

# **Optisches Messverfahren zur gleichzeitigen Erfassung von Absolutdrehwinkel und Drehmoment an Wellen**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte Dissertation

von

M. Sc. Tobias Schneider (geb. Menke)

geboren am 07.03.1992  
in Hildesheim

2020

Referent: Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Ostendorf  
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek  
Tag der Promotion: 22.10.2020

# Kurzzusammenfassung

Absolut messende Drehwinkel- und Drehmomentmesssysteme haben in der Industrie eine große Bedeutung. Bislang erfolgt die Erfassung beider Messgrößen getrennt. Im Rahmen dieser Dissertation wird ein berührungsloses Messverfahren zur Erfassung des absoluten Drehwinkels und Drehmoments untersucht. Um das vorliegende Drehmoment einer mechanischen Welle berührungslos erfassen zu können, werden mit einem Laserverfahren zwei codierte Markierungen in Umfangsrichtung und entsprechendem Abstand aufgebracht, die mittels eines optischen Systems ausgelesen werden. Beide Markierungen codieren jeweils den absoluten Drehwinkel über  $360^\circ$ , sodass bei Erfassung beider Drehwinkel auf eine Winkeldifferenz und indes auf ein vorliegendes Drehmoment geschlossen wird. Die Weiterentwicklung vorhandener Codierungen als auch die Detektierbarkeit der absoluten Drehwinkel und des daraus berechneten Drehmoments sind in dieser Arbeit beschrieben. Darüber hinaus wird die Erfassung der Unrundheit und die Wirkung dieser auf die Winkelmessung im Rahmen der wissenschaftlichen Frage untersucht. Hierzu sind sowohl die Modellvorstellung als auch experimentelle Messergebnisse in der Arbeit beschrieben. Die gleichzeitige Erfassung der Unrundheit bietet die Möglichkeit zur Ermittlung der winkelabhängigen Abstandsänderung, sodass eine Anwendung in der zustandsorientierten Instandhaltung (z. B. von Lagern) denkbar ist. Ferner sind Vorüberlegungen zur industriellen Einsetzbarkeit einbezogen, um eine kompakte Bauweise zu ermöglichen und Datenverarbeitung weiter zu optimieren. In Versuchen mit einem Motorenprüfstand wird das prototypisch umgesetzte Messsystem in der industriellen Praxis untersucht und diskutiert. Bei einer Drehzahl von  $500 \text{ min}^{-1}$  wurde die generelle Machbarkeit der optischen Drehmomentmessung mit einem Fehler von bis zu 11 % nachgewiesen.

**Schlüsselwörter:** optisches Drehmomentmesssystem, absoluter Drehwinkel, Codierung, Unrundheit, Winkeldifferenzverfahren

## Abstract

Absolutely measuring angle of rotation and measuring torque are of great importance in industry. So far, the acquisition of both variables is done separately. Within the scope of this thesis, a non-contact measurement method for the determination of the absolute rotation angle and torque is investigated. In order to detect the torque of a mechanical shaft contactless, two coded markings in the circumferential direction and corresponding distance are applied with a laser, which are read by means of an optical system. Both markings encode the absolute angle of rotation within  $360^\circ$ , so that when the two angles of rotation are detected, an angle difference and thus torque are inferred. Further development of existing codings as well as the detectability of the absolute rotation angles and the torque calculated therefrom are described in this work. In addition, the detection of the circularity and the effect of this on the angle measurement in the context of the scientific question is examined. For this purpose, both the model presentation and experimental measurement results are described in the work. The simultaneous detection of the circularity offers the possibility of determining the angle-dependent change in distance, so that an application in condition-based maintenance (e.g. of bearings) is conceivable. Furthermore, preliminary considerations for industrial applicability are included in order to enable a compact design and further optimize data processing. In experiments with an engine test bench, the implemented prototypical measuring system is investigated and discussed in industrial practice. At a speed of  $500 \text{ min}^{-1}$ , the general feasibility of optical torque measurement was demonstrated with an error of up to 11 %.

**Title:** Optical system for measuring simultaneously the absolute angle of rotation and the torque of shafts

**Keywords:** optical torque measuring system, absolute rotation angle, coding, circularity, angle difference method

## Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH (IPH). Die Untersuchungen wurden über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) finanziell unterstützt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer, dem geschäftsführenden Gesellschafter des IPH und Leiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik der Leibniz Universität Hannover, gilt mein besonderer Dank für die vertrauensvolle und wohlwollende Unterstützung, die ich während meiner Tätigkeit am Institut erfahren habe. Auch möchte ich mich für die Möglichkeiten bedanken, die mir gegeben wurden. Der intensive und regelmäßige Austausch war Grundvoraussetzung für die wissenschaftliche Bearbeitung dieser Dissertation. Zudem möchte ich mich noch bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Ostendorf als Zweitprüfer sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek für den Vorsitz der Prüfungskommission bedanken.

Außerdem danke ich den aktiven und ehemaligen Kollegen aus der Abteilung für Produktionsautomatisierung. Insbesondere bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Björn Eilert und Herrn Dr.-Ing. Florian Podszus, die mir stets bei Fragen sowie beim Korrekturlesen meiner Arbeit behilflich waren.

Darüber hinaus danke ich Herrn Anan Dai für die Ausarbeitung und Programmierung der Codierung, sowie Herrn Timon Barlag für die Weiterentwicklung dieser. Herrn Jan Perwas möchte ich besonders für Unterstützung bei der Umsetzung verschiedener Hardware-Projekte (insbesondere der SSI-USB-Box und der FPGA-Triggerbox) danken, ohne die das Projekt nur unter Einschränkung hätte umgesetzt werden können. Ebenso danke ich Herrn David Kramer für die gewissenhafte konstruktionstechnische Konzeption und Auslegung der Testkörpergeometrie, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Herrn Johannes Wortmann danke ich für seine tatkräftige Masterarbeit zur Auslegung der statischen und quasi-dynamischen Drehmomentprüfstände. Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Dr. rer. nat. Fabian Will (LLS ROWIAK LaserLabSolutions GmbH), sowie Herrn Jan Geller und Herrn Albert (High-Speed Photo-Systems) für die Unterstützung der Hochgeschwindigkeitsbeleuchtung bedanken.

Meiner Familie danke ich dafür, dass sie meinen Werdegang ermöglicht haben und stets mit sehr großem Engagement gefördert haben. Danken möchte ich ebenfalls meiner Frau, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit mit viel Verständnis und Geduld unterstützt hat.

Schwäbisch Gmünd, 27. Juni 2020

Tobias Schneider

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Abgrenzung des Anwendungsfalls . . . . .   | 3         |
| 1.2      | Resultierende Herausforderung . . . . .  | 3         |
| 1.3      | Aufbau der Arbeit . . . . .  | 5         |
| <b>2</b> | <b>Stand der Technik und Wissenschaft</b>  | <b>7</b>  |
| 2.1      | Drehwinkelmessverfahren . . . . .  | 7         |
| 2.2      | Drehmomentmessverfahren . . . . .  | 9         |
| 2.2.1    | Resistive Dehnungsmessstreifen . . . . .   | 10        |
| 2.2.2    | Optische Dehnungsmessstreifen . . . . .  | 12        |
| 2.2.3    | Neuartige Drehmomentmessverfahren und Anwendungsfelder .                           | 12        |
| 2.3      | Kombinierte Drehzahl- und Drehmomentmessverfahren . . . . .                        | 14        |
| 2.4      | Zwischenfazit . . . . .  | 15        |
| <b>3</b> | <b>Zielsetzung und wissenschaftliche Fragestellung</b>                             | <b>17</b> |
| <b>4</b> | <b>Konzeption der Drehwinkelcodierung und Drehwinkelmessung</b>                    | <b>21</b> |
| 4.1      | Konzeption der Drehwinkelcodierung . . . . .                                       | 21        |
| 4.1.1    | Aufbringung der Lasermarkierung . . . . .  | 22        |
| 4.1.2    | Codierung des absoluten Winkels durch eine Pseudo-Random-Codierung (PRC) . . . . . | 23        |
| 4.1.3    | Codierung des absoluten Winkels durch eine MPR-Codierung .                         | 25        |
| 4.2      | Auslegung einer Torsionsmesswelle . . . . .  | 27        |
| 4.3      | Bildverarbeitung zum Auslesen von Markierungen . . . . .                           | 30        |
| 4.3.1    | Aktueller Stand der Technik und Wissenschaft . . . . .                             | 30        |
| 4.3.2    | Entwickeltes Schwellwert-Verfahren . . . . .                                       | 32        |
| 4.4      | Zwischenfazit . . . . .  | 35        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>5</b> | <b>Modellbildung und Simulation</b>                                   | <b>37</b> |
| 5.1      | Auswirkung der translatorischen Bewegung des optischen Systems . . .  | 38        |
| 5.2      | Auswirkung der rotatorischer Bewegung des optischen Systems . . . .   | 40        |
| 5.3      | Einfluss der Unschärfe auf die Winkelgenauigkeit . . . . .            | 42        |
| 5.3.1    | Simulation der Unschärfe durch Faltung mit einem Gauß-Kernel          | 43        |
| 5.3.2    | Simulation der Unschärfe durch Faltung mit einem Motion-Kernel        | 46        |
| 5.3.3    | Wechselwirkung der Gauß- und Bewegungsunschärfe . . . . .             | 47        |
| 5.4      | Zwischenfazit . . . . .   | 48        |
| <b>6</b> | <b>Umsetzung des optischen Messsystems</b>                            | <b>51</b> |
| 6.1      | Vorüberlegung zur industriellen Einsetzbarkeit . . . . .              | 51        |
| 6.2      | Voruntersuchungen der lasermarkierten Testwelle . . . . .             | 52        |
| 6.2.1    | Oberflächenuntersuchung mit dem Konfokalmikroskop . . . . .           | 52        |
| 6.2.2    | Voruntersuchungen mit dem Auflichtmikroskop . . . . .                 | 53        |
| 6.3      | Auslegung des optischen Systems . . . . .                             | 55        |
| 6.3.1    | Beleuchtung . . . . .   | 55        |
| 6.3.2    | Abbildende Optik . . . . .  | 56        |
| 6.3.3    | Digitale Kamera . . . . .   | 57        |
| 6.4      | Parametrierung der Beleuchtung und Belichtungszeit . . . . .          | 58        |
| 6.5      | Kalibrierung des optischen Messsystems . . . . .                      | 59        |
| 6.6      | Zwischenfazit . . . . .   | 60        |
| <b>7</b> | <b>Verifikation des Messverfahrens</b>                                | <b>61</b> |
| 7.1      | Fehlertypen innerhalb eines Bildes . . . . .                          | 61        |
| 7.2      | Kalibrierung und experimentelle Bestimmung der Drehwinkel-Genauigkeit | 64        |
| 7.3      | Charakterisierung des optischen Drehmoment-Messsystems . . . . .      | 69        |
| 7.4      | Zwischenfazit . . . . .   | 73        |
| <b>8</b> | <b>Evaluation und Anwendung</b>                                       | <b>75</b> |
| 8.1      | Evaluation der wissenschaftlichen Frage . . . . .                     | 75        |
| 8.1.1    | Unschärfe durch radiale Verschiebung . . . . .                        | 75        |
| 8.1.2    | Winkelabweichung durch radiale Verschiebung . . . . .                 | 80        |
| 8.1.3    | Untersuchung des Abbildungsmaßstabs . . . . .                         | 81        |
| 8.2      | Optisches Messverfahren zur Erfassung der Unrundheit . . . . .        | 84        |
| 8.3      | Anwendung in der Praxis . . . . .                                     | 90        |
| 8.3.1    | Synchronisierung und Hochgeschwindigkeitsbeleuchtung . . . .          | 90        |
| 8.3.2    | Vorversuch in der Rotation . . . . .                                  | 96        |



|          |   |               |
|----------|---|---------------|
| 8.3.3    | Untersuchung des Drehmoments in der Rotation . . . . .            | 99            |
| 8.3.4    | Erhöhung des Informationsgehalts durch Datenreduktion . . . . .   | 103           |
| 8.3.5    | Industrielle Einsetzbarkeit durch Miniaturisierung . . . . .      | 106           |
| 8.4      | Zwischenfazit . . . . .   | 108           |
| 8.5      | Nutzen und Grenzen des Messsystems und -verfahrens . . . . .      | 108           |
| <b>9</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                               | <b>111</b>    |
| <b>A</b> | <b>Anhang</b>   | <b>I</b>      |
| A.1      | Weitere Drehmomentmessverfahren . . . . .                         | I             |
| A.1.1    | Piezoelektrische Sensoren . . . . .                               | I             |
| A.1.2    | Magnetoelastische Sensoren . . . . .                              | II            |
| A.2      | Temperaturabhängigkeit der Elastizität . . . . .                  | III           |
| A.3      | Einfluss der gewölbten Oberfläche auf die Schärfe . . . . .       | IV            |
| A.4      | Veränderung des Arbeitsabstands durch Rollen der Kamera . . . . . | V             |
| A.5      | Veränderung des Arbeitsabstands durch Nicken der Kamera . . . . . | V             |
| A.6      | Einfluss des Gierens auf die Winkelmessung . . . . .              | VII           |
| A.7      | Laserdiode als Beleuchtung . . . . .                              | VIII          |
| A.8      | Konstruktionszeichnung der Messwelle . . . . .                    | X             |
| A.9      | Quellcode der MPRC-Bildverarbeitung . . . . .                     | XI            |
| A.10     | Quellcode der Tenengrad-Funktion . . . . .                        | XVIII         |
|          | <b>Bildverzeichnis</b>  | <b>XIX</b>    |
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b>  | <b>XXIII</b>  |
|          | <b>Abkürzungsverzeichnis</b>                                      | <b>XXVII</b>  |
|          | <b>Formelzeichen</b>  | <b>XXIX</b>   |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                                       | <b>XXXIII</b> |
|          | <b>Betreute studentische Arbeiten</b>                             | <b>LI</b>     |
|          | <b>Eigene Veröffentlichungen</b>                                  | <b>LIII</b>   |
|          | <b>Lebenslauf</b>   | <b>LV</b>     |



# 1 Einleitung

Der endogenen Wachstumstheorie folgend, sind Unternehmen angehalten technischen Fortschritt z. B. durch Erhöhung der Produktivität zu generieren. Erst durch einen technischen Fortschritt kann maßgeblich und langfristig ein ökonomisches Wachstum erreicht werden und das Unternehmen am Markt bestehen. Eine Erhöhung der Produktivität kann z. B. durch Automatisierung erreicht werden. Hauptgebiete der Automatisierung sind die Überwachung, Steuerung und Regelung von Prozessen, was wiederum in der sog. Feldebene u. a. durch Sensoren realisiert ist [BDD<sup>+</sup>07]. Sensoren bilden damit eine entscheidende Schnittstelle zwischen mechanischen Messgrößen und elektrischen Ausgangsgrößen. Die damit einhergehende Schlüsselrolle der Sensoren spiegelt sich neben der Bedeutung auch im weltweiten Umsatz der Sensor-Industrie von etwa 102 Mrd. EUR (in 2010) wieder [BDE<sup>+</sup>17]. Durch das anhaltende Umsatzwachstum werden neue Sensoren erforscht und Grundlagen für zukünftige technische Innovationen gelegt, sodass laut [BDE<sup>+</sup>17] ein Anstieg des Umsatzes auf über das doppelte nämlich 205 Mrd. EUR bis 2020 prognostiziert wird. Als Trends der neuen Entwicklungen sind die Miniaturisierung, Integration und Kommunikation zu erkennen [BDE<sup>+</sup>17] sowie die Vereinheitlichung von Sensor-Schnittstellen und smarte Konfiguration von Sensoren auf Sensorebene [Pod19]. Funktionen werden in unterschiedliche Sensorkomponenten integriert, Sensoren fusioniert und für vorausschauendes autonomes Handeln genutzt. Entsprechend der aktuellen Trends kann das Thema dieser Arbeit der Sensorintegration zugeordnet werden. Genauer behandelt die vorliegende Arbeit die Integration zweier berührungsloser Messverfahren, um ein neuartiges Messverfahren im Bereich der Drehwinkel- und Drehmomentmessung zu erforschen. Für einen passenden Einstieg folgt zunächst eine allgemeine Einordnung des Themas. Dabei werden sowohl Sensoren zur Drehwinkel- als auch Drehmomentmessung kurz erläutert.

## **Sensoren zur Drehwinkelmessung**

Zur Winkelerfassung in der Industrieautomation werden standardmäßig sog. Dreh-

## 1 Einleitung

geber eingesetzt [HLG17]. Mit Hilfe der Winkellage können weitere Messgrößen abgeleitet werden, wie z. B. die Drehzahl von Antriebswellen oder Reifen. Darüber hinaus werden Drehgeber auch zur maßgenauen Positionierung angewendet wie bspw. in sog. Seilzuglängengebern von Personenaufzügen [Ung18].

Drehgeber können in absolute und inkrementelle Systeme unterteilt werden. Während inkrementelle Systeme eine relative Winkeländerung erfassen, wird bei absoluten Systemen der absolute Drehwinkel erfasst. Die absoluten Drehgeber können wiederum in Singleturn- und Multiturn-Drehgeber unterteilt werden. Singleturn-Drehgeber geben zu jeder Winkelstellung einen absoluten Winkelwert aus. Bei Multiturn-Drehgeber wird zusätzlich zum absoluten Drehwinkel noch die Anzahl der ganzen Umdrehungen ausgegeben. [BBF<sup>+</sup>06]

### Sensoren zur Drehmomentmessung

Sensoren zur Drehmomentmessung, sog. Drehmomentaufnehmer, dienen zur elektrischen Erfassung des Drehmoments, bspw. von Wellen in der Antriebstechnik, in der Automatisierungstechnik in Werkzeugmaschinen oder auch Windkraftanlagen. Die Mehrheit dieser Sensoren basiert auf Dehnungsmessstreifen (DMS), die das Drehmoment indirekt über die Verformung, genauer die Dehnung und Stauchung, erfassen. Weitere Verfahren sind in Kapitel 2.2 beschrieben.

Tabelle 1.1: Kategorien und Anwendung der Drehmomentmesstechnik nach [AW06a]. In blau dargestellt, die für diese Arbeit relevante Kategorie und Anwendung.

| Bewegung des Drehmomentaufnehmer | Anliegendes Drehmoment              |  |
|----------------------------------|-------------------------------------|--|
|                                  | statisch                            | dynamisch  |
| keine Rotation                   | Kalibrierung<br>(Totgewichtsanlage) | Torsionsdauer-<br>untersuchung                     |
| Rotation                         | In Praxis nicht<br>antreffbar       | Messungen an<br>Getrieben, Motoren<br>Pumpen, etc. |

Grundsätzlich lassen sich Drehmomentsensoren in rotierende und nicht-rotierende Bauformen unterteilen. In beiden Bauformen können dynamische oder statische Drehmomente auftreten. Tabelle 1.1 zeigt die möglichen Fälle mit typischen Anwendungsfeldern. In **blau** dargestellt, der für diese Arbeit relevante Fall: Dynamisch anliegende Drehmomente, die bei gleichzeitiger Rotation erfasst werden.

### 1.1 Abgrenzung des Anwendungsfalls

Der für die vorliegende Arbeit ausgewählte Anwendungsfall begrenzt sich auf berührungslose und dadurch verschleißfreie Sensorik zur Erfassung von Drehwinkel und Drehmoment (**Anforderung 1**). Durch die berührungslose Messung wird der Sensor näher an die Messgröße herangeführt bei gleichzeitiger Verringerung der Rückwirkung auf diese [GHM<sup>+</sup>10, BBB<sup>+</sup>87]. Auch soll eine elektromagnetisch verträgliche Sensorik angestrebt werden, um eine ausreichende Störfestigkeit für Industriebereiche zu erreichen (**Anforderung 2**). Ebenso soll die technische Auslegung des bestehenden Systems der Applikation nicht verändert werden, um zum Teil erhebliche Kosten für eine Neukonstruktion zu vermeiden. Daher sind keine Anbauten an die Welle oder Modifikationen der Wellen möglich (**Anforderung 3 und 4**). [SUA17]

Weiter soll das zu entwickelnde System im Vergleich zu relativen Systemen referenzlos den Drehwinkel und dadurch das Drehmoment direkt nach dem Einschalten ermitteln können (**Anforderung 5**). Dies ist in Anwendungen wichtig, in denen z. B. Antriebe nach einem Stromausfall oder anderweitig fehlender Energieversorgung direkt wieder in den Normalbetrieb übergehen und nicht erst eine definierte Position anfahren können, um die aktuelle Position bzw. das anliegende Moment zu ermitteln. [Mil90, Thi90, Ise08]

In Kapitel 4.1 werden diese fünf Anforderungen um drei weitere Anforderungen bezüglich der Markierung ergänzt.

### 1.2 Resultierende Herausforderung

Durch die Erkenntnisse aus dem Stand der Technik und Wissenschaft bedingt, sind einzelne Technologien - die jeweils Teile der Anforderungen erfüllen - verfügbar, siehe Kapitel 2. Allerdings können diese einzelnen Technologien nicht trivial zusammen geschaltet werden, sodass eine Neuentwicklung angestrebt wird. Die hier vorliegende

## 1 Einleitung

Arbeit stellt daher grundlegende Überlegungen und Untersuchungen dar, um eine kombinierte Messung von Drehwinkel und Drehmoment unter den genannten Anforderungen zu ermöglichen und ist als eine technische Machbarkeitsprüfung zu verstehen. Da sich die Anforderung hinsichtlich der möglichen Drehzahl  $n$  und des Drehmoments  $M$  je nach Anwendungsfall stark unterscheiden, wird eine typische und dadurch repräsentative Anwendung mit Drehzahlen bis  $n_{max} = 1000 \text{ min}^{-1}$  und dynamischen Drehmomenten mit  $M_{max} = \pm 50 \text{ N m}$  festgelegt. Weitere Mindestanforderung an die Umsetzung sind in der folgenden Tabelle zusammen gefasst:

Tabelle 1.2: Mindestanforderungen an das umzusetzende Messsystem [MUD+16]

| Beschreibung Anforderung         | Mindestanforderung                         |
|----------------------------------|--|
| Wellentyp                        | Vollwelle                                  |
| Umgebung                         | vibrationsarm, staubarm, schmiermittelfrei |
| Messbereich des Drehmoments $M$  | $\pm 50 \text{ N m}$                       |
| Wellendurchmesser $d$            | 10 bis 20 mm                               |
| Drehzahl $n$                     | 0 bis $1000 \text{ min}^{-1}$              |
| Auflösung d. Drehwinkelmessung   | $0,01^\circ$ (0,003 % v. E.)               |
| Genauigkeit d. Drehwinkelmessung | $0,4^\circ$ (0,1 % v. E.)                  |
| Schnittstelle                    | digital                                    |

Darüber hinaus sind fünf Wunschanforderungen mit aufgenommen, die seitens der Industrie geäußert wurden (Tabelle 1.3):

Tabelle 1.3: Wunschanforderungen an das umzusetzende Messsystem [MUD+16]

| Beschreibung Anforderung         | Wunsch-Anforderung               |
|----------------------------------|----------------------------------|
| Wellentyp                        | Voll- und Hohlwelle              |
| Umgebung                         | Treibstoff/Öl                    |
| Wellendurchmesser $d$            | $> 20 \text{ mm}$                |
| Drehzahl $n$                     | 0 bis $12\,000 \text{ min}^{-1}$ |
| Genauigkeit d. Drehwinkelmessung | $0,04^\circ$ (0,01 % v. E.)      |

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Der gesamte Entwicklungsprozess ist an die VDI Richtlinie 2206 [VDI04] angelehnt und beinhaltet u. a. die Erstellung des morphologischen Kastens, die daraus abgeleiteten Grobkonzepte sowie das resultierende Labormuster. In dieser Arbeit ist das daraus entstandene und priorisierte (Fein-)Konzept des Labormusters beschrieben. Der Stand der Technik und Wissenschaft wird in diesem Kontext in Kapitel 2 vorgestellt. Im Kapitel 3 wird darauf aufbauend die Zielsetzung sowie die wissenschaftliche Fragestellung formuliert.

Das ausgearbeitete Konzept wird im Detail einschließlich der entwickelten Winkelkodierung in Kapitel 4 erklärt. In Kapitel 5 werden darauf aufbauend theoretische Vorüberlegungen und Simulationen durchgeführt. Diese sind als Grundlage der Modellbildung zu verstehen und dienen daher zum tieferen Verständnis der vorliegenden Prozesse. Im Anschluss wird in Kapitel 6 das umgesetzte Messsystem beschrieben. Dabei wird insbesondere auf den optischen und elektrischen Aufbau eingegangen und die entwickelte Bildverarbeitung im Detail vorgestellt.

In Kapitel 7 wird das zuvor umgesetzte Messsystem verifiziert und hinsichtlich der Grenzen untersucht. Besonders relevant scheint in diesem Kapitel die Einordnung des Messsystems in den Stand der Technik. Die wissenschaftliche Frage wird dann in Kapitel 8 mit Hilfe unterschiedlicher Versuche bei idealen Bedingungen im Labor untersucht. Darüber hinaus folgt eine ausführliche Beschreibung der Anwendung des Messsystem in der Praxis sowie Untersuchungen unter industriellen Bedingungen an einem Prüfstand mit zwei Elektromotoren.

Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick über Ansatzpunkte weitergehender Forschung gegeben (Kapitel 9).





## 2 Stand der Technik und Wissenschaft

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik und Wissenschaft für Drehwinkel- und Drehmomentmessverfahren sowie kombinierte Messverfahren beschrieben. Für den Stand der Technik und Wissenschaft lasermarkierter metallischer Oberflächen sei auf Kapitel 4.1.1 verwiesen. Darüber hinaus werden verschiedene Arten der Winkelcodierung in Kapitel 4.1.2 und 4.1.3 in den aktuellen Stand eingeordnet. Ebenso wird der aktuelle Stand im Bereich der Bildverarbeitung von Markierungen in Kapitel 4.3.1 zusammengefasst.

### 2.1 Drehwinkelmessverfahren

Begriffe und relevante Kenngrößenangaben sind in DIN 32878:1993-06<sup>1</sup> sowie in der VDI/VDE Richtlinie 2648 Blatt 1:2009-10 und in der VDI/VDE Richtlinie 2648 Blatt 2:2007-03 definiert. [VDI09, VDI07, Sey13]

Die eingangs beschriebenen absoluten und inkrementellen Drehgeber erfassen den Drehwinkel meist optisch über sog. Codescheiben. Eine Codescheibe besteht bei inkrementellen Drehgebern aus einer Spur mit abwechselnd hellen und dunklen Codierungen. Bei absoluten Drehgebern sind typischerweise mehrere Spuren unterschiedlicher Codierung konzentrisch angeordnet. Diese Spuren wiederum können durch die interne Auswertelektronik gleichzeitig ausgelesen und der absolute Winkel erfasst werden. Typische Codierungen für eine Mehrspur-Codierung sind der Gray- oder Binär-Code [HLG17]. In dieser Arbeit wird eine Einspurcodierung verwendet, die in Kapitel 4.1 ausführlicher beschrieben ist. Neben optischen Drehwinkelgebern sind auch magnetische, kapazitive und induktive Messverfahren zu erwähnen, die im Grundsatz ebenfalls auf der Erkennung von Markierungen

---

<sup>1</sup>zurückgezogen

## 2 Stand der Technik und Wissenschaft

basieren. Die Markierungen sind entweder direkt im Material eingebracht, nutzen Schlitzscheiben oder modifizierte Zahnräder.

Industrielle optische Drehgeber haben aktuell eine Auflösung von etwa 18 Bit. Dies entspricht ( $2^{18} =$ ) 262 144 Schritten pro Umdrehung und damit einer Drehwinkelauflösung von ( $360/2^{18} \approx$ )  $0,001\ 37^\circ$ . Bei Multiturngewerben kommen zusätzlich 12 bis 16 Bit - entsprechend bis 65 536 Umdrehungen - dazu, die intern über Untersetzungsgetriebe erfasst werden [HLG17]. Unternehmen wie z. B. Baumer, Fritz Kübler, Dr. Johannes Heidenhein, Pepperl Fuchs oder Sick bieten diese kommerziell an.

Nennenswert sind an dieser Stelle zwei industrielle Drehgeber des Unternehmens Renishaw: ein optisches (RESOLUTE™) und ein magnetisches Messsystem (AKSIM™). Von konventionellen Drehgebern mit Eigenlagerung unterscheiden sich diese durch einen Ring, der zusätzlich zum Lesekopf verwendet wird. Der Ring mit einer Einspurcodierung wird in den Antriebsstrang verbaut. Der Lesekopf erfasst berührungslos und mit einer Winkelgenauigkeit von bis zu  $0,0003^\circ$  (bei einem Ring mit 100 mm Durchmesser und optischer Messung) sowie von bis zu  $0,1^\circ$  (bei magnetischer Messung) den absoluten Winkel. Die mögliche Drehzahl beträgt bei beiden Systemen über  $10\ 000\ \text{min}^{-1}$ . [RLS17, Ren18]

SEYBOLD beschreibt die Entwicklung eines industrietauglichen, miniaturisierten, optischen Drehwinkelsensors mit diffraktiver Codierscheibe aus Kunststoff. Mit einer Gehäusegröße von 16 mm x 16 mm und einer Bauhöhe von 18 mm wurde eine Drehwinkelgenauigkeit von  $\pm 3,5^\circ$  erreicht. Die für Laser typische Temperaturabhängigkeit wurde durch eine Monitordiode kompensiert und dadurch das Messsystem für Temperaturen von  $-40^\circ\text{C}$  bis  $85^\circ\text{C}$  ausgelegt. Bei einer Temperatur von  $50^\circ\text{C}$  wird von einer Lebensdauer von einer Million Stunden ausgegangen. [Sey13]

Gegenstand weiterer Untersuchungen sind Einspurcodierungen des Drehwinkels. WAN ET AL. beschreiben die Umsetzung eines miniaturisierten Drehgebers mit implementiertem Field Programmable Gate Array (FPGA). Dabei wird eine Drehwinkelauflösung von  $0,001\ 46^\circ$  erreicht. Der Drehgeber basiert auf einer Diode im Infraroten-Spektralbereich, einer Metallscheibe mit drei Spuren sowie einem Phototransistor. Von den drei Spuren ist lediglich eine für die Drehwinkelbestimmung, die ähnlich wie in dieser Arbeit, einer Pseudorandom Codierung entspricht. Von den beiden übrigen inkrementellen Codespuren wird eine Spur zur Kalibrierung und eine Spur zur präzisen Positionsbestimmung genutzt. Die Positionsbestimmung wird durch eine höhere Auflösung der Spur im Vergleich zur Auflösung der oben erwähnten ortscodierten Spur präzisiert. [WWSY12]

PAUL ET AL. beschreiben einen hochauflösenden optischen Drehgeber für Roboter im Leichtbaubereich, der eine neuartige Codierung des absoluten Winkels verwendet. Die neuartige Codierung ist im Vergleich zu den oben genannten Mehrspur-Codierungen aufgrund einer höheren Informationsdichte deutlich platzsparender. Die höhere Informationsdichte wird durch drei axial gestapelte Codierungsringe erreicht, die mit Hilfe des Hamiltonkreises erstellt wurden. Diese drei Ringe werden an neun Positionen mit Photodetektoren abgetastet. Die erreichte Drehwinkelauflösung beträgt etwa  $0,7^\circ$  und ist damit im Vergleich zu herkömmlichen Codierungen deutlich kompakter. Angaben zur Genauigkeit sind auf Grund der prototypischen Implementierung noch nicht bekannt. [PCFM18, PC18]

Neben den in Kapitel 1 beschriebenen Anwendungen von Drehwinkelgebern, werden diese auch z. B. bei Bildderotatoren zur Drehzahlmessung verwendet. Die Drehzahl wird in dem Fall benötigt, um Bewegungsunschärfe im polartransformierten Bild [APR18] oder Frequenzraum [WLG07] kompensieren zu können. Weitere Anwendungsfelder sind in der folgenden Tabelle 2.1 gegeben.

Tabelle 2.1: Absolute und relative Drehwinkelsensoren in der Anwendung

| Einsatzbereich          | Nachweis in der Literatur                               |
|-------------------------|---|
| Automobil               | [DSC18, HOK18, DH18]                                    |
| Antriebstechnik         | [RZHR03, Sey13, OKA <sup>+</sup> 17]                    |
| Automatisierungstechnik | [Sey13, Con18]  |
| Fördertechnik           | [Ova91, MTN <sup>+</sup> 03, DSC18]                     |
| Robotik                 | [BMG <sup>+</sup> 17, PCFM18, LKQ18, ZR18]              |
| Werkzeugmaschinen       | [Sey13, GKB <sup>+</sup> 15, LCC <sup>+</sup> 17, ZH18] |
| Windkraftanlagen        | [XC95, MMZ97, WW04, HNM08, BLM <sup>+</sup> 18]         |

## 2.2 Drehmomentmessverfahren

Neben dem eingangs erwähnten am weitesten verbreiteten Messverfahren mittels DMS die Verformung bzw. Dehnung zu erfassen, gibt es verschiedene Möglichkeiten die Torsion z. B. in einer Welle quantitativ zu erfassen. Weitere in der Industrie typisch verwendete Messverfahren erfassen den Verdrehwinkel oder spannungsbedingte

## 2 Stand der Technik und Wissenschaft

Ladungs- oder Permeabilitätsänderungen [Trä14]. Unternehmen wie Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), Lorenz Messtechnik, Non Contact Torque Engineering (NCTE) oder Torque And More (TAM)<sup>2</sup> bieten Drehmomentsensoren kommerziell an.

Im Folgenden sind resistive und optische DMS beschrieben, sowie piezoelektrische und magnetoelastische im Anhang A.1. Jeweils sind die wesentlichen Messprinzipien<sup>3</sup> mit deren Vor- und Nachteilen kurz aufgeführt.

Weitere Drehmomentmessverfahren mit anderen Messprinzipien sind:

- kapazitive und induktive Sensoren ( [BBB+87, Bal91, Trä14]),
- Körperschallsensoren ( [Bal91, Dum95, BBF+06]),
- Schwingsaitenaufnehmer ( [BBB+87, Dum95, CH12]),
- sowie mechanische Hebelkonstruktionen.

### 2.2.1 Resistive Dehnungsmessstreifen

Die Messung von Kräften und Drehmomenten kann durch Dehnungsmessung erfolgen. Innerhalb des Geltungsbereichs des hookeschen Gesetzes (elastische Verformung) wird die Elastizität des Messkörpers genutzt, um aus dessen relativer Längenänderung  $\epsilon$  (Dehnung) die mechanische Belastungsgröße bestimmen zu können. DMS bilden das in der Praxis am häufigsten verwendete Verfahren zur statischen und dynamischen Drehmomentmessung und wandeln die im Messkörper auftretende Dehnung in eine Widerstandsänderung um [BBB+87, Trä14, Bor16].

Handelsübliche DMS beruhen auf zwei physikalischen Effekten. Zum einen auf dem resistiven Effekt: Erfährt ein Draht eine Dehnung, so verändert sich dessen Geometrie [Kei17]. Bei positiver Dehnung kommt es zu einer Verlängerung des Drahtes, verbunden mit einer Querschnittsverkleinerung (Querkontraktion) [Bor16]. Zu einer Drahtverkürzung kommt es bei negativer Dehnung, also der Stauchung. Die Verformung verursacht eine Widerstandsänderung des DMS-Leitermaterials. [Her12, Rei16, Kei17]. Neben der Widerstandsänderung durch geometrische Verformung tritt zusätzlich der piezoresistive Effekt auf [Bor16]. Hierbei ändert sich der spezifische Widerstand des Materials unter mechanischer Spannung aufgrund der Änderung der

---

<sup>2</sup>Teil der Trafag Gruppe

<sup>3</sup>Neben der Einteilung der Drehmomentsensoren nach dem Messprinzip unterscheidet man auch nach technischen und konstruktiven Merkmalen, wie z. B. der Datenübertragung, Datenschnittstelle, Berührungslosigkeit, Kosten, aktive/ passive Sensoren oder auch nach der Bauart (Flansch, Welle, Speichenrad, einseitiger Zapfen etc.) [Bög15].

Anzahl und/ oder Beweglichkeit von Ladungsträgern im Leitermaterial [Trä14, Rod16]. Dieser Effekt ist bei metallischen DMS vernachlässigbar und führt zu einem konstanten Faktor [Bor16, Rod16]. Bei Halbleiter-DMS führt dieser Effekt allerdings zu sehr hohen, dehnungsabhängigen Widerstandsänderungen [BBF<sup>+</sup>06, Trä14, Bor16].

Der Verformungszustand eines DMS richtet sich stets nach dem des Messobjekts, auf dem der Messstreifen appliziert ist. Wird bspw. eine Messwelle durch eine Zugkraft belastet, entstehen an deren Oberfläche Spannungen. Diese führen zu einer Dehnung des Messobjekts und somit auch des DMS. DMS-Aufnehmer müssen so angebracht sein, dass die Messrichtung des Metallgitters mit der Richtung der Hauptspannungsrichtung übereinstimmt [Kut15]. Neben der Ermittlung von Zug-, Druck- und Biegebelastungen können DMS durch entsprechende Applikation auf dem Messobjekt auch für Torsionsmessungen angewendet werden. Da bei reiner Torsion einer Messwelle die Hauptschubspannungen im Winkel von 45° bzw. 45° zur Wellenachse auftreten, müssen DMS-Aufnehmer gleichermaßen um 45° oder -45° gedreht auf der Messwelle angebracht sein [BBF<sup>+</sup>06, Kut15]. In den meisten Fällen sind mehrere DMS zu sog. Wheatstoneschen Messbrücken verschaltet. Dadurch ergibt sich eine erhöhte Empfindlichkeit und weiterhin eine Kompensation von Signalstörungen durch Temperatur- und Leitungseinflüsse [Kut15]. Durch paarweise Anordnungen werden zudem Biegeeinflüsse kompensiert [Dum95].

DMS sind in unterschiedlichen Herstellungsvarianten für verschiedenste Einsatzzwecke verfügbar. Beispiele sind Folien-DMS, Draht-DMS für Hochtemperaturmessungen, Dünnschicht-DMS oder besonders dehnungsempfindliche Halbleiter-DMS. DMS weisen im Wesentlichen folgende Vor- und Nachteile auf (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von konventionellen DMS

| Vorteile   | Nachteile  |
|--|--|
| dynamische und statische Messungen möglich [Kut15, Bor16]                    | Signal- und Energieübertragung notwendig [Bal91, Dum95, Bor16] |
| stoßartige Belastungen messbar [Kei17]                                       | Temperaturabhängigkeit [Trä14]                                 |
| kleine Abmessungen und verhältnismäßig preiswert [BBF <sup>+</sup> 06, HS14] | Applikationsaufwand [Gie94]                                    |
| Störungsempfindlichkeit [Bor16]  | Querdehnungsempfindlichkeit [Kei17]                            |

### 2.2.2 Optische Dehnungsmessstreifen

Eine vergleichsweise neue Variante der DMS sind optische DMS, die auf sog. Faser-Bragg-Gitter basieren. Diese sind aus einem mit Glas ummantelten Lichtwellenleiter, einer etwa 5  $\mu\text{m}$  dicken optischen Faser, aufgebaut [Trä14]. In diese Faser ist ein optisches Interferenzgitter mit Hilfe einer UV-Laserbearbeitung eingeschrieben. Dadurch entsteht ein Gitter aus mehreren Reflexionsstellen mit definiertem Abstand zueinander. Demnach weist der Lichtwellenleiter eine charakteristische, periodische Variation des Brechungsindex auf, sodass einige Lichtwellenlängen bzw. Frequenzbereiche des in die Glasfaser eingekoppelten Lichts nicht transmittiert werden [Bor16, Til16]. Die mittlere Frequenz des Transmissionsspektrums wird als Bragg-Frequenz bezeichnet. Wird das Bragg-Gitter gedehnt, verändert sich die Bragg-Frequenz und damit das Transmissionsspektrum. Anhand dieser Änderung lässt sich auf die vorliegende Dehnung rückschließen.

Tabelle 2.3: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von optischen DMS

| Vorteile  | Nachteile                           |
|---|-------------------------------------|
| thermische, chemische und elektromagnetische Verträglichkeit [Trä14, Bor16] | Applikationsaufwand [Gie94]         |
| Langlebigkeit [Trä14]   | Querdehnungsempfindlichkeit [Kei17] |
| geringe Größe und Gewicht   | vergleichsweise hohe Kosten [Bor16] |

### 2.2.3 Neuartige Drehmomentmessverfahren und Anwendungsfelder

Steigende Anforderungen an die Temperaturstabilität, Dehnungsempfindlichkeit, Auflösung, Genauigkeit oder preisgünstige Produktion von Drehmomentsensoren und neue Technologien oder Anwendungsbereiche führen zu einer kontinuierlichen Verbesserung bisheriger Sensortypen. Jedoch besteht nicht nur Forschungsbedarf für Sensoroptimierungen, sondern auch für die Entwicklung neuartiger Sensorsysteme. [Kra16]

SHARMS ET AL. entwickelten einen kompakten und leichten optischen Drehmomentsensor, der mit kostengünstiger Elektronik umgesetzt und unempfindlich gegen elektromagnetische Störfelder ist. Anwendungsfeld für diesen Sensor bildet die Robotik. Ein Beispiel sind Roboter, die Arme, Beine und somit Gelenke besitzen.

In den Gelenken darf das maximale Drehmoment nicht überschritten werden, da es sonst zu Beschädigungen an Bauteilen kommen kann. Daher muss das Drehmoment an entsprechenden Stellen erfasst werden. Dazu sind Drehmomentsensoren an den Gelenken appliziert. Der Sensor ist auf einem Messflansch, bestehend aus einem äußeren Flansch und einer Bauteilbasis in der Flanschmitte, befestigt. Außenflansch und Bauteilbasis sind durch Speichen miteinander verbunden. Am äußeren Flansch ist eine Halterung mit optischen Sensoren angebracht. Gegenüber davon, an der Basis, sitzt ein Abschirmungsschild. Der optische Detektor besteht aus einer Infrarot-LED und einem lichtabhängigen Phototransistor. Das von der LED ausgesendete Licht verursacht im Phototransistor einen Photostrom. Wird der Flansch tordiert, schiebt sich das Abschirmungsschild zwischen LED und Phototransistor, sodass der resultierende Strom aufgrund der Verdeckung verringert wird. In Testversuche mit einer Belastung von etwa 40 N m und einer anschließenden Entlastung zeigen, dass sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Drehmoment und Ausgangssignal mit geringer Hysterese ergibt. Die Auflösung des Sensors liegt bei 1 N m. [SLH12, Kra16]

Einen neuen Ansatz zur Drehmomentmessung wählten KIM UND KIM bei der Entwicklung eines berührungslosen Sensors. Sie nutzen dabei einen Mechanolumineszenz-Prüfling, eine UV-Lichtquelle zur Anregung sowie einen Lumineszenzsensor zur Detektion. Der Messeffekt beruht auf der Mechanolumineszenz von ZnS:Cu Mikropartikel, die in dem Werkstoffgefüge des Prüfkörpers enthalten sind. Die enthaltenen Partikel emittieren unter mechanischer Belastung Licht im sichtbaren Spektralbereich (VIS). Je größer die Belastung, desto mehr Licht wird emittiert. Als mechanische Stimulation gelten hier Zug und Druck, Torsion, aber auch Reibung. Der Lumineszenzsensor misst die Änderungen der Lichtintensität und gibt selbige als Spannungssignal aus. Um ein gleichmäßigen Signalverlauf zu erhalten, wird der Prüfkörper kontinuierlich mit UV-Licht bestrahlt. Erste Messungen ergaben vielversprechende Drehmoment- und Messsignalverläufe, wobei eine recht große Hysterese zu verzeichnen ist. Bei einer quasistatischen Messung wurde im Mittel ein Drehmoment von 18 N m mit einem Fehler von 4,2 N m also 23 % ermittelt. [KK14, Kra16]

VOLLBERG ET AL. erforschten hochempfindliche Folien-DMS. Diese bestehen aus einer etwa 50 µm dünnen, hochtemperaturfesten Polyimid-Trägerfolie mit sehr geringer Rauheit. Eine glatte Oberfläche ist notwendig, weil eine granulare Nanopartikel-Dünnschicht durch Sputtern auf die Trägerfolie aufgetragen wird. Die Dünnschicht auf Nickel- und Kohlenstoffbasis ist 150 nm dick, wobei die Nickelpartikel säulenförmig ausgebildet sind. Die Säulen haben einen Durchmesser von 15 nm und sind von schlecht leitenden Kohlenstoffpartikeln umgeben. Die Strukturierung der Dünnschicht zu einem

## 2 Stand der Technik und Wissenschaft

Messgitter erfolgt durch Materialabtrag mittels Pikosekundenlaser. Dadurch lassen sich hohe elektrische Widerstände von etwa 50 k $\Omega$  erreichen. Die Hochempfindlichkeit des Sensor wird erst durch das teilweise ersetzen der Nickelpartikel durch Chrom erreicht. Im Vergleich zu konventionellen Metallfolien-DMS werden deutlich höhere Empfindlichkeiten von bis zu 20 mV V<sup>-1</sup> erreicht. [VPL<sup>+</sup>15, Kra16]

Weitere Entwicklungen von DMS im Bereich der Temperaturbeständigkeit oder Hochempfindlichkeit sind in den Arbeiten von [BKH<sup>+</sup>14, ZSBS14] und [RJL<sup>+</sup>15] beschrieben. Ein weiterer erwähnenswerter Dehnungsmesssensoren auf Silberbasis, der direkt auf das Material gedruckte wird, ist in [MWZB10] beschrieben. Ein optischer Sensor auf Polymerbasis zur Kraftmessung ist z. B. in der Arbeit von KELB beschrieben [KRRR15]. Neben den oben genannten Anwendungen sind Anwendungsfelder von Drehmomentsensoren in Tabelle 2.4 zusammengefasst.

Tabelle 2.4: Drehmomentmessverfahren in der Anwendung

| Einsatzbereich                      | Nachweis in der Literatur                                       |
|-------------------------------------|---|
| Astronautik                         | [KJWS87, PRRA02]  |
| Automobil                           | [Tur88, Bur03, Gie18]   |
| Impulsschrauber                     | [Bar97, Kla16, LMMAL17]   |
| Kompressoren- oder Pumpenprüfstände | [FH09, LW14, Kla16]   |
| Motorenkomponentenprüfstände        | [DL03, MP03, Kla16]   |
| Motorenprüfstände                   | [AW06b, SKS <sup>+</sup> 07, LDL10, Kla16, OKA <sup>+</sup> 17] |
| Robotik                             | [HKP93, HASH <sup>+</sup> 01, SWQH07]                           |
| Turbinen                            | [SSS03, ZKTV05]   |
| Windkraftanlagen                    | [LLWY09, KM10, PC11]  |

### 2.3 Kombinierte Drehzahl- und Drehmomentmessverfahren

Im Rahmen der Literaturrecherche konnten zwei Verfahren mit Veröffentlichungen aus den Jahren 1993 bis 1995 ausfindig gemacht werden, die eine kombinierte Drehzahl- und Drehmomentmessung ermöglichen.

FRANKE ET AL. beschreiben in Ihrer Arbeit die Entwicklung eines berührunglosen Drehzahl-Drehmoment-Messsystems auf Basis von Inkrementalscheiben und Hall-



Sensoren. Ähnlich wie in dieser Arbeit wird das Prinzip der Winkeldifferenzmessung genutzt, um das Drehmoment zu bestimmen, vgl. Kapitel 4.2. An die Messwelle sind im Abstand der Torsionslänge zwei Inkrementalscheiben montiert. Anhand der Dauer der Impulse wird die Drehzahl mit Hilfe eines Microcontrollers bestimmt. Anhand des zeitlichen Versatzes der Impulse zwischen den beiden Inkrementalscheiben wird das Drehmoment indirekt über die Dehnung bzw. Torsion bestimmt. An einem Prüfstand mit Wirbelstrombremse wurde bei einer Drehzahl von  $800 \text{ min}^{-1}$  das Drehmoment zwischen Null und  $10 \text{ Nm}$  mit einer Abweichung von maximal  $1,39\%$  bestimmt. Das System wurde für den beschriebenen Versuch in zwei modifizierten Rillenkugellagern realisiert und zeichnet sich dabei durch niedrige Kosten, die Robustheit durch die Berührungslosigkeit sowie durch die Notwendigkeit nur geringer Modifikationen aus. [FBLS94]

DUMOULIN UND SEELIGER verfolgten einen ähnlichen Ansatz über Hall-Sensoren. In Ihren Veröffentlichungen beschrieben sie die digitale Erfassung des Drehmoments von rotierenden Wellen. Ähnlich wie FRANKE ET AL. nutzen sie Inkrementalscheiben mit Rechteckzähnen. Das realisierte System ist Transistor-Transistor-Logik (TTL)-kompatibel und bietet eine Echtzeitanalyse, eine Zahnkorrektur sowie eine Drehrichtungserkennung. Unwucht wird durch einen zweiten um  $180^\circ$  versetzten Sensor kompensiert. In einem Prüfstand für Nutzfahrzeugreifen wird bei einer Drehzahl von  $1670 \text{ min}^{-1}$  und einem Antriebsdrehmoment von  $1008 \text{ Nm}$  eine Auflösung von  $0,6 \text{ Nm}$  ( $0,06\%$ ) erreicht. Beeindruckend ist, dass bei dieser Auflösung noch eine Dejustage von bis zu  $\pm 1 \text{ mm}$  toleriert werden kann. Für einen der Sensoren wird die Wegstreckengenauigkeit mit  $3,3 \mu\text{m}$  sowie für zwei Sensoren mit  $0,6 \mu\text{m}$  angegeben. [DS93, Dum95]

## 2.4 Zwischenfazit

Im Rahmen der Literaturrecherche konnte kein kommerzielles System ausfindig gemacht werden, das den oben genannten Anforderungen entspricht. In der Wissenschaft konnten nur erste Ansätze gefunden werden, die aber nicht vollständig den genannten Anforderungen entsprechen. Den Anforderungen und dem gesetzten technischen Ziel dieser Arbeit, sind die kombinierten Drehzahl- und Drehmomentmessverfahren aus dem vorherigen Kapitel am nächsten. Beide erfüllen (Anforderung 1 und 2) aber nicht die Anforderungen hinsichtlich der Anbauten bzw. Modifikationen der Welle (Anforderung 3 und 4) sowie der absoluten Winkelmessung (Anforderung 5).



## 3 Zielsetzung und wissenschaftliche Fragestellung

Die Bedeutung der optischen Sensorik für die vielfältigen Anwendungsfelder gegenüber konventionellen, berührenden Sensoren zur Messdatenerfassung ist in Kapitel 1 und Kapitel 2 aufgezeigt. Durch eine aktuell zunehmende Digitalisierung und damit einhergehender Überwachung von Anlagen und Prozessen, wird in der Zukunft eine Vielzahl von Sensoren benötigt. Besonders Sensoren, die berührungslos (vgl. Anforderung 1) und ohne Anbauten (vgl. Anforderung 3) funktionieren, sind immer mehr gefragt. Die Betrachtung der aktuell verfügbaren Sensoren und dem gegenüberstehenden Bedarfen zeigt, dass berührungslose und kostengünstige Messverfahren zur Drehmomentmessung nicht verfügbar sind. Ebenso ist aktuell keine Sensorik verfügbar, die eine kombinierte Messung vom absoluten Drehwinkel und vom Drehmoment ermöglicht.

Vor diesem Hintergrund ist die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit eine technische Machbarkeitsprüfung einer kombinierten Messung vom absoluten Drehwinkel und Drehmoment durchzuführen. Folgende Teilziele lassen sich zur Erreichung der Zielsetzung ableiten:

- Teilziel 1: Konzeption der Drehwinkelcodierung und -messung
- Teilziel 2: Modellbildung und Simulation
- Teilziel 3: Umsetzung des optischen Messsystems
- Teilziel 4: Verifizierung des Messverfahrens und den erreichbaren Grenzwerten
- Teilziel 5: Evaluation und Anwendung

Im Folgenden soll das Verhalten des optischen Messsystems durch ein methodisches Vorgehen nach dem Ursachen-Wirkungsprinzip besser verstanden werden. Von Interesse ist dabei, welche Ursachen-Wirkbeziehungen in der weiteren Entwicklung berücksichtigt werden sollten, um mögliche Risiken und Grenzen frühzeitig zu

### 3 Zielsetzung und wissenschaftliche Fragestellung

erkennen. Die jeweilige Wirkung kann dabei sehr unterschiedlich sein. Denkbar sind keine relevante Wirkung bis hin zu einem Versagen des Messsystems. Besonders kritisch ist, wenn ein Messwert vom Messsystem ausgegeben wird, dieser aber falsch ist. Die Abweichung eines Messwertes vom wahren Wert setzt sich additiv aus dem systematischen und zufälligen Fehler zusammen [ISO08]. Zufällige Fehler sind unerwünscht, können aber per Definition nicht kontrolliert werden [DIN95]. Systematische Fehler des Winkelwerts können wiederum konstant vom wahren Messwert abweichen oder aber auch (systematisch) variieren. Beide Fälle des systematischen Fehlers sind unerwünscht.

Das Ursachen-Wirkungs-Diagramm mit den sechs Haupteinflussgrößen ist in Bild 3.1 dargestellt. Die Haupteinflussgrößen unterteilen sich jeweils in Haupt- und Nebenursachen, die eine Wirkung auf das optische Messverfahren haben. Das Diagramm stellt dabei eine erste Aufstellung möglicher Einflussgrößen dar, sodass sowohl Ursachen ungewollt unbeachtet bleiben als auch erkannte Ursachen nicht zwangsläufig vermieden oder verbessert werden können [Pfe01]. So kann bspw. eine fehlerhafte Kalibrierung oder Bedienung durch den Anwender nicht immer ausgeschlossen oder die Alterung von Komponenten nicht verhindert werden.

Auf die einzelnen Bestandteile des Ursachen-Wirkungs-Diagramms wird an dieser Stelle nicht eingegangen. Von zentraler Bedeutung für die Funktionsweise des optischen Systems mit Bildaufnahme und -verarbeitung ist allerdings die Abbildungsschärfe. Ist das aufgenommene Bild unscharf hinsichtlich der Abbildung auf dem Kamerasensor, wird die nachgelagerte Signalverarbeitung beeinflusst. Im Ursachen-Wirkungs-Diagramm sind Ursachen in **blau** gekennzeichnet, die eine Wirkung auf die Schärfe des optischen Systems haben. Da die Wirkung der Schärfe bzw. gerade auch der Unschärfe unklar ist, lautet die **zentrale wissenschaftliche Fragestellung**: Welchen Einfluss hat die Unschärfe auf das optische Messverfahren zur Erfassung des absoluten Drehwinkels und welche Grenzwerte sind mit dem Messverfahren erreichbar? Darüber hinaus wird im Folgenden geklärt, ob die Unschärfe überhaupt als ein Problem anzusehen ist und falls ja, ob diese ggfs. kompensiert oder sogar zum Vorteil genutzt werden kann.

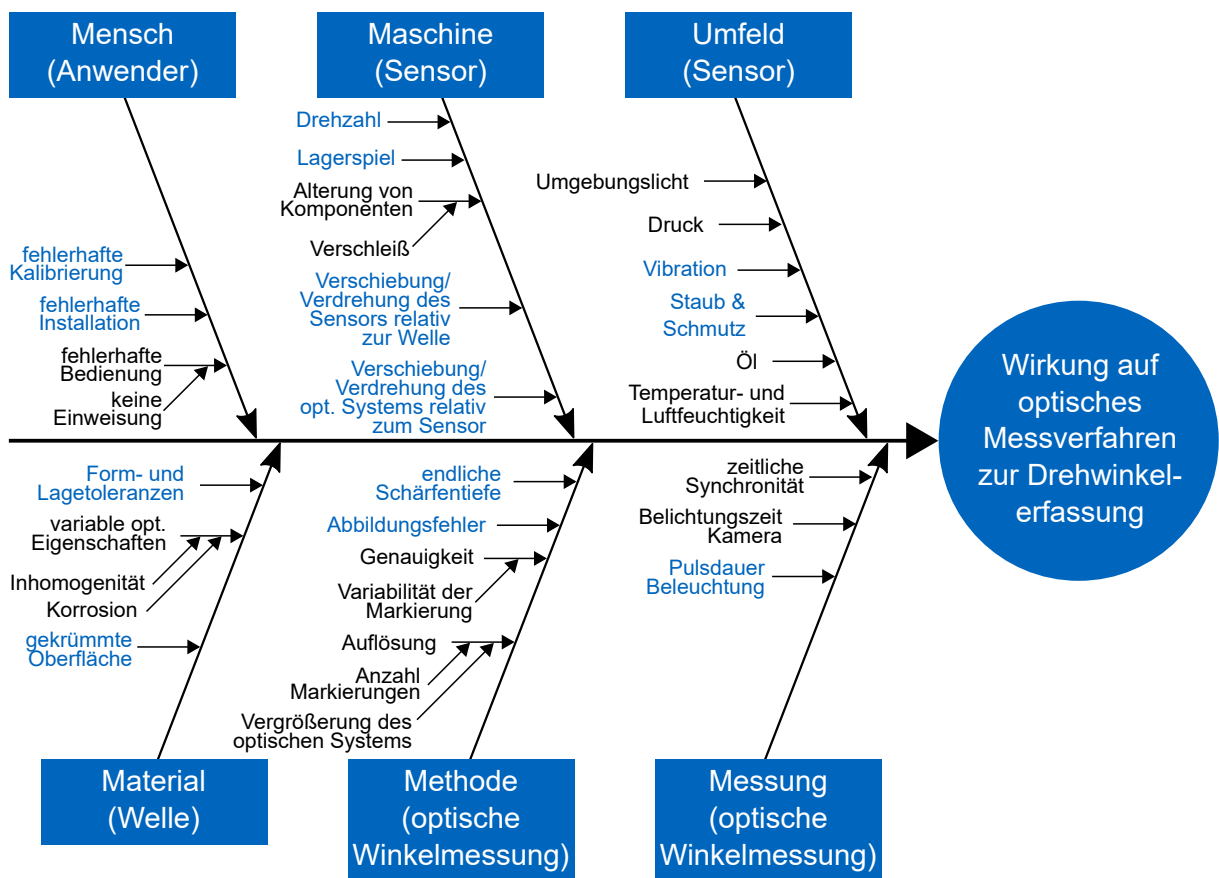


Bild 3.1: Das Ursachen-Wirkungs-Diagramm stellt die sechs Haupteinflussgrößen dar, sowie die Haupt- und Nebenursachen, die eine Wirkung auf das optische Messverfahren zur Drehwinkelermessung haben.



## 4 Konzeption der Drehwinkelcodierung und Drehwinkelmessung

Die Eingangs beschriebenen Anforderungen an eine Sensorik können durch unterschiedliche technische Systeme realisiert werden. Beispielsweise könnte die Wellenoberfläche in Umfangsrichtung speziell magnetisiert und ausgelesen werden. Anbauten wie Zahnräder oder Ringe mit einer optischen Codierung wären hingegen nicht möglich (vgl. Anforderung 3 und 4). Der neuartige Ansatz, der in dieser Arbeit genutzt wird, basiert auf der optischen Winkeldifferenz-Messung. Dabei wird der absolute Winkel in Form einer Codierung direkt auf die Wellenoberfläche an zwei unterschiedlichen Positionen aufgebracht. Die Differenz, die durch eine Torsion zwischen diesen beiden Codierungen entsteht, wird optisch erfasst. Dadurch wird sowohl der absolute Drehwinkel als auch das Drehmoment der Welle gleichzeitig erfasst. Bei kontinuierlicher Messung kann auch die Drehzahl und damit die Leistung bestimmt werden. Sowohl die Codierung als auch das optische System wird im Folgenden genauer beschrieben und gegen alternative Ansätze abgegrenzt.

### 4.1 Konzeption der Drehwinkelcodierung

Der Funktionsweise der Winkeldifferenz-Messungen nach, wird der Drehwinkel an zwei Positionen ermittelt und die Differenz gebildet. Entsprechend ist jeweils eine Winkelcodierung in Umfangsrichtung zur Bestimmung der Winkellage notwendig. Das Prinzip der Winkelcodierung ist schematisch in Bild 4.1 gezeigt. Zwei Markierungsringe werden auf der Welle im Abstand der Torsionslänge  $l$  aufgebracht. Die Markierungsringe werden jeweils durch eine Kamera mit entsprechender Vergrößerung erfasst und digital weiterverarbeitet.

Die in Kapitel 2.1 erwähnten Mehrspurcodierungen sind grundsätzlich für die Codierung des absoluten Winkels geeignet. Allerdings sind Mehrspurcodierungen

#### 4 Konzeption der Drehwinkelcodierung und Drehwinkelmessung

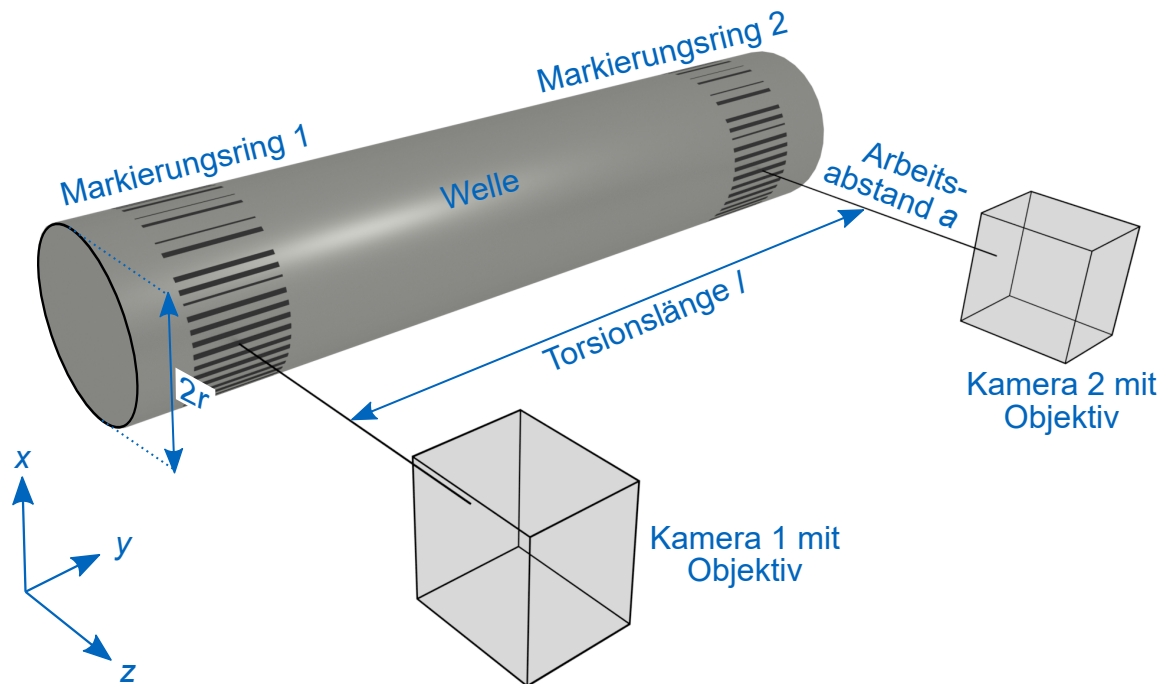


Bild 4.1: Schematische Darstellung der relevanten Systemkomponenten und Kenngrößen.

für die bevorstehende Laserbearbeitung aufgrund der systemimmanenten erhöhten Anzahl an Markierungen im Vergleich zu Einspurcodierungen ineffizient. Zur Aufbringung der Codierung wird ein Laserverfahren genutzt, das im Folgenden genauer erklärt ist. Die daraus resultierenden Limitierungen sind bei der Konzeption der eigentlichen Codierung berücksichtigt und im Detail erklärt.

##### 4.1.1 Aufbringung der Lasermarkierung

Mit dem Laser kann sowohl eine Einspur- als auch eine Mehrspurcodierung aufgebracht werden. Da das zu entwickelnde Verfahren in Hinblick auf eine industrielle Einsetzbarkeit möglichst kostengünstig sein soll, wird an dieser Stelle eine Einspurcodierung gewählt, die deutlich weniger Markierungen aufweist ([Anforderung 6](#)). Dadurch ist die Laserbearbeitung weniger fehleranfällig, da z. B. statistisch weniger Markierungsfehler auftreten und/ oder eine Verschiebung zwischen zwei aneinander liegenden Markierungen in axialer Richtung nicht möglich ist. Außerdem kann eine Reihe aus gleichen Linien einfacher z. B. hinsichtlich der Bearbeitungsgeschwindigkeit optimiert werden als es mit einer komplexen mehrreihigen Codierung möglich wäre.

Laut GABZDYL können sowohl cv-Laser als auch hochfrequent gepulste Laser genutzt werden, um metallische Oberflächen zu Markieren [Gab08]. Da die Welle



nicht geschwächt werden darf, wird ein ablationsfreier, oxidativer Laserprozess gewählt [ASU<sup>+</sup>18]. Alternative Laserverfahren wie das Abtragen, Aufschäumen oder die Reaktion mit Zusatzmaterialien kommen aufgrund der Anforderung 4 (keine Modifikation der Welle) nicht in Frage. In dieser Arbeit wird mit Hilfe eines industriellen UltrakurzpulsLasers im grünen Wellenlängen- und zweistelligen Pikosekunden-Bereich eine ausreichende Schwärzung der Oberfläche mit guter Kantenqualität erreicht [ASU<sup>+</sup>18]. Die Markierung wird dabei als eine binäre Codierung  $q = 2$  umgesetzt, sodass zwei Zustände möglich sind (Anforderung 7). Diese Zustände werden als „Null“ (schwarz bzw. geschwärzt) und „Eins“ (weiß bzw. nicht geschwärzt) definiert, wie dies bei Binärbildern üblich ist [LEM89]. Die Laserstrahlung wird mit Hilfe eines Scanners und Linsen auf die Oberfläche geführt und fokussiert. Nach dem Aufbringen einer etwa 15  $\mu\text{m}$  breiten Markierung durch einen Laser wird die Welle durch eine Präzisionsachse gedreht und in Umfangsrichtung der Markierungsring schrittweise aufgebracht. Die durch den Laserprozess hervorgerufene Schwärzung kann anhand der Reflektivität quantifiziert werden. Die Reflektivität der Wellenoberfläche wird bspw. bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 632 \text{ nm}$  von etwa 70 % im unbehandelten Zustand auf etwa 5 % reduziert [ASU<sup>+</sup>18].

Der durch die Laserstrahlung hervorgerufene Oxidationsprozess wird in der Literatur zum Beispiel von MURPHY ET AL. beschrieben. Die Oxidation, die erst durch den in der Umgebungsluft vorhandenen Sauerstoff ermöglicht wird, findet hauptsächlich mit den Chrom- und Eisenionen statt. Genauer bildet sich an der Oberfläche eine Schicht aus  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  bzw.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , die eine Farbänderung hervorrufen. Diese Färbung bzw. der Grad der Schwärzung wird signifikant u. a. von der eingebrachten Laserleistung beeinflusst. [MHN15]

### 4.1.2 Codierung des absoluten Winkels durch eine Pseudo-Random-Codierung (PRC)

Die Markierung, die für dieses Verfahren zur Ortscodierung eingesetzt wird, muss Kriterien genügen, die im Weiteren beschrieben sind. Zum Erkennen des absoluten Winkels ist es notwendig, dass jede Markierungsfolge von  $m$  Markierungen eindeutig erkannt wird [FBV08, BVF09]. Diese sog. minimale Codewortlänge aus  $m$  Markierungen muss für jede Codierung bestimmt werden, sodass eine Doppeldeutigkeit ausgeschlossen ist. Diese minimale Codewortlänge kann mit Hilfe der Gleichung 4.1 bestimmt werden [FBV08, BVF09]. Die Anzahl aller Markierungen eines Markierungsringes entspricht dabei  $e$ .

#### 4 Konzeption der Drehwinkelcodierung und Drehwinkelmessung

$$m = \log_2 e \quad (4.1)$$

Darüber hinaus muss gewährleistet sein, dass auch eine Eindeutigkeit beim Übergang der letzten Markierung zum Anfang gegeben ist und somit das sog. „closed-loop“ Kriterium erfüllt ist. Da viele unterschiedliche Anwendungen und damit unterschiedliche große Wellendurchmesser in Frage kommen, ist es notwendig die Anzahl der Markierungen  $e$  flexibel für die jeweilige Anwendung wählen zu können ([Anforderung 8](#)). Alternativ könnte zwar auch die Linienbreite durch die Laserbearbeitung variiert werden, allerdings wird dies zunächst nicht betrachtet, da die Bearbeitungsparameter für eine Linienbreite (eine Linie entspricht einer Null-Markierung) optimiert sind. Eine abgerollte Codierung, die diesen Kriterien gerecht wird, ist in Bild 4.2 beispielhaft für  $e = 16$  Markierungen dargestellt. [MUD<sup>+</sup>16]

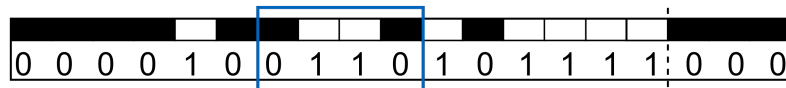


Bild 4.2: Abgerollte Pseudo-Random-Codierung (PRC) mit  $e = 16$  Markierungen und einer minimalen Codewortlänge von  $m = \log_2 e = 4$  Markierungen. Das Codewort 0110 ist beispielhaft in [blau](#) hervorgehoben. [MUD<sup>+</sup>16]

Entsprechend der Anzahl an Markierungen und der Gleichung 4.1 ergibt sich die minimale Codewortlänge  $m = 4$ . Beliebige vier (oder mehr) zusammenhängende Markierungen sind innerhalb der ganzen Codierung eindeutig. Zur besseren Veranschaulichung des Beispiels ist das eindeutige Codewort 0110 hervorgehoben. In Bild 4.3 sind die 16 möglichen Positionen dargestellt. Das Codewort 0110 kann eindeutig und ausschließlich der siebten Position der Markierung zugeordnet werden. Anhand der Position kann direkt auf den absoluten Drehwinkel geschlossen werden. Die drei Nullen (000) am Ende stellen den nahtlosen Übergang des Endes mit dem Anfang der Markierung dar. [MUD<sup>+</sup>16]

Die qualitative Untersuchung mit  $e = 2000$  Markierungen in [MUD<sup>+</sup>16] zeigt, dass der absolute Winkel durch den programmierten Pseudo-Random (PR)-Code zwar mit Fehlern aber immer eindeutig abgebildet wird, sodass die zuvor aufgeführten Kriterien an die Codierung erfüllt sind. Auch kann eine beliebige ganzzahlige Markierungsanzahl  $e$  gewählt werden. Auffällig an der Simulation sind reproduzierbare und verhältnismäßig große Winkelfehler bei bestimmten Winkelpositionen. Diese Fehler treten auf, da bei diesen Positionen verhältnismäßig viele aneinander liegende Nullen oder Einsen vorliegen, wie das in Bild 4.3 z. B. bei Position eins und Position 13

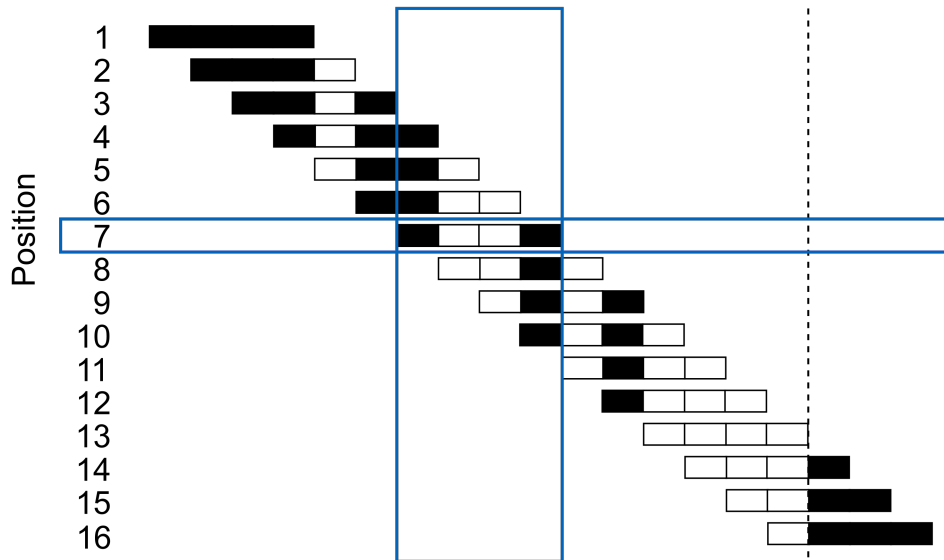


Bild 4.3: Das in dem vorangegangenen Bild beispielhaft hervorgehobene Codewort entspricht der Position sieben. [MUD<sup>+</sup>16]

der Fall ist. Die entwickelte Bildverarbeitung, die in Kapitel 4.3.2 genauer beschrieben wird, ist auf die Bestimmung der Position von Kanten ausgelegt. Mehrere Kanten (mehr als eine) sind für die Redundanz und damit für die Kompensation von Fehlern vorteilhaft bzw. im umgekehrten Fall von Nachteil, wenn nur wenige Kanten (z. B. eine oder keine) vorliegen. [MUD<sup>+</sup>16]

#### 4.1.3 Codierung des absoluten Winkels durch eine MPR-Codierung

Aus der in [MUD<sup>+</sup>16] durchgeführten Untersuchung ist ersichtlich, dass der codierungsbedingte Fehler für mehrere gleiche aneinander liegende Markierungen für eine spätere Umsetzung inakzeptabel ist. Aus dem gleichen Grund kann z. B. auch die von WANG beschriebene Codierung, die auf dem Hamiltonkreis basiert, nicht verwendet werden [WWHL16]. Daher wird der zuvor entwickelte PR-Code durch den sog. „Manchester Code“ [Yue83, JBS92] transformiert. Der transformierte PR-Code wird im Folgenden als Manchester-Pseudo-Random (MPR)-Code bezeichnet. Die Transformation durch den Manchester Code ersetzt eine Null durch eine Null-Eins ( $0 \rightarrow 01$ ) und eine Eins durch eine Eins gefolgt von einer Null ( $1 \rightarrow 10$ ). Daraus folgt, dass die maximale Anzahl gleicher Markierungen, die nach einander folgen können, auf maximal zwei reduziert wird. Eine erneute und ebenfalls in [MUD<sup>+</sup>16] durchgeführte Untersuchung zeigt eine Verbesserung, sodass die oben genannten Fehler nicht mehr auftreten. In einem Vergleich ist in Bild 4.4 beispielhaft der zuvor ausgelegte PR- und MPR-Code für  $e = 16$  Markierungen dargestellt. [MUD<sup>+</sup>16]

#### 4 Konzeption der Drehwinkelcodierung und Drehwinkelmessung

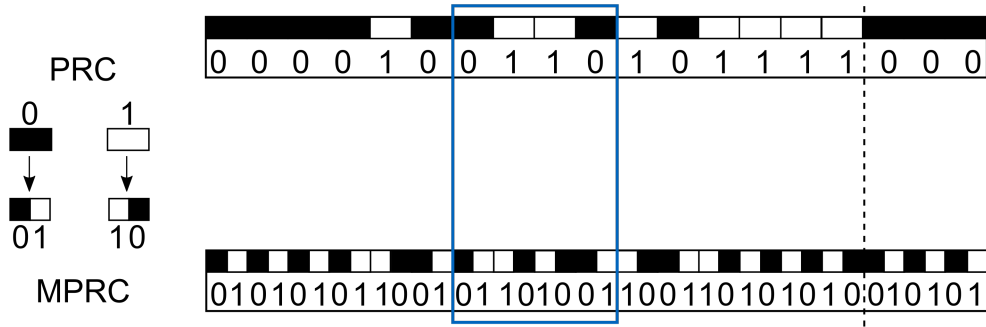


Bild 4.4: Transformation vom PR-Code zum MPR-Code. [MUD<sup>+</sup>16]

Nach Gleichung 4.1 wird die minimale Codewortlänge für PR-Codes berechnet. Für MPR-Codes könnte man daher annehmen, dass  $m_{MPRC} = 2 \cdot m_{PRC}$  gilt, sodass im gezeigten Beispiel in Bild 4.4 die minimale Codewortlänge  $m_{PRC} = 4$  bzw.  $m_{MPRC} = 8$  ist. Diese Annahme trifft allerdings nicht immer zu und kann lediglich als eine grobe Abschätzung angesehen werden. Die tatsächlich minimale Codewortlänge kann kürzer sein. Von Interesse ist dies, weil dadurch z. B. die zu betrachtende Fläche der Codierung kleiner ausgeführt oder der Code bei gleich groß betrachteter Fläche mehr Redundanz aufweist. Dadurch wiederum wird die Fehlererkennung verbessert. Der Bestimmung der minimalen Codewortlänge steht die dafür notwendige Laufzeit entgegen, sodass nicht alle möglichen Codes der Länge  $e$  getestet werden können. Die Laufzeit zur Erzeugung aller möglichen Codes wächst mit der Codewortlänge im schlimmsten Fall exponentiell, sodass der Lösungsraum eingrenzt werden muss. Die oben beschriebene Transformation hat neben der Tatsache, dass die Codewortlänge  $m$  verdoppelt wird auch zur Folge, dass die Codelänge  $e$  verdoppelt wird und nur noch ganzzahlige Vielfache von zwei als Codelänge möglich sind. Dies steht allerdings im Widerspruch zu Anforderung 8, dass jede ganzzahlige Länge  $e$  aufgrund unterschiedlicher Wellenradien möglich sein muss. Daher wird eine weitere Anpassung des Algorithmus vorgenommen, sodass nicht zunächst der PR-Code erstellt und daraus der MPR-Code abgeleitet wird, sondern direkt der MPR-Code erstellt wird.

Für die direkte Erzeugung eines MPR-Codes wird ein sog. Backtracking Algorithmus genutzt, der für dieses ganzzahlige Optimierungsproblem eine Lösung ermittelt. Bei diesem Algorithmus werden Codes in einem eingeschränkten Lösungsraum getestet [BPS99]. Das heißt, dass z. B. Kombinationen mit drei aufeinander folgenden gleichen Zahlen vorher ausgeschlossen werden. Durch die direkte Erzeugung kann nun ein MPR-Code für beliebige ganzzahlige Codelängen  $e$  erzeugt werden. Unklar ist aber nach wie vor, wie klein die minimale Codewortlänge  $m$  werden kann. Zwar wurde bislang kein Beweis erbracht, allerdings kann nach [Bar19] mit Hilfe der Fibonacci-

Folge eine genauere Abschätzung durchgeführt werden. Bislang konnte kein MPR-Code gefunden werden, für die eine kürzere Codewortlänge  $m$  möglich ist als der Wert des Indices<sup>1</sup>  $n$  der Fibonacci-Zahl  $F$  mit  $\varphi = (1 + \sqrt{5})/2$ :

$$n(F) = \left\lceil \log_{\varphi} \left( F \cdot \sqrt{5} + \frac{1}{2} \right) \right\rceil \quad (4.2)$$

Ersetzt man in der Gleichung 4.2 die Fibonacci-Zahl  $F$  durch die halbe Gesamtcodelänge  $e/2$ , kann die oberste untere Schranke der Codewortlänge  $m_{MPRC}$  berechnet werden. Mit der vermeintlich theoretischen obersten unteren Schranke wird in vertretbarer Zeit selten eine Lösung erreicht. Erweitert man diese Begrenzung um Eins oder Zwei, wird innerhalb weniger Sekunden mit einem durchschnittlichen Computer eine Lösung gefunden. Durch stichprobenartige Versuche konnte jeweils ein MPR-Code mit einer minimalen Codewortlänge  $m_{MPRC}$  im Intervall

$$n\left(\frac{e}{2}\right) \leq m_{MPRC} \leq n\left(\frac{e}{2}\right) + 2 \quad (4.3)$$

erstellt werden. Dies bedeutet, dass z. B. für  $e = 2^{14} = 16\,384$  Markierungen ein MPR-Code mit einer minimalen Codewortlänge von  $m_{MPRC} = 22$  erstellt werden kann. Im Vergleich dazu wäre mit der vorherigen groben Abschätzung über den PR-Code (mit  $m_{PRC} = 14$ )  $m_{MPRC} = 28$  angenommen worden. An dieser Stelle sei erneut darauf hingewiesen, dass der Algorithmus auch beliebige ganze Zahlen außerhalb der Zweierpotenz-Reihe Codes erstellt, sodass Anforderung 8 erfüllt ist.

Entlang der Zweier-Potenzreihe wurde die Codewortlänge für Codelängen bis  $e \leq 2^{22} = 4\,194\,304$  Markierungen ermittelt und sind in Bild 4.5 dargestellt.

## 4.2 Auslegung einer Torsionsmesswelle

Für die Untersuchung der generellen Machbarkeit und die Durchführung von Versuchen wurde eine Torsionsmesswelle konstruktiv ausgelegt und gefertigt. Die Torsionsmesswelle ist in Versuchen mit statischen Drehmomenten als auch bei

<sup>1</sup>Die Formel zur Berechnung des Indices einer Fibonacci-Zahl kann dabei mit Hilfe der Binet-Formel hergeleitet werden, siehe dazu Wikipedia ("Fibonacci number", Stand: 12/2018) und [HW08].

#### 4 Konzeption der Drehwinkelcodierung und Drehwinkelmessung

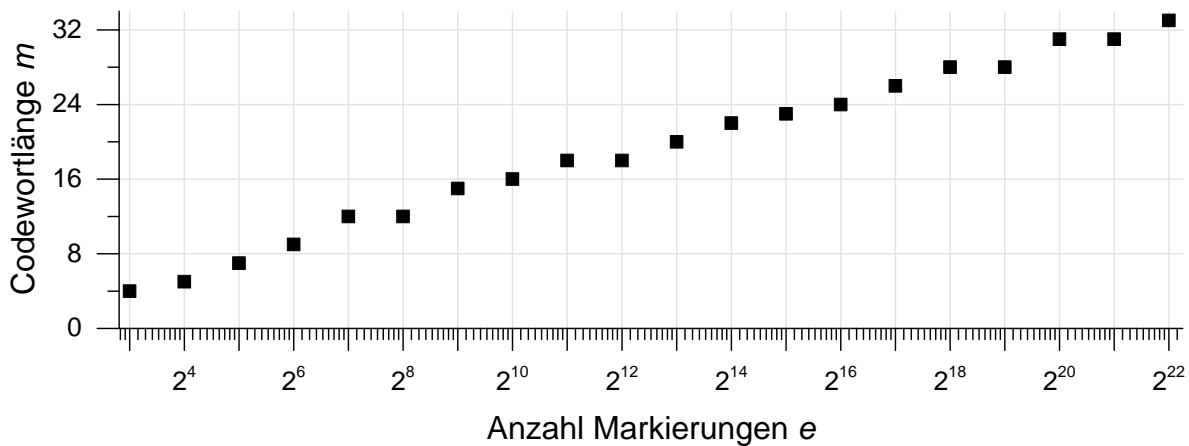


Bild 4.5: Darstellung verschiedener MPR-Codelängen  $e$  und der jeweiligen ermittelten Codewortlängen  $m$ .

Drehzahlen von bis zu  $1000 \text{ min}^{-1}$  mit dynamischen Drehmomenten von bis zu jeweils  $\pm 100 \text{ N m}$  belastet. Zusätzliche Momente oder Kräfte werden nicht eingeleitet, sodass keine weiteren inneren Kraft- und Momentwirkungen, d. h. Biegemomente oder Normal- und Querkräfte, zu erwarten sind und somit eine reine Torsionsbelastung vorliegt [Kra16]. Die Torsionsmesswelle wird aus dem duktilen Stahl 42CrMo4 (Werkstoff-Nr. 1.7225) hergestellt, der typischerweise in möglichen Anwendungen wie Kurbelwellen [BBK08, BTC<sup>+</sup>14, HDB16] verwendet wird. Neben dem Messbereich muss die Torsionswelle zudem jeweils zwei Absätze für Kupplungssitze und Lagersitze aufweisen, um die spätere Integration in den Versuchsaufbau zu ermöglichen. Ein statischer als auch dynamischer Festigkeitsnachweis wurde in der Arbeit von [Kra16] durchgeführt. Besonders relevant für diese Arbeit ist der ungekerbte Abschnitt in der Mitte, der Torsionsmessbereich. Dieser hat einen Radius von  $r = 10 \text{ mm}$  und verdreht sich nach [DS93, WJVS17] innerhalb einer Torsionslänge von  $l = 100 \text{ mm}$  und bei einer Belastung von  $M_t = 100 \text{ N m}$  um einen Winkel von

$$\Delta\varphi = \frac{M_t \cdot l}{G \cdot I_p} = \frac{100\,000 \text{ N mm} \cdot 100 \text{ mm}}{81\,000 \text{ N mm}^{-2} \cdot 15\,708 \text{ mm}^4} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \approx 0,4503^\circ. \quad (4.4)$$

Dabei sind  $G$  das Schubmodul und  $I_p$  das polare Flächenmoment des vorliegenden Vollkreises (Querschnitt der Welle) [Läp16]. Zur Veranschaulichung der vorliegenden Verformung bzw. Torsion ist in Bild 4.6 die Verformung bei anliegendem Drehmoment von  $M_t = 100 \text{ N m}$  dargestellt. Die Verformung steigt im mittleren ungekerbten Bereich, wie zu erwarten, linear von links nach rechts mit der Torsionslänge an. Die hier nicht dargestellten Vergleichsspannungen nach von Mises sind im

## 4.2 Auslegung einer Torsionsmesswelle

mittleren Bereich homogen und zeigen keine nennenswerten Spannungsspitzen durch die Querschnittsänderung auf. Somit kann der mittlere Bereich für statische und dynamische Torsionsuntersuchungen im Kontext des Winkeldifferenzverfahrens genutzt werden.

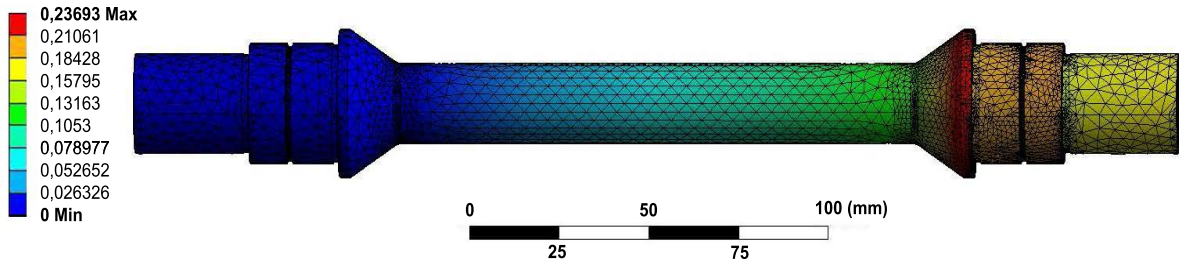


Bild 4.6: FEM-Simulation zur Veranschaulichung der Torsionsmesswellen-Verformung bei maximalem Drehmoment um die Längsachse. Dargestellt ist die farblichkodierte totale Deformation in Millimetern.

Die Qualitätsanforderung an die Oberfläche sind je nach Anwendung sehr verschieden. Von spiegelnden glatten Oberflächen bis zu sehr rauen Oberflächen. Da allerdings in Hinblick auf eine spätere Industrialisierung (vgl. Anforderung 4) kein kostenintensives Verfahren zur Minimierung der Rauheit angewendet wird, wird lediglich das Längsdrehen als Herstellungsverfahren der Wellen zugelassen. Durch das Nutzen eines kostengünstigen Fertigungsverfahrens ergibt sich zudem der Vorteil, dass die Torsionswellen-Oberfläche einer Vielzahl gedrehter Wellen in Maschinen ähnelt, was für eine spätere Integration des Messverfahrens und der damit verbundenen Bildverarbeitung von Vorteil ist. Beim Längsdrehen können nach DIN 4766<sup>2</sup> [DIN81] gemittelte Rautiefen von bis zu  $R_z \geq 1 \mu\text{m}$  erreicht werden. Die gefertigten Wellen entsprechen dieser Norm und haben eine gemittelte Rautiefe von etwa  $R_z \approx 4 \mu\text{m}$ .

Prinzipbedingt sind für das angestrebte optische Messsystem hohe Anforderungen an die Laufgenauigkeit und an den Rundlauf der Messwelle vorausgesetzt. Aus diesem Grund ist die Welle mit einigen Form- und Lagetoleranzen nach DIN EN ISO 1101 [DIN17] versehen [Kra16, WJVS17]. Die Tolerierung legt Toleranzräume fest, innerhalb der sich das gesamte tolerierte Geometrieelement befinden muss [ADF<sup>+</sup>18]. Neben den Form- und Lagetoleranzen sind allerdings gerade auch die Kombination dieser, die Lauftoleranzen und insbesondere der Gesamtrundlauf, wichtig. Die technische Zeichnung der Welle ist dem Anhang A.8 beigefügt. Die Integration der Torsionsmesswelle in den Prüfstand erfolgt mittels einer

<sup>2</sup>Die Norm DIN 4766 wurde zurückgezogen, sodass der Wert der Rautiefe nur als Anhaltswert zu verstehen ist, wie in [Pet12, WK14].

## 4 Konzeption der Drehwinkelcodierung und Drehwinkelmessung

Fest-Los-Lagerung und drehsteifen Metallbalgkupplungen. Die Lagerung der Welle ist mit radial-spielfreien, einreihigen Rillenkugellagern realisiert. Zusätzlich werden spezielle Rillenkugellager genutzt, die einen reduzierten Laufwiderstand aufweisen, sodass eine Beeinflussung des Drehmoments zwischen Torsionsmesswelle und Referenzdrehmomentmesswellen minimiert wird. Diese Beeinflussung, die aufgrund der Schmiermittel auch temperaturabhängig ist, liegt schätzungsweise in der Größenordnung von wenigen mNm und wird deshalb vernachlässigt.

### 4.3 Bildverarbeitung zum Auslesen von Markierungen

In Kapitel 2 wurde bereits der aktuelle Stand der Technik und Wissenschaft von Drehwinkel- und Drehmomentmessverfahren beschrieben. In diesem Kapitel wird zunächst der aktuelle Stand im Bereich der Verarbeitung von Markierungen, bzw. genauer von eindimensionalen Codierungen, beschrieben und darauf aufbauend dargelegt, warum die Programmierung eines eigenen Schwellwert-Verfahrens notwendig ist.

#### 4.3.1 Aktueller Stand der Technik und Wissenschaft

Seit den 70er-Jahren werden u. a. Barcodes zur Produktidentifikation verwendet. Diese eindimensionalen Codes finden vielfach Anwendung und werden mit sog. Barcodescannern ausgelesen. Seither beschäftigen sich wissenschaftliche Arbeiten mit dem möglichst fehlerfreien und robusten Auslesen eben dieser Codes. In Experimenten an der Ohio University wurden beim sog. Code 39 Fehlerhäufigkeit im Bereich zwischen einem Fehler je 1,7 Million Scans (worst case) und einem Fehler je 4,5 Million Scans (best case) ermittelt [FV93].

CHEN und MEDIONI zeigen ein vielversprechendes iteratives Kanten-Detektionsverfahren, das auch für Barcodes eingesetzt werden kann [CM89]. Aufgrund der Beschaffenheit der Kanten in der vorliegenden Arbeit kann dieses Verfahren allerdings nicht genutzt werden. Bei konventionellen Barcodes wird typischerweise ein starker Kontrast und teilweise eine optimierte bzw. modifizierte Oberfläche verwendet. Die hier vorliegenden Kanten sind vergleichsweise komplex und werden im folgenden Kapitel 4.3.2 genauer beschrieben. Jedenfalls weisen die Kanten unterschiedliche Steigungen auf, die speziell verarbeitet werden müssen. Eine



### 4.3 Bildverarbeitung zum Auslesen von Markierungen

Modifikation der Oberfläche, die ein einfacheres Auslesen ermöglicht, ist aufgrund der beschriebenen Anforderungen nicht möglich.

JOSEPH und PAVLIDIS beschreiben einen Ansatz, bei dem Sie im Gegensatz zu [CM89] die Mittelpunkte von angrenzenden Kanten detektieren, statt direkt die Kanten zu erfassen. Dadurch können einfachere Algorithmen verwendet werden, die den Funktionsverlauf der erfassten Codierung decodieren. Darüber hinaus beschreiben diese erstmalig den Zusammenhang zwischen der Unschärfe und dem Funktionsverlauf. Demnach kann die maximale Unschärfe durch ein Vielfaches der minimalen Pulsbreite des Funktionsverlauf beschrieben werden. Allerdings gelten Verfahren, die die Ableitung des Funktionsverlaufs nutzen, als besonders rauschanfällig und sind deshalb eher ungeeignet [SB15]. [JP94]

Im Vergleich zum bislang genutzten laser-basierten Barcodescanner werden immer mehr Geräte mit 2D-Kamerachips verwendet die neben Barcodes auch zweidimensionale Matrixcodes (z. B. Data-Matrix und QR-Codes) oder auch Stapelcodes (z. B. PDF417 und Code 16K) auslesen zu können [Ove18]. Als Stand der Technik zum Auslesen von Barcodes gilt ein Verfahren, das auf der Maximum-Likelihood-Methode basiert [SB15]. Dieses Verfahren unterscheidet sich von den bisherigen, da keine Binarisierung des Bildes vorgenommen wird. Weder werden Schwellwerte verwendet, noch Kanten detektiert. Die präsentierten Fehlerraten liegen deutlich unter denen anderer und eine Implementierung in einem Smartphone wurde umgesetzt. Der beschriebene Algorithmus konnte in verschiedenen Testszenarien 113 von 153 Testbildern erfolgreich decodieren. Ein auf bayesschen Netzen basierender Algorithmus konnte im Vergleich dazu lediglich 84 Testbilder erfolgreich decodieren. Kommerzielle, auf Barcode spezialisierte Bildverarbeitungsprogramme konnten nicht mehr als 65 Bilder korrekt decodieren. [GM09, GM11, SB15]

SIMSEKLI und BIRDAL beschreiben erstmalig einen allgemeinen Ansatz zur Dekodierung von linearen Barcodes auf Basis eines bayesschen Netzes, genauer eines sog. Hierarchical Hidden Markov Models. Der beschriebene Ansatz ist robust gegenüber Unschärfe, Verzerrung und Verformung. Im Vergleich zu den Algorithmen von [GM09, GM11] können auch andere Codierungen als die von spezifischen Barcodes (wie z. B. UPC-A) genutzt werden. Problematisch zum aktuellen Zeitpunkt sind allerdings die fehlende dynamische Anpassung von Parametern anhand der Gradienten sowie die fehlende Unterstützung anderer Codierungen. [SB15]

### 4.3.2 Entwickeltes Schwellwert-Verfahren

Da keines der oben genannten Verfahren zum aktuellen Zeitpunkt direkt für die Detektion der Markierungen geeignet ist, wird ein Algorithmus angestrebt, der auf den bekannten Ansätzen aufbaut. Ansätze für die Erkennung von Kanten sind insbesondere das sog. Canny-Kantendetektionsverfahren, das Schwellwertverfahren nach Otsu sowie der Prewitt- und Sobel-Operator. Herausfordernd ist bei den Markierungen allerdings, dass die hellen Markierungen waagerechte Linien durch den Herstellungsprozess aufweisen, die vorzugsweise von konventionellen Kantendetektionsverfahren erfasst werden. Zwar können diese anhand der Richtung von der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen werden, allerdings führen eben diese zur einer Unterbrechung der eigentlichen vertikalen Markierung. Sog. Region-Growing-Algorithmen könnten diese zwar bis zu einem gewissen Grad schließen, werden an dieser Stelle aber aufgrund der vergleichsweise langen Laufzeit zunächst vernachlässigt.

In Voruntersuchungen wurden die oben genannten Verfahren miteinander verglichen und die Eignung für den hier vorliegenden Anwendungsfall geprüft. Insbesondere mit dem Verfahren nach Otsu sowie einem Schwellwert basiertem Verfahren konnten die Bilder erfolgreich decodiert werden. Allerdings war die Laufzeit des Otsu-Verfahrens um einen Faktor über zehn länger als die des Schwellwertverfahrens, sodass das individualisierte Schwellwertverfahren weiter verfolgt wurde und im Folgenden beschrieben ist. Die iterative Entwicklung des Schwellwertverfahrens wurde zu Beginn mit simulierten Bildern und später mit den realen Bildern durchgeführt. Aufgrund der besseren Verständlichkeit des Programmierablaufs wird an dieser Stelle vorgegriffen und ein reales Bild als Ausgangssituation verwendet. In Bild 4.7 ist ein typisches Bild von einer Wellenoberfläche (mit Lasermarkierungen) gezeigt, wie es im Laufe der Arbeit öfter auftauchen wird. Zu sehen sind die aufgebrauchten Lasermarkierungen in schwarz in vertikaler Richtung, sowie in horizontaler Richtung Riefen in der hellreflektierenden Oberfläche der Welle, die durch den drehenden Herstellungsprozess entstehen.

Der Quellcode der Bildverarbeitung ist im Anhang A.9 gegeben und mit der kommerziellen Software Matrix Laboratory (MATLAB) programmiert. Zu Beginn werden die Helligkeitswerte der Pixel in vertikaler Richtung (parallel zu einer Markierung) aufsummiert und zu einem Wert zusammen gefasst. Das 2D-Bild mit 2048 x 1088 Grauwerten wird somit zu einem 1D-Bild mit 2048 x 1 Grauwerten transformiert. Jeder Grauwert liegt dabei zwischen Null und 255. Anschließend wird das 1D-Bild

### 4.3 Bildverarbeitung zum Auslesen von Markierungen

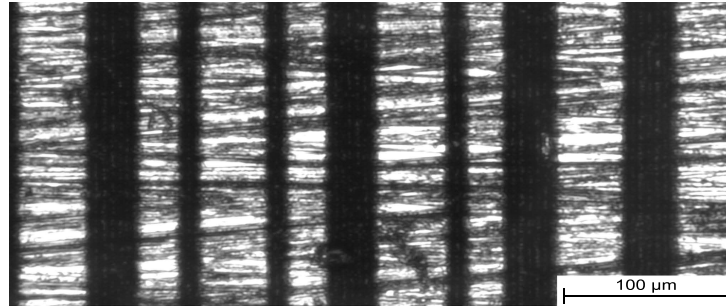


Bild 4.7: Unbearbeitetes Originalbild der Wellenoberfläche bei maximaler Vergrößerung.

im Offset korrigiert und auf eins normiert, vgl. Bild 4.8. Anhand eines festgelegten Schwellwertes wird dann das Grauwertbild in ein Binärbild umgewandelt. Liegt der Grauwert unterhalb des Schwellwertes wird diesem eine Null zugeordnet. Werten die gleich oder oberhalb des Schwellwertes liegen wird die Eins zugeordnet, vgl. Bild 4.9. Da dieser Schwellwert im voraus festgelegt<sup>3</sup> wird, wird dieser als statisch bezeichnet. Voruntersuchungen haben einen Schwellwert von  $1/3$  des maximalen Grauwerts ergeben. Dass dieser Wert nicht bei  $0,5$  liegt, ist durch die Riefen in den hellen Markierungen begründet. Diese sind dadurch vergleichsweise unregelmäßiger. Die dunklen Markierungen hingegen werden nicht von hellen Bereichen überlagert, sodass diese deutlicher zu erkennen sind.

An dieser Stelle wird anhand der Verteilung der 2048 Binärwerte überprüft, ob Ausreißer vorliegen. Je nach Art des Ausreißers wird dieser ignoriert und somit als Messwert ausgeschlossen oder das Verfahren abgebrochen. Im ersten Fall wird eine Warnung und im zweiten Fall eine Fehlermeldung ausgegeben. Bei keiner Fehlermeldung kann im Anschluss eine Einordnung in die vier möglichen Markierungen (0,00,1,11) erfolgen. Die Separation in Null oder Eins wird trivial anhand des Binärwertes entschieden. Als letztes ist jeweils die Entscheidung zu treffen, ob eine einzelne Markierung oder eine doppelte vorliegt, also 0 oder 00 und 1 oder 11. Dies wird anhand eines weiteren Schwellwertes (im folgenden Grenzwert genannt) entschieden, vgl. Bild 4.10. Dieser Grenzwert wird separat für die Nullen und Einsen bestimmt und für jedes einzelne Bild berechnet. Dieser Grenzwert wird somit als dynamisch bezeichnet, da dieser nicht im voraus statisch festgelegt wird. In jedem Bild wird zunächst geprüft, ob doppelte Markierungen vorliegen indem die Differenz zwischen der minimalen und maximalen Breite berechnet wird. Ist die Differenz größer als  $1,5$  wird davon ausgegangen, dass eine doppelte Markierung vorliegt. In diesem

<sup>3</sup>Hinweis: Im Laufe der Arbeit wird dieser durch einen dynamischen Schwellwert ersetzt, siehe dazu Kapitel 8.3.2.

#### 4 Konzeption der Drehwinkelcodierung und Drehwinkelmessung

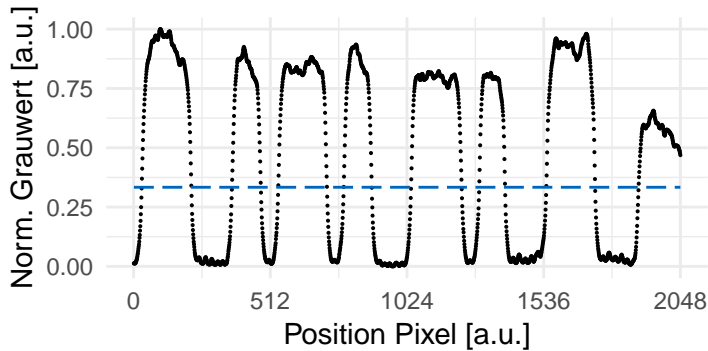


Bild 4.8: Normierte und Offset-korrigierte Grauwerte des Originalbildes mit eingezeichnetem statischem Schwellwert bei  $y = 0,33$ .

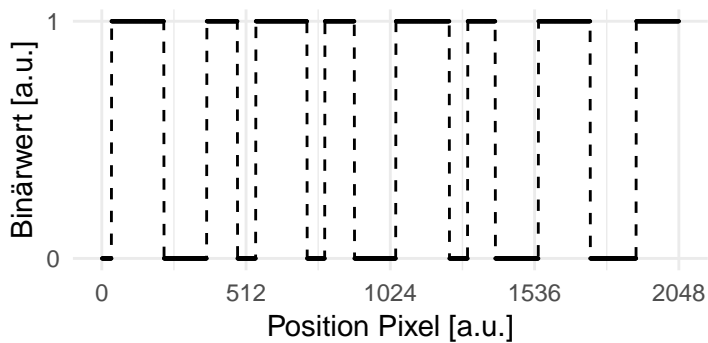


Bild 4.9: Transformation der Grauwerte zu Binärwerten. Zur Verdeutlichung des Verlaufs verbindet eine gestrichelte Linie die Binärwerte.

Fall, wird die Mitte zwischen dem kleinsten und größten Wert als Grenzwert bestimmt. Dabei werden jeweils die erste und letzte Markierung nicht berücksichtigt, da diese meist außerhalb des Bildfeldes sind und somit die Grenzwertbestimmung verfälschen würden. Ob nur doppelte Markierungen vorliegen, wird ebenfalls anhand der Anzahl der Markierungen und eines festgelegten Werts der jeweiligen Breiten überprüft.

Die erfasste Codierung liegt vor, sodass diese mit dem vorliegenden Gesamtcode abgeglichen und die Position im Gesamtcode bestimmt wird. Unter Annahme einer korrekt aufgetragenen Codierung liegt eine Winkelinformation mit einer Genauigkeit kleiner der Breite einer doppelten Markierung vor. Die erste Markierung kann z. B. eine doppelte Markierung sein, die entweder komplett oder nur noch zu einem ganz kleinen Teil zu sehen ist. Daher ist die Ungenauigkeit  $< 0,18^\circ$  bei 4000 Markierungen. Dies ist allerdings nur eine grobe Winkelbestimmung. Da aufgrund der maximalen Vergrößerung von  $\beta = 28$  und einer Markierungsbreite von  $17 \mu\text{m}$  etwa 24 Markierungen auf 2048 Pixel abgebildet werden, wird eine genauere Bestimmung vorgenommen. Neben der Information welche Binärwerte vorliegen, wird die Information genutzt

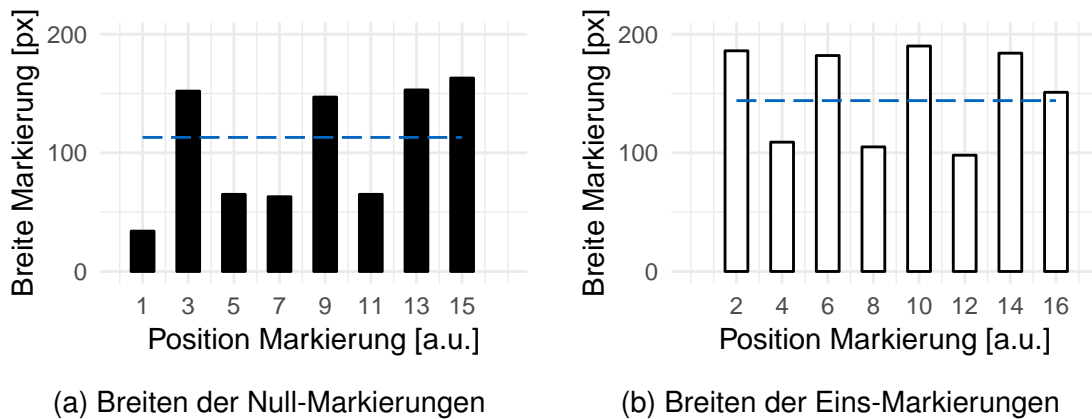


Bild 4.10: Breiten der jeweiligen Markierungen und dynamischen Grenzwerte (gestrichelt eingezeichnet) zur Unterscheidung, ob eine einzelne oder eine doppelte Markierung vorliegt.

an welcher Stelle diese Werte vorliegen, sodass bestimmt wird an welcher Position der erste Wechsel einer Markierung vorliegt. Anhand dieser Position wird berechnet, welcher Anteil der Markierung im Sichtbereich der Kamera ist bzw. welcher Abstand zur zweiten Markierung besteht. Dieser Abstand, multipliziert mit einem Faktor zur Umrechnung von Pixel auf Grad, wird der groben Winkelinformation hinzugefügt und so eine präzise Winkelinformation bestimmt. Dadurch ergibt sich eine theoretische Genauigkeit von  $< 0,002^\circ$ . Dieser Angabe liegen  $e = 4000$  Markierungen zugrunde sowie die maximale Vergrößerung aus der ableitbar ist, dass eine Markierung auf etwa 86 Pixel abgebildet wird.

## 4.4 Zwischenfazit

Das Teilziel 1 der Winkelcodierung wurde unter Berücksichtigung der Anforderungen erfolgreich in Form einer neuartigen Einspurcodierung umgesetzt. Diese Codierung wird durch einen Lasermarkierprozess auf die ausgelegte Torsionsmesswelle aufgebracht und mit Hilfe einer Schwellwert-basierten Bildverarbeitung als absoluter Drehwinkel ausgelesen. Resultierend wird das anliegende Drehmoment anhand der Winkeldifferenz zweier im Abstand der Torsionslänge befindlicher Messstellen optisch bestimmt.



## 5 Modellbildung und Simulation

Unschärfe kann in der vorliegenden Arbeit auf zwei grundlegende Ursachen zurückgeführt werden:

1. Unschärfe durch Abbildung des Objektes außerhalb des Schärfebereichs
2. Unschärfe durch schnelle relative Bewegung zwischen Objekt und Kamera

Beide Ursachen können wiederum die Wirkung vorangegangener Ursachen sein. Mögliche vorangegangene Ursachen sind im Ursachen-Wirkungsdiagramm in Bild 3.1 dargestellt. Exemplarisch seien z. B. die Drehzahl, Vibration oder auch die Verschiebung zwischen Kamera und Objekt genannt. All diese können zu einer unscharfen Abbildung führen. Aus der Wissenschaft ist bekannt, dass aufgrund entsprechend großem Abbildungsmaßstab eine endliche und damit begrenzte Schärfentiefe vorliegt [Haf03]. Schärfentiefen bekannter Objektive mit entsprechender Vergrößerung liegen typischerweise im ein- bis zweistelligen Mikrometer-Bereich. Vergleicht man dies bspw. mit der zu erwartenden Gesamtrundlauf toleranz, die typischerweise im zweistelligen Mikrometer-Bereich liegt, kann die resultierende Unschärfe nicht unberücksichtigt bleiben. Daher werden im folgenden Systemveränderungen hinsichtlich der Auswirkung auf die Drehwinkelmessung und die Schärfe entsprechend der zentralen wissenschaftlichen Fragestellung untersucht.

Zusätzlich wird die Auswirkung der Relativgeschwindigkeit zwischen Objekt und Kamera simulativ untersucht. Ist diese deutlich höher als die dafür vorgesehene Belichtungsdauer, verzerrt das Bild während der Bildaufnahme, sodass auch diese Ursache für Unschärfe nicht vernachlässigt werden kann.

Eine weitere Ursache für Unschärfe, die an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben soll, kann die gewölbte Oberfläche der Welle sein. Bei den in dieser Arbeit gewählten Radien und Schärfentiefen sind diese allerdings vernachlässigbar. Eine analytische

## 5 Modellbildung und Simulation

Beschreibung der Zusammenhänge und eine Berechnung des minimal möglichen Radius ist im Anhang in Kapitel A.3 gegeben.

Die in diesem Kapitel gezeigten Positionsveränderungen in den sechs Freiheitsgraden können in der Anwendung auch gleichzeitig auftreten, sodass die Fehlerfortpflanzung systematischer Fehler beachtet werden muss. Im Folgenden sind diese zunächst einzeln beschrieben, beginnend mit der translatorischen Bewegung (Kapitel 5.1) und gefolgt von der rotatorischen Bewegung (Kapitel 5.2).

### 5.1 Auswirkung der translatorischen Bewegung des optischen Systems

Unter Annahme eines starren Körpers ohne Bewegungseinschränkung sind Veränderungen entlang der drei translatorischen und rotatorischen Achsen möglich. In Bezug auf das hier beschriebene Messverfahren kann sowohl die Welle als auch der Sensor jeweils Bewegungen in eben diesen durchführen. Für die weitere Betrachtung ist allerdings nur die relative Bewegung zu einander von Interesse. In Bild 5.1 sind die drei translatorischen Bewegungen dargestellt, die folgend mit Gleichungen beschrieben sind.

Die Winkelveränderung  $\Delta\varphi(x)$  die sich aus der translatorischen Verschiebung  $\Delta x$  entlang der Codierung in x-Richtung ergibt, berechnet sich aus dem Verhältnis zwischen der entsprechenden Verschiebung und dem Gesamtumfang der Welle mit einem Radius  $r$ :

$$\Delta\varphi(x) = \frac{360}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \Delta x \quad (5.1)$$

Bei einer Drehwinkelmessung führt eine translatorische Verschiebung  $\Delta y$  parallel zur Codierung in y-Richtung unter Annahme perfekter Markierungen zu keiner Veränderung des bestimmten Drehwinkels. Im Kontext der Drehmomentmessung entspricht die translatorische Verschiebung in y-Richtung allerdings einer Veränderung der Torsionslänge. Allgemein kann die Winkeldifferenz trivial aus Gleichung 4.4 berechnet werden. Bei keiner anliegenden Torsion ist die Winkeldifferenz gleich Null:

$$\Delta\varphi(y, M_t) = \frac{M_t}{G \cdot I_t} \cdot \Delta y \quad (5.2)$$



## 5.1 Auswirkung der translatorischen Bewegung des optischen Systems

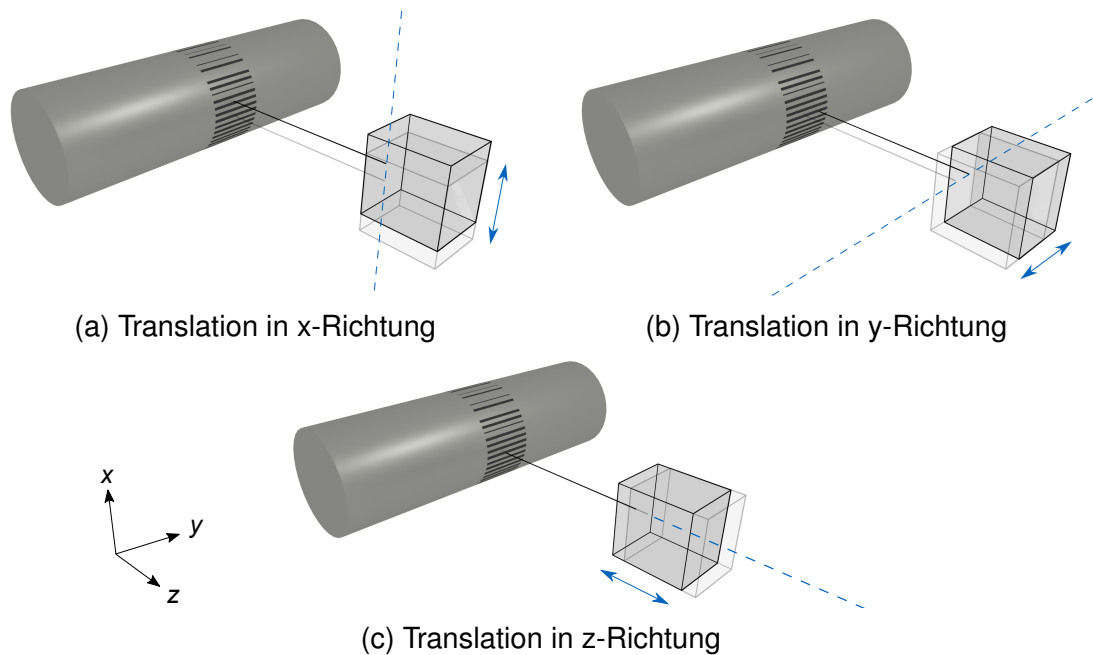


Bild 5.1: Translatorische Verschiebung zwischen der Welle und dem optischem System.

In der folgenden Tabelle 5.1 sind für jede Bewegungsrichtung die Auswirkung auf die Drehwinkelmessung unter idealen Bindungen berechnet. Dafür wird für die translatorischen Bewegungen eine realistische Veränderung von 0,1 mm angenommen. Die daraus resultierende Abstandsänderung  $\Delta a$  zwischen Welle und Kamera sind der in der dritten Spalte dargestellt. Diese Distanz wird auch als der sog. Arbeitsabstand bezeichnet.

Tabelle 5.1: Exemplarisch berechnete Winkelveränderung  $\Delta\varphi$  bei translatorischer Verschiebung um 0,1 mm entlang der jeweiligen Achse.

| Richtung | Winkelveränderung $\Delta\varphi$ [°] | Arbeitsabstandsänderung $\Delta a$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|----------|---------------------------------------|--|
| x        | 0,018                                 | 0,5  |
| y        | 0,001                                 | 0  |
| z        | unbekannt                             | 100  |

Die Arbeitsabstandsänderung  $\Delta a_x$  ergibt sich dabei trivial aus der Segmenthöhe des Kreises:

$$\Delta a_x(\Delta x) = r - \frac{1}{2} \sqrt{4r^2 - (2 \cdot \Delta x)^2} \quad (5.3)$$

Die Winkel- und Arbeitsabstandsveränderungen für die Translation in x-Richtung ist mit  $0,018^\circ$  relativ groß und ist durch die Verschiebung entlang der Codierung zu begründen. Diese Tatsache ist unumgänglich und wird in Hinblick auf die Winkelveränderung als nicht änderbar hingenommen. Die Arbeitsabstandsänderung hingegen ist vernachlässigbar klein. Ebenfalls vernachlässigbar sind die Arbeitsabstandsveränderungen sowie die Winkel- und Arbeitsabstandsveränderungen für die Translation in y-Richtung, da diese ausreichend klein sind. Anders ist es bei der Translation in z-Richtung (siehe Bild 5.1c). In diesem Fall wirkt die Translation direkt auf den Arbeitsabstand. Die daraus resultierende Winkelveränderung kann nicht trivial abgeleitet werden, sodass diese in Kapitel 5.3.1 simulativ untersucht wird.

### 5.2 Auswirkung der rotatorischer Bewegung des optischen Systems

Neben der Translation kann auch Rotation auftreten, vgl. Bild 5.2.

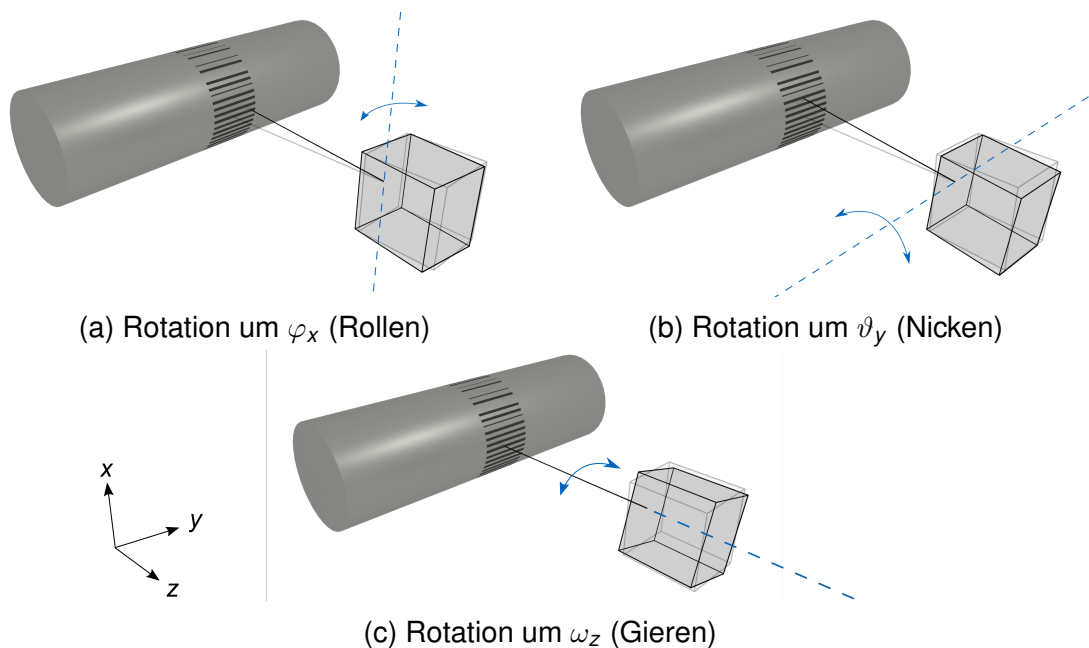


Bild 5.2: Rotatorische Bewegung zwischen der Welle und dem optischen System.

Die Auswirkung der Rotation auf die Winkelveränderung kann durch eine Translation auf der Oberfläche in Abhängigkeit vom Rotationswinkel bestimmt werden. Die daraus resultierende Winkelveränderung für das Rollen und Nicken ist in Gleichung 5.4 und 5.5 gezeigt.

## 5.2 Auswirkung der rotatorischer Bewegung des optischen Systems

$$\Delta\varphi(\varphi_x, M_t) = \frac{M_t \cdot a}{G \cdot l_t} \cdot \tan(\varphi_x) \quad (5.4)$$

$$\Delta\varphi(\vartheta_y) = \frac{360 \cdot a}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \tan(\vartheta_y) \quad (5.5)$$

Die Winkelveränderung ist Null für die Rotation um die z-Achse (Gieren) für kleine Winkel, da keine Verschiebung entlang der Codierung stattfindet. Bei größeren Winkeln ist die theoretische Winkelveränderung zwar ebenfalls Null, allerdings versagt ab einem Gierwinkel von etwa  $\omega_z = \pm 3^\circ$  die Bildverarbeitung. Im Anhang in Kapitel A.6 ist dieses Verhalten genauer beschrieben.

Durch die Rotation um  $\varphi_x$  und  $\vartheta_y$  entsteht allerdings noch ein zweiter Effekt, nämlich der einer in z-Richtung verschobenen Objektebene (vgl. Bild A.3 im Anhang). Dadurch verändert sich der Arbeitsabstand, sodass im schlimmsten Fall ein Teil des Bildes unscharf ist. In der folgenden Tabelle 5.2 sind beispielhaft die resultierenden Winkelveränderungen für rotatorische Bewegungen von  $0,1^\circ$  dargestellt. Zusätzlich sind in der dritten Spalte die damit einhergehenden Arbeitsabstandsänderungen aufgelistet, die mit Formeln im Anhang A.4 und A.5 beschrieben sind.

Tabelle 5.2: Exemplarisch berechnete Winkelveränderung  $\Delta\varphi$  bei rotatorischer Veränderung um  $0,1^\circ$  um die jeweilige Achse.

| Richtung      | Winkelveränderung $\Delta\varphi$ [°] | Arbeitsabstandsänderung $\Delta a$ [µm] |
|---------------|---------------------------------------|---|
| $\varphi_x$   | < 0,001                               | 0,3                                     |
| $\vartheta_y$ | 0,370                                 | 0,1                                     |
| $\omega_z$    | 0                                     | 0                                       |

Bei einer Rotation der Kamera um  $\varphi_x = 0,1^\circ$  ist die Winkelveränderung mit  $< 0,001^\circ$  vernachlässigbar. Ähnlich ist es mit der Verschiebung der Objektebene und damit mit dem Arbeitsabstand. Der Arbeitsabstand verschiebt sich um etwa  $0,3\mu\text{m}$ . Da diese Verschiebung deutlich kleiner ist als der zu erwartende Schärfebereich der Kamera, kann dieser Einfluss vernachlässigt werden. Bei der Rotation um die y-Achse ist die Veränderung des Arbeitsabstandes ebenso vernachlässigbar. Anders ist es bei der Winkelveränderung, die mit  $0,370^\circ$  nicht mehr vernachlässigt werden kann. Diese ist vergleichsweise hoch und hat damit einen signifikanten Einfluss auf die Winkelmessung. Dieser hohe Wert ist allerdings auch nicht überraschend, da die Verschiebung entlang der Codierung statt findet, vgl. Bild 5.2b.

### 5.3 Einfluss der Unschärfe auf die Winkelgenauigkeit

Aus den zwei vorangegangenen Kapiteln wird deutlich, dass in Hinblick auf die sechs Freiheitsgrade lediglich die Translation entlang der z-Achse bzw. der optischen Achse einen wesentlichen Einfluss auf den Arbeitsabstand und damit auf die Schärfe hat, vgl. Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2. Da die genauen Auswirkungen der Translation entlang der z-Achse auf die Winkelmessung unklar sind, werden diese im Folgenden untersucht. Ebenfalls wird - wie eingangs erwähnt - die Unschärfe durch eine schnelle Bewegung simulativ untersucht und abschließend in Wechselwirkung mit der Translation entlang der z-Achse betrachtet.

Unschärfe wird in der Literatur typischerweise durch die Faltung des Bildes mit einem entsprechenden Kernel realisiert [GW08]. Als Ausgangsbild wird dafür ein perfektes Bild erstellt, siehe Bild 5.3a. Die Abmessungen des Bildes und die Breiten der Markierungen entsprechen der zu erwartenden Vergrößerung der Optik und einer typischen Auflösung der Kamera.

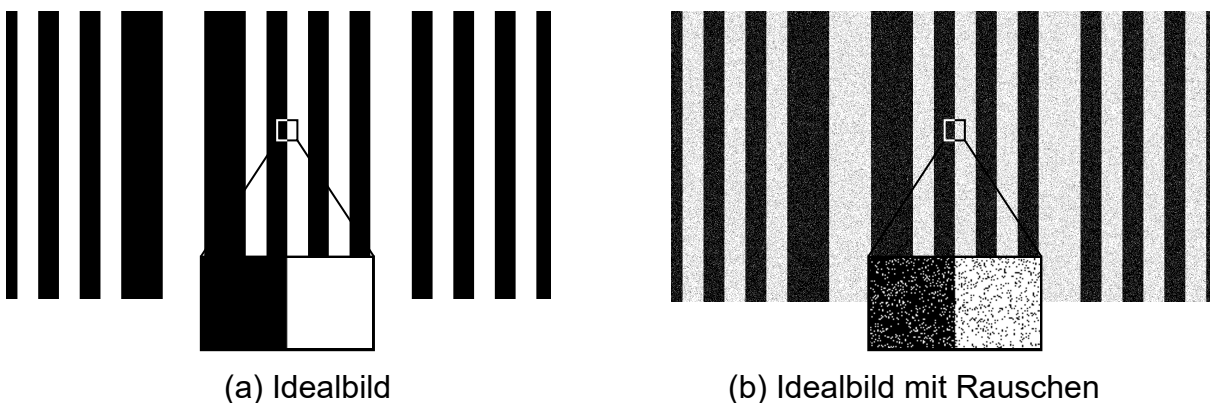


Bild 5.3: Vergleich zweier Idealbilder ohne (a) und mit (b) Rauschen.

Für die Untersuchung werden  $N = 30$  Idealbilder genutzt. Die im Idealbild dargestellte Codierung wird dabei randomisiert aus dem MPR-Code mit  $e = 3490$  Markierungen ausgewählt. Ebenfalls wird der Überlapp der ersten Markierung randomisiert bestimmt. In Bild 5.3b ist das Idealbild mit sog. Salt-and-Pepper-Rauschen, also einem Rauschen aus Weiß und Schwarz, dargestellt. Das Rauschen ist zur besseren visuellen Unterscheidung der kommenden zwei Kapitel 5.3.1 und 5.3.2 eingeblendet und ist nicht in der Simulation berücksichtigt.

### 5.3.1 Simulation der Unschärfe durch Faltung mit einem Gauß-Kernel

Für die Simulation der Unschärfe, die bspw. durch eine Translation in z-Richtung hervorgerufen wird, wird ein Kernel mit Hilfe der Gauß-Funktion berechnet [Pen87, DW88, MBA<sup>+</sup>96]. Dieser Kernel führt bei einer Faltung mit einem Bild zu einer Weichzeichnung und lässt dadurch das Bild unscharf erscheinen, vgl. Bild 5.4. Für die Umsetzung verschiedener Stufen der Unschärfe wird der Kernel für unterschiedliche Standardabweichungen  $\sigma$  der Gauß-Verteilung berechnet. Die Größe der quadratischen Kernelmatrix wird dabei mit steigender Standardabweichung ebenfalls vergrößert mit  $4 \cdot \sigma + 1$ .

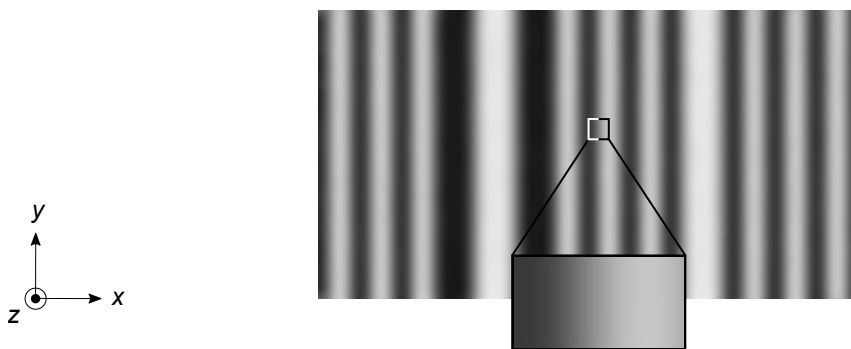


Bild 5.4: Verrauschtes Idealbild mit einem Gauß-Kernel ( $\sigma = 30$ ) gefaltet.

Der absolute Drehwinkel wird mit Hilfe des Schwellwert-Verfahrens für das Idealbild und die unterschiedlich Gauß-gefilterten Bilder ermittelt. Für jede Standardabweichung  $\sigma$  wird die Differenz des Drehwinkels der Gauß-gefilterten Bilder zum ermittelten Drehwinkel des Idealbildes berechnet. Diese Winkelabweichung zum Idealbild ist für die 30 Idealbilder gemittelt und in Bild 5.5a dargestellt.

Für Unschärfen bis  $\sigma = 40$  px ist die Winkelabweichung im Mittel Null. Dieses Verhalten entspricht den Erwartungen, als dass durch die Unschärfe die Position der Markierung nicht signifikant verändert wird. Ähnliche Ergebnisse sind in der Literatur zu finden, sodass z. B. NORMAND und VIARD-GAUDIN einen 1D-Code mit einer Unschärfe von 5 px ebenfalls erfolgreich decodierten [NVG94].

Mit zunehmender Unschärfe werden allerdings die weißen und auch schwarzen Markierungen grauer. Dadurch verschwimmt die im idealen Bild perfekte Grenze zu einer immer größer werdenden Übergangszone. Da der Schwellwert nicht exakt in der Mitte zwischen den beiden Markierungen liegt, sondern bei  $y = 0,33$ , verschiebt sich diese Position in Richtung der weißen Markierung. Die Positionsverschiebung ist dabei von der Breite der Übergangszone und damit von der Schärfe abhängig. Somit

## 5 Modellbildung und Simulation

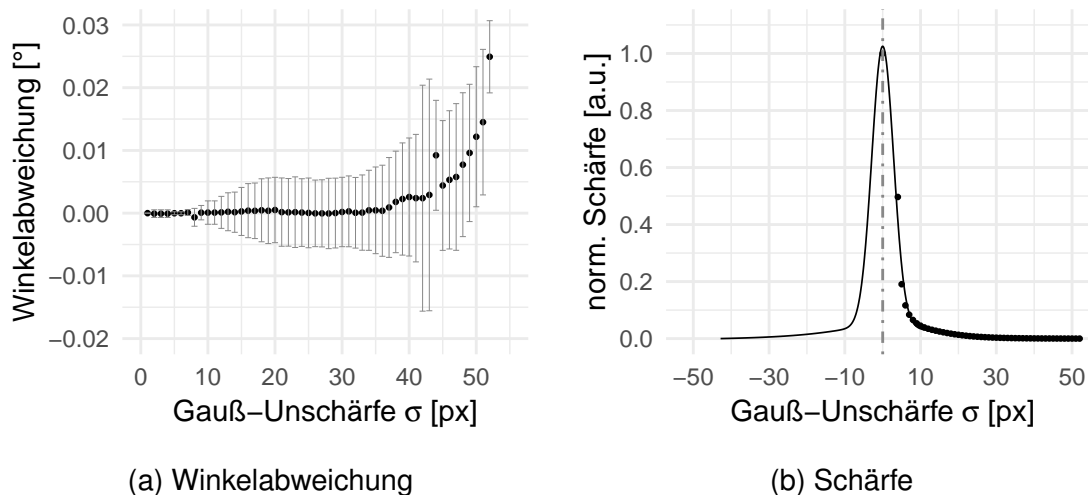


Bild 5.5: Darstellung der Winkelabweichung und der normierten Schärfe Gauß-gefilterter Idealbilder. ( $N = 30$  Bilder)

kommt es in Abhängigkeit des ersten Übergangs zu einer Positionsveränderung, die in beide Richtungen möglich ist. Dieses Verhalten ist durch den Anstieg der immer stärker streuenden Messwerte anhand der Standardabweichung der Winkelabweichung in Bild 5.5a zu erkennen. Die Standardabweichung ist durch die Fehlerbalken dargestellt und steigt auf etwa  $0,005^\circ$  an. Im gezeigten Beispiel verschiebt sich die Grenze nach rechts, da die erste Markierung eine schwarze Markierung ist. Diese zufällig verteilten Abweichungen gleichen sich - für kleine Unschärfen - aus, sodass der Mittelwert bei einer ausreichend großen Anzahl an Messungen nahe Null liegt. Allerdings trifft dies nur zu, wenn die Anzahl weißer und schwarzer sowie jeweils einfacher und doppelter Markierungen gleich sind. Die in dieser Arbeit genutzte MPR-Code mit 3490 Markierungen erfüllt diese Bedingung. Die Markierung weist 1745 weiße und schwarze Markierungen mit jeweils 435 doppelten auf.

Ab einer Unschärfe von  $\sigma = 40$  px steigt die Winkelabweichung auf  $0,025^\circ$  an. Dieses Verhalten entspricht nicht der Erwartung und wird durch Randeffekte der Filterung erklärt. Die Kombination aus der Standardabweichung und der daraus resultierenden Kernelgröße führen zu einer vergleichsweise geringeren Weichzeichnung, sodass die erste (und letzte) Markierung im Vergleich intensiver und dadurch breiter erscheinen. Dies führt zu einer Verschiebung des ersten Übergangs und damit im Schwellwertverfahren zu einem in positiver Richtung verschobenen Winkelwert. Da dieses Verhalten durch die Filterung bei großen Unschärfen und nicht durch die optische Abbildung hervorgerufen wird, ist dies in der praktischen Umsetzung nicht zu erwarten. Die einzelnen Markierungen überlappen ab einer Unschärfe von  $\sigma = 52$  px

### 5.3 Einfluss der Unschärfe auf die Winkelgenauigkeit

so stark, dass kein Winkel mehr decodiert werden kann und eine Fehlermeldung der Bildverarbeitung ausgegeben wird.

Für weitere Untersuchungen wird zusätzlich noch die Schärfe jedes simulierten Bildes bestimmt. Zur Bestimmung der Schärfe sind in der Literatur verschiedene Verfahren bekannt. Typische Verfahren basieren auf dem Gradient [NN94, Ten70, SSNW83], der Varianz [KYO<sup>+</sup>89], der Autokorrelation [Vol87], dem Histogramm [Kro87] oder der Fourier-Transformation [Hor68, JABG94, RMMM11]. Aufgrund der Robustheit und des vergleichsweise steilen Peaks, wird die sog. Tenengrad-Funktion, ein Gradient basiertes Verfahren, genutzt [YOJS93, Kro87]. Diese Funktion beruht auf einer Faltung mit dem Sobel-Operator, zweier 3 x 3 Matrizen. Ein steiler Peak ist von Vorteil, da eine Abstandsveränderung mit einer vergleichsweise großen Schärfenänderung einhergeht und damit die Sensitivität erhöht ist. Ergebnis der Tenengrad-Funktion ist ein einheitsloser Zahlenwert, der für ein gegebenes Bild, die Schärfe wiedergibt. In Bild 5.5b sind die gemittelten und normierten Schärfewerte für positive Werte dargestellt und die symmetrische Tenengrad-Funktion angefügt. Ersichtlich ist, dass die Werte gut mit der Theorie übereinstimmen und eine hohe Sensitivität durch einen steilen Anstieg und Abfall gegeben ist.

Interessant an den Simulationsergebnissen der beiden Bilder 5.5a und 5.5b ist, dass mit beginnender Gauß-Unschärfe der Winkelfehler noch quasi Null ist, aber die Schärfe sichtlich abnimmt. Dieser positive Umstand wird im speziellen in Kapitel 8.2 wieder aufgegriffen.

### 5.3.2 Simulation der Unschärfe durch Faltung mit einem Motion-Kernel

Die Bewegungsunschärfe ist für die Rotationsrichtung interessant in die sich die Markierung während einer Bildaufnahme mit großer Geschwindigkeit bewegen wird, also in x-Richtung. In Bild 5.6 ist Bewegungsunschärfe in x-Richtung mit dem verrauschten Idealbild dargestellt.

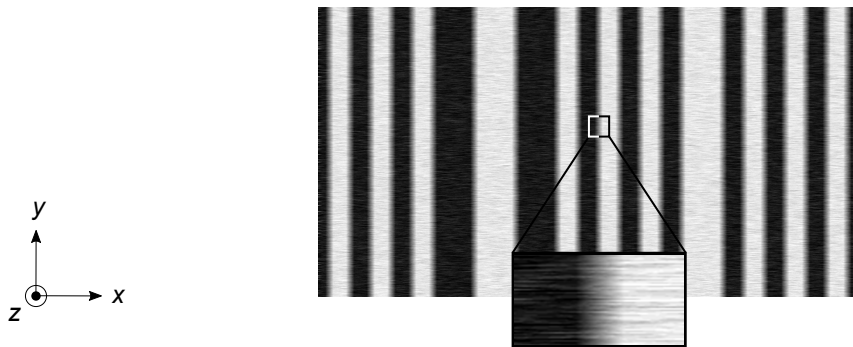


Bild 5.6: Verrauschtes Idealbild mit Bewegungsunschärfe in x-Richtung.

Hingegen kann eine Verschiebung in y-Richtung zwar vorkommen, hat allerdings unter idealen Bedingungen keinen Einfluss, da in dieser Richtung keine Winkelinformation verfälscht wird. Eine Bewegung in z-Richtung entspricht der bereits beschriebenen Gauß-Unschärfe.

Für die Simulation wird analog zur Gauß-Filterung das nicht verrauschte Idealbild mit dem Motion-Kernel gefaltet. Die Bewegungsunschärfe ist genau genommen eine Unschärfe in nur einer Richtung und besitzt entsprechend Werte ungleich Null in der Kernel-Matrix im Winkel der Richtung der gewünschten Unschärfe. Die restlichen Werte der Matrix sind Null. Die Stärke der Filterung ist durch die Matrixgröße des Kernels bestimmt und wird im Folgenden variiert. In Bild 5.7 sind die Winkelabweichung sowie die normierte Schärfe in Abhängigkeit der Bewegungsunschärfe dargestellt.

Die Winkelabweichung ist erneut als Winkeldifferenz zwischen dem idealen Bild mit keiner Unschärfe und dem simuliert-unscharfen Bild zu verstehen. Ähnlich wie bei der Gauß-Unschärfe ist auch hier erwartungsgemäß im Mittel kein signifikanter Unterschied der Winkelabweichung von Null zu erkennen. Allerdings wird die Streuung der Messwerte und damit die Standardabweichung größer mit steigender Bewegungsunschärfe. Maximal ist die Standardabweichung  $0,018^\circ$  bei einer Bewegungsunschärfe von 116 px. Bei größeren Bewegungsunschärfen



### 5.3 Einfluss der Unschärfe auf die Winkelgenauigkeit

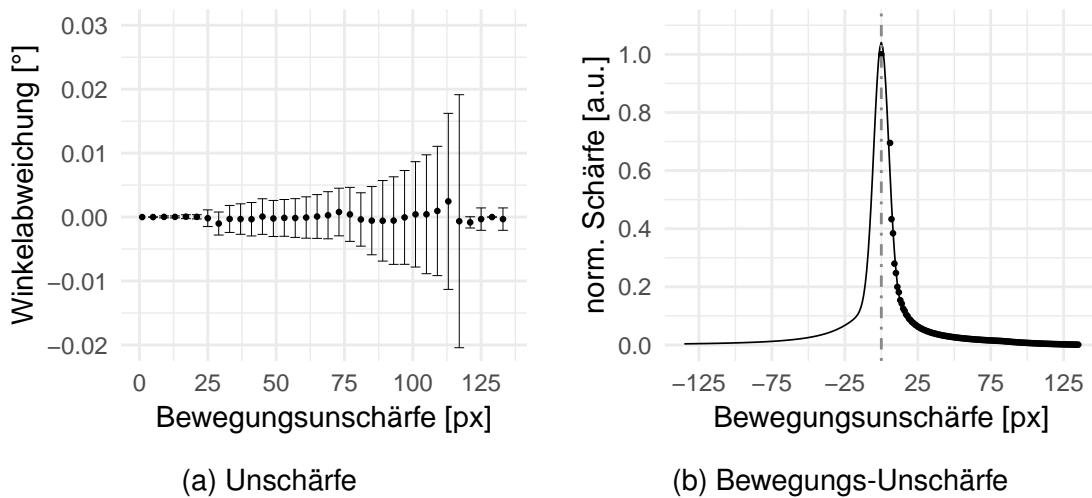


Bild 5.7: Darstellung der Winkelabweichung und der normierten Schärfe Motiongefilterter Idealbilder. ( $N = 30$  Bilder)

sinkt die Standardabweichung signifikant. Dieses Verhalten ist auf Codierungen zurückzuführen, bei denen an der ersten und zweiten vollständigen Markierung – im Bild der Simulation – eine einzelne Markierung vorliegt. Bei großen Unschärfen entsteht zwischen einzelnen Markierungen eine vergleichsweise kurze und dadurch trennscharfe Übergangszone, die wiederum mit kleineren Winkelabweichungen decodiert werden kann.

#### 5.3.3 Wechselwirkung der Gauß- und Bewegungsunschärfe

Neben den einzelnen Auswirkungen der beiden Unschärfen ist noch deren Wechselwirkung von Interesse. Die Wechselwirkung der Gauß- und Bewegungsunschärfe entspricht mathematisch einer Faltung der beiden Filter miteinander. Die Reihenfolge, in der die Filterungen mit dem Bild durchgeführt werden, ist auf Grund der Kommutativität nicht von Bedeutung. Ebenfalls ist – wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben – nicht die um Null schwankende Winkelabweichung, sondern die Standardabweichung dieser die interessante Messgröße. Für genauere Untersuchungen werden beide Unschärfen simuliert und deren Parameter systematisch variiert. Die Parameter für die Simulation sind die Bewegungsunschärfe als auch die Gauß-Unschärfe. Für einen quantitativen Eindruck sind die Ergebnisse in Bild 5.8 anhand der Standardabweichung der ermittelten Winkelabweichung dargestellt.

Die Werte auf der Abszissen- und Ordinatenachse entsprechen dabei den Ergebnissen, die jeweils in den Bildern 5.5a und 5.7a dargestellt sind. Die Ergebnisse

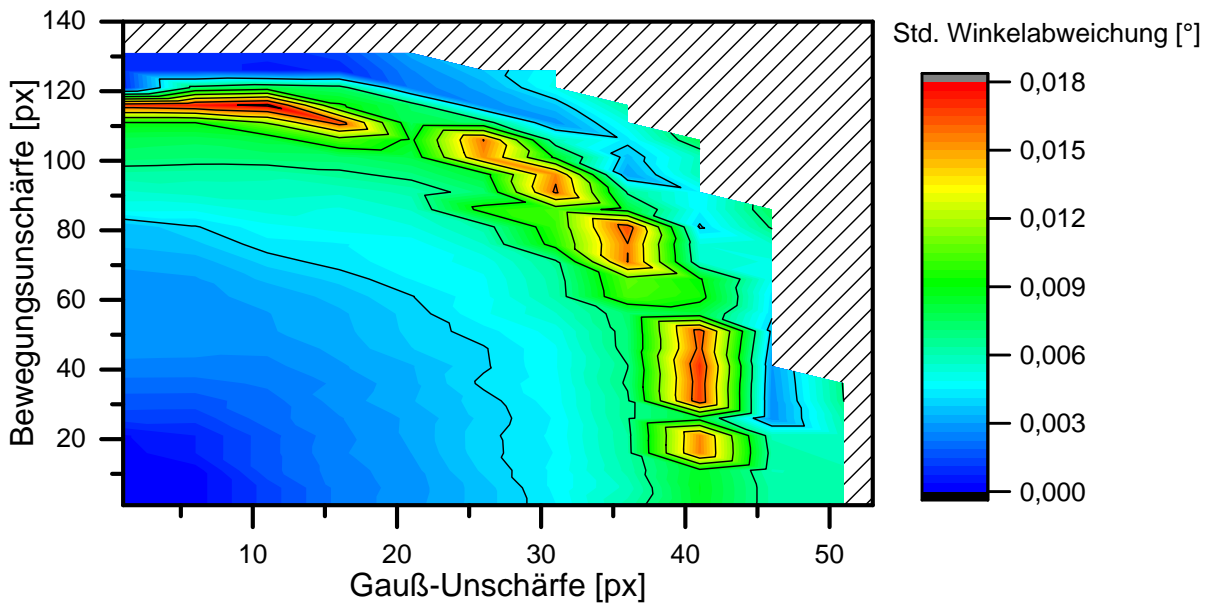


Bild 5.8: Bestimmung der absoluten Winkelabweichung des programmierten Schwellwert-Verfahrens zwischen dem Originalbild und durch Gauß- und Bewegungsunschärfe modifizierten Bildern. (Randbedingungen:  $N = 30$  randomisierte Bilder bei einer Vergrößerung von  $\beta = 28$ , Codierung mit  $n = 3490$  idealen Markierungen)

entsprechen den Erwartungen, sodass bspw. die Standardabweichung nahe des Koordinatenursprungs nicht signifikant unterschiedlich von Null ist. Die Konturlinie bei  $0,006^\circ$  schließt eine relativ große Fläche ein, sodass der Simulation nach von einem robusten System auszugehen ist. Geht man von der genannten Konturlinie weiter nach außen zu größeren Unschärfen, steigt die Standardabweichung signifikant an, was auch bereits in den voran gegangenen Kapiteln beschrieben und erklärt ist. Die Erklärungen sind auf die Wechselwirkung übertragbar ist. Im schraffierten Bereich kann kein Winkel mehr decodiert werden, sodass die Bildverarbeitung nur noch eine Fehlermeldung ausgibt.

In den folgenden Kapiteln werden die Auswirkungen der Unschärfe weiter untersucht und durch experimentelle Versuche genauer beschrieben.

### 5.4 Zwischenfazit

Besonders ist die Frage von Interesse, ob die Theorie auf die Praxis angewendet werden kann. Bislang wird die Simulation nur anhand von Pixelwerten abgeschätzt.

Eine Übertragung ins reale System ist trivial nicht möglich, sodass zu klären ist welche Kausalität zwischen Unschärfe in Pixeln und der Unschärfe im realen System durch eine Verschiebung in Mikrometern vorliegt.

Das Teilziel 2 der Modellbildung ist erreicht. Die Unschärfe kann auf zwei grundlegende Ursachen zurück geführt werden:

1. Unschärfe durch eine Abbildung des Objektes außerhalb des optischen Schärfereichs
2. Bewegungsunschärfe durch eine vergleichsweise schnelle Oberflächenbewegung während der Belichtungsdauer

Deren beider Wirkung und Wechselwirkung ist anhand verschiedener Simulationen untersucht. Die ermittelte Drehwinkelabweichung, die durch die Unschärfe induziert wird, bleibt im Mittel ungefähr Null. Allerdings nimmt die Standardabweichung mit steigender Unschärfe zu, sodass dadurch die Messunsicherheit steigt und die Genauigkeit der gemessenen Drehwinkel sinkt. Bei großen Unschärfen kann erwartungsgemäß kein Drehwinkel durch die Bildverarbeitung erfasst werden.



## 6 Umsetzung des optischen Messsystems

Das in Kapitel 2.2 beschriebene Winkeldifferenzverfahren setzt die Messung des absoluten Drehwinkels an zwei unterschiedlichen im axialen Abstand befindlichen Positionen der Welle voraus. Somit werden zwei optische Systeme für die Abbildung der Wellenoberfläche benötigt.

### 6.1 Vorüberlegung zur industriellen Einsetzbarkeit

Die Anforderungen hinsichtlich der umzusetzenden Messtechnik unterschieden sich stark in Abhängigkeit des jeweiligen Anwendungsfalls. Neben den beschriebenen Anforderungen in Kapitel 1.1 und 4.1 sind für eine spätere Industrialisierung auch die Stückkosten eines Sensors von großer Relevanz. Die Stückkosten differieren allerdings mit den dahinter liegenden Stückzahlen.

Von potentiellen Anwendern besteht der Wunsch einer preisgünstigen Sensorik, die aber je nach Anwendungsfall variiert (1 EUR - mehrere 10k EUR). Da in dieser Hinsicht keine Einigkeit erzielt wurde und die Festlegung einer genauen Preisgrenze ohnehin zu Beginn schwierig ist, wurde dies zunächst vernachlässigt, um dies zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgreifen zu können. Dies bedeutet allerdings nicht, dass dieser Punkt gänzlich unbeachtet blieb. So wurde bspw. festgelegt, dass die vorliegenden Oberflächen der Wellen, nicht modifiziert und daher nicht z. B. hinsichtlich der Rauheit optimiert werden. Somit wird die Machbarkeit und damit die Bildverarbeitung an typisch gefertigten Wellen überprüft. Dies entspricht auch den anderen Anforderungen, insbesondere der Anforderung 4 (keine Modifikation der Welle). Zusätzlich kann dadurch die entwickelte Messtechnik einfacher in bestehende Anlagen integriert bzw. nachgerüstet werden.

In einer späteren Applikation kann zusätzlich eine Plausibilitätskontrolle anhand der Schrittweite vorgenommen werden, die diese in den Kontext der Anwendung und der

## 6 Umsetzung des optischen Messsystems

voran gegangenen Schrittweiten setzt. Zusätzlich kann die Redundanz durch den zweiten absoluten Drehwinkel genutzt werden und anhand des vorliegenden Drehmoments eine weitere Überprüfung durchgeführt werden.

Eine Adaption bestehender ähnlicher technischer Lösungen konnte nicht realisiert werden. Prinzipiell in Frage kommen bspw. 1) der optische Lesekopf von Blu-ray- und DVD-Spielern oder auch 2) Barcodescanner. Beide Systeme decodieren eine Einspurcodierung, werden allerdings nicht weiter verfolgt, da mittels der bestehenden Leseköpfe ohne weiteres nicht die notwendige Vergrößerung erreicht wird, keine absolute Winkelerfassung (Anforderung 5) möglich ist und die notwendige Genauigkeit und Messgeschwindigkeit von Barcodescannern nicht erreicht wird. Dennoch kann eine spätere Integration von Teillösungen (z. B. elektrischer Chips zur Signalverarbeitung oder Schwellwertbildung) denkbar sein.

### 6.2 Voruntersuchungen der lasermarkierten Testwelle

Vor der Auslegung des optischen Systems wird die Oberflächenbeschaffenheit mit einem konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop (LSM) und einem Auflichtmikroskop untersucht.

#### 6.2.1 Oberflächenuntersuchung mit dem Konfokalmikroskop

Mit Hilfe des LSM wird die metallische Oberfläche punktförmig abgetastet und dabei ein dreidimensionales Bild in Anlehnung an ISO 4287 [ISO09] erfasst. Die Ergebnisse sind in Bild 6.1 dargestellt. Im oberen Bild ist die abgetastete Fläche von 0,3 x 2,9 mm dargestellt, die im unteren mit der Höheninformation farblich codiert ist.

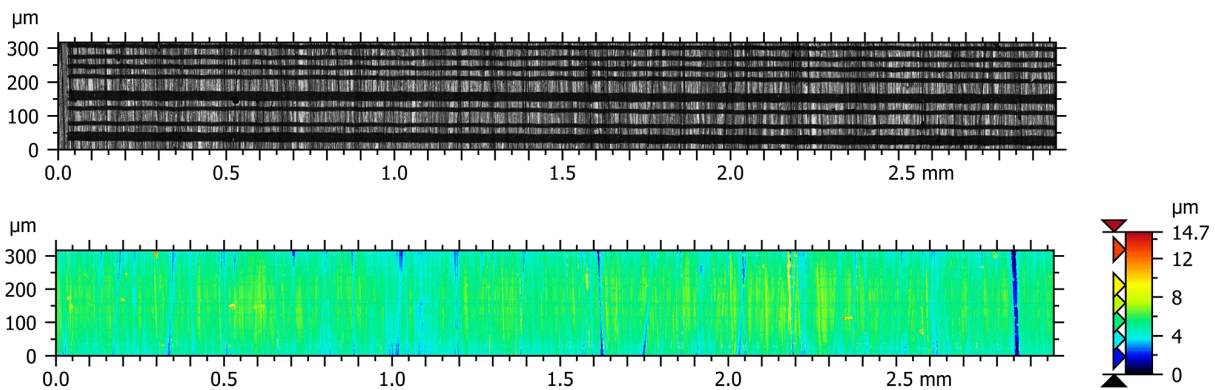


Bild 6.1: LSM-Aufnahme der lasermarkierten Oberfläche.

Zu erkennen ist, dass die ebene Oberflächentopologie durch die Lasermarkierung nicht signifikant beeinflusst wird. Die Riefen durch die drehende Herstellung der Welle sind deutlich tiefer als die Abtragtiefe der Laserbearbeitung. Die nicht speziell nachbearbeitete Oberfläche hat eine Rautiefe von etwa  $R_z \approx 4 \mu\text{m}$ , wohingegen die Lasermarkierung eine niedrigere maximale Rautiefe von  $R_{max} < 1 \mu\text{m}$  aufweist [ASU<sup>+</sup>18].

### 6.2.2 Voruntersuchungen mit dem Auflichtmikroskop

Der Einfluss verschiedener Beleuchtungskonfigurationen auf die Bildverarbeitung wird anhand eines kommerziellen Auflichtmikroskops Axioscope Vario der Fa. Zeiss stichprobenartig untersucht. Zur Verfügung stehen zwei Zeiss-Objektive relevanter Vergrößerung<sup>1</sup>: „EC Epiplan 20x/0.4 HD“ und „EC Epiplan 50x/0.75 Pol“. Beide Objektive sind hinsichtlich ihrer Kompatibilität mit verschiedenen Beleuchtungskonfigurationen in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Tabelle 6.1: Gegenüberstellung der industriellen Objektive hinsichtlich der Kompatibilität verschiedener Beleuchtungskonfigurationen.

|                            | EC Epiplan 20x/0.4 HD | EC Epiplan 50x/0.75 Pol |
|----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Hellfeld (BF)              | ja                    | ja                      |
| Dunkelfeld (DF)            | ja                    | nein                    |
| Variation d. Polarisierung | ja                    | ja                      |
| Variation d. Aperturblende | ja                    | ja                      |

Die Ergebnisse der Voruntersuchung von lasermarkierten Metalloberflächen lassen sich wie folgt zusammenfassen und werden bei der weiteren Auslegung des optischen Messsystems berücksichtigt:

- In der Hellfeldbeleuchtung kann mit beiden Objektiven eine gute Aufnahme ähnlicher Schärfe erzielt werden, siehe Bild 6.2 (a).
- In der Dunkelfeldbeleuchtung kann nur bei besonders großer Beleuchtungsintensität eine ausreichend ausgeleuchtete Aufnahme erzielt werden. Die Schärfe ist im Vergleich zur Hellfeldbeleuchtung minimal geringer.

<sup>1</sup>Die tatsächlich bestimmten Abbildungsmaßstäbe mit der genutzten Kamera sind  $\beta'_1 \approx 12$  und  $\beta'_2 \approx 33$ .

## 6 Umsetzung des optischen Messsystems

- Die Kanten können durch die Dunkelfeldbeleuchtung nicht besser hervorgehoben werden. Der verringerte Kontrast macht eine Entscheidung, ob eine helle oder dunkle Markierung vorliegt, sogar schwieriger, siehe Bild 6.2 (b). Bei noch geringerer Beleuchtungsintensität kann nur noch anhand der Oberflächenbeschaffenheit die Unterscheidung getroffen werden.
- Ähnlich, wie bei der Dunkelfeldbeleuchtung, kann unter Verwendung der Polarisation eine helle von der dunklen Markierung einfacher anhand der Beschaffenheit unterschieden werden als an der eigentlichen Farbe bzw. Helligkeit. Je nach Polarisationswinkel kehren sich die Farben sogar um, siehe Bild 6.2 (c).
- Die Polarisation kann ausschließlich bei besonders großer Beleuchtungsintensität genutzt werden und hat keinen signifikanten Einfluss auf die Schärfe.
- Die Aperturblende beeinflusst die Schärfe der Abbildung signifikant.

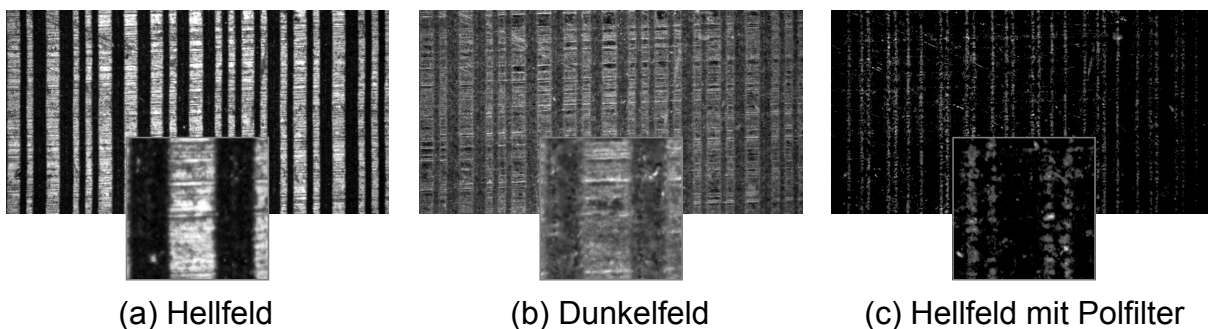


Bild 6.2: Darstellung verschiedener Beleuchtungseinstellungen am Mikroskop: (a) Hellfeld, (b) Dunkelfeld und (c) Hellfeld mit Polarisationsfilter ( $90^\circ$ ) jeweils mit einem vergrößerten Ausschnitt aus der Bildmitte. Die unvergrößerten Abbildungen der Oberfläche haben eine Breite von etwa  $900\ \mu\text{m}$ . Der vergrößerte Ausschnitt hat eine Kantenlänge von etwa  $100\ \mu\text{m}$ . (*Hinweis: Bild (a) wurde bei geringer Intensität der Mikroskopbeleuchtung aufgenommen. Die Bilder (b) und (c) wurden hingegen bei maximaler Beleuchtungsintensität aufgenommen.*)

Neben den optischen Variationsmöglichkeiten, die oben aufgelistet sind, kann durch das industrielle Auflichtmikroskop die Bildverarbeitung in ersten Schritten mit realen Oberflächenbildern getestet und weiter entwickelt werden. Die grundsätzliche Funktionsweise der Winkeldecodierung funktioniert bei beiden Objektiven, trotz unterschiedlicher Abbildungsmaßstäbe, einwandfrei. Ebenso kann bei Hellfeld- als auch Dunkelfeldbeleuchtung der Winkel decodiert werden. Für eine möglichst scharfe



Abbildung kann – wie seit dem 16. Jahrhundert bekannt – die Blende möglichst weit geschlossen werden [Ila07].

### 6.3 Auslegung des optischen Systems

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete optische System, das in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben ist, besteht jeweils aus den üblichen drei Komponenten: 1) einer Beleuchtung, 2) einer abbildenden Optik mit verschiedenen Unterkomponenten sowie 3) einer digitalen Kamera. Die Auswahl dieser Komponenten ist an die Vorgehensweise in [VDI10] angelehnt und damit ein iterativer Prozess, bei dem Anforderungen der Codierung und der Programmierung der Bildverarbeitung mit einbezogen sind. Das optische System wird in den folgenden Kapiteln häufiger dargestellt und ist z. B. in Bild 7.6 zu sehen.

#### 6.3.1 Beleuchtung

Spätestens seit der Erforschung der Köhlerschen Beleuchtung ist die entscheidende Rolle der Beleuchtung in der Mikroskopie bekannt. Eine gute Bildaufnahme kann besonders durch eine durchdachte und an das System angepasste Beleuchtung begünstigt werden. Entsprechend werden in diesem optischen System die Beleuchtung den Anforderungen und Gegebenheiten angepasst. Zur Beleuchtung der metallischen Oberfläche kommen zwei der vier Auflichtbeleuchtungen in Frage: Hellfeld- und koaxiale Beleuchtung. Dunkelfeld- und diffuse Beleuchtung sind aufgrund der vergleichsweise niedrigen Lichtausbeute ungeeignet. Eine möglichst hohe Lichtausbeute ist notwendig, um bei hohen Drehzahlen der Welle (vgl. Anforderung in Tabelle 1.2 und 1.3) schnell und ausreichend hell belichten zu können. Daher wird die Dunkelfeldbeleuchtung, die nur an der Oberfläche gestreutes Licht nutzt, verworfen. Gleiches gilt für diffuse Beleuchtung, wie bspw. den Dom- und Flat-Dome-Beleuchtungen, sodass auch diese verworfen werden. Diese nutzen zwar einen Teil der direkten Strahlung, verlieren aber den Großteil der Strahlstärke durch indirekte Beleuchtung der Oberfläche.

In Hinblick auf eine kompakte Bauweise und eine einfache Justage bei großer Vergrößerung wird die koaxiale Beleuchtung gewählt. Diese wiederum ist diffus ausgeführt, um eine homogene Ausleuchtung der Oberfläche zu erreichen und dadurch die Komplexität der Bildverarbeitung niedrig zu halten. Da kohärentes Licht

## 6 Umsetzung des optischen Messsystems

beim Einsatz von Streuscheiben zu Interferenzeffekten neigt, wird inkohärentes Licht verwendet.

Zur Beleuchtung werden in den Versuchen zwei kostengünstige, nicht pulsierende Light Emitting Diode (LED) eingesetzt. Eine Ausnahme bilden dabei allerdings die Versuche zur Anwendung in der Praxis. Bei diesen ist die minimale Belichtungszeit der Kamera zu lang, um das Bild der Oberfläche scharf aufzunehmen. Da die optische Leistung der LEDs begrenzt ist, können diese nicht ohne weiteres im gepulsten Betrieb mit gleicher Energie betrieben werden. Daher wird eine Blitzlampe deutlich höherer optischer Leistung verwendet, die in Kapitel 8.3.1 genauer beschrieben ist.<sup>2</sup> Die Wellenlänge der LEDs ist an der spektralen Empfindlichkeit der Kamera orientiert. Da das Empfindlichkeitsmaximum im infraroten Spektralbereich liegt, die Sicherheit der Bediener aber nicht zusätzlich gefährdet werden soll, werden LEDs mit einer zentralen Wellenlänge von etwa  $\lambda = 630 \text{ nm}$  (roter Spektralbereich des sichtbaren Spektrums) für die weitere Umsetzung genutzt.

### 6.3.2 Abbildende Optik

Für die Bildaufnahme einer Kamera von einem Objekt, ist eine Optik in Form eines Objektivs notwendig, die dieses in der Bildebene abbildet [Zol18]. Aus technischer Sicht sind dabei insbesondere die Sensorgröße, die Objektauflösung sowie die Qualität der Abbildung von Interesse. Iterativ werden unter Berücksichtigung der anderen Komponenten die Anforderungen an ein Objektiv erarbeitet und abschließend ausgewählt.

Entsprechend der Anforderungen ergibt sich aus dem Radius der Welle (10 mm) und der Breite der Codierung ( $15 \mu\text{m}$ ) die Anzahl der notwendigen Markierungen (4189 Markierungen). Aus der Anzahl der Markierungen wiederum wird nach Gleichung 4.3 die minimale Codewortlänge  $m = 20$  bestimmt. Da diese 20 Markierungen mit je  $15 \mu\text{m}$  Breite abzubilden sind, ist die Objektgröße mindestens  $y \geq 300 \mu\text{m}$ . Aus Gründen der Flexibilität in der Auslegung und der Redundanz sind weitere Markierungen gefordert, sodass hier sechs Markierungen hinzugefügt werden. Die resultierende Objektgröße von  $y \approx 400 \mu\text{m}$  führt bei einer typischen Sensorbreite von  $y' = 13 \text{ mm}$  nach Gleichung 6.1 [DIN03] zu einem lateralen Abbildungsmaßstab von etwa  $\beta' \approx 28$ :

---

<sup>2</sup>Aus wirtschaftlichen Gründen sowie Gründen der Verfügbarkeit wird die Blitzlampe nur für die Versuche in der Praxis verwendet und ansonsten die deutlich günstigeren LEDs genutzt.

$$\beta' = \frac{y'}{y} \quad (6.1)$$

Dieser Abbildungsmaßstab liegt somit zwischen denen der beiden Objektivs (s.o.) und kann von einer Vielzahl industriell-verfügbarer Objektivs realisiert werden. Für die Umsetzung des Messsystems in dieser Arbeit wird ein Zoom-Objektiv der Fa. Navitar gewählt. Dieses bietet im Vergleich zu anderen Objektivs einen seitlichen Zugang zur koaxialen Beleuchtung, den sog. Illuminationsport. Durch diesen können verschiedene Beleuchtungen in das System eingekoppelt werden. Der Illuminationsport hat darüber hinaus den Vorteil, dass das eingekoppelte Licht durch ein Milchglas homogenisiert und zudem fokussiert auf die Oberfläche der Welle eingeleitet wird. Im Inneren besteht das verwendete Objektiv aus einem optischen System mit mehreren Optiken und Blenden. Diese optischen Komponenten sind nicht zugänglich, sodass weder die sog. Aperturblende noch die sog. Feldblende variiert werden kann. Lediglich ein Teil des inneren optischen Systems ist verschiebbar, die den Abbildungsmaßstab verändern, sodass dadurch die Funktionalität eines sog. Zoom-Objektivs gegeben ist. Damit ist die Schärfentiefe auf einen festen Wert in Abhängigkeit des eingestellten Abbildungsmaßstabs vorgegeben. Laut Datenblatt ist die Schärfentiefe  $\Delta d = 10 \mu\text{m}$  bei maximalem Abbildungsmaßstab ( $\beta' \approx 28$ ). Im Vergleich dazu wäre ein selbstaufgebautes Objektiv, vor allem in Hinblick auf die Zugänglichkeit der beiden Blenden, von Vorteil. Allerdings wird dies aufgrund der zu erwartenden Fragilität und Abbildungsqualität für die Machbarkeitsuntersuchung nicht gewählt. Für eine kommerzielle Umsetzung des Messsystems in hohen Stückzahlen ist eine speziell angepasste Optik allerdings unabdingbar.

#### 6.3.3 Digitale Kamera

Das eigentliche Bild wird durch einen lichtempfindlichen Sensor in der Bildebene hinter dem Objektiv aufgenommen, typischerweise durch einen Charge-Coupled Device (CCD)- oder Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS)-Sensor. Aufgrund der Möglichkeit der parallelen Auslesbarkeit und der Definition einer Region of Interest (ROI) wird eine CMOS-basierte Kamera<sup>3</sup> dem CCD-Sensor vorgezogen. Durch die parallele Auslesbarkeit und Definition eines ROIs kann die Ausleserate signifikant gesteigert und dadurch eine schnelle Bildverarbeitung realisiert werden. Die CMOS-Kamera ist dabei mit einem Global shutter ausgeführt, sodass alle Pixel gleichzeitig

<sup>3</sup>CMOS-Kamera UI-3360CP-NIR-GL Rev. 2 der IDS Imaging Development Systems GmbH

## 6 Umsetzung des optischen Messsystems

belichtet werden und Bildfehlern, die durch ein bewegtes Objekt entstehen können, vorgebeugt wird. Als CMOS-Kamera wird die monochrome Near Infrared (NIR)-Ausführung gewählt, da diese im Vergleich zur VIS-Farbkamera keine Farbfilter, die sog. Bayer-Filter, vor den Pixeln aufweist, die einen Teil des eintreffenden Lichts absorbieren [Bay76, BIE<sup>+</sup>19].

Darüber hinaus verfügt die Kamera über Ein- und Ausgänge zum Triggern sowie zwei programmierbare, universelle General Purpose Input/Output (GPIO) Ports. Diese Ports sind wichtig, um eine Synchronisierung zwischen der Beleuchtung und der Bildaufnahme sowie der Synchronisation mit der anderen Kamera umsetzen zu können.

### 6.4 Parametrierung der Beleuchtung und Belichtungszeit

Für die folgenden Versuche wurden die Kameraeinstellungen manuell eingestellt und automatische Anpassungen deaktiviert, sodass eine Vergleichbarkeit zwischen den Versuchen gegeben ist. Um möglichst rauscharme Bilder zu erhalten, sind die Verstärkung (gain) auf Null gesetzt und die extra Verstärkung (gain-boosting) deaktiviert. Ziel der Parametrierung der Beleuchtung und Belichtungszeit ist, die maximale Schärfe bei gleichzeitig minimaler Belichtungszeit zu erreichen. Die maximale Schärfe ist in Hinblick auf die wissenschaftliche Fragestellung wichtig, sodass sowohl der Drehwinkel als auch mögliche Schärfe-Änderungen bestmöglich erfasst werden. Die kurze Belichtungszeit ist für eine spätere Umsetzung wichtig, sodass eine schnelle Messung in Bezug auf die Messdauer durchgeführt als auch die Bewegungsunschärfe minimiert werden kann.

Für die Parametrierung wird die Belichtungszeit der Kamera zwischen 1 ms und 50 ms bei verschiedenen Versorgungsspannungen der LED variiert und jeweils die Schärfe nach Tenengrad des aufgenommenen Bildes bestimmt. Die minimale Belichtungszeit der Kamera von bis zu 25  $\mu$ s kann nicht ausgereizt werden, da die LED keine ausreichende optische Leistung zur Verfügung stellt. Die Versorgungsspannung der LED wird zwischen 1,7 V und 2,5 V in 0,1 V-Schritten variiert. In Bild 6.3 sind der Übersichtlichkeit halber nur drei Spannungen (1,9 V, 2,1 V und 2,5 V) dargestellt. Die zugehörigen elektrischen Leistungen 0,3 W, 0,7 W und 2,8 W sind den Graphen zugeordnet.

Erwartungsgemäß existiert jeweils ein Maximum der Schärfe. Im Bereich vor dem Maximum ist das Bild tendenziell zu wenig belichtet und entsprechend im Bereich

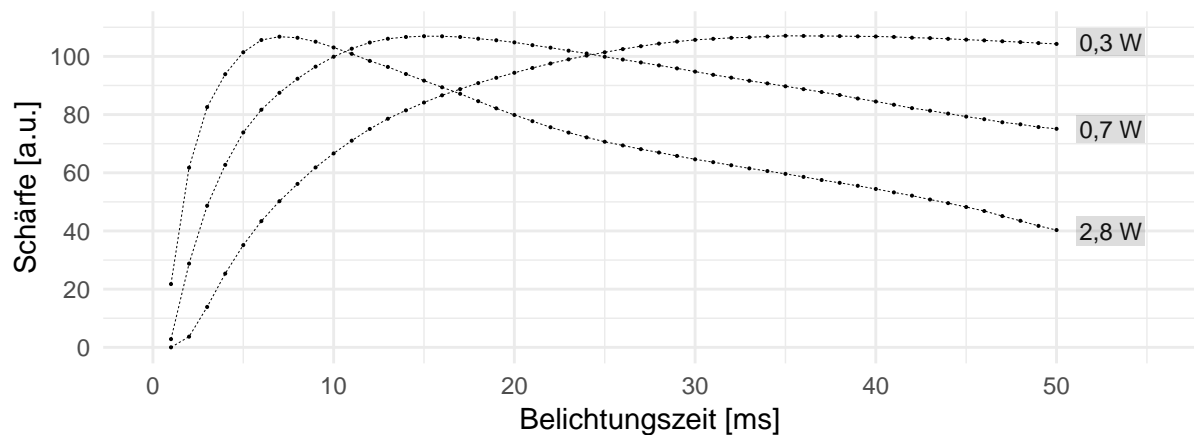


Bild 6.3: Verlauf der Schärfe in Abhängigkeit der Belichtungszeit für drei unterschiedliche elektrische Leistungen der LED. (Hinweis: Aus Gründen der Darstellung sind die Messpunkte mit geraden Linien verbunden und geben entsprechend nicht zwangsläufig den tatsächlichen Verlauf zwischen den Messpunkten wieder.)

dahinter zu viel, sodass die Bilder zu dunkel oder zu hell erscheinen. Die drei dargestellten Leistungen weisen ein ähnlichen maximalen Wert der Schärfe von etwa  $y_{max} = 106$  auf. Darüber hinaus verschiebt sich mit sinkender Leistung der LED die Position der maximalen Schärfe in Richtung längerer Belichtungszeiten. Entsprechend der Zielsetzung wird daher die maximale elektrische Leistung von  $P_{LED,el.} = 2,8\text{ W}$  in Kombination mit einer Belichtungszeit von  $t_{Belichtung} = 7\text{ ms}$  für weitere Versuche verwendet.

## 6.5 Kalibrierung des optischen Messsystems

Die jeweilige Kalibrierung optischer Systeme wird nach [Tsa87, HS97] in intrinsische und extrinsische Parameter unterteilt. Demnach sind sowohl die Kamera als auch die optischen Eigenschaften des Objektivs als intrinsisch und die dreidimensionale Anordnung des optischen Systems im Raum als extrinsisch zu betrachten [HS97]. Vor der Versuchsdurchführung werden beide Kameras mit den Objektiven jeweils mit Hilfe eines Distortion Targets der Fa. Thorlabs mit einem  $100\text{ }\mu\text{m}$  Gitter kalibriert. Die Kalibrierung wird mit Hilfe der Kamera Kalibrations-Toolbox<sup>4</sup> vom California Institute of Technology (Caltech) durchgeführt. Diese Toolbox basiert auf wissenschaftlichen

<sup>4</sup>Dokumentation der Toolbox unter [www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc). Die Toolbox ist sowohl in Open Source Computer Vision (OpenCV) als auch in MATLAB integriert.

## 6 Umsetzung des optischen Messsystems

Untersuchungen u. a. von [Tsa87,HS97,Zha99,Zha00] und wird z. B. in [Mir12] genutzt. Die durch die Kalibrierung ermittelten intrinsischen und extrinsischen Parameter werden auf die jeweiligen aufgenommenen Bilder angewendet und dadurch entzerrt.

### 6.6 Zwischenfazit

In diesem Kapitel ist die Erreichung des Teilziels 3 anhand der Umsetzung des optischen Messsystems beschrieben. Ausgehend von Vorüberlegungen zur Industrialisierung wurden aus der Literatur bekannte Beleuchtungskonfigurationen für den beschriebenen Anwendungsfall untersucht und die koaxiale Beleuchtung ausgewählt. Zentraler Bestandteil des Systems ist die abbildende Optik, die diese koaxiale Beleuchtung bei der notwendigen Vergrößerung ermöglicht. Diese Optik wird zusammen mit einer LED genutzt, um die Oberfläche auf eine CMOS-Kamera abzubilden. Die LED wird dabei ungepulst genutzt und ist hinsichtlich der Wellenlänge an die Kamera angepasst. Die Beleuchtungsintensität sowie die damit verbundene minimale Belichtungszeit sind in Hinblick auf die Schärfe abgestimmt. Zusätzlich wurde das gesamte optische System kalibriert.

## 7 Verifikation des Messverfahrens

### 7.1 Fehlertypen innerhalb eines Bildes

Bei der Entwicklung und Nutzung technischer Systeme treten Fehler auf. Diese Fehler können je nach Ursache systematisch oder zufällig sein. In [Len04] ist eine ausführliche Auflistung offensichtlicher Mängel von 1D-Codes mit Beispielen gegeben. LENK unterscheidet u. a. zwischen A) Einfluss der Drucktechnik, B) Beschädigung und Verschmutzung und C) mangelhaften Codes. Fünf Mängel die den genannten Kategorien zugeordnet werden können und in dieser Arbeit aufgetreten sind, sind in Tabelle 7.1 aufgeführt.

Die Berücksichtigung und Behebung mangelhafter Codes und deren Fehlerquellen ist teilweise nur schwer möglich, sodass durch ein Anpassen der Bildverarbeitung eine Kompensation in Grenzen möglich ist. Allerdings kann die Bildverarbeitung nicht für alle denkbaren Fehlertypen angepasst werden, sodass dies für jeden Fall einzeln zu entscheiden ist. Exemplarisch sind die Fehlertypen in den Bildern 7.1 bis 7.5 dargestellt. Die gezeigten Bilder können von der entwickelten Bildverarbeitung verarbeitet und die Fehler kompensiert werden, sodass ein eindeutiger Winkel bestimmt wird.

## 7 Verifikation des Messverfahrens

Tabelle 7.1: Auflistung verschiedener Fehlertypen mit Bezug auf beispielhafte Ursachen und Wirkungen.

| Fehler-<br>typ | Beschreibung                                 | Beispielhafte Ursache(n)                               | Beispielhafte Wirkung  |
|----------------|--|--|--|
| A              | Schwankung der Markierungsbreite             | instabiler bzw. fehlerhafter Laserprozess              | Markierung wird nicht korrekt erfasst                          |
| B <sub>1</sub> | Veränderung der Oberfläche                   | Öl, Korrosion, Kratzer                                 | Vollständige Verdeckung von Markierungen                       |
| B <sub>2</sub> | Fremdkörper auf der Oberfläche               | Staubbelastete Umgebung                                | Schatten wird auf die Oberfläche projiziert                    |
| C <sub>1</sub> | Fehlerhafte Schwärzung der Lasermarkierung   | Fehlerhafte Schrittweite, Schwankung der Laserleistung | Markierung wird nicht korrekt erfasst                          |
| C <sub>2</sub> | Das Ende der Markierung überlappt mit Anfang | ungenauer bzw. fehlerhafter Laserprozess               | Winkel kann im Übergangsbereich nicht richtig dekodiert werden |

Mögliche Fehler sind unterschiedliche breite Markierungen oder auch Veränderungen der Oberfläche durch Korrosion oder Kratzer. Überschreitet ein Fehler jedoch festgelegte Grenzen bei der Bildverarbeitung, wird eine Fehlermeldung ausgegeben. Durch festgelegte Grenzen wird sicher gestellt, dass eine Markierung nicht als eine andere Markierung interpretiert wird und vor allem eine sinnvolle Fehlermeldung zurück gegeben wird. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine falsch eingelesene Markierung zufällig als eine andere Position im Code fehlinterpretiert wird, ist gering aber nicht Null. Zudem wird z.B. eine Codierung mit mehr als zwei gleichen Markierungen als Fehler identifiziert (vgl. Kapitel 4.1.3), sodass eine hohe Fehler-Erkennungsrate systembedingt gegeben ist.



## 7.1 Fehlertypen innerhalb eines Bildes

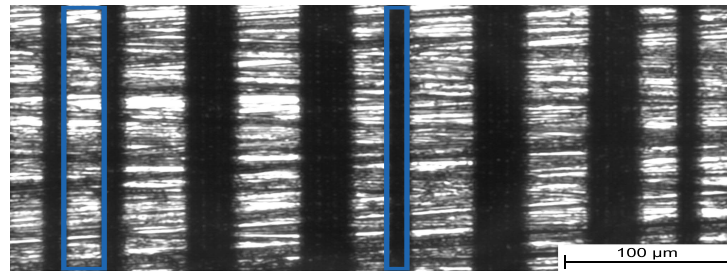


Bild 7.1: Wellenoberfläche mit unterschiedlich breiten Markierungen (Fehlertyp A).

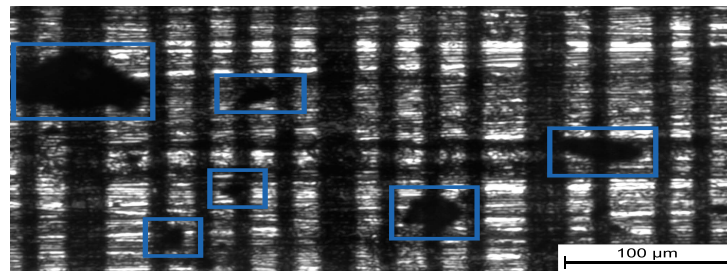


Bild 7.2: Wellenoberfläche mit Korrosion der Oberfläche (Fehlertyp B<sub>1</sub>).

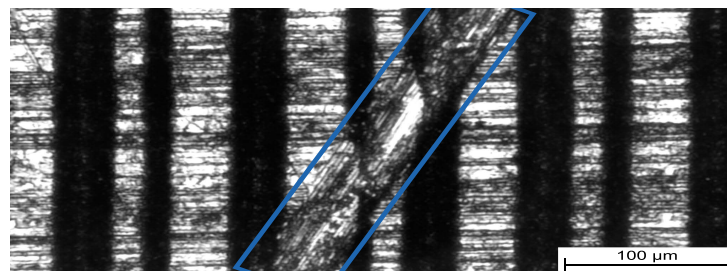


Bild 7.3: Wellenoberfläche mit einem Kratzer auf der Oberfläche (Fehlertyp B<sub>1</sub>).

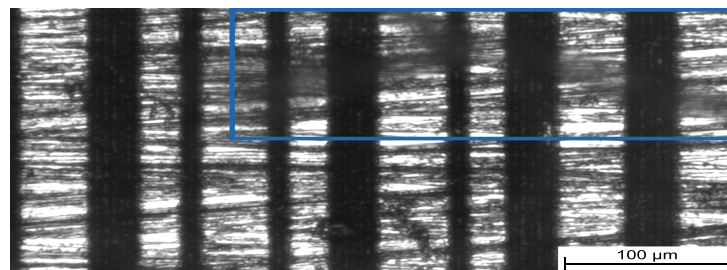


Bild 7.4: Wellenoberfläche mit einem Fussel (Fehlertyp B<sub>2</sub>).

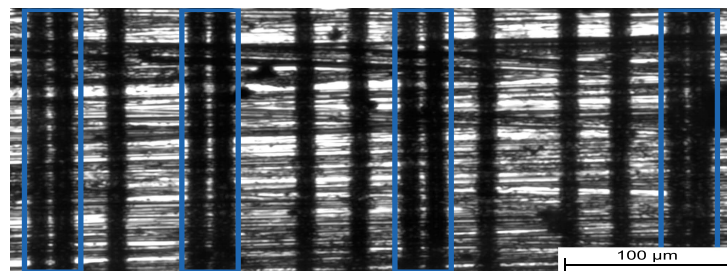


Bild 7.5: Wellenoberfläche mit fehlerhafter Lasermarkierung (Fehlertyp C<sub>1</sub>).

### 7.2 Kalibrierung und experimentelle Bestimmung der Drehwinkel-Genauigkeit

Fehler, wie z. B. Kratzer oder Verdeckung durch Korrosion, erschweren zwar die Bildauswertung, verändern aber nicht (signifikant) den zu erfassenden Drehwinkel. Im Vergleich dazu sind Fehler die die Winkelposition beeinflussen, wie z. B. unterschiedliche Breite Markierungen, als kritisch anzusehen. Da durch keinen Laserprozess eine perfekte Markierung aufgebracht werden kann, ist die vorliegende Codierung hinsichtlich der Genauigkeit zu prüfen. Je nach Beschaffenheit der Welle und des Lasermarkierprozesses, kann eine Markierung abweichend aufgebracht sein. Diese Abweichung kann konstant sein, sodass zum Beispiel der eine Ring im Vergleich zum anderen verdreht ist. Andererseits kann diese Abweichung aber auch über die Rotation variieren. Bspw. kann die Breite einer Lasermarkierung über den Umfang variieren, sodass die aufgebrachten Codierungen im Vergleich zur idealen Position zu eng bzw. zu weit aufgebracht sind. Dadurch wiederum kann der ermittelte Winkelwert von Position zu Position mehr oder weniger vom wahren Winkel abweichen.

#### Ziel der Kalibrierung

Sowohl konstante als auch systematisch variierende Abweichungen sind für das Messverfahren inakzeptabel und sollten daher in der Winkelberechnung berücksichtigt bzw. kompensiert werden. In Voruntersuchungen wurde eine systematisch variierende Abweichung festgestellt, sodass im Folgenden die gefertigten Wellen vermessen und mit Hilfe der ermittelten Messwerte kalibriert werden. Dabei wird jeder Ring mit der jeweiligen Kamera einzeln vermessen und wie im Folgenden beschrieben kalibriert. Darüber hinaus wird nach erfolgter Kalibrierung die experimentelle Drehwinkel-Genauigkeit des aufgebauten Messsystems ermittelt. Abschließend wird diese Genauigkeit mit der Mindestanforderung ( $0,4^\circ$ ) und der Wunschanforderung ( $0,04^\circ$ ) verglichen.

Neben der Genauigkeit ist ebenfalls die Drehwinkel-Auflösung von Interesse. Diese kann allerdings experimentell nicht genau genug ermittelt werden, da derartig kleine Rotationen für den Schrittmotor<sup>1</sup> bei den vorliegenden Trägheitsmomenten nicht umsetzbar sind. Die theoretische Drehwinkel-Auflösung für das Messsystem liegt bei  $0,002^\circ$ , wenn die Grenze der Unterscheidbarkeit einer Linie von zwei Pixeln wie in [Zol18] zu Grunde gelegt wird.

<sup>1</sup>Motorized Continuous Rotation Stage CR1/M-Z7 der Thorlabs GmbH

### Experimenteller Aufbau und Durchführung der Kalibrierung

Zur Kalibrierung wird der experimentelle Aufbau in Bild 7.6 genutzt. Die gelagerte Welle wird durch einen Schrittmotor gedreht, die durch eine drehsteife Metallbalgkupplung verbunden sind. Ebenfalls durch eine Metallbalgkupplung verbunden ist die Welle auf der im Bild rechten Seite mit einem industriellen Drehgeber<sup>2</sup>, der als Referenz des tatsächlichen Drehwinkels genutzt wird. Dieser Drehgeber gibt den absoluten Drehwinkel mit einer Genauigkeit von  $0,0014^\circ$  wieder und ist damit ausreichend genau in Hinblick auf die geforderte Mindest- und Wunschanforderung.

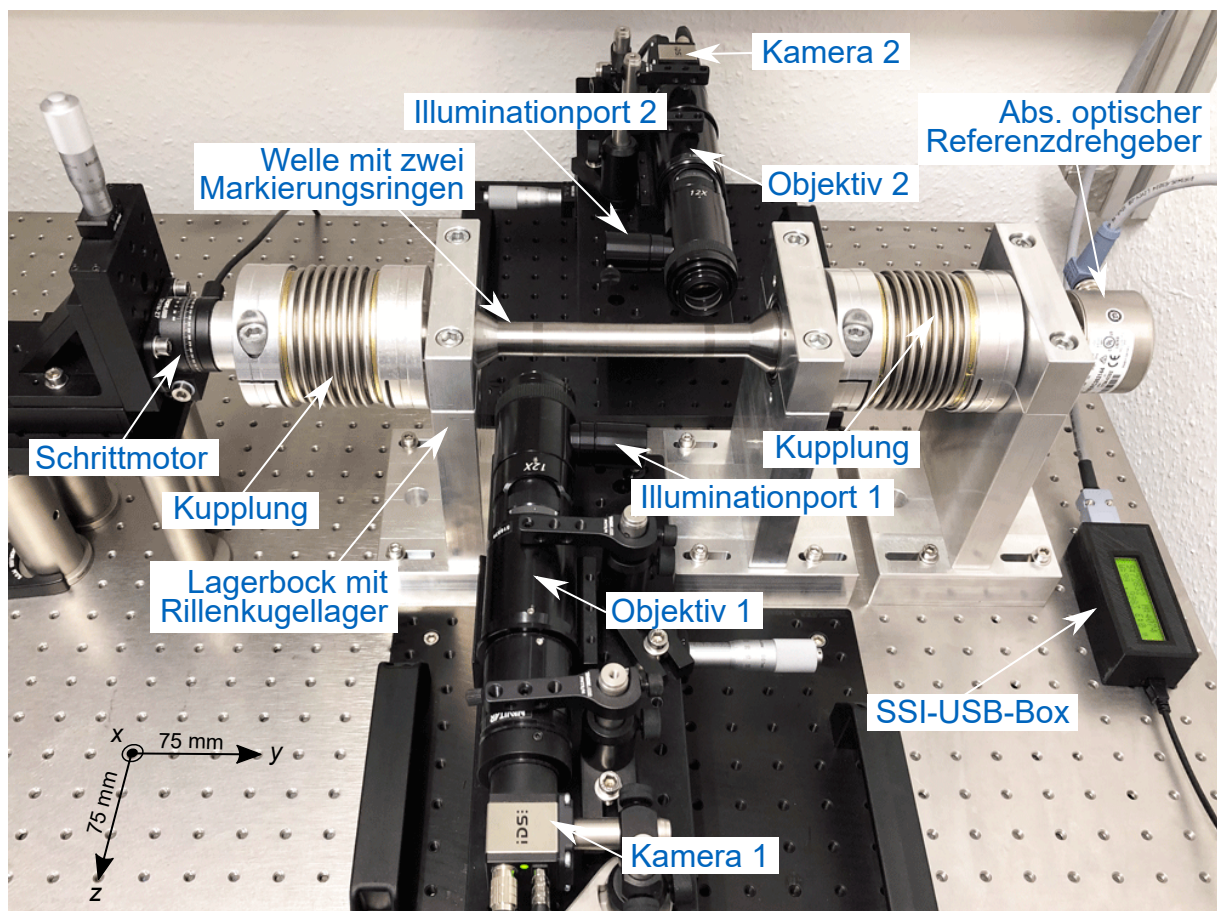


Bild 7.6: Versuchsaufbau zur Kalibrierung der Drehwinkelgenauigkeit.

Zwei Objektive sind zur Erfassung zweier absoluter Winkel auf die beiden Codierungen im Abstand der Torsionslänge  $l$  (vgl. Bild 4.1) positioniert. Für die Kalibrierung wird die Welle schrittweise durch den Schrittmotor gedreht. Während der Bildaufnahme dreht sich die Welle nicht. Die Schrittweite zwischen zwei Bildern wird randomisiert bestimmt, um Fehlereinflüsse zu minimieren. Für die

<sup>2</sup>Optischer absoluter Encoder AFM60I-BERC262144 der SICK AG

## 7 Verifikation des Messverfahrens

Kalibrierung werden  $N = 3 \cdot 100$  Messpositionen angefahren, die jeweils  $1^\circ$  bis  $20^\circ$  auseinander liegen. Insgesamt werden entsprechend etwa acht  $360^\circ$  Umdrehungen durchgeführt. Beide Kameras nehmen zeitlich synchronisiert Bilder auf, die durch die Bildverarbeitung ausgewertet werden. Aus Platzgründen sind die Objektive versetzt zueinander angeordnet. Dies führt dazu, dass die Winkeldifferenz durch Gleichung 7.1 beschrieben ist mit  $\Delta\varphi_{Offset} = 180^\circ$ .

$$\Delta\varphi' = \Delta\varphi - \Delta\varphi_{Offset} \quad (7.1)$$

### Ergebnis der Drehwinkel-Kalibrierung

Zunächst wird jeder Ring einzeln vermessen und kalibriert. Exemplarisch ist in Bild 7.7a die ermittelte Winkelabweichung der Kamera 1 vom industriellen Drehgeber  $\Delta\varphi = |\varphi_{Kamera} - \varphi_{Drehgeber}|$  dargestellt. Auffällig ist, dass die dargestellte Winkelabweichung  $\Delta\varphi$  systematisch zwischen  $-1,25^\circ$  und  $1,25^\circ$  schwankt. Diese - im Folgenden noch erklärte - Schwankung tritt reproduzierbar nach  $360^\circ$  wieder auf, sodass es sich um keinen zufälligen Messfehler handelt und der Fehlereinfluss durch eine Kalibrierung minimiert werden kann. Ein ähnlicher Verlauf des Messfehlers ist bei der zweiten Kamera zu beobachten als auch bei weiteren gefertigten und gelaserten Wellen.

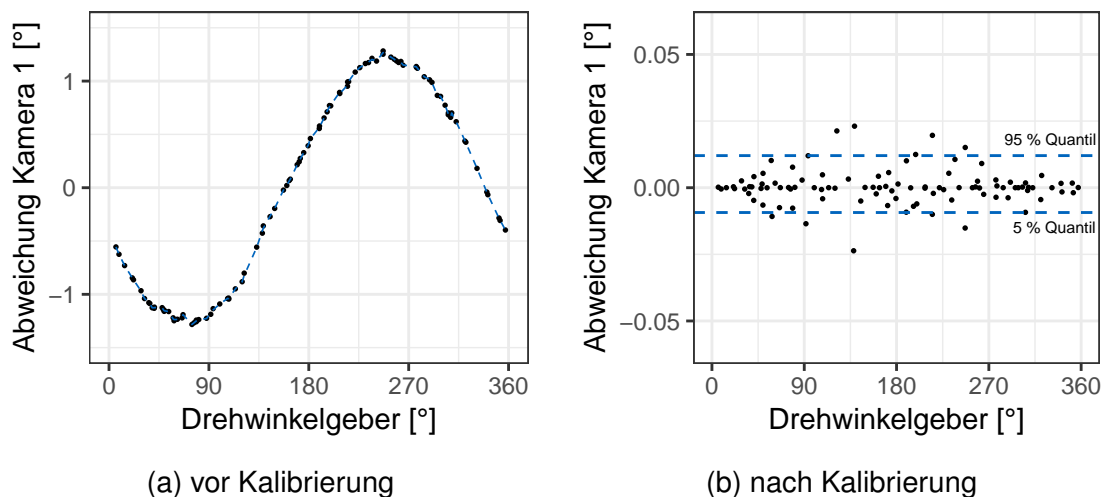


Bild 7.7: Genauigkeit der absoluten Drehwinkelmessung vor und nach der Kalibrierung. ( $N = 100$  Bilder)

Für die Kalibrierung dieser systematischen Abweichung wird eine Ausgleichsfunktion mit Hilfe der lokalen Regression bestimmt, genauer dem Locally Estimated Scatterplot Smoothing (LOESS) Modell. Die Ausgleichsfunktion beschreibt im Vergleich zu einer

## 7.2 Kalibrierung und experimentelle Bestimmung der Drehwinkel-Genauigkeit

angefitteten Polynom- oder Sinus-Funktion, die Daten besser, sodass im Resultat genauere Ergebnisse erzielt werden können. In Bild 7.7 ist die Abweichung nach der Kalibrierung zu sehen. Die Abweichung  $\Delta\varphi$  variiert zufällig zwischen etwa  $-0,025^\circ$  und  $0,025^\circ$ , sodass die Pflichtanforderung ( $0,4^\circ$ ) erfüllt ist, wohingegen die Wunschanforderung ( $0,04^\circ$ ) knapp nicht erfüllt ist.

Die genaue Ursache für die Schwankung konnte nicht abschließend geklärt werden. Durch Versuche konnte allerdings ein fehlerhafter Drehgeber und Ungenauigkeiten in der Bildverarbeitung als Ursache ausgeschlossen werden. Ebenfalls kann die Schwankung nicht durch die Unrundheit der Welle erklärt werden. Diese kann je nach Art der Strahlformung, -führung und -regelung lediglich als Erklärung für eine Schwankung bis zu einer Markierungsbreite heran gezogen werden. Eine mögliche Ursache kann eine unzureichende Lagerung der Welle bei der Laserbearbeitung sein. Dadurch wird die Welle während der Rotation nicht nur gedreht, sondern auch hinsichtlich des Abstands zwischen Laserfokus und Welle verändert und vor allem die Rotationsachse aus der Bearbeitungsachse bewegt. Dies würde dann zur beschriebenen sinusartigen Schwankung führen.

Nach der Kalibrierung beider Kameras nach dem beschriebenen Vorgehen wird die Genauigkeit der Winkeldifferenz überprüft. Die Winkeldifferenz ergibt sich aus:

$$\Delta\varphi' = \Delta\varphi - \Delta\varphi_{\text{Offset}} = (\varphi_{\text{Kamera}_1} + \varphi_{\text{Kalibration}_1}) - (\varphi_{\text{Kamera}_2} + \varphi_{\text{Kalibration}_2}) - \Delta\varphi_{\text{Offset}} \quad (7.2)$$

In Bild 7.8 ist die Winkeldifferenz der beiden kalibrierten Kameras dargestellt, die – aufgrund keines anliegenden Drehmoments – idealerweise Null ist. Genau genommen kann allerdings eine geringe Torsion durch die Lagerreibung auftreten, die an dieser Stelle aber in Hinblick auf die zu erwartende Genauigkeit dieses Messsystems vernachlässigt wird.

Die Messwerte schwanken mit einer Spannweite von bis zu  $0,086^\circ$ . Diese Spannweite entspricht bei einer Torsionslänge von  $l = 100$  mm einer Drehmomentmessgenauigkeit von  $\pm 8,6$  N m. Allerdings wird diese statistisch gesehen genauer sein (Average Case), da die Spannweite den schlechtesten Fall (Worst Case) beschreibt. In der folgenden Tabelle 7.2 sind weitere Streuungsmaße aufgelistet, die ebenfalls häufig zur Beurteilung der Genauigkeit genutzt werden. So liegen bspw. laut dem Interquartilsabstand 50 % der Daten innerhalb von  $0,017^\circ$  (entspricht 1,7 N m) bzw. laut dem Quantilsabstand  $Q_{0,95} - Q_{0,05}$  90 % der Daten innerhalb von  $0,046^\circ$

## 7 Verifikation des Messverfahrens

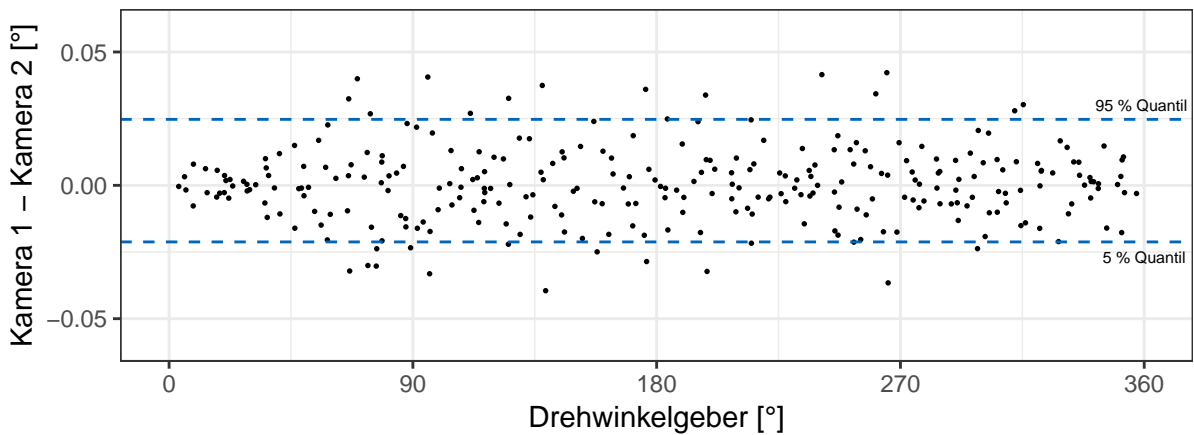


Bild 7.8: Exemplarisch aufgenommene Drehwinkeldifferenz der Kameras 1 und 2 an  $N = 300$  randomisierten Messpositionen bei keiner Torsion  $M = 0 \text{ N m}$ .

(entspricht  $4,6 \text{ N m}$ ). Letzterer ist in den beiden vorangegangenen Bildern zur visuellen Veranschaulichung anhand zweier gestrichelter Linien eingezeichnet. In der Tabelle sind zusätzlich die unterschiedlichen Streuungsmaße für die Winkelmessung aufgelistet. Die Messwerte stimmen gut mit den Erwartungen überein, als das bei der Fehlerfortpflanzung die Standardabweichungen addiert werden, wenn zwei Messwerte voneinander subtrahiert werden [HS18]. Entsprechend sind die Standardabweichungen der Winkelmessung  $0,007^\circ$  bzw.  $0,014^\circ$  für die Winkeldifferenz.

Tabelle 7.2: Genauigkeit der Winkelbestimmung einer Kamera nach der Kalibrierung. (jeweils  $N = 300$  Messpositionen, Drehzahl  $n = 0 \text{ min}^{-1}$  während Bildaufnahme)

| Streuungsmaß   | Genauigkeit             |                         |
|--|-------------------------|-------------------------|
|  | Winkel                  | Winkeldifferenz         |
| Standardabweichung   | $0,007^\circ$ (0,002 %) | $0,014^\circ$ (0,004 %) |
| Interquartilsabstand $Q_{0,75} - Q_{0,25}$                 | $0,004^\circ$ (0,001 %) | $0,017^\circ$ (0,005 %) |
| Quantilsabstand $Q_{0,95} - Q_{0,05}$                      | $0,024^\circ$ (0,007 %) | $0,046^\circ$ (0,013 %) |
| Spannweite ( $\Delta\varphi_{max} - \Delta\varphi_{min}$ ) | $0,049^\circ$ (0,013 %) | $0,086^\circ$ (0,024 %) |

Hinweis: Die Prozentzahlen sind auf den Endwert (v. E.)  $360^\circ$  bezogen.

## 7.3 Charakterisierung des optischen Drehmoment-Messsystems

Nach der Kalibrierung der beiden Ringe zur Codierung des absoluten Drehwinkels wird im Folgenden das System hinsichtlich der Drehmomentmessung charakterisiert. In Hinblick auf die Anwendung sind rotierende und dynamische Drehmomente von Interesse. Derzeit existieren allerdings allein Verfahren zur statischen Charakterisierung von Drehmomentaufnehmern, sodass die allgemein übliche DIN 51309 genutzt wird [Kla16, DIN05].

### Ziel der Charakterisierung

Ziel dieser Untersuchung ist die Charakterisierung des umgesetzten Messsystems anhand anerkannter Merkmale. Die Norm DIN 51309 beschreibt dafür sowohl die durchzuführende Untersuchung als auch Klassifizierungsmerkmale zur Charakterisierung. Darüber hinaus sind Vorschläge zur Messunsicherheitsbetrachtung gegeben, die in diesem Kapitel für eine genauere Beschreibung des Systems genutzt werden.

### Experimenteller Aufbau und Durchführung der Charakterisierung

Zur Kalibrierung wird der experimentelle Aufbau in Bild 7.9 genutzt.

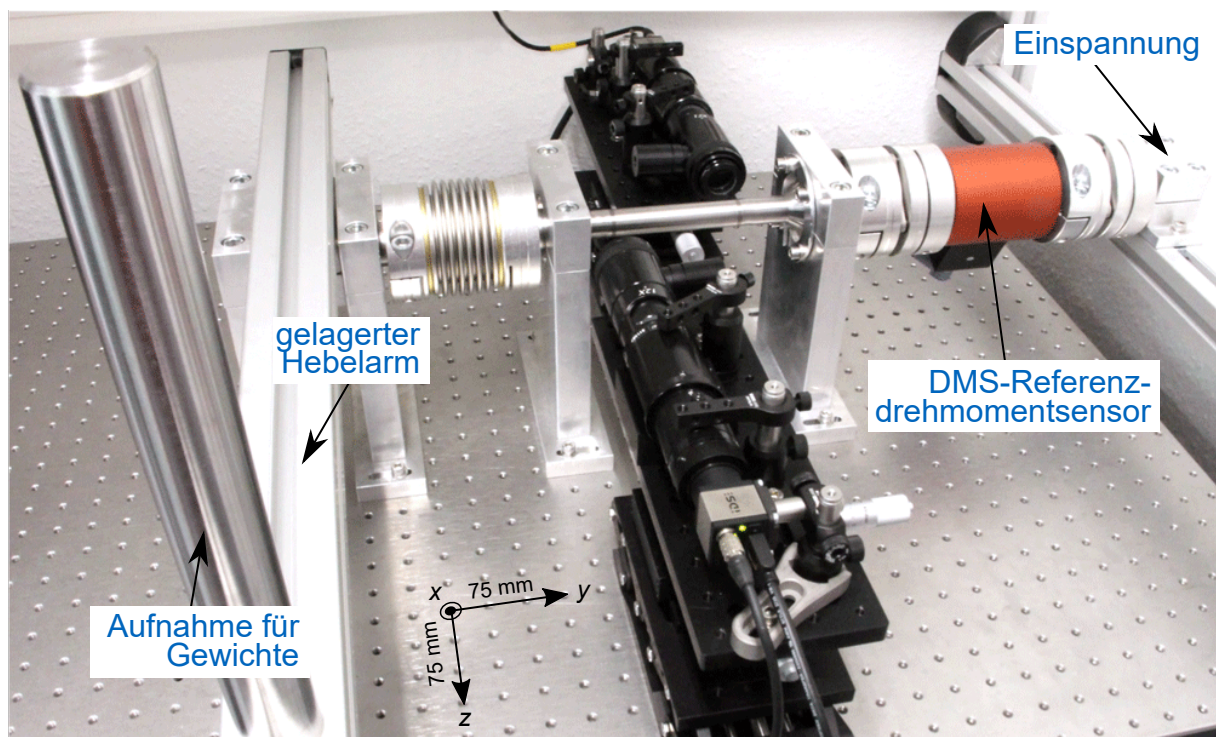


Bild 7.9: Versuchsaufbau zur statischen Charakterisierung des Drehmomentmesssystems. [SWE<sup>+</sup>17]

## 7 Verifikation des Messverfahrens

Die gelagerte Welle ist auf der einen Seite durch eine Metallbalgkupplung mit einem drehbar gelagertem Hebelarm verbunden. Der Hebelarm hat eine Länge von  $l = 500 \text{ mm}$  zwischen dem Drehpunkt und der Aufnahme für Gewichte, sodass mit bis zu  $20 \text{ kg}$  ein Drehmoment von bis zu  $100 \text{ Nm}$  aufgebracht wird. Da die Gewichte trotz Aufnahme nur bedingt gleich hinsichtlich der Position – durch den Experimentator – abgelegt werden, wird die Welle auf der anderen Seite zur genauen Bestimmung des Drehmoments mit einem industriellen Drehmomentsensor der Fa. KTR verbunden. Der Drehmomentsensor, der auch für rotierende Anwendungen geeignet ist, wird in diesem Versuch mit Hilfe von Servolamellenkupplungen verbunden und auf der rechten Seite fest eingespannt. Dieser Sensor wird als Referenz genutzt.

Typisch für eine Charakterisierung sind Belastungsstufen, die über den Messbereich zweckmäßig verteilt sind. Bspw. werden die Belastungsstufen bei 10 %, 20 %, 30 % ... 90 % und 100 % vom Messbereichsendwert (ME) gelegt. Aus praktischen Gründen wird in der folgenden Untersuchung allerdings mit einer ähnlichen zweckmäßigen Verteilung von acht Belastungsstufen gearbeitet: 2,5 kg; 5 kg; 7,5 kg; 10 kg; 12,5 kg; 15 kg; 17,5 kg und 20 kg. Bild 7.10 zeigt den schematischen Ablauf der durchzuführenden Charakterisierung nach DIN 51309. [SWE<sup>+</sup>17]

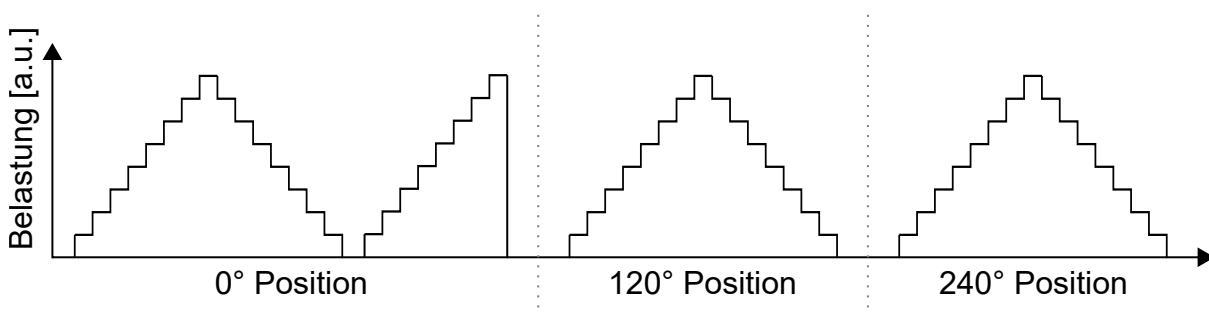


Bild 7.10: Ablauf der Charakterisierung eines Drehmomentsensors nach DIN 51309 in drei unterschiedlichen Einbaupositionen (nach [DIN05]).

Das zu charakterisierende Messsystem wird in drei unterschiedlichen Einbaustellungen geprüft. In allen drei Einbaustellungen wird die Belastung schrittweise von keiner Belastung bis zum ME erhöht und im Anschluss wieder schrittweise abgebaut, sodass der Verlauf der Belastung durch eine auf- und absteigende Treppe beschrieben ist. In der ersten Einbauposition wird zusätzlich noch eine solche aufsteigende Treppe mit erfasst. Die vorgeschriebene und durchgeführte dreimalige Vorbelastung des Strangs vor der ersten Belastungsreihe in der 0°-Einbausituation und die jeweils einmalige Vorbelastung in den zwei weiteren Einbaupositionen bis zum ME sind nicht dargestellt.



### 7.3 Charakterisierung des optischen Drehmoment-Messsystems

Grundvoraussetzung für die experimentellen Untersuchungen sind die querkraft- und biegemomentfreie Einleitung des Drehmoments. Die empfohlenen Maße für den Mindestwellendurchmesser ( $d_{Welle} = 20 \text{ mm}$ ) als auch die minimale Torsionslänge ( $l \geq 60 \text{ mm}$ ) sind bei der Auslegung der Torsionsmesswelle in Kapitel 4.2 berücksichtigt.

#### Ergebnis der Messsystem-Charakterisierung

Da der Hebelarm auf der einen Seite länger und zudem schwerer aufgrund der Aufnahme für Gewichte ist, liegt bereits ein Grundmoment an, welches zunächst hinsichtlich des Nullwerts korrigiert wird. In Bild 7.11 sind Messwerte für die erste Einbaustellung exemplarisch dargestellt.

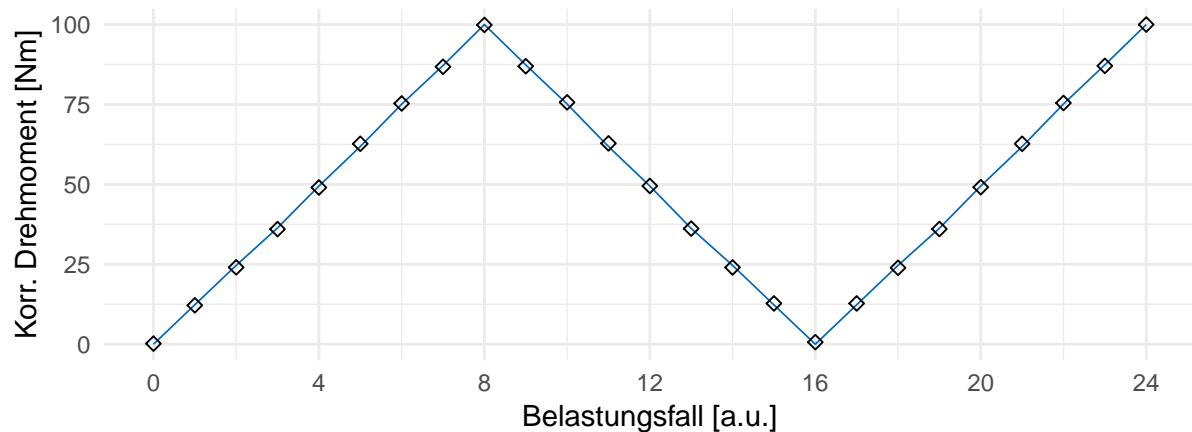


Bild 7.11: Ermittelte Drehmomente für die Hebelarm-Belastungen in der  $0^\circ$  Einbauposition. Die ermittelten Messwerte des Messsystems (schwarze Rauten) stimmen gut mit den Referenzwerten (blaue Linie) überein. (Hinweis: Die Drehmomentwerte sind hinsichtlich des Offsets zum Nullpunkt korrigiert. Die Referenzwerte sind aus Gründen der Darstellung und besseren Vergleichbarkeit als Linie dargestellt. Die diskreten Messpunkte des Referenzsystems befinden sich an den gleichen Positionen, wie die des zu vergleichenden Messsystems.)

Die blaue Linie stellt die vom Referenzsensor ermittelten Messwerte für die verschiedenen Belastungsfälle dar. Die vom Messsystem ermittelten Messwerte sind als Rauten eingezeichnet. Diese folgen den Messwerten in allen Belastungsfällen, sodass sowohl Momente um Null als auch die Momente bis  $100 \text{ Nm}$  angemessen erfasst werden. Für eine quantitative Bewertung des Messsystems sind in DIN 51309 die folgenden Parameter definiert: Vergleichpräzision, Wiederholpräzision, Nullpunktabweichung,

## 7 Verifikation des Messverfahrens

Umkehrspanne sowie die Anzeigeabweichung. Diese Parameter berechnen sich jeweils aus den Messwerten aller drei Einbaupositionen. Je nach erreichten Parametern, wird das System klassifiziert. Die Klassenbezeichnungen orientieren sich dabei an der relativen Vergleichspräzision, die von 0,05 % bis 5 % ausgelegt ist. Für jede Klasse und die fünf Parameter sind die maximal zulässigen Werte gegeben. Die niedrigste Einhaltung einer Klasse bestimmt die Klasseneinteilung, sodass das vorliegende System in die Klasse 0,5 einzuordnen ist.

In Tabelle 7.3 sind die max. zulässigen den max. ermittelten Werten gegenübergestellt. Der Klasseneinteilung nach, hat das vorliegende Messsystem bspw. eine Vergleichspräzision von 0,5 % bzw. 0,5 N m und eine Hysterese bzw. Umkehrspanne von 0,63 % bzw. 0,63 N m.

Tabelle 7.3: Gegenüberstellung der ermittelten und maximal zulässigen Werte (nach DIN 51309) für die Klasse 0,5 für die statische Drehmomentbelastungen.

| Klassifizierungsmerkmal | max. zulässiger Wert [%] | ermittelter max. Wert [%] |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Vergleichspräzision     | 0,5                      | 0,047                     |
| Wiederholpräzision      | 0,25                     | 0,047                     |
| Nullpunktabweichung     | 0,125                    | 0,013                     |
| Umkehrspanne            | 0,63                     | 0,137                     |
| Anzeigeabweichung       | 0,25                     | 0,134                     |

Hinweis: Die Prozentzahlen sind auf den Endwert (v. E.) 100 N m bezogen.

Im Vergleich mit den Werten aus Tabelle 7.2 ist die Vergleichspräzision mit 0,5 N m der Drehmomentmessung niedriger als die Standardabweichung der Winkeldifferenz mit 1,4 N m. Dies erscheint zunächst widersprüchlich, kann aber durch die geringe Anzahl an Messpositionen erklärt werden. Die Drehmomentmessung wird nur mit drei Einbaupositionen der Welle durchgeführt, sodass die daraus ermittelten Kenngrößen nicht zwangsläufig signifikant sind. Entsprechend ist damit zu rechnen, dass die tatsächlichen Messunsicherheiten eher denen aus Tabelle 7.2 entsprechen. Dennoch geben die ermittelten Kenngrößen einen ersten Anhaltspunkt zur Einordnung des entwickelten Messsystems. In der Anwendung sind die Messunsicherheiten

voraussichtlich höher, da in den bisherigen Versuchen die Versuchsbedingungen ideal sind mit einer Drehzahl  $n = 0 \text{ min}^{-1}$ .

### 7.4 Zwischenfazit

In diesem Kapitel ist die Erreichung des Teilziels 4 (Verifizierung des Messverfahren) sowie mögliche Fehlertypen innerhalb von Markierungen beschrieben, die jeweils bis zu gewissen Grenzen durch die Bildverarbeitung toleriert werden. Liegen erfasste Werte außerhalb festgelegter Toleranzgrenzen, wird eine Fehlermeldung ausgegeben. Darüber hinaus ist der Nachweis erbracht, dass der absolute Drehwinkel mit einer Genauigkeit von bis zu  $0,007^\circ$  (laut Standardabweichung) bzw.  $0,049^\circ$  (laut Spannweite) ermittelt werden kann. Ebenfalls ist der Nachweis erbracht, dass die Winkeldifferenz mit ähnlicher Genauigkeit nämlich  $0,014^\circ$  (laut Standardabweichung) bzw.  $0,086^\circ$  (laut Spannweite) ermittelt werden kann. Abschließend ist gezeigt, dass das Drehmoment im Stillstand mit Hilfe des realisierten Messsystems auf Grundlage des Winkeldifferenzverfahrens ermittelt werden kann. Damit entspricht das Messsystem den Anforderungen und kann im nächsten Schritt zur weiteren Untersuchung der wissenschaftlichen Frage genutzt werden.



## 8 Evaluation und Anwendung

Nachdem im vorherigen Kapitel das Messverfahren verifiziert wurde, wird in diesem Kapitel die wissenschaftliche Fragestellung evaluiert und das Messverfahren und Messsystem zur Anwendung gebracht (Teilziel 5). Im ersten Schritt wird die Unschärfe schrittweise durch radiale Verschiebung variiert und die Kausalität zwischen der Unschärfe und die radiale Verschiebung für dieses Messsystem bestimmt. Im nächsten Schritt wird die Winkelabweichung mit der Unschärfe in Relation gesetzt und mit der eingangs durchgeführten Simulation verglichen. In einem weiteren Versuch wird geprüft, ob anhand der Unschärfe eines Bildes auf den Abstand zwischen Wellenoberfläche und Kameraobjektiv geschlossen werden kann. Damit wäre dann nämlich die Bestimmung der Unrundheit der Welle möglich, da die Unrundheit zu einer unscharfen Abbildung führt. Weiter wird mit Hilfe von Elektromotoren die Grenzdrehzahl, bis zu der dieses Messsystem funktioniert, überprüft und das Drehmoment erstmals in der Rotation bestimmt und mit einem kommerziellen Sensor verglichen. Abschließend werden der Nutzen und die Grenzen des Messsystems und -verfahrens diskutiert.

### 8.1 Evaluation der wissenschaftlichen Frage

Beginnend mit der Evaluation wird der Einfluss der Unschärfe auf das optische System und vor allem die Wirkung auf die optische Winkelmessung untersucht.

#### 8.1.1 Unschärfe durch radiale Verschiebung

##### Ziel

In der folgenden Untersuchung wird das Verhalten der Schärfe in Abhängigkeit der Verschiebung der Markierung außerhalb der Fokusebene untersucht. Laut der Theorie

kann diese durch die Tenengrad-Funktion beschrieben werden. Außerdem werden die Grenzen der Verschiebung entlang der optischen Achse bestimmt, bis zu denen die Bildverarbeitung ohne Fehlermeldung den absoluten Winkel dekodieren kann.

### Experimenteller Aufbau und Durchführung

Da die Oberfläche im einstelligen Mikrometerbereich verschoben wird, wird anstelle der Wellenoberfläche eine deutlich leichtere metallische Flachprobe gleichen Materials verwendet. Auch hat die Flachprobe ähnliche optische Eigenschaften, sodass die Ergebnisse übertragbar sind. Die Markierung wird in abgerollter Form in x-Richtung aufgebracht, sodass auch die Positionierung dem finalen Aufbau gleicht. Entsprechend kann die Position des Objektivs in Relation zur Markierung mit Hilfe der x-Achse (in diesem Fall mit einer der beiden Scherentische, vgl. Bild 8.1) beliebig variiert werden. Die Verwendung einer leichteren Probe ist notwendig, um eine präzise Verschiebung in z-Richtung mit einer Genauigkeit im einstelligen Mikrometerbereich und der vorhandenen Antriebstechnik realisieren zu können. Manuelle Linearachsen sind vergleichsweise ungenau, sodass eine elektronische Linearachse<sup>1</sup> mit einer Wiederholgenauigkeit von 1,5 µm verwendet wird. Durch diese Linearachse können automatisiert und randomisiert verschiedene Distanzen zwischen der Oberfläche und dem Objektiv angefahren werden. Zudem wird der Fehlereinfluss des Bedieners eliminiert und die Geschwindigkeit der Versuchsdurchführung um ein Vielfaches gesteigert.

Wie in Bild 8.1 dargestellt, ist die Linearachse kollinear zur optischen Achse ausgerichtet, sodass die Flachprobe entlang der optischen Achse durch die Linearachse in z-Richtung verschoben wird. Durch die Programmierung werden automatisch und randomisiert die Positionen angefahren. Durch den linken Scherentisch wird die Höhe der Flachprobe eingestellt und damit zwölf willkürliche Positionen des MPR-Codes ausgewählt. Über eine Distanz von 600 µm in z-Richtung werden Bilder aufgenommen und mit Hilfe der Bildverarbeitung hinsichtlich der Schärfe ausgewertet. Zusätzlich wird untersucht bis zu welcher Schrittweite der absolute Winkel ermittelt werden kann. Die Schrittweite entspricht dem Vielfachen von 20 µm-Schritten. In Voruntersuchungen wurde die Flachprobe charakterisiert, die Funktionsweise geprüft und als ausreichend genau klassifiziert. Daher wird im Gegensatz zu Versuchen mit der Welle bei dieser Untersuchung die Position der Codierung nicht durch eine Kalibrierung korrigiert, vgl. Kapitel 7.2. Unabhängig von dieser Winkelkalibrierung

---

<sup>1</sup>Bürstenloser DC-Servomotor „DDSM100/M“ von Thorlabs

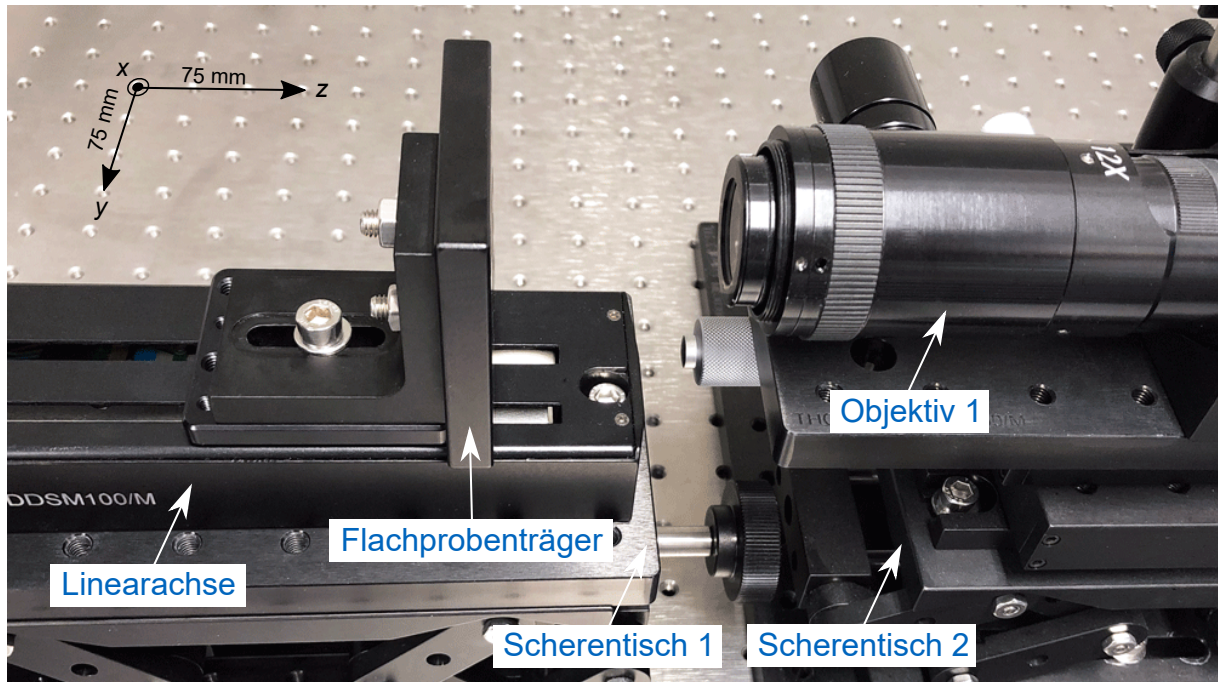


Bild 8.1: Versuchsaufbau zur Untersuchung der radialen Verschiebung einer Flachprobe.

ist das optische System, wie in Kapitel 6.4 und 6.5 beschrieben, parametrisiert und kalibriert. Die Korrektheit der absoluten Position über einen großen Verfahrweg ist bei diesem Versuch nebensächlich, sodass ein Fehler durch Nichtkalibrierung vernachlässigt werden kann. Viel mehr ist hier die relative Winkelveränderung zum ermittelten Winkel im Fokus von Interesse. Da durch das Verändern der Höhe des Scherentisches die Fokusslage relativ zur Probe minimal verändert wird, muss vor jeder Versuchsreihe die Fokusslage minimal nachjustiert werden. Dies wird mit Hilfe der Tenengrad-Funktion und der Linearachse automatisiert durchgeführt. Diese Konfiguration entspricht typischen Autofokus-Systemen. Diese nachjustierte Position wird als Null definiert und davon ausgehend die Flachprobe um  $-300\ \mu\text{m}$  und  $300\ \mu\text{m}$  in z-Richtung verschoben.

Die Messwerte sind bei maximaler Vergrößerung aufgenommen und sind nur bei dieser repräsentativ, da die Schärfentiefe in Abhängigkeit der Vergrößerung variiert.

### Ergebnis

Die ermittelten Schärpen, die mit Hilfe der Tenengrad-Funktion bestimmt wurden, sind in Bild 8.2 in Abhängigkeit der Schrittweite dargestellt. Der Verlauf der Messwerte stimmt erwartungsgemäß mit denen aus der Modellbildung und denen der Literatur [SMSR17] überein.

## 8 Evaluation und Anwendung

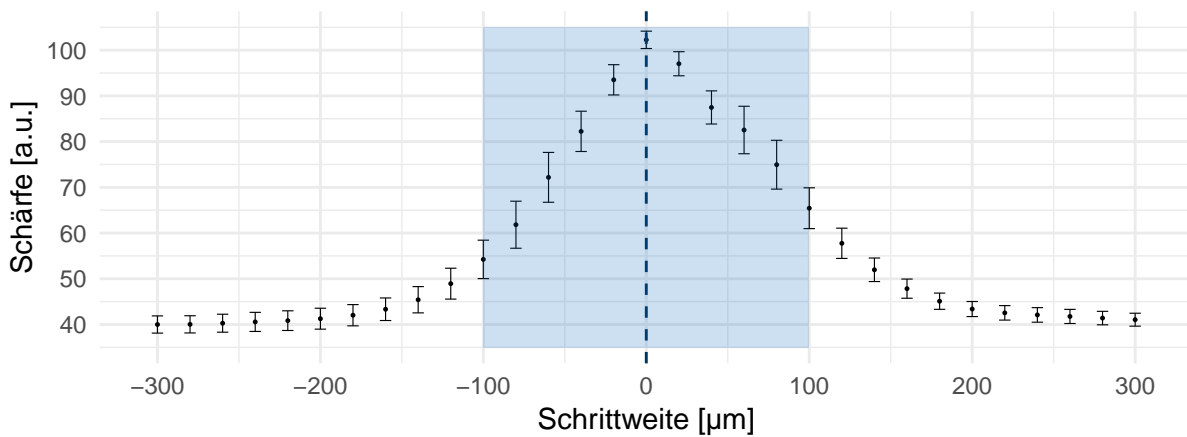


Bild 8.2: Darstellung der Tenengrad-Schärfe in Abhängigkeit der Schrittweite vom Fokuspunkt. Der blaue Bereich kennzeichnet den Bereich, bei dem die Winkelposition eindeutig und ohne Warn-/Fehlermeldung decodiert werden kann. (N=12 randomisierte Messpositionen)

Die Schärfe ist näherungsweise achsensymmetrisch, hat das Maximum im Fokus und fällt zu den Seiten steil ab. Im Vergleich zu den Graphen in der Modellbildung, ist der Abfall zu den Seiten flacher. Dies lässt sich dadurch erklären, dass keine perfekte Schärfe, wie in der Modellbildung, erreicht werden kann. Die metallische Oberfläche sowie das optische System weisen per se Imperfektionen auf, die sich in einer deutlich niedrigeren maximalen Schärfe widerspiegeln. Ab der Schrittweite von  $|\Delta z| \approx 150 \mu\text{m}$  zur Fokusslage konvergiert die Schärfe, sodass keine signifikante Änderung der Schärfe mehr erkennbar ist. Bis  $|\Delta z| = 100 \mu\text{m}$  kann der absolute Winkel ohne Fehlermeldung decodiert werden und ist durch den blau eingefärbten Bereich angedeutet. Die Standardabweichung ist zu den Rändern und im Fokusbereich klein, wird aber jeweils dazwischen verhältnismäßig groß.

Das Bilder bis  $|\Delta z| = 100 \mu\text{m}$  decodiert werden können ist insofern interessant als das dies den Schärfentiefebereich des Objektivs bei weitem übersteigt und das aufgenommene Bild auch mit dem menschlichen Auge nur noch mit Mühe decodiert werden kann. Dieser Sachverhalt wurde auch bereits, wie im Stand der Technik erwähnt, durch [JP94] beschrieben. Zur Veranschaulichung eines decodierbaren, unscharfen Bildes ist ein solches in Bild 8.3 dargestellt.

Darüber hinaus erscheint an dieser Stelle erwähnenswert, dass die Schärfe bei einer Messposition stetig und in Abhängigkeit der Schrittweite verläuft. In Bild 8.4 ist zur Illustration die Schärfe einer Winkelposition in Abhängigkeit der Schrittweite gegeben. Die Messwerte sind separat zwischen etwa  $-50 \mu\text{m}$  bis  $60 \mu\text{m}$  in  $1 \mu\text{m}$ -



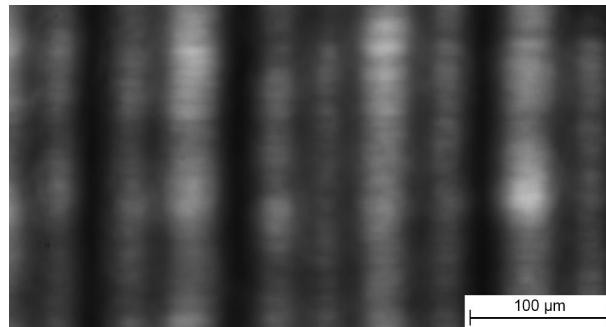


Bild 8.3: Exemplarisches Bild der Flachprobe bei einer Schrittweite  $\Delta z = 100 \mu\text{m}$ , dass durch die Bildverarbeitung ohne Fehlermeldung decodiert werden kann.

Schritten aufgenommen und dienen lediglich dem Verständnis. Dieser Messwertverlauf ist zu erwarten, da außer der Schärfe-Information im Bild nicht viel verändert wird. Bemerkenswert erscheint die Sensitivität, mit der die Schärfenänderung erkannt werden kann. Die Asymmetrie zwischen der linken und rechten Hälfte sowie die beiden leichten „Beulen“, sind auf die optischen Eigenschaften des Objektivs zurück zu führen.

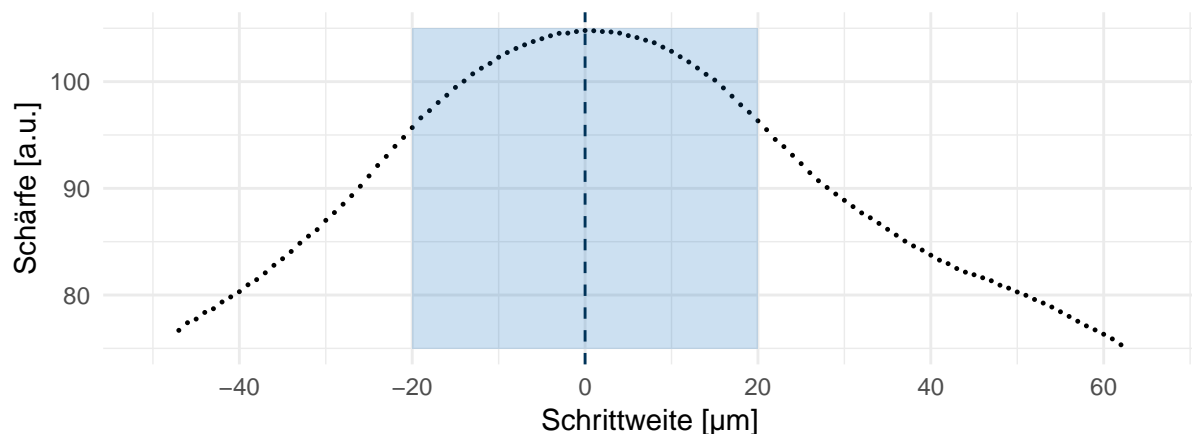


Bild 8.4: Exemplarischer Verlauf der berechneten Schärfe bei Variation des Abstandes zwischen Oberfläche und Objektiv.

Auch an anderen Messpositionen ist ein ähnlicher Verlauf der Schärfe in Abhängigkeit der Schrittweite wie in Bild 8.2 zu beobachten. Dies legt die Vermutung nahe, dass die berechnete Schärfe wesentlich durch die Position und damit z. B. durch die Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst wird, ohne dass dabei die eigentliche Schärfe der optischen Abbildung signifikant verändert wird.

Entsprechend dem Verlauf der Schärfe in Abhängigkeit der Schrittweite kann einem gegebenen Abstand zwischen Welle und Objektiv mit Hilfe der Tenengrad-Funktion

eine Unschärfe und umgekehrt einer Unschärfe zwei Abstände (aufgrund der Symmetrie) zugeordnet werden. Wichtig ist, dass die Auflösung dieser Schärfe- bzw. indirekten Distanzmessung maßgeblich von den Eigenschaften des optischen Systems abhängt und auch durch die Schärfentiefe gezielt beeinflusst werden kann. Dieser Sachverhalt wird in Kapitel 8.2 weiter untersucht und diskutiert.

### 8.1.2 Winkelabweichung durch radiale Verschiebung

#### Ziel

Aufbauend auf den Ergebnissen des vorherigen Kapitels ist neben der Untersuchung der Schärfe für die Anwendung noch der Winkelfehler von Interesse, der durch die radiale Verschiebung bzw. die Unschärfe hervorgerufen wird. Die Ergebnisse werden mit denen der Modellbildung verglichen, um eine Antwort auf die wissenschaftliche Fragestellung bezüglich des Einflusses der Unschärfe auf die Winkelerfassung geben zu können.

#### Experimenteller Aufbau und Durchführung

Der Versuchsaufbau entspricht dem des vorherigen Versuches, nur dass die Schritte entsprechend der vorherigen Untersuchung von  $-100\ \mu\text{m}$  bis  $100\ \mu\text{m}$  variiert werden. Die Schrittweite entspricht dabei  $5\ \mu\text{m}$ . Die Positionen werden wie im Versuch zuvor randomisiert angefahren. Statt die Schärfe zu bestimmen, wird in dieser Untersuchung der absolute Winkel jedes Bildes ausgewertet und jeweils mit der Nulllage verglichen.

#### Ergebnis

Die Winkelabweichung sowie die Standardabweichung von dieser bei der jeweiligen Schrittweite ist in Bild 8.5 dargestellt.

Die Winkelabweichung ist nahe der Nulllage (Schrittweite  $< 40\ \mu\text{m}$ ) etwa  $0^\circ$ . Die Standardabweichung ist – erwartungsgemäß – mit denen der Vorversuche konsistent und liegt ebenfalls nahe der Nulllage bei etwa  $0,01^\circ$ . Links von der Nulllage bleibt die Winkelabweichung mit größer werdender Schrittweite quasi Null, was der Beobachtung in der Modellbildung gleicht. Zeitgleich wird auch die Standardabweichung zu beiden Rändern größer, was ebenfalls zu erwarten ist. In der linken Hälfte wird die Standardabweichung bis zu  $\pm 0,015^\circ$  und in der rechten Hälfte bis zu  $\pm 0,022^\circ$  groß.

Rechts von der Nulllage hingegen sinkt die Winkelabweichung im Mittel auf bis zu  $-0,015^\circ$  ab. Allerdings steigt ebenfalls die Standardabweichung deutlich an, sodass eine mögliche Abweichung des realen Wertes von der Nulllage nicht signifikant nachgewiesen werden kann.

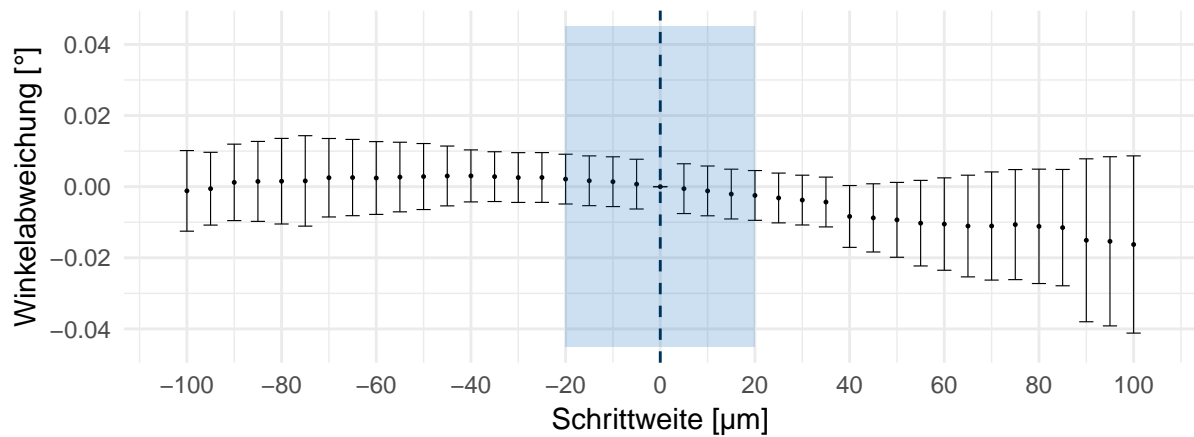


Bild 8.5: Darstellung der Winkelabweichung im Vergleich zur Nulllage in Abhängigkeit der Schrittweite vom Fokuspunkt. (N = 12 randomisierte Messpositionen)

Ähnlich wie in der Simulation in Kapitel 5.3, nimmt die Standardabweichung mit zunehmendem Abstand von der Fokusebene zu. Ebenso ist im Mittel die Winkelabweichung, zumindest im relevanten Bereich zwischen  $-20\ \mu\text{m}$  und  $20\ \mu\text{m}$ , etwa Null. Eine einfaktorielle Varianzanalyse mit anschließendem Post-hoc-Test (nach Scheffé) zeigt innerhalb des relevanten Bereichs ebenfalls keine signifikanten Unterschiede der Winkelabweichung. Die Größenordnung von einer maximalen Winkelabweichung von etwa  $0,02^\circ$  stimmt auch überein, sodass die Simulation eine ausreichende Genauigkeit hat.

### 8.1.3 Untersuchung des Abbildungsmaßstabs

#### Ziel

Trotz des telezentrischen Objektivs konnte eine Veränderung der erfassten Winkelposition bei Variation des Abstandes zwischen Objekt und Objektiv festgestellt werden. In dieser Untersuchung wird geprüft, ob diese durch eine Veränderung der Vergrößerung in Abhängigkeit des Objektabstandes erklärt werden kann.

### Experimenteller Aufbau und Durchführung

Für diese Untersuchung wird der gleiche Aufbau wie zuvor genutzt. Statt der metallischen Flachprobe wird nun allerdings ein im Lithographieverfahren gefertigter Referenzmaßstab mit bekannter Teilung genutzt. Dieser wird auf dem Flachprobenträger montiert und ähnlich der Metallprobe entlang der optischen Achse in 2,5 µm-Schritten verschoben. In jeder Position wird manuell mit Hilfe der Software ImageJ<sup>2</sup> der Abstand zweier Referenzmarkierungen gemessen. Diese Messung wird für jede Position zwölfmal wiederholt. In Bild 8.6 ist ein Screenshot einer solchen manuellen Messung<sup>3</sup> gezeigt.

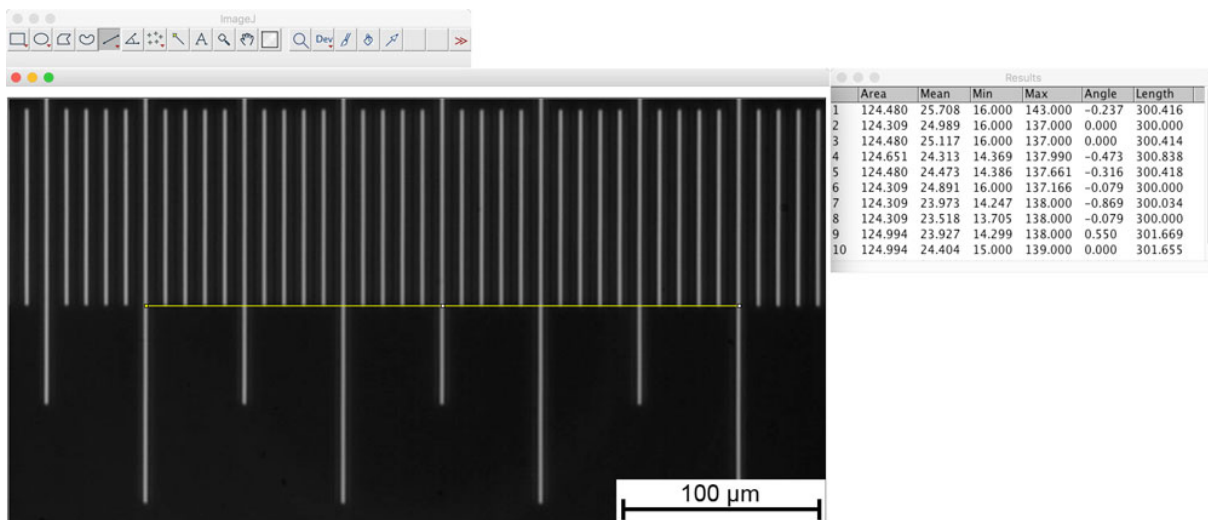


Bild 8.6: Manuelle Ermittlung des Abstandes der Referenzmarkierungen mit Hilfe der Software ImageJ.

### Ergebnis

In Bild 8.7 sind die ermittelten Abstände der Referenzmarkierungen zwischen  $-20\ \mu\text{m}$  und  $20\ \mu\text{m}$  dargestellt. Außerhalb dieser Schrittweiten, konnten die Markierungen aufgrund der Unschärfe nicht ausreichend genau identifiziert werden. Mit Hilfe der eingezeichneten Regressionsgerade lassen sich bei einem  $R^2 = 0,87$  genau eben dieser Anteil von 87 % der Streuung erklären. Die Regression ist auf dem 0,1 %-Niveau hochsignifikant, sodass eine Kausalität zwischen der Schrittweite und dem Abstand der Referenz bestätigt ist.

<sup>2</sup>Die von Wayne Rasband in Java programmierte Software ImageJ kann zur Verarbeitung und Analyse von Bildern genutzt werden.

<sup>3</sup>Im Versuch wird die Distanz in Pixeln ermittelt. Im gezeigten Screenshot sind bereits die Kalibrierdaten hinterlegt, sodass direkt die Distanz in Mikrometern ausgegeben wird.

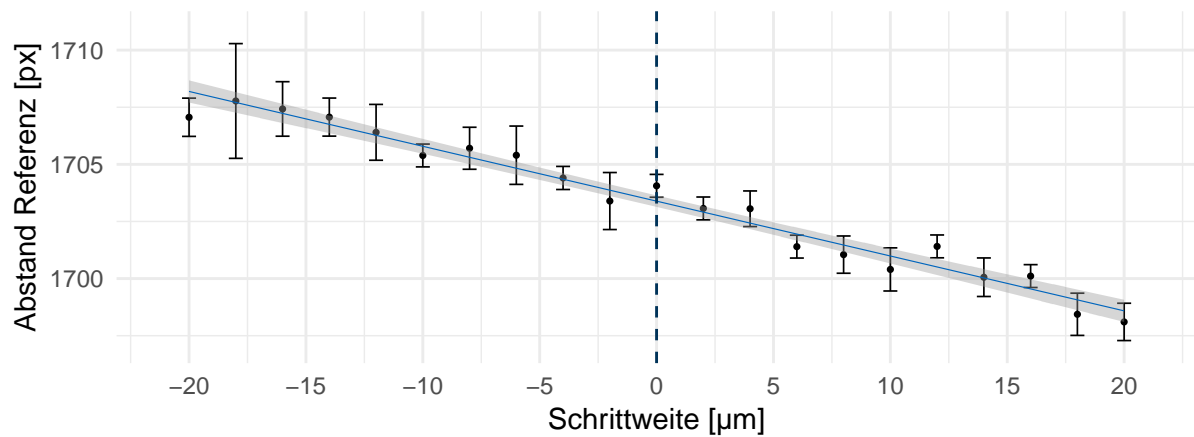


Bild 8.7: Mittels der Software ImageJ manuell bestimmten Abstände der Referenzmarkierung bei entsprechender Schrittweite.

Der Abstand der gewählten Referenz nimmt mit zunehmender Schrittweite ab. Dies bedeutet, dass das nahe Objekt größer als das entfernte Objekt erscheint. Dieses Verhalten ist typisch für konventionelle Objektive, nicht jedoch für telezentrische Objektive. Da das Objektiv allerdings außerhalb der im Datenblatt spezifizierten Schärfentiefe ( $\text{DOF} = 10\ \mu\text{m}$ ) genutzt wird, ist dieses Verhalten wiederum nicht überraschend. Dieser Schärfenbereich wird um den Faktor vier in dieser Untersuchung und um den Faktor zehn in der Anwendung überschritten. Der Abstand der Markierungen sinkt von etwa 1708 px auf 1698 px also um etwa 10 Pixel. Da die Pixel jeweils  $5,5\ \mu\text{m}$  groß sind und eine Vergrößerung von 28 genutzt wird, entspricht dies einer relativen Verschiebung von etwa  $2\ \mu\text{m}$  auf der Oberfläche, was wiederum etwa  $0,01^\circ$  entspricht. Diese Veränderung von etwa  $0,01^\circ$  ist annähernd in Bild 8.5 zu erkennen und erklärt die dort sinkende Winkelabweichung im **blauen** Bereich mit steigender Schrittweite.

Aufgrund dieser Erkenntnis ist es umso wichtiger, dass beide Kameras sowohl bei gleicher Vergrößerung als auch bei gleichbleibendem Abstand zur Objektoberfläche genutzt werden. Ebenso darf zwischen der Kalibrierung und der Versuchsdurchführung keine Veränderung des Systems vorgenommen werden. Die Vergrößerung wird so gewählt, dass beim Aufbau der Versuche jeweils die Vergrößerung durch das Drehen des Zoom-Rads an den Anschlag gewählt wird. Dies entspricht der maximalen Vergrößerung. Der Abstand des Systems wird dadurch konstant gehalten, dass nach jedem Umbau des Systems die Kalibrierung erneut durchgeführt wird. Dadurch ist sichergestellt, dass in der Hinsicht gleiche Versuchsbedingungen vorliegen.

### Zwischenfazit

In diesem Abschnitt konnte durch Untersuchungen gezeigt werden, dass – entsprechend der Ergebnisse aus der Modellbildung – mit zunehmender Verschiebung der Oberfläche entlang der optischen Achse eine zunehmende Ungenauigkeit der Winkelerfassung einhergeht. Diese resultierende Ungenauigkeit ist durch die ebenfalls zunehmende Unschärfe begründet. Die durch die Verschiebung um bis zu  $\pm 100 \mu\text{m}$  verursachte Unschärfe führt zu einem Winkelfehler von etwa  $\pm 0,015^\circ$  und beantwortet damit die **wissenschaftliche Fragestellung** nach dem Einfluss der Unschärfe auf die Winkelmessung quantitativ. Zusätzlich wurde bei dem vorliegenden System eine abstandsabhängige Vergrößerung nachgewiesen, die im Vergleich zur Standardabweichung zu einer systematischen zugleich aber auch vernachlässigbaren Winkelabweichung führt.

## 8.2 Optisches Messverfahren zur Erfassung der Unrundheit

In logischer Konsequenz liegt die Zusammenführung der Schärfeinformation sowie der Winkelinformation nahe. Anhand der Schärfe kann auf die Abstandsänderung und mit Hilfe der dazugehörigen Winkelinformation auf die Form geschlossen werden.

### Ziel

Konkret wird in diesem Kapitel die Kausalität zwischen der Unrundheit und der Unschärfe untersucht. Dies ist als ein weiterer Anwendungsfall des hier untersuchten Messverfahrens anzusehen. Die Idee, anhand der Schärfe eines Bildes auf die Form des Objektes zu schließen, ist in der Literatur nicht neu und ist z. B. in [Pen87, Pen90, FS02] beschrieben. Allerdings konnte die hier beschriebene Anwendung in diesem Zusammenhang in der Literatur nicht gefunden werden. Jedoch scheint gerade diese Anwendung im Kontext der Eingangs beschriebenen Digitalisierung und der damit verbundenen Sensorintegration von großem Interesse. Vor allem in Hinblick der zustandsorientierten Instandhaltung von Wellen oder auch der Detektion von Lagerschäden, könnte dieses Messverfahren genutzt werden. Besonders interessant scheint die Möglichkeit der gleichzeitigen Erfassung und Auswertung von drehmoment-, drehwinkel- bzw. drehzahlabhängigen Änderungen des Abstands.

Da die Schärfefunktion allerdings achsensymmetrisch ist, ist es nicht direkt möglich dem Wert einer Schärfe einen konkreten Abstandswert zuzuordnen. Konkret ist dies

## 8.2 Optisches Messverfahren zur Erfassung der Unrundheit

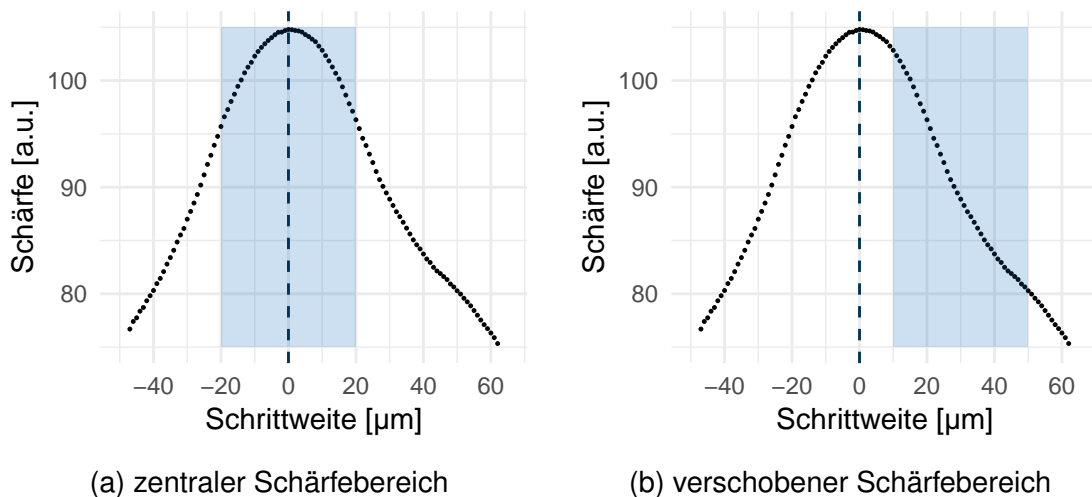


Bild 8.8: Konzept der Verschiebung des Schärfebereichs der Optik durch absichtliche Dejustage.

in Bild 8.8a verdeutlicht. Im relevanten Schärfebereich (hier in blau gezeichnet) werden der beispielhaft gewählten Schärfe von etwa 95, zwei Schrittweiten nämlich  $-20\ \mu\text{m}$  und  $20\ \mu\text{m}$  zugeordnet. Die Richtungsinformation der Schärfe ist entsprechend nicht vorhanden. Um diesem Umstand entgegen zu wirken, wird in der folgenden Untersuchung durch absichtliche Dejustage des optischen Systems überprüft, wie genau mit Hilfe der Schärfe die Abstandsänderung ermittelt werden kann. In Bild 8.8b ist das Konzept der Dejustage schematisch gezeigt. Der scharfe Bereich des Objektivs wird soweit verschoben bis das Maximum kein Teil der Schnittmenge mehr ist. Dadurch ist die Schärfenänderung in Abhängigkeit der Abstandsänderung sowohl eindeutig als auch annähernd linear, wenn ein kleiner Abstand zum Maximum gewählt wird.

### Experimenteller Aufbau und Durchführung

Konkret bedeutet dies, dass das Objektiv um  $30\ \mu\text{m}$  zur Nulllage entlang der optischen Achse verschoben wird. Da ohne weitere Hilfe nur mit viel Ausprobieren die tatsächliche Nulllage, nämlich das globale Maximum der Welle gefunden werden kann, wird sowohl zur Justage, Kalibrierung als auch zur Referenzierung eine industrielle, digitale Messuhr genutzt. Diese Messuhr wird aus Platzgründen um  $90^\circ$  versetzt zur optischen Achse mit Hilfe von Aluminium-Profilen platziert, siehe Bild 8.9. Zusätzlich wird die Messuhr leicht versetzt zur Markierung positioniert, um diese nicht zu beschädigen<sup>4</sup>. Der übrige Aufbau gleicht dem aus Kapitel 7.2.

<sup>4</sup>Zur Beständigkeit der Lasermarkierungen liegen zum aktuellen Zeitpunkt keine Erkenntnisse vor, sodass diese z. B. vor mechanischer Beschädigung geschützt wird.

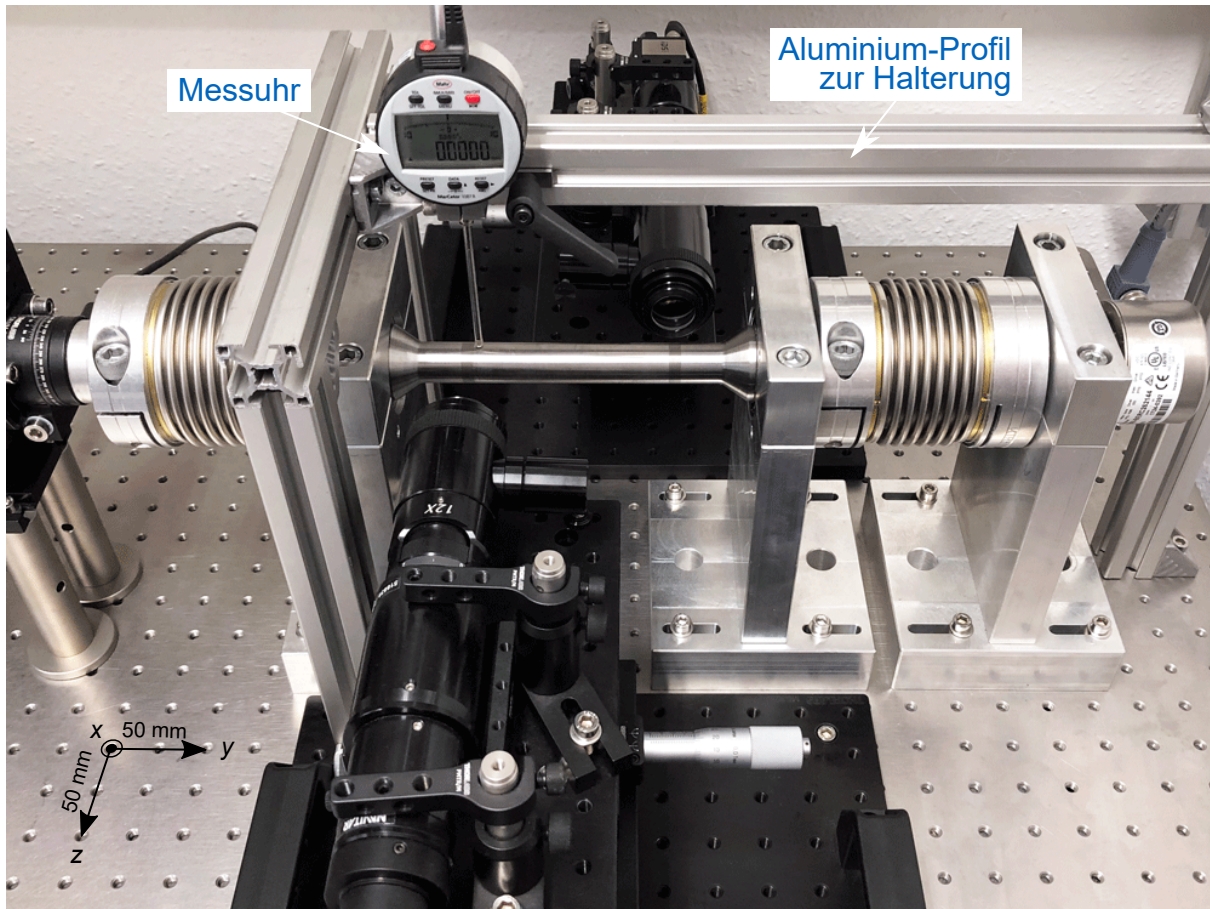


Bild 8.9: Versuchsaufbau zur optischen Messung der Unrundheit einer Welle mit der Messuhr als Referenz.

Bei der Versuchsdurchführung wird zunächst das globale Maximum der Welle mit Hilfe der Messuhr bestimmt, indem die Welle um  $360^\circ$  gedreht wird. Nach dem die Position bestimmt ist, wird die Welle um etwa  $90^\circ$  weitergedreht, sodass das globale Maximum im Sichtfeld des optischen Systems ist. Auf diese Position wird nun manuell mit Hilfe der Linearachse in z-Richtung scharf gestellt. Dies ist die Nulllage aus der heraus das optische System um weitere  $30\ \mu\text{m}$  verschoben wird. Entsprechend wird kein Bild im eigentlichen Schärfentiefe-Bereich der Kamera aufgenommen, sodass alle Bilder eine gewisse Mindestunschärfe besitzen. Damit ist das optische System für diesen Anwendungsfall korrekt justiert.

Untersucht wird die Genauigkeit zur Erfassung der Unrundheit mit Hilfe von zwei Wellen. Dabei liegt *Welle I* innerhalb der selbst festgelegten Anforderung (Gesamtrundlauf toleranz  $\leq 15\ \mu\text{m}$ ) und *Welle II* außerhalb. Beide Wellen werden jeweils vor der Versuchsdurchführung wie beschrieben justiert und kalibriert. Für die

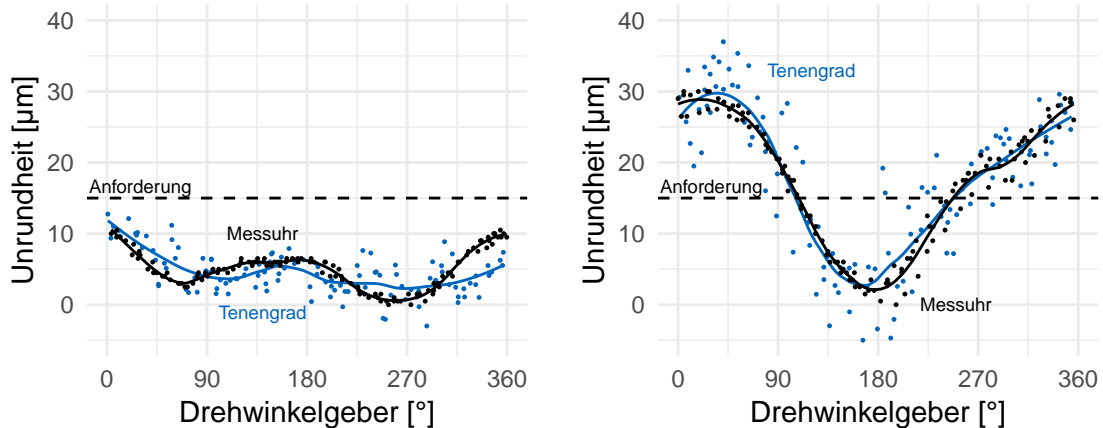


## 8.2 Optisches Messverfahren zur Erfassung der Unrundheit

Messung werden 120 randomisierte Messpunkte, die über 360° zufällig verteilt sind, aufgenommen.

### Ergebnis

Die Ergebnisse in Bild 8.10 sind zur besseren Vergleichbarkeit hinsichtlich des 90°-Offsets zwischen Messuhr und optischer Achse korrigiert.



(a) Welle I innerhalb der Anforderung

(b) Welle II außerhalb der Anforderung

Bild 8.10: Vergleich zweier Rundlaufmessungen mit einer Messuhr und der Tenengrad-Bildschärfe. Die Messung wird an zwei Wellen durchgeführt wobei eine innerhalb (a) und eine außerhalb (b) der Anforderung bezüglich der Gesamtrundlauf toleranz liegt.

Dargestellt sind die Messwerte der Messuhr sowie die Werte der Schärfe die mit Hilfe der Tenengrad-Funktion bestimmt wird. Bei der Kalibrierung wird mit Hilfe linearer Regression jeweils ein Offsetwert von etwa 109 „Tenengrad“ und ein Skalierungsfaktor von etwa  $-40 \mu\text{m}/(23 \text{ „Tenengrad“})$  zwischen der Messuhr und dem optischen System bestimmt. Zusätzlich wird jeweils eine LOESS Funktion an die Messwerte angefitet, um den Verlauf besser erkennen und vergleichen zu können.

Bei *Welle 1* liegen alle Messwerte der Messuhr erwartungsgemäß unterhalb von  $15 \mu\text{m}$ . Die angefitete schwarze Funktion zeigt den Verlauf der Unrundheit bzw. den des Gesamtrundlaufs. Dieser schwankt zwischen Null und  $9,9 \mu\text{m}$ . Im Vergleich dazu weist die in blau dargestellte angefitete Funktion der Tenengrad-Schärfe einen abweichenden Verlauf mit einer ähnlichen Spannweite von  $9,6 \mu\text{m}$  auf. Bei *Welle II* hingegen ist der Verlauf der angefiteten Funktionen ähnlicher, sodass hier die Unrundheit durch die Tenengrad-Werte besser wiedergegeben wird. Die

## 8 Evaluation und Anwendung

Spannweiten sind erneut ähnlich mit  $26,7\ \mu\text{m}$  und  $27,0\ \mu\text{m}$ . Diese geringe Abweichung der Spannweiten ist allerdings zu erwarten, da diese durch die Kalibrierung (genauer der Skalierung) bereits angenähert sind.

Tabelle 8.1: Überprüfung der jeweils angefitzten Modellfunktion anhand des Bestimmtheitsmaßes (R-Quadrat).

|                | Welle I  |           | Welle II |           |
|----------------|----------|-----------|----------|-----------|
|                | Messuhr  | Tenengrad | Messuhr  | Tenengrad |
| Multipl. $R^2$ | 0,968*** | 0,518***  | 0,978*** | 0,796***  |

Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p \leq 0,01$ ; \*\*  $p \leq 0,05$ ; \*  $p \leq 0,1$

Anhand des sog. Multiplen  $R^2$  kann die Güte der Anfitzung einer Funktion an Messwerte quantitativ beschrieben werden, siehe [BEW15]. Dieses ist für die jeweilige Messung in Tabelle 8.1 gegeben. Neben der statistischen Auswertung ist auch sachlogisch ein Zusammenhang zu prüfen, der in diesem Fall die Ergebnisse nicht entkräftet. Die Anfitzung der Daten mit Hilfe des LOESS Modells scheint sinnvoll, als dass die Daten im Fall der Messuhr-Werte sehr gut ( $R > 0,95$ ) und im Fall der Tenengrad-Werte bei *Welle II* gut ( $R > 0,75$ ) wieder gegeben werden. Die angefitzte LOESS Funktion gibt im Fall der Tenengrad-Werte bei *Welle I* nur 50% der Daten wieder, sodass diese Anfitzung als nicht ausreichend einzustufen ist. In Hinblick auf die Plausibilität erscheinen diese Ergebnisse auch unter Berücksichtigung der Signifikanzniveaus korrekt. Alle vier multiplen  $R^2$  sind auf dem 0,01%-Niveau signifikant. Somit lässt sich folgern, dass bei einer Unrundheit von bis zu  $10\ \mu\text{m}$  die optisch ermittelte Unrundheit im Kontext des hier genutzten optischen Aufbaus nicht gut geeignet ist. Hingegen, kann bei einer Unrundheit von bis zu  $30\ \mu\text{m}$  diese optisch erfasst werden und grob im Verlauf wiedergegeben werden. Zur weiteren quantitativen Beurteilung ist in Tabelle 8.2 der Standardfehler der Residuen gegeben. Der Standardfehler der Residuen kann als Mittelwert der Differenzen der gefitteten Funktion und der eigentlichen Messwerte bzw. als ein Streumaß verstanden werden. Dabei liegt die Streuung der mit Hilfe der Tenengradfunktion ermittelten Messwerte bei  $\pm 2,2\ \mu\text{m}$  und  $\pm 4,8\ \mu\text{m}$ . Bei der Messuhr liegen die Residuen Standardfehler bei  $\pm 0,5\ \mu\text{m}$  und  $\pm 1,5\ \mu\text{m}$ , was etwa der im Datenblatt angegebenen Wiederholgenauigkeit von  $1\ \mu\text{m}$  entspricht. Somit kann mit Hilfe des optischen System die Unrundheit vergleichsweise ungenau (siehe angegebenen Fehler) ermittelt werden.

Tabelle 8.2: Überprüfung der jeweils angefitteten Modellfunktion anhand des Standardfehlers der Residuen.

|                         | Welle I           |                   | Welle II          |                   |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                         | Messuhr           | Tenengrad         | Messuhr           | Tenengrad         |
| Residuen Standardfehler | 0,5 $\mu\text{m}$ | 2,2 $\mu\text{m}$ | 1,5 $\mu\text{m}$ | 4,8 $\mu\text{m}$ |

Nachdem sowohl die Anfittungsgüte der Funktionen an die Messwerte als auch die Standardfehler beschrieben sind, bleibt die Frage der Ähnlichkeit der beiden Messergebnisse. Zwar wurde bereits für *Welle I* die Anfittung für nicht geeignet erklärt, dennoch wird diese im Folgenden der Vergleichbarkeit weiterhin beschrieben.

Zur quantitativen Beurteilung einer nicht linearen Ähnlichkeit zweier metrisch skalierten Variablen wird in der multivariaten Statistik die sog. Ähnlichkeitsanalyse verwendet, die anhand eines Distanzmaßes die Ähnlichkeit darstellt. In diesem Fall wird das Distanzmaß der euklidischen Distanz genutzt, um die Ähnlichkeit der beiden oben angefitteten Funktionen zu vergleichen. Genauer werden deren vorausgesagte Funktionswerte zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  in  $0,01^\circ$ -Schritten verglichen, indem deren quadrierte Differenz summiert und im Anschluss die Wurzel gezogen wird. Diese daraus berechnete euklidische Distanz gibt für kleine Zahlen eine hohe Ähnlichkeit wieder. Bei einer Distanz von Null wären die Daten deckungsgleich.

Tabelle 8.3: Quantitative Beurteilung der Ähnlichkeiten der angefitteten Funktionen.

|                     | Welle I | Welle II |
|---------------------|---------|----------|
| Euklidische Distanz | 51,6    | 9,3      |

Für die *Welle I* ergibt sich eine euklidische Distanz von 51,6 und für *Welle II* von 9,3, siehe Tabelle 8.3. Daraus lässt sich ableiten, dass die Tenengrad-Funktion bei größeren Rundheitsabweichungen (*Welle II*) den Werten der Messuhr ähnlicher ist als bei kleineren (*Welle I*). Dennoch bleibt zu beachten, dass der Standardfehler auch bei der größeren Rundheitsabweichungen (*Welle II*) ebenfalls größer ist.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für eine abschließende Klärung der vorliegenden Genauigkeit und einem verlässlichen Nachweis der Funktionsfähigkeit

## 8 Evaluation und Anwendung

die oben genannten Untersuchungen nicht ausreichen. Dafür müssen diese Untersuchungen deutlich häufiger durchgeführt werden und zusätzlich weitere Parameter variiert werden. Z.B. müssten mehr gleiche als auch unterschiedliche Wellen gefertigt werden, um eine verlässlichere Aussage im Kontext des Gesetzes der großen Zahl zu bekommen.

### Zwischenfazit

In diesem Abschnitt wurde gezeigt, dass die Unschärfe, die durch die Verschiebung der Oberfläche aus dem Fokusbereich der Optik hervorgerufen wird, zum Vorteil genutzt werden kann. Anhand der Unschärfe kann auf den Abstand der Oberfläche und dem optischen System geschlossen werden. Um einen ein- und nicht zweideutigen Schärfewert zu bekommen, muss das optische System allerdings definiert dejustiert werden. In dem vorliegenden System, wurde dieses um  $30\ \mu\text{m}$  entlang der optischen Achse verschoben. Für die Untersuchung wurden zwei Wellen gefertigt, die unterschiedliche Rundheiten aufweisen und mit Hilfe einer industriell-üblichen Messuhr untersucht und verglichen wurden. Der anhand der Schärfe ermittelte Verlauf der Rundheit stimmt je nach Welle einmal gut und einmal sehr gut mit den Messwerten der Messuhr überein. Somit wurde in ersten Ergebnissen gezeigt, dass die optische Erfassung der Unrundheit mit Einschränkungen möglich ist. Somit können mit Hilfe der meist ohnehin vorliegenden Unschärfe weitere Informationen extrahiert werden.

## 8.3 Anwendung in der Praxis

### 8.3.1 Synchronisierung und Hochgeschwindigkeitsbeleuchtung

In der Praxis liegen je nach Anwendung stark unterschiedliche Drehzahlen vor, vgl. Mindestanforderung (Tabelle 1.2) und Wunschanforderung (Tabelle 1.3). Bei hohen Drehzahlen verschwimmt das aufgenommene Bild, da sich die Wellenoberfläche während der Belichtungsdauer relativ zur Kamera bewegt. Je kürzer die Belichtungsdauer ist, desto kleiner ist die relative Bewegung. Das vorliegende optische System wird durch die Belichtungsdauer der Kamera bzw. der gepulsten Beleuchtung limitiert. Idealerweise dreht sich die Oberfläche während der Bildaufnahme nur soweit, dass die Abbildung auf dem CMOS-Chip der Kamera weniger als ein Pixel verschoben wird. In diesem Fall wäre die Bildinformation nur unwesentlich durch die Bewegung

verfälscht. Wie allerdings bereits in der Modellbildung beschrieben ist, kann auch eine Bewegungsunschärfe von bis zu 125 px decodiert werden. Für die kommenden Versuche stellt sich entsprechend die Frage bei welcher Puls- bzw. Belichtungsdauer welche Drehzahl in Abhängigkeit der verschiedenen Bewegungsunschärfen ermöglicht werden kann. Dies kann trivial anhand der vorliegenden Eigenschaften wie dem Umfang der Welle (62,8 mm), der Anzahl an Pixeln in Bewegungsrichtung (2048 px), der Abmessungen eines Pixels (5,5  $\mu\text{m}$ ) sowie der Vergrößerung des Objektivs ( $\beta = 28$ ) berechnet werden. Zum besseren Verständnis ist dieser Sachverhalt in Bild 8.11 für verschiedenen Bewegungsunschärfen zwischen 1 px und 125 px dargestellt. Sowohl die Puls- bzw. Belichtungsdauer als auch die Drehzahl ist logarithmisch dargestellt, um einen möglichst großen Bereich darstellen zu können. Bspw. kann bei einer Puls- bzw. Belichtungsdauer von 10  $\mu\text{s}$  und einer Unschärfe von bis zu 1 px eine Drehzahl von bis zu 20  $\text{min}^{-1}$  ermöglicht werden.

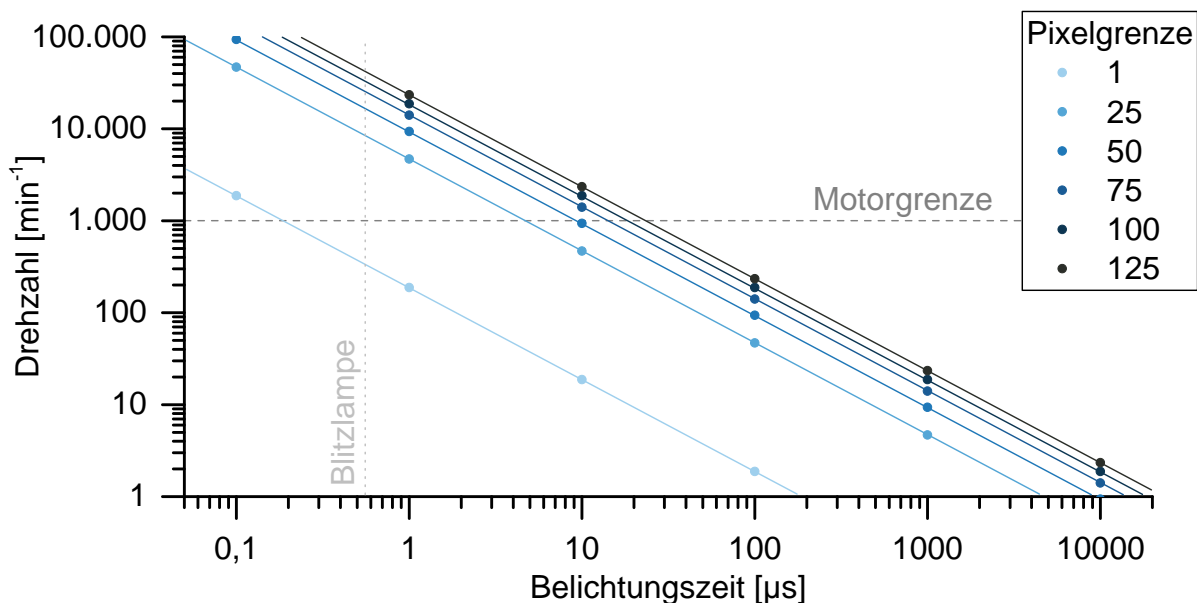


Bild 8.11: Abschätzung der möglichen Drehzahl in Abhängigkeit der Belichtungsdauer und bei einer Welle mit einem Durchmesser von  $d_{\text{Welle}} = 20 \text{ mm}$ .

### Synchronisierung

Für die Realisierung von Belichtungsdauern, die kürzer sind als die minimale Belichtungszeit der Kamera, wird ein Lichtblitz mit hoher Intensität genutzt. Zunächst wird die Kamera, genauer der Kamera-Shutter, geöffnet und nach einer bestimmten Zeit der Lichtblitz ausgelöst. Nach dem Lichtblitz wird die Kamera wieder geschlossen. Um sicher zu gehen, dass die jeweilige Kamera für die Bildaufnahme bereit ist, wird die Beleuchtung mit einem zeitlichen Versatz ausgelöst. Das Öffnen als auch

## 8 Evaluation und Anwendung

das Auslösen des Lichtblitzes wird dabei durch externe Steuersignale gesteuert. Der Zusammenhang zwischen dem Kamera-Shutter, der Beleuchtung und dem jeweiligen Steuersignal für die Kamera ( $U_S(t, K_1)$ ) sowie die Beleuchtung ( $U_S(t, B_1)$ ) sind in Bild 8.12 verdeutlicht. Im Anschluss an die Bildaufnahme werden die Bilder zum PC übertragen und die Prozedur erneut begonnen.

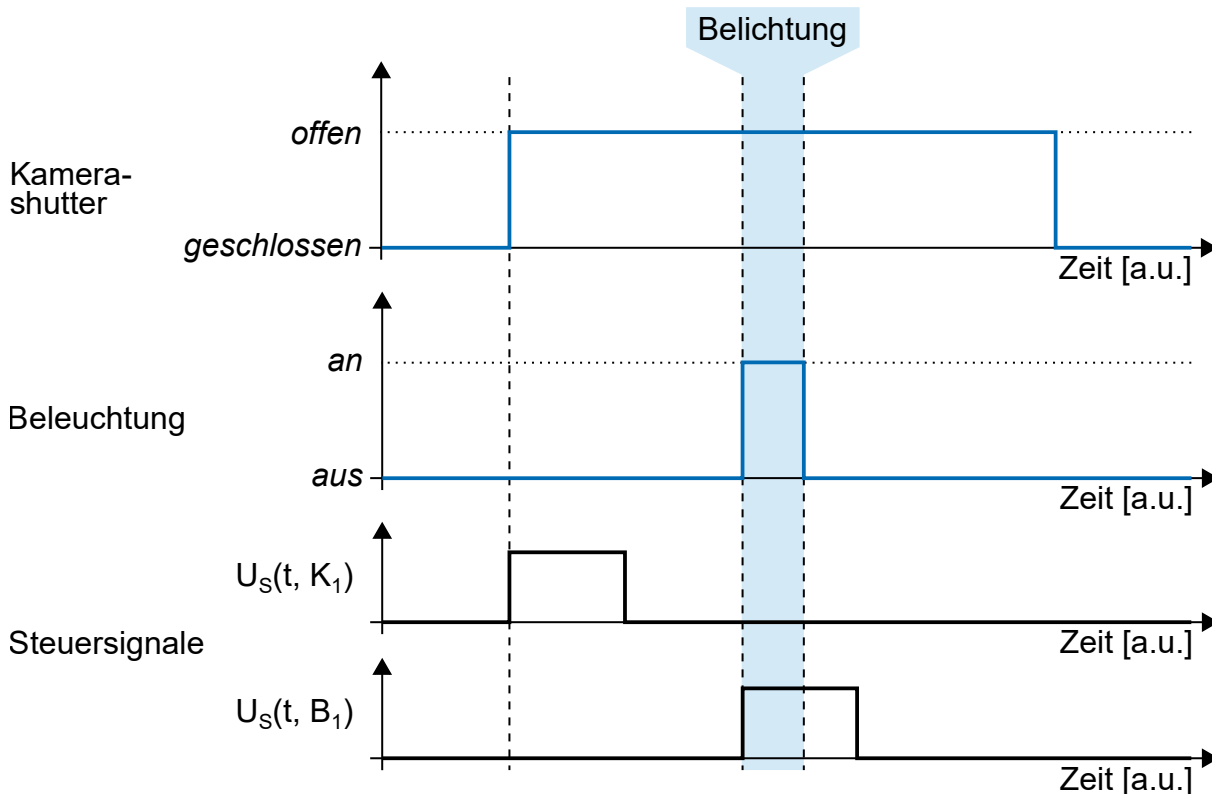


Bild 8.12: Vereinfachte Darstellung der zeitlichen Synchronisierung von Kamera-Shutter und Beleuchtung durch die entsprechenden Steuersignale. [Per19]

Dargestellt ist die Ansteuerung für nur eine Kamera, allerdings gilt diese analog auch für die zweite. Beide Kameras werden zeitgleich ausgelöst und können je nach Art der Ansteuerung mit einer zeitlichen Genauigkeit im unteren Mikrosekundenbereich synchronisiert werden.

Konzeptionell gibt es für synchrone Bildaufnahmen mehrerer Kameras neben der externen Ansteuerung auch die Möglichkeit die sog. Master-Slave-Konfiguration zu nutzen. Dabei triggert die erste Kamera (Master) sowohl die zweite Kamera (Slave) als auch die Beleuchtung (Slave). Diese Konfiguration ist einfach umzusetzen, hat allerdings auch die folgenden Nachteile:

- Die Auslösezeiten sind auf den Mikrosekunden-Bereich limitiert, sodass eine

Genauigkeit im Nanosekunden-Bereich nicht möglich ist.

- Die Schaltung ermöglicht nur ein Delay, wohingegen in der Praxis bei mehreren Beleuchtungsquellen eine individuelle Ansteuerung sinnvoll sein kann.
- Die Hardware kann nicht mehr angepasst werden, sodass das Spannungsniveau vorgegeben ist.

Aus den genannten Nachteilen sowie in Hinblick auf eine weitere Industrialisierung wird eine elektronische Schaltung zur individuellen Ansteuerung entwickelt. Diese ermöglicht Schaltsignale für die Kameras als auch die Beleuchtung individuell einzustellen. So kann z. B. eine definierte Verzögerung zwischen der Kamera und der Beleuchtung sowie das Spannungsniveau entsprechend eingestellt werden. Darüber hinaus ist die Schaltung einfach zu miniaturisieren und kann ohne Bindung an Lizenzbedingungen anderer Hersteller genutzt werden.

Für diese Synchronisierung wird eigens eine Platine mit FPGA realisiert, sodass Schaltzeiten im zweistelligen Nanosekundenbereich individuell konfigurierbar sind. Ebenfalls können dadurch die Spannungsniveaus der Signale sowie optische Entkopplungen individuell an die vorhandenen Komponenten angepasst werden.

#### **FPGA-Triggerbox und Zusammenschaltung der Geräte**

Diese Platine bzw. dieses Gerät ist im Folgenden genauer beschrieben und wird als FPGA-Triggerbox bezeichnet. Diese wird vor allem in Hinblick auf die Synchronisierung mit der Blitzlampe realisiert. Die Blitzlampe besitzt ein konstantes Delay von etwa 500 ns sowie einen TTL-Eingang zum Aktivieren des Blitzes. So liegt bspw. bei einer Eingangsspannung von 2,5 V der High-Pegel vor. Die FPGA-Triggerbox ist so ausgelegt, dass sowohl das Delay als auch die notwendige Eingangsspannung zum Aktivieren des Blitzes berücksichtigt sind. Um mögliche Rückstreuungen bzw. Rückkopplungen in die FPGA-Triggerbox zu vermeiden, wird zusätzlich ein Optokoppler verbaut. In Bild 8.13 ist der Aufbau schematisch gezeigt. Die FPGA-Triggerbox fungiert in dieser Geräte-Konfiguration als der Master. Konfiguriert wird der FPGA über einen Mikrocontroller, der wiederum mit dem PC verbunden ist. Über den Mikrocontroller und den FPGA können wiederum für jeden Ausgang individuelle Delays in 20 ns-Schritten eingestellt werden.

Die beiden Kameras, die in diesem Fall als Slave agieren, werden über den jeweiligen GPIO-Port mit entsprechendem Delay aktiviert. Ebenso wird die Blitzlampe

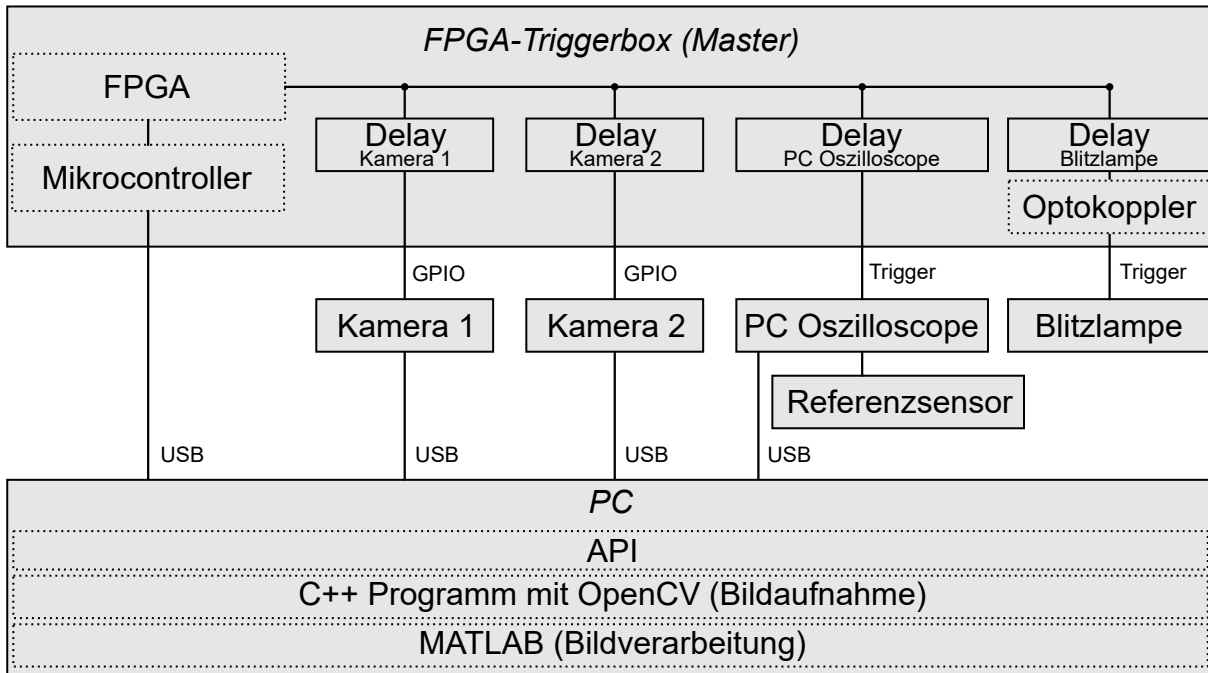


Bild 8.13: Schematische Darstellung der Geräte-Konfiguration.

mit einem definierten Delay aktiviert, vgl. Bild 8.12. In späteren Untersuchungen zum Drehmoment wird zusätzlich der DMS basierte Referenzsensor verwendet. Das analoge Ausgangssignal des Referenzssensors wird mit Hilfe eines PC Oszilloscopes zeitsynchron aufgenommen, digitalisiert und an den PC übertragen.

Der PC ist über die Programmierschnittstelle (API) und Universal Serial Bus (USB) mit den einzelnen Komponenten verbunden. Mit Hilfe des Mikrocontrollers werden die einzelnen Delays konfiguriert und die fortlaufende Bildaufnahme und Blitzauslösung aktiviert. Anschließend werden nach jeder Bildaufnahme die Bilder sequentiell zum PC übertragen und mit Hilfe von OpenCV abgespeichert. Die Bildverarbeitung wird nachgelagert in MATLAB durchgeführt. Der Quellcode ist im Anhang A.9 gegeben. In späteren Versuchen zur Drehmomentenerfassung werden zeitgleich die Daten vom PC-Oszilloskop erfasst, abgespeichert und in der späteren Auswertung mit den Bilddaten zusammen geführt.



### Hochgeschwindigkeitsbeleuchtung

Wie bereits in Kapitel 6.3.1 beschrieben, ist die Beleuchtung in hoher Geschwindigkeit nur durch eine gepulste Beleuchtung mit entsprechend kurzer Pulsdauer und nicht durch die vergleichsweise lange Belichtungsdauer der Kamera möglich. Neben der Pulsdauer muss allerdings auch eine ausreichende Ausleuchtung der Oberfläche gewährleistet werden, sodass die Pulsdauer nicht beliebig klein gewählt werden kann. Dies ist dadurch bedingt, dass die zur Verfügung stehende Leistung begrenzt ist. Entscheidend ist bekanntermaßen die notwendige Pulsenergie. Für die folgenden Versuche wird ein Hochenergie-Blitzlicht der Fa. High-Speed Photo-Systeme genutzt, genauer der sog. Monoflash. Dieser erzeugt einen Lichtblitz mit einer Blitzenergie von bis zu 5 J bei einer Halbwertszeit von  $t_{FWHM} = 545 \text{ ns}$ . Dies entspricht einer immensen Peakleistung von 8 MW. Der Lichtblitz mit einer räumlichen Ausdehnung von etwa  $1 \text{ mm}^3$ , wird mit Hilfe von jeweils einer Kollimationsoptik in zwei flüssigkeitsgefüllte Lichtwellenleiter der Lumatec GmbH eingekoppelt. Durch diese optische Trennung des Blitzes, wird ein nahezu perfekt gleichzeitiger Lichtblitz in den Illuminationsport der beiden Objektive eingekoppelt und somit zur Bildaufnahme genutzt.

In Bild 8.14 ist das Triggersignal zum Aktivieren der Kameras gezeigt, das von der FPGA-Triggerbox erzeugt wird. Zum Zeitpunkt Null steigt die erfasste Spannung auf etwa 5 V. Dies aktiviert die Bildaufnahme für eine vorher festgelegte Belichtungszeit. Nach etwa  $1,1 \mu\text{s}$  fällt die Spannung wieder auf etwa 0 V. Dies deaktiviert allerdings nicht die Bildaufnahme, da diese durch die Belichtungszeit vorgegeben ist.

In Bild 8.15 ist der vergleichsweise langsame Anstieg des Triggersignals für die Blitzlampe dargestellt, das ebenfalls von der FPGA-Triggerbox erzeugt wird. Das Triggersignal ist durch ein Delay auf der Zeitachse in positiver Richtung verschoben, sodass die Kameras bereit sind zur Bildaufnahme. Der Blitz wird etwa nach  $0,8 \mu\text{s}$  ausgelöst, was an der Auswirkung des elektromagnetischen Pulses (EMP) zu erkennen ist. Der tatsächliche Lichtblitz erreicht das Intensitätsmaximum allerdings erst weitere  $0,5 \mu\text{s}$  später. Dies ist in Bild 8.16 zu sehen. Dieser Spannungsverlauf ist mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitsdiode am Ende einer Faser aufgenommen. Darüber hinaus ist in blau die oben genannte Halbwertsbreite  $t_{FWHM} = 545 \text{ ns}$  des Lichtblitzes eingezeichnet. Innerhalb dieser Zeit wird der Großteil der Photonen emittiert, die zur Bildaufnahme beitragen. In allen drei Bildern von 8.14 bis 8.16 ist die Auswirkung des EMP zu sehen, was in der Entwicklung der FPGA-Timerbox berücksichtigt werden musste. Aufgrund der hohen Blitzenergie und den hohen zuschaltenden Spannungen im inneren der Blitzlampe kann die Lampe nur alle 4 s ausgelöst werden und muss

## 8 Evaluation und Anwendung

nach 20 Auslösungen für 30 s abkühlen, was ebenfalls sowohl bei der Entwicklung als auch der Versuchsdurchführung berücksichtigt wurde.

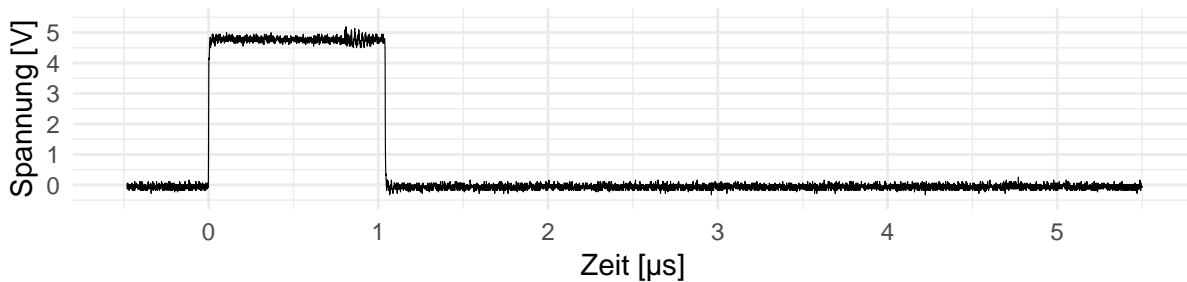


Bild 8.14: Triggersignal für die Kameras.

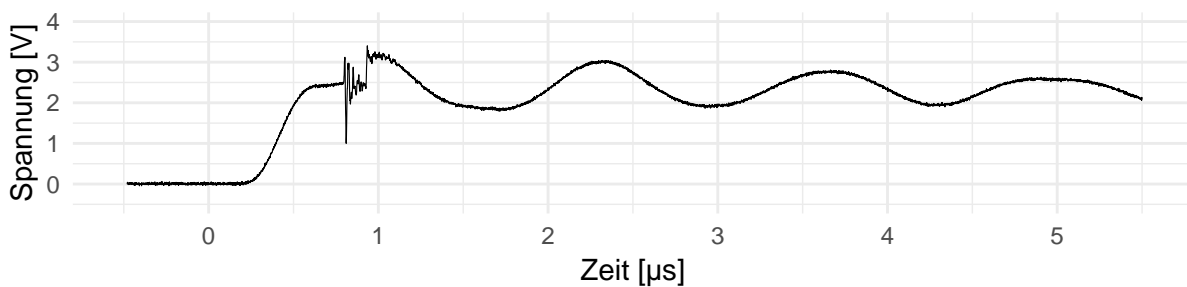


Bild 8.15: Triggersignal für die Blitzlampe.

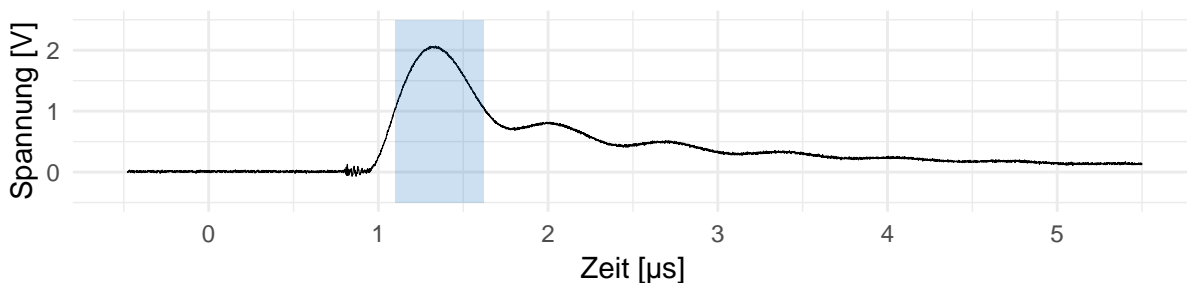


Bild 8.16: Zeitlicher Verlauf der Blitzlampen-Strahlungsintensität.

### 8.3.2 Vorversuch in der Rotation

#### Ziel

In der oben genannten theoretischen Abschätzung soll mit Hilfe der Blitzlampe eine ausreichend scharfe Bildaufnahme bei Drehzahlen von über  $10\,000\text{ min}^{-1}$  möglich sein, siehe Bild 8.11. In der folgenden Untersuchung wird mit Hilfe eines Motorenprüfstandes die Messung bei verschiedenen Drehzahlen durchgeführt und untersucht, ob eine scharfe Bildaufnahme während der Rotation möglich ist und bis zu welcher Drehzahl dies gilt.

### Experimenteller Aufbau und Durchführung

Im Vergleich zu den vorherigen Versuchen, wird hier die beschriebene Blitzlampe mit den Lichtwellenleitern anstatt der LEDs genutzt. Die Blitzauslösung sowie die Synchronisierung mit den Kameras wird durch die FPGA-Triggerbox gesteuert. Die FPGA-Triggerbox wiederum wird durch das Laptop in C++ parametrisiert und aktiviert. Die Versuche werden mit Hilfe von luftgekühlten Elektromotoren (Drehstrom-Asynchronmaschinen) durchgeführt, siehe Bild 8.17. Für die Untersuchung wäre zwar nur ein Motor notwendig, um aber den Aufbau für die weiteren Versuche nicht modifizieren zu müssen, wird nur der erste Elektromotor elektronisch angesteuert, sodass der zweite mitrotiert. Der Drehmoment-Referenzsensor sowie das PC Oszilloskop sind in diesem Versuch nicht eingeschaltet. Die Kameras sind auf die Welle gerichtet, die wiederum über eine Metallbalgkupplung mit dem Motor verbunden ist. Im Stillstand werden zunächst beide Kameras hinsichtlich des Abstandes justiert und der Schwellwert jeweils kalibriert. Anschließend wird in  $100 \text{ min}^{-1}$ -Schritten die Drehzahl von Null bis  $1000 \text{ min}^{-1}$  erhöht. Die Drehzahl von  $1000 \text{ min}^{-1}$  stellt dabei die Obergrenze des Prüfstands dar, sodass darüber hinaus keine Versuche durchgeführt werden können. Die Drehzahlen werden jeweils randomisiert angefahren und je Drehzahl 20 Bilder von beiden Kameras aufgenommen.

### Ergebnis

Die aufgenommenen Bilder sind scharf, aber im Vergleich zu den vorherigen Bildern mit LED-Beleuchtung dunkler und zugleich auch ungleichmäßiger ausgeleuchtet. Eine wiederholte Justage half ebenso wenig wie das Entfernen des Illuminationports, der das eingekoppelte Licht durch ein Milchglas zwar homogenisiert aber auch abschwächt. Aufgrund dessen wird die in Kapitel 4.3.2 beschriebene Bildverarbeitung angepasst. Die bisherige Bildverarbeitung kann mit dem statischen Schwellwert nur noch einen Bruchteil der Bilder decodieren, weil die zuvor festgelegten Grenzwerte bei weitem überschritten werden. Eine einmalige Anpassung des Schwellwerts hat keinen signifikanten Einfluss, sodass ein dynamischer Schwellwert sowie eine Funktion zur Reduzierung der ungleichmäßigen Beleuchtung mit Hilfe eines Strukturelements implementiert wird, siehe Programmcode im Anhang A.9.

In Bild 8.18 ist die Anzahl der erfolgreichen Decodierungen je Kamera für die jeweilige Drehzahl dargestellt. Beide Kameras können bis zur Motorgrenzdrehzahl von  $1000 \text{ min}^{-1}$  erfolgreich Bilder aufnehmen. Bei Kamera 1 ist kein Drehzahl abhängiger Verlauf erkennbar, sodass das Niveau der erfolgreich decodierten Bilder stets hoch

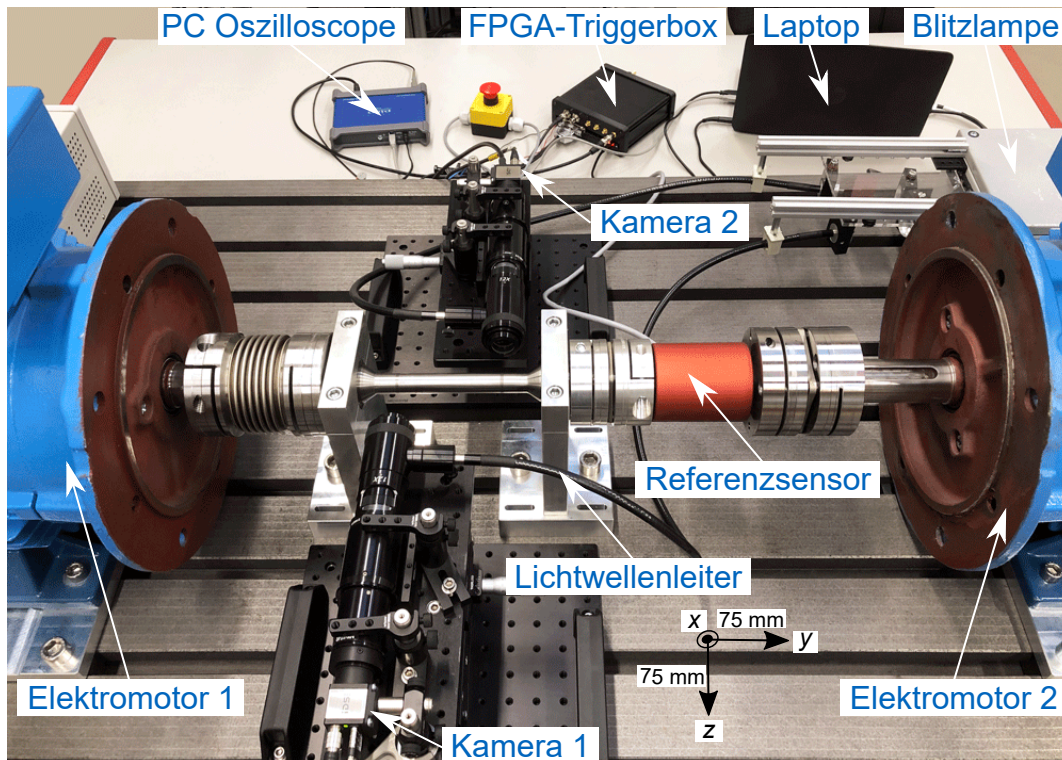


Bild 8.17: Prüfstand mit den zwei Elektromotoren, dem Referenzdrehmomentsensor und dem PC Oszilloskop zur automatisierten Messdatenerfassung.

ist und minimal auf 17 Bilder sinkt. Das nicht alle Bilder erfolgreich decodiert werden können, liegt an der vergleichsweise schlechten Ausleuchtung der Oberfläche. Zwar können mit Hilfe der LEDs auch nicht 100% erfolgreich decodiert werden, aber eine Reduktion auf 85% ist vernachlässigbar. Kamera 2 hingegen zeigt eine leicht sinkende Tendenz zu höheren Drehzahlen und sinkt z. B. auf 10 Bilder bei  $1000 \text{ min}^{-1}$  ab. Dies hängt ebenfalls mit der schlechteren Ausleuchtung zusammen und ist sowohl in den Bildern als auch in der Auswertung erkennbar. Trotz baugleicher optischer Systeme, sind aufgenommene Bilder mit dem Objektiv von Kamera 2 dunkler als die des anderen Objektivs. Ein Vertauschen der Kameras und der Lichtwellenleiter bestätigt dies. Bei höheren Drehzahlen beginnt das Bild bei beiden Kameras leicht unscharf zu werden, sodass bei ungleichmäßiger und vergleichsweise dunkler Ausleuchtung bei Kamera 2 die Bildverarbeitung nicht erfolgreich abläuft. Diese Reduktion auf eine Erfolgsquote von etwa 50% ist deutlich, kann aber nicht ohne weiteres verbessert werden. Somit wird für die folgenden Versuche die Anzahl der aufzunehmenden Bilder erhöht und die Anzahl der Versuchsreplikation auf drei festgelegt, um diesem Sachverhalt bestmöglich entgegen zu wirken.

Trotz der niedrigen Gesamterfolgsquote im Vergleich zur LED-Beleuchtung ist hier

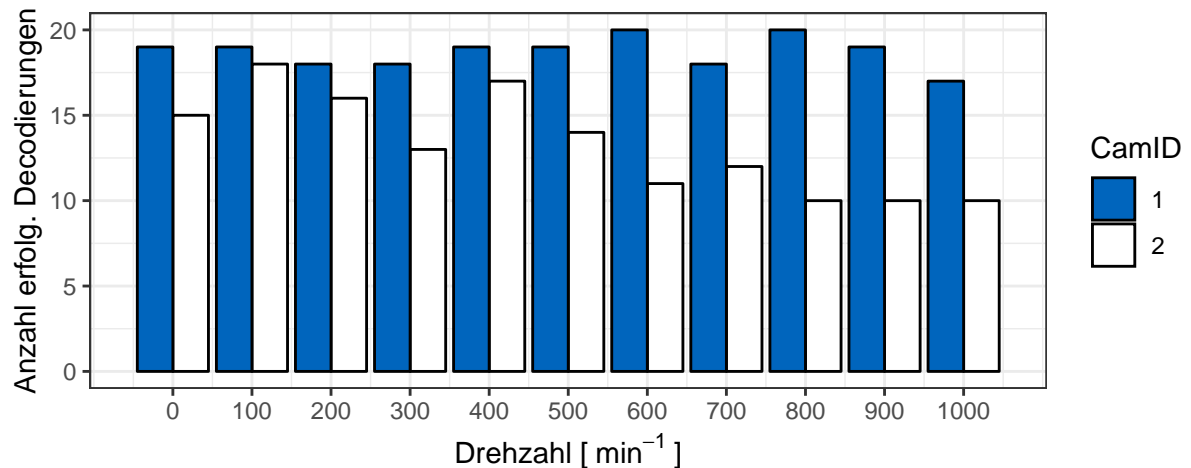


Bild 8.18: Mit einem Motor wird die Welle ohne anliegendem Drehmoment angetrieben und bei unterschiedlichen Drehzahlen bis 1000 min<sup>-1</sup> getestet.

gezeigt, dass eine Bildaufnahme in der Rotation bei verschiedenen Drehzahlen und Vibration durch die Bewegung des Systems möglich ist, sodass im nächsten Schritt die Genauigkeit der Drehmomentmessung untersucht wird. Wichtig zu beachten ist, dass für die erfolgreiche Messung des Drehmoments beide absoluten Drehwinkel gleichzeitig erfolgreich decodiert werden müssen.

### 8.3.3 Untersuchung des Drehmoments in der Rotation

#### Ziel der Untersuchung

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie groß die Messabweichungen bei der Drehmomentmessung in einem industriellen Kontext sind. In Kapitel 7.3 ist die Messabweichung bereits für ein statisches System untersucht und charakterisiert.

#### Experimenteller Aufbau und Durchführung der Untersuchung

Zur Untersuchung wird der Referenzdrehmomentsensor in einen Prüfstand mit zwei Servolamellenkupplungen verbaut, siehe Bild 8.17. Die Motoren sind über die Synchronumrichter in einem Zwischenkreis gekoppelt, sodass die überschüssige Bremsenergie zurück ins System gespeist wird und nicht zurück ins Netz gespeist oder in Wärme umgewandelt wird. Mit Hilfe der Motoren kann problemlos ein Drehmoment bis 100 Nm erzeugt werden. Das Drehmoment wird dabei über die Drehzahldifferenz eingestellt. Zum Besseren Verständnis der zu erwartenden Genauigkeit des erzeugten Drehmoments wird der Prüfstand zunächst charakterisiert.

## 8 Evaluation und Anwendung

In diesen Vorversuchen hat sich die Ausgangsdrehzahl von  $n_0 = 500 \text{ min}^{-1}$  als sinnvoll erwiesen, da dann z. B. die Kühlung durch die mitrotierenden Lüfter ausreichend groß ist und ein vergleichsweise stabiles Drehmoment erzeugt wird. Zugleich wird die ordnungsgemäße Messdatenerfassung des digitalen Oszilloskops geprüft sowie das Delay mit Hilfe einer Photodiode parametrisiert. Das Zeitfenster der Datenaufnahme wird so gewählt, dass die aufgenommenen Daten denen dem blauen Bereich aus Bild 8.16 gleichen. Zwar ist der EMP auch in den Daten des digitalen Oszilloskops zu sehen, allerdings liegt dieser zeitlich vor der eigentlichen Messung, sodass die Daten dahingehend nicht verfälscht werden.

Zur Untersuchung des Drehmoments in der Rotation wird ausgehend von einer Drehzahl  $n_0 = 500 \text{ min}^{-1}$  die Differenz zwischen den beiden Motordrehzahlen schrittweise erhöht. Durch diese Differenz werden quasi-statische Momente zwischen 0 N m und etwa 75 N m erzeugt. Die Versuche werden - wie üblich - in randomisierter Reihenfolge der Drehzahl durchgeführt. Je Drehzahl werden in drei Durchläufen je 120 Messungen aufgenommen, also 360 in Summe. Jede Messung besteht dabei aus zwei Bildern der Oberfläche mit einer MPR-Codierung sowie dem Drehmoment des Referenzsensors. Nach der Versuchsdurchführung werden die aufgenommenen Bilder mit Hilfe von MATLAB ausgewertet und mit den Daten des Referenzsensors zusammengeführt.

### Ergebnisse der Untersuchung

Die vom Referenzsensor ermittelten quasi-statischen Drehmomente sind in Bild 8.19 dargestellt. Das Drehmoment steigt linear mit ansteigender Drehzahldifferenz der Motoren auf bis zu  $(73,1 \pm 1,7) \text{ N m}$ . Zur besseren Veranschaulichung ist die Regressionsgerade eingezeichnet. Die Messwerte weichen leicht von dieser ab, was auf Regelungsungenauigkeiten der Motoren zurück zu führen ist. Diese minimale Abweichung kann aber vernachlässigt werden, da die Messungen gemittelt verglichen werden. Ebenfalls ein Indiz für Ungenauigkeiten ist die Standardabweichung die zum Großteil systembedingt und nicht auf Messfehler zurückzuführen sind.

Die ermittelten Messwerte der optischen Winkeldifferenzmessung sind in Bild 8.20 dargestellt. Neben den ermittelten Verdrehwinkeln ist auch das daraus abgeleitete Drehmoment gegeben. Ähnlich wie beim Referenzsensor steigt der Verdrehwinkel bzw. das Drehmoment mit ansteigender Drehzahldifferenz der Motoren. Der maximale Verdrehwinkel liegt bei  $(0,41 \pm 0,06)^\circ$  und entsprechend das maximale Drehmoment bei  $(65,6 \pm 8,8) \text{ N m}$ . Da alle Messwerte unter Berücksichtigung der

Standardabweichungen auf der Regressionsgraden liegen, geben diese den Verlauf gut wieder. Allerdings sind die Standardabweichungen deutlich größer als die des Referenzsensors, was in diesem Fall auf das Messsystem zurückzuführen ist. Im Mittel ist die Standardabweichung beim Referenzsensor  $1,9 \text{ Nm}$  wohingegen beim optischen System die Standardabweichung  $0,05^\circ$  bzw.  $8,4 \text{ Nm}$  ist. Diese Differenz ist auch optisch anhand des grau eingezeichneten Konfidenzintervalls zu erkennen, das bei letzterem deutlich größer ist. Auch liegt z.B. die Regressionsgrade aus Bild 8.19 innerhalb des Konfidenzintervalls, sodass diese Messwerte den Verlauf gut wiedergeben.

Für einen quantitativen Vergleich ist in Bild 8.21 die absolute Abweichung zwischen beiden System gegeben. Die Abweichung variiert zwischen  $-9,6\%$  und  $11,3\%$ . Diese Abweichung zeigt, dass das optische Messsystem ein Drehmoment in der Rotation mit einem Fehler von etwa  $11\%$  erfassen kann und somit die **generelle Machbarkeit nachgewiesen** ist. Im Vergleich zur Winkeldifferenzbestimmung im Stillstand ist die Genauigkeit in Hinblick auf die Standardabweichung etwa  $3,5$  mal so groß, vgl. Kapitel 5.2. Die Ursachen sind bis jetzt nicht abschließend geklärt, sodass an dieser Stelle nur Vermutungen geäußert werden können. Als ein Einfluss ist die Vibration zu nennen, die zu den in der Modellbildung beschriebenen Translationen und Rotationen der beiden Messköpfe führen kann. Betrachtet man die Sensitivität der Freiheitsgerade, so führt am ehesten das Nicken (Rotation um y-Achse) um  $0,1^\circ$  zu einer Winkelveränderung von etwa  $0,4^\circ$  und die Translation um  $0,1 \text{ mm}$  in x-Richtung zu einer Beeinflussung der Winkelmessung von etwa  $0,02^\circ$ . Im Zusammenspiel beider Messköpfe ist eine Verdoppelung der Ungenauigkeit entsprechend möglich. Eine Translation in z-Richtung, die ähnliche Auswirkungen wie die in x-Richtung hat, kann anhand der (scharfen) Bilder ausgeschlossen werden. Ein weiterer Einfluss ist die neuartige und deutlich dunklere Beleuchtung, der allerdings nicht ausreichend abgeschätzt werden kann.

## 8 Evaluation und Anwendung

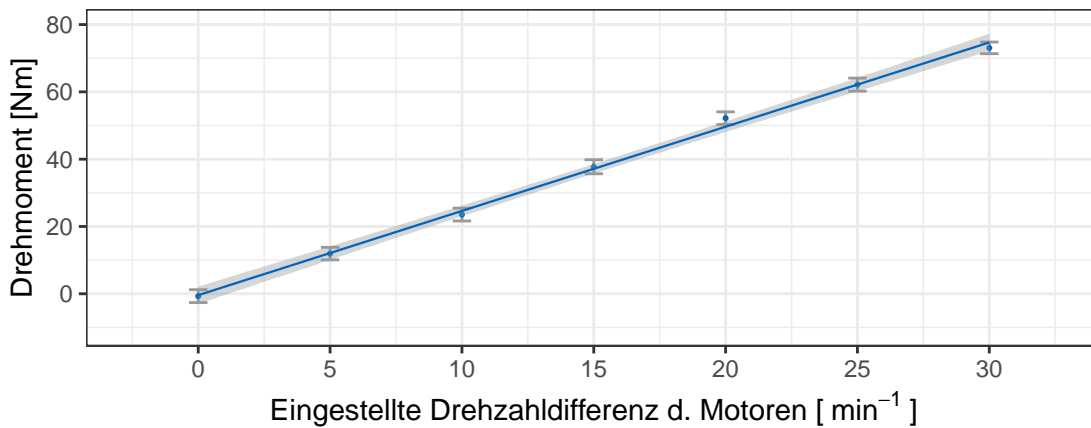


Bild 8.19: Ermittelte Drehmomente des DMS-Referenzsensors bei einer Drehzahl von  $n_{Motor_1} = 500 \text{ min}^{-1}$ . (N = 360 Messungen je Drehzahldifferenz)

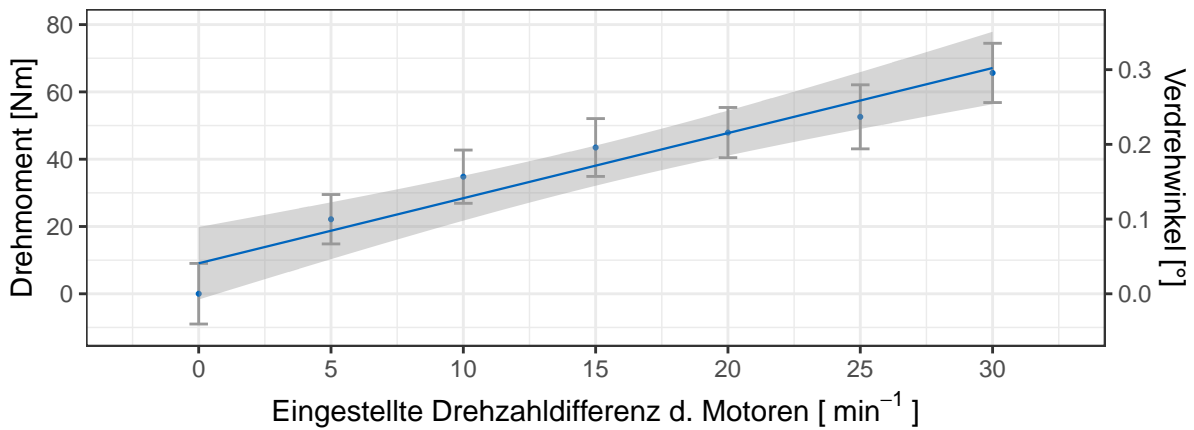


Bild 8.20: Ermittelte (kalibrierte) Drehmomente des optischen Systems bei einer Drehzahl von  $n_{Motor_1} = 500 \text{ min}^{-1}$ . (N = 360 Bilder je Drehzahldifferenz und Kamera)

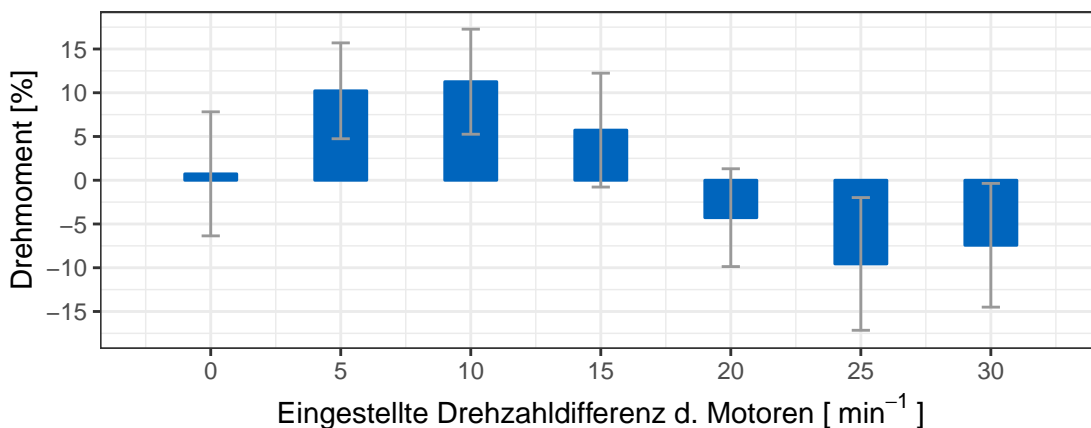


Bild 8.21: Abweichung des optischen Systems vom DMS-Referenzsensor. (N = 360 Messungen je Drehzahldifferenz)



### 8.3.4 Erhöhung des Informationsgehalts durch Datenreduktion

#### Ziel

Im Rahmen einer industrietauglichen Entwicklung ist zu überlegen, wie Kosten für den Sensor eingespart und gleichzeitig die Funktionalität gehalten oder sogar verbessert werden kann. Mögliche Ansatzpunkte zur Kosteneinsparung bieten z. B. das optische System oder die Verwendung von speziell angefertigten Elektronikschaltungen zur Datenverarbeitung, die in Massen gefertigt werden können. Auch ist zu überlegen, wie die Information des absoluten Winkels bzw. des Drehmoments möglichst früh in der Datenverarbeitung erlangt werden kann. Aktuell wird z. B. das komplette 2D-Bild via USB übertragen und erst dort dekodiert. Dieses Bild weißt – in Hinblick auf die enthaltene Information – Redundanz auf. Das 2D-Bild enthält einen 1D-Code, der wiederum einer Winkelinformation entspricht. Die Datenübertragung mit vergleichsweise großer Redundanz, also maximaler Entropie, ist für eine Analyse der Machbarkeit vertretbar, in der Anwendung aber eher undenkbar. Entsprechend wird im Folgenden untersucht, wie groß die Redundanz minimal sein kann, um den Code zu decodieren. Wird der Informationsgehalt frühzeitig erhöht, kann die Geschwindigkeit der Datenverabreichung gesteigert werden. Ziel ist es zusätzlich die dadurch entstehende Messabweichung zu untersuchen.

#### Durchführung der Untersuchung

Ausgehend von 1088 px in x-Richtung der verwendeten Matrixkamera wird schrittweise die Anzahl der genutzten Zeilen reduziert. In der Bildverarbeitung wird diese Datenselektion bzw. Datenreduktion als ROI bezeichnet und typischerweise genutzt, um das Bild auf das Wesentliche zu reduzieren. In diesem Fall wird allerdings die Anzahl der Pixel (2048 px) in y-Richtung unverändert gelassen und somit lediglich die x-Richtung zur Datenreduktion genutzt. Bei der Reduzierung der Kamerazeilen, werden die Zeilen symmetrisch von oben und unten gleichzeitig zur Mitte reduziert, sodass bei 10% der Zeilen nur noch die mittleren 10% genutzt werden. Für die Untersuchung werden  $N = 50$  randomisierte Bilder in zwölf Wiederholungen mit Hilfe des Versuchstandes aus Kapitel 7.2 aufgenommen.

#### Ergebnis der Untersuchung

In Tabelle 8.4 ist die Erfolgsquote der Winkelberechnung, ausgehend von 12 x 50 Bildern, gezeigt. Diese Erfolgsquote entspricht dem Mittelwert der prozentualen Häufigkeit der dekodierbaren Bilder. Dekodierbar meint in diesem Zusammenhang,

Tabelle 8.4: Erfolgsquote der Winkelberechnung in Abhängigkeit der genutzten Zeilen der Kamera. Zusätzlich dargestellt ist das Ablehnungsintervall aus dem Gauß-Test.

| Anzahl genutzter Zeilen | M (SD)        | $K_{0,05}$ |
|-------------------------|---------------|------------|
| 1088 (100 %)            | 98,83 (1,17)  | 94,92      |
| 980 (90 %)              | 98,83 (1,17)  | 94,92      |
| 870 (80 %)              | 98,67 (1,03)  | 94,93      |
| 762 (70 %)              | 98,50 (1,05)  | 94,92      |
| 652 (60 %)              | 98,33 (0,82)  | 94,95      |
| 544 (50 %)              | 98,33 (1,03)  | 94,93      |
| 436 (40 %)              | 96,83 (1,17)  | 94,92      |
| 326 (30 %)              | 95,17 (2,04)  | 94,86      |
| 218 (20 %)              | 88,50 (2,88)  | 94,79      |
| 108 (10 %)              | 69,17 (10,61) | 94,14      |

Hinweis: M = arith. Mittelwert, SD = Standardabweichung,

K = Obere Grenze des Ablehnungsintervalls für  $H_0$ .

dass dem Bild eindeutig ein einziger Drehwinkel zugeordnet werden kann, also kein Fehler vorliegt. Dennoch sind Ungenauigkeiten möglich, die zunächst vernachlässigt werden. Eine Vorselektion findet nicht statt, sodass auch bei allen genutzten Zeilen eine Erfolgsquote von 98,83 % vorliegt und nicht 100 %. Die geforderte Erfolgsquote liegt bei 95 %.

Erkennbar ist, dass bis einschließlich 30 % der Zeilen eine Erfolgsquote von über 95 % erzielt wird. Zur Überprüfung, ob die dargestellten Mittelwerte kleiner sind als die vorgegebene Erfolgsquote, wird ein rechtsseitiger Einstichproben-Gauß-Test<sup>5</sup> durchgeführt. Folgende Hypothesen werden entsprechend aufgestellt:

$$H_0 : \mu \leq \mu_0 = 0,95 \text{ gegen } H_1 : \mu > \mu_0 = 0,95$$

<sup>5</sup>Der Gauß-Test ähnelt dem bekannteren t-Test, setzt aber im Vergleich eine dichotome Grundgesamtheit (Fehler tritt auf bzw. Fehler tritt nicht auf) und zudem eine bekannte Varianz voraus.

Der Gauß-Test ergibt zum Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$  und einer Standardabweichung  $\sigma = 1,17$  ein Ablehnungsintervall von  $K_\alpha = (-\infty, \mu_0 + 1,64 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}) = (-\infty, 95,08)$ . Damit wird  $H_0$  für die Anteile der genutzten Zeilen der Kamera von 100 % bis 30 % zugunsten von  $H_1$  verworfen. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 5 % wird somit nachgewiesen, dass der Schwellwert bei  $\geq 30$  % der genutzten Zeilen im Mittel für die untersuchte Welle nicht unterschritten wird. Somit kann mit nur 30 % der Daten ein Winkel in über 95 % der Fälle berechnet werden. Wie bereits erwähnt, garantiert eine Erfolgsquote von über 95 % nicht alleine einen einwandfreien Betrieb der Winkelberechnung. Die Standardabweichung steigt ab 30 % der genutzten Zeilen ebenfalls an, sodass im Folgenden die einhergehende Ungenauigkeit untersucht wird. Dabei wird die Differenz des ermittelten Winkels mit dem des Originalbildes verglichen.

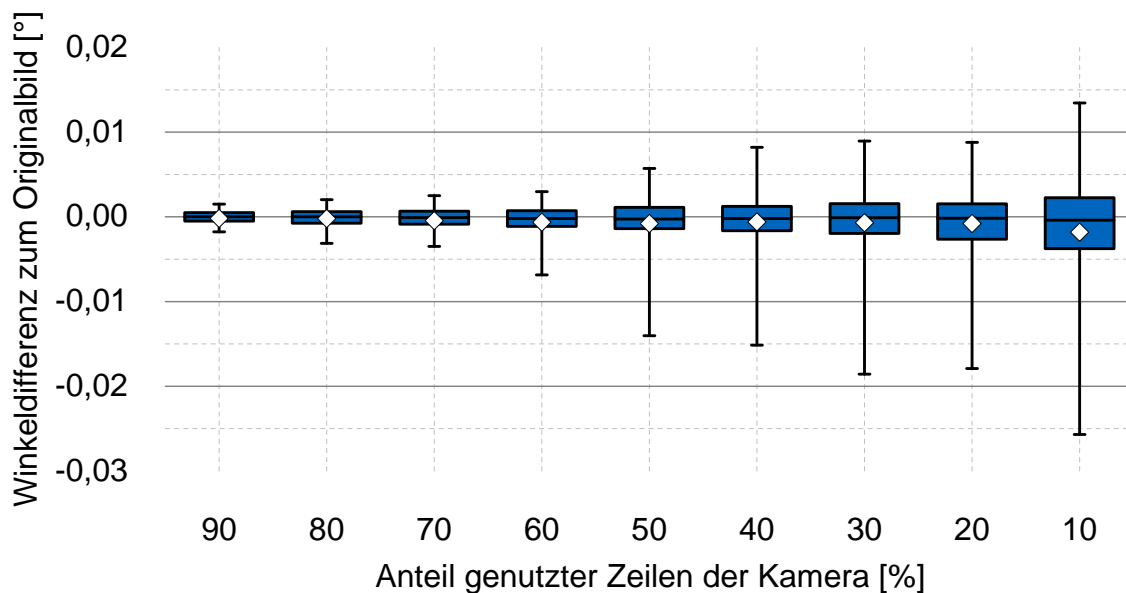


Bild 8.22: Modifizierter Box-Plot zur Darstellung der Winkeldifferenz zum Originalbild bei variierendem Anteil der genutzten Zeilen der Kamera. Die Box zeigt jeweils den Median, sowie das untere und obere Quartil. Die Raute visualisiert die Lage des jeweiligen arithmetischen Mittelwerts. Die Whisker entsprechen den 2,5 % und 97,5 % Quantilen. (N = 600 randomisierte Bilder einer Welle)

In Bild 8.22 ist die Winkeldifferenz anhand von Box-Plots dargestellt. Im Mittel bleibt der bestimmte Winkel, trotz weniger Daten, nahezu gleich. Allerdings streut der Winkel um so mehr, je weniger Zeilen genutzt werden. Dies ist an den Boxen erkennbar, die von links nach rechts stetig größer werden. An den Whiskern ist ebenfalls ersichtlich, dass auch 95 % der Daten mit sinkender Anzahl an Zeilen der Winkel immer weiter

streuen. Die Whisker helfen bei der Interpretation der Daten. Welche Differenz für die jeweilige Anwendung akzeptabel ist, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden, zumal dafür weitere Untersuchungen im Gesamtsystem der Drehmomentmessung notwendig wären.

### 8.3.5 Industrielle Einsetzbarkeit durch Miniaturisierung

Neben der Erhöhung des Informationsgehalts können ebenfalls signifikant Kosten bei einer industriellen Einsetzbarkeit durch eine Miniaturisierung gespart werden. Das Zoom-Objektiv, das bisher verwendet wurde, kann sehr gut für die Machbarkeitsuntersuchung genutzt werden. Für einen Einsatz in der späteren Anwendung ist dies aber undenkbar, sowohl aus Platz- als auch aus Kostengründen. In Bild 8.23 ist eine schematische Darstellung einer integrierten Sensorik in ein Getriebe gegeben. Die Optiken, eine Lichtquelle sowie CMOS-Chips und z. B. ein Opto-Application-specific integrated circuit (ASIC) wären bei einer Weiterentwicklung anzustreben. Eine Einhausung und Abdichtung der Sensorik (zum Schutz vor Öl, Partikeln und ähnlichem) ist nicht dargestellt, wäre in einer realen Umsetzung allerdings notwendig. Ebenso ist sicherzustellen, dass die Auflösung der Sensorik zu der zu erwartenden Torsion der Welle passt.

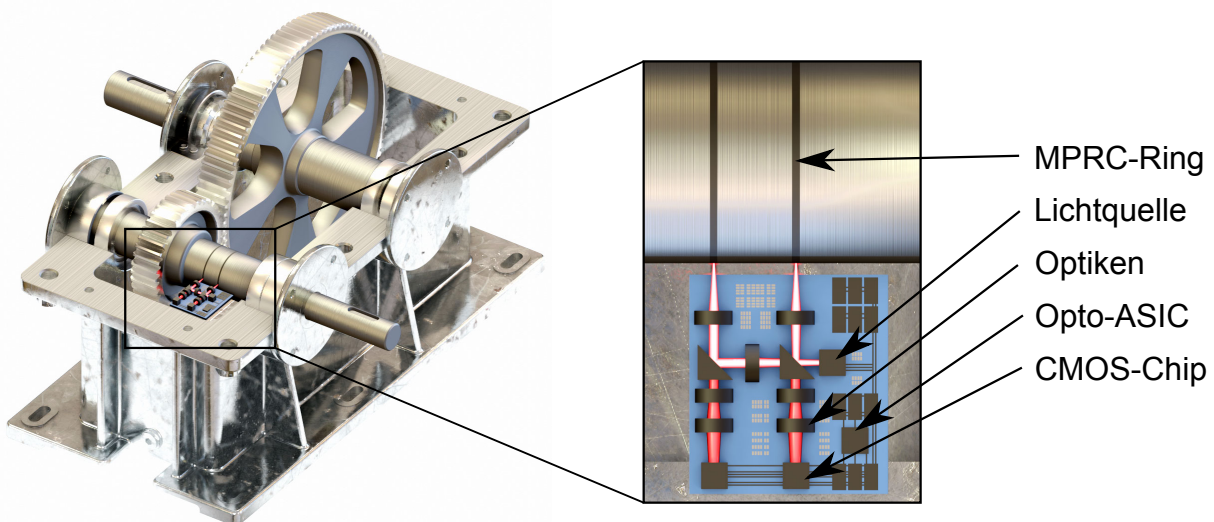


Bild 8.23: Schematische Darstellung einer integrierten Sensorik. (*Hinweis: Das Getriebe wurde für den hier gezeigten Anwendungsfall modifiziert und stammt in der Ursprungs-CAD-Version von Hrn. Hannes Koitz (Grabcad.com).*)

Ein erster Demonstrator eines miniaturisierten Objektivs<sup>6</sup> ist in Bild 8.24 gezeigt.

<sup>6</sup>Dieses Objektiv wurde freundlicherweise und speziell für diese Anwendung von der in-situ GmbH gefertigt.

Dieses Objektiv hat eine Länge von 25 mm und liegt kostentechnisch in der Serienfertigung im zweistelligen Euro-Bereich (unter Berücksichtigung einer gewissen Mindeststückzahl). Bei noch höheren Stückzahlen ist eine Massenfertigung möglich und entsprechend ein noch geringerer Preis denkbar.

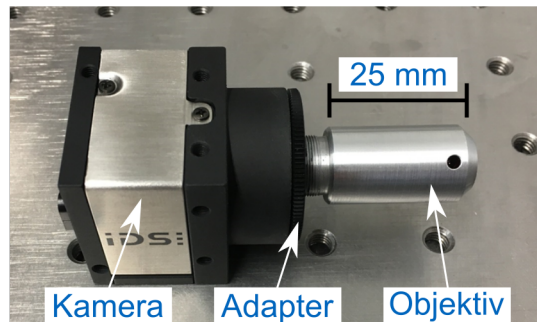


Bild 8.24: Demonstrator eines miniaturisierten Objektivs mit einer Industrie-Kamera.

In Bild 8.25 sind Abbildungen der Oberfläche vor (a) und nach (b) der Bildverarbeitung dargestellt, die mittels des miniaturisierten Objektivs aufgenommen sind. Die Vergrößerung ist im Vergleich zum Zoom-Objektiv kleiner, reicht zur Funktionsdemonstration aber aus. Um die Kosten der Voraentwicklung gering zu halten, wurde bei der Konstruktion des Objektivs zunächst die Beleuchtung nicht berücksichtigt, sodass hier eine zusätzliche LED-Ringleuchte benutzt wird. Das Bild zeigt eine inhomogene Ausleuchtung auf, sowie eine Vignettierung (Abschattung zum Bildrand), die in einer weiteren Entwicklung verbessert werden kann. Nichtsdestotrotz kann mit der Bildverarbeitung der Winkel  $\varphi = 177,99^\circ$  ohne eine Fehlermeldung decodiert werden.

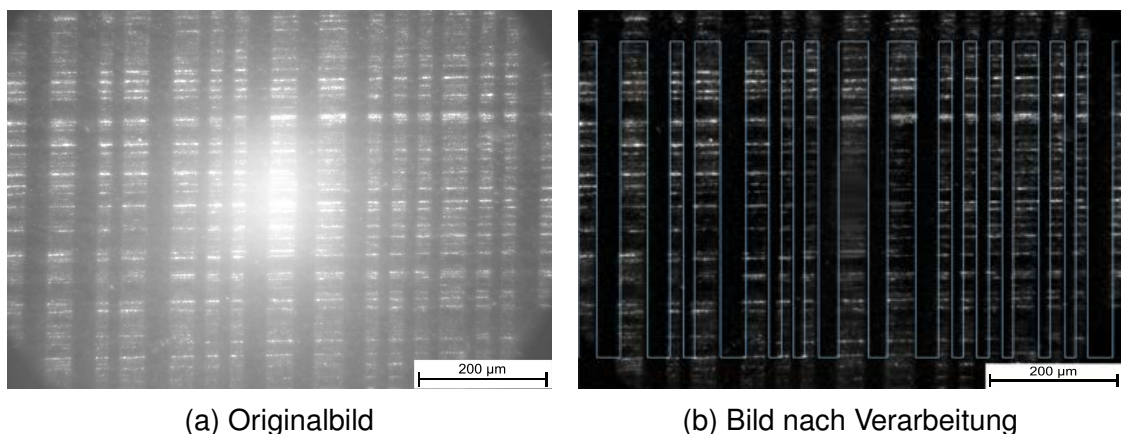


Bild 8.25: Aufnahme der Wellenoberfläche mit miniaturisiertem Objektiv.

### 8.4 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde die wissenschaftliche Frage evaluiert, in der Anwendung untersucht und damit Teilziel 5 erreicht. Mit Hilfe der Tenengrad-Funktion wurde die Schärfe eines Bildes quantifiziert und mit der einhergehenden Winkelabweichung verglichen. Dabei konnte im relevanten Schärfebereich eine systematische Winkelabweichung ermittelt werden, die auf die optischen Eigenschaften des Objektivs zurückzuführen sind. Zusätzlich konnte mit absichtlicher Desjustage des optischen Systems eine relative Abstandsänderung, die durch die Unrundheit der Welle hervorgerufen wird, erfasst werden. In ersten Untersuchungen an einem Prüfstand mit zwei Elektromotoren konnte erfolgreich das quasi-statische Drehmoment mit Hilfe des Winkeldifferenzverfahrens bei einer Drehzahl von  $500 \text{ min}^{-1}$  erfasst werden. Zusätzlich wurden Potentiale aufgezeigt, die bei einer weiteren Industrialisierung berücksichtigt werden könnten.

### 8.5 Nutzen und Grenzen des Messsystems und -verfahrens

#### Nutzen

Mit Hilfe des gezeigten Messsystems können optisch der absolute Drehwinkel sowie die daraus ableitbare Drehwinkeldifferenz bzw. das Drehmoment erfasst werden. Durch die optische Ermittlung der Messgrößen, wird diese durch die Messung an sich nicht beeinflusst bzw. verfälscht, wie dies bei konventionellen Verfahren der Fall ist. Zusätzlich werden mehrere Messgrößen durch ein Messsystem erfasst, wofür bislang unterschiedliche und zum Teil zueinander inkompatible Messsysteme notwendig sind. Konkret kann der absolute Drehwinkel an zwei Positionen, daraus das Drehmoment sowie eine Abschätzung der Abstandsänderung zwischen Optik und Welle anhand der Schärfe ermittelt werden. Denkbar ist dies z.B. für eine Zustandsüberwachung von Wellen und deren Lagerung. Tritt über die Zeit ein Verschleiß von den Lagern auf, kann dies durch das Lagerspiel und der damit verbundenen Abstandsänderung ermittelt werden. Da gleichzeitig die absolute Winkelinformation vorliegt, kann auf die Position des Lagerschadens oder den defekten Wälzkörper zurück geschlossen werden. Ebenso sind keine mechanischen Anbauten zur Messung der beschriebenen Messgrößen notwendig, die z.B. das Trägheitsmoment des Antriebssystems verändern. Das Messsystem wurde anhand

von konventionellen Stahloberflächen getestet, die nicht zusätzlich durch z.B. Polieren für die Bildverarbeitung optimiert sind. Mechanische Modifikationen sind ebenfalls nicht notwendig. Darüber hinaus ist durch das optische Messverfahren die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) gegeben. Eine Kombination bzw. Erweiterung mit weiteren Messverfahren z.B. Streulichtverfahren zur Messung der Rauheit und Welligkeit ist interessant für weitere Untersuchungen, siehe [Lei11].

### **Grenzen**

Die gezeigte Untersuchung zeigt nur den Nachweis der Funktionstüchtigkeit des Messverfahrens. Weitere umfangreiche Entwicklungen und damit Untersuchungen sind somit notwendig, um einen höheren Technologie-Reifegrad zu erreichen. Die resultierenden Stückkosten können für einen solchen Sensor zum aktuellen Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden, da dies maßgeblich von den Anforderungen sowie den jährlichen Stückzahlen abhängt.

Das Drehmoment wird mit Hilfe der Winkeldifferenz ermittelt, was wiederum die zweifache Messung des Winkels bedingt. Zwischen diesen beiden Messstellen muss eine bestimmte Torsionslänge liegen, sodass entweder der Bauraum oder eine Verjüngung, wie dies typischerweise bei DMS-basierten Drehmomentsensoren der Fall ist, vorzusehen sind.

Eine kritische, aber lösbare Herausforderung ist die notwendige Beleuchtung. Diese sollte noch heller, kleiner, schneller und vor allem günstiger sein. Für die Untersuchungen in der Praxis wurde eine Blitzlampe genutzt, die in der Anwendung nicht zu verwenden ist. Ähnliche industriell-verfügbare optische Sensoren zeigen allerdings, dass eine solche Beleuchtung möglich ist. Essentiell ist hier die Entwicklung des gesamten optischen Systems, bei dem von Beginn an die Beleuchtung berücksichtigt ist.

Für den aktuellen Aufbau sind darüber hinaus auch Lasermarkierungen auf der Wellenoberfläche notwendig, die ebenfalls weiter untersucht und entwickelt werden müssen. Bisher wurden z.B. keine Untersuchungen zur mechanischen und chemischen Beständigkeit durchgeführt. Auch ist zu untersuchen, wie diese Markierung unter ökonomischen Gesichtspunkten, zu fertigen ist.





## 9 Zusammenfassung und Ausblick

### Zusammenfassung

Heutige Drehwinkel- und Drehmomentsensoren sind in Antriebssträngen verbaut, die speziell für die Messung modifiziert sind. Die Sensoren funktionieren meist berührend, benötigen viel Bauraum, sind zueinander inkompatibel und zudem teuer. Aktuelle Entwicklungen von Sensoren gehen in Richtung Miniaturisierung und der Fusionierung verschiedener Funktionen. In dieser Arbeit ist der Machbarkeitsnachweis eines neuartigen optischen Messsystems zur Erfassung des absoluten Drehwinkels und Drehmoments dargestellt. Mit Hilfe eines optischen Systems wird der absolute Drehwinkel einer Stahlwelle an zwei Messstellen erfasst. Aus der Differenz der absoluten Winkel, wird das anliegende Drehmoment bestimmt. Das Messverfahren basiert auf zwei optischen Systemen, die jeweils aus einer Kamera, einem Zoom-Objektiv und einer coaxialen Beleuchtung bestehen. Mit Hilfe des Zoom-Objektives wird die Oberfläche der Stahlwelle abgebildet. Auf der Oberfläche ist mit Hilfe eines Laserverfahrens eine im Rahmen dieser Arbeit weiter entwickelte MPR-Codierung aufgebracht, die einem Barcode gleicht. Diese Einspurcodierung ist in Umfangsrichtung umlaufend mit etwa 4000 Markierungen aufgebracht und wird an jeder Position eindeutig einer absoluten Winkelposition zugeordnet.

Die Barcode ähnliche Einspurcodierung wird mit Hilfe einer Schwellwert basierten Bildverarbeitung in MATLAB ausgewertet. Drei verschiedene Fehlertypen unterschiedlicher Ausprägungen sind bei der Entwicklung der Bildverarbeitung berücksichtigt. Vor der Versuchsdurchführung wurde das System mit einem absoluten optischen Referenzdrehgeber kalibriert und die Genauigkeit untersucht. Die Kalibrierung wurde dabei mit Hilfe der LOESS-Funktion durchgeführt und die systematisch, schwankende Abweichung korrigiert. Für die Winkelmessung wurde eine Genauigkeit von  $0,007^\circ$  (Standardabweichung) ermittelt. Dies ist in Hinblick auf die theoretisch ermittelte minimale Winkelgenauigkeit von etwa  $0,002^\circ$  nah an der Grenze.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Das optische Messsystem zur Ermittlung des Drehmoments wurde nach DIN 51309 spezifiziert und entsprechend in drei unterschiedlichen Einbaupositionen untersucht. Das statische Drehmoment konnte zwischen 0 und 100 Nm mit einer Anzeigenabweichung von 0,25 % ermittelt werden.

Neben dem Fähigkeitsnachweis des Messverfahrens wurde die wissenschaftliche Fragestellung nach dem Einfluss der Unschärfe auf die optische Winkelmessung untersucht. Ausgehend von verschiedenen Ursachen-Wirk-Zusammenhängen sind Vorüberlegungen zur translatorischen und rotatorischen Bewegung dargestellt, die zu Unschärfe bei der Bildaufnahme führen. In Hinblick auf die Winkelmessung sind die Translation in x- und z-Richtung sowie die Rotation um die y-Achse signifikant. Bis auf die Translation in z-Richtung (optische Achse) sind die Auswirkungen analytisch beschrieben, sodass diese in Simulationen mit Hilfe eines Gauß- und eines Motion-Kernels und Versuchen weiter untersucht wurden. Eine radiale Translation führt in der Simulation als auch in den Untersuchungen maximal zu einer Winkelabweichung von etwa  $0,02^\circ$ . Bis zu einer Verschiebung des Objektivs von etwa  $\pm 100 \mu\text{m}$  konnte die Einspurcodierung erfolgreich decodiert werden, obwohl die Schärfentiefe laut Datenblatt bei  $10 \mu\text{m}$  liegt. Dieser Sachverhalt konnte in weiteren Untersuchungen durch absichtliche Dejustage des optischen Systems zum Vorteil genutzt werden, um anhand der Unschärfe auf den Abstand zur Wellenoberfläche zu schließen. Dadurch konnte eine gleichzeitige Messung von absoluter Winkelposition und Abstandsänderung durchgeführt werden.

Mit Hilfe eines Motorenprüfstands und einer Hochgeschwindigkeitsblitzlampe wurde das Messsystem in der Anwendung untersucht. Drehmomentmessungen konnten bis zur Grenzdrehzahl des Prüfstands von bis zu  $1000 \text{ min}^{-1}$  durchgeführt werden. Schlussendlich wurde bei einer Drehzahl von  $500 \text{ min}^{-1}$  die generelle Machbarkeit der optischen Drehmomentmessung mit einem Fehler von maximal 11 % nachgewiesen.

### **Ausblick**

Aufgrund des Nachweises der Funktionstüchtigkeit, sowie ersten Untersuchungen im Labor und in Einsatzumgebung, können weiterführende Untersuchungen sowie Investitionsentscheidungen von Sensorherstellern und/oder -anwendern getroffen werden. Als nächstes müsste eine konkrete Einsatzumgebung festgelegt und dafür ein Prototyp hergestellt und ausführlich getestet werden. Funktionale Anforderung an die Umsetzung, die im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht sind, aber in der Konzeption bestmöglich berücksichtigt wurden, sind verschiedene Wellendurchmesser, verschiedene Materialien sowie Umgebungen mit Öl und Staub.

Darüber hinaus bleibt im Rahmen einer Industrialisierung des Sensors, neben der Datenreduktion und -verarbeitung, die Herausforderung bezüglich der Unschärfe. Die Ursachen der Unschärfe sind vielfältig, sodass an dieser Stelle davon ausgegangen wird, dass die Ursachen der Unschärfe nicht komplett vermieden, sondern allenfalls nur verringert werden können. Somit bleibt die Möglichkeit, die Auswirkung der Unschärfe zu vermeiden bzw. zu verringern. Aus technischer und ökonomischer Sicht ist zu entscheiden, welche der folgenden Lösungen oder welche Kombination der folgenden Lösungen umgesetzt wird. Neben dem teilweisen Kompensieren der Unschärfe durch mathematische Transformationen können auch Ansätze aus dem Bereich der Optik gewählt werden. Der Unschärfe kann z. B. durch eine Optik mit einer größeren Schärfentiefe entgegen gewirkt werden. Alternativ und/oder zusätzlich kann das sog. Scheimpflug-Verfahren genutzt werden, bei dem die optische Abbildung in Richtung der optischen Achse leicht verkippt wird. Dadurch gibt es zu jedem Zeitpunkt auf dem Sensor einen Ausschnitt mit einer scharfen Abbildung. Anhand der Position der Schärfe kann dann auch auf den Abstand geschlossen werden. Eine weitere aber technisch aufwendigere Alternative wäre die Verwendung eines Auto-Fokus-Systems zum Nachregeln des Abstandes.

Durch das neuartige Messverfahren sind weitere Untersuchungen und Technologien denkbar, wie bspw. verschleißfreie oder drehwinkelabhängige Drehmomentmessung. Durch die redundante Messung des Drehwinkels sind Anwendungen auch in sicherheitskritischen Bereichen denkbar, da einer Fehlmessung und einem Sensorausfall bei der Winkelmessung entgegen gewirkt wird.



# A Anhang

## A.1 Weitere Drehmomentmessverfahren

Ergänzend zu Kapitel 2.2 sind im Folgenden noch zwei bekannte Messverfahren zur Erfassung von Drehmomenten zusammengefasst:

### A.1.1 Piezoelektrische Sensoren

Die Messung von Kräften und Drehmomenten mit piezoelektrischen Sensoren beruht auf dem piezoelektrischen Effekt. Dabei handelt es sich um die Entstehung einer elektrischen Polarisation in piezoelektrischen Materialien unter dem Einfluss mechanischer Belastung [Gau02, Trä14, Rei16]. Elektrische Ladungen verschiedenen Vorzeichens bilden sich an entgegengesetzten Oberflächen des Materials [GB97, Gau02]. Die an der Oberfläche erzeugte Ladung ist proportional zur Kraft [HS14]. Die Ladung kann aufgrund der niedrigen elektrischen Leitfähigkeit der Piezomaterialien nicht umgehend abfließen, sodass sie mittels Elektroden als Oberflächenladung abgegriffen und als Messwert dargestellt wird [HS14, Trä14]. Man unterscheidet je nach Ausrichtung der Belastungsachse zur polaren Achse des Kristalls zwischen dem longitudinalen oder transversalen piezoelektrischen Effekt und dem longitudinalen oder transversalen Schereffekt [BBB<sup>+</sup>87, Her12, Trä14]. Letzterer kommt bei der Messung von Drehmomenten zum Einsatz. Piezoelektrische Momentsensoren bestehen – wie auch Piezosensoren zum Messen von Kräften – aus einem Gehäuse, in dem sich mehrere piezoelektrische Kristallscheiben befinden, die mit Elektroden in Kontakt sind [Trä14]. Die entstehenden Ladungen werden von den Elektroden aufgenommen und durch eine nachgelagerte Elektronik ausgewertet und zu einem Signal verarbeitet.

Tabelle A.1: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von piezoelektrischen Sensoren.

| Vorteile  | Nachteile   |
|---|---|
| sehr gute Linearität [Gau02, HS14, Kut15]   | nicht für statische Drehmomente geeignet [Dum95, GB97, Gau02, HS14]     |
| aktiv, d.h. kein Energiebedarf bzw. Speisespannung notwendig (allerdings ist Energie für Messwertübertragung notwendig) [Dum95] | gute Isolation der elektrischen Leitungen notwendig [BBB+87]            |
| Langzeitstabilität der Eigenschaften [Kut15]  | thermischer Einfluss auf Sensitivität und das Messsignal [Gau02, Trä14] |
| sehr gute Wiederholgenauigkeit [Gau02]  | Genauigkeit geringer als bei DMS [BBB+87, Dum95]                        |

### A.1.2 Magnetoelastische Sensoren

Der Effekt der Magnetostriktion beschreibt eine Deformation ferromagnetischer Werkstoffe durch den Einfluss von Magnetfeldern. Unter der inversen Magnetostriktion (magnetoelastischer Effekt) versteht man die Änderung der relativen magnetischen Permeabilität unter Einwirkung mechanischer Spannungen. [Dum95, HK07, Rei16]

Magnetoelastische Sensoren werden zur Detektion mechanischer Messgrößen, wie z. B. des Drehmoments, genutzt [BBB+87, Bal91]. Dabei werden die durch die mechanische Beanspruchung hervorgerufenen magnetischen Permeabilitätsänderungen des Messobjekts mittels Induktivitätsänderungen an Messspulen nachgewiesen [Rei16]. Hierzu erzeugt eine mit Wechselspannung versorgte Speisespule (Primärspule) ein magnetisches Wechselfeld. Dieses durchsetzt die Messobjektoberfläche und induziert in den Empfängerspulen (Sekundärspulen) elektrische Spannungen. Die Differenz dieser Spannungen stellt das Messsignal dar [HS14]. Im unbelasteten Zustand des Messobjekts ergibt sich keine Spannungsdifferenz, folglich ist das Messsignal Null. Wird der Messkörper tordiert, ändert sich dessen magnetische Permeabilität proportional zu den Torsionsspannungen [Dum95].

Tabelle A.2: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von magnetoelastischen Sensoren.

| Vorteile  | Nachteile  |
|---|--|
| hohe Genauigkeit von 0,1% [Her12, Kut15]  | Messempfindlichkeit von den magnetischen Eigenschaften des Messobjektmaterials abhängig [Bal91]            |
| hohe Abtastfrequenz in der Signalverarbeitung, somit hohe obere Grenzfrequenzen möglich [Kut15]                             | große magnetoelastische Hysterese von 10% bis 30% bei herkömmlichen Wellenwerkstoffen [Bal91, Dum95, HS14] |
| Störfestigkeit gegenüber Schock, Vibration, Temperatur, Schmutz und Feuchtigkeit ermöglicht breites Einsatzspektrum [Her12] |  |
| berührungsloses und bis 300 °C einsetzbares Messverfahren [Bor16, Rei16]  |  |

## A.2 Temperaturabhängigkeit der Elastizität

Die Versuche wurden alle bei Raumtemperatur durchgeführt, sodass an dieser Stelle der Fall höherer Temperaturen andiskutiert wird. Im Fall von 20 °C beträgt der Schubmodul von niedriglegierten Vergütungsstählen  $G = 81\,000 \text{ N/mm}^2$ . Mit steigender Temperatur sinkt der Schubmodul, sodass dieser bei 100 °C  $G = 79\,071 \text{ N/mm}^2$  ist [Mün04, BT08]. Entsprechend ist die Verdrehung bei maximaler Torsion 0,461 ° (bei 100 °C) bzw. 0,45 ° (bei 20 °C). Diese Veränderung ist im Vergleich zum Messfehler des Messsystem klein, kann aber bei der Berechnung berücksichtigt werden, sofern die Temperaturänderung bekannt ist.

Die temperaturbedingte Längenausdehnung der Torsionslänge von 0,13 mm entspricht einer Veränderung der Verdrehung um 0,001 ° und ist damit vernachlässigbar.

### A.3 Einfluss der gewölbten Oberfläche auf die Schärfe

In diesem Kapitel wird überprüft, ob die gewölbte Oberfläche eine Herausforderung für das Messsystem darstellt.

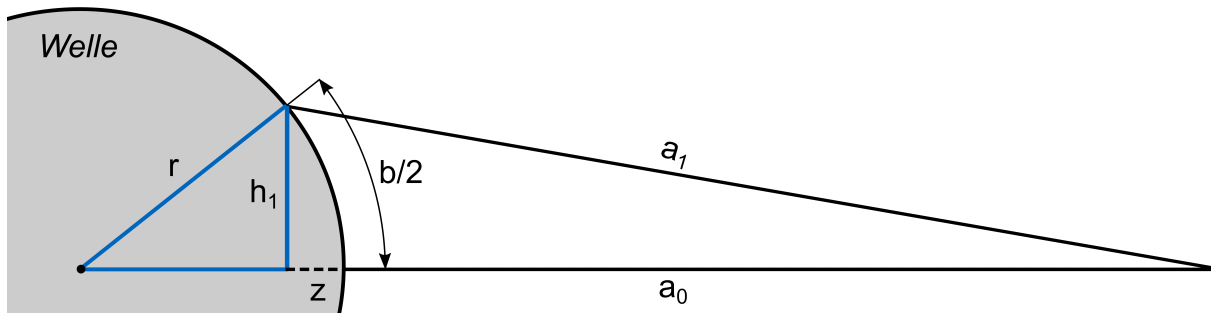


Bild A.1: Zusammenhang zwischen der gewölbten Oberfläche und dem Arbeitsabstand  $a_1$ .

Bei der vorliegenden Vergrößerung ist das Bildfeld auf der Oberfläche  $b = 402,5 \cdot 10^{-6}$  m groß. Aus trivialen Formeln zum Kreis ergeben sich die folgenden Gleichungen für die Segmenthöhe  $z$  und die halbe Kreissehne  $h_1$ :

$$z = r \cdot \left( 1 - \cos \left( \frac{360b}{4\pi r} \right) \right) \quad (\text{A.1})$$

$$h_1 = \sqrt{2rz - z^2} \quad (\text{A.2})$$

$$\Delta a = a_1 - a_0 = \sqrt{(a_0 + z)^2 + h_1^2} - a_0 \quad (\text{A.3})$$

Demnach ergibt sich ein Unterschied vom Arbeitsabstand  $\Delta a = 2,6 \mu\text{m}$  symmetrisch zu beiden Rändern innerhalb jeden Bildes durch die Wölbung der Oberfläche. Da das verwendete Objektiv eine Schärfentiefe von  $DOF = 10 \mu\text{m}$  hat und innerhalb dieser das Bild scharf ist, ist die Wölbung unkritisch und führt zu keiner nennenswerten Unschärfe bei einem Radius von  $r = 10$  mm. Umgekehrt kann durch die genannten Gleichungen auch der kritische bzw. minimal mögliche Radius bestimmt werden. Unter Annahme, dass das gesamte Bildfeld zur Bildverarbeitung benötigt wird, ergibt sich ein minimaler Radius von  $r_{min} \approx 2$  mm. Dieser kann allerdings weiter reduziert werden, wenn nur ein Bildausschnitt oder Unschärfe bis zu einer bestimmten Grenze toleriert wird.



## A.4 Veränderung des Arbeitsabstands durch Rollen der Kamera

Durch das Rollen der Kamera ändert sich der Arbeitsabstand, sodass im Folgenden untersucht wird, ob dies eine Herausforderung für das Messsystem darstellt.

$$\Delta a = a_1 - a_0 = \sqrt{a_0^2 + \Delta y^2} - a_0 = \sqrt{a_0^2 + \tan^2(\varphi_x) \cdot a_0^2} - a_0 \quad (\text{A.4})$$

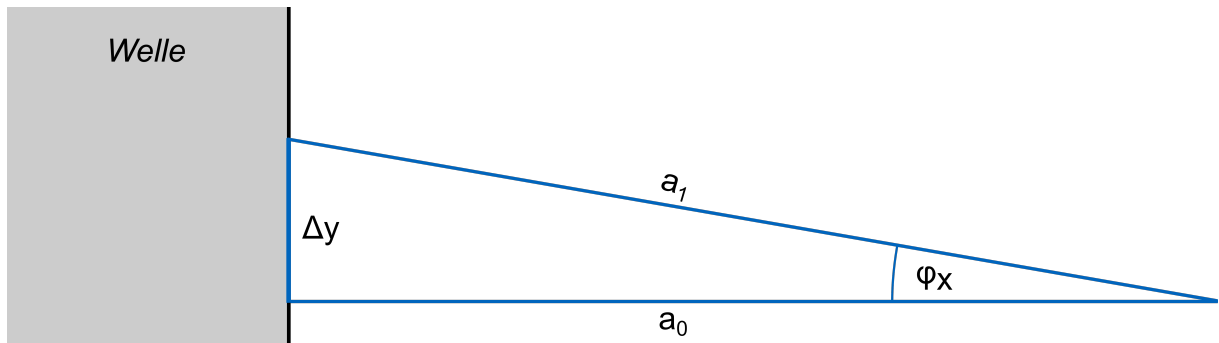


Bild A.2: Arbeitsabstand  $a_1$  beim Rollen der Kamera.

In Gleichung A.4 ist der benötigte Zusammenhang formelmäßig für das Bild A.2 gegeben. Verdreht sich die optische Achse um  $\varphi_x = 0,1^\circ$ , so ändert sich der Arbeitsabstand um  $\Delta a = 0,06 \mu\text{m}$ . Erst ab einer Rotation um  $1,4^\circ$  wird die Schärfentiefe laut Datenblatt erreicht. Allerdings kann begrenzt darüber hinaus trotz Unschärfe der Winkel bestimmt werden, vgl. Kapitel 8.1.1.

## A.5 Veränderung des Arbeitsabstands durch Nicken der Kamera

Durch Nicken der Kamera, also der Rotation um  $\vartheta_y$  verschiebt sich die Objektebene  $h_0$  um die Strecke  $z$ . Die neue Objektebene ist in Bild A.3 mit  $h_1$  betitelt.

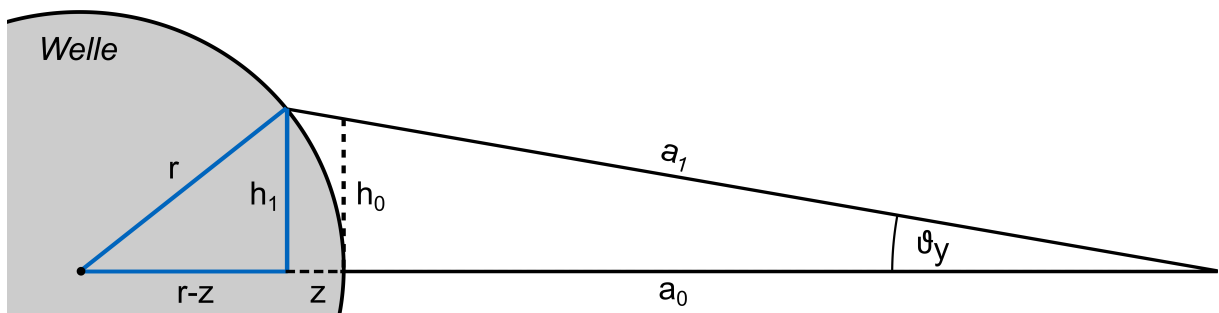


Bild A.3: Arbeitsabstand  $a_1$  beim Nicken der Kamera.

## A Anhang

Die aus der Rotation resultierende Verschiebung  $z$  kann mit Hilfe der Gleichung A.5 berechnet werden:

$$z(\vartheta_y) = \frac{2r - 2a^2 a_0 - \sqrt{(2a^2 a_0 - 2r)^2 - 4a^2(a^2 + 1)a_0^2}}{2(a^2 + 1)} \quad (\text{A.5})$$

mit  $a = \tan^2(\vartheta_y)$

Der Arbeitsabstand zwischen Welle und Kamera ist mit  $a_0 = 37 \text{ mm}$  beschrieben. Aus der Verschiebung kann der neue Arbeitsabstand  $a_1$  und die Differenz  $\Delta a$  zum ursprünglichen Arbeitsabstand bestimmt werden:

$$\Delta a = a_1 - a_0 = \sqrt{(a_0 + z(\vartheta_y))^2 + h_1^2} - a_0 \quad (\text{A.6})$$

Das Nicken der Kamera um  $0,1^\circ$  führt zu einer Arbeitsabstandveränderung von  $0,3 \mu\text{m}$ , sodass dies nicht kritisch ist. Erst ab einer Rotation um  $0,7^\circ$  wird die Schärfentiefe erreicht. Allerdings ist – wie bereits im vorherigen Kapitel – zu erwähnen, dass dies als keine harte Grenze zu verstehen ist, ab der ein Winkel nicht mehr decodiert wird.

Gleichung A.5 kann über die beiden folgenden Formeln hergeleitet werden:

$$h_1^2 + (r - z)^2 = r^2 \quad (\text{A.7})$$

$$\tan(\vartheta_y) = \frac{h_1}{z + w_0} \quad (\text{A.8})$$

## A.6 Einfluss des Gierens auf die Winkelmessung

In Kapitel 5.2 ist der Einfluss der Rotation um die x- und y-Achse auf die Winkelmessung beschrieben. Der Vollständigkeit halber ist an dieser Stelle die verbleibende Rotation um die z-Achse gegeben, siehe Bild A.4a. In Bild A.4b ist beispielhaft ein Bild einer um  $8^\circ$  verdrehten MPR-Codierung gezeigt. Der Einfluss auf die Winkelmessung kann nicht trivial berechnet werden, sodass dies experimentell mit einer Flachprobe untersucht wird. Die Flachprobe wird dabei auf einer Rotationsachse befestigt und in  $0,5^\circ$ -Schritten gedreht. Das optische System ist dabei auf den Drehpunkt der Flachprobe justiert. Die  $0^\circ$ -Stellung entspricht hierbei dem Fall, bei dem die Markierungen senkrecht sind.

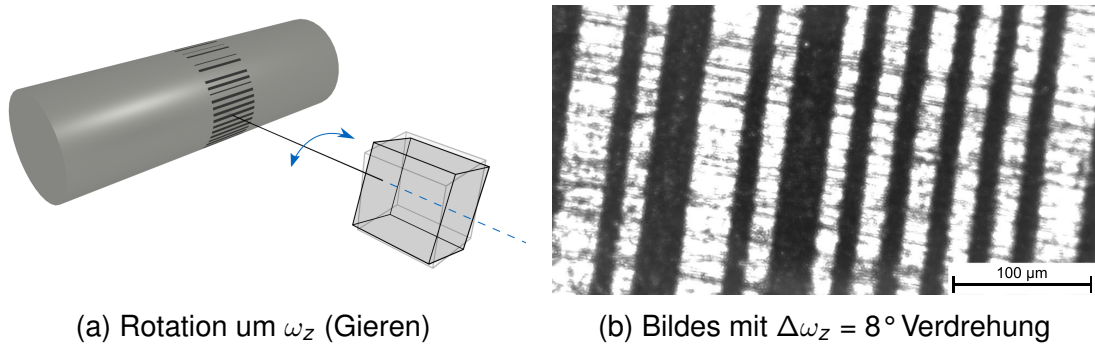


Bild A.4: Veranschaulichung des Gierwinkels.

In Bild A.5 ist die resultierende Winkeldifferenz in Abhängigkeit des Gierwinkels dargestellt. Innerhalb der Toleranz (blauer Bereich) ist keine signifikante Änderung der Winkeldifferenz unter Berücksichtigung der verhältnismäßig großen Standardabweichung der Mittelwerte zu erkennen. Auch außerhalb der Toleranz ist keine nennenswerte Änderung der Winkeldifferenz zu erkennen. Allerdings fällt auf, dass mit größer werdendem Gierwinkel die Standardabweichung ebenfalls größer wird.

Dennoch sollte ein Verkippen in den Versuchen minimal gehalten werden, da die Streuung der Messwerte zu den Rändern z. B. bei einem Gierwinkel von  $2,5^\circ$  größer wird und dadurch die Messgenauigkeit sinkt, vgl. Bild A.5. Dennoch kann ein Drehwinkel bestimmt werden, sodass in einer möglichen Anwendung nicht sofort ein komplettes Versagen beim Gieren des Sensors oder der Markierung zu erwarten ist.

## A Anhang

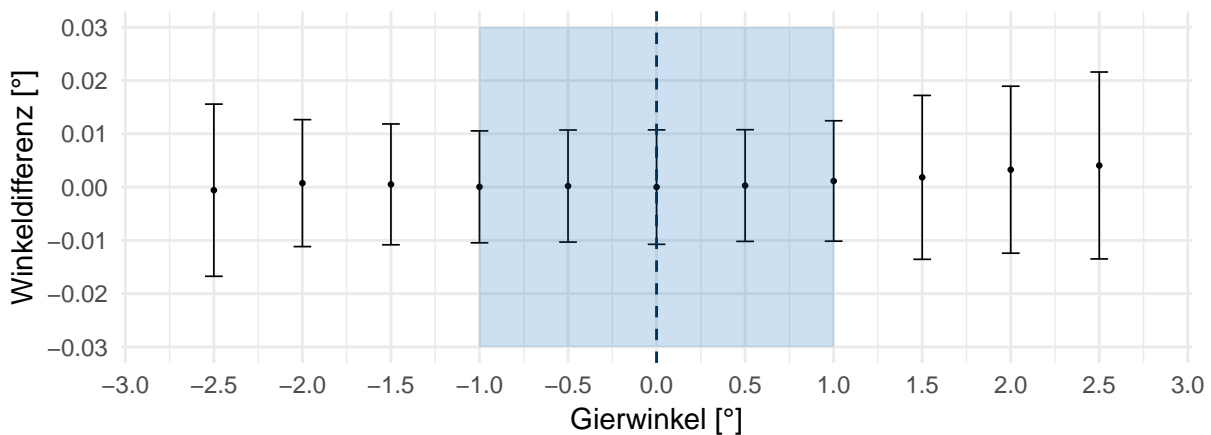


Bild A.5: Exemplarischer Verlauf der Winkeldifferenz bei Variation des Gierwinkels. (n=30 bei sechsmaliger Messwiederholung, Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung)

### A.7 Laserdiode als Beleuchtung

In dieser Arbeit wird eine LED und eine Blitzlampe zur koaxialen Beleuchtung der Wellenoberfläche genutzt. Diese beiden Technologien erzeugen inkohärentes Licht. Denkbar ist allerdings auch die Beleuchtung mit kohärentem, monochromatischem Licht und die Entfernung der Streuscheibe im Illumination Port. Zwar homogenisiert die Streuscheibe die Beleuchtung, sodass eine gleichmäßig ausgeleuchtete Fläche entsteht, allerdings würden gleichzeitig sog. Speckle erzeugt. Diese Speckle enthalten auch Informationen über die abgebildete Oberfläche und insbesondere über die Bewegung dieser, können allerdings nicht mit der in Kapitel 4.3 beschriebenen Bildverarbeitung ausgewertet werden. Somit müsste ein grundverschiedener Ansatz der Bildverarbeitung gewählt und umgesetzt werden.

Eine Abbildung der Wellenoberfläche ohne den Illumination Port und mit einem Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Laser) beleuchtet, ist in Bild A.6 dargestellt. Als Laser wird hier eine kostengünstige Laserdiode verwendet. Die Laserdiode wird im Dauerstrich-Modus genutzt und mit Hilfe von zwei Spiegeln auf den halbdurchlässigen Spiegel im Objektiv geführt. Die Belichtungszeit der Kamera ist auf 1 ms eingestellt. Der Laser hat eine optische Leistung von etwa 1 mW und ist damit mit der LED vergleichbar.

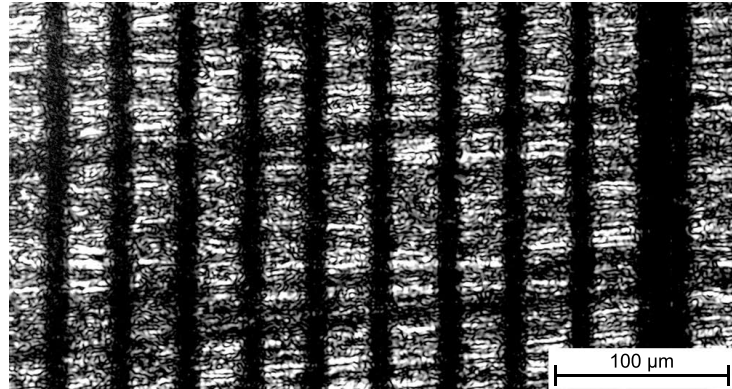
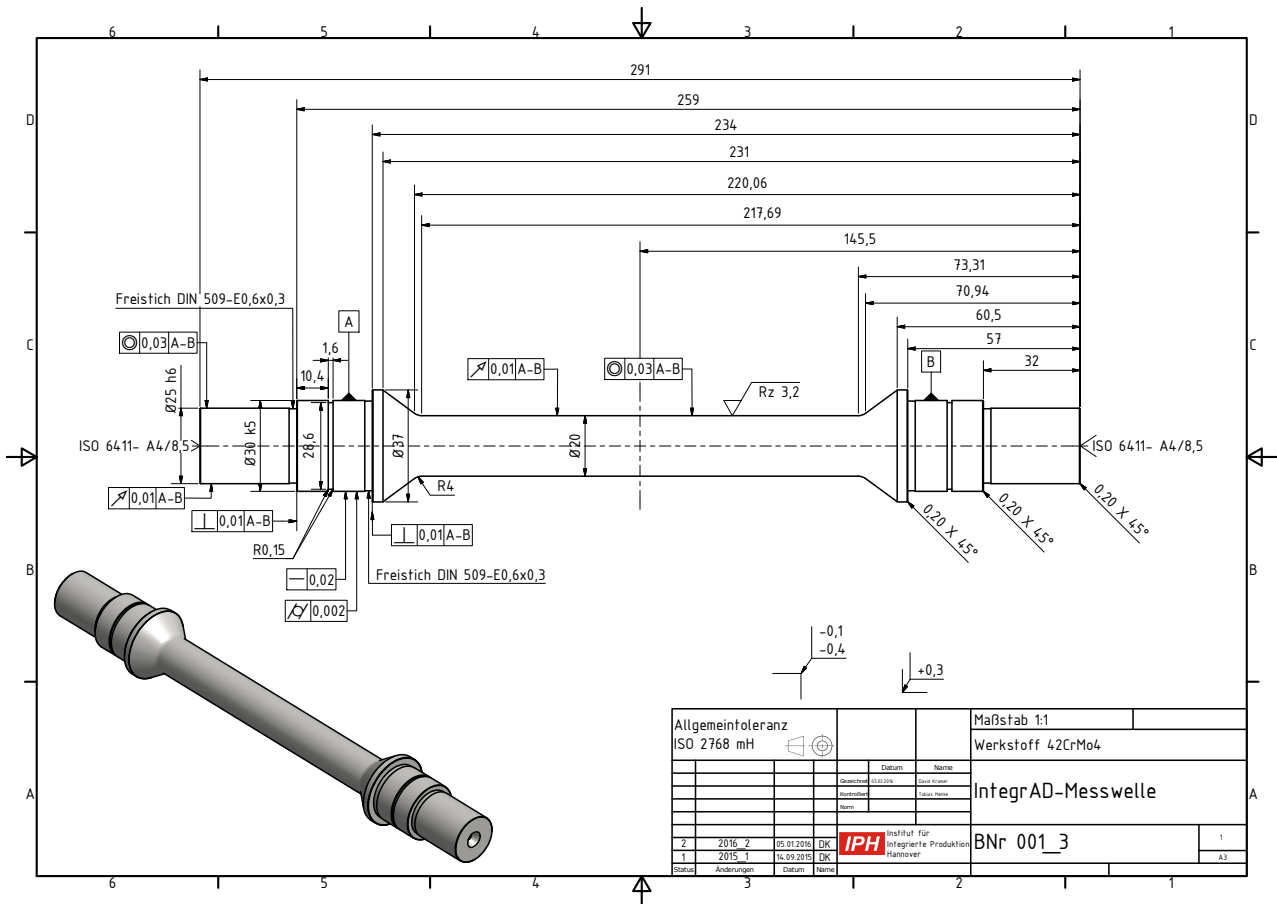


Bild A.6: Beleuchtung der Wellenoberfläche mit Hilfe von Laser-Strahlung.

Für eine Anwendung in der Praxis, mit den genannten Pflicht- und Wunschanforderungen sowie dem gewählten technologischen Ansatz, ist eine Laserdiode oder auch andere Laser, ähnlich wie die LED, eventuell nicht geeignet. Die Gründe liegen hier vor allem in der geringen Lichtintensität pro Zeiteinheit. Zum Vergleich sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Blitzlampe eine optische Peakleistung von  $P_{peak} = 8,8 \text{ MW}$  aufbringt, was von (kostengünstigen) Lasern nicht ohne Weiteres aufgebracht wird. Zudem ist mit temperaturabhängigen optischen Leistungen zu rechnen, die bei der Bildverarbeitung berücksichtigt werden müssten.

## A.8 Konstruktionszeichnung der Messwelle



## A.9 Quellcode der MPRC-Bildverarbeitung

```

1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  % @brief      Image processing for decoding a single image with a MPR-code
3  % @details    Display version for LaTeX without calibration, plots,
4  %             clearing of variables and error handling (try,catch)
5  %
6  % @date       2019/05/12
7  % @author     T. Schneider
8  % @version    3.8
9  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
10
11 % import image
12 Image_2D = imread([input_file_name input_file_extension]);
13
14 % rotate image (optional)
15 if input_file_name(1) == '1'
16     flip_image=flip_image_camera(1);
17 elseif input_file_name(1) == '2'
18     flip_image=flip_image_camera(2);
19 else
20     flip_image=0;
21 end
22
23 % flip image (optional)
24 if flip_image == 1
25     Image_2D = fliplr(Image_2D);
26 end
27
28 % brightness correction (optional)
29 Image_2D=imadjust(Image_2D);
30
31 %% background subtraction (optional)
32 se = strel('rectangle',[20,300]);
33 background = imopen(Image_2D,se);
34 Image_2D=Image_2D - background;
35
36 % transformation from 2D to 1D
37 Image_1D=sum(Image_2D,1);
38
39 % detrend the graph (optional)
40 Image_1D = detrend(Image_1D);
41
42 % normalize the 1D Image (optional)
43 Image_1D = (Image_1D-min(Image_1D))/max(Image_1D);
44
45 % transpose the vector
46 Image_1D_T=transpose(Image_1D);
47
48 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
49 min_Image_1D_T = min(min(Image_1D_T));
50 % correct the y-offset
51 Image_1D_T = Image_1D_T - min_Image_1D_T;
52 % normalize the 1D Image
53 Image_1D_T = Image_1D_T/max(Image_1D_T);
54
55 %% filter signal (optional)
56 windowSize = 10;
57 b = (1/windowSize)*ones(1,windowSize);
58 a = 1;
59 y1 = filter(b,a,Image_1D_T);
60 Image_1D_T = y1;

```

## A Anhang

```
61
62 %% find local maxima (optional)
63 x=(1:max_x)';
64 MinPeakDistance = 100;
65 MinPeakHeight = 0.3;
66 MinPeakProminence =0.1;
67
68 [pks_one,locs_one,widths_one,proms_one] = findpeaks(y1,x,'Annotate','extents
    ','WidthReference','halfheight','MinPeakProminence',MinPeakProminence,'
    MinPeakHeight',MinPeakHeight,'MinPeakDistance',MinPeakDistance);
69
70 %% find local minima (optional)
71 Rev_Image_1D_T=1-y1;
72
73 [pks_zero,locs_zero,widths_zero,proms_zero]=findpeaks(Rev_Image_1D_T,x,'
    Annotate','extents','WidthReference','halfheight','MinPeakProminence',
    MinPeakProminence,'MinPeakHeight',MinPeakHeight,'MinPeakDistance',
    MinPeakDistance);
74
75 %% automatic threshold value calculation (optional)
76 pks_one_sort=sort(pks_one);
77 pks_zero_Re_sort = 1-sort(pks_zero);
78 delta_pks=0;
79 temp=1;
80
81 % delete peaks from data (optional)
82 pks_zero_Re_sort = medfilt1(pks_zero_Re_sort,3);
83
84 while delta_pks <= 0.05
85     delta_pks=pks_one_sort(temp,:)-pks_zero_Re_sort(temp,:);
86     temp = temp + 1;
87 end
88
89 temp = temp - 1;
90
91 if delta_pks > 0
92     if pks_zero_Re_sort(temp,:)+delta_pks/2 >0.1
93         var_threshold = pks_zero_Re_sort(temp,:)+delta_pks/2;
94     else
95         var_threshold = pks_zero_Re_sort(temp,:)+delta_pks/3*2;
96     end
97 end
98
99 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
100 for temp = 1:numel(Image_1D_T)
101     if Image_1D_T(temp) > var_threshold
102         Image_1D_T(temp)=1;
103     else
104         Image_1D_T(temp)=0;
105     end
106 end
107
108 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
109 % allocate memory
110 array_code_one(1,2)=0;
111 array_code_zero(1,2)=0;
112
113 for temp = 1:numel(Image_1D_T)
114     % first element
115     if temp == 1
116         if Image_1D_T(temp) == 1
```



```

117         array_code_one(1,1)=1; % x_position of the first one
118         array_code(1,1)=1;
119         array_code(1,2)=1;
120         array_code(1,3)=0;
121     else
122         array_code_zero(1,1)=1; % x_position of the first zero
123         array_code(1,1)=0;
124         array_code(1,2)=1;
125         array_code(1,3)=0;
126     end
127 % every other element
128     else
129         if Image_1D_T(temp) == 1 && Image_1D_T(temp-1) == 0
130             array_code(end+1,1)=1;
131             array_code(end,2)=temp;
132             array_code(end,3)=temp-array_code(end-1,2);
133         elseif Image_1D_T(temp) == 0 && Image_1D_T(temp-1) == 1
134             array_code(end+1,1)=0;
135             array_code(end,2)=temp;
136             array_code(end,3)=temp-array_code(end-1,2);
137         end
138     end
139 end
140
141 % calculate the width of each mark (shift column 3 one row up)
142 % allocate memory
143 array_code(1,4)=0;
144 % calculate the length of array_code
145 number_of_last_temp = length(array_code);
146
147 for temp = 1:number_of_last_temp
148     % if case for last row
149     if temp == number_of_last_temp
150         array_code(temp,4)=max_x-array_code(temp,2);
151     else
152         array_code(temp,4)=array_code(temp+1,3);
153     end
154 end
155
156 % delete third column
157 array_code=array_code(:, [1,2,4]);
158
159 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
160 % Cut of very small 5 px double bars
161 % find small widths except the first and last marking
162 positions_small_width = find(array_code([1:end],3)<6);
163 temp_number_small_bars = numel(positions_small_width);
164
165 % check if there are double positions
166 if temp_number_small_bars > 1
167     % get pairs (eg. [1;3;4;9;11] -> [3])
168     double_list=intersect(positions_small_width, positions_small_width+1)-1;
169
170     % get doubles of the doubles (not tripples)
171     double_double_list=intersect(double_list, double_list+1);
172
173     c=ismember(double_double_list, double_double_list+1);
174     double_double_list=double_double_list(~c);
175
176     d=~ismember(double_list, double_double_list);
177     % delete the eg. [3] from the list

```

## A Anhang

```
178     corrected_double_list=double_list(d);
179     corrected_double_list=[corrected_double_list;corrected_double_list+1];
180
181     % delete rows
182     for i = 1:numel(array_code)
183         y = array_code;
184         y([corrected_double_list], :) = [];
185     end
186     array_code = y;
187 end
188
189
190 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
191 % Cut of very small 10 px single bars
192 positions_small_width = find(array_code([2:end-1],3)<10)+1;
193 temp_number_onezeroone=numel(positions_small_width);
194
195 % check if there is a small double bar at 2 and 3 under 10 px
196 if temp_number_onezeroone > 1
197     if positions_small_width(1,1)==2 && positions_small_width(2,1)==3
198         array_code(1,3)=array_code(1,3)+array_code(2,3);
199         array_code(4,3)=array_code(3,3)+array_code(4,3);
200         array_code(4,2)=array_code(1,3)+1;
201         array_code(2:3,:)=[];
202     end
203 end
204
205 positions_small_width = find(array_code([2:end-1],3)<10)+1;
206 temp_number_onezeroone=numel(positions_small_width);
207
208 if temp_number_onezeroone > 0
209     for temp = 1:temp_number_onezeroone
210         % check if prev_value could get a negative index
211         if positions_small_width(temp,1)>1
212             % calculate the width of the 00 by adding 010
213             previous_value=array_code(positions_small_width(temp,1)-1,3)
214             ;
215             itself_value=array_code(positions_small_width(temp,1),3);
216             next_value=array_code(positions_small_width(temp,1)+1,3);
217             value_calc=previous_value+itself_value+next_value;
218
219             % correct the value 010
220             array_code(positions_small_width(temp,1)-1,3)=value_calc;
221
222             % delete the 10
223             array_code(positions_small_width(temp,1),:)=[];
224             array_code(positions_small_width(temp,1),:)=[];
225             % correct the position in the position_small_width_array
226             positions_small_width(:,1)=positions_small_width(:,1)-2;
227         end
228     end
229 end
230 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
231 % Cut very small 5 px first single bars
232 if array_code(1,3)<6)
233     array_code(2,3)=array_code(1,3)+array_code(2,3);
234     array_code(1,:)=[];
235     array_code(1,2)=1;
236 end
237
```

```

238 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
239 % Calculate threshold to decide 0 or 00 and 1 or 11
240 width_zero_min=min(array_code_zero);
241 width_zero_max=max(array_code_zero);
242 % check if there is double zero
243 if width_zero_min*1.5<width_zero_max
244     % there is a double zero
245     threshold_zero_zero_zero=width_zero_min+(width_zero_max-width_zero_min)
        /2;
246 else
247     % there is no double zero
248     threshold_zero_zero_zero=NaN;
249 end
250
251 width_one_min=min(array_code_one);
252 width_one_max=max(array_code_one);
253 % check if there is double one
254 if width_one_min*1.5<width_one_max
255     % there is a double one
256     threshold_one_one_one=width_one_min+(width_one_max-width_one_min)/2;
257 else
258     % there is no double one
259     threshold_one_one_one=NaN;
260 end
261
262 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
263 % Calculate if it is 0 or 00 and 1 or 11
264 % array_code(:,4):= 1 means one 0/1, 2 means two 0/1-> 00/11
265 % indices = find(array_code(:,1)==1 & array_code(:,4)==1);
266
267 array_code(:,4)=NaN;
268 % get columns for 1&1s
269 indices_zero=find(array_code(:,1)==0);
270 indices_one=find(array_code(:,1)==1);
271 % get indices for 0er,00er
272 % set array_code_selected(:,4)= 1 --> 0 and 2 --> 00
273 if isnan(threshold_zero_zero_zero) == 1
274     % if no double marking exist
275     array_code(indices_zero,4)=1;
276 else
277     % if double marking exist
278     indices_single_zero=indices_zero(find(array_code(indices_zero,3)<
        threshold_zero_zero_zero));
279     indices_double_zero=indices_zero(find(array_code(indices_zero,3)>=
        threshold_zero_zero_zero));
280     array_code(indices_single_zero,4)=1;
281     array_code(indices_double_zero,4)=2;
282 end
283
284 % get indices for 1er,11er
285 % set array_code_selected(:,4)= 1 --> 1 and 2 --> 11
286 if isnan(threshold_one_one_one) == 1
287     % if no double marking exist
288     array_code(indices_one,4)=1;
289 else
290     % if double marking exist
291     indices_single_one=indices_one(find(array_code(indices_one,3)<
        threshold_one_one_one));
292     indices_double_one=indices_one(find(array_code(indices_one,3)>=
        threshold_one_one_one));
293     array_code(indices_single_one,4)=1;

```

```

294     array_code(indices_double_one,4)=2;
295 end
296
297 %%%%%%%%%%%
298 % find single zeros
299 indices = find(array_code([2:end-1],1)==0 & array_code([2:end-1],4)==1);
300 indices = indices+1;
301 array_code_zero_single=array_code(indices,3);
302 % find double zeros
303 indices = find(array_code([2:end-1],1)==0 & array_code([2:end-1],4)==2);
304 indices = indices+1;
305 array_code_zero_double=array_code(indices,3);
306 % find indices and width for single ones in array_code
307 indices = find(array_code([2:end-1],1)==1 & array_code([2:end-1],4)==1);
308 indices = indices+1;
309 array_code_one_single=array_code(indices,3);
310 % find double ones
311 indices = find(array_code([2:end-1],1)==1 & array_code([2:end-1],4)==2);
312 indices = indices+1;
313 array_code_one_double=array_code(indices,3);
314
315 %%%%%%%%%%%
316 % extract the image_code
317 length_array_code=length(array_code);
318 array_code_selected_code=array_code(1:length_array_code,[1 4]);
319 image_code='';
320
321 for temp = 1:length_array_code
322     if array_code_selected_code(temp,1) ==0
323         image_code=[image_code repmat('0',1,array_code_selected_code(temp,2)
324         )];
325     else
326         image_code=[image_code repmat('1',1,array_code_selected_code(temp,2)
327         )];
328     end
329 end
330 %%%%%%%%%%%
331 % shorten the image_code (optional)
332 [laser_code,laser_code_minimal_sample_number]=getMPRC(length_laser_code);
333
334 % shorten the length of image_code if possible to minimise errors
335 if length(image_code) <= laser_code_minimal_sample_number
336     % set var skipped marking to false
337     skipped_marking = 0;
338 else
339     % cut of image_code to minimal number of required marks
340     image_code=image_code(2:laser_code_minimal_sample_number+1);
341     % set var skipped marking to true
342     skipped_marking = 1;
343 end
344 %%%%%%%%%%%
345 % estimate position of the image_code in the laser_code (roughly)
346 image_code_vor_position=[strfind(laser_code,image_code)];
347
348 % degree per marking
349 degree_per_single_marking_ideal=360/length_laser_code;
350 radius_mm=10;
351 circumface_mm=2*pi()*radius_mm;
352 width_marking_ideal_um=circumface_mm*1000/length_laser_code;

```

```

353 degree_per_pixel_zero=degree_per_single_marking_ideal/zero_single_mean;
354 degree_per_pixel_one=degree_per_single_marking_ideal/one_single_mean;
355
356 % check how many matches exit --> 0,1,>1
357 if numel(image_code_vor_position)==1
358     % get position minus offset
359     aa_image_position = image_code_vor_position*
        degree_per_single_marking_ideal-degree_per_single_marking_ideal;
360 elseif numel(image_code_vor_position)==0
361     aa_image_position=0;
362 elseif numel(image_code_vor_position)>1
363     aa_image_position = image_code_vor_position(1)*
        degree_per_single_marking_ideal-degree_per_single_marking_ideal;
364 end
365 image_position_rough = aa_image_position;
366
367 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
368 % calculate position (precisely)
369 % get image_position_after_the first marking_pair
370 position_add = (array_code(1,4) + array_code(2,4)/2) *
        degree_per_single_marking_ideal;
371 if array_code(1,1) == 1
372     position_substract = (array_code(2,2)*degree_per_pixel_one + array_code
        (2,3)/2*degree_per_pixel_zero);
373 else
374     position_substract = (array_code(2,2)*degree_per_pixel_zero + array_code
        (2,3)/2*degree_per_pixel_one);
375 end
376
377 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
378 % calculate final position
379 aa_image_position = image_position_rough + position_add - position_substract
        - skipped_marking * degree_per_single_marking_ideal;

```

## A.10 Quellcode der Tenengrad-Funktion

```
1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % @brief      Tenengrad function for calculating the sum
3 % @details    Display version for LaTeX
4 %
5 % @date       2019/05/12
6 % @author     T. Schneider
7 % @version    1.1
8 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
9
10 x = [-1,0,1;-2,0,2;-1,0,1];
11 y = flipud(x');
12
13 n=size(block,1)*size(block,2);
14 score=sum(sum((imfilter(block,x,'replicate').^2+imfilter(block,y,'replicate'
15               ).^2)));
16 score=(1/n)*score;
```

## Bildverzeichnis

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.1  | Ursachen-Wirkungs-Diagramm der sechs Haupteinflussgrößen . . . . .  | 19 |
| 4.1  | Schematische Darstellung der relevanten Systemkomponenten und Kenngrößen. . . . .   | 22 |
| 4.2  | Abgerollte Pseudo-Random-Codierung (PRC) mit $e = 16$ Markierungen und einer minimalen Codewortlänge von $m = \log_2 e = 4$ Markierungen. Das Codewort 0110 ist beispielhaft in blau hervorgehoben. . . . . | 24 |
| 4.3  | Das in dem vorangegangenen Bild beispielhaft hervorgehobene Codewort entspricht der Position sieben. . . . .  | 25 |
| 4.4  | Transformation vom PR-Code zum MPR-Code . . . . .   | 26 |
| 4.5  | Darstellung verschiedener MPR-Codelängen $e$ und der jeweiligen ermittelten Codewortlängen $m$ . . . . .  | 28 |
| 4.6  | FEM-Simulation zur Veranschaulichung der Torsionsmesswellen-Verformung bei maximalem Drehmoment um die Längsachse. Dargestellt ist die farblichkodierte totale Deformation in Millimetern. . . . .          | 29 |
| 4.7  | Unbearbeitetes Originalbild der Wellenoberfläche bei maximaler Vergrößerung. . . . .  | 33 |
| 4.8  | Normierte und Offset-korrigierte Grauwerte des Originalbildes mit eingezeichnetem statischen Schwellwert bei $\gamma = 0,33$ . . . . .  | 34 |
| 4.9  | Transformation der Grauwerte zu Binärwerten. Zur Verdeutlichung des Verlaufs verbindet eine gestrichelte Linie die Binärwerte. . . . .  | 34 |
| 4.10 | Breiten der jeweiligen Markierungen und dynamischen Grenzwerte (gestrichelt eingezeichnet) zur Unterscheidung, ob eine einzelne oder eine doppelte Markierung vorliegt. . . . .                             | 35 |
| 5.1  | Translatorische Verschiebung zwischen der Welle und dem optischem System. . . . .   | 39 |
| 5.2  | Rotatorische Bewegung zwischen der Welle und dem optischen System.  | 40 |
| 5.3  | Vergleich zweier Idealbilder ohne (a) und mit (b) Rauschen. . . . .   | 42 |

## Bildverzeichnis

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 5.4 | Verrauschtes Idealbild mit einem Gauß-Kernel ( $\sigma = 30$ ) gefaltet. . . . .  | 43 |
| 5.5 | Darstellung der Winkelabweichung und der normierten Schärfe Gauß-gefilterter Idealbilder. ( $N = 30$ Bilder) . . . . .  | 44 |
| 5.6 | Verrauschtes Idealbild mit Bewegungsunschärfe in x-Richtung. . . . .  | 46 |
| 5.7 | Darstellung der Winkelabweichung und der normierten Schärfe Motion-gefilterter Idealbilder. ( $N = 30$ Bilder) . . . . .  | 47 |
| 5.8 | Bestimmung der absoluten Winkelabweichung des programmierten Schwellwert-Verfahrens zwischen dem Originalbild und durch Gauß- und Bewegungsunschärfe modifizierten Bildern. (Randbedingungen: $N = 30$ randomisierte Bilder bei einer Vergrößerung von $\beta = 28$ , Codierung mit $n = 3490$ idealen Markierungen) . . . . .  | 48 |
| 6.1 | LSM-Aufnahme der lasermarkierten Oberfläche. . . . .  | 52 |
| 6.2 | Darstellung verschiedener Beleuchtungseinstellungen am Mikroskop: (a) Hellfeld, (b) Dunkelfeld und (c) Hellfeld mit Polarisationsfilter ( $90^\circ$ ) jeweils mit einem vergrößerten Ausschnitt aus der Bildmitte. Die unvergrößerten Abbildungen der Oberfläche haben eine Breite von etwa $900\ \mu\text{m}$ . Der vergrößerte Ausschnitt hat eine Kantenlänge von etwa $100\ \mu\text{m}$ . ( <i>Hinweis: Bild (a) wurde bei geringer Intensität der Mikroskopbeleuchtung aufgenommen. Die Bilder (b) und (c) wurden hingegen bei maximaler Beleuchtungsintensität aufgenommen.</i> ) . . . . | 54 |
| 6.3 | Verlauf der Schärfe in Abhängigkeit der Belichtungszeit für drei unterschiedliche elektrische Leistungen der LED. ( <i>Hinweis: Aus Gründen der Darstellung sind die Messpunkte mit geraden Linien verbunden und geben entsprechend nicht zwangsläufig den tatsächlichen Verlauf zwischen den Messpunkten wieder.</i> ) . . . . .   | 59 |
| 7.1 | Wellenoberfläche mit unterschiedlich breiten Markierungen (Fehlertyp A). 63   |    |
| 7.2 | Wellenoberfläche mit Korrosion der Oberfläche (Fehlertyp $B_1$ ). . . . .   | 63 |
| 7.3 | Wellenoberfläche mit einem Kratzer auf der Oberfläche (Fehlertyp $B_1$ ). . . . .   | 63 |
| 7.4 | Wellenoberfläche mit einem Fussel (Fehlertyp $B_2$ ). . . . .   | 63 |
| 7.5 | Wellenoberfläche mit fehlerhafter Lasermarkierung (Fehlertyp $C_1$ ). . . . .   | 63 |
| 7.6 | Versuchsaufbau zur Kalibrierung der Drehwinkelgenauigkeit. . . . .  | 65 |
| 7.7 | Genauigkeit der absoluten Drehwinkelmessung vor und nach der Kalibrierung. ( $N = 100$ Bilder) . . . . .  | 66 |
| 7.8 | Exemplarisch aufgenommene Drehwinkeldifferenz der Kameras 1 und 2 an $N = 300$ randomisierten Messpositionen bei keiner Torsion $M = 0\ \text{N m}$ . 68  |    |



|      |   |    |
|------|---|----|
| 7.9  | Versuchsaufbau zur statischen Charakterisierung des Drehmomentmesssystems. . . . .  | 69 |
| 7.10 | Ablauf der Charakterisierung eines Drehmomentsensors nach DIN 51309 in drei unterschiedlichen Einbaupositionen (nach [DIN05]). . . . .  | 70 |
| 7.11 | Ermittelte Drehmomente für die Hebelarm-Belastungen in der 0° Einbauposition. Die ermittelten Messwerte des Messsystems (schwarze Rauten) stimmen gut mit den Referenzwerten (blaue Linie) überein. <i>(Hinweis: Die Drehmomentwerte sind hinsichtlich des Offsets zum Nullpunkt korrigiert. Die Referenzwerte sind aus Gründen der Darstellung und besseren Vergleichbarkeit als Linie dargestellt. Die diskreten Messpunkte des Referenzsystems befinden sich an den gleichen Positionen, wie die des zu vergleichenden Messsystems.)</i> . . . . . | 71 |
| 8.1  | Versuchsaufbau zur Untersuchung der radialen Verschiebung einer Flachprobe. . . . .   | 77 |
| 8.2  | Darstellung der Tenengrad-Schärfe in Abhängigkeit der Schrittweite vom Fokuspunkt. Der blaue Bereich kennzeichnet den Bereich, bei dem die Winkelposition eindeutig und ohne Warn-/Fehlermeldung decodiert werden kann. (N=12 randomisierte Messpositionen) . . . . .   | 78 |
| 8.3  | Exemplarisches Bild der Flachprobe bei einer Schrittweite $\Delta z = 100 \mu\text{m}$ , dass durch die Bildverarbeitung ohne Fehlermeldung decodiert werden kann. . . . .  | 79 |
| 8.4  | Exemplarischer Verlauf der berechneten Schärfe bei Variation des Abstandes zwischen Oberfläche und Objektiv. . . . .  | 79 |
| 8.5  | Darstellung der Winkelabweichung im Vergleich zur Nulllage in Abhängigkeit der Schrittweite vom Fokuspunkt. (N = 12 randomisierte Messpositionen) . . . . .   | 81 |
| 8.6  | Manuelle Ermittlung des Abstandes der Referenzmarkierungen mit Hilfe der Software ImageJ. . . . .   | 82 |
| 8.7  | Mittels der Software ImageJ manuell bestimmten Abstände der Referenzmarkierung bei entsprechender Schrittweite. . . . .   | 83 |
| 8.8  | Konzept der Verschiebung des Schärfebereichs der Optik durch absichtliche Dejustage. . . . .  | 85 |
| 8.9  | Versuchsaufbau zur optischen Messung der Undrundheit einer Welle mit der Messuhr als Referenz. . . . .  | 86 |

|   |     |
|---|-----|
| 8.10 Vergleich zweier Rundlaufmessungen mit einer Messuhr und der Tenengrad-Bildschärfe. Die Messung wird an zwei Wellen durchgeführt wobei eine innerhalb (a) und eine außerhalb (b) der Anforderung bezüglich der Gesamtrundlauftoleranz liegt. . . . .   | 87  |
| 8.11 Abschätzung der möglichen Drehzahl in Abhängigkeit der Belichtungsdauer und bei einer Welle mit einem Durchmesser von $d_{Welle} = 20 \text{ mm}$ . .  | 91  |
| 8.12 Vereinfachte Darstellung der zeitlichen Synchronisierung von Kamera-Shutter und Beleuchtung durch die entsprechenden Steuersignale . . .   | 92  |
| 8.13 Schematische Darstellung der Geräte-Konfiguration. . . . .   | 94  |
| 8.14 Triggersignal für die Kameras. . . . .   | 96  |
| 8.15 Triggersignal für die Blitzlampe. . . . .  | 96  |
| 8.16 Zeitlicher Verlauf der Blitzlampen-Strahlungsintensität. . . . .   | 96  |
| 8.17 Prüfstand mit den zwei Elektromotoren, dem Referenzdrehmomentsensor und dem PC Oszilloskop zur automatisierten Messdatenerfassung.   | 98  |
| 8.18 Mit einem Motor wird die Welle ohne anliegendem Drehmoment angetrieben und bei unterschiedlichen Drehzahlen bis $1000 \text{ min}^{-1}$ getestet. . . . .  | 99  |
| 8.19 Ermittelte Drehmomente des DMS-Referenzsensors bei einer Drehzahl von $n_{Motor_1} = 500 \text{ min}^{-1}$ . (N = 360 Messungen je Drehzahldifferenz) . . .  | 102 |
| 8.20 Ermittelte (kalibrierte) Drehmomente des optischen Systems bei einer Drehzahl von $n_{Motor_1} = 500 \text{ min}^{-1}$ . (N = 360 Bilder je Drehzahldifferenz und Kamera) . . . . .  | 102 |
| 8.21 Abweichung des optischen Systems vom DMS-Referenzsensor. (N = 360 Messungen je Drehzahldifferenz) . . . . .  | 102 |
| 8.22 Modifizierter Box-Plot zur Darstellung der Winkeldifferenz zum Originalbild bei variierendem Anteil der genutzten Zeilen der Kamera. Die Box zeigt jeweils den Median, sowie das untere und obere Quartil. Die Raute visualisiert die Lage des jeweiligen arithmetischen Mittelwerts. Die Whisker entsprechen den 2,5% und 97,5% Quantilen. (N = 600 randomisierte Bilder einer Welle) . . . . . | 105 |
| 8.23 Schematische Darstellung einer integrierten Sensorik. ( <i>Hinweis: Das Getriebe wurde für den hier gezeigten Anwendungsfall modifiziert und stammt in der Ursprungs-CAD-Version von Hrn. Hannes Koitz (Grabcad.com).</i> ) . . . . .  | 106 |
| 8.24 Demonstrator eines miniaturisierten Objektivs mit einer Industriekamera. . . . .   | 107 |

|  |      |
|--|------|
| 8.25 Aufnahme der Wellenoberfläche mit miniaturisiertem Objektiv. . . . .  | 107  |
| A.1 Zusammenhang zwischen der gewölbten Oberfläche und dem Arbeits-<br>abstand $a_1$ . . . . .   | IV   |
| A.2 Arbeitsabstand $a_1$ beim Rollen der Kamera. . . . .   | V    |
| A.3 Arbeitsabstand $a_1$ beim Nicken der Kamera. . . . .   | V    |
| A.4 Veranschaulichung des Gierwinkels. . . . .   | VII  |
| A.5 Exemplarischer Verlauf der Winkeldifferenz bei Variation des Gier-<br>winkels. ( $n=30$ bei sechsmaliger Messwiederholung, Fehlerbalken<br>entsprechen der Standardabweichung) . . . . . | VIII |
| A.6 Beleuchtung der Wellenoberfläche mit Hilfe von Laser-Strahlung. . . . .  | IX   |



# Tabellenverzeichnis

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Kategorien und Anwendung der Drehmomentmesstechnik nach [AW06a]. In blau dargestellt, die für diese Arbeit relevante Kategorie und Anwendung. . . . .                     | 2  |
| 1.2 | Mindestanforderungen an das umzusetzende Messsystem [MUD+16] .  | 4  |
| 1.3 | Wunschanforderungen an das umzusetzende Messsystem [MUD+16] .   | 4  |
| 2.1 | Absolute und relative Drehwinkelsensoren in der Anwendung . . . . .   | 9  |
| 2.2 | Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von konventionellen DMS . .  | 11 |
| 2.3 | Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von optischen DMS . . . . .  | 12 |
| 2.4 | Drehmomentmessverfahren in der Anwendung . . . . .  | 14 |
| 5.1 | Exemplarisch berechnete Winkelveränderung $\Delta\varphi$ bei translatorischer Verschiebung um 0,1 mm entlang der jeweiligen Achse. . . . .                               | 39 |
| 5.2 | Exemplarisch berechnete Winkelveränderung $\Delta\varphi$ bei rotatorischer Veränderung um $0,1^\circ$ um die jeweilige Achse. . . . .                                    | 41 |
| 6.1 | Gegenüberstellung der industriellen Objektive hinsichtlich der Kompatibilität verschiedener Beleuchtungskonfigurationen. . . . .  | 53 |
| 7.1 | Auflistung verschiedener Fehlertypen mit Bezug auf beispielhafte Ursachen und Wirkungen. . . . .  | 62 |
| 7.2 | Genauigkeit der Winkelbestimmung einer Kamera nach der Kalibrierung. (jeweils $N = 300$ Messpositionen, Drehzahl $n = 0 \text{ min}^{-1}$ während Bildaufnahme) . . . . . | 68 |
| 7.3 | Gegenüberstellung der ermittelten und maximal zulässigen Werte (nach DIN 51309) für die Klasse 0,5 für die statische Drehmomentbelastungen.                               | 72 |
| 8.1 | Überprüfung der jeweils angefitzten Modellfunktion anhand des Bestimmtheitsmaßes (R-Quadrat). . . . .   | 88 |

*Tabellenverzeichnis*

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 8.2 | Überprüfung der jeweils angefitteten Modellfunktion anhand des Standfehlers der Residuen. . . . .  | 89  |
| 8.3 | Quantitative Beurteilung der Ähnlichkeiten der angefitteten Funktionen.  | 89  |
| 8.4 | Erfolgsquote der Winkelberechnung in Abhängigkeit der genutzten Zeilen der Kamera. Zusätzlich dargestellt ist das Ablehnungsintervall aus dem Gauß-Test. . . . . | 104 |
| A.1 | Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von piezoelektrischen Sensoren. . . . .   | II  |
| A.2 | Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von magnetoelastischen Sensoren. . . . .  | III |

# Abkürzungsverzeichnis

---

| <b>Kürzel</b> | <b>Bezeichnung</b>                                      |
|---------------|---|
| <b>API</b>    | Programmierschnittstelle                                |
| <b>ASIC</b>   | Application-specific integrated circuit                 |
| <b>CCD</b>    | Charge-Coupled Device                                   |
| <b>CMOS</b>   | Complementary Metal-Oxide-Semiconductor                 |
| <b>DMS</b>    | Dehnungsmessstreifen                                    |
| <b>EMV</b>    | Elektromagnetische Verträglichkeit                      |
| <b>EMP</b>    | Elektromagnetischer Puls                                |
| <b>FEM</b>    | Finite Elemente Methode                                 |
| <b>FPGA</b>   | Field Programmable Gate Array                           |
| <b>GPIO</b>   | General Purpose Input/Output                            |
| <b>Laser</b>  | Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation |
| <b>LED</b>    | Light Emitting Diode                                    |
| <b>LOESS</b>  | Locally Estimated Scatterplot Smoothing                 |
| <b>LSM</b>    | Laser-Scanning-Mikroskop                                |

## *Abkürzungsverzeichnis*

|               |                                     |
|---------------|-------------------------------------|
| <b>MATLAB</b> | Matrix Laboratory                   |
| <b>ME</b>     | Messbereichsendwert                 |
| <b>MPR</b>    | Manchester-Pseudo-Random            |
| <b>MPRC</b>   | Manchester-Pseudo-Random-Codierung  |
| <b>NIR</b>    | Near Infrared                       |
| <b>OpenCV</b> | Open Source Computer Vision         |
| <b>PR</b>     | Pseudo-Random                       |
| <b>PRC</b>    | Pseudo-Random-Codierung             |
| <b>ROI</b>    | Region of Interest                  |
| <b>TTL</b>    | Transistor-Transistor-Logik         |
| <b>USB</b>    | Universal Serial Bus                |
| <b>VIS</b>    | Licht im sichtbaren Spektralbereich |



# Formelzeichen

| <b>Zeichen</b> | <b>Einheit</b>     | <b>Bezeichnung</b>          |
|----------------|--------------------|-----------------------------|
| $a$            | mm                 | Arbeitsabstand              |
| $\Delta a$     | mm                 | Arbeitsabstandsänderung     |
| $\beta$        | -                  | Abbildungsmaßstab           |
| $\beta'$       | -                  | lateraler Abbildungsmaßstab |
| $b$            | -                  | Bildfeld auf der Oberfläche |
| $d$            | mm                 | Wellendurchmesser           |
| $e$            | -                  | Anzahl Markierungen         |
| $F$            | -                  | Fibonacci-Zahl              |
| $G$            | $\text{N mm}^{-2}$ | Schubmodul                  |
| $h$            | mm                 | Objektebene                 |
| $H_0$          | -                  | Nullhypothese               |
| $H_1$          | -                  | Alternativhypothese         |
| $I_p$          | $\text{mm}^4$      | polares Flächenmoment       |

## Formelzeichen

|            |                   |  |
|------------|-------------------|--|
| $K_\alpha$ | -                 | Ablehnungsintervall  |
| $\lambda$  | nm                | Wellenlänge  |
| $l$        | mm                | Torsionslänge  |
| $\mu$      | -                 | Mittelwert der Grundgesamtheit   |
| $\mu_0$    | -                 | vorgegebener Wert  |
| $m$        | -                 | Codewortlänge  |
| $m_{PRC}$  | -                 | minimale Codewortlänge einer PRC                                       |
| $m_{MPRC}$ | -                 | minimale Codewortlänge einer Manchester-Pseudo-Random-Codierung (MPRC) |
| $M$        | N m               | Drehmoment   |
| $n$        | $\text{min}^{-1}$ | Drehzahl   |
| $n_0$      | $\text{min}^{-1}$ | Ausgangsdrehzahl   |
| $n$        | -                 | Index der Fibonacci-Zahl   |
| $n$        | -                 | Anzahl an Teilversuchen  |
| $N$        | -                 | Anzahl an Versuchen  |
| $p$        | -                 | Wahrscheinlichkeit   |
| $P_{Peak}$ | W                 | Peakleistung   |
| $q$        | -                 | Basis der Codierung  |

|                                 |               |                                     |
|---------------------------------|---------------|-------------------------------------|
| $Q$                             | -             | Quantil                             |
| $Q_{0,5}$                       | -             | Median                              |
| $Q_{0,25}, Q_{0,75}$            | -             | Quartil                             |
| $r$                             | mm            | Wellenradius                        |
| $R$                             | -             | Bestimmtheitsmaß                    |
| $R_{max}$                       | $\mu\text{m}$ | maximale Rautiefe                   |
| $R_z$                           | $\mu\text{m}$ | gemittelte Rautiefe                 |
| $\sigma$                        | -             | Standardabweichung                  |
| $t_{\text{Belichtung}}$         | ms            | minimale Belichtungszeit            |
| $U_S$                           | V             | Steuerspannung                      |
| $\varphi$                       | $^\circ$      | absoluter Drehwinkel                |
| $\varphi'$                      | $^\circ$      | korrigierter absoluter Drehwinkel   |
| $\varphi_{\text{Drehgeber}}$    | $^\circ$      | Absoluter Drehwinkel des Drehgebers |
| $\varphi_{\text{Kalibrierung}}$ | $^\circ$      | Kalibrationswinkel                  |
| $\varphi_{\text{Kamera}}$       | $^\circ$      | Absoluter Drehwinkel der Kamera     |
| $\varphi_{\text{Offset}}$       | $^\circ$      | Offsetwinkel                        |
| $\Delta\varphi$                 | $^\circ$      | Torsionswinkel                      |
| $x$                             | -             | Abszissenachse                      |

*Formelzeichen*

|      |    |                 |
|------|----|-----------------|
| $y$  | -  | Ordinatenachse  |
| $y$  | mm | Objektgröße     |
| $y'$ | mm | Sensorggröße    |
| $z$  | -  | Applikatenachse |
| $z$  | -  | Segmenthöhe     |

## Literaturverzeichnis

- [ADF<sup>+</sup>18] ALBERS, Albert; DETERS, Ludger; FELDHUSEN, Jörg; LEIDICH, Erhard; LINKE, Heinz; POLL, Gerhard ; WALLASCHEK, Jörg; SAUER, Bernd (Hrsg.): *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2 – Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*. Springer Vieweg, 2018
- [APR18] ALTMANN, B.; PAPE, C. ; REITHMEIER, E.: Determining angular velocities of fast rotating objects based on motion blur to control an optomechanical derotator. In: *Proceedings Appl. Math. Mech.* 18 (2018). <http://dx.doi.org/10.1002/pamm.201800092>. – DOI 10.1002/pamm.201800092
- [ASU<sup>+</sup>18] ALBRECHT, D.; SCHNEIDER, T.; UNGER, C.; KOCH, J.; SUTTMANN, O. ; OVERMEYER, L.: Study for Black Marking of Steel with Short Pulsed and Ultrashort Pulsed Lasers. In: *CLEO: Applications and Technology*, 2018
- [AW06a] ANDRAE, J.; WEGENER, G.: Dynamische Drehmomentmessung. Drehmomentaufnehmer in Leistungsprüfständen (Dynamic Torque Measurement. Torque Transducers in Power Test Stands). In: *tm - Technisches Messen* 12 (2006), S. 684–691
- [AW06b] ANDRAE, J.; WEGENER, G.: Dynamische Drehmomentmessung. Drehmomentaufnehmer in Leistungsprüfständen (Dynamic Torque Measurement. Torque Transducers in Power Test Stands). In: *tm – Technisches Messen* 73 (2006), Nr. 12. <http://dx.doi.org/10.1524/teme.2006.73.12.684>. – DOI 10.1524/teme.2006.73.12.684
- [Bal91] BALDAUF, W.: Frequenzanaloge Drehmomentmessung mit Oberflächenwellen-Resonatoren. In: *tm – Technisches Messen* 58 (1991), Nr. 9
- [Bar97] BARBER, A.: *Pneumatic Handbook*. 8. Aufl. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 1997

## Literaturverzeichnis

- [Bar19] BARLAG, T.: *Wissensaustausch über den PR- und MPR-Code*. Persönliche Mitteilung, 2019
- [Bay76] BAYER, Bryce E.: *Color imaging array*. Patent, 1976
- [BBB+87] BASTL, W.; BENDIT, G.; BERWEGER, P.; BONFIG, K. W.; BUSSE, H.-J.; DITTMANN, J.; ... ; ZWICKY, R.; PROFOS, P. (Hrsg.): *Handbuch der industriellen Messtechnik*. 4. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag, 1987
- [BBF+06] BEIKIRCH, H.; BERGMANN, R. B.; FEHLER, D.; FEUSER, A.; FREY, G.; GERDES, B.; ... ; ZABLER, E.; GEVATTER, H.-J. (Hrsg.); GRÜNHAUPT, U. (Hrsg.): *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006
- [BBK08] BEHRENS, B.-A.; BOSTRON, M. ; KUEPER, A.: Investigation of load adapted gears and shafts manufactured by compound-forging. In: *Journal of Advanced Manufacturing Systems* 07 (2008), Nr. 01, 175-182. <http://dx.doi.org/10.1142/S0219686708001292>. – DOI 10.1142/S0219686708001292
- [BDD+07] BOCKSKOPF, V.; DIEKMANN, A.; DRIEHAUS, S.; EHLICH, M.; ERBS, F.; ... ; WITTE, S.; KIEL, E. (Hrsg.): *Antriebslösungen - Mechatronik für Produktion und Logistik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007
- [BDE+17] BOCK, K.; DITTRICH, P.-G.; ETTRICH, K.; GRAF, V.; GROSSER, V.; HÄNSCHKE, F.; ... ; ZIEGER, G.; WERTHSCHÜTZKY, R. (Hrsg.): *Sensor Technologien 2022*. AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V., 2017
- [BEW15] BACKHAUS, K.; ERICHSON, B. ; WEIBER, R.: *Fortgeschrittene Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung*. 3. überarbeitete und aktl. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015
- [BIE+19] BARTLOMIEJ, W.; IGNACIO, G.-D.; ERNST, M.; KELLY, D.; KRANIN, M.; LIANG, C.-K.; LEVOY, M. ; MILANFAR, P.: Handheld Multi-Frame Super-Resolution. In: *ACM Trans. Graph.* 38 (2019), Nr. 4. <http://dx.doi.org/10.1145/3306346.3323024>. – DOI 10.1145/3306346.3323024
- [BKH+14] BESSONOV, A.; KIRIKOVA, M.; HAQUE, S.; GARTSEEV, I. ; BAILEY, M. J. A.: Highly reproducible printable graphite strain gauges for flexible devices. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 206 (2014), 75-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2013.11.034>. – DOI 10.1016/j.sna.2013.11.034

- [BLM<sup>+</sup>18] BERHANU, M.; LEIDHOLD, R.; MULUNEH, Z.; MEKONNEN, Y. ; SARWAT, A.: Real-Time Control of a Doubly Fed Induction Machine for Variable Speed Constant Frequency Wind Power System Through Laboratory Test Rig. In: *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, 2018, 195-201
- [BMG<sup>+</sup>17] BARBULESCU, V.; MARICA, I.; GHEORGHE, V.; NISTOR, M. ; PATRASCU, M.: Encoder-based path tracking with adaptive cascaded control for a three omni-wheel robot. In: *16th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*, 2017, 1-6
- [Bög15] BÖGE, A.; BÖGE, W. (Hrsg.): *Handbuch Maschinenbau – Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. 22. Aufl. Springer Vieweg, 2015
- [Bor16] BORGEEST, K.: *Messtechnik und Prüfstände für Verbrennungsmotoren – Messungen am Motor, Abgasanalytik, Prüfstände und Medienversorgung*. Springer Vieweg, 2016
- [BPS99] BRAILSFORD, S. C.; POTTS, C. N. ; SMITH, B. M.: Constraint satisfaction problems: Algorithms and applications. In: *European Journal of Operational Research* 119 (1999), Nr. 3, 557 - 581. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00364-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00364-6). – DOI 10.1016/S0377-2217(98)00364-6
- [BT08] BERNS, H.; THEISEN, W.: *Eisenwerkstoffe – Stahl und Gusseisen*. 4. Aufl. Springer, 2008
- [BTC<sup>+</sup>14] BRNIC, J.; TURKALJ, G.; CANADIJA, M.; LANC, D. ; BRCIC, M.: Study of the Effects of High Temperatures on the Engineering Properties of Steel 42CrMo4. In: *High Temperature Materials and Processes* 34 (2014), Nr. 1, 27-34. <http://dx.doi.org/10.1515/htmp-2014-0011>. – DOI 10.1515/htmp-2014-0011.
- [Bur03] BURTON, A. W.: Innovation drivers for electric power-assisted steering. In: *IEEE Control Systems Magazine* 23 (2003), Nr. 6, 30-39. <http://dx.doi.org/10.1109/MCS.2003.1251179>. – DOI 10.1109/MCS.2003.1251179
- [BVF09] BALLE, B.; VENTURA, E. ; FUERTES, J. M.: An algorithm to design prescribed length codes for single-tracked shaft encoders. In: *IEEE International Conference on Mechatronics*, 2009, 1-6

## Literaturverzeichnis

- [CH12] CZICHOS, H.; HENNECKE, M.: *Das Ingenieurwissen*. 34., aktl. Aufl. Springer Vieweg, 2012
- [CM89] CHEN, J. S.; MEDIONI, G.: Detection, Localization, and Estimation of Edges. In: *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 11 (1989), Nr. 2, S. 191–198
- [Con18] CONNER, G.: *Scenic automation handbook*. New York, NY: Routledge, 2018
- [DH18] DATLINGER, C.; HIRZ, M.: Investigations of Rotor Shaft Position Sensor Signal Processing in Electric Drive Train Systems. In: *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2018, 1-5
- [DIN81] DIN 4766:1981-03: (zurückgezogen) Herstellverfahren der Rauheit von Oberflächen – Erreichbare gemittelte Rauhtiefe Rz nach DIN 4768 Teil 1. Deutsches Institut für Normung e.V. (1981)
- [DIN95] DIN 1319-1:1995-01: Grundlagen der Meßtechnik – Teil 1: Grundbegriffe. Deutsches Institut für Normung e.V. (1995)
- [DIN03] DIN 1335:2003-12: Geometrische Optik – Bezeichnungen und Definitionen. Deutsches Institut für Normung e.V. (2003)
- [DIN05] DIN 51309:2005-12: Werkstoffprüfmaschinen – Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Drehmomente. Deutsches Institut für Normung e.V. (2005)
- [DIN17] DIN EN ISO 1101:2017-09: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung - Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf. Deutsche Fassung EN ISO 1101:2017. (2017)
- [DL03] DAVIS, R. I.; LORENZ, R. D.: Engine torque ripple cancellation with an integrated starter alternator in a hybrid electric vehicle: implementation and control. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 39 (2003), Nr. 6, 1765-1774. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2003.818972>. – DOI 10.1109/TIA.2003.818972



- [DS93] DUMOULIN, L.; SEELIGER, A.: Digitale Drehmomentmessung in rotierenden Wellen - Digital torque measurement in rotating shafts. In: *tm - Technisches Messen* 60 (1993), Nr. 11, 416-418. <http://dx.doi.org/10.1524/teme.1993.60.11.416>. – DOI 10.1524/teme.1993.60.11.416
- [DSC18] DAS, S.; SARKAR, T. S. ; CHAKRABORTY, B.: Simple approach to design a capacitive rotary encoder. In: *IET Science, Measurement and Technology* 12 (2018), Nr. 4, S. 500–506
- [Dum95] DUMOULIN, L.: *Die berührungslose, digitale Messung von Drehmoment und Drehzahl*. Aachen, Instituts für Bergwerks- und Hüttenmaschinenkunde, Diss., 1995
- [DW88] DARRELL, T.; WOHN, K.: Pyramid Based Depth from Focus. In: *Proceedings CVPR: The Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (1988), 504-509. <http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.1988.196282>. – DOI 10.1109/CVPR.1988.196282
- [FBLS94] FRANKE, H.-J.; BIELFELDT, U.; LACHMAYER, R. ; SALMEN, A.: Entwicklung eines robusten berührungslosen Drehzahl-Drehmoment-Meßsystems. In: *Antriebstechnik* 33 (1994), Nr. 8, 53-57. [https://www-1wiso-2net-1de-100670622719e.shan01.han.tib.eu/document/ANT\\_\\_ANT199400001423293218122021302316141823142827241130](https://www-1wiso-2net-1de-100670622719e.shan01.han.tib.eu/document/ANT__ANT199400001423293218122021302316141823142827241130)
- [FBV08] FUERTES, J. M.; BALLE, B. ; VENTURA, E.: Absolute-Type Shaft Encoding Using LFSR Sequences With a Prescribed Length. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 57 (2008), Nr. 5, 915-922. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2007.913811>. – DOI 10.1109/TIM.2007.913811
- [FH09] FEESE, T.; HILL, C.: Prevention of Torsional Vibration Problems in Reciprocating Machinery. In: *Proceedings of the Thirty-Eighth Turbomachinery Symposium* (2009), S. 213–238
- [FS02] FAVARO, P.; SOATTO, S.: Learning Shape from Defocus. In: HEYDEN, A. (Hrsg.); SPARR, G. (Hrsg.); NIELSEN, M. (Hrsg.) ; JOHANSEN, P. (Hrsg.): *Computer Vision - ECCV 2002*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002 (7th European Conference on Computer Vision), S. 735–745

## Literaturverzeichnis

- [FV93] FALES, J. F.; VINCENT, R. S.: *Datamatrix and PDF417 data integrity test*. Ohio University, College of Engineering and Technology, 1993
- [Gab08] GABZDYL, Jack: Fibre lasers make their mark. In: *Nature Photonics* 2 (2008), Nr. 1, 21–23. <http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2007.268>. – DOI 10.1038/nphoton.2007.268. ISBN 1749–4893
- [Gau02] GAUTSCHI, G.: *Piezoelectric Sensorics – Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002
- [GB97] GROTE, K.-H. (Hrsg.); BEITZ, W. (Hrsg.): *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997
- [GHM+10] GROSSER, V.; HEYDENBLUTH, D.; MOOS, R.; REIN, D.; SAUER, J.; SIMMONS, C. T.; ... ; WILDE, J.: *Sensor-Trends 2014 - Trends in zukunftsorientierten Sensortechnologien*. Berlin: AMA Fachverband für Sensorik e.V., 2010
- [Gie94] GIESECKE, P.: *Dehnungsmeßstreifentechnik – Grundlagen und Anwendungen in der industriellen Meßtechnik*. Vieweg+Teubner Verlag, 1994
- [Gie18] GIESSIBL, J.; TILLE, T. (Hrsg.): *Automobil-Sensorik 2 – Systeme, Technologien und Applikationen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2018
- [GKB+15] GAO, W.; KIM, S. W.; BOSSE, H.; HAITJEMA, H.; CHEN, Y. L.; LU, X.D.; KNAPP, W.; WECKENMANN, A.; ESTLER, W. T. ; KUNZMANN, H.: Measurement technologies for precision positioning. In: *CIRP Annals* 64 (2015), Nr. 2, 773 - 796. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.009>. – DOI 10.1016/j.cirp.2015.05.009
- [GM09] GALLO, O.; MANDUCHI, R.: Reading challenging barcodes with cameras. In: *Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)* (2009). <http://dx.doi.org/10.1109/WACV.2009.5403090>. – DOI 10.1109/WACV.2009.5403090
- [GM11] GALLO, O.; MANDUCHI, R.: Reading 1D Barcodes with Mobile Phones Using Deformable Templates. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 33 (2011), Nr. 9, 1834 - 1843. <http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.2010.229>. – DOI 10.1109/TPAMI.2010.229

- [GW08] GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.: *Digital image processing*. 3. überarb. Aufl. Pearson Education, 2008
- [Haf03] HAFERKORN, H.: *Optik - Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*. 4., bearb. und erw. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2003
- [HASH+01] HIRZINGER, G.; ALBU-SCHAFFER, A.; HAHNLE, M.; SCHAEFER, I. ; SPORER, N.: On a new generation of torque controlled light-weight robots. In: *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)* Bd. 4, 2001, 3356-3363
- [HDB16] HALICIOGLU, R.; DULGER, L. C. ; BOZDANA, A. T.: Structural design and analysis of a servo crank press. In: *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19 (2016), Nr. 4, 2060 - 2072. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2016.08.008>. – DOI 10.1016/j.jestch.2016.08.008. – ISSN 2215–0986
- [Her12] HERING, E.; SCHÖNFELDER, G. (Hrsg.): *Sensoren in Wissenschaft und Technik – Funktionsweise und Einsatzgebiete*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012
- [HK07] HRISTOFOROU, E.; K TENA, A.: Magnetostriction and magnetostrictive materials for sensing applications. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 316 (2007), 372 - 378. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.03.025>. – DOI 10.1016/j.jmmm.2007.03.025
- [HKP93] HASHIMOTO, M.; KIYOSAWA, Y. ; PAUL, R. P.: A torque sensing technique for robots with harmonic drives. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 9 (1993), Nr. 1, 108-116. <http://dx.doi.org/10.1109/70.210802>. – DOI 10.1109/70.210802
- [HLG17] HEINRICH, B.; LINKE, P. ; GLÖCKLER, M.: *Grundlagen Automatisierung - Sensorik, Regelung, Steuerung*. 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017
- [HNM08] HAQUE, M. E.; NEGNEVITSKY, M. ; MUTTAQI, K. M.: A Novel Control Strategy for a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator. In: *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008, 1-8

## Literaturverzeichnis

- [HOK18] HARA, M.; OHO, S. ; KANEKO, Y.: An ultrasonic rotary encoder and its application to torque estimation. In: *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 2018, 1-6
- [Hor68] HORN, B.: *Focusing - Project MAC*. Bd. 160. Massachusetts Institute of Technology (MIT), 1968
- [HS97] HEIKKILA, J.; SILVEN, O.: A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. In: *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997. – ISSN 1063–6919, S. 1106–1112
- [HS14] HESSE, S.; SCHNELL, G.: *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation – Funktion, Ausführung, Anwendung*. 6. Aufl. Springer Vieweg, 2014
- [HS18] HEDDERICH, J.; SACHS, L.: *Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R*. 16. überarb. und erw. Aufl. Springer Spektrum, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-56657-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-56657-2>
- [HW08] HARDY, G. H.; WRIGHT, E. M.: *An Introduction to the Theory of Numbers*. 6. Aufl. Oxford University Press, 2008
- [Ila07] ILARDI, Vincent;: *Renaissance Vision from Spectacles to Telescopes*. Bd. 259. Philadelphia: American Philosophical Society, 2007
- [Ise08] ISERMANN, R.: *Mechatronische Systeme*. 2. vollständig neu bearbeitete Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008
- [ISO08] ISO/IEC GUIDE 98-3:2008: Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization. (2008)
- [ISO09] ISO 4287:2009: Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization. (2009)
- [JABG94] JUTAMULIA, S.; ASAKURA, T.; BAHUGUNA, R. R. ; GUZMAN, P. C. D.: Autofocusing based on power-spectra analysis. In: *Applied Optics* 33 (1994), Nr. 26, S. 6210–6212

- [JBS92] *Kapitel Modeling of Communication Systems.* In: JERUCHIM, M. C.; BALABAN, P. ; SHANMUGAN, K. S.: *Simulation of Communication Systems.* Boston, MA: Springer US, 1992, 303-462
- [JP94] JOSEPH, E.; PAVLIDIS, T.: Bar Code Waveform Recognition Using Peak Locations. In: *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 16 (1994), Nr. 6, 630 - 640. <http://dx.doi.org/10.1109/34.295907>. – DOI 10.1109/34.295907
- [Kei17] KEIL, S.: *Dehnungsmessstreifen.* 2. Aufl. Springer Vieweg, 2017
- [KJWS87] KATZBERG, S. J.; JENSEN, R. L.; WILLSHIRE, K. F. ; SATTERTHWAITE, R. E.: *Space station and effector strategy study - Technical Memorandum.* NASA, 1987
- [KK14] KIM, J. S.; KIM, G.-W.: New non-contacting torque sensor based on the mechanoluminescence of ZnS. In: *Sensors and Actuators A Physical* 218 (2014), 125-131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2014.07.023>. – DOI 10.1016/j.sna.2014.07.023
- [Kla16] KLAUS, Leonard: *Entwicklung eines primären Verfahrens zur Kalibrierung von Drehmomentaufnehmern mit dynamischer Anregung.* Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Diss., 2016
- [KM10] KANG, H. S.; MENEVEAU, C.: Direct mechanical torque sensor for model wind turbines. In: *Measurement Science and Technology* 21 (2010), Nr. 10. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/21/10/105206>. – DOI 10.1088/0957-0233/21/10/105206
- [Kra16] KRAMER, D.: *Konstruktionstechnische Auslegung eines Prüfkörpers zur Untersuchung statischer und dynamischer Drehmomente.* Hannover, Leibniz Universität Hannover, Bachelorarbeit, 2016
- [Kro87] KROTKOV, E.: Focusing. In: *International Journal of Computer Vision* 1 (1987), S. 223–237
- [KRRR15] KELB, C.; RAHLVES, M.; REITHMEIER, E. ; ROTH, B.: Realization and Performance of an All-Polymer Optical Planar Deformation Sensor. In: *IEEE Sensors Journal* 15 (2015), Nr. 12, S. 7029–7035

## Literaturverzeichnis

- [Kut15] KUTTNER, T.: *Praxiswissen Schwingungsmesstechnik*. Springer Vieweg, 2015
- [KYO+89] KANAYA, K.; YAMAMOTO, Y.; OGASAWARA, M.; BABA, N. ; YONEHARA, K.: An automatic focusing and astigmatism correction method for high resolution electron microscopy. In: *Micron and Microscopica Acta* 20 (1989), Nr. 3/4, S. 172–192
- [Läp16] LÄPPLE, V.: *Einführung in die Festigkeitslehre - Lehr- und Übungsbuch*. 4., aktl. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016
- [LCC+17] LIAO, J.; CHEN, X.; CHEN, X.; ZHANG, F. ; WANG, H.: High speed image acquisition system of absolute encoder. In: *Proc. SPIE 10322, Seventh International Conference on Electronics and Information Engineering, 103221C*, 2017
- [LDL10] LEHRMANN, C.; DREGER, U. ; LIENESCH, F.: Wirkungsgradbestimmung an elektrischen Maschinen – Gegenüberstellung und Optimierung verschiedener Verfahren. In: *Bulletin SEV / VSE: Fachzeitschrift von Electrosuisse und VSE* 101 (2010), Nr. 11, S. 37–43
- [Lei11] LEIS, A.: *Oberflächenqualitätskontrolle mit winkelaufgelöstem Streulichtverfahren*. Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Diss., 2011
- [LEM89] In: LIEDTKE, C.-E.; ENDER, M. ; MARKO, H.: *Wissensbasierte Bildverarbeitung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1989
- [Len04] LENK, B.: *Strichcode-Praxis: Handbuch der automatischen Identifikation*. Monika Lenk Fachbuchverlag, 2004
- [LKQ18] LV, W.; KANG, Y. ; QIN, J.: Indoor Localization for Skid-Steering Mobile Robot by Fusing Encoder, Gyroscope, and Magnetometer. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* (2018), 1-13. <http://dx.doi.org/10.1109/TSMC.2017.2701353>. – DOI 10.1109/TSMC.2017.2701353
- [LLWY09] LU, B.; LI, Y.; WU, X. ; YANG, Z.: A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis. In: *2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications*, 2009, 1-7

- [LMMAL17] LEONG, C. H.; MOHD-MOKHTAR, R.; AHMAD, N. S. ; LEOW, C. W.: Measurement and validation of disc spring arrangement on a single bolt joint for rotary power tool. In: *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*. Penang, Malaysia, 2017
- [LW14] LENZ, J.; WANING, P.: Schwingungstechnische Untersuchung von Kupplungsschäden an Kolbenverdichtern. In: *Erdöl Erdgas Kohle* 130 (2014), S. 25–29
- [MBA+96] MARSHALL, J. A.; BURBECK, C. A.; ARIELY, D.; ROLLAND, J. P. ; MARTIN, K. E.: Occlusion edge blur: a cue to relative visual depth. In: *Optical Society of America* 13 (1996), Nr. 4, S. 681–688
- [MHN15] MURPHY, T.; HARRISON, P. ; NORMAN, S.: Black anneal marking with pulsed fiber lasers. In: GREEN, Mike (Hrsg.); ROSE, Cath (Hrsg.); International Society for Optics and Photonics (Veranst.): *Industrial Laser Applications Symposium (ILAS 2015)* Bd. 9657 International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2015, 123 – 128
- [Mil90] MILBERG, J.: *Werkzeugmaschinen - Grundlagen - Zerspantechnik, Dynamik, Baugruppen und Steuerungen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1990
- [Mir12] MIRZAEI, S.: *Entwicklung und Erprobung der Bildrotator-Messtechnik am Beispiel der Schlupfmessung von Wälzlagern*. Hannover, Universität Hannover, Diss., 2012
- [MMZ97] MILLER, A.; MULJADI, E. ; ZINGER, D. S.: A variable speed wind turbine power control. In: *IEEE Transactions on Energy Conversion* 12 (1997), Nr. 2, 181-186. <http://dx.doi.org/10.1109/60.629701>. – DOI 10.1109/60.629701
- [MP03] MUFTI, R. A.; PRIEST, Martin: Experimental and Theoretical Study of Instantaneous Engine Valve Train Friction. In: *Journal of Tribology* 125 (2003), Nr. 3, 628-637. <http://dx.doi.org/10.1115/1.1538189>. – DOI 10.1115/1.1538189
- [MTN+03] MATSUZOE, Y.; TSUJI, N.; NAKAYAMA, T.; FUJITA, K. ; YOSHIZAWA, T.: High-performance absolute rotary encoder using multitrack and M-code. In: *Optical Engineering* 42 (2003), 124-131. <http://dx.doi.org/10.1117/1.1523943>. – DOI 10.1117/1.1523943

## Literaturverzeichnis

- [MUD<sup>+</sup>16] MENKE, T.; UNGER, C.; DAI, A.; KRAMER, D.; EILERT, B.; ... ; OVERMEYER, L.: Development of a combined measurement system for torque and angular position. In: *Proedia Technology* 26 (2016), 136-143. <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.019>. – DOI 10.1016/j.protcy.2016.08.019
- [Mün04] MÜNSTERMANN, S.: Einflußgrößen auf den Elastizitätsmodul von Stählen für den Fahrzeugbau / Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT). 2004 (182). – Schriftenreihe
- [MWZB10] MAIWALD, M.; WERNER, C.; ZOELLNER, V. ; BUSSE, M.: INKtelligent printed strain gauges. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 162 (2010), Nr. 2, 198-201. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2010.02.019>. – DOI 10.1016/j.sna.2010.02.019
- [NN94] NAYAR, S. K.; NAKAGAWA, Y.: Shape from Focus. In: *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 16 (1994), Nr. 8, S. 824–831
- [NVG94] NORMAND, N.; VIARD-GAUDIN, C.: A two-dimensional bar code reader. In: *Proceedings of the 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition* Bd. 3, 1994, 201-203
- [OKA<sup>+</sup>17] OZTURK, S. B.; KIVANC, O. C.; ATILA, B.; REHMAN, S.; AKIN, B. ; TOLİYAT, H. A.: A simple least squares approach for low speed performance analysis of indirect FOC induction motor drive using low-resolution position sensor. In: *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2017, 1-8
- [Ova91] OVASKA, S. J.: Improving the velocity sensing resolution of pulse encoders by FIR prediction. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 40 (1991), Nr. 3, 657-658. <http://dx.doi.org/10.1109/19.87041>. – DOI 10.1109/19.87041
- [Ove18] *Kapitel* Automatisierung in der Materialflusstechnik. In: OVERMEYER, L.: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018
- [PC11] PUCCI, M.; CIRRINCIONE, M.: Neural MPPT Control of Wind Generators With Induction Machines Without Speed Sensors. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58 (2011), Nr. 1, 37-47. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2010.2043043>. – DOI 10.1109/TIE.2010.2043043



- [PC18] PAUL, S.; CHANG, J.: Design and Development of a Novel High Resolution Absolute Rotary Encoder System Based on Affine n-digit N-ary Gray Code. In: *J Electr Eng Technol.* 13 (2018), Nr. 2, 943-952. <http://dx.doi.org/10.5370/JEET.2018.13.2.943>. – DOI 10.5370/JEET.2018.13.2.943
- [PCFM18] PAUL, S.; CHANG, J.; FLETCHER, J. E. ; MUKHOPADHYAY, S.: A Novel High-Resolution Optical Encoder With Axially Stacked Coded Disk for Modular Joints: Physical Modeling and Experimental Validation. In: *IEEE Sensors Journal* 18 (2018), Nr. 14, 6001-6008. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2018.2841982>. – DOI 10.1109/JSEN.2018.2841982
- [Pen87] PENTLAND, A. P.: A new sense for depth of field. In: *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 9 (1987), Nr. 4, 523-531. <http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.1987.4767940>. – DOI 10.1109/TPAMI.1987.4767940
- [Pen90] PENTLAND, A. P.: Physically-based dynamical models for image processing and recognition. In: GROSSKOPF, R. E. (Hrsg.): *Informatik-Fachberichte – Mustererkennung* Bd. 254. Oberkochen-Aalen: Springer-Verlag, 1990, 171-190
- [Per19] PERWAS, J.: *FPGA-basierte Zeitsteuerung im Rahmen des Projektes IntegrAD*. Vortrag am IPH, 2019
- [Pet12] PETERS, S.; KALWEIT, A. (Hrsg.); PAUL, C. (Hrsg.); PETERS, S. (Hrsg.) ; WALLBAUM, R. (Hrsg.): *Handbuch für Technisches Produktdesign: Material und Fertigung – Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012
- [Pfe01] PFEIFER, T.: *Fertigungsmeßtechnik*. 2. überarb. Aufl. München, Wien: Oldenbourg, 2001
- [Pod19] PODSZUS, F.: *Wissensaustausch über aktuelle Trends in der Industrie*. Persönliche Mitteilung, 2019
- [PRRA02] PIRES, J. N.; RAMMING, John; RAUCH, Stephen ; ARAÚJO, Ricardo: Force/torque sensing applied to industrial robotic deburring. In: *Sensor Review* 22 (2002), Nr. 3, 232-241. <http://dx.doi.org/10.1108/02602280210433070>. – DOI 10.1108/02602280210433070

## Literaturverzeichnis

- [Rei16] REIF, K. (Hrsg.): *Sensoren im Kraftfahrzeug*. 3. Aufl. Springer Vieweg, 2016
- [Ren18] RENISHAW: *Datenblatt: RESOLUTE™ mit Funktionaler Sicherheit für die Siemens DRIVE-CLiQ Schnittstelle*. <https://www.renishaw.de/de/resolute-downloads--37856>. Version:2018, Abruf: 12/2018
- [RJL+15] REN, S.; JIANG, S.; LIU, H.; ZHANG, W. ; LI, Y.: Investigation of strain gauges based on interdigitated Ba<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>TiO<sub>3</sub> thin film capacitors. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 236 (2015), 159-163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.11.001>. – DOI 10.1016/j.sna.2015.11.001
- [RLS17] RLS: *Datenblatt: AksIM™ off-axis rotary absolute encoder*. <https://www.rls.si/en/aksim-off-axis-rotary-absolute-encoder>. Version:2017, Abruf: 12/2018
- [RMMM11] RUDNAYA, M.; MATTHEIJ, R.; MAUBACH, J. ; MORSCHE, H. t.: Gradient-based Sharpness Function. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering I* (2011)
- [Rod16] RODDECK, W.: *Einführung in die Mechatronik*. 5. Aufl. Springer Vieweg, 2016
- [RZHR03] RAHMAN, M. F.; ZHONG, L.; HAQUE, M. E. ; RAHMAN, M. A.: A direct torque-controlled interior permanent-magnet synchronous motor drive without a speed sensor. In: *IEEE Transactions on Energy Conversion* 18 (2003), Nr. 1, 17-22. <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2002.805200>. – DOI 10.1109/TEC.2002.805200
- [SB15] SIMSEKLI, U.; BIRDAL, T.: A unified probabilistic framework for robust decoding of linear barcodes. In: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (2015). <http://dx.doi.org/10.1109/ICASSP.2015.7178310>. – DOI 10.1109/ICASSP.2015.7178310
- [Sey13] SEYBOLD, J.: *Untersuchungen zur Industrialisierung von miniaturisierten optischen Drehwinkelsensoren mit diffraktiver Kodierscheibe aus Kunststoff*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Diss., 2013
- [SKS+07] SCHLOSSER, A.; KINOO, B.; SALBER, W.; WERNER, S. ; ADEMES, N.: Beschleunigte Antriebsstrangentwicklung mittels modellbasierter Applikation. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 68 (2007), Nr. 2, 134-141. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03225453>. – DOI 10.1007/BF03225453

- [SLH12] SHAMS, S.; LEE, J. Y. ; HAN, C.: Compact and lightweight optical torque sensor for robots with increased range. In: *Sensors and Actuators A Physical* 173 (2012), Nr. 1, 81-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2011.10.019>. – DOI 10.1016/j.sna.2011.10.019
- [SMSR17] SHAH, M.I.; MISHRA, S.; SARKAR, M. ; ROUT, C.: Identification of Robust Focus Measure Functions for the Automated Capturing of Focused Images from Ziehl–Neelsen Stained Sputum Smear Microscopy Slide. In: *Cytometry Part A* 91A (2017), 800-809. <http://dx.doi.org/10.1002/cyto.a.23142>. – DOI 10.1002/cyto.a.23142
- [SSNW83] SCHLAG, J. F.; SANDERSON, A. C.; NEUMAN, C. P. ; WIMBERLY, F. C.: *Implementation of Automatic Focusing Algorithms for a Computer Vision System with Camera Control*. Pittsburgh, Pennsylvania: Carnegie-Mellon University, 1983
- [SSS03] SVEDIN, N.; STEMME, E. ; STEMME, G.: A static turbine flow meter with a micromachined silicon torque sensor. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 12 (2003), Nr. 6, 937-946. <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2003.820271>. – DOI 10.1109/JMEMS.2003.820271
- [SUA17] SCHNEIDER, T.; UNGER, C. ; ALBRECHT, D.: *IntegrAD Integrierter optischer Absolutgeber und Drehmomentmesser*. Frankfurt: Forschungsbericht Deutsche Forschungsgesellschaft für Automatisierung und Mikroelektronik, Abschlussbericht, 2017
- [SWE+17] SCHNEIDER, T.; WORTMANN, J.; EILERT, B.; STONIS, M. ; OVERMEYER, L.: *Validierung einer optischen Drehmomentmessung*. wt Werkstattstechnik online, 2017
- [SWQH07] SONG, A.; WU, J.; QIN, G. ; HUANG, W.: A novel self-decoupled four degree-of-freedom wrist force/torque sensor. In: *Measurement* 40 (2007), Nr. 9-10, 883-891. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2006.11.018>. – DOI 10.1016/j.measurement.2006.11.018
- [Ten70] TENENBAUM, J. M.: *Accommodation in Computer Vision*, Stanford University, Diss., 1970
- [Thi90] THIEL, R.: *Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen*. 3., durchgesehene Auflage. Stuttgart: B. G. Teubner, 1990

## Literaturverzeichnis

- [Til16] *Automobil-Sensorik – Ausgewählte Sensorprinzipien und deren automobiler Anwendung.* T. Tille, 2016
- [Trä14] TRÄNKLER, H.-R.; REINDL, L. M. (Hrsg.): *Sensortechnik – Handbuch für Praxis und Wissenschaft.* 2. Aufl. Springer Vieweg, 2014
- [Tsa87] TSAI, R.: A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. In: *IEEE Journal on Robotics and Automation* 3 (1987), Nr. 4, S. 323–344. <http://dx.doi.org/10.1109/JRA.1987.1087109>. – DOI 10.1109/JRA.1987.1087109. – ISSN 0882–4967
- [Tur88] TURNER, J. D.: Development of a rotating-shaft torque sensor for automotive applications. In: *IEE Proceedings D - Control Theory and Applications* 135 (1988), Nr. 5, 334-338. <http://dx.doi.org/10.1049/ip-d.1988.0050>. – DOI 10.1049/ip-d.1988.0050
- [Ung18] UNGER, D.: *Aufzüge und Fahrtreppen – Ein Anwenderhandbuch.* 3. Aufl. Springer Vieweg, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-56241-3>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-56241-3>
- [VDI04] VDI 2206: 2004:06: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Verein deutscher Ingenieure (VDI). (2004)
- [VDI07] VDI/VDE-2648 BLATT 2: 2007-03: Sensoren und Messsysteme für die Drehwinkelmessung – Anweisungen für die rückführbare Kalibrierung – Indirekt messende Drehwinkelmeßsysteme. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA). (2007)
- [VDI09] VDI/VDE-2648 BLATT1:2009-10: Sensoren und Messsysteme für die Drehwinkelmessung – Anweisungen für die rückführbare Kalibrierung – Direkt messende Drehwinkelmeßsysteme. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA). (2009)
- [VDI10] VDI/VDE 2632: 2010:04: Industrielle Bildverarbeitung – Grundlagen und Begriffe. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA). (2010)
- [Vol87] VOLLATH, D.: Automatic focusing by correlative methods. In: *Journal of Microscopy* 147 (1987), Nr. 3, S. 279–288

- [VPL<sup>+</sup>15] VOLLBERG, D.; PROBST, A.-C.; LANGOSCH, M.; LANDES, A.; GÖTTEL, D.; CERINO, M.; LELLIG, A.; FREITAG-WEBER, O. ; SCHULTES, G.: Hochempfindliche Folien-Dehnungsmessstreifen auf dem Weg zur technologischen Reife. In: *tm – Technisches Messen* 82 (2015), Nr. 10, 505-516. <http://dx.doi.org/10.1515/teme-2015-0066>. – DOI 10.1515/teme-2015-0066
- [WJVS17] WITTEL, H.; JANNASCH, D.; VOSSIEK, J. ; SPURA, C.: *Roloff/Matek Maschinenelemente - Normung, Berechnung, Gestaltung*. 23. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017
- [WK14] WITTEL, Herbert; KURZ, Ulrich: Technische Zeichnung. In: *Böttcher/Forberg Technisches Zeichnen*. Springer, 2014, S. 112–215
- [WLG07] WANG, S.; LI, Q. ; GUAN, B: A computer vision method for measuring angular velocity. In: *Optics and Lasers in Engineering* 45 (2007), 1037-1048. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.02.005>. – DOI 10.1016/j.optlaseng.2007.02.005
- [WW04] WRIGHT, A. K.; WOOD, D. H.: The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92 (2004), Nr. 14, 1265 - 1279. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2004.08.003>. – DOI 10.1016/j.jweia.2004.08.003
- [WWHL16] WANG, Y.; WANG, H.; HAO, F. ; LIU, L.: A Novel Approach of an Absolute Coding Pattern Based on Hamiltonian Graph. In: *Proc. SPIE 10256, Second International Conference on Photonics and Optical Engineering*, 2016, 102563K
- [WWSY12] WAN, Q.; WANG, Y.; SUN, Y. ; YANG, S.: A Novel Miniature Absolute Metal Rotary Encoder Based on Single-track Periodic Gray Code. In: *International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control* 2 (2012), 399 - 402. <http://dx.doi.org/10.1109/IMCCC.2012.98>. – DOI 10.1109/IMCCC.2012.98
- [XC95] XU, L.; CHENG, W.: Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 31 (1995), Nr. 3, 636-642. <http://dx.doi.org/10.1109/28.382126>. – DOI 10.1109/28.382126

## Literaturverzeichnis

- [YOJS93] YEO, T. T. E.; ONG, S. H.; JAYASOORIAH ; SINNIAN, R.: Autofocusing for tissue microscopy. In: *Image and Vision Computing* 11 (1993), Nr. 10, S. 629–639
- [Yue83] *Kapitel Telecommunications Systems Design*. In: YUEN, Joseph H.: *Deep Space Telecommunications Systems Engineering*. Boston, MA: Springer US, 1983, 1-22
- [ZH18] ZHANG, Yong; HUANG, Yu: A novel machining of multi irregular surface using improved noncircular turning method. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96 (2018), Nr. 9, 3161-3174. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-1761-z>. – DOI 10.1007/s00170-018-1761-z
- [Zha99] ZHANG, Z.: Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In: *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision* Bd. 1, 1999, S. 666–673
- [Zha00] ZHANG, Z.: A flexible new technique for camera calibration. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22 (2000), Nr. 11, S. 1330–1334. <http://dx.doi.org/10.1109/34.888718>. – DOI 10.1109/34.888718. – ISSN 0162-8828
- [ZKTV05] ZWYSSIG, C.; KOLAR, J. W.; THALER, W. ; VOHRER, M.: Design of a 100 W, 500000 rpm permanent-magnet generator for mesoscale gas turbines. In: *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005*. Bd. 1, 2005, 253-260
- [Zol18] ZOLLITSCH, C.: *Das Handbuch der Bildverarbeitung*. Stemmer Imaging AG, 2018
- [ZR18] ZAREI, J.; RAMEZANI, A.: Performance Improvement for Mobile Robot Position Determination Using Cubature Kalman Filter. In: *Journal of Navigation* 71 (2018), Nr. 2, S. 389–402. <http://dx.doi.org/10.1017/S0373463317000716>. – DOI 10.1017/S0373463317000716
- [ZSBS14] ZARFL, C.; SCHMID, P.; BALOGH, G. ; SCHMID, U.: TiAlN Thin Films as High Temperature Strain Gauges. In: *Procedia Engineering* 87 (2014), 136-139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.578>. – DOI 10.1016/j.proeng.2014.11.578

# Betreute studentische Arbeiten

## 2015

Hr. Anan Dai, Masterarbeit: Auslegung eines optischen Messsystems zur Erfassung der Drehzahl und des Absolutdrehwinkels.

## 2016

Hr. David Kramer, Bachelorarbeit: Konstruktionstechnische Auslegung eines Prüfkörpers zur Untersuchung statischer und dynamischer Drehmomente.

Hr. Johannes Wortmann, Masterarbeit: Konstruktionstechnische Auslegung eines Prüfstandes zur Untersuchung statischer und dynamischer Drehmomente

## 2018

Hr. Matthias Springer, Studienarbeit: Aufbau eines optischen Messsystems zur Distanzmessung auf Basis der Bildschärfe

## 2019

Hr. Matthias Springer, Masterarbeit: Klassifizierung lasermarkierter Binärcodierung mittels neuronaler Faltungsnetzwerke

Hr. Jan Perwas, Studienarbeit: FPGA-basierte Zeitsteuerung im Rahmen des Projektes IntegrAD





# Eigene Veröffentlichungen

## Konferenzbeitrag

Schneider, T.; Perwas, J.; Küster, B.; Stonis, M.; Overmeyer, L.: Validation of an inductive sensor for monitoring marine gearboxes. In: Overmeyer, L. (Hrsg.): AST - Symposium on Automated Systems and Technologies. TEWISS Verlag, Hannover 2018, ISBN: 978-3-95900-223-3 , pp. 3-7.

Schneider, T.; Kruse, T.; Küster, B.; Stonis, M.; Overmeyer, L.: Evaluation of an energy self-sufficient sensor for monitoring marine gearboxes position. In: Procedia Manufacturing, vol. 24 (2018), pp. 135 - 140, DOI: 10.1016/j.promfg.2018.06.019.

Albrecht, D.; Schneider, T.; Unger, C.; Koch, J.; Suttman, O.; Overmeyer, L...: Study for Black Marking of Steel with Short Pulsed and Ultrashort Pulsed Lasers. In: Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, 2018, DOI: 10.1364/CLEO\_AT.2018.AM1M.4.

Schneider, T.; Eilert, B.; Stonis, M.; Overmeyer, L.: Validation of an optical system for measuring the absolute angular position. In: 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore, 2017, pp. 490 - 493, DOI: 10.1109/IEEM.2017.8289939.

Schneider, T.; Wortmann, J; Eilert, B.; Stonis, M.; Overmeyer, L.: Validierung einer optischen Drehmomentmessung. In: wt Werkstattstechnik online, 107. Jg. (2017), H. 9, S. 590-593.

Schneider, T.; Unger, C.; Albrecht, D.; Stonis, M.; Overmeyer, L.; Kracht, D.; Ulbrich, K.: IntegrAD Integrierter optischer Absolutgeber und Drehmomentmesser, Abschlussbericht. In: Forschungsbericht Deutsche Forschungsgesellschaft für Automatisierung und Mikroelektronik e. V., o. Jg. (2017), H. 33, ISBN 978-3-8163-0712-9.

### *Eigene Veröffentlichungen*

Menke, T.; Eilert, B.; Stonis, M.; Overmeyer, L.: Image Processing of an Absolute Rotary Encoder for Determining Torque. In: Overmeyer, L. (Hrsg.): AST – Symposium on Automated Systems and Technologies. PZH Verlag, Hannover 2016, S. 83 - 86.

Menke, T.; Unger, C.; Dai, A.; Kramer, D.; Eilert, B.; Ullmann, G.; Overmeyer, L.: Development of a combined measurement system for torque and angular position. In: Procedia Technology, vol. 26 (2016), pp. 136 - 143.

### **Fachzeitschrift**

Schneider, T.: Schiffsgetriebe aus der Ferne überwachen. In: ti - Technologie-Informationen, o. Jg. (2017), H. 3, S. 26.

Menke, T.; Unger, C.: Die Welle im Fokus. In Computer&Automation, WEKA FACHMEDIEN GmbH, 8/2015, S.32-35.

### **Vortrag**

Menke, T.: Praxisbeispiel IntegrAD mit Ansatzpunkten der Industrie 4.0. 2. Göttinger Messtechniksymposium, Measurement Valley e.V., 15.-16. Juli 2015, Göttingen.

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name Tobias Schneider (geb. Menke)  
Geburtsdatum und -ort 07.03.1992 in Hildesheim

## Ausbildung

08/2002 - 06/2010 **Goethegymnasium, Hildesheim**  
*Abschluss: Allgemeine Hochschulreife*

10/2010 - 03/2013 **Bachelorstudium Engineering Physics, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg**  
*Schwerpunkt: Laser and Optics*  
*Abschluss: B.Eng.*

04/2013 - 10/2014 **Masterstudium Engineering Physics, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg**  
*Schwerpunkt: Biomedizinische Physik*  
*Abschluss: M.Sc.*

## Berufserfahrung

08/2012 - 10/2014 Praktische Tätigkeiten während des Studiums in verschiedenen Unternehmen, z. B.:  
- TRIUMF, Kanada (Vancouver)  
- Fraunhofer ILT – Abteilung Dünnschichtverfahren, Aachen

11/2014 - 05/2019 **IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH, Hannover**  
*Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Produktionsautomatisierung*

10/2019 - heute **Carl Zeiss Vision GmbH, Aalen**  
*Projektingenieur im Process Engineering*