionsmatrix

⁴ The MathWorks, I. (2020a), *Single Camera Calibrator App. R2020a*. <https://de.mathworks.com/help/vision/ug/single-camera-calibrator-app.html> [07.07.2020].

berechnet wird. Hierfür werden typischerweise zunächst eine Reihe von Aufnahmen eines Kalibrierkörpers in verschiedenen Ebenen und Orientierungen durchgeführt und Punkte dieses Körpers, häufig die Ecken eines Schachbrettmusters, in den aufgenommenen Bildern lokalisiert. Mit den so gewonnenen Positionen in der Bildebene sowie der Information über den abgebildeten Kalibrierkörper werden die intrinsischen Parameter und Objektivverzeichnung berechnet.

Für die anschließende Bestimmung der extrinsischen Parameter werden Korrespondenzen zwischen Punkten in der Bildebene und diesen Punkten im Weltkoordinatensystem benötigt. Hierfür können bekannte Koordinaten von Kontrollpunkten im Raum (im Weltkoordinatensystem) mit ihren Abbildungen in der Bildebene in Beziehung gesetzt werden (vgl. Abbildung 2-13).

Durch intrinsische und extrinsische Parameter kann dann die Projektionsmatrix bestimmt werden. Damit können Koordinaten im Weltkoordinatensystem in Koordinaten der Bildebene umgerechnet werden. (Beyerer, Puente León & Frese 2016; Xu & Brownjohn 2018)

Zur praktischen Durchführung der Kamerakalibrierung können spezielle Softwaremodule wie die Matlab Camera Calibrator App eingesetzt werden.⁵

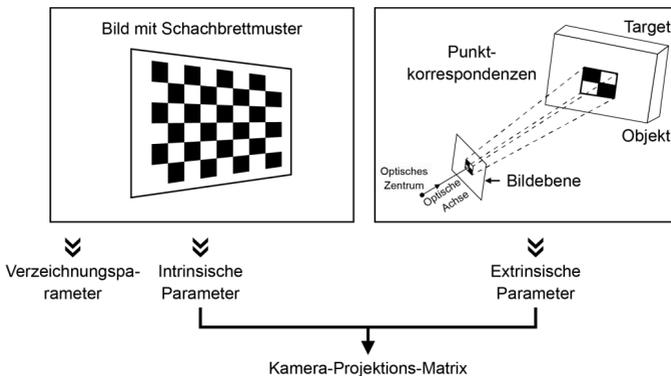


Abbildung 2-13: Schritte der Kamerakalibrierung zur Bestimmung der Projektionsmatrix für eine dreidimensionale Lokalisierung nach (Xu & Brownjohn 2018)

⁵ The MathWorks, I. (2020), *What Is Camera Calibration? R2020a*. <https://de.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html> [07.07.2020].

Sofern die exakte Bestimmung von Bewegungsamplituden nicht im Vordergrund steht und Fehler durch nicht exakt ausgerichtete Koordinatensysteme von Kamera und Objekt vernachlässigt werden können, kann gegebenenfalls auf die Kamerakalibrierung verzichtet werden (Xu & Brownjohn 2018). Sind dagegen exakte Amplituden und Bewegungsrichtungen von Bedeutung, wie etwa bei der Kompensation von Achsbewegungen mit Steuerungsdaten in Werkzeugmaschinen (vgl. Kapitel 7.2.1), muss eine Kalibrierung durchgeführt werden.

Nach der Beschreibung der Vorgehensweise und Anwendung der Kamerakalibrierung werden in den folgenden Kapiteln verschiedene Ansätze zum Target Tracking, also dem Verfolgen eines sich dynamisch bewegenden Objekts in Videodaten, mit jeweiligen Vor- und Nachteilen zusammenfassend beschrieben.

2.5.2 Template Matching

Das Template Matching oder „Schablonenvergleich“ ist ein Ansatz zur Analyse von Bewegungen in Videos, der auf der Suche eines festgelegten Musters in aufeinanderfolgenden Videoframes, also in den Einzelbildern der Videoaufnahme, basiert. Das Muster kann ein künstlich am Objekt angebrachtes Muster oder eine bereits auf der Oberfläche des Objekts vorhandene, geeignete Struktur sein. Mithilfe eines Kriteriums zur Korrelation von Bildbereichen, beispielsweise der sogenannten „Zero-Mean Normalised Cross Correlation“, kurz ZNCC, wird dann die Region in den aufeinander folgenden Bildframes bestimmt, die am stärksten mit dem festgelegten Muster korreliert ist beziehungsweise die größte Ähnlichkeit aufweist. Die Veränderung der Position der am stärksten korrelierten Region gibt dann Aufschluss über die Objektbewegung. Durch Interpolation kann die Methode zur Bestimmung von Positionen im Subpixel-Bereich erweitert werden. Digital Image Correlation, kurz DIC, ist eine Erweiterung des Template Matching, bei der die Analyse der Deformationen von Körpern im Vordergrund steht. (Xu & Brownjohn 2018)

Nachteile von Template Matching Verfahren und DIC sind, dass sie in vielen Fällen entweder spezielle auf den Körper aufgebrachte Muster oder große Bewegungen und deutlich definierte Objektkanten erfordern, um eine ausreichende Robustheit erzielen zu können. (Helfrick et al. 2011; Xu & Brownjohn 2018; Diamond, Heyns & Oberholster 2017)

Darüber hinaus ist das Template Matching wenig robust gegenüber Veränderungen der Beleuchtung oder des Bildhintergrunds. Vorteile sind die einfache Anwendbarkeit des

Verfahrens, das ausgenommen von der Auswahl des initialen Musters ohne Nutzereingaben auskommt. (Xu & Brownjohn 2018)

2.5.3 Feature Point Matching

Anstatt wie beim Template Matching einen gesamten Bereich im Bild als Muster zu definieren, der in folgenden Frames gesucht wird, setzt das Feature Point Matching auf das Wiederfinden von einzelnen Bildpunkten innerhalb eines ausgewählten Bereichs. Solche Punkte sind markante Punkte, genannt Keypoints, die möglichst robust gegenüber Störeinflüssen wie beispielsweise Veränderungen der Beleuchtung sind.

Ein Beispiel für eine Methode zur Identifikation solcher markanter Punkte ist der sogenannte „Harris Corner Detector“ (Abbildung 2-14 Schritt 1). Zur Beschreibung von Keypoints werden in der Regel nicht die Pixelwerte des Keypoints beziehungsweise die Pixel in einem Bereich um den Keypoint genutzt, sondern komplexere Deskriptoren angewandt, die beispielsweise die Form um den Keypoint miteinbeziehen. Beim Keypoint Matching (Abbildung 2-14 Schritt 2) werden die in unterschiedlichen Frames identifizierten Keypoints miteinander verglichen, um gleiche Keypoints und damit aus ihrer Veränderung Bewegungen identifizieren zu können. Im letzten Schritt werden Ausreißer, die das Messergebnis verfälschen könnten, identifiziert und entfernt (Abbildung 2-14 Schritt 3), indem die Positionen der Keypoints zueinander mit möglichen Bewegungsformen des Körpers auf Plausibilität geprüft werden. Die Bestimmung der Objektbewegung kann dadurch, dass die Bewegung mehrerer Keypoints zur Berechnung gemittelt wird, Subpixel-Genauigkeit⁶ erreichen. (Xu & Brownjohn 2018)

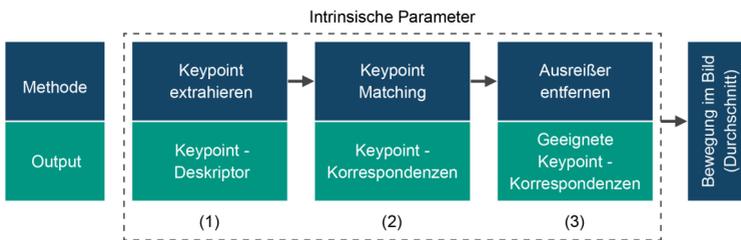


Abbildung 2-14: Typische Vorgehensweise beim Feature Point Matching zur Analyse von Objektbewegungen nach (Xu & Brownjohn 2018)

⁶ Unter Subpixel-Genauigkeit ist eine Genauigkeit mit einem Fehler von unter einem Pixel zu verstehen. Die äquivalente Größe eines Pixels im Weltkoordinatensystem ist von den Eigenschaften des Kamerasystems und der Aufstellung abhängig.

Dadurch, dass zur Berechnung der Objektbewegung beim Feature Point Matching nur wenige markante Punkte genutzt werden, ist die Berechnung vergleichsweise effizient und, geeignete Keypoints vorausgesetzt, robust gegenüber Störeinflüssen wie Veränderungen der Beleuchtung. Gleichwohl müssen geeignete Keypoints vorhanden sein, die zudem in allen Frames mit ausreichender Qualität abgebildet sind. Außerdem müssen die Parameter der zur Identifikation und zum Matching eingesetzten Methoden häufig manuell und basierend auf Erfahrungswissen eingestellt werden. (Xu & Brownjohn 2018)

Sowohl Methoden der Digital Image Correlation als auch des Point Tracking werden trotz der beschriebenen Nachteile auch in industriellen Anwendungen eingesetzt, etwa bei der Schwingungsanalyse von Turbinenschaufeln (Baquersad et al. 2017).

2.5.4 Optischer Fluss

Auf optischem Fluss basierende Verfahren schätzen die Bewegung aller im untersuchten Bildbereich liegender Pixel. Dadurch unterscheiden sie sich von den in den Kapiteln 2.5.2 und 2.5.3 dargestellten Methoden des Template Matching oder Feature Point Matching, bei denen nur einzelne ausgewählte Bildbereiche oder Pixel zur Berechnung einer Bewegung herangezogen werden. (Xu & Brownjohn 2018)

Optischer Fluss kann dabei als Geschwindigkeit der Bewegung in einem Bild beschrieben werden, die durch Verschiebungen eines Helligkeitsmusters entsteht. Dabei wird häufig eine Konstanz der Helligkeitsverteilung dieses Musters im Zeitverlauf sowie eine gleichmäßige Bewegung benachbarter Pixel unterstellt. Funktionen zur Bestimmung des optischen Flusses machen sich diese Annahmen zunutze. (Beauchemin & Barron 1995; Xu & Brownjohn 2018)

Analog zum Feature Point Tracking werden zur Steigerung der Genauigkeit bei der Berechnung des optischen Flusses Methoden zur Eliminierung von Ausreißern der für die Pixel errechneten Geschwindigkeiten beziehungsweise Verlagerungen angewandt. Subpixel-Genauigkeit wird ebenso wie beim Feature Point Tracking durch die Mittelung der an vielen Pixeln berechneten Verschiebung erreicht. (Xu & Brownjohn 2018)

Der sogenannte Kanade-Lucas-Tomasi-Tracker, kurz KLT Tracker, stellt eine verbreitete Vorgehensweise zur Berechnung des optischen Flusses dar. Er setzt voraus, dass die Helligkeitsverteilung der zum Tracking genutzten Features in jedem Bildframe konstant ist. Zum Tracking werden häufig nicht alle Bildinhalte, sondern nur Bereiche mit

Features genutzt, die gut für die Berechnung des optischen Flusses geeignet sind. Beispiele sind Ecken oder Kanten von Objekten (vergleiche Kapitel 2.5.3). (Tomasi & Kanade 1991)

Ein Vorteil der auf optischem Fluss basierenden Verfahren ist die Möglichkeit zum Tracking ohne die Notwendigkeit künstlich aufgebrachtener Muster auf dem zu untersuchenden Objekt. Unter kontrollierten Bedingungen können zudem gute Genauigkeiten erzielt werden. Gleichwohl ist das Ergebnis wie beim Template Matching und Feature Point Tracking davon abhängig, dass am zu analysierenden Objekt über den gesamten Betrachtungszeitraum geeignete Strukturen, wie Objektkanten und Ecken vorhanden und geeignet orientiert sind. So kann die Berechnung des optischen Flusses bei nicht geeigneter Orientierung der vorhandenen Objektfeatures, etwa wenn zur Analyse von Bewegungen nur eine Kante parallel zur Bewegungsrichtung zur Verfügung steht, eine Herausforderung darstellen. (Xu & Brownjohn 2018)

Eine weitere Vorgehensweise zur Berechnung des optischen Flusses stellt die phasenbasierte Analyse von Bewegungen nach (Wadhwa et al. 2013) dar, die im folgenden Kapitel getrennt behandelt wird.

2.5.5 Phasenbasierte Bewegungsanalyse

Die phasenbasierte Analyse von Bewegungen in Videodaten baut auf einem von (Wadhwa et al. 2013) anknüpfend an (Fleet & Jepson 1990; Gautama & van Hulle 2002; Freeman, Adelson & Heeger 1991) entwickelten Algorithmus zur Analyse und Verstärkung kleiner, in der Regel nicht mit dem menschlichen Auge sichtbarer Bewegungen in Videodaten auf. Im Vergleich zu dem von (Wu et al. 2012) vorgestellten Ansatz, bei dem Farbveränderungen in Videos analysiert und verstärkt werden, basiert der Ansatz nach (Wadhwa et al. 2013) auf der Analyse und Manipulation von Phasenverschiebungen der am Bildaufbau beteiligten Signale (vgl. Kapitel 2.2.2 und 2.2.3). Die Nachteile des Ansatzes nach (Wu et al. 2012), insbesondere dessen Anfälligkeit gegenüber Rauschen und Einschränkungen bezüglich maximaler Bewegungsamplituden können mit dem phasenbasierten Ansatz abgemildert werden (Wadhwa et al. 2016; Wadhwa et al. 2013).

In den folgenden Kapiteln werden zunächst die allgemeine Vorgehensweise des phasenbasierten Ansatzes erläutert (Kapitel 2.5.5.1) und anschließend erzielbare Genauigkeiten, relevante Einflussfaktoren sowie Weiterentwicklungen des Ansatzes beschrieben (Kapitel 2.5.5.2).

2.5.5.1 Vorgehensweise bei der phasenbasierten Bewegungsanalyse

Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben können einzelne Bilder als zweidimensionale Signale aufgefasst werden. Daher ist auch eine Überführung dieser Signale in den Frequenzbereich möglich. Diese werden auch als Ortsfrequenzen bezeichnet. Hierfür kann entweder die eindimensionale Transformation beispielsweise für eine einzelne Bildzeile oder die zweidimensionale Transformation auf das gesamte Bild angewandt werden. Amplitude und Phase des so transformierten Bildes geben dann Aufschluss über den Anteil der am Bildaufbau beteiligten räumlichen Frequenzen (Amplitude) sowie die Lage dieser Funktionen mit entsprechenden Frequenzen zueinander (Phase). Die Phase enthält damit Informationen über die Position der abgebildeten Objekte. Eine Verschiebung der Objekte zwischen zwei Bildern hat prinzipiell nur Einfluss auf die (subpixel-genaue) Phaseninformation und verhält sich für kleine Verschiebungen proportional zur Phase. (Beyerer, Puente León & Frese 2016; Wadhwa et al. 2016; Fleet & Jepson 1990; Wadhwa et al. 2013)

Ansätze zur phasenbasierten Analyse und Verstärkung von Bewegungen in Videodaten machen sich diesen Zusammenhang von Objektbewegung und Phasenverschiebung der räumlichen Frequenzen zunutze. So entwickelten (Wadhwa et al. 2013) aufbauend auf (Fleet & Jepson 1990; Gautama & van Hulle 2002; Freeman, Adelson & Heeger 1991) den Ansatz zur Analyse und optischen Verstärkung von kleinen Bewegungen in Videodaten, dessen Vorgehensweise im Folgenden erläutert wird.

Als Ausgangspunkt für die Analyse einer Bewegung liegen Bilddaten eines Videos als entsprechende Zahlenwerte in einem oder mehreren Farbkanälen vor. Abbildung 2-15 a) zeigt hierzu beispielhaft eindimensionale Intensitätsverläufe von zwei aufeinanderfolgenden Videoframes.⁷ Anschließend werden die Bilder des zu analysierenden Videoabschnitts durch eine 2D-Transformation in den Frequenzbereich transformiert und eine komplex steuerbare Bildpyramide aufgebaut.

Die komplex steuerbare Bildpyramide zerlegt ein einzelnes Bild in Abhängigkeit von Orientierung, Position und Ortsfrequenzbereich in Koeffizienten, die mit den Basisfunktionen der Bildsignale korrespondieren (Wadhwa et al. 2016) und aus denen die Phasen und Amplituden der zugrundeliegenden Basisfunktionen bestimmt werden können.

⁷ Zur Veranschaulichung der Vorgehensweise werden in Abbildung 2-15 nicht vollständige Frames eines Videos, sondern nur Intensitätsverläufe dargestellt, die zum Beispiel dem Verlauf der Helligkeit in einer Bildzeile oder Bildspalte entsprechen können.

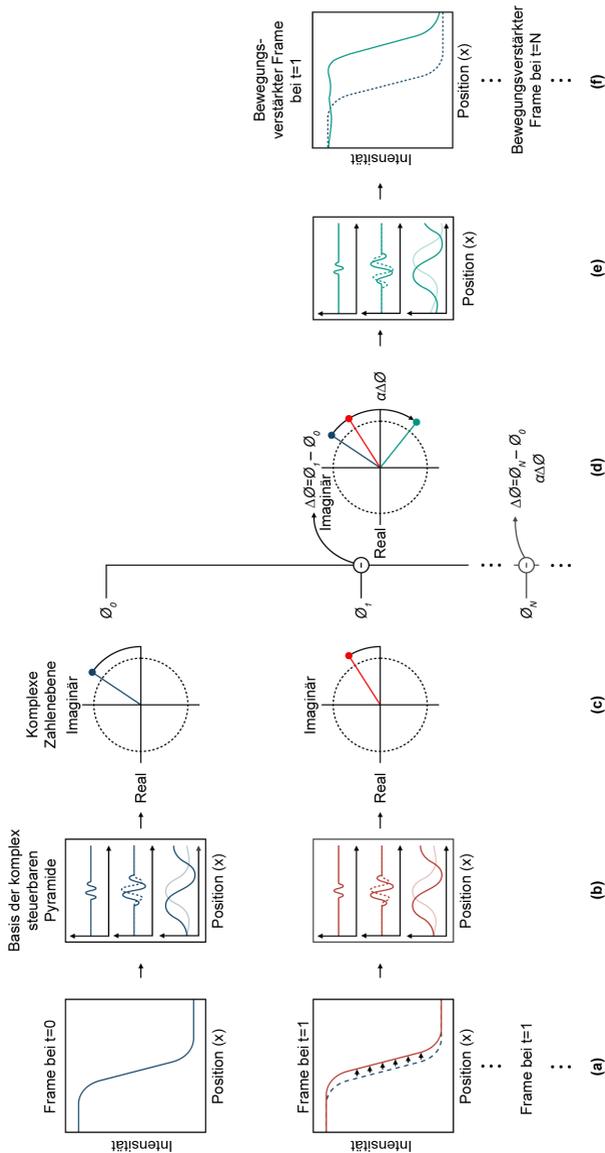


Abbildung 2-15: Vorgehensweise zur phasenbasierten Bewegungsanalyse und Bewegungsverstärkung nach (Wadhwa et al. 2016)

Grundlage der steuerbaren Pyramide sind sogenannte Gabor-Filter, die die Bildinformation in Abhängigkeit von räumlicher Orientierung und dem (Orts-) Frequenzbereich filtern. (Wadhwa et al. 2013; Simoncelli & Freeman 1995)

Die komplex steuerbare Bildpyramide kann damit ähnlich wie die klassische Fourier-Transformation vereinfacht als Filterbank mit einer Reihe von (räumlichen) Bandpassfiltern aufgefasst werden (vergleiche Kapitel 2.2.1). Im Unterschied zu einer Filterbank für die Transformation von zeitlich veränderlichen Signalen in den Frequenzbereich werden jedoch einerseits Bandpassfilter auf räumliche Bildsignale angewandt, zum anderen hat die komplex steuerbare Bildpyramide mit der Filterorientierung eine weitere Dimension. Grund dafür ist, dass die am Bildaufbau beteiligten Signale und damit ihre Frequenzen und Phasen, wie in Kapitel 2.2.2 und 2.2.3 dargestellt, von der räumlichen Orientierung abhängig sind. (Simoncelli & Freeman 1995)

Durch diese Abhängigkeit können Bildanteile mit unterschiedlichen Orientierungen erfasst und analysiert beziehungsweise verstärkt werden. So haben höhere Pyramiden Ebenen den Vorteil, dass sie größere Bewegungsamplituden erfassen können und zum Teil unempfindlicher gegenüber Rauscheinflüssen sind. Die Lokalisierbarkeit von Bewegungen im Raum ist in höheren Pyramiden Ebenen dagegen eingeschränkt.

In der Forschung zur phasenbasierten Analyse von Bewegungen werden verschiedene Ansätze zur Filterung mit Bildpyramiden verfolgt. So analysieren etwa (Kooij & van Gemert 2016) lediglich die jeweils unterste Pyramiden Ebene in Hauptbewegungsrichtung, (Chen et al. 2015) kombinieren verschiedene Ebenen zur Abdeckung verschieden großer Bewegungsamplituden und (Wadhwa et al. 2014) untersuchen Alternativen zum Pyramidenaufbau für verkürzte Rechenzeiten.

Abbildung 2-15 b) stellt beispielhaft die Funktionen nach der Transformation mit der komplex steuerbaren Bildpyramide dar, aus denen die Bildsignale aufgebaut werden können. Diese Funktionen entsprechen unterschiedlichen Ortsfrequenzbereichen und haben unterschiedliche räumliche Ausdehnung. In Abbildung 2-15 b) sind jeweils drei Ortsfrequenzbereiche übereinander dargestellt.

Im nächsten Schritt werden aus der Bildpyramide die Phasen und Amplituden abgeleitet, die in Abbildung 2-15 c) in der komplexen Zahlenebene für einen Ortsfrequenzbereich und eine Orientierung dargestellt sind.

Anschließend kann entweder die Phaseninformation und damit die Bewegung quantitativ analysiert oder ein Video mit verstärkten Bewegungen erstellt werden.

Bei der Analyse der Phaseninformationen können im ausgewählten Bildbereich die Phaseninformationen über mehrere Frames hinweg und damit Bewegungen im Zeitbereich analysiert werden. Entsprechend dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem muss die Bildwiederholfrequenz der Videokamera hierfür mindestens doppelt so hoch sein wie die höchste zu analysierende Frequenz (Meyer 2017), zur Analyse von Frequenzen bis 1000 Hz also zum Beispiel 2000 Frames pro Sekunde. Ferner sind für die Analyse die Orientierungen und der Ortsfrequenzbereich der Bildpyramide mit den entsprechenden Phaseninformationen auszuwählen. Die Auswertung der Variation der Phase kann dann entweder im Zeitbereich oder im (zeitlichen) Frequenzbereich durchgeführt werden.

Bei der Verstärkung kleiner Bewegungen im Video werden dagegen die Phaseninformationen manipuliert und die Bilddaten anschließend zu einem Video rücktransformiert. Hierfür wird die Phasendifferenz zwischen Bildframes berechnet und mit einem einstellenden Verstärkungsfaktor verstärkt (Abbildung 2-15 d). Anschließend werden die Basisfunktionen des Bildaufbaus mit den manipulierten Phasen angepasst (Abbildung 2-15 (e)) und die Videoframes durch eine inverse Transformation wiederhergestellt.

Um lediglich bestimmte Schwingungsformen zu verstärken, können auch lediglich Phasenvariationen in einem bestimmten zeitlichen Frequenzbereich verstärkt werden. Hierfür können die Phasenvariationen zunächst zeitlich bandpass-gefiltert werden, um zu verstärkende und nicht zu verstärkende Inhalte voneinander zu trennen. (Wadhwa et al. 2013; Wadhwa et al. 2016)

2.5.5.2 Erzielbare Genauigkeiten und Einflussfaktoren bei der phasenbasierten Bewegungsanalyse

In einer von (Diamond, Heyns & Oberholster 2017) durchgeführten Untersuchung wurden Fehler der gemessenen Amplitude in Abhängigkeit des Verhältnisses von Schwingungsamplitude zu Pixelauflösung für verschiedene Ansätze evaluiert. In der Evaluierung wurden ein Laservibrometer, ein klassischer Beschleunigungssensor, ein kommerzielles GOM 3D-System mit zwei verschiedenen künstlichen Markern (basierend auf Digital Image Correlation, vgl. Kapitel 2.5.2), sowie der phasenbasierte Ansatz mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gegenübergestellt. Dafür wurde ein elektrodynamischer Shaker mit einem Beschleunigungssensor und entsprechenden Markern ausgestattet sowie von einem Kamerasystem gefilmt. Das Laservibrometer diente als Referenzmessung. Dabei zeigte sich, dass die mit dem GOM-System

erzielten Messfehler stark von dem genutzten Marker abhängig waren, die Fehler jedoch für alle untersuchten Amplituden größer als die des phasenbasierten Ansatzes waren. Insbesondere bei Amplituden unter $1/100$ Pixel war der phasenbasierte Ansatz dem GOM-System überlegen. Auch im Vergleich zu den aus dem Signal eines Beschleunigungssensors abgeleiteten Amplituden zeigte der phasenbasierte Ansatz vergleichbare Messfehler, bei sehr kleinen Amplituden war er in der durchgeführten Versuchsreihe dem Beschleunigungssensor überlegen. Die minimal identifizierbaren Amplituden lagen bei phasenbasiertem Ansatz in einzelnen Messungen bei bis zu $1/450$ Pixel. (Diamond, Heyns & Oberholster 2017) Werden diese Amplituden in Beziehung zu in Werkzeugmaschinen auftretenden Amplituden und möglichen Kameraauflösungen gesetzt, erscheint eine Übertragbarkeit der Anwendung plausibel. So würden Amplituden von $1/100$ Pixel bei 1 Pixel/mm $10 \mu\text{m}$ entsprechen, was im Bereich der beim Schruppen auftretenden Amplituden an Werkstücken liegt, vgl. (Labisch & Weber 2013). Mit höheren Auflösungen könnten rechnerisch deutlich kleinere Amplituden analysiert werden. Die Bildauflösung ist folglich so zu wählen und einzustellen, dass das Analyseobjekt mit einer hohen Pixeldichte und Bildwiederholrate abgebildet wird.

(Wadhwa et al. 2017) stellen ferner zu den mit dem phasenbasierten Ansatz erzielbaren Genauigkeiten fest, dass die Zuverlässigkeit lokaler Phaseninformationen stark von der zugehörigen Amplitude des Bildsignals abhängig ist (nicht zu verwechseln mit der ebenfalls relevanten Amplitude der Objektbewegung). Wie in Kapitel 2.2.4 dargestellt, hat die Phaseninformation für Bereiche mit großer Amplitude im zugehörigen Ortsfrequenzbereich eine höhere Zuverlässigkeit als für kleinere Amplituden. Hohe Amplituden treten beispielsweise in Regionen mit starkem Kontrast mit den zugehörigen Ortsfrequenzen auf. Das Setup aus Kamera, Beleuchtung und Analyseobjekt ist daher entsprechend auszuwählen und einzustellen.

Die Amplitude und zugehörige Phaseninformation sind zudem stark abhängig von der Orientierung der zugehörigen Ortsfrequenz („In welche Bildrichtung wird analysiert?“) und der Höhe der Ortsfrequenz selbst („Wird die Phase einer niedrigen Ortsfrequenz für langwellige Bildinhalte oder einer hohen Ortsfrequenz für kurzweilige Bildinhalte betrachtet?“, vergleiche Kapitel 2.2.2) (Wadhwa et al. 2017). Das Vorhandensein ausreichender Amplituden in den Bilddaten, beispielsweise durch eine Objektkante mit entsprechender Orientierung und Beschaffenheit, hat daher großen Einfluss auf die Analysequalität mit dem phasenbasierten Ansatz.

Die von (Diamond, Heyns & Oberholster 2017) durchgeführten Untersuchungen zeigen das im Vergleich zu weiteren optischen Verfahren große Potential der phasenbasierten Analyse von Videodaten. So können im Vergleich zu einem auf Digital Image Correlation basierenden GOM-System geringe Messfehler bei der Bestimmung von Amplituden gezeigt werden, auch im Vergleich zu klassischen Beschleunigungssensoren werden im untersuchten Fall bezüglich der gemessenen Amplitude gute Ergebnisse erzielt. Die Versuche fanden jedoch unter Laborbedingungen und ohne mögliche Störeinflüssen realer Anwendungsbedingungen statt. Von einer direkten Übertragbarkeit auf Werkzeugmaschinenanwendungen kann daher nicht ausgegangen werden. So ist beispielsweise unklar, ob die für den phasenbasierten Ansatz erforderlichen Bildeigenschaften erzielt werden können und inwiefern sich spezifische, in Werkzeugmaschinen vorherrschende Störeinflüsse auswirken. Diese spezifischen Störeinflüsse werden anschließend in Kapitel 3.2 abgeleitet.

2.5.5.3 Weiterentwicklungen der phasenbasierten Bewegungsanalyse

Ein Vorteil des phasenbasierten Ansatzes ist die Möglichkeit, neben einer rein quantitativen Analyse eine Verstärkung der kleinen Bewegungen und damit eine anschauliche Visualisierung durchzuführen. Somit wird eine „Bewegungsmikroskopie“ ermöglicht, mit der Bewegungen mit ausgewählten Frequenzen verstärkt werden können, vgl. (Wadhwa et al. 2017).

Auch weist der phasenbasierte Ansatz nach (Wadhwa et al. 2013) deutliche Vorteile hinsichtlich der Empfindlichkeit gegenüber Rauschen im Vergleich zu den auf (Wu et al. 2012) basierenden Verfahren auf, die sich Veränderungen der Farbinformation oder der Pixel-Intensität zunutze machen. (Chen et al. 2017) zeigen jedoch, dass Rauschen der Pixelintensität insbesondere unter realen Anwendungsbedingungen auch im phasenbasierten Ansatz einen deutlichen Einfluss auf das Messergebnis haben kann. Möglichkeiten zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses sind die Vergrößerung der Bildauflösung, etwa durch einen verkürzten Betrachtungsabstand oder andere längere Objektivbrennweite, die allerdings mit einem verkleinerten Bildfeld einhergehen. Längere Betrachtungszeiträume werden ebenso als Möglichkeit zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnis angesehen (vgl. Kapitel 2.2.3). Als mögliche weitere Störquelle werden unerwünschte Kamerabewegungen durch Vibrationen in der Umgebung

der Kameraaufstellung sowie Veränderungen der Beleuchtungsintensität und des Bildhintergrunds genannt. (Chen et al. 2017)

Zur Vermeidung einer Verstärkung von überlagerten großen Bewegungen im Bildbereich zeigten (Elgharib et al. 2015) einen Ansatz zur Vorverarbeitung von Videodaten, bei der zunächst zu verstärkende von nicht zu verstärkenden Bildebenen in den Videoframes getrennt werden. (Kooij & van Gemert 2016) entwickelten darüber hinaus einen auf der Nutzung einer Tiefenkamera basierenden Ansatz, der vorzugsweise Bewegungen mit bestimmtem räumlichen Abstand zur Kamerasystem verstärkt. Damit erzielten sie Verbesserungen in Videoaufnahmen mit verstärkten menschlichen Bewegungen. Hierfür dienten Aufnahmen von menschlichem Zittern aus dem medizinischen Kontext.

Um die Anfälligkeit gegenüber Rauschen sowie Weichzeichnungseffekte bei starken Verstärkungsfaktoren zu verringern, entwickelten (Oh et al. 2018) einen Ansatz zum Ableiten von verbesserten räumlichen Filtern basierend auf einem künstlichen neuronalen Netz.

(Diamond, Heyns & Oberholster 2017) zeigten darüber hinaus einen Einfluss der Wahl der zu analysierenden Pixel (im Folgenden als ROI – Region of Interest bezeichnet) sowie einen Einfluss der Wahl des Ortsfrequenzbereichs auf das Analyseergebnis.

Erste industrielle Hard- und Softwarelösungen mit Bildwiederholraten bis 1300 Hz (und damit für tendenziell niedrige Frequenzen) zeigen die prinzipielle Anwendbarkeit des phasenbasierten Ansatzes im industriellen Kontext.⁸ (Xu & Brownjohn 2018) fassen jedoch zusammen, dass phasenbasierte Ansätze bisher vorrangig unter Laborbedingungen zum Einsatz gekommen sind, eine Nutzung unter realen Anwendungsbedingungen aber noch eine Herausforderung darstellt.

2.5.6 Zusammenfassung der Analyse von Bewegungen in Bildfolgen

Entsprechend der Unterteilung von Datenquellen zur Schwingungsanalyse in Kapitel 2.4.1 können Kamerasysteme, die zur Analyse von Bewegungen beziehungsweise Schwingungen eingesetzt werden, als berührungslose Relativaufnehmer aufgefasst werden. Sie teilen mit anderen Relativaufnehmern die prinzipbedingten Nachteile wie

⁸ RDI Technologies (2020), *IRIS CM*. <https://rditechnologies.com/models/iris-cm/> [02.07.2020]

die Notwendigkeit eines festen Bezugspunktes (in der Regel eine feste Lage der Kamera) sowie die bei berührungslosen Verfahren typischerweise höheren Anforderungen an die Messstelle (z.B. optische Oberflächeneigenschaften), vgl. (Kuttner & Rohnen 2019). So können Veränderungen der Oberfläche analysierter Objekte, beispielsweise aufgetragener Schmutz oder Kühlschmierstoffe, die optischen Eigenschaften und damit auch das Analyseergebnis beeinflussen. Darüber hinaus können bei der Analyse von Schwingungen durch die Nutzung des Weges als Messgröße insbesondere bei hohen Frequenzen Nachteile entstehen, vergleiche (Diamond, Heyns & Oberholster 2017). Klassische Beschleunigungssensoren, die die Beschleunigung als Messgröße nutzen, können hier Vorteile ausspielen (vgl. Kapitel 2.4.1). Gleichzeitig hat die Messung des Weges im Vergleich zur Beschleunigung prinzipiell Vorteile bei quasi-statischen Komponenten und niedrigen Frequenzen, vgl. Kapitel 2.4.1. (Xu & Brownjohn 2018)

Die Genauigkeit von videobasierten Verfahren hängt dabei von verschiedenen Faktoren wie dem Abstand von Kamera zu Objekt, der Objektbeleuchtung, der Stabilität der Kameraaufstellung und der angewandten Methode zur Videoanalyse ab (Xu & Brownjohn 2018). Die rechnerisch analysierbaren Schwingungsamplituden reichen jedoch in einen Bereich, der videobasierte Verfahren auch für Anwendungen in Werkzeugmaschinen interessant macht.

Die Analyse von Bewegungen in Videos, etwa basierend auf dem phasenbasierten Ansatz nach (Wadhwa et al. 2013) bietet gleichzeitig die Möglichkeit, Bewegungen in der gesamten abgebildeten Bildebene, also gleichzeitig in zwei Achsen zu erfassen. Bewegungen normal zur Betrachtungsachse können zwar nur eingeschränkt erfasst werden, durch die Wahl einer geeigneten Kameraaufstellung oder die Nutzung mehrerer Kameras kann jedoch auch in diesem Fall eine Analyse ermöglicht werden.

Zudem hat die berührungslose Analyse, gerade in Verbindung mit einem Kamerasystem, deutliche Vorteile durch einen geringeren Vorbereitungsaufwand, die fehlende Beeinflussung des Messobjekts durch eine aufgebrauchte Masse sowie die große räumliche Auflösung der Messung, vgl. (Kuttner & Rohnen 2019; Xu & Brownjohn 2018). Erste industriell vermarktete Ansätze zur videobasierten Schwingungsanalyse zielen auf besonders diese Vorteile ab: Durch die berührungslose Analyse in der gesamten Bild-

ebene kann der Messaufwand deutlich gesenkt werden, die Möglichkeiten zur Visualisierung von Schwingungsformen im Video vereinfachen außerdem die Ableitung entsprechender Maßnahmen.⁹

Insbesondere bei Untersuchungen, die heute vielfach aufgrund ihres großen Messaufwands nicht durchgeführt werden, wie bei Modalanalysen oder der Analyse von Betriebsschwingungen in Werkzeugmaschinen (vgl. Kapitel 2.4.1 und 2.4.4), können kamerabasierte Ansätze daher neue Möglichkeiten bieten. Aufgrund des Verzichts auf künstliche Marker, der Möglichkeit zur Visualisierung durch Verstärkung von Bewegungen sowie den möglichen erzielbaren Empfindlichkeiten im Subpixel-Bereich verspricht insbesondere der auf (Wadhwa et al. 2013) basierende phasenbasierte Ansatz Potential. Auch die vergleichsweise gute Robustheit gegenüber Helligkeitsveränderungen stellt einen Vorteil der Analyse von Phaseninformation dar (Gautama & van Hulle 2002). Gleichzeitig bestehen gegenüber klassischen Beschleunigungssensoren Defizite gerade hinsichtlich Zuverlässigkeit und Genauigkeit. Während unter Laborbedingungen gute Resultate und hohe Empfindlichkeiten erreicht werden, stellen Störgrößen unter realen Anwendungsbedingungen teilweise ein Problem dar. Spanende Prozesse innerhalb einer Werkzeugmaschine stellen aufgrund der Randbedingungen wie Spänen, Relativbewegungen von Achsen oder den beschränkten Möglichkeiten zur Kamera- und Beleuchtungsaufstellung eine besondere Herausforderung dar, die bisher noch nicht ausreichend untersucht wurde.

Im Folgenden werden abschließend die wichtigsten Vor- und Nachteile videobasierter Ansätze zur Schwingungsanalyse stichpunktartig zusammengefasst.

Vorteile videobasierter Ansätze

- Flexible Positionierung von Messpunkten in der Bildebene (zwei Achsen), auch nach der Datenaufnahme
- Durch berührungslose Analyse kein Aufwand zur Montage von Sensor am Messobjekt und keine Beeinflussung durch Sensor
- Vereinfachte Visualisierung von Ergebnissen durch Möglichkeit der Verstärkung von Bewegungen (insb. phasenbasierter Ansatz)
- Prinzipbedingte Vorteile von Relativaufnehmern bei niedrigen Frequenzen und damit einhergehend tendenziell höheren Amplituden

⁹ RDI Technologies (2020), *IRIS CM*. <https://rditechnologies.com/models/iris-cm/> [02.07.2020]

Nachteile videobasierter Ansätze

- Abhängigkeit der Messgenauigkeit von verschiedenen Faktoren wie Abstand von Kamera zu Objekt, Objektbeleuchtung und angewandter Methode zur Datenanalyse
- Notwendigkeit eines festen Bezugspunktes (in der Regel eine feste, ruhige Lage der Kamera)
- Anforderungen an die Messstelle, insb. optische Eigenschaften. Unklarer Einfluss von optischen Störfaktoren.
- Prinzipbedingte Nachteile von Relativaufnehmern bei hohen Frequenzen und damit einhergehend tendenziell niedrigeren Amplituden

2.6 Defizite im Stand der Forschung und Technik

Nach der Einführung grundlegender Begriffe der Schwingungslehre und der Signalanalyse wurden in den vorangegangenen Kapiteln die heute vorherrschenden Ansätze zur Messdatengenerierung und Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen dargestellt. Dabei zeigten sich zunächst folgende Hauptdefizite bei aktuellen Messverfahren zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens:

Defizite verschiedener Messprinzipien von Schwingungsaufnehmern

- Absolutaufnehmer, wie die verbreiteten Beschleunigungssensoren, weisen ein frequenzabhängiges Übertragungsverhalten auf und müssen mit hohem Aufwand an den jeweiligen Messpunkten angebracht werden.
- Relativaufnehmer können zwar je nach Messprinzip auch berührungslos Verlagerungen messen, sie haben jedoch besonders bei hohen Frequenzen und damit einhergehend niedrigen Amplituden Defizite. Die Sicherstellung eines ruhenden Referenzsystems kann ebenso eine Herausforderung darstellen.

Die Schwingungsaufnehmer liefern häufig die Basis für eine weitergehende dynamische Charakterisierung von Messobjekten. Bei der Darstellung der Verfahren zur Charakterisierung des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen zeigten sich dann insbesondere folgende Defizite:

Defizite aktueller Verfahren zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen

- Bei der Vorbereitung von Messungen ist ein fundiertes Expertenwissen zur Bestimmung der Messpunkte erforderlich (Modalanalyse und Betriebsschwingungsanalyse).
- Der Aufwand zur Durchführung von Messungen ist durch die Vielzahl an Messpunkten und Wiederholungen hoch (insbesondere Modalanalyse).
- Eine anschauliche Visualisierung von Ergebnissen ist mit hohem Aufwand verbunden (Modalanalyse und Betriebsschwingungsanalyse).
- Verfahren ohne experimentelle Bestimmung dynamischer Parameter weisen dagegen hohe Unsicherheiten auf (dynamische FEM).

Videobasierte Ansätze und insbesondere der phasenbasierte Ansatz zur Analyse von Videodaten könnten hier eine Reihe von Vorteilen bieten und rechnerisch Schwingungsamplituden, wie sie in Werkzeugmaschinen auftreten, auflösen. Gleichwohl bestehen insbesondere im Kontext spanender Werkzeugmaschinen Defizite bei der Anwendbarkeit videobasierter Ansätze sowie speziell des phasenbasierten Ansatzes:

Defizite videobasierter Ansätze zur Schwingungsanalyse in Werkzeugmaschinen

- Messunsicherheiten nehmen insbesondere bei kleinen Amplituden zu, die oft mit hohen Frequenzen einhergehen (vgl. Relativaufnehmer) und in hochsteifen, hochgenauen WZM auftreten – Anwendbarkeit in WZM-Anwendungen aktuell unklar
- Notwendigkeit eines festen Bezugspunktes durch Kamerasystem – unklar ob und wie eine ausreichend ruhige Kameraaufstellung im WZM-Kontext erreicht werden kann
- Hohe Anforderungen an Messobjekt / Beleuchtung
 - Bisher keine systematische Untersuchung von in WZM-Anwendungen relevanten Einflussgrößen
 - Folglich sind auch keine Ansätze zur Abmilderung von in WZM-Anwendungen relevanten Störeinflüssen vorhanden

Die identifizierten Defizite des Stand der Technik werden in der folgenden Zielsetzung der Arbeit aufgegriffen und in wissenschaftliche Fragestellungen formuliert, an denen sich der weitere Aufbau dieser Arbeit orientiert.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

3.1 Zielsetzung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde dargelegt, dass videobasierte Ansätze zur Schwingungsanalyse mit Videodaten prinzipiell geeignet sind, entscheidende Defizite der heutigen Verfahren zur Schwingungsanalyse von Werkzeugmaschinen aufzulösen. Gleichwohl existieren bei videobasierten Verfahren und dem Ansatz der phasenbasierten Analyse Defizite, die eine tatsächliche Anwendung abseits von Laborbedingungen und innerhalb einer Werkzeugmaschine einschränken. Hieraus werden folgende wissenschaftliche Fragestellungen für diese Arbeit abgeleitet:

- Welche Einflussgrößen sind bei der Videoaufnahme und Datenauswertung mit dem phasenbasierten Ansatz zur Schwingungsanalyse mit Videodaten relevant und welche Maßnahmen müssen daraus für Videoaufnahmen im Werkzeugmaschinen-Kontext abgeleitet werden?
- Welche zusätzlichen, für spanende Werkzeugmaschinen spezifischen Einflussgrößen können auftreten?
- Wie können werkzeugmaschinenspezifische Einflussgrößen abgemildert oder kompensiert werden, um Schwingungsanalysen zu ermöglichen?

3.2 Vorgehensweise

Ausgangspunkt für die Untersuchungen zur Beantwortung der aufgestellten Fragestellungen bildet die Identifikation möglicher Einflussgrößen mithilfe eines Ursache-Wirkungsdiagramms (Ishikawa-Diagramm), vgl. (Syska 2006). Die Wirkung wird hierfür als Abweichung der videobasiert durchgeführten Schwingungsanalyse von der tatsächlichen dynamischen Bewegung beziehungsweise von einer Referenzmessung definiert. Als übergeordnete Haupteinflussgrößen werden Mensch, Maschine (hier gleichzeitig das Messobjekt), Millieu, Material, Methode und Messung gewählt. Anschließend werden aus Literatur und Voruntersuchungen mit der videobasierten Schwingungsanalyse mögliche Einflussgrößen gesammelt und den Haupteinflussgrößen zugeordnet.

Abbildung 3-1 stellt den Überblick der identifizierten Einflussgrößen dar.

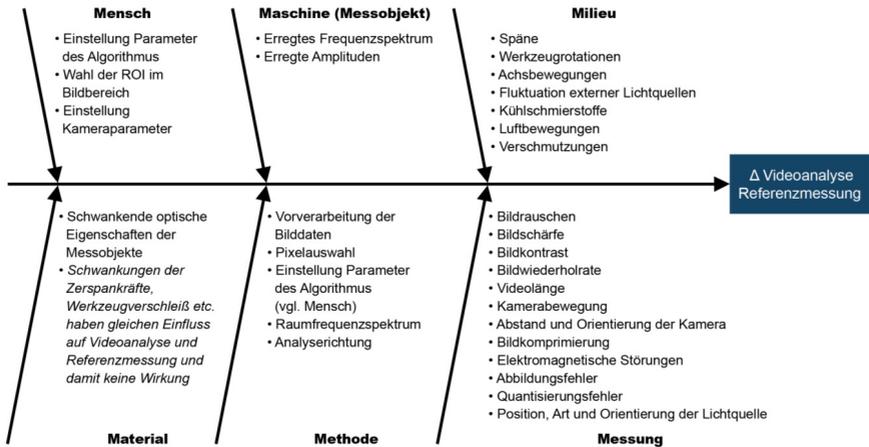


Abbildung 3-1 Einflussgrößen mit Wirkung auf Fehler bei der videobasierten Schwingungsanalyse (Abweichung der videobasierten Schwingungsanalyse von einer Referenzmessung)

Um Einflussgrößen zu untersuchen und mögliche Ansätze zur Kompensation abzuleiten ist die Vorgehensweise dieser Arbeit in drei Schritte unterteilt. So werden zunächst unabhängig von der Werkzeugmaschinenanwendung Einflussgrößen der Videoaufnahme und Datenauswertung bei der phasenbasierten Schwingungsanalyse anhand von Videoaufnahmen eines schwingenden Piezoaktors sowie anhand von synthetischen Videodaten untersucht (Kapitel 5). Hierbei werden die Einflussgrößen betrachtet, die losgelöst von der realen Umgebung einer Werkzeugmaschine (Milieu) untersucht werden können. Nachfolgend werden daher die Gruppen Messung, Methode und Maschine fokussiert.¹⁰ Die Herausforderung ist hierbei, aus der Vielzahl möglicher Einflüsse, relevante Faktoren zu identifizieren und Schlüsse für die spätere Generierung von Videodaten in Werkzeugmaschinen zu ziehen. Beispiele sind der Einfluss von Bildrauschen auf das Analyseergebnis, der Einfluss der ROI-Auswahl und -Positionierung oder der erforderliche Bildkontrast.

¹⁰ Der Mensch als Einflussgröße wird nicht getrennt betrachtet, da er nur indirekt Einfluss über die weiteren, ebenfalls untersuchten Einflussgrößen hat.

Im Anschluss an die Untersuchung allgemeiner Einflussgrößen werden spezifische Einflussgrößen bei der Analyse von Videodaten aus Werkzeugmaschinen untersucht. Hierbei werden die in

Abbildung 3-1 unter Milieu aufgeführten Einflussgrößen fokussiert. Beispiele sind der Einfluss durch das im Bildbereich rotierende Werkzeug oder der Einfluss von Spänen. Für die identifizierten WZM-spezifischen Einflussgrößen werden dann Lösungsansätze abgeleitet (Kapitel 6). Beispiele sind die Kompensation von Spänen oder von Achsbewegungen, um eine Schwingungsanalyse weiterhin ermöglichen zu können. Die besondere Herausforderung liegt hierbei in Verarbeitung von Bildinformationen aus einem realen Zerspanprozess mit seinen weiteren Einflussgrößen und Unwägbarkeiten. Die Erkenntnisse werden dazu anschließend anhand von Videodaten Zerspanprozesse validiert (Kapitel 6.6). Abbildung 3-2 stellt die Gliederung der Vorgehensweise dar.

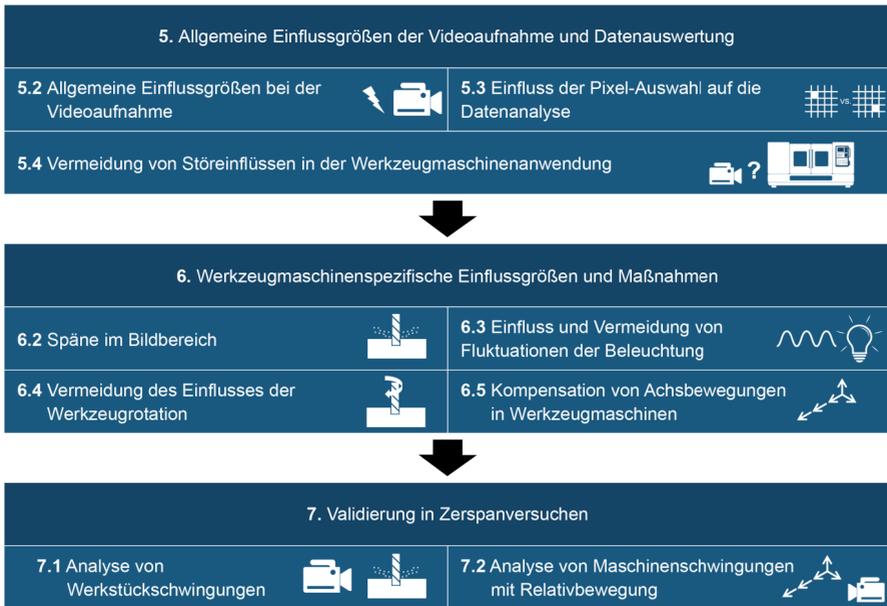


Abbildung 3-2: Illustrierte Darstellung der Vorgehensweise

Abbildung 3-3 zeigt hierzu exemplarisch den Messaufbau zur Validierung in Zerspanversuchen. Die dargestellte Hochgeschwindigkeitskamera ist Datenquelle sowohl für die Untersuchungen der allgemeinen Einflussgrößen (Kapitel 5), die Untersuchung

werkzeugmaschinenspezifischer Einflussgrößen (Kapitel 6), sowie für die abschließende Validierung in Zerspanversuchen (Kapitel 7). Die eingesetzte Hardware zur Datengenerierung wird im Folgenden Kapitel näher beschrieben. Die einzelnen durchgeführten Versuche und Messaufbauten werden mit dem Ziel besserer Lesbarkeit direkt in den jeweiligen Kapiteln 5-7 erläutert.

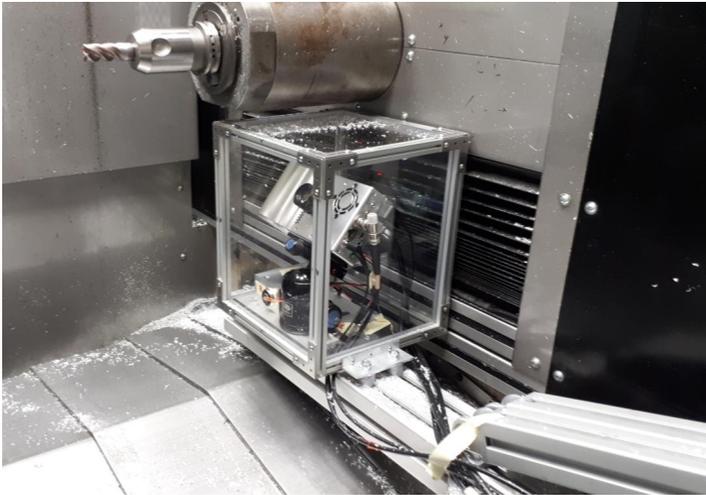


Abbildung 3-3: Detailaufnahme der in einer Werkzeugmaschine eingesetzten Hochgeschwindigkeitskamera: Die Kamera ist in einem Makrolongehäuse mit einstellbarem Kugelkopf auf einem Stativ aus Aluminiumprofilen befestigt; das Stativ und Makrolongehäuse sind so positioniert, dass sie keine Kontaktpunkte mit der Werkzeugmaschine haben.

4 Hardware zur Datengenerierung

Wie im Stand der Technik dargelegt haben die zur Datengenerierung genutzten Datenquellen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität einer Schwingungsanalyse. Der Fokus dieser Arbeit soll jedoch nicht auf dem Vergleich unterschiedlicher Kamerahardware liegen. Stattdessen wird ein Kamerasetup gewählt, das mit vertretbarem Aufwand und günstigen Kosten aufgebaut und zur reproduzierbaren Datengenerierung genutzt werden kann.

Im Folgenden wird die im Rahmen dieser Arbeit zur Erzeugung der Videodaten und Referenzsignale eingesetzte Hardware näher beschrieben. Das im folgenden Kapitel 4.1 beschriebene Kamerasystem und die in 4.2 beschriebene Beleuchtung werden sowohl für die initiale Evaluierung von Einflussgrößen für die phasenbasierte Videoanalyse (Kapitel 5), die Datengenerierung für die Filterung von Videodaten aus Werkzeugmaschinen (Kapitel 6) und Validierung in Zerspanversuchen (Kapitel 6.6) eingesetzt. Die in Kapitel 4.4 beschriebene Hardware zur Erzeugung von Referenzsignalen sowie zur Datensynchronisation werden für die Datengenerierung in den Versuchen mit einer spanenden Werkzeugmaschine (Kapitel 6 und 6.6) eingesetzt.

4.1 Kamerasystem

Die verwendete Kamera ist eine Hochgeschwindigkeitskamera vom Typ Krontech Chronos 1.4 mit Farbsensor und 32 GB RAM. Die Kamera zeichnet ein günstiger Einkaufspreis (~2100€ Stand 09/2017) und damit eine prinzipielle Eignung für kostensensitive Anwendungen bei gleichzeitig vergleichsweise hoher Bildqualität und Framerate aus. Der RAM-Speicher der Kamera dient zur schnellen Zwischenspeicherung der Bilddaten während der Aufnahme. Die Kamera erreicht in dieser Konfiguration bei maximaler Auflösung von 1280x1024 Pixel eine Bildwiederholrate von 1057 FPS und ca. 17 Sekunden Aufnahmedauer. Mit niedrigeren Auflösungen werden entsprechend höhere Bildwiederholraten und Aufnahmedauern erreicht. Da davon ausgegangen wird, dass in den Messungen die Zahneingriffsfrequenzen der Fräswerkzeuge und deren Harmonische dominieren, wird entsprechend dem später beschriebenen Versuchsplan eine maximale zu analysierende Frequenz von 1000 Hz festgelegt. Zur Verlängerung der maximalen Aufnahmedauer und zur Auflösung der Schwingungen bis 1000 Hz werden in den Versuchsreihen geringere Auflösungen bei einer Bildwiederholrate von jeweils 2000 FPS gewählt.

Die gewählten Aufnahmeparameter stellen stets einen Kompromiss aus Bildwiederholrate, Pixel-Auflösung und Aufnahmedauer dar, mit dem die Leistungsfähigkeit der Bilddaten-Speicherung voll auszunutzen ist. Eine hohe Pixel-Auflösung dient in diesem Zusammenhang der Abbildung größerer Objekte oder der Abbildung kleiner Schwingungsamplituden mit höherer Auflösung. Eine hohe Bildwiederholrate dient der Abbildung hoher Schwingungsfrequenzen des gefilmten Objekts. Die Aufnahmedauer muss mindestens so lang sein, dass der Versuch vollständig abgebildet werden kann bzw. dass eine ausreichende Anzahl von Bildern für die spätere Analyse vorhanden ist.

Um unerwünschte Effekte durch Bildkomprimierung und damit die Reduktion der Bildinformation zu vermeiden, werden alle Bilddaten im nicht komprimierten Rohformat gespeichert, vgl. (A_Parth 2018).

Die Kamera ist in den Versuchsreihen mit einem Objektiv vom Typ Ricoh FL-CC3516-2M mit Festbrennweite ausgestattet.

Zur zeitlich synchronisierten Aufnahme der Videodaten wird die Aufnahme aller Einzelbilder von einem externen Triggersignal ausgelöst, das je nach Versuchsaufbau mit den weiteren Datenquellen synchronisiert ist, insbesondere den Achsdaten zur späteren Kompensation von Bewegungen in der Werkzeugmaschine. Das Triggersignal wird durch eine USB-Messkarte vom Typ Data Translation 9834 erzeugt.

4.2 Kamerabefestigung und Bestimmung von Kamerabewegungen

Translatorische oder rotatorische Kamerabewegungen, die durch eine unzureichend steife beziehungsweise unzureichend gedämpfte Aufstellung des Kamerasystems verursacht werden, rufen scheinbare Bewegungen der durch den Bildsensor abgebildeten Objekte hervor. Insbesondere in Anwendungen mit starken Vibrationen in der Umgebung, wie in Produktionsumgebungen und Werkzeugmaschinen, stellen Vibrationen der Umgebung, wie auch bei anderen Relativaufnehmern eine Herausforderung dar (vgl. Kapitel 2.4.1). Abbildung 4-1 stellt hierzu am Beispiel einer eindimensionalen translatorischen Kamerabewegung den resultierenden Messfehler beziehungsweise Fehler der Abbildung auf den Bildsensor dar. Der Abbildungsfehler ist sowohl von den intrinsischen Parametern, als auch von der relativen Position und Orientierung zwischen Kamera und zu analysierendem Objekt abhängig. (Brownjohn, Xu & Hester 2017)

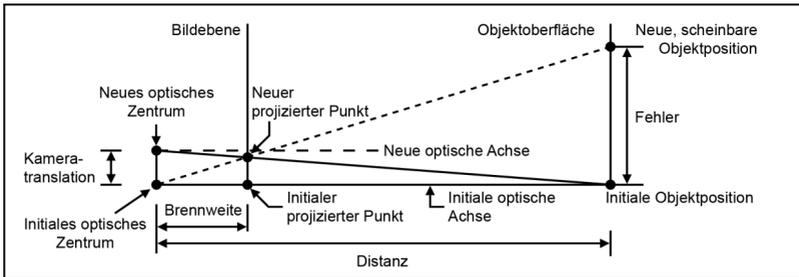


Abbildung 4-1: Durch eindimensionale Translation der Kamera hervorgerufene Messfehler nach (Brownjohn, Xu & Hester 2017)

Fehler durch translatorische Kamerabewegungen werden dabei, wie auch Fehler durch rotatorische Bewegungen, vom Abstand zwischen Kamerasystem und Objekt beeinflusst. Bei der Durchführung der Zerspanversuche wird daher, unter der Prämisse, dass das zu analysierende Objekt vollständig abgebildet wird, jeweils eine Kameraposition gewählt, die möglichst nahe am zu analysierenden Objekt liegt.

Auf Ansätze zur nachträglichen Kompensation von Kamerabewegungen durch Tracking eines fixierten Objekts (vgl. (Brownjohn, Xu & Hester 2017)) wird verzichtet, da bei Aufnahmen im Werkzeugmaschineninnenraum keine Objekte abgebildet werden können, die einerseits als unbeweglich angenommen und andererseits mit ausreichender Bildqualität abgebildet werden können. Stattdessen wird eine möglichst steife, gut dämpfende und von der Werkzeugmaschine entkoppelte Kameraaufstellung mit kurzem Abstand zwischen Kamera und Objekt gewählt. Hierfür werden für die Versuche jeweils Stative aus massiven Aluminiumprofilen aufgebaut und mit schwingungsdämpfenden Stellfüßen unter das Maschinenbett geschoben. Die Kamera ist jeweils mit einem massiven Kugelkopf vom Typ Sirui K-30X mit dem Stativ verbunden, der die Einstellung des Bildausschnitts erlaubt. Um ein Anregen durch schwingende Maschinenbauteile zu verhindern, berühren Stativ und Kamerasystem die Maschinenstruktur nicht. Mögliche weitere Quellen zur Anregung des Stativs sind fliegende Späne, die auf Stativ und Makrolongehäuse treffen, sowie eine Anregung durch den Luftschall des

Bearbeitungsprozesses. In den Versuchsreihen zur Bestimmung allgemeiner Einflussgrößen außerhalb einer Werkzeugmaschine wird auf das Makrolongehäuse verzichtet und ein stabiles Holzstativ genutzt.

Um gegebenenfalls weiterhin auftretende Kamerabewegungen bewerten zu können, werden Geophon-Sensoren vom Typ SM-24, empfindliche Beschleunigungssensoren für niedrige Frequenzbereiche am Stativ beziehungsweise an der Kamera angebracht und ihre Daten mit den aus den Videodaten rekonstruierten Bewegungen im Zeit- und Frequenzbereich abgeglichen.

Um eine mögliche Objektivverzeichnung trotz Kalibrierung so gering wie möglich zu halten, ist die Kamera in den Versuchen jeweils so ausgerichtet, dass das zu analysierende Objekt in der Nähe des Mittelpunkts der Bildebene beziehungsweise in der Nähe des Objektivmittelpunkts liegt.

4.3 Beleuchtung

Die Videoaufnahmen werden durch einen 75 Watt LED-Scheinwerfer vom Typ WASP 100-C beleuchtet. Der Scheinwerfer weist eine in Vorversuchen ermittelte Flackerfrequenz von über 30.000 Hz auf, sodass von einer geringen Beeinflussung der mit 2.000 Hz aufgenommenen Videodaten ausgegangen werden kann. Um die für hohe Bildwiederholfrequenzen notwendige große Helligkeit zu erzielen, wird der Scheinwerfer mit maximaler Helligkeit betrieben und auf eine Farbtemperatur von 8000 K eingestellt.

Der Scheinwerfer wird in den Vorversuchen zur Bestimmung von Eingangsgrößen auf einem eigenen Stativ positioniert (vgl. Abbildung 7-4). In den Versuchen an der Werkzeugmaschine wird der Scheinwerfer aus Platzgründen mit der Kamera am selben Stativ befestigt.

Position und Orientierung des Scheinwerfers sind so gewählt, dass sie eine möglichst hohe Helligkeit bei gleichzeitig starkem Kontrast am zu analysierendem Objekt bzw. an dessen Kanten erzeugen. In Versuchen mit Achsbewegung beziehungsweise relativ zur Kamera und Scheinwerfer beweglichem Objekt wird der Scheinwerfer so positioniert, dass sich ein Kompromiss aus gutem Kontrast und über den Verfahrensweg der Achse möglichst gleichmäßiger Ausleuchtung des Objekts ergibt.

Weitere Lichtquellen neben dem Scheinwerfer stellen potentielle Störquellen dar. So zeigen Vorversuche von (A_Parth 2018), dass Lichtquellen wie Neonröhren die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit Flackerfrequenzen von typischerweise 100 Hz überlagern. Um keine überlagerten Flackerfrequenzen zu erzeugen, werden in den Versuchen andere Lichtquellen als der Scheinwerfer ausgeschaltet.

4.4 Hardware zur Datenerfassung und Versuchssteuerung

Der Aufbau zur Versuchssteuerung und Speicherung der Versuchsdaten besteht bei der Durchführung von Versuchen in der Werkzeugmaschine aus drei Haupt-Datenquellen, der Hochgeschwindigkeitskamera, die in Kapitel 4.1 beschrieben wird, den Referenz-Beschleunigungssensoren sowie der Maschinensteuerung.

Durch die Beschleunigungssensoren werden Referenzsignale am Werkstück bzw. an der Spindelnase erfasst. Die Beschleunigungssensoren vom Typ KS943B.10/01 Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K. (bei Schwingungsanalyse am Werkstück) bzw. vom Typ HBK Brüel&Kjaer 4524-B-001 (Schwingungsanalyse an der Hauptspindel) werden von Kopplern vom Typ Kistler 5134A verstärkt und mit einer USB-Messkarte vom Typ Data Translation 9834 erfasst. Neben den Beschleunigungssensoren an den zu analysierenden Objekten sind am Kamerasystem Geophon-Sensoren vom Typ SM-24 montiert. Die Geophon-Sensoren sind in drei Achsen äquivalent zum Kamerakordinatensystem orientiert.

Die Hochgeschwindigkeitskamera speichert die Einzelbilder jedes Versuchs zunächst auf einem internen RAM-Speicher ab, anschließend werden sie von dort auf eine externe Festplatte übertragen. Die Bildaufnahme wird jeweils von der USB-Messkarte getriggert, die zeitlich synchron zum Bildaufnahme-Triggersignal die Daten der Referenzbeschleunigungssensoren erfasst. Die Daten der USB-Messkarte werden auf einem PC abgespeichert. Darüber hinaus nimmt die USB-Karte ein Triggersignal der Maschinensteuerung auf, das für Versuche mit Relativbewegung zwischen Kamera und Maschine die Synchronisation mit den Achspositionen der Werkzeugmaschine erlaubt. Die Achspositionen werden mitsamt dem Maschinensteuerung-Triggersignal von der Maschinensteuerung abgespeichert und nach der Versuchsdurchführung auf den PC übertragen. Anschließend werden die Bilddaten, Beschleunigungssensor-Daten sowie Achspositionen anhand der Triggersignale synchronisiert und ausgewertet. Abbildung 4-2 stellt den Aufbau zur Datenerfassung und Versuchssteuerung schematisch dar.

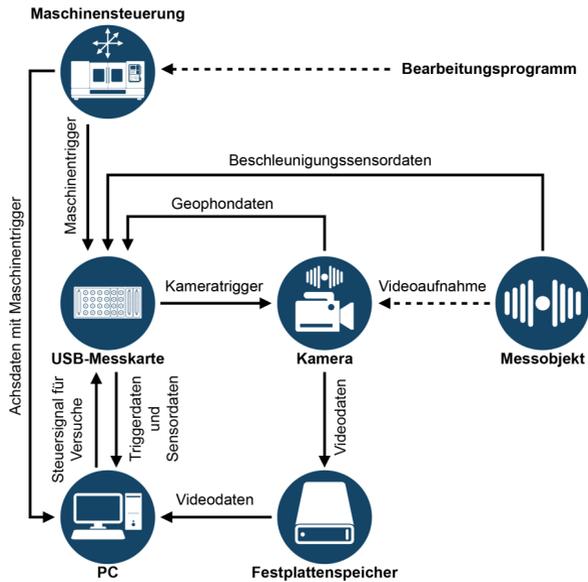


Abbildung 4-2: Schematischer Aufbau zur Datenerfassung und Versuchssteuerung

5 Allgemeine Einflussgrößen der Videoaufnahme und Datenauswertung

Im Folgenden werden im Anschluss an die Beschreibung der verfolgten Vorgehensweise (5.1) die Ergebnisse zu allgemeinen Einflussgrößen der Videoaufnahme (5.2) und allgemeine Einflussgrößen der Datenauswertung (5.3) dargestellt und anschließend die daran anknüpfenden Maßnahmen für die Übertragung auf die Anwendung in Werkzeugmaschinen zusammengefasst (5.4). Einflussgrößen sind hier als solche Größen definiert, die eine Abweichung der Videoanalyse von der Referenzmessung zur Folge haben können (siehe Abbildung 5-1 rechts). Abbildung 5-1 zeigt dazu die in diesem Kapitel fokussierten Haupteinflussgrößen Maschine, Methode und Messung sowie mögliche zugehörige Einflussgrößen. Die in Abbildung 5-1 fett dargestellten untersuchten Einflussgrößen werden im Folgenden beschrieben.

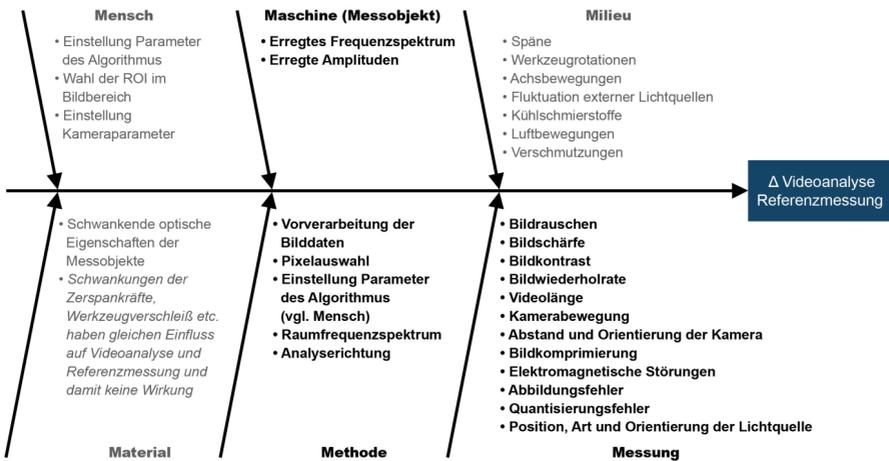


Abbildung 5-1 Bei der Untersuchung allgemeiner Einflussgrößen fokussierte Hauptgruppen und zugeordnete mögliche Einflüsse

5.1 Vorgehensweise

Die Analyse von Videodaten zur Rekonstruktion kleiner Bewegungen kann zahlreichen unterschiedlichen Störfaktoren unterliegen. Ungewollte Kamerabewegungen oder Bildrauschen sind nur zwei naheliegende Beispiele für mögliche Störfaktoren, welche die Analysequalität beeinflussen können. Zur Untersuchung von Einflussgrößen der

Videoanalyse zur Schwingungsanalyse werden daher in einem fraktionellen faktoriellen Versuchsplan zunächst systematisch mögliche Einflussfaktoren, die unabhängig von der Werkzeugmaschinenanwendung untersucht werden können (vgl. Maschine/Messobjekt, Methode und Messung in Abbildung 5-1), fokussiert und hinsichtlich ihrer Bedeutung für den späteren Einsatz in Werkzeugmaschinen bewertet.

Hierfür werden analog zu (Diamond, Heyns & Oberholster 2017) zunächst kleine, Bewegungen mit verschiedenen Amplituden und Frequenzen durch einen Piezoaktor erzeugt und dieser Piezoaktor mit einer Hochgeschwindigkeitskamera unter verschiedenen Aufnahmebedingungen und mit unterschiedlichen eingestellten Einflussgrößen gefilmt. Hintergrund des Einsatzes des Piezoaktors ist, dass so losgelöst von anderen möglichen Einflussgrößen (siehe insb. Milieu in Abbildung 5-1) reproduzierbare Schwingungen eingestellt und untersucht werden können. Der Piezoaktor wird über eine USB-Messkarte vom Typ Data Translation 9834, die einen Piezoverstärker ansteuert, sinusförmig mit unterschiedlichen Frequenzen und Amplituden angeregt. Die Auswertung eines Dehnmessstreifens im Piezoaktor ermöglicht die Validierung der eingestellten Frequenzen und Amplituden des Piezoaktors.

Der Piezoaktor wird vom genutzten LED-Scheinwerfer Typ WASP 100-C vor hellem Hintergrund beleuchtet und mit der Hochgeschwindigkeitskamera vom Typ Krontech Chronos 1.4 gefilmt. Abbildung 5-2 zeigt den Aufbau der durchgeführten Vorversuche zur Bewertung der Einflussfaktoren.

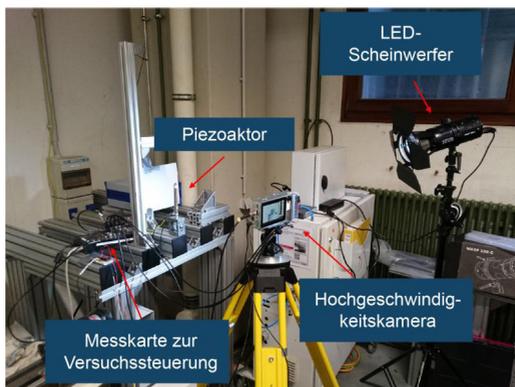


Abbildung 5-2: Messaufbau zur Evaluierung von allgemeinen Einflussgrößen bei der Videoaufnahme und Datenauswertung

Neben den naheliegenden Faktoren Schwingungsfrequenz und Amplitude des Piezoaktors werden weitere mögliche Einflussgrößen untersucht. Hierfür werden zunächst entsprechend der Ishikawa-Methode (Syska 2006) mögliche Einflussgrößen gesammelt (vgl. Abbildung 5-1) und anschließend ihr Einfluss in Vorversuchen untersucht (A_Kleinert 2017; A_Parth 2018). Hieraus ergeben sich die näher zu untersuchenden Einflussgrößen:

- Schwingungsamplitude (relativ zur Pixelgröße)
- Schwingungsfrequenz
- Bildwiederholrate
- Aufnahmelänge / Anzahl Frames
- Belichtungsdauer einzelner Frames
- Abstand von Kamera und Messobjekt
- Orientierung der Bewegungsrichtung relativ zur analysierten Richtung
- Vibrationen des Kamerasystems
- Bildkontrast
- Bildschärfe
- Bildrauschen
- ROI-Auswahl¹¹

Diese Einflussgrößen werden sowohl durch Videoaufnahmen unter veränderten Randbedingungen als auch durch nachträgliche synthetische Veränderung der Videodaten, etwa das Hinzufügen von synthetischem Bildrauschen, eingestellt (vgl. Abbildung 5-1).

Aufgrund der hohen Anzahl von Faktoren werden zwei Stufen je Faktor mithilfe eines Screening-Versuchsplans (fraktioneller faktorieller Versuchsplan) untersucht. Dazu werden die Eingangsgrößen und Aufnahmeparameter variiert, wobei die Faktorstufen in Vorversuchen und orientiert an realen Aufnahmebedingungen ermittelt wurden. Die Videodaten werden dabei auf Basis des Phase-Based Video Motion Processing Ansatzes nach (Wadhwa et al. 2013) analysiert. Hierfür wird das Frequenzspektrum der sinusförmig bewegenden Oberkante des Piezoaktors extrahiert und anhand des Signal-Rausch-Abstandes des extrahierten Videosignals bewertet. Die Ergebnisse des so durchgeführten Versuchsplans dienen anschließend als Grundlage für die

¹¹ Gesonderte Untersuchung in Kapitel 5.3

Vorverarbeitung und Filterung von Videodaten zur Schwingungsanalyse in Werkzeugmaschinen und damit für die Übertragung in die Produktionsanwendung. (A_Parth 2018)

Neben der Durchführung von Versuchen mit realen Videodaten eines schwingenden Piezoaktors werden neben dem durchgeführten Screening-Versuchsplan weitere Versuche, die mit dem physischen Versuchsaufbau nicht umgesetzt werden können, mit synthetisch erstellten Videodaten durchgeführt. Hierzu werden in der Matlab-Softwareumgebung Videos von einfachen, sich bewegenden Objekten erstellt. Die Analyse der so erstellten Videos erlaubt es unter Ausschluss von Störeinflüssen Bewegungen zu simulieren, die mit dem Piezoaktor nicht abgebildet werden können, beispielsweise lineare Bewegungen mit großen Amplituden. Abbildung 5-3 stellt beispielhaft Videoframes eines synthetisch erzeugten Videos dar, in dem sich die Kante eines schwarzen Objekts mit konstanter Geschwindigkeit im Bild von links nach rechts bewegt. (A_Flohr 2019)

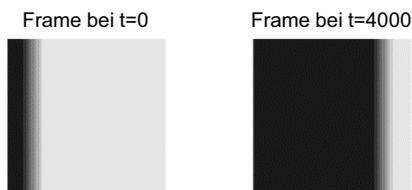


Abbildung 5-3: Videoframes eines synthetisch erzeugten Videos nach (A_Flohr 2019)

5.2 Allgemeine Einflussgrößen bei der Videoaufnahme

Zur Evaluierung der für die phasenbasierte Videoanalyse zu bevorzugenden Aufnahmeparameter werden zunächst an dem beschriebenen Versuchsstand mögliche Einflussgrößen eingestellt und ihre Wirkungen auf das Signal-Rausch-Verhältnis¹² bei der Analyse des Frequenzspektrums untersucht.

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben wird hierfür ein sinusförmig mit festgelegter Frequenz schwingender Piezoaktor mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt. Im folgenden

¹² In den durchgeführten Versuchsreihen findet das sogenannte SINAD (Signal-to-Interference Ratio Including Noise and Distortion) Anwendung, bei dem Oberfrequenzen der Grundfrequenz mit zum Rauschen gezählt werden

Kapitel werden die untersuchten Faktoren und Ergebnisse zusammenfassend beschrieben.

Die untersuchten Faktorstufen werden in folgender Tabelle 5-1 dargestellt, vgl. (A_Parth 2018). Abbildung 5-4 zeigt beispielhaft Videoframes des Piezoaktors aus den Versuchsreihen mit unterschiedlichen Aufnahmeparametern und Störfaktoren.

Tabelle 5-1 Im Versuchsplan untersuchte Faktoren und Faktorstufen nach (A_Parth 2018)

Faktoren	Faktorstufen
Schwingungsamplitude (relativ zur Pixelgröße)	0,1 / 1 Pixel (0,05 / 0,5Pixel) ¹³
Schwingungsfrequenz	40 / 400 Hertz
Bildwiederholrate	2,5 / 12,5-fache Schwingungsfrequenz
Aufnahmelänge (Anzahl Frames)	500 / 2000 Frames
Belichtungsdauer	0,5 / 1-fache Famedauer
Abstand von Objektiv zu Messobjekt	32cm / 47,5cm
Orientierung der Bewegungsrichtung relativ zur analysierten Richtung	0° / 45° (0°: optimale Ausrichtung)
Vibrationen des Kamerasystems (durch Shaker)	ohne Schwingung / mit Schwingung (bei 30Hz + Harmonische)
Bildkontrast	hoch / gering ¹²
Bildschärfe	scharf / unscharf ¹²
Bildrauschen	mit / ohne addiertes Rauschen ¹²

¹³ Markierte Faktoren werden zur weiteren Untersuchung der statistischen Signifikanz in einer zusätzlichen Versuchsreihe mit angepassten Faktorstufen analysiert. Die Höhe der Faktorstufen wurde empirisch ermittelt, vgl. (A_Parth 2018).

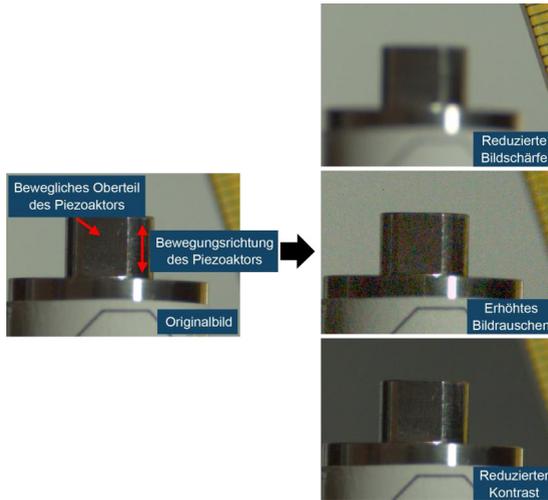


Abbildung 5-4: Videoframes mit Piezoaktor zur Evaluierung unterschiedlicher Aufnahmeparameter und Eingangsgrößen nach (A_Parth 2018)

Die ermittelten Effekte sind von den empirisch gewählten Faktorstufen abhängig, weshalb ein Vergleich der untersuchten Einflussgrößen untereinander nur begrenzte Aussagekraft hat. Im Folgenden wird daher zum einen beschrieben, ob für die jeweiligen Faktoren statistische Signifikanz gezeigt werden kann. Zum anderen wird der Einfluss der untersuchten Faktoren qualitativ erläutert.

In den Versuchsreihen zeigt sich für die Faktoren Pixelhub, Videolänge, Bewegungsrichtung, Bildschärfe und Kamerabewegung ein signifikanter Einfluss (Statistisch signifikant bezogen auf Signifikanzniveau von $p=0,05$). Verringerter Bildkontrast und höheres Pixelrauschen zeigen einen Einfluss, der im Versuchsaufbau jedoch keinen entsprechenden Signifikanzwert erreicht. Die analysierte Schwingungsfrequenz zeigt einen nur geringen Einfluss (vgl. Einflussgrößen in Abbildung 5-1). Die Wirkung der in den Versuchen untersuchten Einflussgrößen wird im Folgenden zusammenfassend erläutert.

- Der Pixelhub, also das Verhältnis von Schwingungsamplitude zu Pixel, hat wie erwartet einen starken Effekt auf das Analyseergebnis. So können Schwingungen mit großer Amplitude besser als solche mit kleiner Amplitude pro Pixel erkannt werden.

- Eine große Videolänge wirkt sich positiv auf das Analyseergebnis aus, was auf die verbesserte Filterung von Rauschen beim mehr Frames einer gleichen Schwingung zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 2.2.4). So können mit mehr Abtastwerten eine bessere Filterung des unkorrelierten Rauschens und entsprechend ein verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis erzielt werden.
- Ein Einfluss der Bewegungsrichtung des analysierten Piezoaktors beziehungsweise der Orientierung der analysierten Kante in der analysierten ROI kann gezeigt werden. So haben solche Auswertungen ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis, in denen die Orientierung der angewendeten Filter (vgl. Kapitel 2.2.3) für die analysierte Kante und Bewegungsrichtung geeignet ist. Das heißt, dass der Filter so orientiert ist, dass die zu analysierende Kante durch den Filter gut erfasst wird.
- Eine hohe Bildschärfe des aufgenommenen Videoframe wirkt sich in der Versuchsreihe positiv auf das Analyseergebnis aus.
- Zusätzliche Kamerabewegungen, in der Versuchsreihe verursacht durch einen neben dem Kamerastativ auf dem Boden befestigten Shaker, haben wie erwartet einen negativen Einfluss auf das Analyseergebnis. Im Versuchsaufbau ist der Einfluss davon abhängig, dass angeregte Frequenzen im von der Bildwiederholrate abgetasteten Bereich liegen.
- Die Ergebnisse mit verringertem Kontrast bestätigen einen negativen Einfluss auf das Signal-Rausch-Verhältnis (vgl. auch (Wadhwa et al. 2017)), auch wenn der Einfluss im gewählten Versuchsaufbau nicht statistisch signifikant ist. Der wichtige Zusammenhang zwischen Bildeigenschaften und Kontrast beziehungsweise Phaseninformation wird in Kapitel 2.2.4 näher beschrieben.
- Synthetisch auf die Videoframes addiertes Gaußsches Rauschen hat im Versuchsaufbau einen vergleichsweise geringen Einfluss auf das Signal-Rausch-Verhältnis, was mit der Mittelung der Phasenwinkel über die Vielzahl von Pixeln in der ROI sowie die vergleichsweise hohe Unempfindlichkeit des phasenbasierten Ansatzes gegenüber Rauschen (vgl. (Wadhwa et al. 2013)) erklärt werden kann.
- Der Einfluss der zu analysierenden Frequenz des Aktors ist bei gleicher Schwingungsamplitude und entsprechend angepasster Bildwiederholrate nur gering. Ausreichende Schwingungsamplituden bei höheren Frequenzen vorausgesetzt

wird daher beim entsprechender Bildwiederholrate von einer Anwendbarkeit des Ansatzes auch für höhere Frequenzbereiche ausgegangen. (A_Parth 2018)

In einer weiteren Versuchsreihe zur minimalen analysierbaren Amplitude zeigt sich darüber hinaus, dass im Versuchsaufbau unter optimalen Aufnahmebedingungen Schwingungsamplituden bis 0,03 Pixel ($\sim 1,92 \mu\text{m}$ im Versuchsaufbau) eine höhere Leistung im Frequenzbereich als andere (Stör-)Signalanteile haben und damit identifiziert werden können. Bis zu 0,0025 Pixel ($\sim 0,16 \mu\text{m}$) Schwingungsamplitude kann die Schwingungsfrequenz unter idealen Bedingungen im Spektrum erkannt werden, sie hat jedoch eine geringere Leistung als vorhandene Störfrequenzen. (A_Parth 2018)

Aus der Untersuchung der allgemeinen Einflussgrößen wird zum Einen abgeleitet, welche Aufnahmeparameter für die videobasierte Schwingungsanalyse von besonderer Bedeutung sind und damit besondere Aufmerksamkeit bei der Übertragung auf die Anwendung in einer Werkzeugmaschine erfordern (vgl. Kapitel 5.4). Darüber hinaus ist aus den minimal analysierten Amplituden zu schließen, dass der gewählte Ansatz für die in Werkzeugmaschinenanwendung auftretenden Schwingungsamplituden prinzipiell geeignet ist.

5.3 Einfluss der Pixel-Auswahl auf die Datenanalyse

So wie klassische Beschleunigungssensoren an der zu analysierenden Stelle eines Objekts angebracht werden müssen, ist bei der Nutzung von Videodaten eine Region of Interest zu bestimmen, welche die in den Videodaten analysierten Pixel bestimmt. Im Vergleich zur Positionierung eines Beschleunigungssensors ist bei der Auswahl von Pixeln jedoch nicht nur von Bedeutung, welche Stelle des Objekts analysiert werden soll, sondern auch, ob eine ausreichende Signalqualität erreicht werden kann. Abbildung 5-5 zeigt beispielhaft einen untersuchten Videoframe mit dem Ausschnitt eines Werkstücks. Auch kleine Verschiebungen der ROI können zu abweichenden Analyseergebnissen führen.

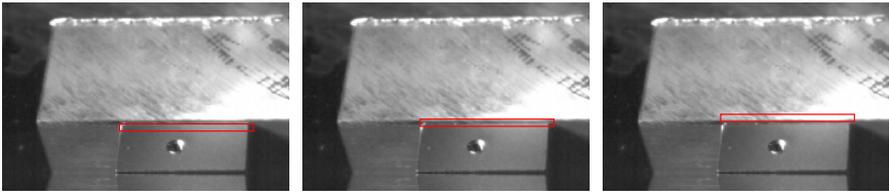


Abbildung 5-5 Darstellung eines Videoframes mit vertikal verschobenen ROI-Positionen (rot markiert)

Im Folgenden wird daher zunächst der Zusammenhang zwischen Bilddaten und Phaseninformation sowie mögliche Störeinflüsse beschrieben, welche große Bedeutung für die Pixelauswahl haben. Anschließend werden die Ergebnisse zur Auswahl von Pixeln anhand von realen Videodaten dargestellt.

5.3.1 Zusammenhang zwischen Amplitude, Phase und Objektbewegung

Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben können Bilder als zweidimensionale räumliche Signale aufgefasst werden. Ebenso wie bei der Fourier-Transformation von zeitlich veränderlichen Signalen ist eine Zerlegung in Basisfunktionen (zum Beispiel Sinusfunktionen) mit unterschiedlichen Frequenzen, Amplituden und Phasen möglich. Die Phaseninformation korrespondiert bei Bilddaten mit den Positionen von Objekten beziehungsweise deren Verlagerungen über mehrere Bilder hinweg. Diese Phaseninformation kann jedoch nicht nur von der Objektbewegung beeinflusst werden, auch Störeinflüsse, die wiederum von der Amplitude abhängen, können Einfluss haben. Im Folgenden wird daher, vorbereitend auf die Ergebnisse zur Auswahl geeigneter ROI in Kapitel 5.3.2, der Zusammenhang zwischen Phase und Amplitude anhand von synthetischen Videodaten näher untersucht.

Zielsetzung für eine hohe Qualität der phasenbasierten Analyse ist es, dass die analysierte Phaseninformation ein möglichst lineares Verhalten bezogen auf die analysierte Objektbewegung aufweist. Nichtlinearitäten oder Rauschen erschweren dagegen die Analyse der Phaseninformation im Zeit- oder Frequenzbereich. Abbildung 5-6 stellt hierzu anhand der Analyse eines synthetischen, mit Gaußschem Rauschen überlagerten Videos den Zusammenhang von Amplitude, Phase und einer linearen Objektbewegung dar. Abbildung 5-7 beschreibt anhand von zwei Videoframes das genutzte syn-

thetische Video, in dem sich ein dunkler Körper mit weich verlaufender Kante mit konstanter Geschwindigkeit im Bild von links nach rechts durch eine mittige ROI bewegt. Anhand der Intensität kann die Position der Kante relativ zur ROI abgelesen werden.

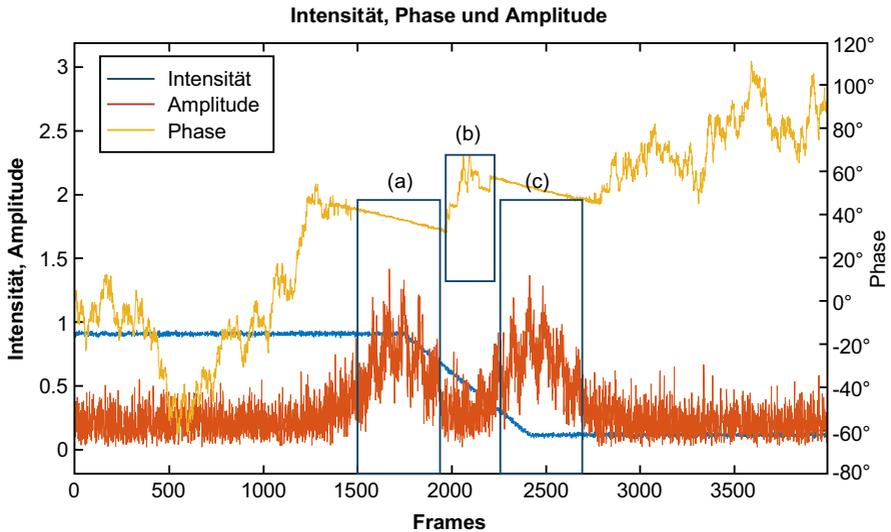


Abbildung 5-6: Einfluss der Amplitude auf den linearen Zusammenhang zwischen Objektverlagerung und Phase – insbesondere bei niedrigen Amplituden hat Rauschen starken Einfluss auf die Phaseninformation nach (A_Flohr 2019)

Es zeigt sich dort ein linearer Zusammenhang zwischen Bewegung und Phase, wo die Amplitude hoch ist (siehe Abbildung 5-6 a) und c))¹⁴, vgl. (Wadhwa et al. 2017; Wadhwa et al. 2013) und Kapitel 2.2.4. Bei kleiner Amplitude, wenn also viel weißer Hintergrund oder das schwarze Objekt, jedoch keine deutlichen Übergänge erfasst werden, hat das Bildrauschen dagegen einen starken Einfluss auf die Phaseninformation. Durch die große Bewegung kommt es zudem zu Phasensprüngen, am deutlichsten erkennbar zwischen den beiden linearen Bereichen der Phase bei 2000 Frames (siehe Abbildung 5-6 b)). Diese Phasensprünge treten auf, wenn der maximale Phasenwinkel (zwischen $-\pi$ bis $+\pi$) nicht zur Abbildung der Verlagerung ausreicht. Bei welcher Verlagerung ein

¹⁴ Auch Bildbereiche, die nicht von der ROI abgedeckt werden, können sich auf Amplitude und Phase auswirken. Grund ist, dass die Berechnung von Amplitude und Phase für die jeweiligen Ortsfrequenzen mehr Pixel erfordert als die ROI bietet.

Phasensprung auftritt ist von der jeweiligen Pyramidenebene mit entsprechendem Ortsfrequenzbereich abhängig. So können Ebenen mit tieferen Frequenzen beziehungsweise längeren Wellenlängen größere Verlagerungen abbilden¹⁵. (A_Flohr 2019)



Abbildung 5-7: Bildframes aus synthetisch erzeugtem Video zur Evaluierung der Abhängigkeit von Phase und Amplitude: Kante des dunklen Körpers bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit durch die mittig positionierte ROI (gelb gekennzeichnet) nach (A_Flohr 2019)

Durch das nur eingeschränkt lineare Verhalten der Phase zur Objektbewegung ist einerseits zu schlussfolgern, dass der Einsatz des Verfahrens zur quantitativen Messung von Bewegungsamplituden, deren prinzipielle Machbarkeit von (Wadhwa et al. 2017) gezeigt wurde, vorrangig dann möglich ist, wenn kleine Schwingungsamplituden erfasst werden und eine exakte Positionierung der ROI relativ zum bewegenden Körper möglich ist. Sofern die ROI nicht in einem Bereich liegt, in dem ein linearer Zusammenhang zwischen Objektverlagerung und Phase vorliegt, ist die Quantifizierung von Bewegungsamplituden nicht direkt möglich. Gleichzeitig wird bestätigt, dass die ROI nach Möglichkeit einen Bereich mit möglichst hoher lokaler Amplitude abdecken soll (vgl. Kapitel 2.2.4). Hohe Amplituden werden insbesondere dort erreicht, wo (im jeweiligen Ortsfrequenzbereich) inhomogene Bereiche, wie Kanten und vergleichbare kontrastreiche Objektstrukturen vorhanden sind. Amplitudengewichtete Filter (Wadhwa et al. 2013; Wadhwa et al. 2016) oder andere Bildstrukturen verstärkende Filter, wie bilaterale Filter (A_Flohr 2019), stellen Möglichkeiten dar, den Einfluss von Bildbereichen mit niedrigen Amplituden abzumildern.

¹⁵ Die Anzahl der erstellten Pyramidenebenen wird beim angewandten Algorithmus automatisch anhand der Videoauflösung bestimmt. Entsprechend der angewandten Pyramidensteigerung und Videoauflösung enthalten die im Rahmen der Arbeit untersuchten Videos acht Pyramidenebenen.

5.3.2 Einfluss der Region of Interest auf die Bewegungsanalyse

Im Folgenden werden anschließend an die Betrachtungen mit synthetischen Videodaten die Ergebnisse der Untersuchungen zur Auswahl von Pixeln beziehungsweise ROIs anhand von realen Videodaten beschrieben. Hierfür werden Versuche mit dem beschriebenen Piezoaktor sowie in der Werkzeugmaschinen-Anwendung (vgl. Kapitel 6) durchgeführt. Die Ergebnisse über den Einfluss der ROI-Position werden im Folgenden anhand eines mit einem Schafffräser angeregten Werkstücks dargestellt.

Wie im vorangegangenen Kapitel und in Kapitel 2.2.4 dargelegt, kann bei der Analyse der Phaseninformation das Vorhandensein von Regionen mit großen Amplituden, etwa von Kanten und anderen kontrastreichen Strukturen, in der Region of Interest von großer Bedeutung sein.

Abbildung 5-8 a) zeigt hierzu das Referenzspektrum des Beschleunigungssensors am untersuchten Werkstück. Deutlich zeigen sich die Messereingriffsfrequenz bei 424,7 Hz, sowie die erste Harmonische bei 849,3 Hz. Die Spektren der zugehörigen Phaseninformation für unterschiedliche ROIs bestätigen die starke Abhängigkeit des Analyseergebnisses von der Auswahl der auszuwertenden Pixel. So zeigen Abbildung 5-8 b)-f), die Analyseergebnisse derselben Videoframes mit jeweils vertikal um 2 Pixel verschobener ROI (angewandte ROI in Abbildung 5-8 jeweils rechts dargestellt). Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit des Analyseergebnisses von der ausgewählten ROI, wobei die höchsten Peaks und das geringste Rauschen wie erwartet mit ROIs erreicht werden, die eine Objektkante mit deutlichem Kontrast abdecken (Abbildung 5-8 d) und e)). In ROIs mit homogenen Bereich über und unterhalb der Kante zeigt sich deutlich höheres Rauschen und schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis (insbesondere Abbildung 5-8 b) und f)).

(a) Spektrum Referenz-Sensor, Zahneingriffsfrequenz 424.7 Hz, Vorschub 2000 mm/min

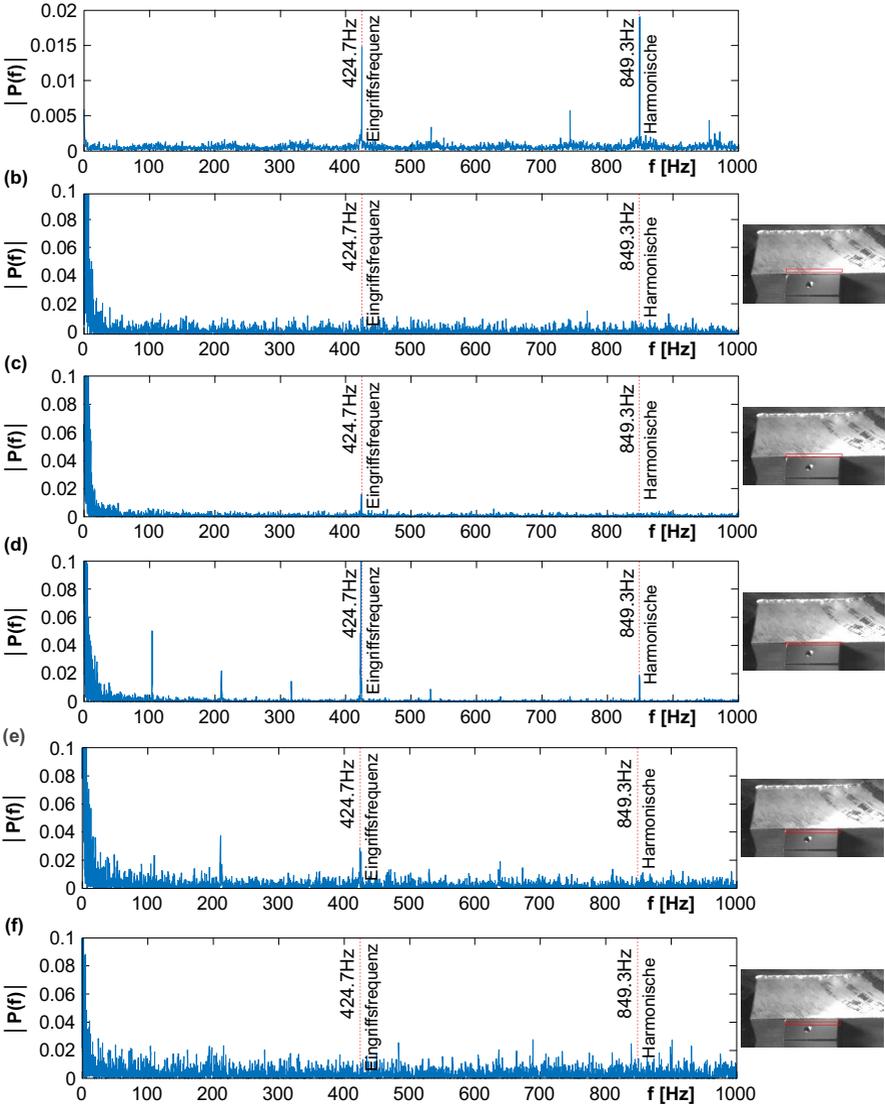


Abbildung 5-8: Spektrum des Referenz-Beschleunigungssensors (oben) und Spektren der Phaseninformation für vertikal verschobene ROIs (jeweils rechts rot markiert)

Weitere Versuche mit variiert Höhe der ROI normal zur Kantenrichtung zeigen, dass die Relevanz der ROI-Positionierung durch eine größere ROI abgeschwächt werden kann, da Pixel mit geeigneter Phaseninformation mit höherer Wahrscheinlichkeit abgedeckt werden. Gleichzeitig steigt jedoch der Einfluss von Pixeln mit stärker verrauschter Phase. Das Signal-Rausch-Verhältnis sinkt somit tendenziell.

Neben der Analyse einer normal zur analysierten Objektkante vergrößerten ROI wird der Einfluss der Analyse unterschiedlicher räumlicher Frequenzen untersucht. Da zur Berechnung tiefer räumlicher Frequenzen (in der gewählten Vorgehensweise durch höhere Pyramidenebenen repräsentiert) nicht nur die ROI, sondern je nach Raumfrequenzbereich auch benachbarte Pixel herangezogen werden, wird die ROI hierdurch implizit vergrößert, sodass auch umliegende Pixel Einfluss auf die Berechnung haben. Abbildung 5-9 verdeutlicht diesen Effekt anhand der Analyse der ersten und zweiten Pyramidenebene für eine außerhalb der Werkstückkante positionierte ROI.

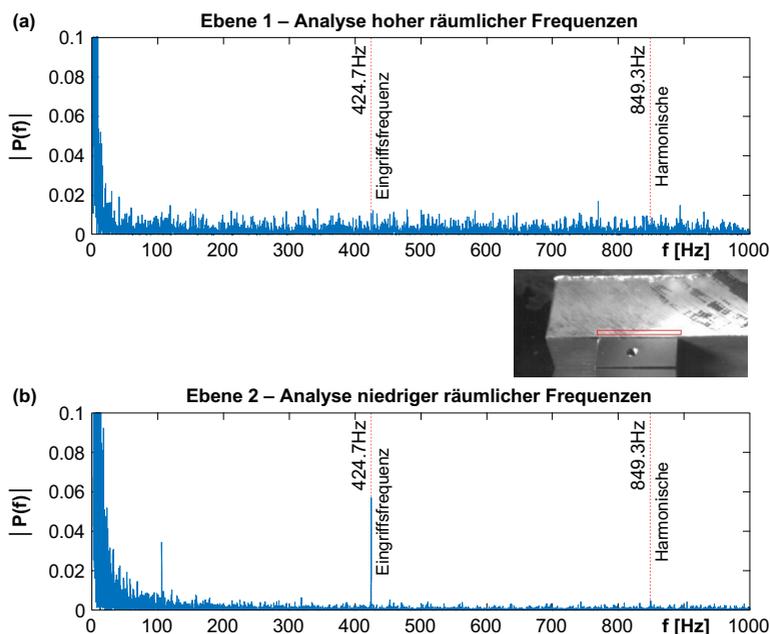


Abbildung 5-9: Spektrum der Phasenvariation für niedrige und hohe räumliche Frequenzen bei gleicher ROI außerhalb der Werkstückkante – gutes Signal-Rausch-Verhältnis bei niedrigen räumlichen Frequenzen trotz ungünstiger ROI-Position

So ist bei höheren Raumfrequenzen Rauschen stark ausgeprägt, Peaks bei den erwarteten Frequenzen sind nicht zu erkennen (Abbildung 5-9 a)). Bei niedrigeren räumlichen Frequenzen wird dagegen trotz ungünstiger Wahl der ROI außerhalb der Werkstückkante ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis erreicht (Abbildung 5-9 b)). Mögliche Nachteile, die mit der Analyse niedriger räumlicher Frequenzen einhergehen, werden in Kapitel 6.3 näher beschrieben.

Aus den Untersuchungen zum Einfluss der ROI-Positionierung ergibt sich die Erkenntnis, dass im Folgenden eine Positionierung der ROI anzustreben ist, die einen Bereich mit möglichst hoher Amplitude, das heißt ausgeprägte Kanten und Objektstrukturen in der Werkzeugmaschine abdeckt. Die gewählte Größe der ROI wird empirisch für die genutzten Datensätze ermittelt, um ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis bei gleichzeitig verringerter Sensitivität gegenüber der ROI-Position zu erreichen. Ein darüber hinausgehendes Verschieben der ROI nach Trial-and-Error könnte das Signal-Rausch-Verhältnis zwar weiter verbessern, vgl. (Diamond, Heyns & Oberholster 2017), da unter realen Anwendungsbedingungen ohne Referenzmessung jedoch nicht bekannt ist, ob die veränderte ROI die Objektbewegung tatsächlich besser abbildet, wird auf ein Verschieben mit dem Ziel, eine bekannte Referenzmessung möglichst exakt abzubilden, verzichtet.

5.4 Vermeidung von Störeinflüssen in der Werkzeugmaschinenanwendung

Im Folgenden werden die in Kapitel 5.1 und 5.3 beschriebenen Ergebnisse zur Aufnahme und Auswertung von Videodaten zusammengefasst und die wichtigsten Faktoren hinsichtlich der Übertragung auf die Werkzeugmaschinenanwendung bewertet. Tabelle 5-2 fasst die Einflussgrößen sowie Lösungsansätze zur Übertragung auf die Werkzeugmaschinenanwendung zusammen.

Die Schwingungsamplitude des zu analysierenden Objekts hat wie in Kapitel 5.1 dargestellt einen starken Einfluss auf das Ergebnis der videobasierten Analyse (Tabelle 5-2 a)). Der Versuchsaufbau bei der Aufnahme innerhalb der Werkzeugmaschine ist entsprechend so zu wählen, dass die auftretenden Schwingungsamplituden mit möglichst hoher Auflösung abgebildet werden. Hieraus ergibt sich - unter der Prämisse, dass der zu analysierende Körper vollständig (und im Fall von zu analysierenden beweglichen Objekten über den gesamten Verfahrensweg) abgebildet werden soll - ein mög-

lichst kurzer Abstand zwischen Kamera und Objekt und eine dabei möglichst lange Objektivbrennweite. Der kurze Abstand zwischen Kamera und Objekt ist auch aufgrund des Einflusses unerwünschter Kamerabewegungen zu bevorzugen (vgl. Kapitel 4.2 und (Xu & Brownjohn 2018)).

Wenn die Zugänglichkeit der Werkzeugmaschine eine solche Aufstellung erlaubt, wird also eine Kamerabefestigung bevorzugt, die einen möglichst kurzen Abstand zum zu analysierenden Bauteil der Werkzeugmaschine hat, andererseits gegenüber Vibrationen der Werkzeugmaschine möglichst unempfindlich ist (vgl. steife, dämpfende Aufstellung in Kapitel 4.2), (Tabelle 5-2 b)). Andernfalls wäre, zulasten des Betrachtungsabstands und mit damit einhergehender größerer Anfälligkeit gegenüber Kamerabewegungen, eine Aufstellung außerhalb der Werkzeugmaschine und ein Objektiv mit längerer Brennweite zu wählen.

Tabelle 5-2: Zusammenfassende Bewertung von Einflussgrößen zur Übertragung auf Werkzeugmaschinenanwendungen (grün: leichte Umsetzung, rot: Herausforderung bei Umsetzung)

Einflussgrößen	Umsetzbarkeit f. WZM-Anwendung	Lösungsansatz für WZM-Anwendung	
Amplitude pro Pixel		<ul style="list-style-type: none"> • Geeignete Abstimmung von Objektiv und Kameraabstand zur Erzielung maximaler Amplitude pro Pixel 	a)
Umgebungs-Vibrationen		<ul style="list-style-type: none"> • Steife, schwingungsdämpfende und entkoppelte Kameraaufstellung 	b)
Videolänge		<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung maximal möglicher Videolänge für stationäre Bearbeitungsparameter 	c)
Bildkontrast		<ul style="list-style-type: none"> • Geeignete Auswahl von ROI, Kamera- und Beleuchtungsparametern 	d)
ROI-Auswahl		<ul style="list-style-type: none"> • Manuelle Auswahl von geeignet orientierter ROI mit gutem Kontrast • Präzise Positionierung auf einer Kante • Empirische Ermittlung der ROI-Größe 	e)
Bildrauschen		<ul style="list-style-type: none"> • Helle Ausleuchtung der Szene • Wahl ausreichend großer ROI in geeignetem Bildbereich • Auswahl geeigneter Filter im Ortsfrequenzbereich 	f)
Auswahl Filter im Ortsfrequenzbereich		<ul style="list-style-type: none"> • Empirische Ermittlung notwendig 	g)
Bildschärfe		<ul style="list-style-type: none"> • Exakte Fokussierung des Objektivs • Nutzung eines Objektivs mit kurzer Brennweite • Schließen der Objektivblende falls nötig 	h)
Spezielle Einflüsse von Werkzeugmaschinenanwendungen		<ul style="list-style-type: none"> • Weitere Untersuchungen notwendig → siehe Kapitel 6 und 6.6 	i)

Der Einfluss der Aufnahmedauer bedeutet für die Werkzeugmaschinenanwendung, dass längere Videoaufnahmen mit als stationär anzunehmenden Betriebsbedingungen bevorzugt werden (Tabelle 5-2 c)). In welchem Zeitraum die Betriebsbedingungen der Werkzeugmaschine beziehungsweise die zu analysierende Schwingung des Bauteils oder Werkstücks als stationär angenommen werden können, hängt insbesondere vom Bearbeitungsprogramm und Werkstück ab.

Aufgrund des Einflusses der ROI auf das Signal-Rausch-Verhältnis wird die ROI so ausgewählt, dass sie präzise einen Bereich mit deutlichem Kontrast und Kanten, bevorzugt normal zur erwarteten Bewegungsrichtung abdeckt, vgl. Kapitel 5.1 und 5.3, Abbildung 5-8 und Tabelle 5-2 d, e). Die ROI-Größe ist dabei aktuell noch für den jeweiligen Datensatz auf Basis von Erfahrungswerten zu ermitteln. Homogene Bereiche des Bildes und der Hintergrund des Objekts werden möglichst nicht von der ROI abgedeckt. Es kann in Bezug auf Werkzeugmaschinen geschlussfolgert werden, dass geeignete Bereiche Kanten von Maschinenbauteilen oder Werkstücken sein können, die durch geeignete Beleuchtung hohen Kontrast erzielen (Tabelle 5-2 e)). Die Beleuchtung der ROI wird so eingestellt, dass in der ausgewählten ROI ein hoher Kontrast und gleichzeitig eine ausreichende Helligkeit für die kurzen Belichtungszeiten der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vorhanden sind. Ausreichende Helligkeit wird zudem für die Einstellung von Kameraparametern, die mit niedrigerem Pixelrauschen einhergehen, angestrebt (Tabelle 5-2 f)). Der Auswahl und Positionierung der Beleuchtung kommt damit eine wichtige Bedeutung zu, die jedoch insbesondere bei den beengten Platzverhältnissen in einer Werkzeugmaschine eine Herausforderung darstellen kann.

Der zu analysierende Ortsfrequenzbereich beziehungsweise die zu analysierende Pyramidenebene zur Erzielung eines ausreichenden Signal-Rausch-Verhältnisses wurde durch (A_Flohr 2019) und (Diamond, Heyns & Oberholster 2017) untersucht. Die unterschiedlichen Ortsfrequenzbereiche können eine unterschiedliche räumliche Reichweite besitzen und damit unterschiedlich große Schwingungsamplituden erfassen. Insbesondere wenn die Größenordnung von Schwingungsamplituden im Verhältnis zu den Aufnahmeparametern zunächst nicht bekannt ist, wie bei experimentellen Aufnahmen von Schwingungen in Werkzeugmaschinen, können daher die auszuwertenden Pyramidenebenen nicht a priori bestimmt werden. Da bisher keine Ansätze zur systematischen Auswahl der anzuwendenden Filter im Ortsfrequenzbereich bekannt sind, sind sie daher aktuell auf Basis von Erfahrungswerten festzulegen (Tabelle 5-2 g)).

Das Erzielen ausreichend hoher Bildschärfe bei gleichzeitig hoher Helligkeit kann insbesondere bei der Analyse von sich bewegenden Maschinenteilen oder wenn bei Aufnahme des Videos die ROI noch nicht feststeht, eine Herausforderung darstellen. Grund ist, dass die Fokusslage nicht exakt bestimmt werden kann (Tabelle 5-2 h)). Zur Erzielung größerer Schärfentiefe können Objektive mit kurzer Brennweite oder kleine Blendenöffnungen gewählt werden. Insbesondere kleine Blendenöffnungen reduzieren jedoch die Bildhelligkeit. Folglich wird je nach zu analysierendem Objekt innerhalb der Maschine ein Kompromiss angestrebt.

In den folgenden Kapiteln werden die beschriebenen Erkenntnisse bei der Aufnahme und Auswertung von Videodaten aus Werkzeugmaschinen angewendet und die weiteren, in spanenden Werkzeugmaschinen auftretenden Einflussgrößen untersucht (vgl. Haupteinflussgruppe „Milieu“ in Abbildung 5-1 und Tabelle 5-2 i)).

6 Werkzeugmaschinenspezifische Einflussgrößen und Maßnahmen

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Ergebnisse zeigen, welche Aufnahmeparameter angestrebt werden und welche Eingangsgrößen bei der Aufnahme und Auswertung von Videodaten zu berücksichtigen sind. Neben den bereits untersuchten Einflussgrößen (Bereiche Messung, Methode und Maschine / Messobjekt in Abbildung 6-1) können bei der Analyse von Videodaten aus zerspanenden Werkzeugmaschinen jedoch noch weitere anwendungsspezifische Einflussgrößen auftreten und gegebenenfalls eine weitere Vorverarbeitung der Videodaten erfordern. Gemäß Darstellung in Abbildung 6-1 werden diese Einflussgrößen dem für Werkzeugmaschinenanwendungen spezifischen Milieu zugeordnet. Beispiele sind Späne im Bildbereich, Fluktuationen der Beleuchtung durch veränderliche Reflektionen des Werkzeughalters oder Achsbewegungen der Werkzeugmaschine. Zur Untersuchung dieser Einflussgrößen werden Videodaten in einer Werkzeugmaschine erzeugt, untersucht und Maßnahmen entwickelt, um den Einfluss von Störfaktoren zu reduzieren. Im Folgenden werden jeweils die Vorgehensweisen und Ergebnisse dieser Vorverarbeitung und Filterung der Videodaten aus Werkzeugmaschinen erläutert. Kapitel 7 stellt dann im Anschluss die mit den entwickelten Ansätzen erzielten Resultate bei der Analyse von Daten aus Zerspanversuchen dar.

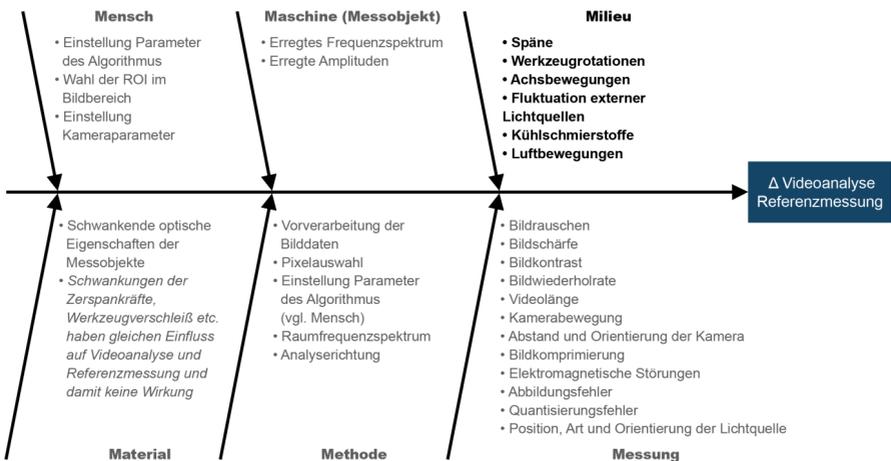


Abbildung 6-1 Mögliche werkzeugmaschinenspezifische Einflussgrößen (Milieu)

6.1 Vorgehensweise

Nach der systematischen Untersuchung von Eingangsgrößen außerhalb einer Werkzeugmaschine werden die Ergebnisse zur Erzeugung von Videodaten in Werkzeugmaschinen genutzt. Ziel ist es, durch die Erzeugung von Videodaten in einer Werkzeugmaschine weitere Störfaktoren, die in den Vorversuchen nicht eingestellt werden können, zu identifizieren, zu untersuchen und Ansätze zur Kompensation abzuleiten. Hierfür werden innerhalb eines 4-Achs-Fräsbearbeitungszentrums vom Typ Deckel DMC 60-H Fräsversuche durchgeführt und mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt. Am jeweils zu analysierenden Objekt (Werkstück und Werkzeugmaschinenspindel) werden Beschleunigungssensoren angebracht, die im Vergleich mit dem aus der Videodatenanalyse abgeleiteten Signal die Identifikation der zusätzlichen Störfaktoren ermöglichen. Datenaufnahme und Versuchssteuerung sind äquivalent zur späteren Validierung und werden in Kapitel 4 beschrieben.

Abbildung 6-2 stellt beispielhaft den Versuchsaufbau zur Generierung von Videodaten beim Planfräsen mit Relativbewegung zwischen Kamera und Spindel dar: Die Videokamera filmt im Versuchsaufbau die Werkzeugmaschinenspindel mitsamt eines auf der Spindelnase angebrachten Referenzbeschleunigungssensors. Der Vergleich der Daten des Beschleunigungssensors mit den aus dem Video abgeleiteten Daten zur dynamischen Bewegung des Beschleunigungssensors erlaubt die Untersuchung von Störfaktoren, die in der Werkzeugmaschine auftreten. Dazu wurden zunächst in Vorversuchen relevante Einflussgrößen identifiziert. Diese sind der Einfluss von Spänen im Bildbereich, der Einfluss von Werkzeugrotationen, Helligkeitsfluktuationen durch Reflektionen des rotierenden Werkzeugs und Achsbewegungen, die eine Relativbewegung zwischen Kamera und Objekt hervorrufen. Verschmutzungen im Bildbereich, Kühlschmierstoffe und auf den Bildbereich wirkende Luftbewegungen stellen weitere mögliche Einflussgrößen dar, die im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht explizit untersucht werden. So wird im Rahmen dieser Arbeit einerseits die Trockenzerspannung fokussiert. Andererseits wird davon ausgegangen, dass Luftbewegungen und Verschmutzungen einen geringen Einfluss haben, beziehungsweise sie in der Praxis nur begrenzt beeinflusst werden können.

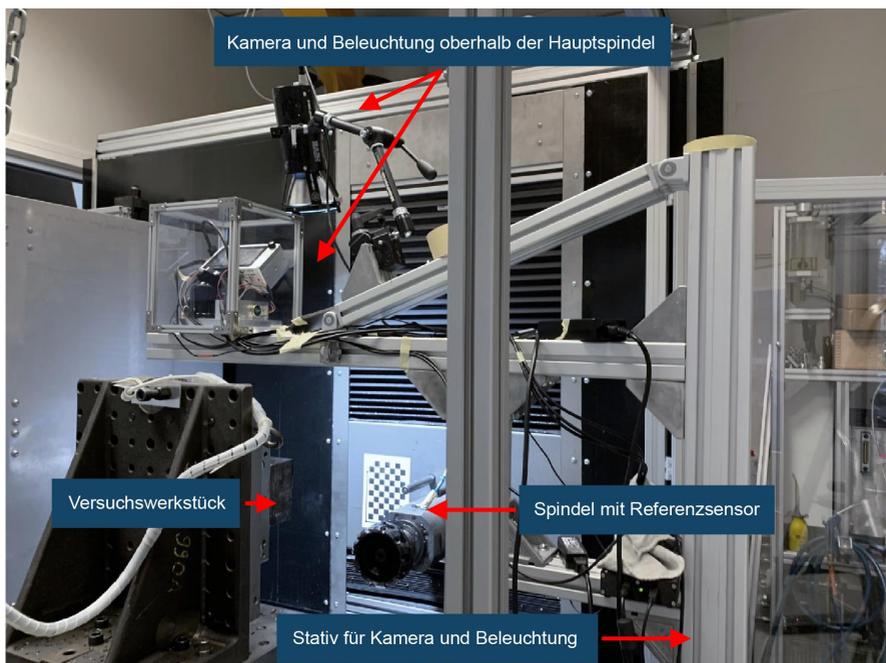


Abbildung 6-2: Versuchsaufbau zur Datengenerierung für die Filterung von Videodaten von Werkzeugmaschinenschwingungen, hier: Versuchsaufbau zur Validierung von Maschinenschwingungen mit Relativbewegungen

Die Identifikation und Bewertung der Störfaktoren erfolgt durch den Abgleich der Signalcharakteristika von Beschleunigungssensor und aus den Videodaten extrahierter Phaseninformation im Zeit- und Frequenzbereich auf Basis des Ansatzes von (Wadhwa et al. 2013). Bei der Analyse im Frequenzbereich werden die Signale zur Filterung von Rauschen mit einer Autokorrelation gefiltert (vgl. Kapitel 2.2.4). Hieraus werden Ansätze zur Filterung der Videodaten abgeleitet, die die Abweichungen zwischen Referenzsignal und Phaseninformation reduzieren.

6.2 Späne im Bildbereich

Die bei spanenden Fertigungsverfahren auftretenden, sich dynamisch bewegenden Späne können für optische Verfahren zur Bestimmung von dynamischen Bewegungen eine Herausforderung darstellen. So erzeugen spanende Fertigungsverfahren Werk-

stückkonturen durch das Abtrennen von Material eines Werkstücks mit einem geeigneten Werkzeug. Die dabei entstehenden Bearbeitungskräfte entstehen genau wie die Späne des abgetragenen Materials durch die Wechselwirkung von Werkzeug und Werkstück. Auch für den Bearbeitungsprozess kritische Schwingungen entstehen gerade aus dieser Wechselwirkung, sodass eine Schwingungsanalyse in der Nähe von Werkstück und Werkzeug häufig von Interesse ist. Der Einfluss von Spänen, welche in der Arbeit dem Milieu der videobasierten Analyse zugerechnet wird (vgl. Abbildung 6-1), wird daher im Folgenden näher untersucht und Möglichkeiten zur Kompensation dargestellt.

6.2.1 Einfluss von Spänen auf die Analyse von Werkstückschwingungen

Die Untersuchung von Videodaten in unmittelbarer Umgebung einer zerspanenden Bearbeitung bestätigt, dass Späne für die Analyse von Videodaten aus Werkzeugmaschinen eine Herausforderung darstellen können: Insbesondere wenn Werkstückschwingungen analysiert werden sollen, befinden sich ROIs häufig in unmittelbarer Nähe der Zerspanung – dort, wo die Prozesskräfte ins Werkstück eingeleitet werden. So werden Späne bei der Bearbeitung durch das Werkzeug vom Werkstück abgehoben, haben je nach Prozessparametern, Werkzeug und Werkstück unterschiedliche Größen und Formen und bewegen sich mitunter in unterschiedliche Richtungen. Damit können sich die Späne auch durch eine zur Videoanalyse gewählte ROI bewegen und dadurch Amplitude und auch Phase bei der Analyse möglicher kleiner Bewegungen beeinflussen. Abbildung 6-3 a) zeigt dazu einen Frame des während der Zerspanung aufgenommenen Videos mit rot markierter ROI. Der Frame zeigt eine Vielzahl von Spänen, ein Span bewegt sich im Frame direkt durch die ROI. Die Späne haben in den untersuchten Videodaten aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit eine deutliche Bewegungsunschärfe (siehe Abbildung 6-3 a)), die durch ihre Bewegung außerhalb der Fokusslage des Objektivs zusätzlich verstärkt wird.

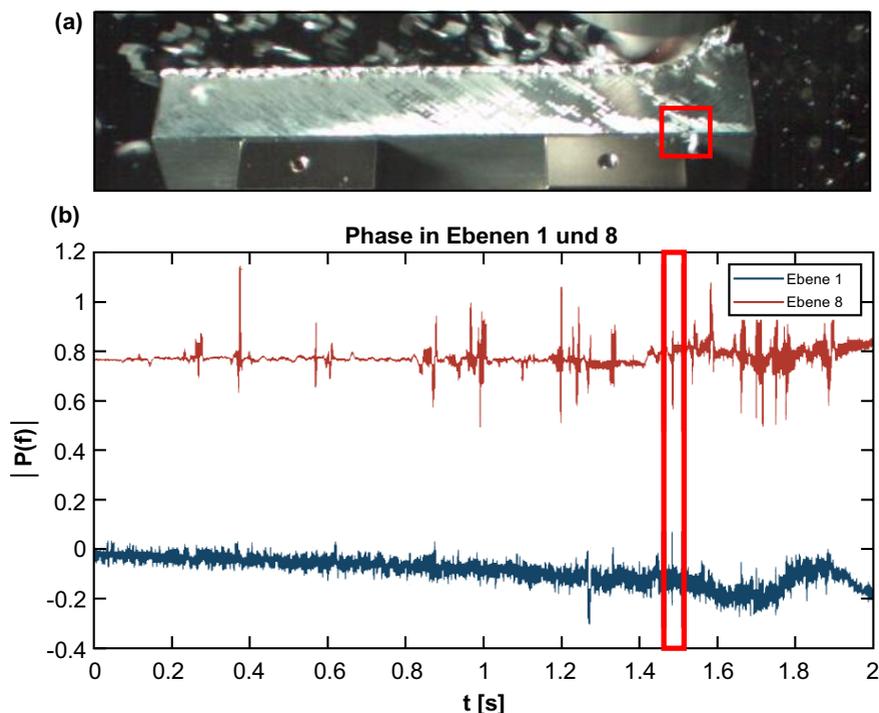


Abbildung 6-3: Während Spanflug analysierte ROI (rot in a), b) Verlauf der Phase für niedrige räumliche Frequenzen (Ebene 8) und hohe räumliche Frequenzen (Ebene 1), Zeitpunkt des Frames aus a) rot markiert

Die Analyse der entsprechenden Phaseninformation (Abbildung 6-3 b)) zeigt die zugehörige zeitliche Entwicklung der Phase vor und nach dem Frame aus a) für die unterste Pyramidenebene mit hohen räumlichen Frequenzen (Ebene 1) sowie die oberste Pyramidenebenen für niedrige Frequenzen (Ebene 8). Es zeigt sich für beide räumlichen Frequenzen eine impulsförmige Anregung (rot markiert). In niedrigen räumlichen Frequenzen zeigen sich auch vor und nach dem ausgewählten Frame deutliche Impulse, die jeweils Spänen zugeordnet werden können. Im Zeitverlauf ist eine Zunahme der Impulse zu erkennen, die auf den im Video abnehmenden Abstand des Werkzeugs zur ROI und damit eine größere Häufigkeit von durch die ROI bewegenden Spänen, zurückgeführt werden kann. Die stärkere Wirkung auf niedrige räumliche Frequenzen

kann zum einen auf die Gestalt und Abbildung der Späne im Versuchsaufbau zurückgeführt werden, andererseits ist die erforderliche räumliche Signallänge zur Berechnung niedriger Frequenzen höher. Hierdurch können weiter entfernte Späne einen Einfluss auf die Phaseninformation haben. Der Einfluss auf höhere räumliche Frequenzen fällt im Versuchsaufbau niedriger aus, Abbildung 6-3 b).

Da kurze und impulsförmige Anregungen im Frequenzbereich ein breites Spektrum anregen (Meyer 2017) und damit die zu analysierenden Signale im Frequenzbereich überdecken können, erschweren Späne in der ROI die Bewegungsanalyse. Folglich wird eine Vorgehensweise angestrebt, die sich durch den Bildbereich bewegenden Späne aus dem Datensatz zu entfernen und damit ihre Wirkung zu reduzieren. Dazu wird ein Filter entwickelt und untersucht, der die Wirkung von Spänen im Bildbereich reduziert, ohne dass die zu analysierende, kleine Bewegung des Werkstücks entfernt wird. Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

6.2.2 Kompensation von Spänen bei der Analyse von Werkstückschwingungen

Aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten von Spänen, ihrer Rotation und der unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnisse je nach Orientierung und Position der Späne, können dieselben Späne in unterschiedlichen Videoframes unterschiedliche Formen, Abmaße und Farbinformationen haben. Die Schärfe der Abbildung der Späne ist zudem abhängig vom Abstand zur Kamera bzw. der Spanbewegung in Richtung der Kamera. Ein auf das Verfolgen von Objekten bzw. Trajektorien gestützter Ansatz ist daher problembehaftet. Da die Späne aus dem gleichen Material bestehen wie das Werkstück, wird eine Segmentierung des Bildes auf Basis von Farbinformationen ebenso als nicht zielführend angesehen.

Ein Merkmal der Späne, das sie vom Werkstück und weiteren Objekten im Bildbereich unterscheidet, ist ihre im Vergleich zum analysierten Teil des Werkstücks nur temporäre Anwesenheit. So bewegen sich die Späne zwar zum Teil mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten fort, nach einer gewissen Zeit verschwinden sie jedoch meist aus dem Bildbereich. Damit kann eine Vorgehensweise verfolgt werden, die auf Basis dieses

Merkmals Späne zunächst im Bildbereich identifiziert und anschließend ersetzt, um ihre Wirkung zu reduzieren.¹⁶

Aufgrund der nur temporären Anwesenheit von Spänen bietet sich für ihre Erkennung ein Vergleich des Videoframes, aus dem die Späne entfernt werden sollen („Spanframe“, vgl. Abbildung 6-4 a), mit jeweils einem Frame an, in dem kein Span im Bildbereich vorhanden ist („Referenzframe“). Dieser Referenzframe kann jedoch, unter anderem aufgrund der Helligkeitsfluktuation durch die Werkzeugbewegung, siehe folgendes Kapitel 6.3, kein Frame sein, der einen großen zeitlichen Abstand zum Spanframe hat. Unterschiede zwischen den Frames könnten dann nicht zweifelsfrei auf Späne zurückgeführt werden, sondern zum Beispiel durch geänderte Beleuchtungsverhältnisse verursacht werden. Daher wird in der untersuchten Vorgehensweise ein zentrierter gleitender Durchschnitt benachbarter Frames gebildet und dieser als Referenzframe genutzt (siehe Abbildung 6-4 c). Der Einfluss der sich bewegenden Späne auf den Referenzframe wird mit ausreichender Breite des gleitenden Durchschnitts minimiert. Im so gebildeten Referenzframe sind nur noch Einflüsse von Spänen in Regionen zu erkennen, in denen Späne nahezu ständig vorhanden sind (vgl. Abbildung 6-4 c) links neben dem Werkzeug).

Anschließend wird ein Vergleich der Grauwerte des Spanframe (Abbildung 6-4 b) mit den Grauwerten des Referenzframes durchgeführt, um die Unterschiede beider Frames und damit Späne zu identifizieren („Differenzframe“). Abbildung 6-4 d) zeigt einen solchen Differenzframe, der mit einem gleitenden Durchschnitt mit 60 Frames Breite gebildet wurde. Der Differenzframe zeigt deutlich die im Spanframe vorhandenen Späne.

¹⁶ Eine Filterung der Phaseninformation zur Kompensation von Spänen, beispielsweise durch das Glätten von Zeitabschnitten mit großen Peaks, wird aufgrund der darin möglicherweise enthaltenen Information über die Werkstückbewegung nicht verfolgt.

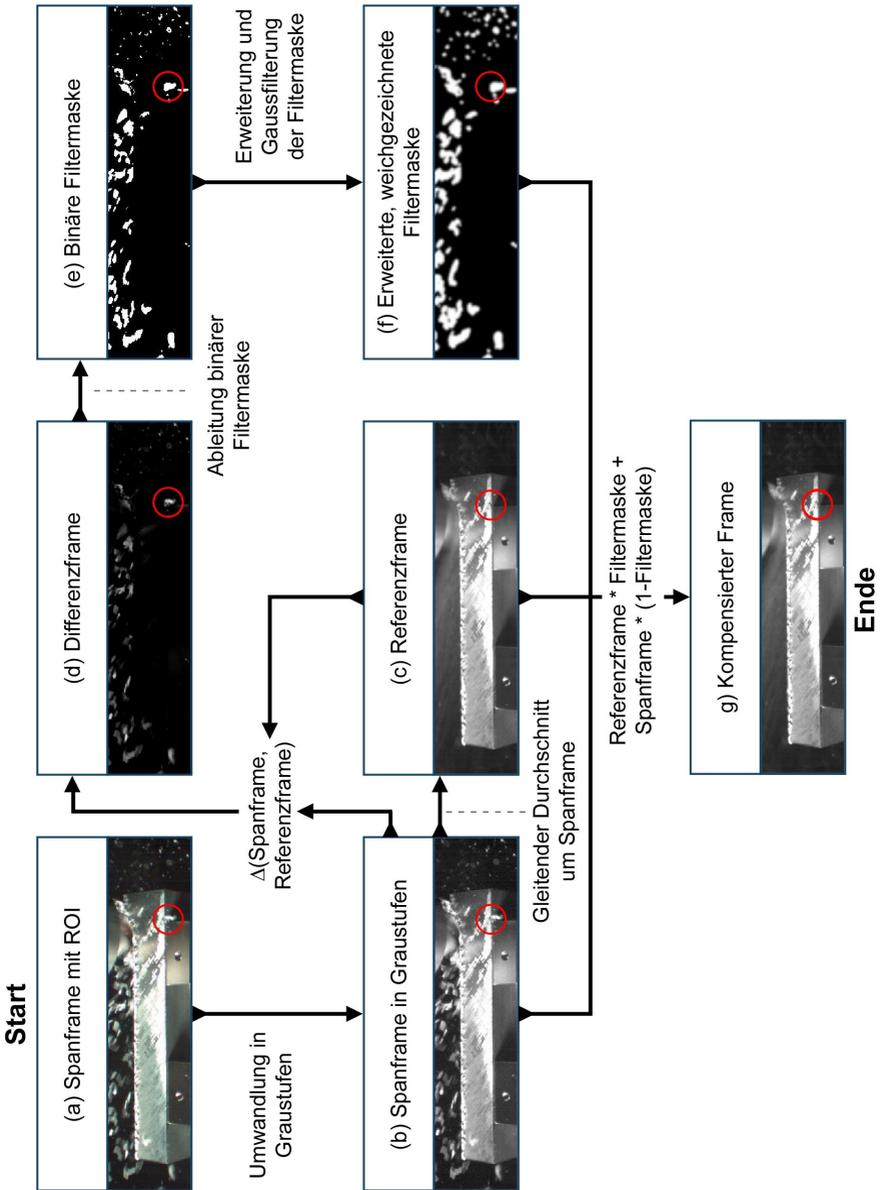


Abbildung 6-4: Vorgehensweise zur Kompensation von Spänen in Videoframes

Der Differenzframe wird anschließend zur Bildung eines räumlichen Filters genutzt, der solche Anteile des Spanframe unberührt lässt, die im Differenzframe unter einer festgelegten Grauwertschwelle liegen (siehe Abbildung 6-4 e)¹⁷. Anteile des Differenzframes, die über dem Schwellwert liegen und temporär anwesenden Objekten wie Spänen zuzurechnen sind, werden hingegen entfernt und durch entsprechende Teile des Referenzframes ersetzt.

Um im kompensierten Spanframe keine un stetigen Übergänge zwischen Anteilen des Spanframes und des Referenzframe zu erzeugen, die Einfluss auf entsprechende Raumfrequenzen und relevante Phaseninformation haben könnten, werden die Bereiche des Filters um wenige Pixel erweitert und anschließend mit einem Gaußfilter weichgezeichnet (Abbildung 6-4 f). Der Filter wird ebenso wie der Referenzframe für jeden Frame berechnet und damit auf jeden Spanframe einzeln angewandt. Der so kompensierte Spanframe (Abbildung 6-4 g) zeigt eine deutlich reduzierte Sichtbarkeit von Spänen, insbesondere in den relevanten Bereichen um die Werkstückkante. In Bereichen mit ständiger Anwesenheit von Spänen (siehe Abbildung 6-4 a links neben dem Werkzeug) stößt die Kompensation an Ihre Grenzen. Es zeigt sich, dass der für die Kompensation genutzte Referenzframe hier selbst zu stark von Spänen beeinflusst wird.

Der zeitliche Verlauf der Phaseninformation für das so kompensierte Video zeigt einen deutlich gleichmäßigeren Verlauf mit weniger auf Späne zurückzuführenden Peaks, siehe Abbildung 6-5. Der Ansatz zeigt damit einen Ansatz zur Beantwortung der eingangs gestellten Fragestellung, wie werkzeugmaschinenspezifische Einflussgrößen abgemildert oder kompensiert werden können, um Schwingungsanalysen zu ermöglichen.

¹⁷ Der im untersuchten Datensatz angesetzte Schwellwert des Filters liegt bei einer Grauwertdifferenz von 15 (bezogen auf 256 Graustufen) und wurde für den Datensatz nach Trial and Error Vorgehensweise ermittelt.

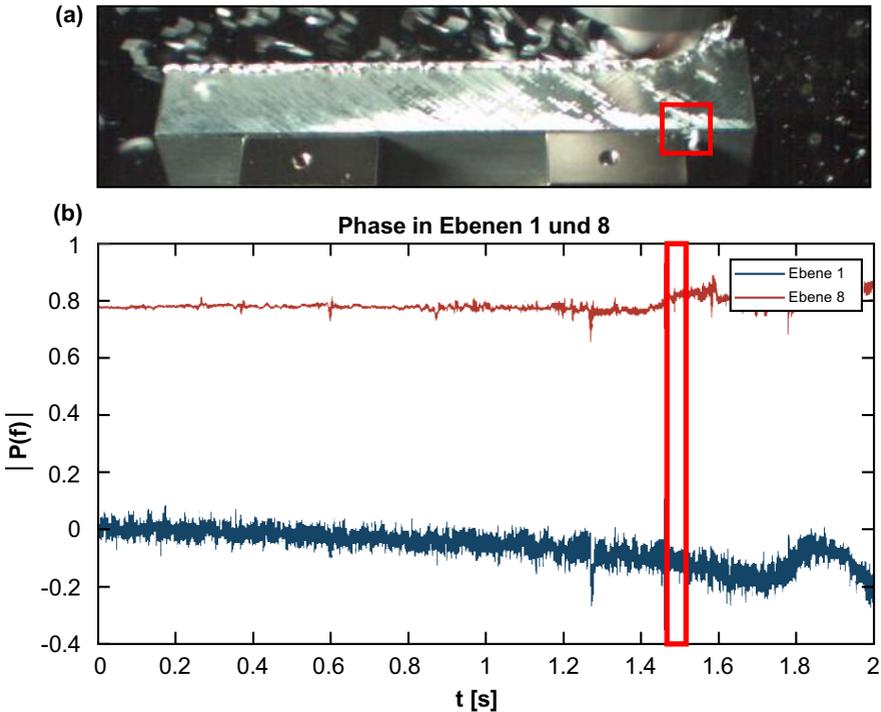


Abbildung 6-5: Nach Spänekompensation: Während Späneflug analysierte ROI (rot in a), b) Verlauf der Phase für niedrige räumliche Frequenzen (Ebene 8) und hohe räumliche Frequenzen (Ebene 1), Zeitpunkt des Frame aus a) rot markiert

Im Spektrum zeigt sich die Spankompensation durch ein verringertes Rauschen und verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis für die vorhandenen Schwingungsfrequenzen. Insbesondere für niedrige Raumfrequenzen, die im Versuchsaufbau von Späneinflüssen stärker betroffen sind, zeigt sich eine deutliche Verbesserung. Abbildung 6-6 zeigt hierzu das Amplitudenspektrum einer an der Werkstückkante analysierten Fräsoption mit und ohne Spankompensation nach der untersuchten Vorgehensweise. Es zeigt sich ein deutlich verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis mit Peaks bei der analysierten Spindelumlauffrequenz ($\sim 106,2$ Hz) und der Messereingriffsfrequenz ($\sim 424,7$ Hz), sodass eine prinzipielle Eignung der untersuchten Vorgehensweise für die Kompensation von Späneinflüssen geschlussfolgert werden kann.

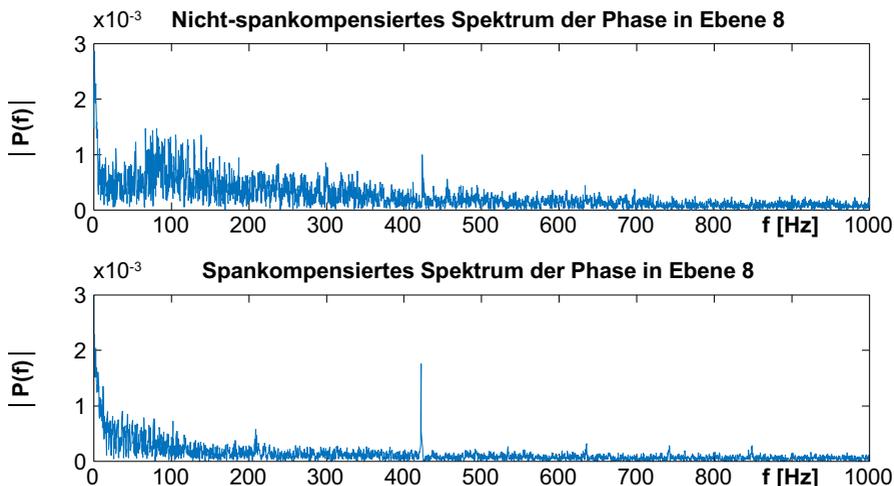


Abbildung 6-6: Nicht-spankompensiertes und spankompensiertes Spektrum für niedrige Raumfrequenzen

6.3 Einfluss und Vermeidung von Fluktuationen der Beleuchtung

Veränderungen der Beleuchtung, seien es Fluktuationen der Intensität der Lichtquelle, veränderte Schattenwürfe oder Reflektionen durch sich bewegende Objekte, beeinflussen die vom Bildsensor aufgenommenen Informationen. Die Phaseninformation weist im Vergleich zur Analyse der Amplitudeninformation zwar eine gewisse Robustheit gegenüber gleichmäßigen Veränderungen der Beleuchtung auf (Gautama & van Hulle 2002), gleichwohl kann die Beleuchtung der zu analysierenden Szene in Abhängigkeit der Randbedingungen des Versuchs deutlichen Einfluss auf die Qualität der Auswertung haben (A_Parth 2018).

So können die Helligkeit und insbesondere die Position der Lichtquelle und Kamera die Kontraste und abgebildeten Objektstrukturen sowie damit die Qualität der entsprechenden Phaseninformation beeinflussen, wie bereits in Kapitel 5.3 untersucht wurde. Fluktuationen der Beleuchtung können ebenso einen Einfluss auf die Auswertung haben, insbesondere wenn ihre (zeitlichen) Frequenzen im Bereich der erwarteten Frequenzen durch die Objektbewegung liegen und die Bildinformation durch eine ungleichmäßige Helligkeitsveränderung verändert wird. Im Folgenden werden daher Ergebnisse zu

möglichen Einflüssen von Fluktuationen der Beleuchtung in Videoaufnahmen bei Zerspanprozessen beschrieben und mögliche Lösungsansätze für die auftretenden Fluktuationen untersucht. Hierfür werden werkzeugrotationsbedingte Helligkeitsveränderungen fokussiert, die durch die möglicherweise angeregten Frequenzen im Bereich von Werkstückschwingungen besonders kritisch sind. Im Vergleich zu anderen Helligkeitsveränderungen, etwa Fluktuationen der Lichtquelle, können werkzeugrotationsbedingte Veränderungen nicht mit vertretbarem Aufwand abgestellt werden und zeigen bei der Analyse von Videodaten aus Fräsprozessen einen deutlichen Einfluss auf die Bildhelligkeit. Ihr Einfluss wird daher im Folgenden gesondert untersucht.

6.3.1 Einfluss von Fluktuationen der Beleuchtung durch Werkzeugrotation

Bei Fräsprozessen rotiert das Werkzeug bzw. der Werkzeughalter mit der Spindeldrehzahl in unmittelbarer Umgebung des durch die Zerspanung angeregten Werkstücks. Das vom Werkzeug bzw. Werkzeughalter auf das Werkstück und ROI reflektierte Licht verändert sich damit zyklisch mit Frequenz der Spindeldrehzahl. In Abhängigkeit der Beleuchtungsparameter, insbesondere der Anordnung von Lichtquelle zu Werkstück und Werkzeug, sowie der Reflektion des Werkzeugs und Werkzeughalters, ergibt sich ein Einfluss auf die untersuchte ROI. Abbildung 6-7 zeigt in die Differenz der Grauwerte einzelner Videoframes. Die Videoframes sind in diesem Fall direkt aufeinanderfolgende Frames mit einem entsprechend kurzen zeitlichen Abstand (0,5 Millisekunden Zeitabstand durch 2000 Frames pro Sekunde). Das Werkzeug rotiert rechts neben dem Werkstück, ist jedoch nicht im Eingriff. Es zeigt sich eine lokale Helligkeitsdifferenz im rot markierten Bereich von Abbildung 6-7. Das Muster wiederholt sich in einem Zyklus von etwa 19 Frames, was 9,5 Millisekunden und damit etwa der Spindelfrequenz von ca. 106 Hz (6370 1/min) entspricht.

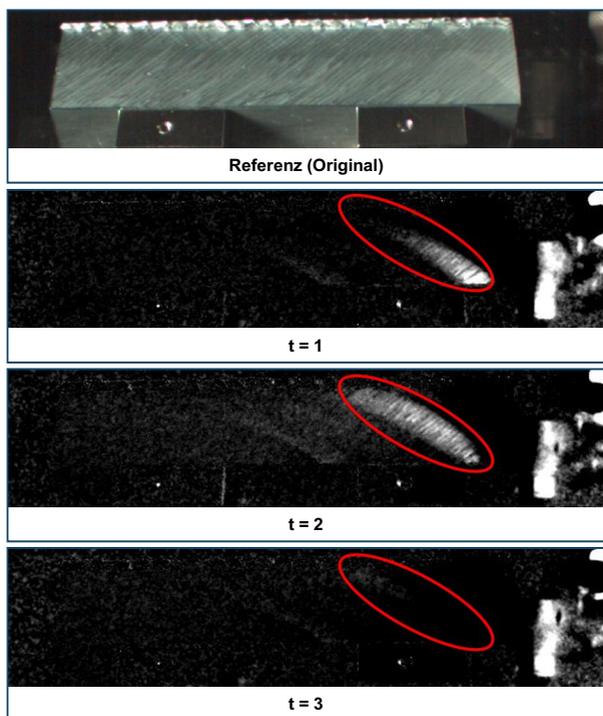


Abbildung 6-7: Darstellung der Helligkeitsfluktuation durch Reflektion eines neben dem Werkstück rotierenden Werkzeugs: Differenz der Grauwerte von aufeinanderfolgenden Frames im Vergleich zum Referenzframe

Bei dem Vergleich der Bildframes zeigt sich ein weicher Verlauf in dem vom Werkzeughalter reflektierten Licht zwischen hellen und dunklen Bereichen. Der Verlauf entsteht zum einen dadurch, dass die Lichtquelle (sowohl der eingesetzte LED-Strahler als auch der Werkzeughalter als reflektierende Lichtquelle) das Licht nicht punktförmig abgeben, sondern ausgedehnte Lichtquellen sind. Zum anderen ist der Verlauf umso weicher, je größer der Abstand zwischen der Lichtquelle und dem beleuchteten Objekt ist, vgl. (Nischwitz et al. 2020). Das Licht auf dem Werkstück, welches nicht direkt von der LED-Lichtquelle auf das Werkstück getroffen ist, sondern von einer anderen Fläche reflektiert wurde, hier insbesondere dem Werkzeughalter, hat folglich einen Bereich mit Halbschatten und damit einen in den Randbereichen weichen Verlauf, vgl. Abbildung 6-8. Die Bereiche eines weichen Verlaufs von Schatten bzw. reflektiertem Licht können bei

der Zerlegung in räumliche Frequenzen Amplituden bei niedrigen Frequenzen hervorufen. Harte Kanten und Schatten bzw. hart abgegrenzte Lichtreflektionen können hingegen stärker hohen räumlichen Frequenzen entsprechen (vgl. Kapitel 2.2.3). Daneben ist die zur Berechnung niedriger Frequenzen benötigte räumliche Signallänge größer (vgl. Kapitel 6.2.1), sodass weitere Teile einer lokal veränderten Bildinformation Einfluss haben können.

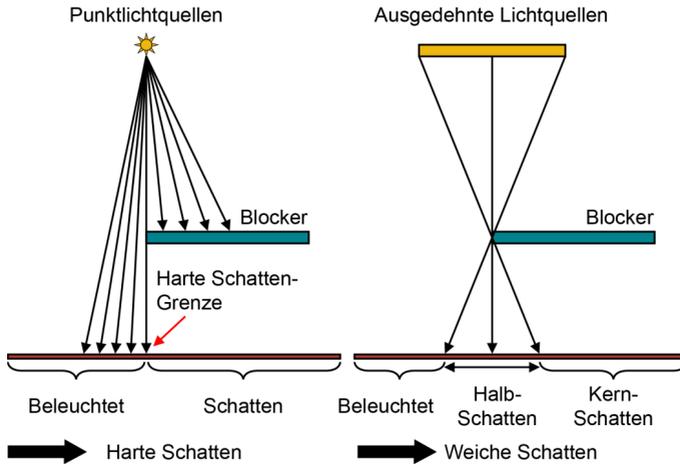


Abbildung 6-8: Erzeugung weicher Schatten durch ausgedehnte Lichtquellen nach (Nischwitz et al. 2020)

Der Einfluss einer durch Werkzeugrotation hervorgerufenen Helligkeitsfluktuation auf das Spektrum der Phase ist in Abbildung 6-9 dargestellt. Dargestellt ist das Spektrum eines Zeitausschnitts ohne Zerspanung. Der Zeitausschnitt ist so gewählt, dass darin eine deutliche Lichtreflektion des Werkzeughalters die ROI am Werkstück trifft. Das Werkzeug ist nicht im Eingriff (siehe Abbildung 6-9 a), das Werkstück ist in Ruhe. Das Spektrum der Phase zeigt für niedrige räumliche Frequenzen, repräsentiert durch die oberste Pyramidenebene, deutliche Peaks bei der Spindeldrehzahlfrequenz (~106,2 Hz) sowie bei Harmonischen der Spindeldrehzahlfrequenz (siehe Abbildung 6-9 b). Für hohe räumliche Frequenzen, repräsentiert durch die unterste Pyramidenebene, zeigen sich dagegen geringere Peaks bei der Spindeldrehzahlfrequenz und den Harmonischen, die sich nicht deutlich vom Rauschen abheben. Dies ist zurückzuführen auf die bessere Abbildung großer Bewegungen in hohen Pyramidenebenen bei gleichzeitig schlechterer Lokalisierbarkeit dieser Bewegungen im Vergleich zu höheren Ebenen,

vgl. (A_Flohr 2019). Die stärkere Abbildung großer Bewegungen führt hier dazu, dass sich die scheinbaren, durch Helligkeitsfluktuationen hervorgerufenen Veränderungen in den Daten widerspiegeln.

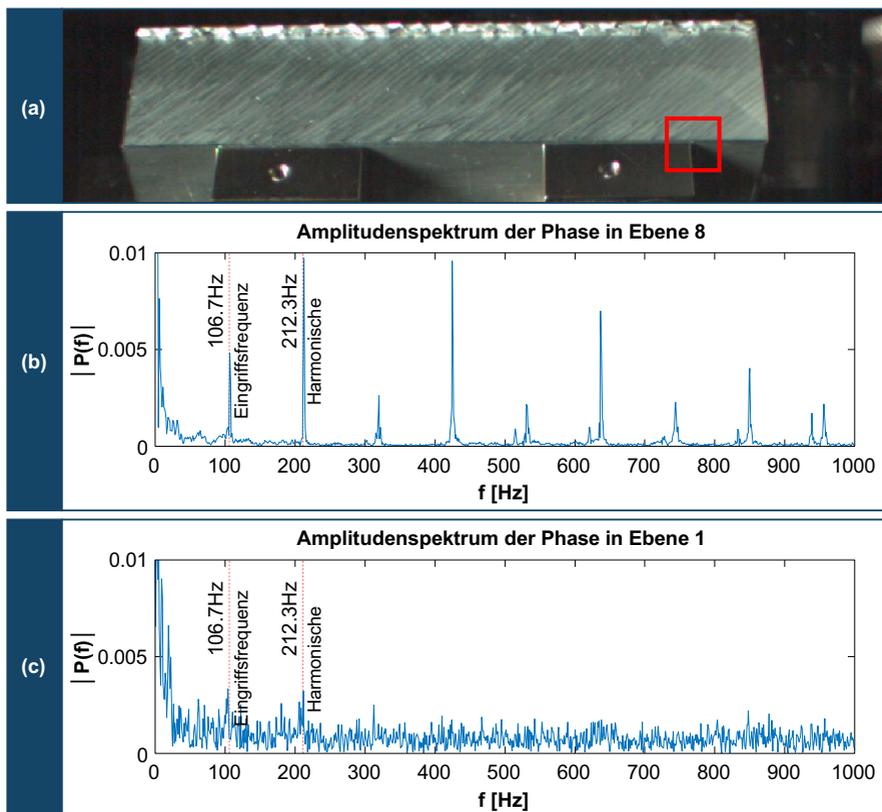


Abbildung 6-9: Während einer Helligkeitsfluktuation analysierte ROI (rot in a), Spektrum der Phase für niedrige räumliche Frequenzen in Ebene 8 b) und für hohe räumliche Frequenzen in Ebene 1 c)

6.3.2 Vermeidung des Einflusses der Werkzeugrotation auf die Beleuchtung

Es zeigt sich folglich, dass die lokale Helligkeitsfluktuation, die lediglich durch die Werkzeugrotation, nicht aber durch eine tatsächliche Werkstückbewegung verursacht wird, bei ungünstiger Wahl von Beleuchtung und ROI einen Einfluss auf die Auswertung der

Phaseninformation haben kann. Weil die Reflektion durch die Werkzeugrotation Frequenzen hervorruft, die auch bei der Analyse der Werkstückbewegung erwartet werden, ist dieser Umstand zur Schwingungsanalyse in der Nähe von rotierenden Werkzeugen kritisch.

Ferner zeigt sich, dass durch geeignete Wahl des analysierten Ortsfrequenzbereichs der Einfluss der Helligkeitsfluktuation eingeschränkt werden kann, wobei hohe Frequenzen sowohl nach theoretischen Betrachtungen der Lichtreflektion als auch bei der Analyse der im Versuchsaufbau gewonnenen Daten eine höhere Robustheit zeigen, siehe Abbildung 6-9 c). Folglich werden zur Analyse der Werkstückschwingungen im Datensatz hohe räumliche Frequenzen, repräsentiert durch die jeweils unterste Pyramidenebene, angewandt (siehe Abbildung 6-9 c). Da die Analyse hoher Raumfrequenzen Auswirkungen auf den gesamten Datensatz hat und nicht nur die Wirkung der Helligkeitsfluktuation isoliert vermindert muss jedoch in weiteren Untersuchungen gezeigt werden, mit welcher Qualität tatsächliche Bewegungen weiterhin abgebildet werden können (Validierung in Kapitel 7).

Verallgemeinernd wird geschlussfolgert, dass die Beleuchtung durch den Abstand von Lichtquelle und Werkstück sowie die Wahl einer möglichst ausgedehnten Lichtquelle so zu wählen ist, dass veränderliche Schatten und Reflektionen in die ROI möglichst reduziert werden. Ein Werkzeughalter und sofern möglich ein Werkzeug mit geringem Reflexionsgrad können zudem Helligkeitsfluktuationen verringern, die zyklisch mit der Spindeldrehzahl auftreten und sind daher bei der Aufnahme von Videodaten in der Nähe rotierender Werkzeuge zu bevorzugen.

6.4 Vermeidung des Einflusses der Werkzeugrotation

Neben Fluktuationen der Beleuchtung durch ein rotierendes Werkzeug können auch durch die Abbildung des Werkzeugs selbst Einflüsse auftreten. So ist es bei Videoaufnahmen von spanenden Prozessen in vielen Fällen unvermeidlich, dass das spanende Werkzeug mit im Video abgebildet wird. Dies kann bei der Berechnung der Phase zur Folge haben, dass die Rotation des Werkzeuges einen Einfluss auf lokale Phaseninformationen in den Videodaten hat – selbst an Positionen, in denen das Werkzeug nicht in der ROI abgebildet ist. Der Grund dafür liegt in der Berechnung der räumlichen Fourier-Transformation, die je nach Ortsfrequenzbereich auch räumlich entfernte Bilddaten mit in die Analyse einbezieht, vgl. Kapitel 2.2.2 (A_Flohr 2019).

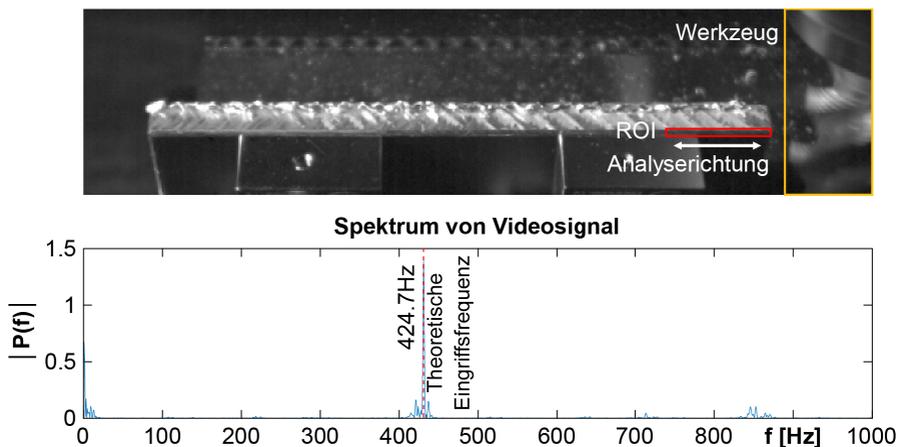


Abbildung 6-10: Schwingungsanalyse an Werkstückkante mit rechts neben dem Werkstück rotierendem Werkzeug (Analyse in niedrigem Ortsfrequenzbereich)

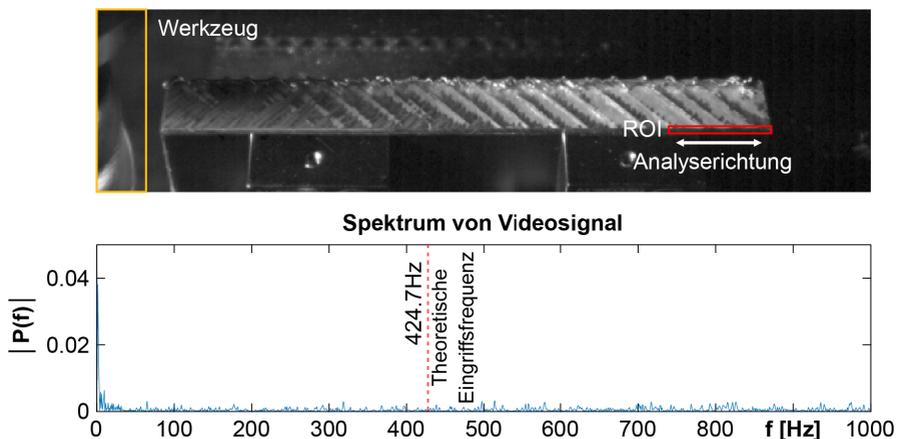


Abbildung 6-11: Schwingungsanalyse an Werkstückkante mit links neben dem Werkstück rotierendem Werkzeug (Analyse in niedrigem Ortsfrequenzbereich)

Abbildung 6-10 und Abbildung 6-11 zeigen anhand der Analyse von niedrigen Ortsfrequenzen in der Nähe eines frei rotierenden Werkzeug den entsprechenden Störeinfluss. Die ROI befindet sich an der rechten Werkstückkante (siehe rote Markierungen in Abbildung 6-10 und Abbildung 6-11), wobei die zur Berechnung der ROI genutzte Signallänge für die analysierten, niedrigen Ortsfrequenzen, über die ROI hinausgeht.

Durch die Wahl der Analyserichtung in Richtung des rotierenden Werkzeugs wird eine Beeinflussung provoziert, wobei das Werkstück in Ruhe ist.

Abbildung 6-10 zeigt deutliche Frequenzanteile beim Vierfachen der Rotationsfrequenz (424,7 Hz), die der theoretischen Zahneingriffsfrequenz entspricht. Bei der gleichen Analyse mit links und damit in größerer Entfernung neben dem Werkstück rotierenden Werkzeug (Abbildung 6-11) sind dagegen keine Amplituden zu erkennen.

Wie bei der durch das Werkzeug verursachten zyklischen Helligkeitsfluktuation ist die mögliche Wirkung der Werkzeugrotation in der Nähe der ROI kritisch, da die Frequenz der Werkzeugrotation beziehungsweise harmonische Frequenzen hiervon in der Regel auch in den (Werkstück-) Schwingungen vorhanden sind. Eine am Werkstück identifizierte Schwingung kann somit bei ungünstiger Wahl von ROI, Analyserichtung und Ortsfrequenzbereich beziehungsweise Pyramidenebene auch durch das rotierende Werkzeug verursacht werden, das sich im Bildbereich in der Nähe der ROI befindet. Dafür reicht es, dass das Werkzeug ohne Eingriff frei rotiert, also nicht zerspannt.

Um den Einfluss der Werkzeugrotation im Video lokal zu begrenzen, wird (im Einklang mit der Vermeidung des Einflusses zyklischer Helligkeitsfluktuationen) ein hoher Ortsfrequenzbereich genutzt, sodass die räumliche Reichweite der analysierten Bildinformation möglichst begrenzt wird, vgl. (A_Flohr 2019). Da die Berechnung der Phaseninformationen eine gewisse räumliche Signallänge erfordert, kann insbesondere bei der Analyse von dünnwandigen Werkstückstrukturen das Werkzeug in unmittelbarer Nähe der zu analysierenden ROI liegen. Entsprechend ist auch die ROI so zu wählen, dass sich das Werkzeug nicht durch die zur Berechnung der Phasen herangezogenen Pixel bewegt.

Neben der hier dargestellten quantitativen Analyse eignet sich der phasenbasierte Ansatz nach (Wadhwa et al. 2013) auch zur qualitativen Verstärkung von Bewegungen in Videodaten (vgl. Kapitel 7.3). Dabei werden typischerweise mehrere Raumfrequenzbereiche für die Analyse und Manipulation der Phaseninformationen genutzt. Um einen Einfluss von Helligkeitsfluktuationen wie durch die Werkzeugrotation zu verhindern, ist daher eine fallbezogene Untersuchung und gegebenenfalls eine Einschränkung des Raumfrequenzbereichs ebenso notwendig.

6.5 Kompensation von Achsbewegungen in Werkzeugmaschinen

Nicht nur die Bewegung eines sich im Bildbereich bewegenden Körpers wie eines Fräswerkzeugs kann sich auf optische Verfahren zur Analyse dynamischer Bewegungen auswirken. Gerade auch Bewegungen des zu untersuchenden Objekts relativ zur Kamera sind in vielen Fällen nicht zu vermeiden und stellen daher eine Herausforderung dar. So hat die Wahl der zu analysierenden Pixel und damit einer geeigneten ROI bei der Analyse von kleinen Objektbewegungen, wie in Kapitel 5.3 dargestellt, große Bedeutung für die erzielbare Signalqualität. Bereits wenige Pixel innerhalb oder außerhalb der ROI können einen großen Einfluss auf das Analyseergebnis haben. Bei Relativbewegungen zwischen Kamera und zu bewegendem Objekt, etwa einer Werkzeugmaschinenachse, stellt dieser Umstand eine besondere Herausforderung dar, da eine fixierte ROI in der Bildebene keiner festen Region am zu analysierenden Objekt entspricht. Bereits kleine Achsbewegungen rufen bei entsprechenden Bildauflösungen große Verschiebungen im Bildbereich hervor, sodass bereits nach kurzer Zeit keine geeigneten Kanten mehr durch die ROI abgedeckt werden oder das zu analysierende Objekt gar nicht mehr in der ROI liegt. Eine Schwingungsanalyse wird dadurch unmöglich. Darüber hinaus können bei der phasenbasierten Analyse von Bewegungen Phasensprünge im Zeitbereich auftreten, wenn große Objektverschiebungen in der ROI auftreten. Die Analyse im zeitlichen Frequenzbereich wird durch solche unerwünschten Impulse erschwert (vgl. Kapitel 5.3).

Ziel der im Folgenden dargestellten Vorgehensweise zur Kompensation von Achsbewegungen ist daher eine Stabilisierung der ROI über dem entsprechenden Objekt, sodass trotz Relativbewegung zwischen Kamera und Achse einer Werkzeugmaschine die Analyse von Schwingungen an Werkstücken oder Maschinenbauteilen ermöglicht werden kann.¹⁸

Einen Ansatz zur Stabilisierung stellt die Festlegung von Referenzkörpern im Bild dar, deren Bewegung zwischen einzelnen Frames berechnet und damit zur Stabilisierung genutzt wird (Tracking), vgl. Kapitel 2.5 und (Xu & Lin 2006). Diese Vorgehensweise

¹⁸ Die Relativbewegung zwischen Kamera und beweglichem Maschinenteil kann in der Regel nicht durch eine geänderte Kameraposition, z.B. eine Befestigung an der verfahrenen Achse, vermieden werden. Grund ist, dass die Kamera bei einer Befestigung am beweglichen Maschinenteil selbst Schwingungen ausgesetzt würde und von ungewünschte Kamerabewegungen auszugehen ist (vgl. Kapitel 6.5.1).

hat bei der Kompensation von Achsbewegungen in Werkzeugmaschinen Vor-, wie auch Nachteile. So ist als Grundlage der Stabilisierung lediglich die Abbildung eines geeigneten Referenzkörpers im Video vonnöten. Nachteilig ist, dass der manuell auszuwählende Referenzkörper über den Analysezeitraum mit ausreichender Bildqualität abgebildet werden muss. In Werkzeugmaschineninnenräumen kann dies nur eingeschränkt möglich sein, etwa wenn Verschmutzungen und Späne die optischen Eigenschaften von Referenzkörpern verändern.

Sofern Objekte analysiert werden sollen, die mit den Maschinenachsen verbunden sind, stellt die Kompensation von Achsbewegungen mit Hilfe von Achspositionen aus der Maschinensteuerung einen weiteren Ansatz dar. Die durch die Maschinensteuerung zur Verfügung gestellten Achspositionen bilden dann eine Basis zur Stabilisierung des Videos und damit Bezugswerte für auftretende Schwingungsamplituden. Von der Abbildung eines Referenzkörpers im Video ist diese Stabilisierung durch die Nutzung einer weiteren Datenquelle unabhängig. Der Aufwand zur Beschaffung von entsprechend synchronisierten Achsdaten sowie zur Kamerakalibrierung (vgl. Kapitel 2.5.1) stellen Nachteile dar.

Aufgrund der jeweiligen Vor- und Nachteile werden in der Arbeit beide Ansätze, die Kompensation mit Achsdaten, sowie die Kompensation durch Tracking eines Referenzkörpers untersucht und in den folgenden Kapiteln 6.5.1 und 6.5.2 näher erläutert.

6.5.1 Kompensation von Achsbewegungen durch Tracking

Um den Ansatz zur Bewegungskompensation auf Basis von Tracking (vgl. Grundlagen in Kapitel 2.5.2 und 2.5.3) umzusetzen, ist zunächst ein Bereich im Video auszuwählen, der den beweglichen Körper, dessen Bewegung zu kompensieren ist, enthält (vgl. (Elgharib et al. 2015)). Im Fall der umgesetzten Werkzeugmaschinenanwendung wird ein Bereich um den Referenzsensor auf der sich bewegenden Spindelnase gewählt.

Eine Kamerakalibrierung wird beim Tracking-Ansatz aufgrund der nicht notwendigen Umrechnung von Bildkoordinaten in Werkzeugmaschinenkoordinaten nicht durchgeführt, etwaige Verzerrungen der Videoframes werden jedoch zunächst mit Aufnahmen von Schachbrettmustern (vgl. Kapitel 2.5.1) korrigiert.

Die Position des zu trackenden Referenzsensors im Video wird anschließend mit Hilfe eines Kanade-Lucas-Tomasi-Feature-Trackers (KLT-Tracker, vgl. (Tomasi & Kanade 1991)) in einzelnen Frames (im Folgenden: Tracking-Frames) des Videos bestimmt.

Zur Reduktion der Rechenzeit werden nicht in allen Frames des Videos Referenzkörper-Positionen bestimmt. Zwischen den aufeinanderfolgenden Positionen des Objekts in den Tracking-Frames werden dann Verschiebungsvektoren in der Bildebene bestimmt. Die Tracking-Frames haben jeweils einen bekannten zeitlichen Abstand zueinander, sodass aus den Verschiebungsvektoren zwischen Tracking-Frames Verschiebungsvektoren zwischen allen Frames interpoliert werden können. Hierdurch werden Verschiebungsvektoren zwischen einzelnen Frames im Subpixel-Maßstab bestimmt.

Nach der Bestimmung der Verschiebungsvektoren sind die einzelnen Videoframes um den entsprechenden Betrag zu verschieben, um die Stabilisierung des Videos zu erreichen (A_Flohr 2019). Abbildung 6-12 stellt die Vorgehensweise zur Tracking-basierten Kompensation schematisch dar.



Abbildung 6-12: Vorgehensweise zur Kompensation von Achsbewegungen in Videoframes mit Tracking von Objekten

Abbildung 6-13 zeigt das Ergebnis der Tracking-basierten Kompensation anhand originaler und kompensierter Videoframes. Der zeitliche Abstand der Frames $t=0$ bis $t=4$ beträgt etwa fünf Sekunden beziehungsweise 10.000 Frames, die auf die bewegungskompensierte Spindelnase mitsamt angebrachtem Beschleunigungssensor zugeschnitten sind. Im Originalvideo (Abbildung 6-13 links) zeigt sich die Achsbewegung während einer Planfräsoption mit Achsvorschub von rechts nach links in der Bildebene (in x-Richtung des Werkzeugmaschinenkoordinatensystems). Rot markiert ist eine ROI um den Beschleunigungssensor mit festen Koordinaten in der Bildebene. In der Tracking-kompensierten Bildreihe ist die Stabilisierung des Referenzsensors in der

ROI zu erkennen, siehe Abbildung 6-13 rechts. Der bewegliche Referenzsensor wird über den gesamten Betrachtungszeitraum innerhalb der ROI stabilisiert.

Gleichzeitig ist die durch die Relativbewegung der Spindelnase bedingte Änderung der Perspektive und Änderung der Beleuchtung zu erkennen. So verändert die relativ zur Kamera fest positionierte Lichtquelle die Beleuchtung der Spindelnase in unterschiedlichen Achspositionen. Die veränderte Reflektion des abgebildeten Beschleunigungssensors verdeutlicht dies. Ebenso zeigt sich eine Drehung des auf dem Bildsensor abgebildeten Beschleunigungssensors normal zur Betrachtungsachse, die durch die große Bewegung des Sensors relativ zur Kamera und die damit einhergehende Änderung der Kameraperspektive verursacht wird, siehe Abbildung 6-14.

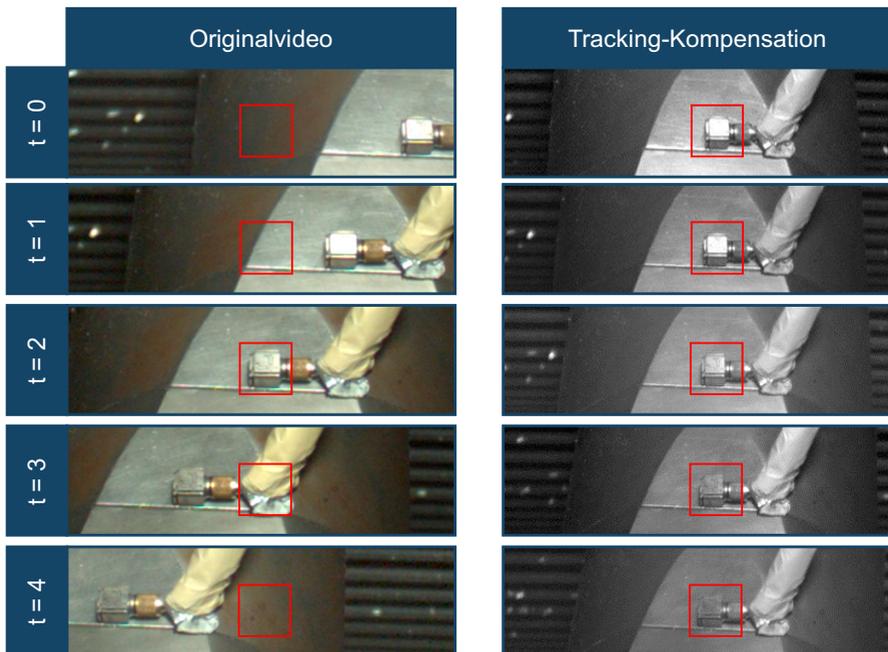


Abbildung 6-13: Gegenüberstellung von Originalvideo mit bewegter Achse (links) zu mit Tracking kompensiertem Video (rechts): Stabilisierung der ROI mit Beschleunigungssensor an der Spindelnase

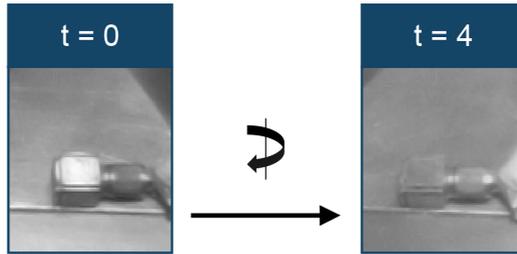


Abbildung 6-14: Scheinbare Rotation des von der Kamera abgebildeten Objekts durch Veränderung der Kameraperspektive und damit geänderte Reflexion des Körpers im stabilisierten Video

In Kapitel 7.2.3 werden die Ergebnisse der Schwingungsanalyse mit durch Tracking stabilisierten Videoframes dargestellt.

6.5.2 Kompensation von Achsbewegungen durch Achsdaten

Die Kompensation von Achsbewegungen durch Achsdaten unterscheidet sich von der Kompensation durch Tracking eines Objekts grundsätzlich durch die genutzte Datenquelle. So wird nicht das zu stabilisierende Video selbst als Datengrundlage herangezogen, sondern externe Positionsdaten der Maschinensteuerung. Auch wenn die Achsdaten der Werkzeugmaschine wie jedes Messsystem selbst mit Unsicherheiten behaftet sind, ist im Vergleich zur Größe eines Pixels im Messaufbau ($\sim 0,4\text{mm/Pixel}$) von einer sehr hohen Messgenauigkeit auszugehen. Da die ROI pixelgenau positioniert wird, ist der Einfluss durch Fehler des Messsystems der Werkzeugmaschine daher zu vernachlässigen.

Abbildung 6-15 stellt die Vorgehensweise zur Achsdaten-basierten Kompensation dar. So ist im Vergleich zur Tracking-basierten Kompensation zunächst eine Umrechnung zwischen Achsdaten im Weltkoordinatensystem und Koordinaten in der Bildebene notwendig, weshalb eine Kamerakalibrierung (vgl. Kapitel 2.5.1) durchgeführt wird.

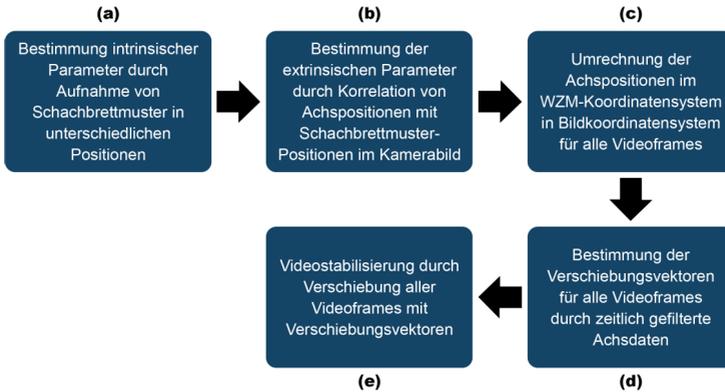


Abbildung 6-15 Vorgehensweise zur Kompensation von Achsbewegungen in Videoframes mit Maschinensteuerungsdaten

Hierfür werden zunächst die intrinsischen Parameter der Kamera bestimmt (Abbildung 6-15 a)). Die intrinsischen Parameter beschreiben die Eigenschaften der Optik des Kamerasystems sowie des Bildsensors (Beyerer, Puente León & Frese 2016) und dienen damit der Umrechnung von Kamerakoordinatensystem und Bildkoordinatensystem (vgl. Kapitel 2.5.1 und Abbildung 2-12). Hierfür wird aus der fixierten Kameraposition einmalig ein Schachbrettmuster in unterschiedlichen Positionen und Orientierungen aufgenommen. Abbildung 6-16 zeigt die für die Bestimmung der intrinsischen Parameter genutzten Bilder eines Schachbrettmusters.



Abbildung 6-16: Für die Bestimmung der intrinsischen Parameter genutzte, aus fixer Kameraposition aufgenommene Bilder eines Schachbrettmusters

Um die Umrechnung des Koordinatensystems der Werkzeugmaschine in das Kamerakoordinatensystems durchzuführen, sind zudem die extrinsischen Parameter des Aufbaus zu bestimmen (Abbildung 6-15 b)). Die extrinsischen Parameter geben an, wie die Kamera im Raum positioniert und orientiert ist (Beyerer, Puente León & Frese 2016), vgl. Kapitel 2.5.1. Das Weltkoordinatensystem wird im Falle der Kompensation

von Achsbewegungen mit Steuerungsdaten mit dem Werkzeugmaschinenkoordinatensystem gleichgesetzt.

Die extrinsischen Parameter werden bestimmt, indem in mehreren Frames tatsächliche Achspositionen im Werkzeugmaschinenkoordinatensystem (in mm) tatsächlichen Koordinaten in aufgenommenen Videoframes (in Pixeln) gegenübergestellt werden. Die Kameraposition, Orientierung und Einstellung (insb. Brennweite) bleiben dabei unverändert. Im genutzten Datensatz wird ein auf dem Fahrständer der Maschine angebrachtes Schachbrettmuster genutzt, um Positionen im Werkzeugmaschinenkoordinatensystem (Positionen des Fahrständers) mit Positionen im Bildkoordinatensystem (Positionen des Schachbrettmusters am Fahrständer) zu korrelieren, siehe Abbildung 6-17. Die Lage des genutzten Schachbrettmusters relativ zum zu kompensierenden Referenzsensor ist dabei bekannt.



Abbildung 6-17: Bilderreihe eines am Fahrständer angebrachten Schachbrettmusters zur Bestimmung der extrinsischen Parameter

Die so bestimmten extrinsischen Parameter beinhalten eine Rotationsmatrix und einen Translationsvektor, mit denen die Werkzeugmaschinenkoordinaten in die entsprechenden Kamerakordinaten umgerechnet werden (Abbildung 6-15 c)), vgl. (Beyerer, Puente León & Frese 2016). Mit den von der Maschinensteuerung zur Verfügung gestellten Achspositionen (in mm) werden dadurch für jeden Frame Verschiebungsanteile in Pixeln in x- und y- Richtung des Bildbereichs bestimmt (Abbildung 6-15 d)).

Um eine Auswirkung der unterschiedlichen Abtastfrequenzen von Video und Maschinensteuerung zu verhindern, werden vor der Verschiebung die Abtastfrequenzen durch Upsampling der Achsdaten angeglichen sowie die Achspositionen über die Zeit geglättet. Andernfalls könnten Frequenzen der Compensation scheinbare Frequenzen in der späteren Schwingungsanalyse hervorrufen.

Die Differenz der so bestimmten Kamerakoordinaten bzw. Bildkoordinaten zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten mit unterschiedlichen Positionen im Werkzeugmaschinenkoordinatensystem ergibt somit eine räumliche Verschiebung. Die so für jeden Bildframe gewonnenen Verschiebungsvektoren mit einer Länge in Pixeln werden dann wie bei der Tracking-basierten Vorgehensweise zur entsprechenden Verschiebung aller Videoframes genutzt (Abbildung 6-15 e)), vgl. (A_Flohr 2019).

Abbildung 6-18 zeigt das Ergebnis der Achsdaten-basierten Kompensation anhand originaler und kompensierter Videoframes. Als Ausgangsvideo dient das gleiche Video, wie zur in Abbildung 6-13 dargestellten Tracking-basierten Kompensation. Der zeitliche Abstand der Frames $t=0$ bis $t=4$ beträgt analog fünf Sekunden beziehungsweise 10.000 Frames, die auf die bewegungskompensierte Spindelnahe mitsamt angebrachtem Beschleunigungssensor zugeschnitten sind.

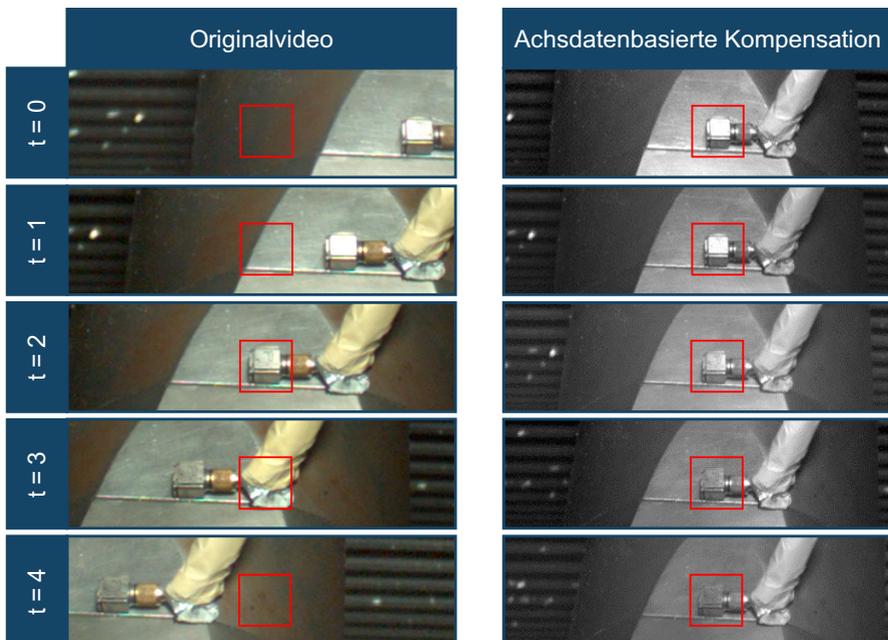


Abbildung 6-18: Gegenüberstellung von Originalvideo mit bewegter Achse und Achsdaten-kompensiertem Video: Stabilisierung der ROI mit Beschleunigungssensor an der Spindelnahe

Im Originalvideo zeigt sich die Achsbewegung während der Planfräsoption von rechts nach links in der Bildebene. In der durch Achsdaten kompensierten Bildreihe ist die Stabilisierung des Referenzsensors in der ROI zu erkennen, siehe Abbildung 6-18 rechts. Die durch die Relativbewegung der Spindelnase bedingte Änderung der Perspektive und Änderung der Beleuchtung ist ebenso zu erkennen. Im Vergleich zur Tracking-basierten Kompensation (siehe Kapitel 6.5.1) ist im Achsdaten-kompensierten Video zunächst kein Unterschied zu erkennen.

In Kapitel 7.2.2 werden die Ergebnisse der Schwingungsanalyse mit durch Achsdaten stabilisierten Videoframes dargestellt.

6.6 Zusammenfassung von Ansätzen zur Kompensation von Störeinflüssen

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ansätze zur Kompensation und Vermeidung von Störeinflüssen bei der phasenbasierten Analyse von Videodaten aus Werkzeugmaschinen werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Zur Kompensation von beim Fräsen durch den Bildbereich fliegenden Spänen wurde eine Vorgehensweise vorgestellt, die die Detektion von Spänen durch einen Vergleich von Videoframes nutzt und entsprechende Bildbereiche ersetzt. Es konnte durch den entwickelten Ansatz im Datensatz eine deutliche Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses im entsprechenden Raumfrequenzbereich gezeigt werden.

Darüber hinaus wurde der Effekt der bloßen Anwesenheit eines rotierenden Werkzeugs im Bildbereich und der Effekt indirekt verursachter Reflektionen auf die videobasierte Analyse identifiziert. Es konnte gezeigt werden, dass durch geeignete Wahl der analysierten ROI sowie des analysierten Raumfrequenzbereichs Störeinflüsse deutlich abgemindert werden können.

Abschließend wurden Möglichkeiten zur Kompensation von Achsbewegungen und damit zur Stabilisierung von ROI bei Relativbewegungen zwischen Kamera und analysiertem Objekt entwickelt und untersucht. Die Kompensation ist insbesondere bei feststehender Kamera und relativ beweglichen zu analysierenden Objekten, zum Beispiel bei Achsbewegungen mit Werkstücken oder Spindeln relevant. Hierfür wurde zum einen eine auf Tracking basierende, zum anderen eine auf NC-Achsdaten basierende Vorgehensweise entwickelt und dargelegt.

Tabelle 6-1 stellt die untersuchten Einflussgrößen und Lösungsansätze zusammenfassend dar.

Tabelle 6-1 Untersuchte Ansätze zur Kompensation und Vermeidung von Störeinflüssen

Einflussgrößen	Lösungsansätze	Kapitel
Späne im Bildbereich	Erkennung und Ersetzen von Bildinhalten mit Spänen durch Vergleich von Videoframes vor der Analyse	6.2
Beleuchtungsfluktuationen durch Werkzeugrotation	Auswahl des zu analysierenden Raumfrequenzbereichs, sodass im Datensatz eine Beeinflussung durch Reflektionen des Werkzeugs vermieden wird	6.3
Werkzeugrotation im Bildbereich	Auswahl der zu analysierenden Raumfrequenzbereiche, sodass im Datensatz eine Beeinflussung durch das Werkzeug im Bildbereich vermieden wird	6.4
Achsbewegungen	<ul style="list-style-type: none"> a) Tracking von Referenzpunkten, anschließende Stabilisierung durch Verschiebung der Videoframes vor der Analyse b) Umrechnung von Achsdaten in entsprechende Verschiebungen von Videoframes, anschließende Stabilisierung durch Verschiebung der Videoframes vor der Analyse 	6.5

7 Validierung in Zerspanversuchen

Im Anschluss an die grundlegende Untersuchung von Einflussgrößen der phasenbasierten Analyse sowie die Entwicklung von Ansätzen zur Vermeidung und Kompensation von negativen Einflussgrößen (Kapitel 5 und 6) werden die Erkenntnisse im Folgenden anhand von Videodaten realer Zerspanprozesse validiert. Hierfür werden zum einen Videodaten der Zerspannung von feststehenden Versuchswerkstücken (Kapitel 7.1), zum anderen Videodaten einer relativ beweglichen Maschinenspindel (Kapitel 7.2) genutzt. Abschließend werden die Ergebnisse auf die qualitative Verstärkung kleiner Bewegungen in Videodaten übertragen (Kapitel 7.3).

7.1 Analyse von Werkstückschwingungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der vier durchgeführten Versuchsreihen zur Analyse von Werkstückschwingungen bei einer Schafffräsoption dargestellt.

Bei der Darstellung der Versuchsreihen mit unterschiedlichen Zerspanungs- und Schwingungsparametern wird jeweils zunächst der Verlauf des Referenzsignals des Beschleunigungssensors als Verlagerung dargestellt.¹⁹ Aufgrund der Unsicherheiten bei der Ableitung von Verlagerungen aus Beschleunigungssignalen ist die absolute Größe der Verlagerungen nur als Anhaltspunkt und zum Vergleich der einzelnen Messungen und Fräsesegmente, nicht aber als absolute Messung anzusehen. Anschließend wird das Spektrum der aus den Videodaten extrahierten Phase für alle fünf aufeinanderfolgenden Fräsesegmente dargestellt. Die Phase ist die über die ROI gemittelte Phaseninformation der untersten Pyramidenebene (vgl. (Kooij & van Gemert 2016; Chen et al. 2015)), in der die geringsten hier relevanten Störeinflüsse erwartet werden (vgl. Kapitel 6.3 und 6.4). Die ROI-Position auf der Werkstückkante wird für jedes Werkstück individuell festgelegt, um den Einfluss unterschiedlicher individueller Werkstücke soweit wie möglich zu reduzieren.

Zum Vergleich des Spektrums des Referenzsignals mit dem durch die Videoanalyse gewonnenen Signal wird für die Versuchsreihen abschließend das Kohärenzspektrum der beiden Signale dargestellt. Ziel ist es, hierdurch die Qualität der Phaseninformationen im Vergleich zur jeweiligen Referenzmessung zu bewerten.

¹⁹ Hierfür wird das Beschleunigungssignal um Störfrequenzen gefiltert, trendbereinigt und zweifach integriert.

7.1.1 Vorgehensweise

Die Versuchsparameter der Fräsversuche werden nach für die Videoanalyse relevanten Faktoren gewählt: Von Bedeutung ist zum einen, ob unterschiedliche Frequenzen, mit denen das Werkstück angeregt wird, klar identifiziert werden können. Zum anderen ist von Bedeutung, wie sich die Signalqualität der extrahierten Phaseninformation bei unterschiedlich großen Amplituden verhält. Hierfür werden zum einen in verschiedenen Versuchen die Spindeldrehzahl (Änderung der Messereingriffsfrequenz) und Schnittparameter in einem für den zerspanten Werkstoff und das Werkzeug zulässigen Bereich variiert, in dem ein stabiler Fräsprozess vorliegt.

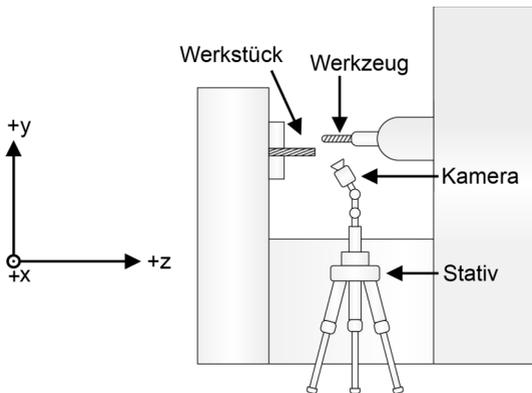


Abbildung 7-1 Schematische Darstellung der Anordnung von Kamera, Werkstück, Werkzeug und Maschinenachsen zur Analyse von Werkstückschwingungen

Zudem werden durch die sukzessive Abnahme der Wandstärke des Werkstücks in jedem Versuch zunehmende steigende Schwingungsamplituden hervorgerufen. Ziel der verschiedenen angeregten Frequenzen sowie der Variation von Schwingungsamplituden (in einem für Fräsprozesse üblichen Bereich) ist es, Ergebnisse mit möglichst guter Generalisierbarkeit zu erhalten.

Ein Schafffräser zerspannt dafür in jedem Versuch mit einer Eingriffsbreite von 40 mm und einer Schnitttiefe von 5 mm einen Aluminiumblock mit den Maßen 100x80x30 mm. Die Kamera ist unterhalb von Werkzeug und Werkstück angeordnet und filmt das Werkstück (vgl. Abbildung 7-1). Der Aluminiumblock wird in jedem Versuch in fünf Fräsoptionen (hier: Frässegmenten) mit gleichen Schnittparametern auf 5 mm Wandstärke zerspannt und ist in einem Maschinenschraubstock eingespannt. Abbildung 7-2 zeigt

anhand von Videoframes der Zerspanung eines Versuchswerkstücks den Ablauf der Zerspanversuche beim Schaftfräsen. Der genutzte Werkzeugtyp ist ein entsprechend den Schnittparametern und dem Werkstückmaterial gewählter Vollhartmetall-Schaftfräser (Schruppfräser) mit vier Schneiden vom Typ Atorn 16628116 (Hommel Hercules Werkzeughandel GmbH & Co. KG 2019). Alle Versuche werden im Gleichlaufräsen durchgeführt.

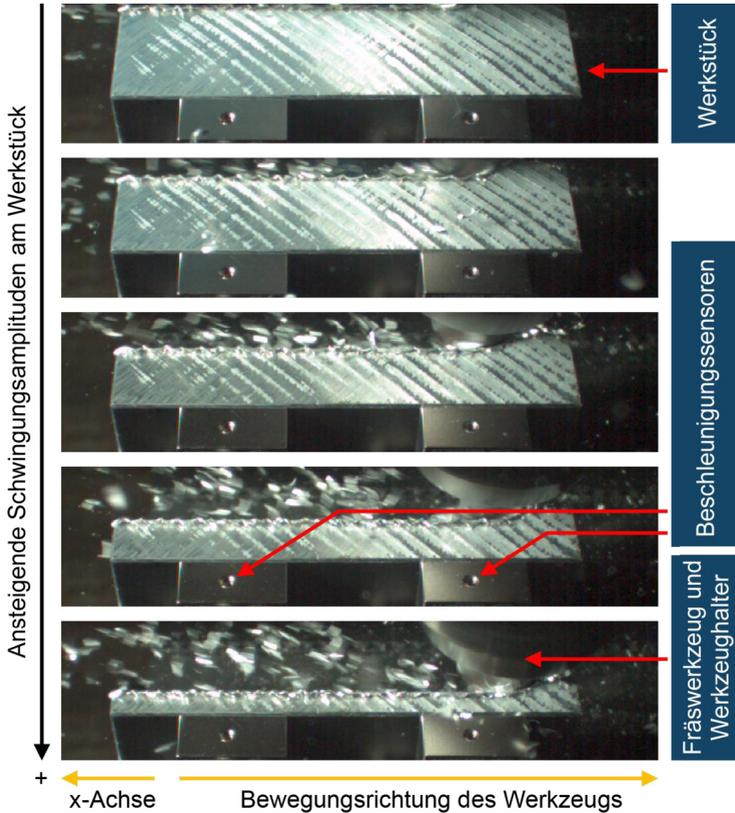


Abbildung 7-2: Videoframes aus den Frässegmenten eines Versuchswerkstücks

Unterschiedliche Frequenzen werden im Versuchsaufbau durch die Veränderung der Spindeldrehzahl erreicht. Hierfür werden den Herstellervorgaben des genutzten Schaftfräasers mit 20 mm Durchmesser entsprechend Schnittgeschwindigkeiten von 200 mm/min und 400 mm/min angewandt, was Spindeldrehzahlen 3185 1/min bzw.

6370 1/min entspricht. Hieraus ergeben sich mit dem Schafffräser mit vier Schneiden Zahnengriffsfrequenzen von 212,3 Hz bzw. 424,7 Hz.

Neben der Spindeldrehzahl wird der Zahnvorschub in den Stufen 0,04 mm/U und 0,08 mm/U variiert, um die Anregung des Werkstücks durch den Fräsprozess zu variieren. Aus den Zahnvorschüben ergeben sich je nach Spindeldrehzahl Vorschubgeschwindigkeiten von 500 mm/min bis 2000 mm/min.

Zur Validierung wurden die in Tabelle 7-1 dargestellten Versuchsreihen durchgeführt. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse werden in den Kapiteln 7.1.2 und 7.1.3 die Versuchsreihen 1 und 4 beschrieben, da sie einerseits stark unterschiedliche Schwingungsfrequenzen aufweisen, andererseits die maximalen untersuchten Schwingungsamplituden (Versuchsreihe 1) und minimalen Schwingungsamplituden (Versuchsreihe 4) aufweisen.²⁰ Die Versuchsparameter werden so gewählt, dass die für Werkstück und Werkzeug empfohlenen Maximalwerte für Zahnvorschub und Schnittgeschwindigkeit jeweils zu 100% oder zu 50% ausgenutzt werden. Hieraus ergeben sich vier Versuchsreihen mit unterschiedlichem Zahnvorschub und Schnittgeschwindigkeit. In der Versuchsreihe mit 100% Zahnvorschub und 100% Schnittgeschwindigkeit werden maximale Schwingungsamplituden bei hohen Schwingungsfrequenzen erwartet, bei 50% Zahnvorschub und 50% Schnittgeschwindigkeit werden minimale Schwingungsamplituden bei niedrigen Schwingungsfrequenzen erwartet.

Tabelle 7-1: Schnittparameter der Versuche zur Analyse von Werkstückschwingungen, Pfeile vor Werten zeigen hohe und niedrige Faktorstufen

Ver- suchs- reihe	Spindeldreh- zahl	Zahnvor- schub	Schnittge- schwindig- keit	Vorschub	Zahnein- griffsfre- quenz
1	↑ 6370 1/min	↑ 0,08 mm/U	↑ 400 m/min	↑ 2000 mm/min	↑ 424,7 Hz
2	↑ 6370 1/min	↓ 0,04 mm/U	↑ 400 m/min	↔ 1000 mm/min	↑ 424,7 Hz
3	↓ 3185 1/min	↑ 0,08 mm/U	↓ 200 m/min	↔ 1000 mm/min	↓ 212,3 Hz
4	↓ 3185 1/min	↓ 0,04 mm/U	↓ 200 m/min	↓ 500 mm/min	↓ 212,3 Hz

Am Werkstück sind bei allen Versuchen jeweils zwei Beschleunigungssensoren vom Typ KS943B.10/01 Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K. befestigt, die

²⁰ Versuchsreihen 2 und 3 zeigen analoge Ergebnisse mit entsprechend veränderten Amplituden und Frequenzen.

als Referenzsignal dienen (siehe Abbildung 7-3). Der Einfluss der Sensoren auf das Schwingungsverhalten des Werkstücks ist nicht relevant, da er sowohl durch die Referenzmessung, als auch in den Videoaufnahmen gleichermaßen mit erfasst wird.

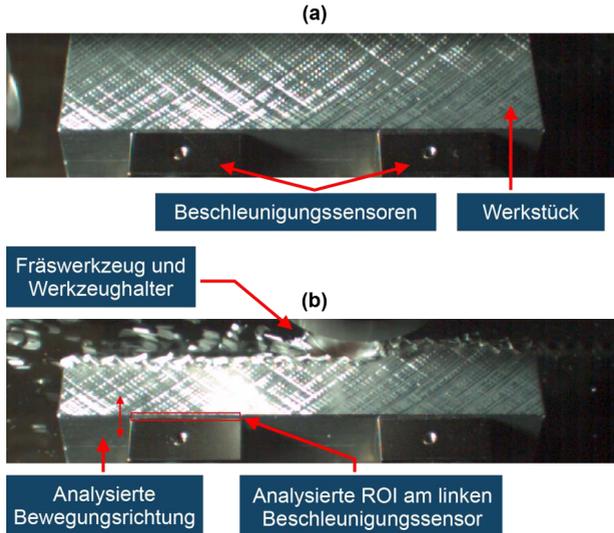


Abbildung 7-3: Standbilder aus Aufnahmen zur Analyse von Werkstückschwingungen: a) Standbild vor Fräsoperation, b) Standbild während Fräsoperation mit am linken Beschleunigungssensor analysierter ROI

Das Schwingungsverhalten des Werkstücks verändert sich durch die Abnahme der Wandstärke in jedem der fünf Frässegmente, wobei der Materialabtrag sowohl zu einer Massereduktion als auch zu einer Steifigkeitsreduktion führt. Durch die Massereduktion steigen die Eigenfrequenzen des Werkstücks bei kleineren Schwingungsamplituden, durch die Steifigkeitsreduktion sinken die Eigenfrequenzen, die Amplituden werden größer. Es wird davon ausgegangen, dass der Effekt durch die Steifigkeitsreduktion deutlich größer ist, als durch die Masseabnahme (Klocke 2018) und dass insbesondere die Zahneingriffsfrequenzen und (Sub-) Harmonische der Zahneingriffsfrequenzen dominieren.

Alle Versuche werden in Trockenzerspanung durchgeführt, um zusätzliche Effekte durch Kühlschmiermittel im Bildbereich der Videoaufnahme zu vermeiden. Der Verzicht auf Kühlschmierstoffe stellt zum Beispiel aus ökologischen Gesichtspunkten in vielen Bereichen einen Trend dar. Daher ist der Fokus auf Trockenzerspanung zwar eine

deutliche, für viele Bereiche aber zulässige Einschränkung. Versuche mit Minimalmengenschmierung werden nicht durchgeführt. Aufgrund der dabei auftretenden geringen Tröpfchengrößen der Schmierstoffe wird jedoch von vergleichbaren Resultaten ausgegangen. Jeder Versuch wird zur Validierung der Ergebnisse drei Mal mit gleichen Schnittparametern und gleichen Aufnahmeparametern wiederholt.

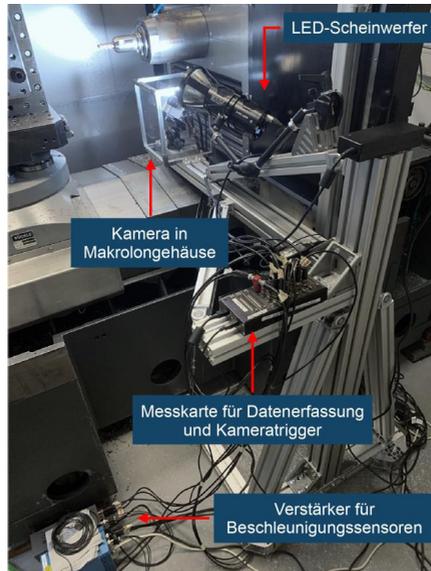


Abbildung 7-4: Messaufbau für Werkstückschwingungen

Die Kamera ist zur Analyse der Werkstückschwingungen unterhalb der Maschinenspinde auf einem Stativ aus Aluprofilen befestigt, siehe Abbildung 7-4 und Kapitel 4.1, sowie 4.2.

Das Kamerasystem bildet das Werkstück im Versuchsaufbau mit einer Pixelgröße von ca. 5,4 Pixel/mm ab. Die Auflösung beträgt 608x150 Pixel, was bei einer Bildwiederholrate von 2000 Hz Aufnahmen bis ca. 204.000 Frames bzw. 102 Sekunden und damit ausreichend lange Aufnahmedauern, auch für die Versuche mit minimaler Vorschubgeschwindigkeit, ermöglicht. Abbildung 7-3 zeigt Einzelbilder aus der Aufnahme im Versuchsaufbau vor der Zerspanung (Abbildung 7-3 a)) und während der Zerspanung mit den entsprechenden ausgewerteten Bildbereichen und der Analyserichtung (Abbildung 7-3 b)).

Die Aufnahme wird durch einen LED-Scheinwerfer vom Typ WASP 100-C beleuchtet. Die Position des Scheinwerfers ist so gewählt, dass unter den räumlichen Randbedingungen ein Kompromiss aus heller Ausleuchtung und gleichzeitig hohem Kontrast an den zu analysierenden Werkstückkanten erzielt werden kann.

7.1.2 Versuche mit hoher Spindeldrehzahl und hohem Zahnvorschub

Abbildung 7-5 zeigt die Verlagerung in den fünf Frässegmenten bei einer Spindeldrehzahl von 6370 1/min und einem Zahnvorschub von 0,08 mm/U und damit bei der höchsten untersuchten Drehzahl und dem höchstem untersuchten Zahnvorschub. Die Vorschubgeschwindigkeit ist mit 2000 mm/min ebenfalls am höchsten. Die Schnittparameter nutzen sowohl bei Zahnvorschub als auch der Schnittgeschwindigkeit die vom Werkzeughersteller für den zerspannten Werkstoff maximal empfohlenen Werte aus.

Am Referenz-Beschleunigungssensor zeigt sich die erwartete Zunahme der Amplituden in den aufeinanderfolgenden Segmenten, die mit der Steifigkeitsreduktion des Werkstücks durch schrittweise Abnahme der Wandstärke einhergehen. Die maximalen Amplituden liegen im letzten Frässegment bei ca. 50 μm , was bei einer Pixeldichte von ca. 5,4 Px/mm im Versuchsaufbau ca. 0,27 Px entspricht. In den vorangehenden Frässegmenten sind die Amplituden entsprechend geringer.

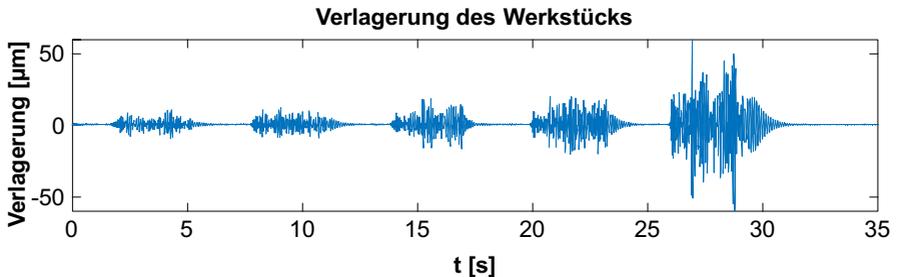


Abbildung 7-5: Aus Beschleunigungssignal nach der Zeit integrierte Verlagerung des Werkstücks im Fräsversuch bei Drehzahl 6370 1/min und Vorschub 2000 mm/min

Abbildung 7-6 bis Abbildung 7-8 stellen die Leistungsspektren für das videobasierte Signal sowie das Referenzsignal für die fünf aufeinanderfolgenden Frässegmente dar. Einzelne Videoframes in den Diagrammen geben jeweils beispielhaft Orientierung zum betreffenden Frässegment.

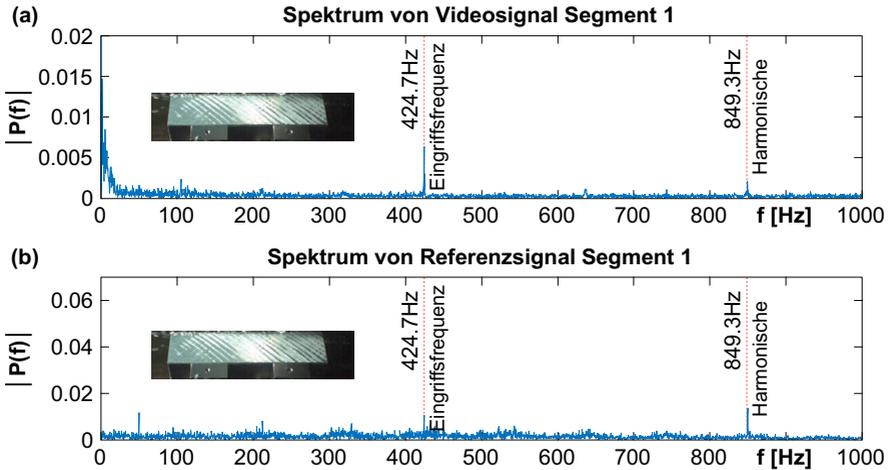


Abbildung 7-6: Gegenüberstellung der Spektren von Videosignal und Referenzsignal für erstes Frässegment bei Drehzahl 6370 1/min und Vorschub 2000 mm/min

Ab dem ersten Frässegment (Abbildung 7-6 a)) sind im Videosignal bei der Zahneingriffsfrequenz von 424,7 Hz sowie der folgenden Harmonischen bei 849,3 Hz Peaks zu erkennen, die mit den höheren Amplituden in den folgenden Frässegmenten ansteigen. Im Referenzsignal sind die Frequenzen der Zahneingriffsfrequenz und ersten Harmonischen ebenfalls ausgeprägt, der Anstieg der Amplituden ist wie beim Videosignal besonders im vierten und fünften Frässegment ausgeprägt. Im Videosignal und im Referenzsignal zeigen sich insbesondere im fünften Segment mit hohem Signal-Rausch-Verhältnis zudem harmonische Frequenzen der Spindeldrehzahl 106,2 Hz (Abbildung 7-8 i) und j)). Darüber hinaus zeigt das Referenzsignal in Ruhe sowie auch in allen Frässegmenten einen konstanten Peak bei 50 Hz, der auf die Netzfrequenz zurückzuführen ist. Im niederfrequenten Bereich unter 25 Hz zeigt das Videosignal zudem stärkeres Rauschen als das Referenzsignal (vgl. Abbildung 7-6 a) und b)). Eine Vergleichbarkeit der Höhe der jeweiligen Leistungsspektren ist durch die unterschiedlichen Datenquellen (Farb- bzw. Grauwerte einzelner Pixel bei Kamera und Werte elektrischer Spannung bei Beschleunigungssensor) nicht gegeben. Da sich die in den Frässegmenten auftretenden Leistungsspektren in ihrer Höhe stark unterscheiden sind die Skalierungen der y-Achsen zudem zum Teil zur besseren Lesbarkeit angepasst.

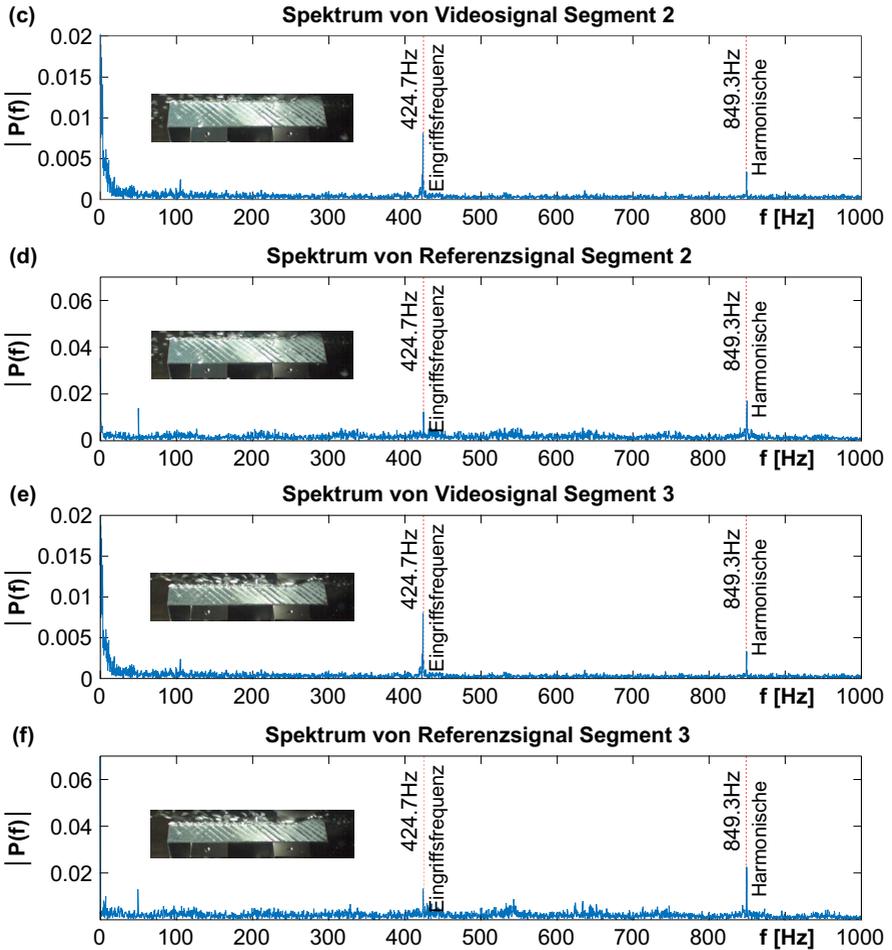


Abbildung 7-7: Gegenüberstellung der Spektren von Videosignal und Referenzsignal für zweites und drittes Frässegment bei Drehzahl 6370 1/min und Vorschub 2000 mm/min

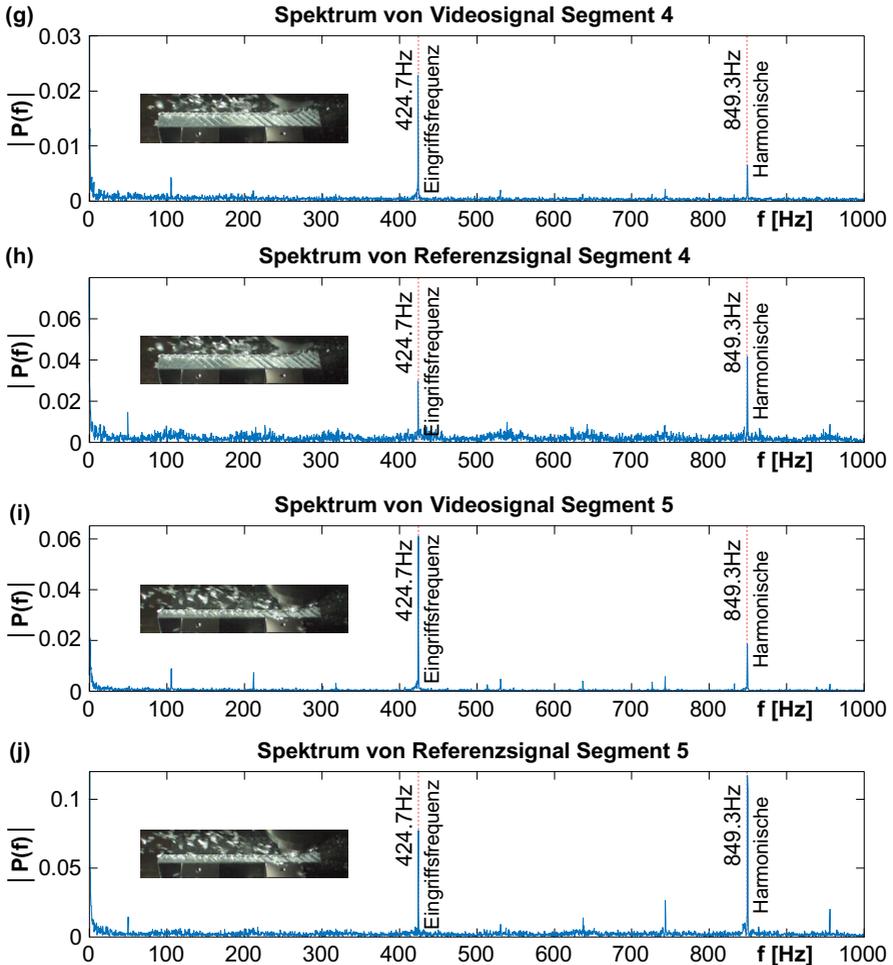


Abbildung 7-8: Gegenüberstellung der Spektren von Videosignal und Referenzsignal für viertes und fünftes Frässegment bei Drehzahl 6370 1/min und Vorschub 2000 mm/min

Das in Abbildung 7-9 dargestellte Kohärenzspektrum (vgl. Kapitel 2.2.5) zeigt eine mit steigender Amplitude in den Frässegmenten (vgl. Abbildung 7-2) zunehmende Kohärenz bei der Zahneingriffsfrequenz sowie der ersten Harmonischen.

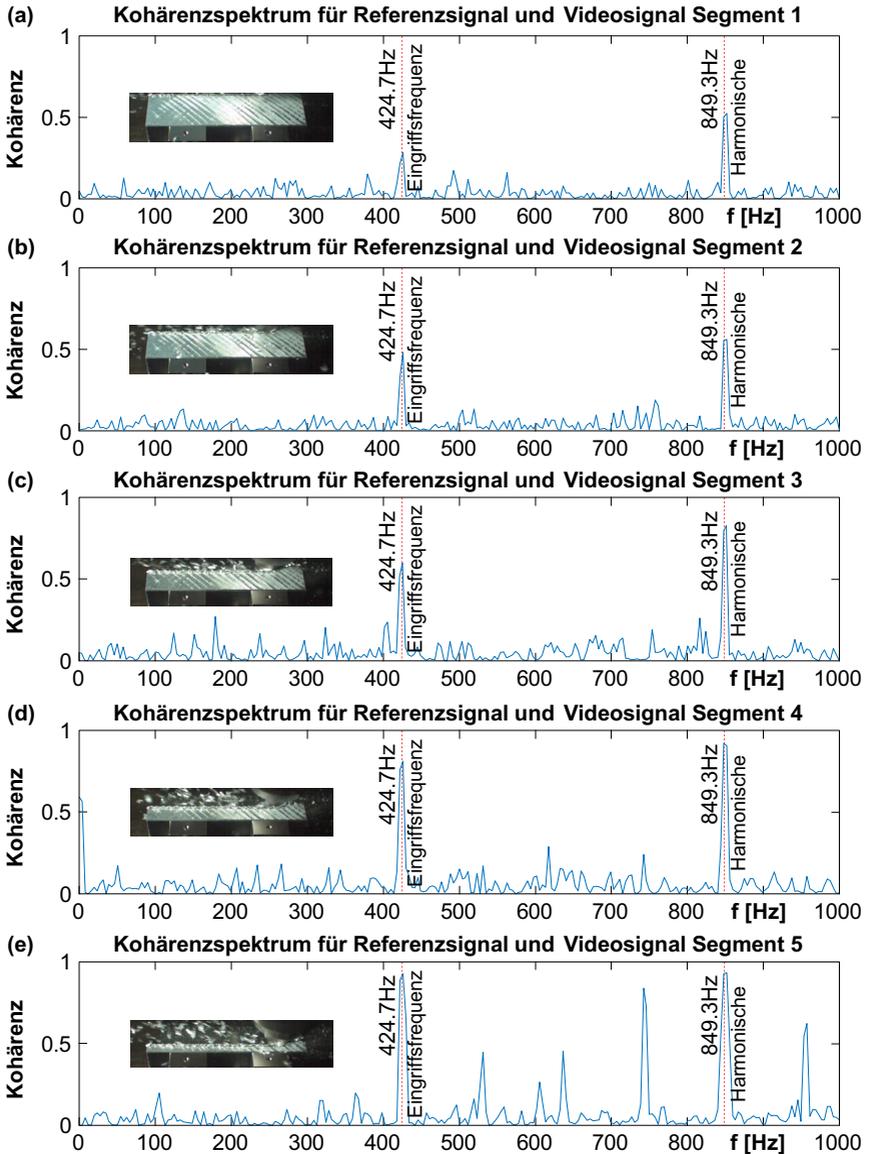


Abbildung 7-9: Kohärenzspektrum von Referenzsignal und Videoanalyse für Drehzahl 6370 1/min Vorschub 2000 mm/min: Werte nahe 1 zeigen starke lineare Abhängigkeit

Das Kohärenzspektrum des Frässegments mit größter Amplitude (Segment 5) zeigt zudem eine hohe Kohärenz bei Vielfachen der Spindelfrequenz (106,2 Hz) oberhalb der Zahneingriffsfrequenz (424,7 Hz). In Frequenzbereichen mit stärkerem Rauschanteil und ohne deutliche Peaks im Referenzsignal und im Videosignal ist die Kohärenz wie erwartet niedrig ausgeprägt.

Es zeigt sich damit, dass die angeregten Frequenzen (Eingriffsfrequenz und Harmonische) in der Versuchsreihe mit hoher Spindeldrehzahl und hohem Zahnvorschub (hohe Frequenzen und Amplituden) deutlich und auch bei hoher Werkstückdicke (Frässegment 1) identifiziert werden können. Dabei stimmt das aus der Phaseninformation gewonnene Signal erwartungsgemäß umso besser mit dem Referenzsignal überein, umso höher die Amplitude ist, zu erkennen durch den Anstieg des Kohärenzspektrums bei den angeregten Frequenzen mit abnehmender Werkstückdicke. Für niedrige Frequenzen unter etwa 25 Hz weist das aus der Phaseninformation gewonnene Spektrum ein deutliches Rauschen auf.

7.1.3 Versuche mit niedriger Spindeldrehzahl und niedrigem Zahnvorschub

Abbildung 7-10 zeigt die Verlagerung in den fünf Frässegmenten bei einer Spindeldrehzahl von 3185 1/min und einem Zahnvorschub von 0,04 mm/U und damit bei niedriger Drehzahl und niedrigem Zahnvorschub (Tabelle 7-1, Versuchsreihe 4). Die Vorschubgeschwindigkeit liegt bei 500 mm/min. Die Schnittparameter liegen für Zahnvorschub und Schnittgeschwindigkeit jeweils bei der Hälfte der vom Werkzeughersteller für den zerspannten Werkstoff maximal empfohlenen Werte.

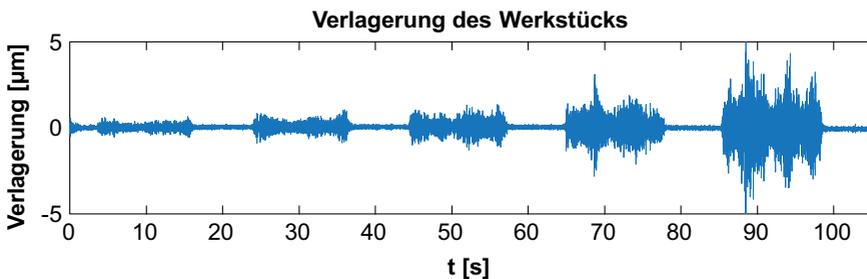


Abbildung 7-10: Aus Beschleunigungssignal integrierte Verlagerung des Werkstücks im Fräsversuch bei Drehzahl 3185 1/min und Vorschub 500 mm/min

Die maximalen Amplituden treten im vierten und fünften Frässegment auf und liegen bei $5\ \mu\text{m}$, was bei einer Pixeldichte von ca. $5,4\ \text{Px/mm}$ im Versuchsaufbau ca. $0,027\ \text{Px}$ entspricht. Die Amplituden sind damit die geringsten der durchgeführten Versuche.

Abbildung 7-11 stellt die Leistungsspektren für das videobasierte Signal der fünf aufeinanderfolgenden Frässegmente dar. Ab dem ersten Frässegment ist bei der Zahneingriffsfrequenz von $212,3\ \text{Hz}$ ein deutlicher Peak vorhanden (Abbildung 7-11 b)). Die Amplitude bei der Zahneingriffsfrequenz ist im vierten und fünften Frässegment am höchsten (Abbildung 7-11 d) und e)), eine stetige Zunahme der Amplituden in den aufeinanderfolgenden Frässegmenten ist nicht zu erkennen, lediglich die Segmente vier und fünf weisen eine höhere Amplitude auf. Segment vier (Abbildung 7-11 d)) weist im Gegensatz zum Referenzsignal eine höhere Amplitude als Segment fünf (Abbildung 7-11 e)) auf. Das Signal-Rausch-Verhältnis ist im Einklang mit den geringeren Amplituden niedriger als in den restlichen Versuchsreihen. Es zeigt sich jedoch, dass Peaks bei der Zahneingriffsfrequenz weiter ab dem ersten Frässegment identifiziert werden.

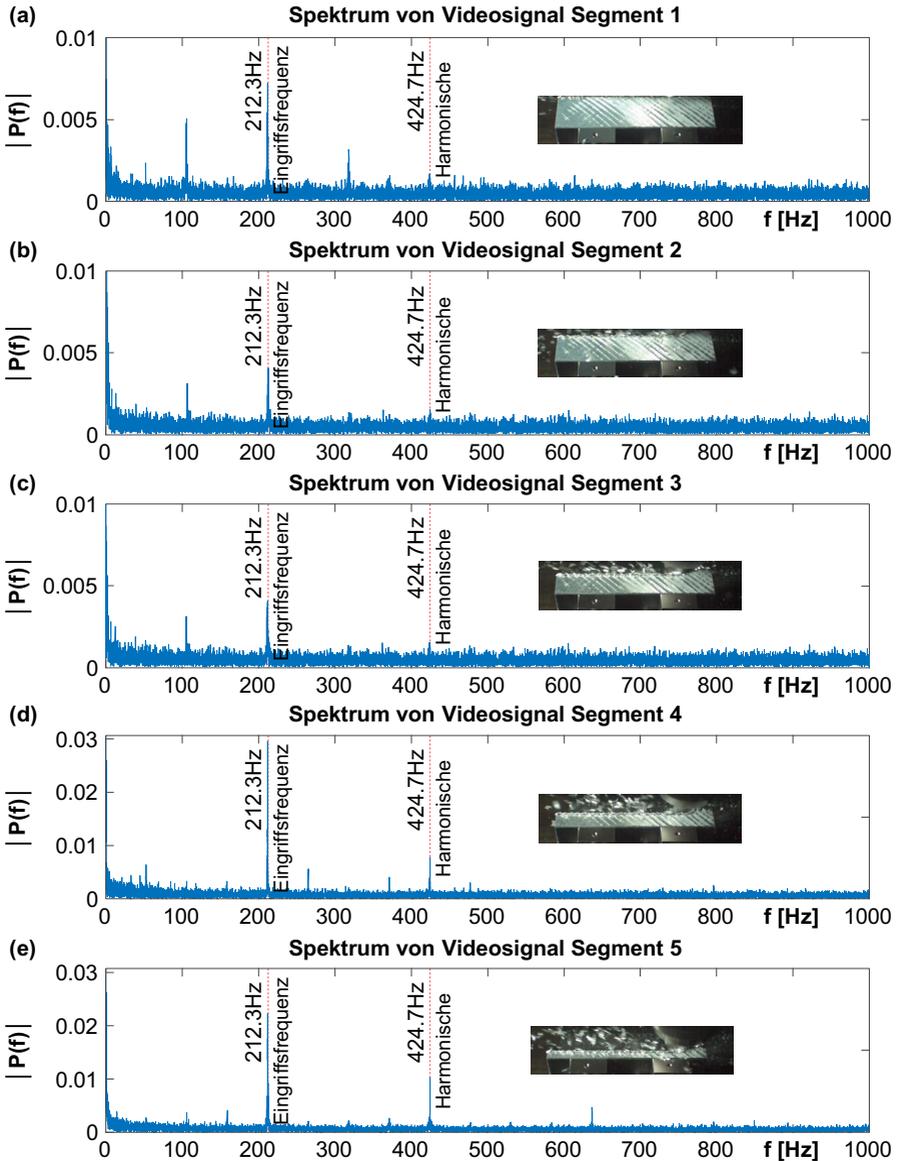


Abbildung 7-11: Spektren des Videosignals für Frässegmente mit ansteigenden Amplituden bei Drehzahl 3185 1/min und Vorschub 500 mm/min

Das in Abbildung 7-12 dargestellte Kohärenzspektrum zeigt insbesondere für die Frässegmente vier und fünf (Abbildung 7-12 d) und e)), die im Videosignal die größten Amplituden aufweisen, eine hohe Kohärenz bei der Spindeldrehzahlfrequenz und ersten Harmonischen (212,3 Hz und 424,7 Hz). Ebenfalls ist die Kohärenz wie in den anderen Versuchsreihen bei Vielfachen der Spindeldrehzahl (hier: 53,1 Hz) stärker ausgeprägt. Die Frässegmente mit geringeren Amplituden, insbesondere die Segmente eins bis drei mit geringerem Signal-Rausch-Verhältnis im Videosignal (Abbildung 7-12 a) bis c)), zeigen geringere Peaks im Kohärenzspektrum.

Es wird geschlussfolgert, dass mit der videobasierten Analyse im Versuch Frequenzen von Werkstückschwingungen deutlich identifiziert werden können. Die Übereinstimmung mit dem Referenzsignal ist wie erwartet, umso besser, desto höher die analysierte Amplitude ist. Folglich zeigt sich dort eine hohe Übereinstimmung im Kohärenzspektrum. In den Frequenzbereichen zwischen den Zahneingriffsfrequenzen mit deutlich niedrigeren Amplituden zeigt sich folglich eine geringere Kohärenz und damit geringere Übereinstimmung. Die durchgeführten Versuche mit hoher Spindeldrehzahl und hohem Vorschub (7.1.2) sowie niedriger Spindeldrehzahl und niedrigem Vorschub (Kapitel 7.1.3) bestätigen im Vergleich den Einfluss der Schwingungsamplitude.

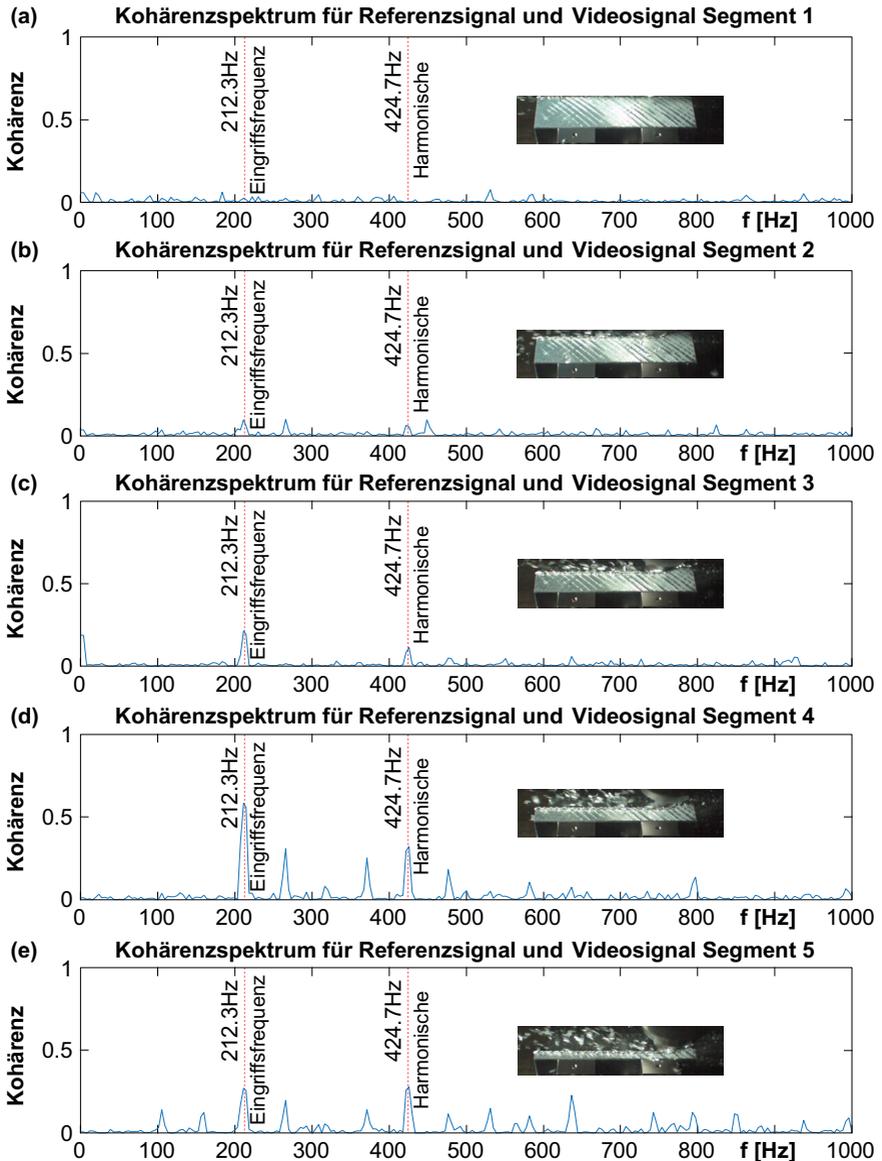


Abbildung 7-12: Kohärenzspektrum von Referenzsignal und Videoanalyse für Drehzahl 3185 1/min Vorschub 500 mm/min: Werte nahe 1 zeigen starke lineare Abhängigkeit

7.1.4 Varianz von Videosignalen unter gleichen Schnittparametern

Zur Validierung der Untersuchungen werden jeweils drei Werkstücke mit gleichem Werkstoff und gleicher Geometrie sowie gleichem Bearbeitungsprogramm wie in den vorangegangenen Versuchsreihen zerspant. Abbildung 7-13 zeigt am Beispiel der Versuchsreihe mit den kleinsten maximalen Amplituden (Drehzahl 3185 1/min, Zahnvorschub 0,04 mm/U, Vorschub 500 mm/min) das Referenzsignal für drei Versuche im fünften Frässegment (höchste Amplituden). Die Frequenzen und Amplituden der Referenzmessung sind bis auf geringe Abweichungen gleich. Ein Einfluss von Werkzeugverschleiß, Schwankungen der Werkstücke oder Ähnlichem kann daher hier vernachlässigt werden.

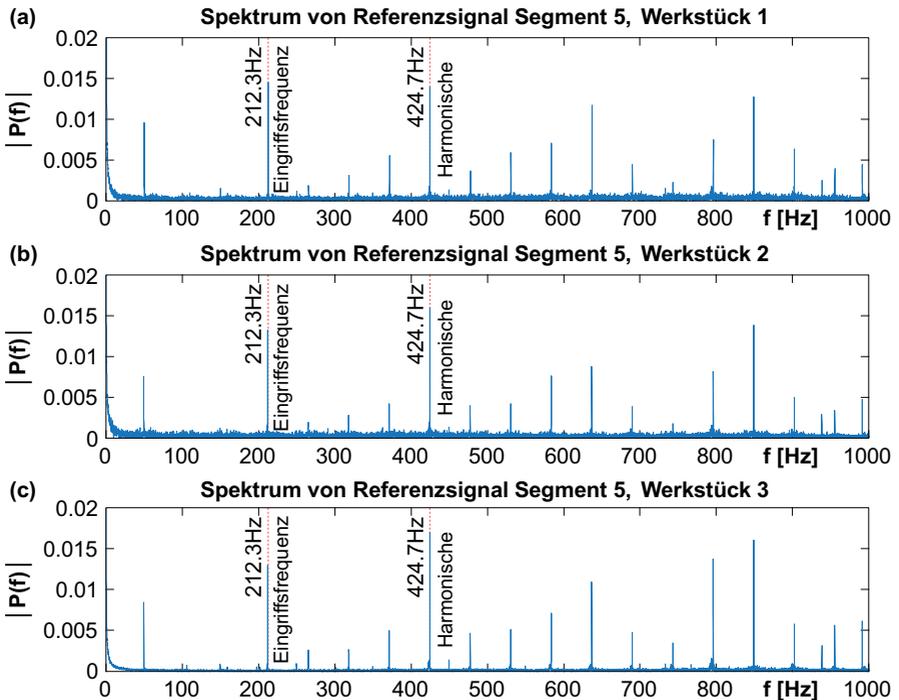


Abbildung 7-13: Spektren des Referenzsignals für drei Versuche mit gleichen Schnittparametern (Drehzahl 3185 1/min, Zahnvorschub 0,04 mm/U, Vorschub 500 mm/min): Nahezu konstante Amplituden in den Versuchen

Abbildung 7-14 stellt dem Referenzsignal die Spektren des Videosignals für die gleichen Versuche gegenüber. Es zeigt sich, dass zwar in allen Versuchen die gleichen Frequenzen identifiziert werden. Auch sind Frequenzen mit hohen Amplituden im Referenzsignal auch im Videosignal deutlich vorhanden. Jedoch weichen die Amplituden der einzelnen Versuche im Videosignal deutlich voneinander ab. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen zur hohen Sensitivität der Vorgehensweise bezüglich der ROI-Auswahl (vgl. Kapitel 5.3).

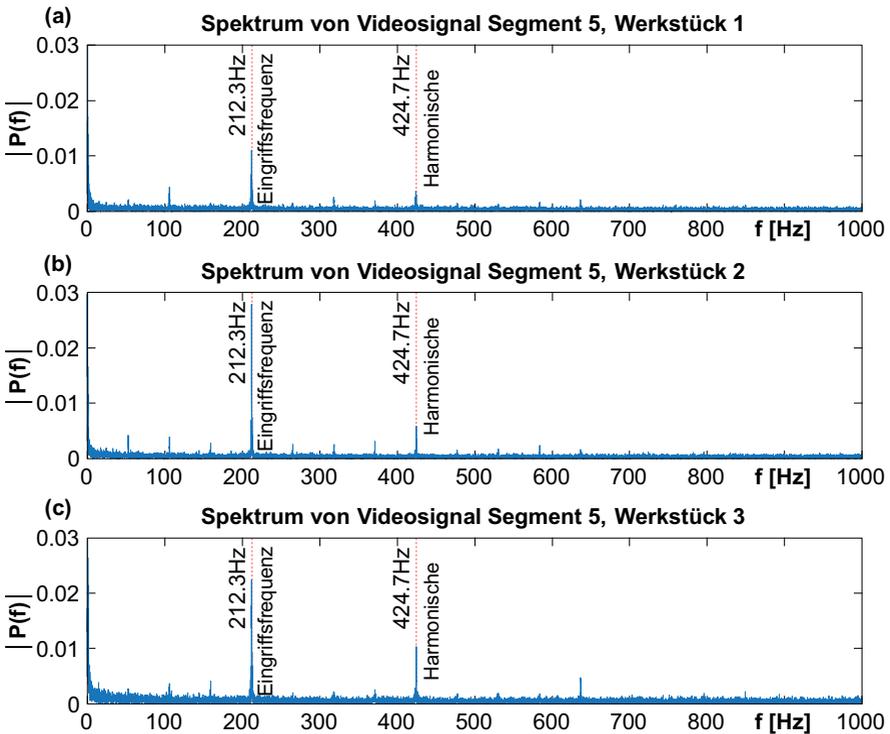


Abbildung 7-14: Spektren des Videosignals für drei Versuche mit gleichen Schnittparametern (Drehzahl 3185 1/min, Zahnvorschub 0,04 mm/U, Vorschub 500 mm/min): Deutliche Unterschiede der Amplituden zwischen den Versuchen

Hieraus kann geschlossen werden, dass die phasenbasierte Schwingungsanalyse nach der untersuchten Vorgehensweise in der Lage ist, auftretende Frequenzen zu identifizieren und bei gleichbleibenden Aufnahmebedingungen auch die Zunahme von

Amplituden zu beschreiben (vgl. Anstieg von Amplituden in Frässegmenten). Gleichwohl können Veränderungen der Aufnahmebedingungen, etwa Variationen der ROI-Position relativ zum Werkstück oder leicht geänderte optische Eigenschaften von Werkstücken, einen deutlichen Einfluss auf die berechneten Amplituden haben. Eine Interpretation der Amplitudenhöhe von veränderlichen Messobjekten wie etwa Werkstücken ist damit nach jetzigem Stand nicht zielführend.

7.2 Analyse von Maschinenschwingungen mit Relativbewegung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Frequenzanalyse mit bewegungskompensierten Videos dargestellt. Als Ausgangsbasis werden Videodaten der relativ bewegten Spindelnase bei einer Planfräsoperation genutzt. Die anschließend mit Achsdaten stabilisierten (Kapitel 7.2.1) oder durch Tracking stabilisierten Videoframes (Kapitel 7.2.3) werden dann wie in Kapitel 7.1 zur videobasierten Schwingungsanalyse genutzt.

Die im Versuch kompensierte Bewegung erstreckt sich über 10.000 Videoframes, was fünf Sekunden Aufnahmedauer entspricht. Der Zeitraum ist so gewählt, dass durch die Daten des Referenzsensors (siehe Abbildung 7-16) von annähernd konstanten Schwingungsamplituden ausgegangen werden kann. Die zu kompensierende x-Achse der Werkzeugmaschine (siehe Abbildung 7-15) bewegt sich mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 1595 mm/min, was bei 10.000 Frames und einer Bildwiederholrate von 2000 Frames pro Sekunde einer Bewegung von ca. 133 mm entspricht. Folglich ergibt sich eine zu kompensierende Bewegung von ca. 13,3 μm pro Frame. Die Pixeldichte an der zu stabilisierenden Spindel beträgt ca. 2,5 Pixel/mm oder 2,5/1000 Pixel/ μm . Hieraus ergibt sich eine zu stabilisierende Bewegung von ca. 0,033 Pixel pro Frame.

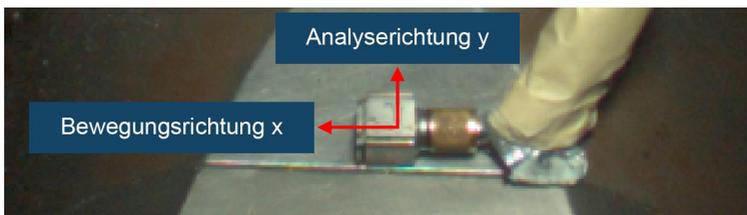


Abbildung 7-15: Bewegungsrichtung und Richtung der Frequenzanalyse in Validierungsversuchen zur Kompensation von Achsbewegungen

Die Spindeldrehzahl beträgt 570 U/min beziehungsweise 9,5 Hz. Bei einer Anzahl von zehn Schneiden am Planfräswerkzeug ergibt sich eine Zahneingriffsfrequenz von

95 Hz. Die Schnitttiefe im quaderförmigen Versuchswerkstück aus C45E Vergütungsstahl beträgt 1,5 mm. Die Parameter des Planfräsprozesses sind im Einklang mit den Werkzeug-, Werkstück- und Maschinencharakteristika gewählt.

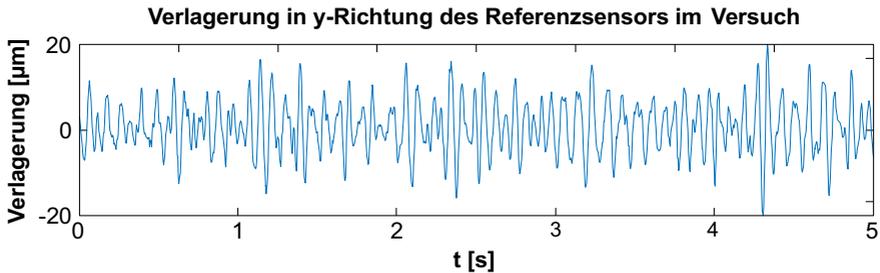


Abbildung 7-16: Aus dem Beschleunigungssignal integrierte Verlagerung des Referenzsensors an der Spindelnase im Planfräsversuch; in der Schwingungsanalyse betrachteter Zeitraum mit „Start“ und „Ende“ markiert

Abbildung 7-16 stellt die Verlagerung der Spindelnase auf Basis von Daten des Referenz-Beschleunigungssensors in y-Richtung dar. Die Verlagerung im analysierten Zeitraum beträgt maximal 40 µm, was bei einer Pixeldichte von ca. 2,5 Px/mm im Versuchsaufbau ca. 0,1 Px entspricht.

7.2.1 Vorgehensweise

Ziel der Analyse von Maschinenschwingungen mit einer Relativbewegung zwischen Kamera und Maschinenkomponente ist es, nach der Validierung der Identifikation von unterschiedlichen Frequenzen und Amplituden an Werkstücken (Kapitel 7.1) die Ansätze zur Kompensation von Achsbewegungen zu validieren. Hierfür wird im Vergleich zur Analyse von Werkstückschwingungen nicht das fixierte Werkstück, sondern die relativ bewegliche Spindelnase während der Zerspanung gefilmt.

Die Kamera ist zur Abbildung der Spindel oberhalb des Werkstücks gegenüber der Hauptspindel positioniert (siehe auch Abbildung 6-2). Sie ist zum Schutz gegen umherfliegende Späne wie in Kapitel 4.2 dargestellt in einem Makrolongehäuse untergebracht und ebenso wie in den Versuchen zur Analyse von Werkstückschwingungen auf einem Stativ montiert, das zur Vermeidung unerwünschter Kamerabewegungen von der Maschine entkoppelt ist, vgl. Kapitel 4.1 und 4.2.

Die Kamera ist ebenfalls mit einem Objektiv vom Typ Ricoh FL-CC3516-2M ausgestattet und bildet den Referenzpunkt der Spindel im Versuchsaufbau mit einer Pixelgröße

von ca. 2,5 Pixel/mm ab. Die im Vergleich zur Analyse von Werkstückschwingungen niedrigere Pixeldichte von 2,5 Px/mm ist dem durch die Spindelbewegung größeren abzubildenden Bildbereich geschuldet.

Auf der Spindelnase ist ein dreiachsiger Beschleunigungssensor vom Typ HBK Brüel&Kjaer 4524-B-001 angebracht, der die Referenzsignale der Versuche liefert.

Zur für die Bewegungskompensation der Hauptspindel notwendigen initialen Kamera-Kalibrierung ist gegenüber der Kamera auf der Spindelabdeckung ein Schachbrettmuster mit Kantenlänge 17 mm angebracht, vgl. Abbildung 7-17.

Die gewählte Kameraauflösung beträgt 1200x500 Pixel, was bei einer Bildwiederholrate von 2000 Hz eine maximale Aufnahmedauer von ca. 36.000 Frames bzw. 18 Sekunden ermöglicht. Die Kameraauflösung ist die mit der eingesetzten Kamerahardware maximal mögliche, mit der die Vorgaben bezüglich Bildwiederholrate (Framerate) und Aufnahmedauer erreicht werden können. Abbildung 7-17 zeigt Einzelbilder aus einer Aufnahme im Versuchsaufbau zu zwei verschiedenen Zeitpunkten während der Zerspannung mit unterschiedlichen Spindelpositionen.

Die Aufnahme wird durch den LED-Scheinwerfer vom Typ WASP 100-C beleuchtet, der auf dem Stativ montiert und oberhalb der Hauptspindel positioniert ist. Die Position des Scheinwerfers ist so gewählt, dass unter den räumlichen Randbedingungen ein Kompromiss aus heller Ausleuchtung über einen breiten Verfahrensweg der Spindel und gleichzeitig hohem Kontrast an der Hauptspindel erzielt werden kann. Abbildung 7-17 a) und b) verdeutlichen durch Helligkeitsunterschiede am Beschleunigungssensor, dass in den Randbereichen des Lichtkegels eine Helligkeitsabnahme auftritt.

Um an der Hauptspindel trotz geringerer Pixelauflösung (2,5 Pixel/mm beim Planfräsen zu 5,4 Px/mm bei der Werkstückanalyse) ausreichend große Schwingungsamplituden zu erzielen, wird auf einen Planfräsprozess mit Stahlwerkstück zurückgegriffen. Das verwendete Werkzeug ist ein Planfräskopf mit 125 mm Durchmesser und zehn Wendeschneidplatten. Die Spindeldrehzahl liegt bei 570 U/min, was einer Zahneingriffsfrequenz von 95 Hz und Schnittgeschwindigkeit von ca. 225 m/min entspricht. Der Vorschub liegt bei 1595 mm/min, die Schnitttiefe bei 1,5 mm. Die Schnittparameter sind auf Basis von Erfahrungswerten und entsprechend der Herstellerempfehlungen der Wendeschneidplatten gewählt.

Alle Versuche werden erneut in Trockenzerspannung durchgeführt, um Effekte durch Kühlschmiermittel in der Videoaufnahme zu vermeiden.

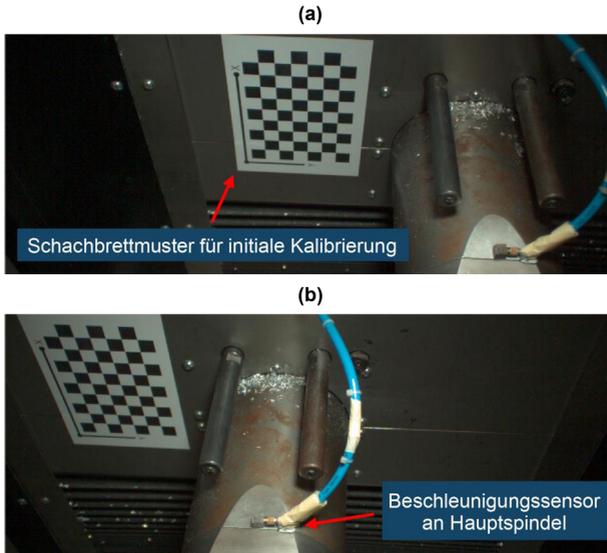


Abbildung 7-17: Standbilder der Analyse von Hauptspindelschwingungen mit unterschiedlichen Spindelpositionen während der Fräsoperation

7.2.2 Schwingungsanalyse mit durch Achsdaten stabilisierten Videos

Abbildung 7-18 stellt die Leistungsspektren für das durch Achsdaten kompensierte, videobasierte Signal sowie das Referenzsignal im in Abbildung 7-16 eingegrenzten Zeitraum von fünf Sekunden dar. Im Referenzsignal sind die Frequenzen der Zahneingriffsfrequenz von 95 Hz sowie die Harmonischen der Zahneingriffsfrequenz bis 1000 Hz ausgeprägt. Neben den Harmonischen der Zahneingriffsfrequenz sind Vielfache der Spindeldrehzahl von 9,5 Hz bis zur höchsten dargestellten Frequenz 1000 Hz ausgeprägt. Darüber hinaus zeigt das Referenzsignal wie in den anderen Versuchsreihen einen konstanten Peak bei der Netzfrequenz von 50 Hz, der auf den Messaufbau zurückzuführen ist (Abbildung 7-18).

Das mit Hilfe von Achsdaten stabilisierte Videosignal zeigt ebenso ausgeprägte Peaks bei der Zahneingriffsfrequenz von 95 Hz sowie der ersten Harmonischen bei 190 Hz. Weitere Peaks oberhalb der ersten Harmonischen, die mit niedrigeren Schwingungsamplituden einhergehen, sind nicht von Rauschen zu trennen (vgl. Kapitel 7.1). Bei niedrigen Frequenzen tritt zudem deutliches Rauschen auf.

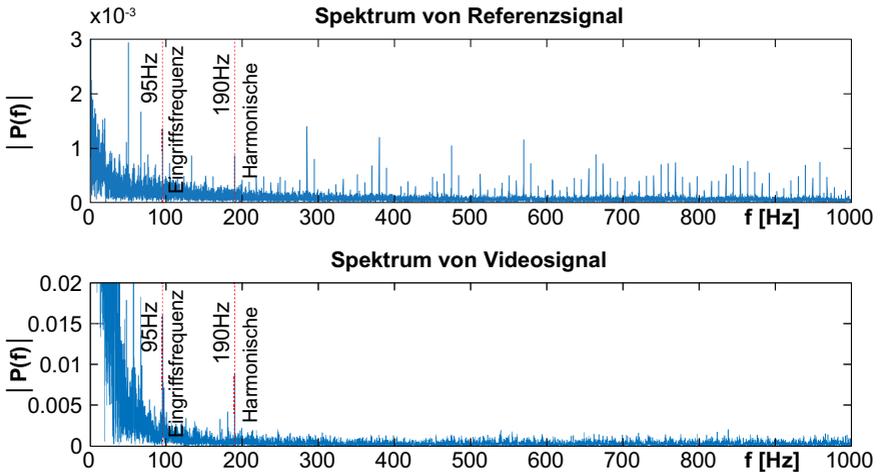


Abbildung 7-18: Gegenüberstellung der Spektren von Videosignal und Referenzsignal für Planfräsversuch mit Achsdaten-basierter Kompensation

Das in Abbildung 7-19 dargestellte Kohärenzspektrum zeigt eine im Vergleich zu den Versuchen mit feststehendem Werkstück (und relativ zur ROI fixierter Beleuchtung) niedrige Kohärenz über das gesamte Spektrum bis 1000 Hz. Bei der Zahneingriffsfrequenz und ersten Harmonischen (95 Hz und 190 Hz) zeigt sich wie aus den Spektren von Referenzsignal und Videosignal erwartet eine höhere Kohärenz.

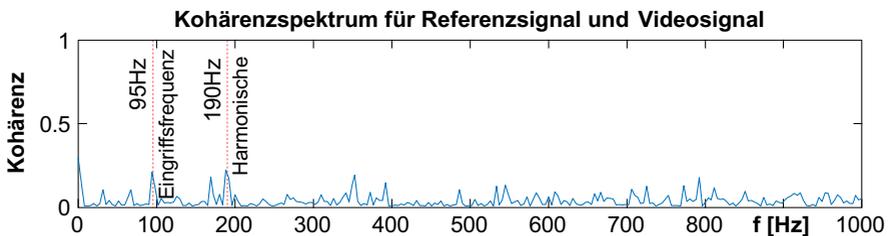


Abbildung 7-19: Kohärenzspektrum von Referenzsignal und Videoanalyse in Planfräsversuch mit Achsdaten-basierter Kompensation: Hohe Werte zeigen starke lineare Abhängigkeit der Signale im jeweiligen Frequenzspektrum

Es kann geschlussfolgert werden, dass die Vorgehensweise zur Identifikation von Frequenzen bei ausreichend hoher Amplitude prinzipiell geeignet ist. Gleichwohl verhin-

dem Faktoren wie die Veränderung der Kameraperspektive und der Beleuchtungsverhältnisse bei großen Objektbewegungen, dass optimale Parameter für Beleuchtung oder ROI eingestellt werden können (vgl. Kapitel 6.5 und Abbildung 6-14). Gerade höhere Frequenzen mit kleinen Amplituden können folglich weniger gut aufgelöst werden als bei Versuchen ohne Relativbewegung.

7.2.3 Schwingungsanalyse mit durch Tracking stabilisierten Videos

Abbildung 7-20 stellt die Leistungsspektren für das durch Tracking kompenzierte, videobasierte Signal sowie das Referenzsignal dar. Das Referenzsignal ist mit dem im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Referenzsignal identisch. Folglich sind die Frequenzen der Zahneingriffsfrequenz von 95 Hz sowie die Harmonischen der Zahneingriffsfrequenz und der Spindeldrehzahl von 9,5 Hz ausgeprägt.

Das mit Hilfe von Tracking stabilisierte Videosignal zeigt ebenso ausgeprägte Peaks bei der Zahneingriffsfrequenz von 95 Hz und der ersten Harmonischen bei 190 Hz. Im Vergleich zur Kompensation durch Achsdaten sind nur geringe Unterschiede hinsichtlich Amplituden oder Rauschen zu erkennen.

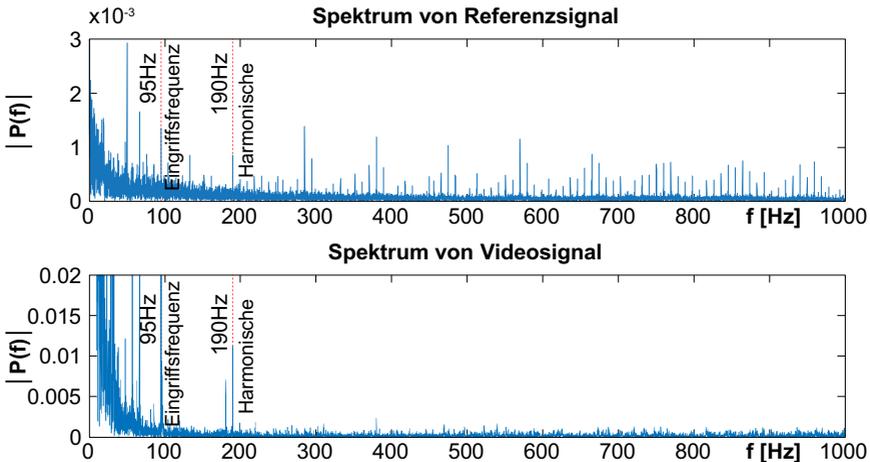


Abbildung 7-20: Gegenüberstellung der Spektren von Videosignal und Referenzsignal für Planfräsversuch mit trackingbasierter Kompensation

Das in Abbildung 7-21 dargestellte Kohärenzspektrum zeigt ebenso wie das Kohärenzspektrum für das Achsdaten-basiert kompensierte Video Peaks bei der Zahneingriffsfrequenz und ersten Harmonischen (95 Hz und 190 Hz), sodass (ausreichend hohe Amplituden vorausgesetzt) eine Anwendung zur Identifikation von Frequenzen umgesetzt werden kann. Höhere Frequenzen mit tendenziell kleinen Amplituden können dagegen nicht abgebildet werden.

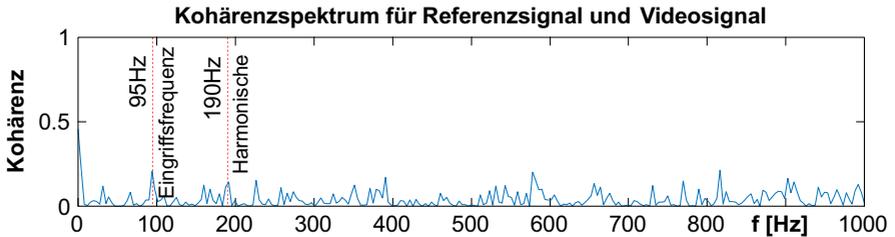


Abbildung 7-21: Kohärenzspektrum von Referenzsignal und Videoanalyse in Planfräsversuch mit trackingbasierter Kompensation: Hohe Werte zeigen lineare Abhängigkeit der Signale im jeweiligen Frequenzspektrum

Die Ansätze zur Achsdaten-basierten und Tracking-basierten Stabilisierung von Videodaten bewegter Objekte in Werkzeugmaschinen erzielend im untersuchten Datensatz und bei den entsprechenden Frequenzen der Anregung eine vergleichbare Kohärenz bezüglich des Referenzsignals. So liegt die Kohärenz bei der Eingriffsfrequenz im Tracking-basierten gleichauf mit dem NC-basierten Ansatz. Bei der ersten Harmonischen hat dagegen der NC-basierte Ansatz eine minimal höhere Kohärenz. Unterschiede liegen vorrangig in der Anwendung beider Ansätze. Während für den Achsdaten-basierten Weg entsprechend aufbereitete und zeitlich synchronisierte Daten der Maschinensteuerung sowie eine vergleichsweise aufwändige Kamerakalibrierung notwendig sind, muss in der Tracking-basierten Vorgehensweise lediglich ein geeigneter Referenzkörper vorhanden sein, der in der Videoaufnahme ausreichend gut abgebildet werden kann.

7.3 Verstärkung von ausgewählten Bewegungsfrequenzen

Der von (Wadhwa et al. 2013) vorgestellte phasenbasierte Ansatz bildet nicht nur die Basis zur quantitativen Analyse kleiner Bewegungen, sondern ermöglicht auch die qualitative Verstärkung und damit Visualisierung von Bewegungen in Videos. Phasenvari-

ationen zwischen den Videoframes werden hierbei mit einem Verstärkungsfaktor multipliziert, dadurch verstärkt und zu manipulierten Frames zurücktransformiert. Das aus diesen manipulierten Frames erstellte Video enthält kleine Bewegungen in verstärkter Form und kann sie für das bloße Auge sichtbar machen. Im Folgenden wird daher die Verstärkung kleiner Bewegungen in den zur Validierung genutzten Videos dargestellt. Die Wirkung der in den Kapiteln 6.2 (Spankompensation) und 6.5 (Achsstabilisierung) vorgestellten Ansätze zur Vorverarbeitung von Videodaten wird damit für die qualitative Verstärkung von Videos dargestellt. Die weiteren dargestellten Ansätze, die sich auf die quantitative Datenauswertung und nicht auf die Vorverarbeitung der Videodaten beziehen, werden daher nicht angewandt.

Zur Verstärkung werden die entsprechend vorverarbeiteten Videos zunächst auf einen zu analysierenden Bereich von 100x100 Pixel (Videos von Schafffräsversuchen), beziehungsweise 200x200 Pixel (Planfräsversuche) zugeschnitten. Um wie bei der Visualisierung von Schwingungen lediglich einzelne Schwingungsfrequenzen isoliert zu verstärken und damit die Interpretation zu vereinfachen, wird die Phaseninformation vor der Verstärkung zeitlich durch einen Bandpass gefiltert, vgl. (Wadhwa et al. 2013). Zur Bestimmung der dominanten Frequenzen in der analysierten Bewegung wird auf die in der quantitativen Analyse bestimmten Frequenzen (Kapitel 7.1 und 7.2) zurückgegriffen. Die verstärkten Frequenzen liegen in einem Bereich von 5 Hz um die jeweilige Hauptfrequenz von 424 Hz (dargestellter Schafffräsversuch) beziehungsweise 95 Hz (Planfräsversuch). Entsprechend der unterschiedlichen auftretenden Amplituden werden die Bewegungen um einen Faktor von 100 (Schafffräsversuch) beziehungsweise 200 (Planfräsversuch) verstärkt. Der genutzte Algorithmus basiert auf dem von (Wadhwa et al. 2013) vorgestellten Ansatz.

Um die Bewegung aus einem Video in einer statischen Abbildung zu visualisieren, werden sogenannte raumzeitliche Schnitte der Videos gebildet. Diese stellen die zeitliche Veränderung einer einzelnen Pixelreihe entlang eines Zeitstrahls dar. Zur Orientierung wird dieser Zeitstrahl in einen vollständigen Videoframe gelegt. Im gegebenen Anwendungsfall wird aus dem jeweils verstärkten Video eine fixierte Pixelreihe mit einem Pixel Breite (gelb markierte vertikale Linie in Abbildung 7-24 bis Abbildung 7-25) für aufeinanderfolgende Videoframes extrahiert und nebeneinander dargestellt (Zeitstrahl rechts neben vertikalen gelben Linien). Der dargestellte Zeitraum beträgt jeweils 200 Frames beziehungsweise 0,1 Sekunden. Die Schnitte sind entsprechend den in den Versuchen aus 7.1 und 7.2 analysierten Bewegungsrichtungen vertikal in der Bildebene

orientiert. Zur Orientierung werden als Hintergrund die entsprechenden Videoframes der unverstärkten, vorverarbeiteten Ausgangsvideos dargestellt.

Abbildung 7-24 bis Abbildung 7-23 stellen verstärkte Videos der in Kapitel 7.1.1 dargestellten Versuchsreihe zur Analyse von Werkstückschwingungen mit einer Zahnneigungsfrequenz von 424,7 Hz und hoher Vorschubgeschwindigkeit dar.

Abbildung 7-22 stellt einen verstärkten Videoausschnitt während der Zerspanung im ersten Frässegment mit kleinster Amplitude dar. Im raumzeitlichen Schnitt ist im spankompensierten und nicht spankompensierten Video die zyklische Bewegung des Werkstücks in vertikaler Richtung zu erkennen. Im verstärkten, nicht spankompensierten Video ist die Wirkung einzelner Späne zu erkennen.

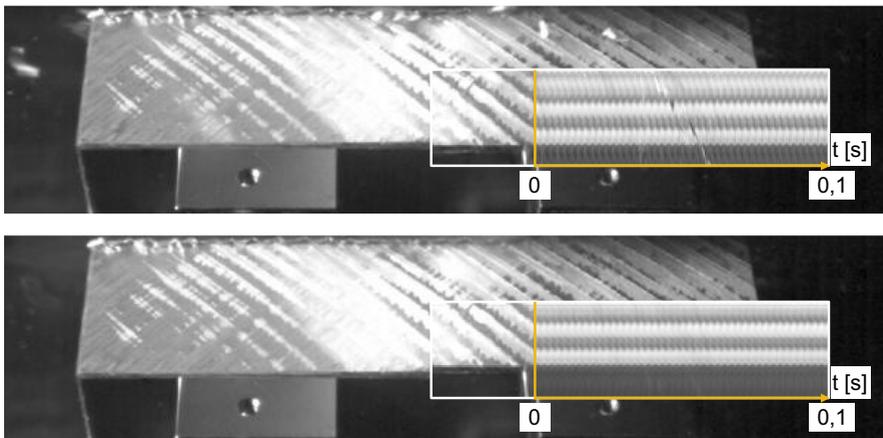


Abbildung 7-22: Verstärktes Video ohne Spankompensation (oben) und mit Spankompensation (unten) im ersten Frässegment mit kleiner Schwingungsamplitude: leichter Einfluss von Spänen im nicht kompensierten Video

Abbildung 7-23 stellt einen verstärkten Videoausschnitt während der Zerspanung im letzten Frässegment mit größter Schwingungsamplitude dar. Das Werkzeug bewegt sich durch den verstärkten Bereich, sodass sowohl ein Einfluss des rotierenden Werkzeugs (vgl. Kapitel 6.3.1) als auch ein starker Einfluss von Spänen (vgl. Kapitel 6.1) vorhanden ist. Im raumzeitlichen Schnitt des nicht spankompensierten, verstärkten Videos zeigt sich folglich ein starker Einfluss von Spänen sowie der Werkzeugrotation. Die qualitative Analyse des verstärkten Videos ist damit deutlich erschwert. Im span-

kompensierten Video wird die verstärkte Bewegung gleichmäßig dargestellt. Die im Vergleich zu Abbildung 7-22 größere Schwingungsamplitude ist deutlich zu erkennen.

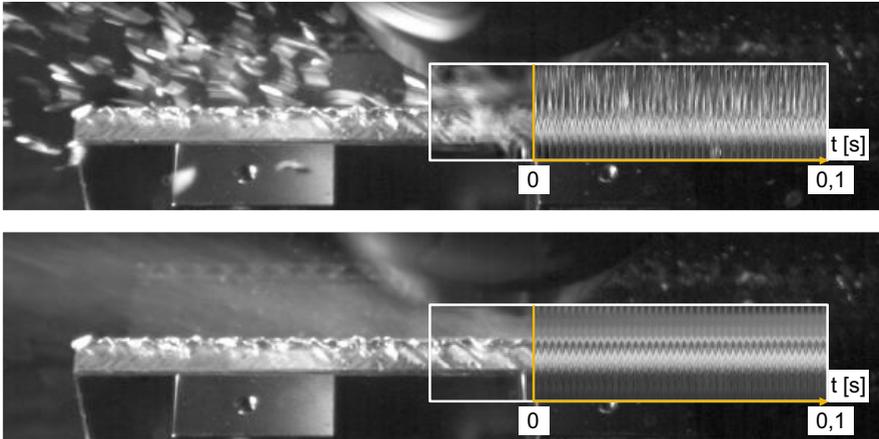


Abbildung 7-23: Verstärktes Video ohne Spankompensation (oben) und mit Spankompensation (unten) im fünften Frässegment mit hoher Schwingungsamplitude: deutlicher Einfluss von Spänen und Werkzeug im nicht kompensierten Video

Abbildung 7-24 stellt zur Kontrolle einen verstärkten Videoausschnitt vor der Zerspanung dar, das Werkzeug ist nicht im Eingriff. Im raumzeitlichen Schnitt (gelbe Zeitachse) ist im Span-kompensierten und nicht-Span-kompensierten Video ein gleichmäßiger Verlauf mit nur geringer Bewegung zu erkennen.²¹

²¹ Die leichte Bewegung (Welligkeit) kann auf die in Kapitel 6.3 beschriebene Helligkeitsfluktuation durch das neben dem Werkstück rotierende Werkzeug zurückgeführt werden. Entgegen der quantitativen Analyse (vgl. Kapitel 7.1 und 7.2) findet im zur Verstärkung verwendeten Ansatz nach Wadhwa et al. (2013) keine Einschränkung bezüglich verstärkter Ortsfrequenzbereiche statt.

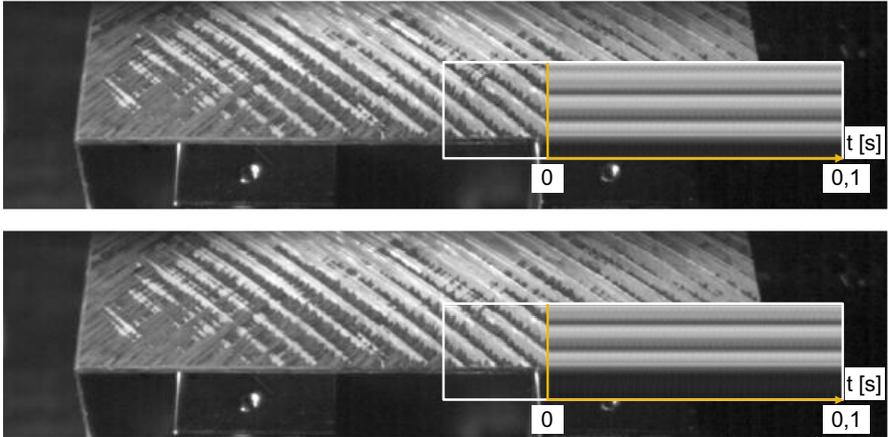


Abbildung 7-24: Kontrolle der Videoverstärkung: Verstärktes Video ohne Spankompensation (oben) und mit Spankompensation (unten) ohne Eingriff des Fräswerkzeugs

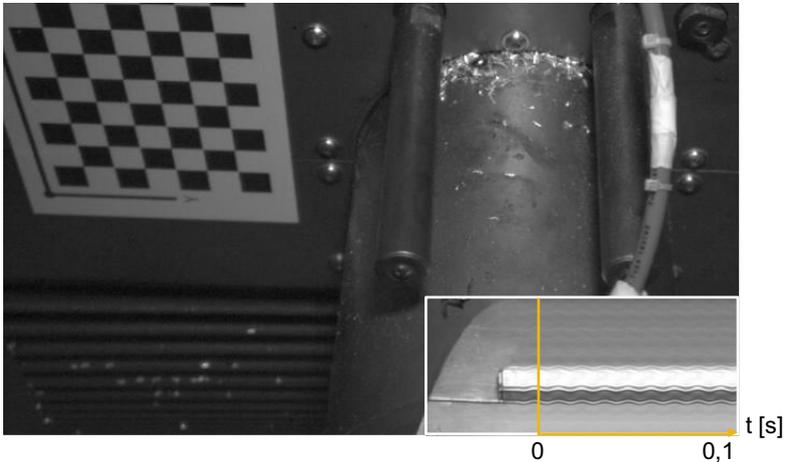


Abbildung 7-25: Verstärkung der Schwingung der Spindel Nase im basierend auf Achsdaten stabilisiertem Video: deutlich erkennbare zyklische Bewegung in Zeitrichtung

Abbildung 7-25 stellt den raumzeitlichen Schnitt eines verstärkten Videos mit überlagerter Achsbewegung aus der Versuchsreihe mit einer Planfräsoption dar (vgl. Ka-

pitel 6.5 und 7.2). Die Achsbewegung wird durch die in Kapitel 6.5.2 dargestellte Vorgehensweise basierend auf Achsdaten stabilisiert.²² Die Bewegung der Spindelnase in Schnitt-Richtung ist deutlich zu erkennen. Im Vergleich zur Verstärkung der Werkstückbewegung ist ebenfalls die geringere Frequenz der verstärkten Bewegung (95 Hz zu 424 Hz) zu erkennen.

Es zeigt sich, dass die entwickelten Ansätze, die auch für die Verstärkung von kleinen Bewegungen in Videos relevant sind - Spankompensation und Stabilisierung von Achsbewegungen - die Interpretation der Videodaten deutlich erleichtern können. So können durch die Kompensation von Spänen die tatsächlich relevanten Bewegungen fokussiert werden. Auch bei überlagerten Achsbewegungen kann die Interpretation verstärkter Bewegungen deutlich verbessert werden.

²² Die Stabilisierung durch Tracking (vgl. Kapitel 6.5.1) liefert bei der Verstärkung vergleichbare Resultate und wird daher nicht einzeln dargestellt. Da der raumzeitliche Schnitt bei beweglichen Objekten nicht sinnvoll dargestellt werden kann, wird die Verstärkung des nicht-stabilisierten Videos nicht dargestellt.

8 Bewertung

Im Folgenden werden die in Kapitel 5, 6 und 6.6 beschriebenen Ergebnisse bewertet und eingeordnet. Hierfür wird zunächst auf die Untersuchung der allgemeinen Einflussgrößen und spezifischen Einflussgrößen von Werkzeugmaschinenanwendungen für die phasenbasierte Schwingungsanalyse eingegangen. Anschließend werden die Resultate der Validierung mit Videodaten aus Zerspanversuchen bewertet und eingeordnet. Abbildung 8-1 gibt einen Überblick von identifizierten und untersuchten Einflussgrößen.

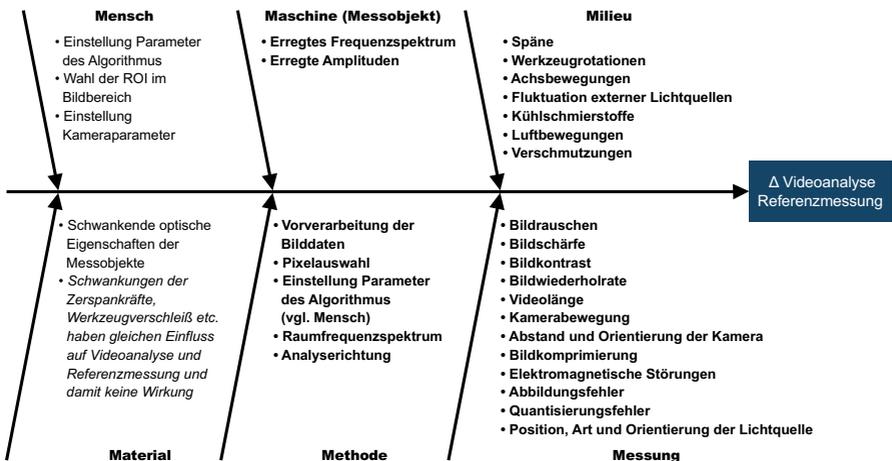


Abbildung 8-1 Identifizierte und untersuchte Einflussgrößen (untersuchte fett dargestellt)

8.1 Allgemeine Einflussgrößen bei der Videoaufnahme und Datenauswertung

Die erste Zielstellung der Arbeit war es zu untersuchen, welche Einflussgrößen bei der Videoaufnahme und Datenauswertung mit dem phasenbasierten Ansatz relevant sind und welche Maßnahmen daraus für Videoaufnahmen im Werkzeugmaschinen-Kontext abgeleitet werden müssen. In der in Kapitel 5 dargestellten Untersuchung wurden daher zunächst die von Werkzeugmaschinen unabhängigen Haupteinflussgrößen Methode, Messung und Maschine (hier: Messobjekt) untersucht und anschließend auf Werkzeugmaschinenanwendungen übertragen.

Die durchgeführten Versuche mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines schwingenden Piezoaktors sowie mit synthetischen Videodaten zeigen, welche Randbedingungen der Aufnahme und Auswertung maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis einer phasenbasierten Schwingungsanalyse mit Videodaten haben. Die unter idealen Randbedingungen erzielbaren minimalen Schwingungsamplituden von bis unter 1 μm zeigen, dass die Größenordnungen von Schwingungsamplituden in Werkzeugmaschinen mit dem phasenbasierten Ansatz analysiert werden können, vgl. typische Mittenrauwerte gefräster Werkstücke zwischen 25 μm (geschruppt) und 0,4 μm (feingeschliffen) (Labisch & Weber 2013). Die untersuchten Schwingungsfrequenzen bis 1000 Hz können ebenfalls präzise erfasst werden, wobei wie bei anderen relativ aufnehmenden Verfahren höhere Frequenzen typischerweise herausfordernder sind als niedrige Frequenzen. Die wichtigen Einflussgrößen von Videoaufnahme und -Auswertung zeigen jedoch, dass zur Umsetzung einer Schwingungsanalyse in Werkzeugmaschinen eine Reihe von kritischen Faktoren zu beachten sind. Tabelle 8-1 fasst die Einflussgrößen mit am höchsten bewerteter Relevanz zusammen (vollständige Darstellung Tabelle 5-2).

Tabelle 8-1 Einflussgrößen mit am höchsten bewerteter Relevanz

Einflussgrößen	Umsetzbarkeit f. WZM-Anwendung	Lösungsansatz für WZM-Anwendung
Amplitude pro Pixel		<ul style="list-style-type: none"> • Geeignete Abstimmung von Objektiv und Kameraabstand zur Erzielung maximaler Amplitude pro Pixel
Umgebungs-Vibrationen		<ul style="list-style-type: none"> • Steife, schwingungsdämpfende und entkoppelte Kameraaufstellung
ROI-Auswahl		<ul style="list-style-type: none"> • Manuelle Auswahl von geeignet orientierter ROI mit gutem Kontrast • Präzise Positionierung auf einer Kante • Empirische Ermittlung der ROI-Größe

Besonders relevante identifizierte Einflussgrößen sind zum einen die geeignete Auswahl und Positionierung der ausgewählten ROI, sodass Bildsignale mit ausreichenden Amplituden und geeigneter Phaseninformation ausgewertet werden. Diese sind vor allem in Bereichen mit starkem Kontrast und Kanten zu finden, bevorzugt normal zur

erwarteten Bewegungsrichtung. Da die berechneten Schwingungsamplituden keine hohe Robustheit gegenüber Veränderungen der ROI-Position haben, sind Analyse und Vergleichbarkeit von Amplituden nur eingeschränkt möglich. Die Identifikation von Schwingungsfrequenzen ist davon jedoch unberührt.

Zum anderen sind unerwünschte Kamerabewegungen durch eine geeignete Kameraaufstellung möglichst zu vermeiden und die Wirkung von Kamerabewegungen durch einen möglichst geringen Abstand des Kamerasystems vom zu analysierenden Objekt zu reduzieren. Eine von den Bauteilen der Werkzeugmaschine entkoppelte Aufstellung wie in den später durchgeführten Versuchen ist hier angezeigt. Die typische Kapselung von Werkzeugmaschineninnenräumen und die damit eingeschränkte Möglichkeit zur Aufstellung des Kamerasystems kann hier eine Herausforderung darstellen.

Darüber hinaus stellt das Verhältnis von Schwingungsamplitude zu Pixeldichte einen wichtigen Faktor für die Analysequalität dar. Da die Schwingungsamplitude bei der Schwingungsanalyse von Werkzeugmaschinen in der Regel nicht beeinflusst werden soll, muss das Kamerasetup und -objektiv folglich so gewählt werden, dass die zu analysierenden Schwingungsamplituden möglichst hochaufgelöst abgebildet werden. Die Analyse von möglichst großen Objekten sowie beschränkte Möglichkeiten zur Kameraaufstellung können dem zuwider laufen. Das in der Arbeit eingesetzte Kamerasetup mitsamt Kameraaufstellung, Beleuchtung und Aufnahmeparametern zeigt in diesem Zusammenhang trotz vergleichsweise günstiger Hardware eine gute Eignung zur Generierung der benötigten Videodaten, wobei insbesondere bei Zerspanprozessen mit größeren Amplituden (z.B. bei dünnen Wandstärken von Werkstücken und Schrumpprozessen) gute Ergebnisse erzielt werden können.

Die Ergebnisse der Untersuchung allgemeiner Einflussgrößen ermöglichen es damit, Datenaufnahme und Datenauswertung so abzustimmen, dass Schwingungen auch unter herausfordernden Bedingungen identifiziert werden können. Der anschließenden Analyse von Schwingungen in Werkzeugmaschinenanwendungen wird damit der Weg geebnet.

8.2 Einflussgrößen bei der Analyse von Videodaten aus Werkzeugmaschinen

Die Zielstellung der Arbeit war es zweitens zu untersuchen, welche zusätzlichen, für spanende Werkzeugmaschinen spezifische Einflussgrößen auftreten können und drittens, wie diese Einflussgrößen abgemildert oder kompensiert werden können, um

Schwingungsanalysen in spanenden Werkzeugmaschinen zu ermöglichen. Daher wurden mit Spänen, Helligkeitsfluktuationen und Achsbewegungen anschließend Einflussgrößen des für Werkzeugmaschinen spezifischen Milieus untersucht. Für diese Einflussgrößen wurden jeweils Maßnahmen untersucht, um die Qualität der Schwingungsanalyse zu verbessern (vgl. Milieu in Abbildung 8-1).

Anhand der durchgeführten Versuche in einer realen Werkzeugmaschine wurden daher weitere Einflussgrößen realer Fräsoperationen für die Analyse von Phaseninformationen in Videodaten identifiziert. So existieren neben naheliegenden Störfaktoren, wie Spanflug und relativen Achsbewegungen, weitere Einflüsse wie etwa Helligkeitsfluktuationen durch Werkzeugrotation. Diese Einflüsse führen im Vergleich zu unter idealen Bedingungen aufgenommenen Videodaten (vgl. Kapitel 5.1) zu einer Verschlechterung des Signal-Rausch-Abstandes und gegebenenfalls zum Auftreten von scheinbaren Schwingungsamplituden, die keiner Objektbewegung zuzuordnen sind (siehe Kapitel 6.3). Scheinbare Schwingungen, etwa durch zyklische Fluktuation der Beleuchtung, können zudem zu einer Verfälschung des Signals und des abgeleiteten Frequenzspektrums führen.

Die dargestellten Ansätze zur Vermeidung und Filterung von Störeinflüssen ermöglichen in den analysierten Datensätzen die Schwingungsanalyse unter den erschwerten Aufnahmebedingungen in Werkzeugmaschinen. So zeigt die untersuchte Vorgehensweise zur Spankompensation im Zeitbereich, dass auftretende Impulse durch Späne und damit die Verschlechterung der Signalqualität reduziert werden können. Aufgezeigte Methoden zur Abmilderung des Einflusses von Helligkeitsfluktuationen und zur Vermeidung des Einflusses der Werkzeugrotation in der Bildebene ermöglichen die Reduktion scheinbarer Schwingungsfrequenzen.

Die entwickelten Ansätze zur Kompensation von Achsbewegungen durch Achsdaten sowie durch Tracking ermöglichen zudem, ausreichende Amplituden vorausgesetzt, eine Schwingungsanalyse von relativ beweglichen Objekten, wie sie in Werkzeugmaschinenanwendungen häufig auftreten.

Auch wenn nicht von einer Vollständigkeit der in Abbildung 8-1 dargestellten und untersuchten Einflussgrößen ausgegangen werden kann, zeigen die entwickelten Ansätze, dass eine Analyse von Schwingungen auch unter herausfordernden Bedingungen erreicht werden kann. Gleichwohl müssen die vorgestellten Ansätze zur Vorverarbeitung und Filterung der Videodaten häufig zunächst parametrisiert werden, um eine auf die

Aufnahmeparameter und Eigenschaften des zu analysierenden Objekts zugeschnittene Vorverarbeitung und Filterung zu erzielen. Das Analyseergebnis hängt daher von der geeigneten Parametrierung der Vorverarbeitung und Filterung ab. Manuelle Arbeitsschritte, etwa die Wahl des entsprechenden Ortsfrequenzbereichs oder der geeigneten ROI, sind damit weiterhin nötig und stellen aktuell noch einen Nachteil gegenüber klassischen absolutaufnehmenden Beschleunigungssensoren dar.

8.3 Validierung in Zerspanversuchen

8.3.1 Analyse von Werkstückschwingungen

Die Zerspanversuche zur Analyse von Werkstückschwingungen ohne Relativbewegung zeigen, dass die Auswertung von Videodaten für die Analyse von Werkstückschwingungen in der Trockenzerspannung prinzipiell geeignet ist. Trotz im Bildbereich vorhandener Späne können die mit einem Beschleunigungssensor als Referenz erkannten Schwingungsfrequenzen auch bei niedrigen Amplituden von unter $5\ \mu\text{m}$ deutlich identifiziert werden (Amplituden sind integriert mit Daten des absolutaufnehmenden Beschleunigungssensors und damit entsprechend mit Unsicherheit behaftet). Noch kleinere Amplituden, wie sie insbesondere beim Schlichten auftreten, erfordern dagegen weitere Untersuchungen. Neben Anhaltspunkten für die minimal auflösbare Amplitude ist die Schwingungsamplitude in Pixeln von Interesse, da sie einen Vergleich mit anderen Kamerasetups zulässt. So entsprächen $5\ \mu\text{m}$ im Versuchsaufbau mit $5,4\ \text{Pixel/mm}$ $0,027\ \text{Pixel}$. Die von (Wadhwa et al. 2017) wie auch von (A_Parth 2018) erreichten kleineren Amplituden wurden mit Aufnahmen unter Laborbedingungen erzielt, die aufgrund der zahlreichen zusätzlichen Störfaktoren bei Videoaufnahmen in einem Werkzeugmaschineninnenraum (Späne, Reflektionen von Werkzeugen, Umgebungsvibrationen etc.) nur bedingt erzielt werden können und daher nur eingeschränkt als Vergleich dienen können. Die Kohärenz von Referenzsignal und Videosignal ist wie erwartet bei höheren Schwingungsamplituden und damit besserem Signal-Rausch-Verhältnis höher²³, vgl. (Wadhwa et al. 2017). Da auch die Referenzmessung mit Beschleunigungssensor auch mit Unsicherheiten behaftet ist, hat die Kohärenz gleichwohl nur qualitative Aussagekraft für die phasenbasierte Analyse.

²³ Eine Darstellung der Kohärenz in Abhängigkeit der Schwingungsamplitude ist durch die Unsicherheiten bei der Berechnung der Amplitude mit Hilfe des Referenzsensors jedoch nicht sinnvoll.

Die Varianz der Amplituden im Spektrum des Videosignals bei unterschiedlichen Werkstücken, die mit gleichen Parametern zerspannt wurden, zeigt, dass die berechneten Schwingungsamplituden aufgrund der erwähnten Einflussgrößen vorrangig eine qualitative Aussagekraft haben. Diese Eigenschaft teilen sie mit klassischen absolutaufnehmenden Beschleunigungssensoren, aus deren Daten Schwingungsamplituden ebenfalls nur mit hoher Unsicherheit hergeleitet werden können und die ebenfalls häufig in Modal- oder Betriebsschwingungsanalysen eingesetzt werden. Als ein Hauptgrund hierfür ist der in Kapitel 5.3 beschriebene Einfluss der ROI auf die Signalqualität zu sehen. Die Eignung einer ROI ist stark abhängig von den tatsächlichen Aufnahmebedingungen und optischen Eigenschaften individueller Werkstücke, weshalb ein quantitativer Vergleich mit konkurrierenden Messverfahren nur sehr begrenzte Aussagekraft hätte. Weitere Untersuchungen mit hochgenauen Referenzmessungen könnten Aussagen zur erzielbaren quantitativen Genauigkeit erlauben und auch als Basis für weitere Ansätze zur Verbesserung der Analysequalität dienen.

Die untersuchte Vorgehensweise ist damit nach aktuellem Stand für die Zerspannung als qualitatives Instrument zum Identifizieren von Schwingungsfrequenzen, aufgrund der Abhängigkeit von der ROI-Auswahl und Position jedoch weniger zur quantitativen Bestimmung von Amplituden oder dem Vergleich von Schwingungsamplituden zu sehen. Da die Identifikation von Schwingungsfrequenzen bei der Suche nach Schwingungsursachen und geeigneten Lösungen in Werkzeugmaschinen eine vorrangige Rolle spielt sind die Einschränkungen zur Analyse von Amplituden in vielen Fällen unkritisch. Dagegen bieten die Möglichkeiten zur nachträglichen Positionierung von Messpunkten und zur Visualisierung von Schwingungen entscheidende Vorteile gegenüber klassischen Ansätzen, zum Beispiel bei der Analyse von Werkstückschwingungen wo der Aufwand zur Montage von Sensoren und Verkabelung deutlich verringert werden kann.

Sofern das Kamerasystem leistungsfähig genug ist, ist zudem davon auszugehen, dass auch Objekte mit deutlich größeren Abmaßen als das hier genutzte Werkstück analysiert werden können. Voraussetzung ist, dass die in den Kapiteln 5 und 6 und beschriebenen Störfaktoren, etwa unerwünschte Kamerabewegungen oder ungeeignete ROIs, vermieden werden.

8.3.2 Analyse von Maschinenschwingungen mit Relativbewegung

Die Analyse von Schwingungen an der beweglichen Spindelnase der Werkzeugmaschine zeigt, dass durch die untersuchten Ansätze relative Bewegungen von Maschinenbauteilen so stabilisiert werden können, dass eine anschließende Identifikation der Schwingungsfrequenzen an Maschinenbauteilen ermöglicht wird. Für die Anwendung in Werkzeugmaschinen wird damit ein neues Feld eröffnet, da Schwingungen von beweglichen Maschinenteilen und Werkstücken hier oft von Interesse sind.

Die durch die Relativbewegung veränderte Beleuchtung des zu analysierenden Objekts stellt jedoch aktuell eine Herausforderung für die Analyse des stabilisierten Videos dar. Um eine ausreichende Konstanz der Beleuchtung erzielen zu können, ist daher bei großen Relativbewegungen gegebenenfalls auf mehrere Lichtquellen zurückzugreifen. Die in Kapitel 6.3 dargestellten Ansätze zur Vermeidung von Beleuchtungseinflüssen sind davon getrennt zu betrachten, da sie ebenfalls eine ausreichende Helligkeit voraussetzen.

Ebenso kann die Veränderung der relativen Kameraposition und die damit einhergehende Veränderung der von der Kamera abgebildeten Bereiche des Objekts die Analyse erschweren. So können gerade bei großen Objektbewegungen veränderliche Bereiche des Objekts durch den Bildsensor erfasst werden. Trotz Stabilisierung der Videoframes ändern sich damit die am Bildaufbau beteiligten räumlichen Signale und können die analysierte Phaseninformation beeinflussen.

In diesem Zusammenhang fällt die in den Versuchsreihen geringere Kohärenz und das schlechtere Signal-Rausch-Verhältnis im Vergleich zur Analyse von Werkstückschwingungen mit vergleichbarer Pixelamplitude auf. Der geringere Kontrast innerhalb der analysierten ROI bei der Analyse der beweglichen Spindelnase (vgl. Kapitel 7.1) liefert dafür eine Erklärung. Aufgrund der nicht übertragbaren Aufnahmebedingungen kann das geringere Signal-Rausch-Verhältnis jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht eindeutig auf die Aufnahmebedingungen oder auf Einflüsse der angewandten Ansätze zur Bewegungskompensation zurückgeführt werden (vgl. insbesondere Einflussfaktoren Maschine, Milieu, und Messung in Abbildung 8-1).

Die Analyse der Achsdaten-basiert und Tracking-basiert stabilisierten Videos von Maschinenbauteilen erzielen vergleichbare Ergebnisse. Die bei der Achsdaten-basierten Kompensation notwendige Kamerakalibrierung und Erfassung von Achsdaten erhöht

einerseits den Aufwand zur Vorverarbeitung der Videodaten und schränkt die Einsetzbarkeit als Ad-hoc-Analysesystem ein. Aufgrund der Unabhängigkeit der Achsdaten-basierten Vorgehensweise von Störfaktoren im zu kompensierenden Video, etwa Spänen im Bildbereich oder der Veränderung der zu trackenden Körper im Video, bietet die Vorgehensweise jedoch gleichzeitig eine Reihe von Vorteilen.

Dagegen kommt das vorgestellte Tracking-basierte Verfahren ohne Achsdaten und, sofern keine Quantifizierung der Amplituden oder exakte Ausrichtung der Achsen benötigt wird, ohne Kamerakalibrierung aus. Nachteilig ist die Notwendigkeit zur Abbildung eines geeigneten Referenzkörpers im Video, dessen Tracking bei Verschmutzungen oder fliegenden Spänen im Maschineninnenraum ein Problem darstellen kann.

8.3.3 Verstärkung von ausgewählten Bewegungsfrequenzen

Die Verstärkung von Videos aus Fräsversuchen zeigt, dass auch die qualitative Analyse auf Basis des phasenbasierten Ansatzes von den entwickelten Ansätzen zur Vorverarbeitung der Videodaten profitieren kann. So zeigen sich durch die Spankompensation deutlich reduzierte Effekte von Spänen sowie durch die Werkzeugrotation im verstärkten Video. Ebenso wird die Analyse kleiner Bewegungen in Videos mit überlagerten Achsbewegungen ermöglicht.

Damit zeigt sich, dass die Ergebnisse im Zusammenhang mit der Vorverarbeitung von Videodaten aus Werkzeugmaschinen nicht nur für die quantitative Identifizierung von Schwingungsfrequenzen, sondern auch für die qualitative Visualisierung relevant sind. Beispiele sind die Darstellung der Schwingungsform oder die Unterscheidung von Bereichen mit größeren und kleineren Amplituden im analysierten Video. Weiterhin bestehende Einflussgrößen, wie der Einfluss von Helligkeitsfluktuationen, zeigen Felder für weitere Untersuchungen im Kontext der qualitativen Verstärkung von Bewegungen.

Zudem kann die benötigte Rechenzeit bei langen, hochauflösenden Videos und hohen Bildwiederholraten weiterhin einen begrenzenden Faktor darstellen. So ist mit zeitlich und räumlich hochauflösenden Videodaten und einem Desktop-PC aktuell nur eine offline-Berechnung möglich (die rein quantitative Analyse ohne Verstärkung erfordert bei der Analyse gleicher Bilddaten vergleichbare Rechenressourcen). So benötigt die Analyse von Schwingungen in einem Beispielvideo mit einer Auflösung von 600x142 Pixeln (~85.0000 Pixel) und 3600 Frames (1,8 Sekunden Aufnahmedauer bei 2000 Frames pro Sekunde) auf einem leistungsfähigen Desktop-PC mit Intel i7-7700 Prozessor (4x3,6GHz) und 32GB RAM-Speicher etwa 158 Sekunden. Erst eine etwa 90-mal

schnellere Berechnung würde also unter gleichen Randbedingungen eine Echtzeit-Berechnung ermöglichen. Gleichwohl können durch reduzierte Auflösung und Framerate bereits deutliche Verbesserungen erzielt und einfache Echtzeit-Anwendungen umgesetzt werden.

Ebenso liegt in der Optimierung der entsprechenden Algorithmen Potential. Ansätze zur Reduzierung der für die phasenbasierte Schwingungsanalyse erforderlichen Rechenleistung (vgl. (Wadhwa et al. 2014)) stoßen in diese Forschungsrichtung vor und könnten weiteren online-Anwendungen den Weg ebnen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Das dynamische Verhalten einer spanenden Werkzeugmaschine hat großen Einfluss darauf, mit welcher Qualität sie Werkstücke bearbeiten kann und wie wirtschaftlich sie dabei arbeitet. Unerwünscht auftretende Schwingungen führen insbesondere zur Verschlechterung der Oberflächenqualität von Werkstücken, zu höherem Verschleiß an Werkzeugen und Maschine sowie in Konsequenz zu oft unproduktiven, weil langsamen Bearbeitungsparametern. Ob, beziehungsweise in welchem Bearbeitungsschritt tatsächlich Schwingungen auftreten, ist jedoch häufig nicht direkt ersichtlich. So sind die Schwingungsamplituden klein und mit dem bloßen Auge nicht sichtbar.

Gängige Werkzeuge zur Bestimmung von Schwingungsfrequenzen und Amplituden sind berührende Beschleunigungssensoren, die auch für Modalanalysen genutzt werden, sowie FEM-Simulationen zur Simulation und Visualisierung des Schwingungsverhaltens von Maschinenbauteilen. Die Anwendung der bekannten Methoden zur Schwingungsanalyse ist jedoch immer mit hohen Aufwänden verbunden – sei es bei der Datenaufnahme, Modellierung oder Datenauswertung. Gerade bei sich häufig ändernden zu fertigenden Werkstücken ist der Aufwand zur Analyse der auftretenden Schwingungen oft so hoch, dass Schwingungsanalysen und damit mögliche Maßnahmen, um Schwingungen zu reduzieren, nicht durchgeführt werden.

Hochgeschwindigkeitskameras mit hohen Bildwiederholraten stellen eine alternative Datenquelle zur Erfassung von dynamischen Bauteilbewegungen dar, die zahlreiche Vorteile, wie die gleichzeitige Erfassung ganzer Bauteilbereiche, sowie einen verringerten Messaufwand verspricht. Auch die Anschaffungskosten der Hardware sind im Vergleich zu konkurrierenden Systemen wie Laservibrometern um ein Vielfaches geringer.

Zur Auswertung von Videodaten für die Analyse von kleinen Bewegungen, wie Schwingungen, existieren eine Reihe von Algorithmen, die sowohl quantitative Aussagen über Schwingungen als auch qualitative Visualisierungen der Schwingungen durch verstärkte Bewegungen erlauben. Der phasenbasierte Ansatz zur Analyse von kleinen Bewegungen in Videodaten nach (Wadhwa et al. 2013) zeichnet sich insbesondere durch die fehlende Notwendigkeit von aufgebrauchten Markern am zu untersuchenden Objekt,

eine geringe Anfälligkeit gegenüber Bildrauschen, vergleichsweise gute Unempfindlichkeit gegenüber Helligkeitsvariationen sowie die Möglichkeit zur Visualisierung von Schwingungen durch Bewegungsverstärkung aus.

Bei Nutzung videobasierter Schwingungsanalyse im Kontext von spanenden Werkzeugmaschinen treten jedoch eine Reihe von Einflussgrößen auf, die die Analyse von Schwingungen erschweren. Die erste Fragestellung dieser Arbeit war daher, welche Einflussgrößen bei der Videoaufnahme und Datenauswertung mit dem phasenbasierten Ansatz relevant sind und welche Maßnahmen daraus für Videoaufnahmen im Werkzeugmaschinen-Kontext abgeleitet werden müssen. Folglich wurden systematisch Einflussgrößen der phasenbasierten Videoanalyse untersucht und Lösungsansätze abgeleitet, die eine Analyse von Videodaten aus Werkzeugmaschinen ermöglichen. Hierfür wurden zunächst Versuche mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines schwingenden Piezoaktors sowie mit synthetischen Videodaten durchgeführt, um allgemeine Einflussgrößen der Videoaufnahme und Datenauswertung zu identifizieren und auf Werkzeugmaschinenanwendungen zu übertragen.

Die zweite Fragestellung war dann, welche weiteren, für spanende Werkzeugmaschinen spezifischen Einflussgrößen auftreten können und wie drittens diese werkzeugmaschinenspezifischen Einflussgrößen abgemildert oder kompensiert werden können. Dazu wurden anhand von Videodaten aus einem Fräsbearbeitungszentrum bei der Trockenerspannung spezielle Einflussgrößen wie Spanflug, Helligkeitsfluktuationen sowie relative Achsbewegungen untersucht und entsprechende Lösungsansätze abgeleitet. Anhand von Videodaten eines schwingenden Werkstücks sowie Videodaten einer Schwingung der verfahrenen Maschinenspindel wurden die Lösungsansätze validiert.

Es zeigt sich, dass einerseits naheliegende Einflussgrößen wie die auftretende Schwingungsamplitude sowie unerwünschte Kamerabewegungen einen starken Einfluss auf die Analyse haben können. Mit entsprechenden Maßnahmen wie geeigneter Kamerabefestigung und -position kann hier entgegengewirkt werden. Zudem ist die phasenbasierte Videoanalyse je nach Parametern der Aufnahme und Analyse anfällig für mögliche, in Werkzeugmaschinen auftretende Einflussgrößen. Beispiele sind zyklische Helligkeitsänderungen, verursacht durch zyklische Reflektionen des rotierenden Werkzeugs oder durch Späne im Bildbereich. Die Auswahl geeigneter Pixel zur Analyse stellt ebenso eine wichtige Einflussgröße dar, da nicht in allen Bildbereichen für die Schwingungsanalyse geeignete Phaseninformationen vorhanden sind. Bei Relativbewegungen zwischen Kamera und zu analysierendem Objekt ist die Auswahl geeigneter Pixel

nochmals herausfordernder. Daher wurden zwei Ansätze implementiert und untersucht, Relativbewegungen durch eine Maschinenachse zu kompensieren und eine Analyse von sich bewegenden Maschinenbauteilen zu ermöglichen.

Bei der Validierung mit Videodaten von Zerspanversuchen konnten bei entsprechender Auswahl der zu analysierenden Pixel und Vorverarbeitung der Videodaten Schwingungsfrequenzen auch für kleine Amplituden an Werkstück und Werkzeugmaschinen-spindel identifiziert werden. Mit steigenden Frequenzen und damit in der Regel deutlich kleineren korrespondierenden Schwingungsamplituden gestaltet sich die Analyse jedoch schwieriger als für niedrigere Frequenzanteile. Auch ist die Quantifizierung von Schwingungsamplituden aufgrund der Abhängigkeit des Analyseergebnisses von der Pixelauswahl problembehaftet. Dass Frequenzen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden können, Amplituden jedoch mit Unsicherheiten behaftet sind, ist je nach Zielsetzung bei der Analyse von Werkzeugmaschinenschwingungen unterschiedlich schwer zu gewichten. Die abschließend durchgeführte Verstärkung von Videodaten aus Werkzeugmaschinen bestätigt zudem die Eignung der entwickelten Ansätze zur Vorverarbeitung von Videodaten und für die qualitative Analyse. So ermöglichen die Spankompensation und Stabilisierung von beweglichen Achsteilen die qualitative Analyse in verstärkten Videos.

Die videobasierte Schwingungsanalyse stellt damit einen vielversprechenden Ansatz dar, Schwingungen in Werkzeugmaschinen mit geringerem Aufwand als bisher identifizieren zu können. Die untersuchten Ansätze zur Vermeidung und Kompensation von negativen Einflüssen in Werkzeugmaschinen zeigen, dass eine Schwingungsanalyse auch unter herausfordernden Bedingungen ermöglicht werden kann. Gleichwohl ist hierfür weiterhin sowohl Knowhow über die Funktionsweise der videobasierten Schwingungsanalyse als auch über den jeweils zu untersuchenden Prozess erforderlich. Fokus folgender Arbeiten sollte daher sein, die Anwendung der videobasierten Schwingungsanalyse in der Anwendung zu vereinfachen sowie robuster gegenüber verbleibenden Einflussgrößen zu machen.

9.2 Ausblick

Die aufgezeigten Ansätze zur Kompensation und Vermeidung von Einflussgrößen in Werkzeugmaschinen sind, wie die Kompensation von Spänen oder die Stabilisierung von Achsbewegungen, weiterhin abhängig von einer erfahrungsbasierten, anwendungsspezifischen Parametrierung. Für weitere Einflussgrößen wie die Auswahl der zu

analysierenden räumlichen Frequenzen oder die Auswahl von geeigneten ROIs wurden bisher wenige allgemeingültige Aussagen abgeleitet. Für eine bessere industrielle Anwendbarkeit sind daher Ansätze zu untersuchen, die die Anwendung der videobasierenden Schwingungsanalyse einfacher und die Ergebnisse robuster machen. Erste industrielle Anwendungen bestätigen diese Entwicklungsrichtung.²⁴ Leitfäden zur Anwendung unter den Randbedingungen in Produktionsmaschinen könnten zudem helfen, die entsprechenden Algorithmen für größere Nutzergruppen zu erschließen.

Weitere Arbeiten im Kontext spanender Werkzeugmaschinen sollten zudem den Einfluss von Kühlschmierstoffen auf die Analyse von Videodaten in Werkzeugmaschinen klären und untersuchen, inwiefern eine Schwingungsanalyse auch dann ermöglicht werden kann. Ebenso sind Möglichkeiten zur Kameraaufstellung und Videostabilisierung zu untersuchen, die auch bei schlechter Zugänglichkeit des Maschineninnenraums und damit ungünstigen Kamerapositionen geeignete Videoaufnahmen erlauben. Aufeinander abgestimmte Kamerahardware mit entsprechenden Beleuchtungs- und Befestigungsmöglichkeiten für Werkzeugmaschineninnenräume sowie darauf zugeschnittene Softwarepakete könnten die Bedienbarkeit besonders vereinfachen.

Die dynamische Entwicklung von digitalen Bildsensoren und schnellen Speichermedien zur Speicherung großer Datenmengen deuten darauf hin, dass Videokameras künftig auch als Datenquellen zur Schwingungsanalyse immer wichtiger werden. Der weitere Preisverfall der entsprechenden Hardwarekomponenten sowie die vereinfachte Anwendbarkeit von Software zur Videodatenanalyse könnten damit zu den entscheidenden Erfolgsfaktoren für den zunehmenden Einsatz im industriellen Kontext und gerade auch für die Anwendung in Werkzeugmaschinen werden.

Die mit der Verarbeitung von Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen verbundenen großen Datenmengen erschweren zudem aktuell den Einsatz in Anwendungen, die über eine nachträgliche Analyse hinausgehen. Sobald durch weiter gestiegene Performance der Hardware zur Datenverarbeitung eine Echtzeit-Verarbeitung möglich wird, werden sich im Bereich der Prozessüberwachung und -regelung spanender Werkzeugmaschinen zahlreiche weitere Anwendungsfälle eröffnen, bei denen die berührungslose und flexible videobasierte Schwingungsanalyse ihre Stärken besonders ausspielen können.

²⁴ RDI Technologies (2020), *IRIS CM*. <https://rditechnologies.com/models/iris-cm/> [02.07.2020]

10 Literaturverzeichnis

Literaturangaben mit dem Präfix „A_“, beispielsweise (A_Flohr 2019) bezeichnen studentische Abschlussarbeiten, die vom Verfasser der vorliegenden Arbeit angeleitet wurden.

(A_Flohr 2019)

A_Flohr, L. (2019), Störeinflüsse der Videomagnifikation in Produktionsumgebungen. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

(A_Kleinert 2017)

A_Kleinert (2017), Untersuchung von Störeinflüssen auf phasenbasierte Algorithmen bei der videobasierten Schwingungsanalyse im industriellen Umfeld. Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV), Karlsruhe, Deutschland.

(A_Parth 2018)

A_Parth, M. (2018), Analyse und Bewertung von Störfaktoren auf die Videoanalyse von Schwingungen in Produktionsumgebungen. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Deutschland.

(Abmayr 1994)

Abmayr, W. (1994), Einführung in die digitale Bildverarbeitung. Mit 26 Tabellen, Teubner, Stuttgart, Deutschland. ISBN: 3519061384.

(Baqersad et al. 2017)

Baqersad, J.; Poozesh, P.; Niezrecki, C. & Avitabile, P. (2017), „Photogrammetry and optical methods in structural dynamics – A review“, Mechanical Systems and Signal Processing, 86, S. 17–34.

(Beauchemin & Barron 1995)

Beauchemin, S. S. & Barron, J. L. (1995), „The computation of optical flow“, ACM Computing Surveys (CSUR), 27(3), S. 433–466.

(Beyerer, Puente León & Frese 2016)

Beyerer, J.; Puente León, F. & Frese, C. (2016), *Automatische Sichtprüfung. Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, Deutschland. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47786-1>. ISBN: 9783662477854.

(Brecher & Weck 2017)

Brecher, C. & Weck, M. (2017), „Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen“ in *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2. Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung*, Hrsg. C. Brecher & M. Weck, Springer Vieweg, Berlin, Deutschland, S. 595–724. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46567-7_13.

(Brecher & Weck 2019)

Brecher, C. & Weck, M. (2019), *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1. Maschinenarten und Anwendungsbereiche*, Springer Vieweg, Berlin, Deutschland. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-46565-3>. ISBN: 978-3-662-46565-3.

(Brownjohn, Xu & Hester 2017)

Brownjohn, J. M. W.; Xu, Y. & Hester, D. (2017), „Vision-Based Bridge Deformation Monitoring“, *Frontiers in Built Environment*, 3, S. 129.

(Chen et al. 2015)

Chen, J. G.; Wadhwa, N.; Cha, Y.-J.; Durand, F.; Freeman, W. T. & Buyukozturk, O. (2015), „Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification“, *Journal of Sound and Vibration*, 345, S. 58–71.

(Chen et al. 2017)

Chen, J. G.; Davis, A.; Wadhwa, N.; Durand, F.; Freeman, W. T. & Büyüköztürk, O. (2017), „Video Camera–Based Vibration Measurement for Civil Infrastructure Applications“, *Journal of Infrastructure Systems*, 23(3), S. B4016013-1-11.

(Diamond, Heyns & Oberholster 2017)

Diamond, D. H.; Heyns, P. S. & Oberholster, A. J. (2017), „Accuracy evaluation of sub-pixel structural vibration measurements through optical flow analysis of a video sequence“, *Measurement*, 95, S. 166–172.

(Elgharib et al. 2015)

Elgharib, M. A.; Hefeeda, M.; Durand, F. & Freeman, W. T. (2015), „Video magnification in presence of large motions“. 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, S. 4119–4127, Boston, MA, USA. ISBN: 978-1-4673-6964-0.

(Fleet & Jepson 1990)

Fleet, D. J. & Jepson, A. D. (1990), „Computation of component image velocity from local phase information“, *International Journal of Computer Vision*, 5(1), S. 77–104.

(Freeman, Adelson & Heeger 1991)

Freeman, W. T.; Adelson, E. H. & Heeger, D. J. (1991), „Motion without movement“, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 25(4), S. 27–30.

(Gautama & van Hulle 2002)

Gautama, T. & van Hulle, M. A. (2002), „A phase-based approach to the estimation of the optical flow field using spatial filtering“, *IEEE transactions on neural networks*, 13(5), S. 1127–1136.

(Helfrick et al. 2011)

Helfrick, M. N.; Niezrecki, C.; Avitabile, P. & Schmidt, T. (2011), „3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement“, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(3), S. 917–927. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.08.013>.

(Hommel Hercules Werkzeughandel GmbH & Co. KG 2019)

Hommel Hercules Werkzeughandel GmbH & Co. KG (2019), Technische Info VHM-Schrupfräser TiAlN-Ultra 4 Schneiden. Art. Nr. 16628, Viernheim, Deutschland.

(Jäger, Mastel & Knaebel 2016)

Jäger, H.; Mastel, R. & Knaebel, M. (2016), *Technische Schwingungslehre. Grundlagen - Modellbildung - Anwendungen*, Springer Vieweg, Wiesbaden, Deutschland. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-13793-9>. ISBN: 978-3-658-13793-9.

(Klocke 2018)

Klocke, F. (2018), *Fertigungsverfahren 1. Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, Deutschland. ISBN: 978-3-662-54207-1.

(Kollmann, Schösser & Angert 2006)

Kollmann, F. G.; Schösser, T. F. & Angert, R. (2006), *Praktische Maschinenakustik*, Springer, Berlin, Heidelberg, Deutschland. ISBN: 3540200940.

(Kooij & van Gemert 2016)

Kooij, J. F. P. & van Gemert, J. C. (2016), „Depth-Aware Motion Magnification“ in *Computer vision - ECCV 2016. 14th European conference*, Amsterdam, Niederlande, 11-14.10.2016, Hrsg. B. Leibe, J. Matas, N. Sebe & M. Welling, Springer, Cham, Schweiz, S. 467–482.

(Kuttner & Rohnen 2019)

Kuttner, T. & Rohnen, A. (2019), *Praxis der Schwingungsmessung. Messtechnik und Schwingungsanalyse mit MATLAB®*. Springer Vieweg, Wiesbaden, Deutschland. ISBN: 978-3-658-25048-5.

(Labisch & Weber 2013)

Labisch, S. & Weber, C. (2013), *Technisches Zeichnen. Selbstständig lernen und effektiv üben*, Springer Vieweg, Wiesbaden, Deutschland. ISBN: 9783834809155.

(Meyer 2017)

Meyer, M. (2017), *Signalverarbeitung. Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter*, Springer Vieweg, Wiesbaden, Deutschland. ISBN: 9783658183202.

(Nischwitz et al. 2020)

Nischwitz, A.; Fischer, M.; Haberäcker, P. & Socher, G. (2020), *Bildverarbeitung. Band II des Standardwerks Computergrafik und Bildverarbeitung*, Springer Vieweg, Wiesbaden, Deutschland. ISBN: 3658287047.

(Oh et al. 2018)

Oh, T.-H.; Jaroensri, R.; Kim, C.; Elgharib, M.; Durand, F.; Freeman, W. T. & Matusik, W., 08.04.2018, *Learning-based Video Motion Magnification*. <http://arxiv.org/pdf/1804.02684v3>.

(Randall 1987)

Randall, R. B. (1987), *Frequency analysis*, Brüel & Kjaer, Naerum, Dänemark. ISBN: 8787355078.

(Simoncelli et al. 1992)

Simoncelli, E. P.; Freeman, W. T.; Adelson, E. H. & Heeger, D. J. (1992), „Shiftable multiscale transforms“, *IEEE Transactions on Information Theory*, 38(2), S. 587–607.

(Simoncelli & Freeman 1995)

Simoncelli, E. P. & Freeman, W. T. (1995), „The steerable pyramid: a flexible architecture for multi-scale derivative computation“. *Proceedings, International Conference on Image Processing*, S. 444–447, Washington, DC, USA. ISBN: 0-7803-3122-2.

(Syska 2006)

Syska, A. (Hrsg.) (2006), *Produktionsmanagement*, Gabler Verlag, Wiesbaden, Germany. ISBN: 978-3-8349-9091-4.

(Tomasi & Kanade 1991)

Tomasi, C. & Kanade, T. (1991), *Detection and tracking of point features*, Technical Report, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA.

(Wadhwa et al. 2013)

Wadhwa, N.; Rubinstein, M.; Durand, F. & Freeman, W. T. (2013), „Phase-based video motion processing“, *ACM Transactions on Graphics*, 32(4), S. 1.

(Wadhwa et al. 2014)

Wadhwa, N.; Rubinstein, M.; Durand, F. & Freeman, W. T. (2014 - 2014), „Riesz pyramids for fast phase-based video magnification“. *2014 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, S. 1–10, Santa Clara, CA, USA. ISBN: 978-1-4799-5188-8.

(Wadhwa et al. 2016)

Wadhwa, N.; Freeman, W. T.; Durand, F.; Wu, H.-Y.; Davis, A.; Rubinstein, M.; Shih, E.; Mysore, G. J.; Chen, J. G.; Buyukozturk, O. & Guttag, J. V. (2016), „Eulerian video magnification and analysis“, *Communications of the ACM*, 60(1), S. 87–95.

(Wadhwa et al. 2017)

Wadhwa, N.; Chen, J. G.; Sellon, J. B.; Wei, D.; Rubinstein, M.; Ghaffari, R.; Freeman, D. M.; Büyükoztürk, O.; Wang, P.; Sun, S.; Kang, S. H.; Bertoldi, K.; Durand, F. & Freeman, W. T. (2017), „Motion microscopy for visualizing and quantifying

small motions“, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 114(44), S. 11639–11644.

(Wu et al. 2012)

Wu, H.-Y.; Rubinstein, M.; Shih, E.; Guttag, J.; Durand, F. & Freeman, W. (2012), „Eulerian video magnification for revealing subtle changes in the world“, ACM Transactions on Graphics, 31(4), S. 1–8.

(Xu & Brownjohn 2018)

Xu, Y. & Brownjohn, J. M. W. (2018), „Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures“, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 8(1), S. 91–110.

(Xu & Lin 2006)

Xu, L. & Lin, X. (2006), „Digital Image Stabilization Based on Circular Block Matching“, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 52(2), S. 566–574.

(Zeller 2018)

Zeller, P. (Hrsg.) (2018), Handbuch Fahrzeugakustik. Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, Deutschland. ISBN: 9783658185190.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Schematische Übersicht des Aufbaus der Arbeit	6
Abbildung 2-1: Darstellung einer harmonischen Schwingung in der komplexen Zahlenebene nach (Kuttner & Rohnen 2019)	8
Abbildung 2-2: Originalbild (oben) und zweidimensionale DFT (unten) eines gesägten Werkstücks mit periodischer Riefentextur; hohe Frequenzen an den Bildrändern und niedrige Frequenzen in der Bildmitte	13
Abbildung 2-3: Bildpyramide (Originalbild $gmn0$ in der Pyramidenebene) nach (Beyerer, Puente León & Frese 2016)	15
Abbildung 2-4: Einfluss der Amplitude auf Sensitivität des Phasenwinkels: Ein addierter Störeinfluss (roter Vektor) hat größeren Einfluss auf den Phasenwinkel φ , wenn die Amplitude gering ist: $\Delta\varphi_1 < \Delta\varphi_2$	17
Abbildung 2-5: Autokorrelation eines verrauschten Sinussignals nach (Brecher & Weck 2017)	18
Abbildung 2-6: Prinzipbild eines Einmassenschwingers nach (Brecher & Weck 2017)	21
Abbildung 2-7: Nachgiebigkeitsfrequenzgänge eines Einmassenschwingers (hier: in Abhängigkeit des Dämpfungsmaßes) nach (Brecher & Weck 2017)	22
Abbildung 2-8: Schwingungen spanender Werkzeugmaschinen nach (Brecher & Weck 2017)	24
Abbildung 2-9: Zusammenwirken von Messobjekt und Schwingungsaufnehmer nach (Kuttner & Rohnen 2019)	26
Abbildung 2-10: Messprinzip eines Relativaufnehmers (links) und eines Absolutaufnehmers (rechts) nach (Kuttner & Rohnen 2019)	27
Abbildung 2-11: Amplitude in Abhängigkeit der Frequenz bei $1g$ Beschleunigung nach (Kuttner & Rohnen 2019)	29
Abbildung 2-12: Extrinsische und intrinsische Parameter zur Umrechnung zwischen Bildkoordinatensystem, Kamerakordinatensystem und Weltkoordinatensystem nach The MathWorks	36

Abbildung 2-13: Schritte der Kamerakalibrierung zur Bestimmung der Projektionsmatrix für eine dreidimensionale Lokalisierung nach (Xu & Brownjohn 2018)	37
Abbildung 2-14: Typische Vorgehensweise beim Feature Point Matching zur Analyse von Objektbewegungen nach (Xu & Brownjohn 2018)	39
Abbildung 2-15: Vorgehensweise zur phasenbasierten Bewegungsanalyse und Bewegungsverstärkung nach (Wadhwa et al. 2016)	43
Abbildung 3-1 Einflussgrößen mit Wirkung auf Fehler bei der videobasierten Schwingungsanalyse (Abweichung der videobasierten Schwingungsanalyse von einer Referenzmessung)	54
Abbildung 3-2: Illustrierte Darstellung der Vorgehensweise	55
Abbildung 3-3: Detailaufnahme der in einer Werkzeugmaschine eingesetzten Hochgeschwindigkeitskamera: Die Kamera ist in einem Makrolongehäuse mit einstellbarem Kugelkopf auf einem Stativ aus Aluminiumprofilen befestigt; das Stativ und Makrolongehäuse sind so positioniert, dass sie keine Kontaktpunkte mit der Werkzeugmaschine haben.	56
Abbildung 4-1: Durch eindimensionale Translation der Kamera hervorgerufene Messfehler nach (Brownjohn, Xu & Hester 2017)	59
Abbildung 4-2: Schematischer Aufbau zur Datenerfassung und Versuchssteuerung	62
Abbildung 5-1 Bei der Untersuchung allgemeiner Einflussgrößen fokussierte Hauptgruppen und zugeordnete mögliche Einflüsse	63
Abbildung 5-2: Messaufbau zur Evaluierung von allgemeinen Einflussgrößen bei der Videoaufnahme und Datenauswertung	64
Abbildung 5-3: Videoframes eines synthetisch erzeugten Videos nach (A_Flohr 2019)	66
Abbildung 5-4: Videoframes mit Piezoaktor zur Evaluierung unterschiedlicher Aufnahmeparameter und Eingangsgrößen nach (A_Parth 2018)	68
Abbildung 5-5 Darstellung eines Videoframes mit vertikal verschobenen ROI-Positionen (rot markiert)	71

- Abbildung 5-6: Einfluss der Amplitude auf den linearen Zusammenhang zwischen Objektverlagerung und Phase – insbesondere bei niedrigen Amplituden hat Rauschen starken Einfluss auf die Phaseninformation nach (A_Flohr 2019) 72
- Abbildung 5-7: Bildframes aus synthetisch erzeugtem Video zur Evaluierung der Abhängigkeit von Phase und Amplitude: Kante des dunklen Körpers bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit durch die mittig positionierte ROI (gelb gekennzeichnet) nach (A_Flohr 2019) 73
- Abbildung 5-8: Spektrum des Referenz-Beschleunigungssensors (oben) und Spektren der Phaseninformation für vertikal verschobene ROIs (jeweils rechts rot markiert) 75
- Abbildung 5-9: Spektrum der Phasenvariation für niedrige und hohe räumliche Frequenzen bei gleicher ROI außerhalb der Werkstückkante – gutes Signal-Rausch-Verhältnis bei niedrigen räumlichen Frequenzen trotz ungünstiger ROI-Position 76
- Abbildung 6-1 Mögliche werkzeugmaschinenspezifische Einflussgrößen (Milieu) 82
- Abbildung 6-2: Versuchsaufbau zur Datengenerierung für die Filterung von Videodaten von Werkzeugmaschinenschwingungen, hier: Versuchsaufbau zur Validierung von Maschinenschwingungen mit Relativbewegungen 84
- Abbildung 6-3: Während Spanflug analysierte ROI (rot in a), b) Verlauf der Phase für niedrige räumliche Frequenzen (Ebene 8) und hohe räumliche Frequenzen (Ebene 1), Zeitpunkt des Frames aus a) rot markiert 86
- Abbildung 6-4: Vorgehensweise zur Kompensation von Spänen in Videoframes 89
- Abbildung 6-5: Nach Spänekompensation: Während Späneflug analysierte ROI (rot in a), b) Verlauf der Phase für niedrige räumliche Frequenzen (Ebene 8) und hohe räumliche Frequenzen (Ebene 1), Zeitpunkt des Frame aus a) rot markiert 91
- Abbildung 6-6: Nicht-spankompensiertes und spankompensiertes Spektrum für niedrige Raumfrequenzen 92

Abbildung 6-7: Darstellung der Helligkeitsfluktuation durch Reflektion eines neben dem Werkstück rotierenden Werkzeugs: Differenz der Grauwerte von aufeinanderfolgenden Frames im Vergleich zum Referenzframe	94
Abbildung 6-8: Erzeugung weicher Schatten durch ausgedehnte Lichtquellen nach (Nischwitz et al. 2020)	95
Abbildung 6-9: Während einer Helligkeitsfluktuation analysierte ROI (rot in a), Spektrum der Phase für niedrige räumliche Frequenzen in Ebene 8 b) und für hohe räumliche Frequenzen in Ebene 1 c)	96
Abbildung 6-10: Schwingungsanalyse an Werkstückkante mit rechts neben dem Werkstück rotierenden Werkzeug (Analyse in niedrigem Ortsfrequenzbereich)	98
Abbildung 6-11: Schwingungsanalyse an Werkstückkante mit links neben dem Werkstück rotierenden Werkzeug (Analyse in niedrigem Ortsfrequenzbereich)	98
Abbildung 6-12: Vorgehensweise zur Kompensation von Achsbewegungen in Videoframes mit Tracking von Objekten	102
Abbildung 6-13: Gegenüberstellung von Originalvideo mit bewegter Achse (links) zu mit Tracking kompensiertem Video (rechts): Stabilisierung der ROI mit Beschleunigungssensor an der Spindelnase	103
Abbildung 6-14: Scheinbare Rotation des von der Kamera abgebildeten Objekts durch Veränderung der Kameraperspektive und damit geänderte Reflektion des Körpers im stabilisierten Video	104
Abbildung 6-15 Vorgehensweise zur Kompensation von Achsbewegungen in Videoframes mit Maschinensteuerungsdaten	105
Abbildung 6-16: Für die Bestimmung der intrinsischen Parameter genutzte, aus fixer Kameraposition aufgenommene Bilder eines Schachbrettmusters	105
Abbildung 6-17: Bilderreihe eines am Fahrständer angebrachten Schachbrettmusters zur Bestimmung der extrinsischen Parameter	106
Abbildung 6-18: Gegenüberstellung von Originalvideo mit bewegter Achse und Achsdaten-kompensiertem Video: Stabilisierung der ROI mit Beschleunigungssensor an der Spindelnase	107
Abbildung 7-1 Schematische Darstellung der Anordnung von Kamera, Werkstück, Werkzeug und Maschinenachsen zur Analyse von Werkstückschwingungen	111

Abbildung 7-2: Videoframes aus den Frässegmenten eines Versuchswerkstücks	112
Abbildung 7-3: Standbilder aus Aufnahmen zur Analyse von Werkstückschwingungen: a) Standbild vor Fräsoperation, b) Standbild während Fräsoperation mit am linken Beschleunigungssensor analysierter ROI	114
Abbildung 7-4: Messaufbau für Werkstückschwingungen	115
Abbildung 7-5: Aus Beschleunigungssignal nach der Zeit integrierte Verlagerung des Werkstücks im Fräsversuch bei Drehzahl 6370 1/min und Vorschub 2000 mm/min	116
Abbildung 7-6: Gegenüberstellung der Spektren von Videosignal und Referenzsignal für erstes Frässegment bei Drehzahl 6370 1/min und Vorschub 2000 mm/min	117
Abbildung 7-7: Gegenüberstellung der Spektren von Videosignal und Referenzsignal für zweites und drittes Frässegment bei Drehzahl 6370 1/min und Vorschub 2000 mm/min	118
Abbildung 7-8: Gegenüberstellung der Spektren von Videosignal und Referenzsignal für viertes und fünftes Frässegment bei Drehzahl 6370 1/min und Vorschub 2000 mm/min	119
Abbildung 7-9: Kohärenzspektrum von Referenzsignal und Videoanalyse für Drehzahl 6370 1/min Vorschub 2000 mm/min: Werte nahe 1 zeigen starke lineare Abhängigkeit	120
Abbildung 7-10: Aus Beschleunigungssignal integrierte Verlagerung des Werkstücks im Fräsversuch bei Drehzahl 3185 1/min und Vorschub 500 mm/min	121
Abbildung 7-11: Spektren des Videosignals für Frässegmente mit ansteigenden Amplituden bei Drehzahl 3185 1/min und Vorschub 500 mm/min	123
Abbildung 7-12: Kohärenzspektrum von Referenzsignal und Videoanalyse für Drehzahl 3185 1/min Vorschub 500 mm/min: Werte nahe 1 zeigen starke lineare Abhängigkeit	125
Abbildung 7-13: Spektren des Referenzsignals für drei Versuche mit gleichen Schnittparametern (Drehzahl 3185 1/min, Zahnvorschub 0,04 mm/U, Vorschub 500 mm/min): Nahezu konstante Amplituden in den Versuchen	126

Abbildung 7-14: Spektren des Videosignals für drei Versuche mit gleichen Schnittparametern (Drehzahl 3185 1/min, Zahnvorschub 0,04 mm/U, Vorschub 500 mm/min): Deutliche Unterschiede der Amplituden zwischen den Versuchen	127
Abbildung 7-15: Bewegungsrichtung und Richtung der Frequenzanalyse in Validierungsversuchen zur Kompensation von Achsbewegungen	128
Abbildung 7-16: Aus dem Beschleunigungssignal integrierte Verlagerung des Referenzsensors an der Spindelnase im Planfräsversuch; in der Schwingungsanalyse betrachteter Zeitraum mit „Start“ und „Ende“ markiert	129
Abbildung 7-17: Standbilder der Analyse von Hauptspindelschwingungen mit unterschiedlichen Spindelpositionen während der Fräsoperation	131
Abbildung 7-18: Gegenüberstellung der Spektren von Videosignal und Referenzsignal für Planfräsversuch mit Achsdaten-basierter Kompensation	132
Abbildung 7-19: Kohärenzspektrum von Referenzsignal und Videoanalyse in Planfräsversuch mit Achsdaten-basierter Kompensation: Hohe Werte zeigen starke lineare Abhängigkeit der Signale im jeweiligen Frequenzspektrum	132
Abbildung 7-20: Gegenüberstellung der Spektren von Videosignal und Referenzsignal für Planfräsversuch mit trackingbasierter Kompensation	133
Abbildung 7-21: Kohärenzspektrum von Referenzsignal und Videoanalyse in Planfräsversuch mit trackingbasierter Kompensation: Hohe Werte zeigen lineare Abhängigkeit der Signale im jeweiligen Frequenzspektrum	134
Abbildung 7-22: Verstärktes Video ohne Spankompensation (oben) und mit Spankompensation (unten) im ersten Frässegment mit kleiner Schwingungsamplitude: leichter Einfluss von Spänen im nicht kompensierten Video	136
Abbildung 7-23: Verstärktes Video ohne Spankompensation (oben) und mit Spankompensation (unten) im fünften Frässegment mit hoher Schwingungsamplitude: deutlicher Einfluss von Spänen und Werkzeug im nicht kompensierten Video	137
Abbildung 7-24: Kontrolle der Videoverstärkung: Verstärktes Video ohne Spankompensation (oben) und mit Spankompensation (unten) ohne Eingriff des Fräswerkzeugs	138

Abbildung 7-25: Verstärkung der Schwingung der Spindelnase im basierend auf Achsdaten stabilisierten Video: deutlich erkennbare zyklische Bewegung in Zeitrichtung

138

Abbildung 8-1 Identifizierte und untersuchte Einflussgrößen (untersuchte fett dargestellt)

140

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1 Im Versuchsplan untersuchte Faktoren und Faktorstufen nach (A_Parth 2018)	67
Tabelle 5-2: Zusammenfassende Bewertung von Einflussgrößen zur Übertragung auf Werkzeugmaschinenanwendungen (grün: leichte Umsetzung, rot: Herausforderung bei Umsetzung)	79
Tabelle 6-1 Untersuchte Ansätze zur Kompensation und Vermeidung von Störeinflüssen	109
Tabelle 7-1: Schnittparameter der Versuche zur Analyse von Werkstückschwingungen, Pfeile vor Werten zeigen hohe und niedrige Faktorstufen	113
Tabelle 8-1 Einflussgrößen mit am höchsten bewerteter Relevanz	141

Forschungsberichte aus dem wbk
Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16
Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17
Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18
Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19
Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20
Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21
Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22
Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24
Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25
Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünfachsigem Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme: Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung im Bereich der Montagesystemplanung

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch Rückführung von Qualitätsinformationen

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung in verteilten Strukturen

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer Untersuchungen beim Fräsen

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungs-elementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindeltriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspansprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90
Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration

Band 91
Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92
Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93
Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94
Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95
Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96
Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97
Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98
Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management- Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen Applikationsprotokollen

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönzheimer

Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikroteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschäl

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und ganzheitlichen Produktionssystemen

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen in Trockenbearbeitungsprozessen

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere geometrische Maschinenbeurteilung

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung auf den Bereich der Mikrobearbeitung

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für μ MIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetrieben

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauße

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebsselementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren
ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit
der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 230
Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231
Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232
Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233
Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234
Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235
Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236
Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237
Dr.-Ing. Sebastian Haag

Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

**Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning
Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry**

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

**Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation
Prozesseinflüsse und Prozessauslegung**

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener
Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

**Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms
im Faserblasverfahren**

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

**Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels
simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotextrurierung**

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

**Regionalized implementation strategy of smart
automation within assembly systems in China**

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

**Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung
für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion**

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und
der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

**Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen
Computertomographie**

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

**Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation
von Schwingungen in Werkzeugmaschinen**

