



Technische Universität Wien
Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien

DIPLOMARBEIT

FUNKTIONS-, FERTIGUNGS- UND QUALITÄTSGERECHTE PRÜFUNG VON WERKSTÜCKEN IN DER MODERNEN FERTIGUNGSTECHNIK

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs (Dipl.-Ing oder DI) unter der Leitung von

Ao.Univ.--Prof.i.R. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Dr.h.c. Numan M. Durakbasa

(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

Univ.Ass.in Dipl.-Ing.in Eva Maria Walcher

(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

Projektass. Dr.techn. Osman Bodur, MSc

(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Fakher OUHADI

Matr.Nr: 08927282

Wien, im September 2023

Fakher, OUHADI

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, im September 2023

Unterschrift

Kurzfassung

Bei der Herstellung eines Werkstückes spielen die Begriffe geometrische Spezifikationen sowie Messen und Prüfen eine wesentliche Rolle. Die Herausforderung in der Qualitätssicherung der Werkstücke ist, dass Entwurf, Produktion, Verifizierung und Montage in der Fertigungsindustrie heutzutage in den meisten Fällen nicht nur national örtlich, sondern auch international voneinander getrennt sind, was nicht nur eine gemeinsame Sprache, sondern allem voran gemeinsame Normen erforderlich macht.

In dieser Arbeit werden im theoretischen Teil die Hintergründe und die Notwendigkeit der Anwendung des ISO-GPS-Systems, das zur funktions-, fertigungs- und qualitätsgerechten Prüfung von Werkstücken notwendig ist, behandelt. Weiters wird die Bedeutung der Industrie 4.0, die Vernetzung der Fertigungsmaschinen untereinander (Digitalisierung), erläutert. Darüber hinaus werden die Einflüsse der Messunsicherheit auf die Qualität der Messergebnisse und die notwendigen statistischen Methoden zur Bestimmung der Messunsicherheit dargelegt. Es werden auch die unterschiedlichen Messinstrumente in der modernen Produktionsmesstechnik behandelt.

Das Ziel des praktischen Teiles ist es, durch Messung festzustellen, ob das harmonische Getriebe ein Umkehrspiel aufweist. Um eine solche Umkehrspiel-Messung durchzuführen, wird ein linear magnetischer Inkrementalgeber eingesetzt und der Wert des Umkehrspiels gemäß ISO 230-2:2014 ermittelt. Gleichzeitig wird der Wert des Spiels mit einem Laserwinkelinterferometer ermittelt und ausgewertet und mit dem Wert des Magnetencoders verglichen.

Die Ergebnisse demonstrieren, dass der linear magnetische Encoder das Umkehrspiel mit ausreichender Präzision zuverlässig messen kann, d.h. geeignet ist, die funktions-, fertigungs- und qualitätsgerechte Prüfung durchzuführen. Auf dieser Grundlage ist es empfehlenswert, das Messinstrument Magnetencoder für die Messung des Umkehrspiels einzusetzen, um zuverlässige und exakte Werte zu bekommen.

Abstract

When producing a workpiece, the terms geometric specifications as well as measuring and testing play an important role. The challenge in quality control of workpieces is that design, production, verification and assembly in the manufacturing industry of today are mostly separated not only nationally but also internationally, which requires not only a common language, but above all common standards.

The theoretical part of this work deals with the background and the necessity of using the ISO GPS system, which is vital for functional and productional testing of workpieces. Furthermore, the importance of Industry 4.0, the linking of production machines with each other (digitalization), is explained. In addition, the impact of measurement uncertainty on the measurement results and the necessary statistical methods for determining the measurement uncertainty are presented. The different measuring instruments in modern production measuring technology are also dealt with.

The practical part of this work aims at finding out through measuring, whether the Harmonic Drive has a backlash. To carry out such a measurement of the backlash, a linear magnetic incremental encoder is used and the backlash value is determined according to ISO 230-2:2014. At the same time, the value of the backlash is determined with a laser angle interferometer, then evaluated and compared with the value of the magnetic encoder.

According to the results it can be concluded that the linear magnetic encoder is able to measure backlash with sufficient accuracy and reliability, i.e. the magnetic encoder is apt to perform functional, productional testing and quality control. Based on this outcome, the use of the Magnetic Encoder measuring instrument is highly recommended to measure the backlash in order to achieve reliable and accurate values.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
Vorwort.....	4
1 Einleitung.....	7
2 Entwicklung und aktueller Status in der Fertigungsmesstechnik.....	9
2.1 Intelligente Automation der Qualitätssicherung und Produktionsmesstechnik „Jidoka“.....	9
2.2 Digitalisierung (Industrie 4.0) und Intelligente Produktionsmesstechnik.....	12
2.2.1 Integrierte Messtechnik.....	13
2.2.2 Automatisierung und Produktionsmesstechnik.....	13
2.2.3 Multicore – die Technik der Parallelisierung.....	13
2.2.4 Sensoren.....	13
2.3 Digitaler Zwilling und Industrie 4.0.....	14
3 Fertigungsmesstechnik – Grundlagen.....	16
3.1 Historische Entwicklung der Produktionsmesstechnik.....	17
3.2 Technische Herausforderungen und Trends in der Produktionsmesstechnik. .	18
3.3 Moderner Produktentwurf, Produktentwicklung, Produktprüfung.....	20
3.4 Einführung in die Tolerierung.....	21
3.4.1 Form und Lage des Werkstückes.....	22
3.4.2 Maße und Abmaße.....	22
3.4.3 Maßtoleranz.....	24
3.4.4 Form und Lagetoleranzen.....	24
3.4.5 Das Hüll- und Unabhängigkeitsprinzip.....	25
3.4.6 Oberflächenbeschaffenheit.....	27
3.4.7 Mittenrauwert Ra.....	29
3.4.8 Rautiefe Rz gemittelt.....	30
3.5 Geometrische Produktspezifikation (GPS).....	31
3.5.1 Das ISO-GPS-Normensystem.....	32
3.5.2 Das GPS-MATRIXMODELL.....	33
3.5.3 Wichtigste Grundsätze des ISO-GPS Normensystems.....	37
3.6 Normen in der Nanotechnologie.....	39

3.7 Nachweis der Konformität von geometrischen Merkmalen.....	39
4 Messunsicherheit.....	41
5 Messgeräte für die Produktion und Qualitätskontrolle.....	51
5.1 Koordinatenmesstechnik und KMGs.....	52
5.1.1 Kategorien von KMGs.....	54
5.1.2 Arten von KMG-Tastern.....	55
5.1.3 Multisensor-KMGs.....	55
5.1.4 Zugehörige Normen und Richtlinien für KMGs.....	56
5.1.5 Stärken und Nachteile von KMGs.....	57
5.2 Berührungslose Messverfahren.....	58
5.2.1 3D-Scanner.....	58
5.2.2 Berührungslose (optische) 3D-KMGs.....	59
5.2.3 Streifenprojektionsverfahren.....	60
5.2.4 Messgeräte mit Photogrammetrie-Prinzip.....	63
5.2.5 Theodolit.....	64
5.2.6 Laser-Tracker.....	65
5.2.7 Laser-Tracer.....	65
5.2.8 Computertomografie.....	67
5.2.9 Konfokale Mikroskopie.....	72
5.2.10 Absolut messendes Interferometer.....	76
5.2.11 Interferometrische Abstands- bzw. Entfernungsmessung.....	77
5.3 Encoder.....	80
5.3.1 Art der Bewegung.....	81
5.3.2 Funktionsweise.....	81
5.3.3 Arten von Encoder.....	81
6 Umkehrspiel.....	96
6.1 Positionsgenauigkeit.....	98
6.2 Wiederholgenauigkeit der Bewegung.....	99
6.3 Spiel mindernde Konstruktionen und Methoden zur Minimierung des Umkehrspiels.....	99
6.4 Präzisionszahnräder.....	100

7 Experimentelle Studie.....	107
7.1 Hintergrund der Messung.....	107
7.2 Methodik.....	107
7.2.2 Verwendete Komponenten und Ausrüstungen.....	109
7.3 Messungen am Harmonic Drive. Messungen mit Hilfe des magnetischen Encoders AS5311.....	116
8 Auswertung.....	122
8.1 Erste Messung.....	122
8.2 Zweite Messung.....	127
8.3 Resultat.....	131
9 Zusammenfassung.....	132
Abbildungsverzeichnis.....	134
Tabellenverzeichnis.....	136
Literaturverzeichnis.....	137
Anhang.....	143

Vorwort

Anstelle eines langen Vorworts zitiere ich einfach den Leitspruch, der mich bei meiner Arbeit begleitete und mich inspirierte:

„Miss alles, was sich messen lässt, und mach alles messbar,
was sich nicht messen lässt“ [1].

„Archimedes von Syrakus (um 287 - 212 v. Chr.) war ein griechischer Mathematiker, Physiker und Ingenieur“ [1].

An dieser Stelle danke ich meinem Betreuern herzlichst für ihre Unterstützung, Geduld und Expertise:

Ao.Univ.--Prof.i.R. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Dr.h.c. Numan M. Durakbasa,

Univ.Ass.in Dipl.-Ing.in Eva Maria Walcher,

Projektass. Dr. techn. Osman Bodur, Msc.

Außerdem danke ich meinen Brüdern Dr. Farnush Ouhadi, Dr. Faraz Ouhadi und Farbod Ouhadi, weiters Mag. Maria Rechnitzer, BA, Mag. Christine Rosche und DDDr. Franz Langmayr für Ihre Unterstützung, Gedanken und Anregungen beim Verfassen der Arbeit.

Ebenso danke ich all jenen Lehrvortragenden, Studienkollegen und Freunden, deren Anregungen auf subtile Weise in meine Arbeit einfließen.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
1D	eindimensional
2D	zweidimensional
ABI	Application Binary Interface
AI	Artificial Intelligence
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures [87]
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CAS	Computer Assisted Simulation
CMM	Coordinate Measuring Machine
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconducto
CNC	Computerized Numerical Control
CPR	Counts per Revolution
CPS	Cyber-physische Systeme
CT	Computertomografie
DAkkS	Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH
DGQ	Deutsche Gesellschaft für Qualität
FPGAs	Field Programmable Gate Arrays
GMA	Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik
GPS	Geometrische Produktspezifikation
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [86]
ICs	Integrated circuits
iCT	Industrielle Computertomografie
IMS	Integriertes Managementsystem
IoT	Internet of Things
ISO	Norm der International Organization of Standardization
IT	Informationstechnik
KI	künstliche Intelligenz
KMG	Koordinatenmessgerät
LCD	Liquid Crystal Display
LEDs	Licht emittierenden Dioden
LKW	Lastkraftwagen
M2M	Machine-to-Machine

ML	maschinelles Lernen
OSG	obere Spezifikationsgrenze
PPR	pulses per revolution
PUMA	Procedure for Uncertainty Management
PWM	Pulsweitenmodulation
Ra	Mittenrauwert
Rz	gemittelte Rautiefe
TC	Technical Committee
TQM	Total Quality Management
TTL	Transistor-Transistor-Logik
USG	untere Spezifikationsgrenze
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VIM	Vocabulaire International de Métrologie
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung
Messtechnische Symbole	
u	Messunsicherheit
U	Erweiterte Messunsicherheit
U_T	Zielmessunsicherheit
y	Messergebnis
Y	Messgröße
Physikalische Symbole	
L	[m] Länge
L_0	[m] Ausgangslänge
ΔL	[m] Längenausdehnung
α	[1/K] Längenausdehnungskoeffizient
ΔT	[K] Temperaturdifferenz

1 Einleitung

Bei der Herstellung eines Werkstückes spielen die Begriffe Messen und Prüfen eine wesentliche Rolle, denn die Funktion eines Bauteils ist entscheidend durch die Geometrie bestimmt. Die Messung von Länge, Oberfläche, Winkel und Form ist ein wichtiges Teilgebiet der Fertigungsmesstechnik. Anders ausgedrückt, die geometrische Form von Werkstücken wird gemessen. Die Messungen liefern Informationen zur Qualität von Produkten, man erhält so Mess- und Prüfdaten. Die Mess- und Prüfdaten sind die Basis der Qualitätssicherung.

Während früher die Messgeräte getrennt von den Fertigungsmaschinen agierten, sind sie heute zunehmend ein integrierter Bestandteil dieser Maschinen. Der Produktfehler kann somit nicht mehr in die nachfolgenden Prozesse einfließen („Jidoka“-Prinzip). Dadurch wird Qualität in den Produktionsprozess eingebaut, und die Prüfung der Produkte durch Menschen reduziert sich. Arbeitszyklen können so optimiert werden.

Neben der uni- und bidirektionalen Wiederholgenauigkeit ist das Umkehrspiel ein wichtiges Thema. Das Umkehrspiel beeinträchtigt die Genauigkeit von Drehtischen in Koordinatenmessmaschinen und in Computertomografen und verhindert aussagekräftige und hoch genaue Messergebnisse. Zusätzlich stellt das Auftreten des Umkehrspiels in Exoskeletten ein erhebliches Problem dar. Neben der Reduzierung des Umkehrspiels durch Sonderkonstruktionen und Mechanismen ist es auch von großer Bedeutung Messaufbauten zu verwenden und zu entwickeln, die den Anforderungen der Industrie 4.0 genügen, um intelligente funktions- fertigungs- und qualitätsgerechte Prüfung durchführen zu können

In der Vergangenheit wurden viele Versuche unternommen, das Spiel in den Getrieben zu erfassen. Auf Grund der Schwankungen der Messungen, die auftraten, waren die Messungen ungenau, daher konnte das Spiel nur geschätzt werden. Der Einsatz von Encodern ermöglicht heute eine schnelle und genaue Messung des Spiels.

Die vorliegende Arbeit hat im Großen und Ganzen zwei Ziele. Im theoretischen Teil soll der aktuelle Stand der modernen Fertigungsmesstechnik gezeigt werden und ein kurzer Überblick über die wichtigsten Messgeräte gegeben werden. Im praktischen Teil dieser Arbeit liegt das Hauptaugenmerk auf der Messung des Umkehrspiels des Harmonic Drive. Realisiert wird dies durch die Entwicklung und Durchführung eines

Messaufbaus, der mit einem magnetischen Hall-Effekt-Inkremental-Linearencoder ausgestattet ist, um aus den Winkelpositionen Informationen zu gewinnen und die Frage zu beantworten, ob ein Umkehrspiel stattfindet.

Insbesondere der Positionsfehler, d.h. das Umkehrspiel, das zu Ungenauigkeiten in der Positionierung führt und die bidirektionale Wiederholgenauigkeit negativ beeinflusst, wurde gemessen und bewertet. Darüber hinaus wurde die Leistungsfähigkeit des oben genannten Messgeräts und Messaufbaus auch mit einem genaueren Messgerät überprüft und verifiziert, nämlich mit einem Laserwinkelinterferometer. Die genaue Erfassung des Spiel ist für die funktions-, fertigungs- und qualitätsgerechte Prüfung von Getrieben, tragbaren Exoskeletten und Drehtischen von großer Bedeutung. Daher ist dem Einsatz von Encodern und der Positioniergenauigkeit eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

Im Kapitel 2 der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung und der aktuelle Stand der Fertigungsmesstechnik behandelt, die durch Digitalisierung (Industrie 4.0) geprägt ist. Weiters wird näher eingegangen auf einen wichtigen Teil der Industrie 4.0 auf intelligente Automation, „Jidoka“, die zum Ziel hat, erkannte Fehler maschinell selbständig ohne den Menschen zu beseitigen. In Kapitel 3 geht es um die Grundlagen der Fertigungsmesstechnik, Einführung in die Tolerierung und geometrische Produktspezifikationen. Kapitel 4 behandelt Messunsicherheit. Kapitel 5 thematisiert die Messgeräte für die funktions-, fertigungs- und qualitätsgerechte Prüfung von Werkstücken. Hier werden taktile und berührungslose Messverfahren vorgestellt, insbesondere der magnetische Encoder und der Laser Interferometer. Kapitel 6 bearbeitet das Umkehrspiel. Kapitel 7 präsentiert eine experimentelle Studie, Methodik und Messungen zur Ermittlung des Umkehrspiels, gefolgt von der Auswertung der Messergebnisse in Kapitel 8 und der Zusammenfassung in Kapitel 9.

2 Entwicklung und aktueller Status in der Fertigungsmesstechnik

In diesem Kapitel geht es einerseits um intelligente Automation der Qualitätssicherung in der Produktionsmesstechnik, „Jidoka“, andererseits wird die intelligente Produktionsmesstechnik in der Industrie 4.0 allgemein behandelt.

2.1 Intelligente Automation der Qualitätssicherung und Produktionsmesstechnik „Jidoka“

„Jidoka“ heißt, mit Maschinen Arbeiten. „Jidoka“ geht zurück auf den Gründer von Toyota, der „Jidoka“ zur tragenden Stütze automatisierter Produktion machte, beruhend auf der Idee von „Sakichi Toyoda, dem Gründer der Toyota Industries Corporation, geboren 1867 in Yamaguchi-mura“^[75], Japan.

Die Idee war, dass der Webstuhl beim Zerreißen des Fadens stoppen sollte, um keine fehlerhaften Produkte zu erzeugen. Durch intelligente Automation soll die Maschine selbsttätig Fehler vermeiden, so schlank wie möglich produzieren und die Qualität der Produkte sichern. „Im Wesentlichen gibt es vier Grundelemente des „Jidoka“-Prinzips in der schlanken Produktion: Erkennen, Unterbrechen, Reaktion und Prävention“¹ [2].

Grundbausteine der Automatisierung - Automation

„Jidoka“ ist integrierte, intelligente, automatische Qualitätskontrolle im Fertigungsprozess. „Jidoka“ beschreibt den Betrieb einer Maschine oder einer Anlage ohne menschliche Überwachung. Es gibt zwei Grundprinzipien von „Jidoka“. Das erste ist die Idee, Qualität in den Produktionsprozess einzubauen und das zweite ist die Idee der Trennung oder Sortierung der Aufgaben der Bediener und die der Maschinen. Die Menschen sind nicht die Wächter der Maschinen [3].

Wichtig ist, dass keine Fehler gemacht werden, was aber auch bedeutet, dass Fehler nicht an nachfolgende Prozesse weitergegeben werden. Wenn eine Abweichung vom Standard während eines Produktionsprozesses festgestellt wird, wird automatisch und sofort durch eine Vorrichtung gestoppt. Bei allgemeiner Automatisierung hält eine Maschine nicht an, wenn etwas schief geht und niemand auf die Taste

¹ Diese Stelle aus dem Englischen übersetzt vom Autor

drückt. Bei „Jidoka“ hingegen stoppt die Maschine, damit der Fehler nicht in den nachfolgenden Prozess weitergegeben wird [3].

Der Mensch muss dann nur mehr die Fehlerursache rausfinden und kann mit der Produktion fortfahren. Nachfolgende Prozesse produzieren somit keine fehlerhaften Einheiten mehr. Man spart sich damit Kosten und Ärger mit Kunden.

Die Schritte von „Jidoka“ können wie folgt beschrieben werden:

1. Die Maschine erkennt den anormalen Zustand.
2. Die Maschine stoppt sich selbst.
3. Implementierung einer Notlösung.
4. Wiederaufnahme der Produktion.
5. Identifizierung der Grundursache.
6. Schnelle Einführung einer dauerhaften Lösung [4].

Die Arbeit muss zwischen Personen und Geräten getrennt werden, um die „Jidoka“ Ziele zu erreichen. Zu diesem Zweck werden in der Maschine Komponenten eingebaut wie zum Beispiel Sensoren. Die Sensoren ermöglichen das selbständige Erkennen von Abweichungen zum Normalbetrieb. Ebenso können vorgegebene Bereiche ausgeglichen werden. Zur Ursachenanalyse können bekannte Werkzeuge wie zum Beispiel das Ishikawa-Diagramm herangezogen werden, siehe Abbildung 2.1. unten.

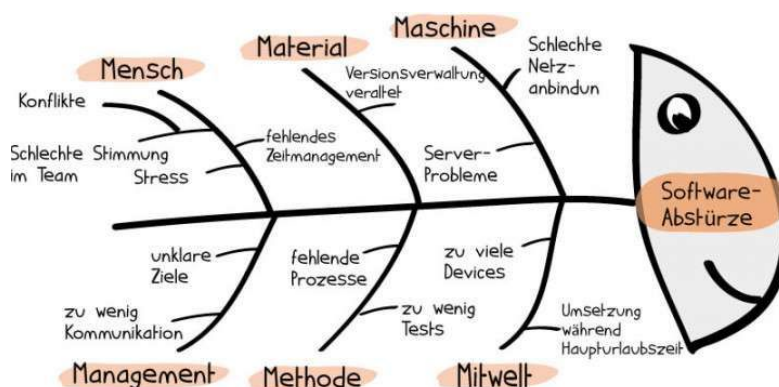


Abbildung 2.1 Ishikawa-Diagramm [66]

Die Lösung eines auftretenden Problems erfolgt in der Regel in zwei Schritten: Der erste ist eine Notlösung, die man dringend benötigt, um zu verhindern, dass Fehler weitergetragen werden. Die Person wird vielleicht nicht immer in der Lage sein, das Problem jetzt zu lösen, aber sie kann das Fertigungsband wieder zum Laufen bringen, nachdem ein Problem entdeckt wurde. Der zweite Schritt ist der verfeinerte Problemlösungsansatz. Er beinhaltet eine Analyse der Ursache, um den Ursprung des Problems zu identifizieren und zukünftiges Wiederauftreten zu verhindern [4].

Zu den **Vorteilen** von „Jidoka“ gehört, dass die Menschen idealerweise nicht mehr die Wächter von Maschinen sind. Die Menschen können sich mehr wert-schöpfender Arbeit widmen. Durch eine sofortige Fehlererkennung im frühen Stadium des Produktionszyklus können spätere Nacharbeit verhindert werden und die Verwirbelungen von Fertigungsreihenfolgen verhindert werden [3].

„Jidoka“ erfordert eine viel größere mentale Veränderung in der Arbeitsweise der Unternehmen, weil es den Mitarbeitern an vorderster Front die Befugnis gibt, sowohl die Produktion zu stoppen als auch Lösungen umzusetzen“ [4]. Dadurch werden die Mitarbeiter ermutigt, gemeinsam als Team die Ziele des Unternehmens zu erreichen.

Die eigentliche **Herausforderung von „Jidoka“** besteht nicht darin, ein Problem zu finden oder gar eine Maschine anzuhalten, sondern darin, die Probleme, die ein Mitarbeiter jetzt entdeckt hat, schnell und unerbittlich zu beheben.

Das Ziel der Autonomation ist eine hundertprozentig selbsttätige, funktions-, fertigungs- und qualitätsgerechte Prüfung von Werkstücken.

2.2 Digitalisierung (Industrie 4.0) und Intelligente Produktionsmesstechnik

Bei Industrie 4.0 geht um die digitalen Vernetzungen der Fertigungs- und Wertschöpfungsprozesse. Der Digitalisierung hat auch vor der Messtechnik nicht halt gemacht, neue Technologien sind entstanden.

Es werden also durch Industrie 4.0 Automatisierung und Datenaustausch sowie Fertigungstechnologie verbunden:

1) CPS (Cyber-physische-Systeme); sie vermitteln zwischen realen und virtuellen Komponenten.

2) IoT (das Internet der Dinge); damit kann man beliebige Maschinen oder Geräte mit dem Internet durch Digitalisierung verbinden, d.h. sie werden intelligent und es können große Datenmengen gesammelt und analysiert werden.

Vorteile der Digitalisierung sind:

- Die Gewinnung großer Datenmengen. Dies ermöglicht zum einen die Optimierung von Prozessen, zum anderen können Daten vom gesamten Fertigungsprozess eines Produktes gespeichert und genutzt werden.
- Man kann intelligente Fabriken bauen und die Einsparung von Geld und Ressourcen in der Fertigung bewirken. Arbeits-, Rohstoff- und Energieverbrauch können reduziert und die Produktivität gesteigert werden.
- Man kann ein mit der Cloud verbundenes Smartphone einrichten, um Fertigungsprozesse von praktisch überall aus zu überwachen.
- Die Digitalisierung ermöglicht Telepräsenz. Mit minimalem Aufwand kann das Qualitätspersonal Wartungen durchführen.
- Hoch technisierte IoT-Messmaschinen ermöglichen eine höhere Produktivität und eine bessere Qualität. Die Verwendung von KI-gestützten visuellen Informationen verringert Fertigungsfehler und damit Kosten und Zeit [6].

Ein **Nachteil der Digitalisierung** ist, dass bei der Nicht-Verwendung nicht-invasiver Sensoren Hackern gelingen kann, in Maschinensteuerungen einzudringen und sie zu manipulieren etc. [5]

Eine **Herausforderung der Digitalisierung** ist, dass alle Maschinen die selbe „Sprache“ sprechen müssen. D.h. nur wenn es industrieweit gelingt, sich auf wenige Standards zu einigen, kann das Ziel der intelligenten Produktionsweise realisiert werden [6].

2.2.1 Integrierte Messtechnik

Direkt in die Maschine integrierte Messtechnik erlaubt es, Präzisionsbauteile ohne Umspannen hoch genau zu prüfen. Durch Schwingungs- und Akustikmessungen kann man direkte Rückschlüsse auf die Fertigungsqualität machen [7].

2.2.2 Automatisierung und Produktionsmesstechnik

Wie in der Messtechnik allgemein ist auch in der Produktionsmesstechnik die Automatisierung eines der Kernbausteine. Um komplexe Steuerungs- und Auswertungs-

funktionen nicht zentral sondern lokal möglich zu machen, bedarf es einer optimalen Integration industrieller Messverstärkersysteme. Automatisierungsschnittstellen in Messverstärkersystemen sind notwendig, um mit jetzigen und zukünftigen Standards Schritt zu halten. Dafür sind Hardware und Software notwendig, die eine Dezentralisierung ermöglichen, damit individuelle 3D Messmaschinen für verschiedene Anwendungsbereiche dezentral eingesetzt werden können [7].

2.2.3 Multicore – die Technik der Parallelisierung

Im Fokus der Multicore-Technik steht die Parallelisierung. Komplexe und vernetzte Systeme fördern höhere Prozessorleistung. Die bisherige Optimierung der Prozessoren durch steigende Taktzahlen ist an eine Optimierungsgrenze gestoßen, Ableitung der Wärme und Signallaufzeiten sind zunehmend ein Problem [7]. Anstatt höherer Taktzahlen wird die Leistung der Prozessoren mit Parallelisierung erhöht. Die Prozessor-Parallelisierung wird in der industriellen Automatisierung immer häufiger eingesetzt [7].

2.2.4 Sensoren

Das Ziel ist, Sensoren einzusetzen, die sich schnell und einfach in komplexere Produktion integriert werden können. Ein Beispiel dafür wäre, elektronische Datenblätter zu generieren.

Multisensorik im digitalen Trend 4.0

Für Industrie 4.0 sind intelligente Sensoren, die Daten generieren, unbedingt notwendig. Miniaturisierte Sensoren und deren Vernetzung mit anderen elektronischen Bauteilen bilden die Grundlage für eine neue Generation intelligenter, multifunktionaler Geräte, die Messgrößen erfassen, weiterleiten können. Heute spricht man nicht mehr von einzelnen Sensoren, sondern von Multisensorik, Sensorsystemen, die miteinander vernetzt sind. Daten werden direkt im System des Sensors vorverarbeitet, und die Sensoren müssen mit übergeordneten Netzwerken verknüpft sein.

Messverstärker

„Mit einem Messverstärker werden elektrische Größen gefiltert, linearisiert, verstärkt, normiert und in Bezug zur Masse gesetzt“ [88] Messverstärker müssen die Fähigkeit haben, in Echtzeit mit Sensoren und industriellen Internet-System kommunizieren zu können.

Messtechnik-Software

Das Hauptanliegen bei der Messtechnik-Software ist, dass komplexe Funktionen möglichst einfach zu bedienen sind.

2.3 Digitaler Zwilling und Industrie 4.0

Der digitale Zwilling bildet den Prozess der Produktion ab. Durch einen digitalen Zwilling können Abläufe in der Produktion sowie Gegenstände in der Welt der Virtualität nachgeahmt und Schwachstellen gesehen werden. Das Produkt muss nicht aktuell existieren [8]. Der digitale Zwilling kann helfen, die Ursache zu finden, wenn ein Problem oder Fehler in der Produktion auftritt. Relevante Daten können heraus gefiltert werden und mit Hilfe dieser Daten können Vorschläge zur Verbesserung gemacht werden.

Die Früherkennung gegebener Schwachstellen oder Fehler führt zu erheblicher Kostensenkung, denn die Verifizierung bringt keine Sicherheit für Fehler, die schon in der Spezifikation vorhanden waren.

Durch den digitalen Zwilling können vor der Produktion Daten gesammelt, ausgewertet und in einheitlichem Format dargestellt werden. Dies ermöglicht eine Untersuchung aller Teile der Produktion und Anpassungen können gemacht werden. [9].

Maschinenbauer der Zukunft

Abschließend zum Kapitel 2 wäre noch hinzuzufügen, dass die Digitalisierung die Arbeit des Maschinenbauers der Zukunft grundlegend geändert hat. Durch die Digitalisierung arbeitet der Maschinenbauer so gut wie ohne Papier. Dadurch kann die Konstruktion einfacher, schneller, günstiger und sicherer gemacht werden. Praktische Anwendungen können digital geprüft werden. Der Maschinenbauer der Zukunft braucht zumindest grundlegende IT-Kenntnisse. KI, Zusammenführung von Datenquellen sowie intelligente und vernetzte Produktion sind Schlüsselbegriffe für ihn. Sein Arbeitsgebiet verlagert sich auf digitale Realitäten und damit virtuelle Möglichkeiten. Der Maschinenbauer der Zukunft wird allerdings weiterhin wie in der Vergangenheit mit dem Messtechniker eng zusammenarbeiten müssen, um funktions- fertigungs- und qualitätsgerechte Werkstücke zu erzeugen.

3 Fertigungsmesstechnik – Grundlagen

Im Zuge der Produktentwicklungsprozesse werden zunächst funktionale Anforderungen festgelegt. Anhand dieser Anforderungen leitet man dann die so genannten funktionalen Spezifikationen ab. Ausgehend von den funktionalen Spezifikationen werden die geometrischen Produktspezifikationen des Produktes festgelegt, d.h. der Bereich der zulässigen Abweichungen.

Da im Fertigungsprozess die exakte Nenngeometrie oft nicht erzeugt werden kann und häufig auch nicht sinnvoll ist, bekommt jedes Nennmaß Toleranzgrenzen zugeordnet, innerhalb welcher die funktions- fertigungs- und qualitätsgerechte Herstellung eines Werkstückes gewährleistet ist.

Der Nachweis der Konformität von geometrischen Merkmalen mit den Spezifikationen ist eine Hauptaufgabe der geometrischen Messtechnik. Dazu ermittelt der Messtechniker am Werkstück Maße, sowie Form- und Lageabweichungen, die dann mit den Spezifikationen des Konstrukteurs verglichen werden. Die Ermittlung geschieht durch Einsatz von Lehren, Messgeräten, Messeinrichtungen oder Messsystemen [10].

Während in der Vergangenheit streng zwischen physischen Produkten und Dienstleistungen unterschieden wurde, wird die Produktbezeichnung nach ISO 9000 nun allgemeiner verwendet. Ein Produkt ist das Ergebnis einer Reihe von miteinander verbundenen oder interagierenden Aktivitäten, das Inputs in Outputs umwandelt. Nach der aktuellen ISO-Normierung für Qualitätsmanagement werden Produkte in vier Produktkategorien eingeteilt: Hardware (z. B. Motor, Gerät, mechanisches Teil), Software, verarbeitete Materialien sowie Dienstleistungen [69].²

„Fertigungsmesstechnik steht als Oberbegriff für alle mit Mess- und Prüfaufgaben verbundenen Tätigkeiten, die beim industriellen Entstehungsprozess eines Produktes zu erbringen sind. Ein wichtiges Teilgebiet der Fertigungsmesstechnik ist die Messung von Länge, Winkel, Gestalt und Oberfläche, also die Messung der Geometrie von Werkstücke“ [31].

Das Aufgabenspektrum der Fertigungsmesstechnik erstreckt sich von Messen und Prüfen der geometrischen Merkmale der Werkstücke, Funktionsprüfung bis hin zur

² Diese Stellen aus dem Englischen übertragen bzw paraphrasiert vom Autor.

Werkstoffprüfung während das Produkt entsteht, und der Sammlung der Daten. Um die Qualität von Produkten zu sichern, zu steuern und zu verbessern, werden Mess- und Prüfdaten in fast jeder Phase des Produktentwicklungsprozesses benötigt. Die Bereitstellung solcher Informationen ist das wichtigste Ziel der Fertigungsmesstechnik, die die Grundlage für das Qualitätsmanagementsystem darstellt [32].

Neben der Qualitätskontrolle von Produktionsmethoden und Produktionsprozessen der erzeugten Produkte muss auch die Kontrolle der Rentabilität in Betracht gezogen werden, und sie alle zusammen bilden die Grundlage für die gesamte Produktionsmesstechnik. Sie umfasst die folgenden Punkte [32]:

- Kontinuierliche Überwachung der Produktionsmittel und -prozesse sowie der Produkte
- Gelegentliche Überprüfung und Kontrolle der Wirtschaftlichkeit
- Kontinuierliche Anwendung der zerstörungsfreien (Material-)Prüfung (ZfP)
- Anwendung der zerstörenden Materialprüfung auf Stichprobenbasis

3.1 Historische Entwicklung der Produktionsmesstechnik

In der Antike und im Mittelalter stand das Messen von Dimensionen im Vordergrund. Mit Beginn der Industrialisierung waren der Taylorismus und die Arbeitsteilung die vorherrschende Treibkraft in der Produktion, was erhebliche Verbesserungen und Erleichterungen ermöglichte. Schließlich wurde diese revolutionäre Philosophie durch die Globalisierung noch einen Schritt weitergeführt [33].

Diese Veränderungen in Richtung Globalisierung haben sich unweigerlich auf das moderne Verständnis der Produktionsmesstechnik ausgewirkt und diese geprägt. Im Laufe der Zeit hat sich die Definition und das Verständnis des Begriffs Qualität konzeptionell verändert. Zunächst wurde er nur auf das Produkt oder die Produktion bezogen, dann auf das gesamte Unternehmen oder die Organisation. Vorläufig ist Qualität zu einer allgemeinen Managementaufgabe der obersten Führungsebene geworden, d. h. TQM (Total Quality Management). Somit berücksichtigt es mehrere wichtige Themen wie interne und externe Kundenzufriedenheit, langfristigen Organisationserfolg, Gesellschaft und Umwelt. Im Lichte dieses umfassenden Konzepts des TQM hat sich die Fertigungsmesstechnik vom Prüfen, Messen, Bestimmen und Beseitigung von fehlerhaften Teilen nach ihrer Herstellung zu einem Konzept entwickelt, das sich auf die vorbeugenden Maßnahmen gegen die

Herstellung möglicher fehlerhaften Teile konzentriert. Es zielt also auf eine Produktion ab, die unter Kontrolle steht [33].

Alles in allem hat sich die Fertigungsmesstechnik in verschiedenen Aspekten wie Anwendungsbereich, Zeitpunkt der Prüfplanung, Inhalt und Ziel verändert. Während etwa in der Zeit des zweiten Weltkriegs das Ziel die Einhaltung der Normen war, ist heute das Thema Industrie 4.0 und das Ziel ist die Automation.

3.2 Technische Herausforderungen und Trends in der Produktionsmesstechnik

Die weltweite Globalisierung und Digitalisierung betrifft nahezu jede Branche national und international und prägt auch die Zukunft der Produktionstechnik. Die verfügbaren Ressourcen effizienter zu nutzen, die neuartigen Prozesstechnologien zu beherrschen, flexibler zu fertigen und die Transparenz zu erhöhen sind die Themen, die für die Produktionsmesstechnik und verwandte Branchen von größter Bedeutung sind. In ihrer Roadmap für Fertigungsmesstechnik, das im Jahre 2011 veröffentlicht wurde, beschreibt der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) die großen Herausforderungen und Bewegungen in der Fertigungsmesstechnik mit vier Schlüsselbegriffen die bis heute noch ihre Gültigkeit haben, nämlich flexibler, genauer, zuverlässiger und schneller [34].

Schneller: Wie in jedem anderen Bereich des menschlichen Lebens ist Zeit oder anders ausgedrückt, die Beschleunigung der Dinge immer eines der ersten Themen, an die man denken muss, auch wenn es um die Durchführung von Wissenschaft und Technologie geht, und in diesem speziellen Fall um die Entwicklung, Herstellung und Messung von Fertigungsprodukten. Aus produktionsmesstechnischer Sicht können schnellere Prozesse in zweierlei Hinsicht interpretiert werden. Erstens, das Sammeln der erforderlichen (Maß-)Informationen über die Produktqualität in kürzerer Zeit durch Verbesserung, Optimierung und eventuell Kombination der bereits vorhandenen Messverfahren und Messprinzipien [34], wofür optische Messgeräte von großer Bedeutung sind. Zweitens sollen Messungen und Messergebnisse schneller durchgeführt werden, indem messtechnische Ansätze und Anwendungen kompakter in Produktionsschritte integriert werden, was insbesondere mit Hilfe der Automatisierung realisiert werden kann [35].

Genauer: Da die Wettbewerbsfähigkeit in der Fertigungsindustrie rasant zunimmt, steigen ebenso die Forderungen der Kunden an die Qualität der Teile und Baugruppen. Das erfordert mehr Genauigkeit, und obwohl Genauigkeit hier das Schlüsselwort für bessere Qualitätsspezifikationen ist, wird ihre korrekte Interpretation und Verwendung durch die Verwendung des Begriffs Messunsicherheit gemäß dem Internationalen Vokabular für Metrologie (VIM) realisiert [36].

Die Verringerung der Messunsicherheit und die Gewinnung genauerer Ergebnisse sind daher eines der anspruchsvollsten Ziele in allen Bereichen der modernen Produktionsmesstechnik, also im Makro-, Mikro- und Nanobereich. In diesem Zusammenhang ist eine bessere Genauigkeit eine unabdingbare Forderung für die Messsysteme, da die Toleranzen ständig kleiner werden. Darüber hinaus verlangt die zunehmende Miniaturisierung höhere Genauigkeit. Dieser Trend betrifft alle Bereiche und Prozesse der Messtechnik, die mit dem Erfassen der Form eines Produktes zu tun haben.

Es besteht eine offensichtliche Korrelation zwischen Messunsicherheit und Abmessung. Außerdem wird die Notwendigkeit deutlich, bei großen Abmessungen engere Toleranzen zu prüfen. Nicht zuletzt führt auch die Messung elektrischer Kenngrößen [39] und von Materialeigenschaften [40] zu einem Bedarf an genaueren Messergebnissen, so dass die Überwachung und Korrektur von Umwelteinflüssen immer mehr an Bedeutung gewinnt.

Zuverlässiger: Jedes Messergebnis erfordert die Angabe der Messunsicherheit, da es sonst nicht als vollständig und aussagekräftig angesehen werden kann. Daher steigt die Notwendigkeit der Ermittlung, Bewertung und vor allem der Verringerung von Messunsicherheiten rapide an.

Neben den standardisierten Verfahren für die oben genannten Ziele werden für unterschiedliche Messaufgaben maßgeschneiderte Lösungen etabliert, die im Vergleich zu den standardisierten Verfahren deutlich einfacher sind.

Darüber hinaus wird wahrscheinlich eine Dokumentation der Messunsicherheit für Produkte erforderlich sein, die sich auf die gesamte Sicherheit produzierter Güter auswirken wie etwa in der Luftfahrt und Medizin (Geräte) [41].

Darüber hinaus dürfte die Bedeutung der computergestützten Simulation (CAS) von Messprozessen, die hauptsächlich auf der Monte-Carlo-Methode basieren, weiter zunehmen, um die Messunsicherheit zu bestimmen..

Flexibler: Die Messverfahren, die in der Produktion eingesetzt sind, werden vielfältiger und somit wird ebenso die Messtechnik immer flexibler und anpassungsfähiger. Wie bei der Kombination verschiedener Fertigungstechnologien werden auch hier mehrere Messverfahren zu kompakten Systemen vereint, die die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit des gesamten Messprozesses erhöhen.

Diese Systeme werden als „Multisensor Messmaschinen“ bezeichnet. Dies steigert die Flexibilität der Systeme. Da sie aus mehreren verschiedenen Sensoren und Messprinzipien bestehen, ist der Grad der Systemkomplexität sowie der erforderliche Schulungsaufwand für das Messpersonal deutlich höher [42].

Holistisch: Holismus „auch Ganzheitslehre, ist die Vorstellung, dass natürliche (gesellschaftliche, wirtschaftliche, physikalische, chemische, biologische, geistige, linguistische usw.) Systeme und ihre Eigenschaften als Ganzes und nicht als Zusammensetzung ihrer Teile zu betrachten sind“ [89].

Im Bezug auf die Fertigungsmesstechnik werden heutzutage immer häufiger Technologien eingesetzt, die die Form eines Produktes ganzheitlich erfassen. Neben der Photogrammetrie und der Streifenprojektion [43] ist es mit Hilfe von CT (Computertomografie) möglich, selbst solche Strukturen zu erschließen, die von außen nicht messbar sind [44].³

3.3 Moderner Produktentwurf, Produktentwicklung, Produktprüfung

„Es kann manchmal schwierig sein, ein Produkt zu erzeugen, welches den Anforderungen seiner Anwendung entspricht. Oft sind Tests notwendig, um die Funktionalität des Bauteiles als Ganzes zu prüfen. Das kann bedeuten, dass erhebliche Kosten für Funktionstests anfallen, um die Parameter zu ermitteln, die erforderlich sind, um sicherzustellen, dass der Entwurf und seine Umsetzung in der Fertigung unter Berücksichtigung der gewählten Materialien und der Herstellung die gewünschten Anforderungen erfüllen. Um Geld und Zeit zu sparen, bedarf es moderner IMS, den Einsatz fortschrittlicher Messtechnik, AI und IT, unter Einbindung des digitalen Zwillings, Simulation und Modellierung, um das Design von Produkten

³ Diese Stelle aus dem Englischen übertragen vom Autor

und Produktionssystemen für einen effizienten Produktlebenszyklus zu managen und zu optimieren.

„Die Erstellung eines Modells erfolgt während der Entwicklungsphase des Produktes mit den Vorteilen:

- Entwurfsprozess: Optimierung der geometrischen Anforderung
- Herstellungsprozess: Ausschuss durch zu übertrieben kleine Toleranzen wird vermieden,
- Verifikationsprozess: mathematisch-physikalisches Modell mit den gemessenen Größen. Das Funktionsverhalten kann simuliert oder virtualisiert werden - basierend auf realitätsnahen Daten“⁴ [69].

3.4 Einführung in die Tolerierung

Die Notwendigkeit der Toleranzangaben ist unerlässlich, um die Funktionsfähigkeit und Austauschbarkeit von Komponenten ohne Nachbearbeitung zu gewährleisten. Diese Notwendigkeit entstand zuerst in der französischen Waffenproduktion (Honore Le Blanc 1785). Im Jahre 1805 garantierte ein amerikanischer Nähmaschinenhersteller Wheeler & Wilson seinen Kunden die Lieferung der Ersatzteile seiner Nähmaschinen für etwaige Service per Post. Dafür war es aber erforderlich ein Bemaßungssystem- und auch ein System für Form-, Lage- und Oberflächentolerierung zu kreieren, welches den Austauschbau und Montage möglich machte [11].

Um einen bestimmten Bauteil herzustellen sind Angaben hinsichtlich der Abmessungen, der Form und der Oberflächenbeschaffenheit des Werkstückes erforderlich. Oberflächenabstände müssen genau eingehalten werden, um die Funktion des Bauteiles zu gewährleisten. Exakte Maße lassen sich praktisch nicht herstellen, Abweichungen müssen toleriert werden. Das bei der Konstruktion festgelegte Maß darf zwei Grenzmaße weder über- noch unterschreiten. Das Herstellungsverfahren muss sich an diesen und der geforderten Oberflächengüte orientieren [12].

Durch ISO 8015 ist festgelegt wie die Toleranz eines Bauteils zu beschreiben ist. Verschiedene Abweichungen von der Idealgestalt können untergliedert werden in

- Abweichungen von der Geometrie: Maßtoleranzen
- Abweichungen von der Form: Form- und Lagetoleranzen sowie
- Rauheitstoleranzen.

⁴ Diese Stelle aus dem Englischen in Deutsche übertragen vom Autor

3.4.1 Form und Lage des Werkstückes

Unter Form und Lage des Werkstückes kann man die „Grobgestalt“ Maß, Form und Lage zusammenfassen. Es geht um einfache Standardgeometrien wie beispielsweise Ebene, Kugel, Zylinder, Torus usw. Diese Parameter können zum Beispiel mittels Koordinatenmessgeräte erfasst und anschließend mit dem Nennmaß verglichen werden. Komplexere Gestalten lassen sich oft nur mittels mathematischer Verfahren bestimmen, besonders dann, wenn die Bauteile ständig weiter optimiert werden. [10].

Die „Feingestalt“ besteht aus Welligkeit und Rauheit, die aus der Oberfläche ergibt. Die Gestalt eines Werkstückes wird allgemein in Grob- und Feingestalt aufgliedert, siehe Abbildung 3.2 unten.

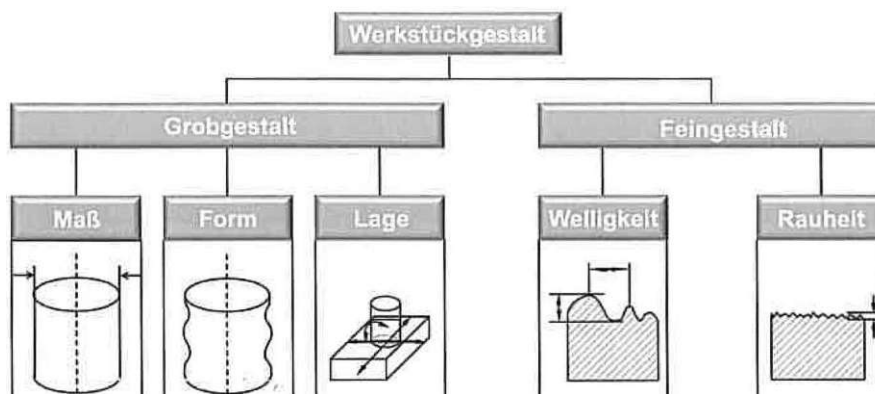


Abbildung 3.2 Grob- und Feingestalt in der Fertigungstechnik [9]

3.4.2 Maße und Abmaße

Als Bezugsmaß dient Nennmaß N . Der am fertigen Werkstück gemessene Wert ist das Istmaß I . „Wegen gewisser Formabweichungen können die Istmaße an verschiedenen Stellen unterschiedlich sein“ [12]. Grenzmaße sind das Größtmaß G und das Kleinstmaß K , zwischen denen das Istmaß liegen muss [12].

„Jedes Werkstück, und sei es noch so exakt hergestellt, weist Abweichungen von der geometrisch idealen Gestalt auf (DIN 4760)“ [67]. Die Maßabweichung beschreibt die Abweichung von Nennmaß und Istmaß.

Zulässige Abweichung wird durch das Abmaß angegeben, wobei die Toleranz eines Maßes durch das untere und obere Abmaß gebildet wird. Diese können auch

unterschiedlichen Wert besitzen [12]. Abbildung 3.3. zeigt Maße und Abmaße an einer Welle und an einer Bohrung.

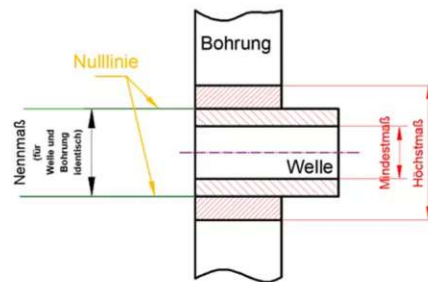


Abbildung 3.3 Maße und Abmaße an einer Welle und an einer Bohrung [12]

Aufgrund von Maß-, Form-, Lageabweichung sowie Oberflächenrauheit kann sich der Nennmaß vom Istmaß unterscheiden.

Bereits bei der Konstruktion müssen die möglichen Formabweichungen, die im Herstellungsprozess entstehen können, berücksichtigt werden [15].

Die Abbildung 3.4 unten zeigt die möglichen Formabweichungen einer Bohrung.

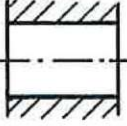
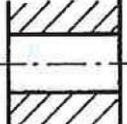
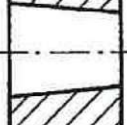
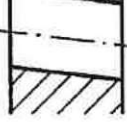
Bohrung	Abweichungen	Beschreibung
	„Ideal“	Bohrung ist „ideal“ bezüglich Maß, Form, Lage und Oberfläche
	Maßabweichung	Bohrungsdurchmesser ist kleiner als das Ideal-Maß
	Formabweichung	Bohrung ist nicht zylindrisch
	Lageabweichung	Bohrungsachse ist nicht rechtwinklig zur Werkstückoberfläche

Abbildung 3.4 Formabweichung einer Bohrung[15]

3.4.3 Maßtoleranz

Maßtoleranz wird wie folgt definiert: Es „ist die Differenz zwischen dem Größtmaß G und dem Kleinstmaß K oder Die Differenz zwischen dem oberen Abmaß A_o und dem unteren Abmaß A_u “ [12].

3.4.4 Form und Lagetoleranzen

Form- und Lagetoleranzen sind geometrische Grundtoleranzen, und beschreiben mögliche Abweichungen von einer idealen Bauteilgeometrie, die sich nicht durch eine Messung an einer einzelnen Bauteilposition ermitteln lassen [13].

Während des Fertigungsphase kommt es zu Abweichung der Form und Lage des Werkstückes. Diese Abweichungen können die Funktions- und Montagefähigkeit des Bauteils massiv beeinträchtigen und müssen durch die Angabe der Formtoleranz und Lagetoleranz berücksichtigt werden.

Keine der Eigenschaften der Formtoleranz erfordert einen Bezugspunkt, und Formen können unabhängig voneinander bestimmt werden, wohingegen Lagetoleranz die Abweichung der idealen geometrischen Lage bezüglich eines Bezugselementes

begrenzt. Dabei besitzen auch die Bezugselemente Toleranzen, damit diese auch nicht ohne Abweichungen gefertigt werden können [13].

In der Abbildung 3.5 unten sind als Beispiel Form- und Lagetoleranzen dargestellt.

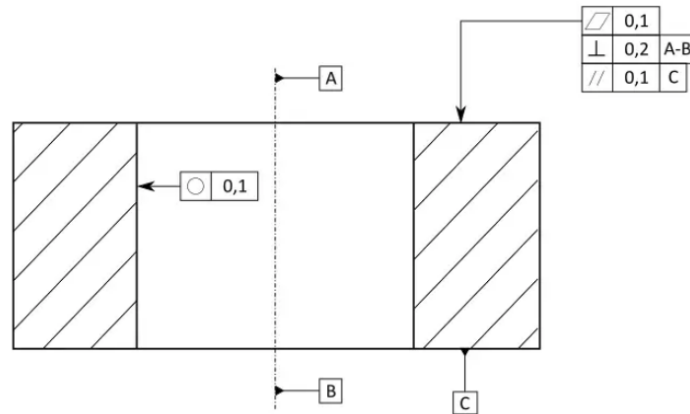


Abbildung 3.5 Beispiele für Form- und Lagetoleranzen [13]

3.4.5 Das Hüll- und Unabhängigkeitsprinzip

Toleranz lässt sich entweder durch das Hüllprinzip oder durch das Unabhängigkeitsprinzip wahlweise definieren [14].

Die Hüllbedingung stellt die gegenseitige Abhängigkeit von Maßtoleranz und geometrischer Toleranz dar. Durch die Maßtoleranzen sind Form- und Lagetoleranzen begrenzt. Diese dürfen Maßtoleranzen nicht überschreiten, da sonst die maximalen Materialmaße überschritten werden [14].

Das Hüllprinzip nach ISO 2768 besagt, dass eine Linie dann als „innerhalb der Toleranz“ gilt, wenn sie sich zwischen zwei gedachten Toleranz-Grenzlinien befindet. Für die Prüfung einer Toleranz nach dem Hüllprinzip sind immer zwei Messungen notwendig. Das gilt vor allem bei Passungen von langen Bauteilen, wenn zum Beispiel ein Profil durch eine passende Bohrung geschoben wird. Die Wichtigkeit einer Doppelmessung lässt sich auch anhand eines Rundprofils zeigen. Eine Biegung oder eine Abweichung in der Rundheit des Profils kann verursachen, dass es sich nicht mehr leichtgängig durch die Bohrung führen lässt, auch wenn das Rundprofil an jedem Punkt innerhalb der geforderten Toleranz gefertigt worden ist.

Um einen solchen Fehler zu meiden muss das Hüllprinzip das ganze Profil umhüllen. Prüfung der Toleranz eines Werkstückes nach dem Hüllprinzip garantiert seine Funktionsfähigkeit und die Austauschbarkeit. Allerdings lässt sich das Hüllprinzip nur auf zylindrische oder planparallele Formen anwenden [14].

Das Unabhängigkeitsprinzip betrachtet jedes Maß mit seiner zugehörigen Toleranz hingegen separat, d.h. die Maßtoleranz und Form- und Lagetoleranz werden einzeln und unabhängig voneinander gemessen. Jedes Element muss damit einzeln ausgewertet werden und soll innerhalb der Spezifikation liegen. Bei dieser Betrachtung der Toleranzen entfällt die doppelte Prüfung. Das Unabhängigkeitsprinzip wird meist bei geringeren Genauigkeitsanforderungen angewendet.

In der Praxis werden jedoch voneinander abhängige Parameter in Bezug zueinander gesetzt. So ist der Durchmesser eines Rundprofils im Unabhängigkeitsprinzip immer in Bezug zur Rundheit am gewählten Messpunkt zu setzen [14].

Das Unabhängigkeitsprinzip nach 8015 ist heute das standardmäßig angewendete Prüfverfahren für Formtoleranzen [14].

Zur Sicherstellung einer Bauteilqualität genügt eine Prüfung nach dem Unabhängigkeitsprinzip nach ISO 8015, sofern auf der Zeichnung nichts anderes angegeben ist. Falls das Hüllprinzip angewendet wurde, muss zur Festlegung auf der Zeichnung ein entsprechender Hinweis, beispielsweise „ISO 2768 – mK⁵“, eingetragen sein [14].

Eintrag der Toleranzen

Der Toleranzeintrag erfolgt in der technischen Zeichnung des Werkstückes. Diese setzt sich aus den geometrischen Maßen mit Toleranzen und den kompletten Merkmalen des Werkstückes zur Beschreibung der Funktion zusammen.

Für Maße, die die Funktionsfähigkeit oder Austauschbarkeit eines Bauteiles nicht beeinträchtigen, ist keine explizite Toleranzangabe in den entsprechenden technischen Zeichnungen erforderlich. Dafür wird auf der Zeichnung eine Allgemeintoleranz eingetragen. Sie ist durch das gewünschte Fertigungsverfahren festgelegt. Es gibt Allgemeintoleranzen der Toleranzklasse fein (f) für Zeichnungen in der Feinwerktechnik und Toleranzklasse mittel (m) für Zeichnungen im allgemeinen Maschinenbau. Diese Allgemeintoleranzen sind in der Norm ISO DIN 2768 definiert.

⁵ISO 2768-mk bedeutet, dass Maßinformationen, für die keine Toleranzen angegeben sind, gemäß der m- und k-Klasse befolgt werden. Die m-Klasse ist in ISO 2768-1 spezifiziert, und die K-Klasse ist in ISO 2768-2 spezifiziert, die H-, K- und L-Toleranzstufen umfasst.

Die Angabe einer gewünschten mittleren Toleranz kann im oder neben dem Schriftfeld der technischen Zeichnung mit ISO 2768-m angedeutet werden [15]. Die Angabe der Maßtoleranz ist mit ISO DIN 286 bzw. ISO DIN 7182 festgelegt und bezieht sich auf das Nennmaß des Werkstücks. Das Istmaß liegt dann zwischen Mindest- und Höchstmaß [15].

Die Abbildung 3.6 unten stellt als ein Beispiel die Tolerierung eines Werkstückes nach ISO 8015 mit Maß-, Form- Und Lagetoleranzen sowie der Allgemeintoleranz nach ISO 2760 - mK dar [13].

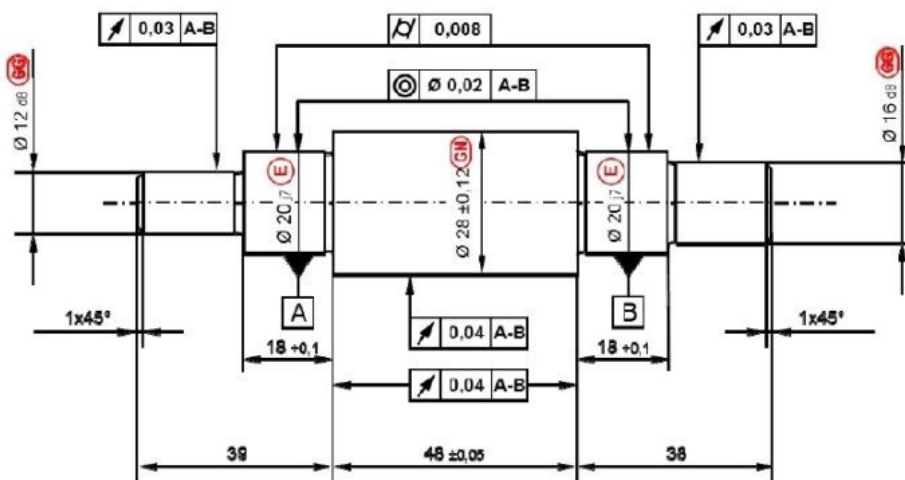


Abbildung 3.6 Toleriertes Bezugssystem einer Welle [13]

3.4.6 Oberflächenbeschaffenheit

Für die Herstellung bzw. Funktionsfähigkeit eines Werkstückes ist neben den Angaben der Abmessungen und der Form die Oberflächenbeschaffenheit entscheidend [81]. Über 90 % der Maschinen- und Geräteschäden werden durch „an der Oberfläche auftretende Mechanismen, wie etwa Ermüdungsrisse, Belastungskorrosionsrisse, Lochfraß, abrasiver bzw. adhäsiver Verschleiß usw., verursacht. Der Oberflächenbeschaffenheit kommt somit eine sehr wichtige Rolle zu. Die Oberfläche ist aus einer Reihe von Schichten wie folgt aufgebaut:

- einer Oxid-Schicht, die alle Metalle besitzen, mit einer Dicke von einigen Nanometer;
- der topografischen Schicht, die die Gestalt der Oberfläche (Spitzen und Täler) beschreibt und aufgrund des Fertigungsprozesses entsteht;
- einer plastisch verformten Schicht, die durch den Fertigungsprozess entsteht;

- einer metallurgisch verformten Schicht, die sich aufgrund der Erwärmung während des Fertigungsprozesses ergibt, sowie
- dem Hauptteil des Materials“ [81].

Rauheit

Der Maschinenbauer versteht unter Oberflächenbeschaffenheit im allgemeinen die Rauheit. Sie „ist eine kleinräumigere Abweichung von der idealen Oberfläche als die mit den Form- und Lagetoleranzen erfassten Abweichungen der Grundgeometrie“ [13]. Abhängig vom Produktionsverfahren kann die Oberflächenrauheit, die besonders kritisch ist bei Berührungspunkten von Werkstücken, gefühlt und gesehen werden, oder sie ist ausschließlich mit Mikroskop zu sehen. Gemeinsam mit ihrer Toleranzeinhaltung ist die Rauheit von größter Bedeutung für die Lebensdauer, die Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit.

Sie beeinflusst sehr stark den Reibungskoeffizienten, den Verschleißwiderstand, die Materialermüdung und das Aussehen von Bauteilen [81]. Dabei verursacht eine zu große Rauheit Abrasion, eine deutlich zu kleine Rauheit (= spiegelglatte Oberfläche) hingegen kann die Wirkung von Schmierstoffen beeinträchtigen, weil der Schmierfilm sich nicht mehr ausreichend in Vertiefungen anhaften kann und abreißt“ [13].

Während nach DIN_4760 die Formabweichung und die Welligkeit Gestaltabweichungen erster bzw. zweiter Ordnung sind, ist die Rauheit eine Gestaltabweichung dritter bis fünfter Ordnung [81]

Bei Fertigungsprodukten, die mit dem menschlichen Körper in Kontakt kommen, sind die Anforderungen besonders hoch. Deshalb wird auf die Oberflächenbeschaffenheit solcher Produkte ausdrücklich Wert gelegt, z.B. in der Zahnmedizin, bei Exoskeletten und bei Implantaten. Darüber hinaus wird nicht nur eine zuverlässige Funktion erwartet, sondern eine Lebensdauer. Auch in der Automobilindustrie sind technische Oberflächen ausschlaggebend für hochpräzise Mechanik und deren Leistungen.

3.4.7 Mittenrauwert Ra

Um nun die Rauheit technischer Oberflächen beschreiben zu können, bedient man sich international festgelegter Rauheitskenngrößen, deren Ermittlung im Allgemeinen durch geeignete Schnittführung und Profilintegration erfolgt“ [30].

Dabei ist der Mittenrauwert R_a der arithmetische Mittelwert, „der Beträge aller Abweichungen des Oberflächenprofils von der Mittellinie. Die Mittellinie ist dabei so definiert, dass die Summe der Flächen im Profildiagramm oberhalb (A_o) und unterhalb (A_u) der Mittellinie gleich groß ist. R_a ist messtechnisch schwerer zu ermitteln, aber wenig empfindlich gegen Ausreißer. Ob wenige große oder viele kleine Abweichungen vorhanden sind ist aus R_a nicht zu erkennen [13]. Die Abbildung 3.7 zeigt den Mittenrauwert.

Die Berechnung erfolgt mit“ [13]: $\sum A_o = \sum A_u$ $R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$ (Gleichung 3.1.)

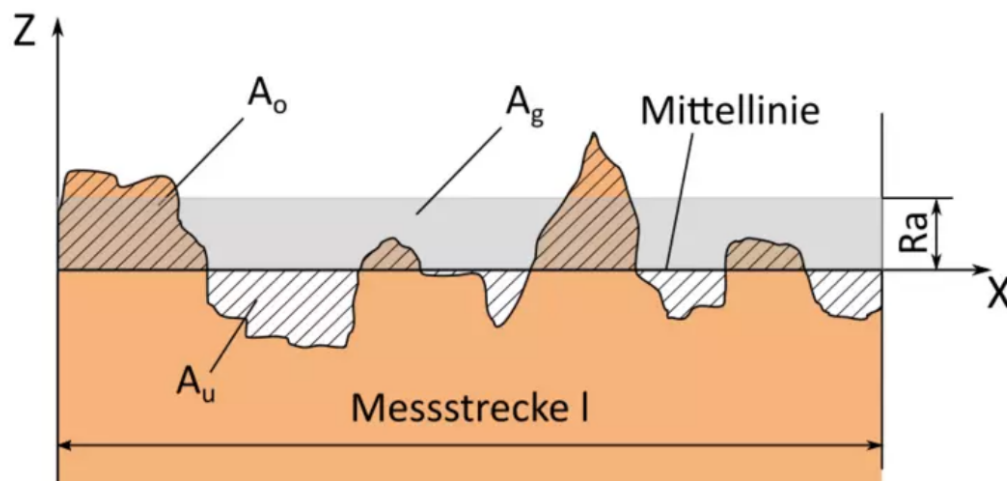


Abbildung 3.7 Mittenrauwert R_a [13]

3.4.8 Rautiefe R_z gemittelt

„Die gemittelte Rautiefe R_z ist der Mittelwert der Rautiefen von 5 aneinander grenzenden gleich langen Messabschnitten, wobei die Rautiefe die Differenz vom höchsten zum tiefsten Punkt des Abschnittes ist. R_z ist aussagefähiger und anschaulicher als R_a “ [13]. Es wird berechnet: $R_z = 1/5 (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5)$. Die Abbildung 3.8 unten zeigt die gemittelte Rautiefe.

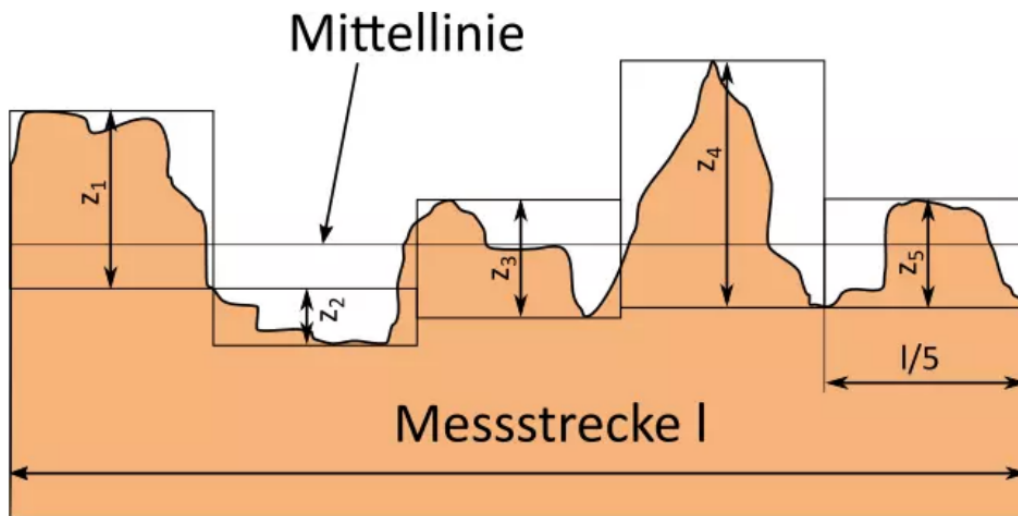


Abbildung 3.8 Gemittelte Rautiefe [13]

Es gibt zwar Möglichkeiten, die Oberflächen-Kennwerte R_z und R_a zu vergleichen, nämlich mit Hilfe von vorhandenen Diagrammen sowie Tabellen, die durch die Eigenschaften der Flächen Vergleiche herstellen. Eine Umrechnung von R_z und R_a und umgekehrt ist allerdings nicht möglich. Auch existieren „weitere Parameter, um die Oberflächenstruktur zu beschreiben, wie Wellentiefe, Materialanteil in einer bestimmten Tiefe oder Rillenrichtung, die mit Zeichnungsangaben vorgegeben werden können, aber nur in Sonderfällen benötigt werden. Die zulässige Oberflächenrauheit muss auf Fertigungszeichnungen mindestens für Funktionsflächen angegeben werden. Die Symbole dafür sind in DIN EN ISO 1302 festgelegt“ [13].⁶

Die Abbildung 3.9 unten zeigt ein Beispiel für R_z in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens.

⁶ Die Normen DIN EN ISO 1302 sind z.B. in Fritz, A. (2023). *Hoischen - Technisches Zeichnen*. Cornelsen Verlag zu finden.

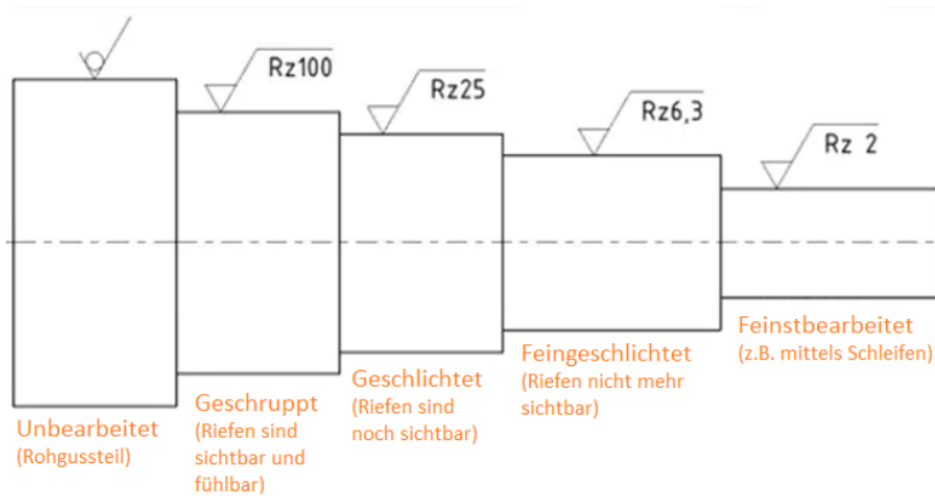


Abbildung 3.9 Beispiel für Rz in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens[13]

3.5 Geometrische Produktspezifikation (GPS)

Die ständig zunehmende Komplexität und Vielfalt von Werkstücken in der Fertigungsindustrie hat im Gefolge eine große Nachfrage nach Austauschbarkeit sowie nach präziseren, genaueren, zuverlässigeren und schnelleren Messtechniken und Messsystemen. Die Tatsache, dass Entwicklung, Produktion und Montage fast immer an verschiedenen Orten grenzüberschreitend verteilt ist, macht die nationale und internationale Austauschbarkeit von Produktinformationen zum essentiellen Faktor für die Fertigungsindustrie. Die zunehmende Arbeitsteilung in der Entwicklung, Produktion und Montage fordert eine gemeinsame Sprache und gemeinsame Normen [16].

Um die Austauschbarkeit von Produktinformationen zu fördern, wurde 1996 das internationale Komitee ISO/TC 213 ISO/TC (International Committee for Dimensional and Geometrical Product Specifications and Verification) gegründet [84]

Die geometrische Produktspezifikation (GPS) ist eine Zusammenstellung von Merkmalen und Attributen zur geometrischen Charakterisierung von herzustellenden Produkten, die in Normen standardisiert ist [17].

3.5.1 Das ISO-GPS-Normensystem

Im Normensystem der Geometrischen Produktspezifikation ISO-GPS-System, das zurzeit das größte ISO-Normenprojekt in der Technik darstellt, werden geometrische

Anforderungen an Werkstücke zur Spezifizierung und Verifizierung definiert. „Als geometrische Spezifikation bezeichnet man die Festlegung der zulässigen Abweichungen eines Werkstückmerkmals durch ein Größenmaß oder eine Zone“ [19]. Dadurch werden „die zulässigen Abweichungen der geometrischen Merkmale eines Werkstückes festgelegt. GPS dient somit auch der Verständigung zwischen Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsplanung, Fertigung und Qualitätssicherung. Für eine Produktion nach Industrie 4.0 sind ebenfalls unmissverständliche geometrische Produktspezifikationen elementare Voraussetzung“ [85], siehe auch [19].

Die Tabelle 1 unten zeigt einige der wichtigsten ISO-GPS-Normen, die für die Spezifizierung geometrischer Eigenschaften von Werkstücken verwendet werden.

Tabelle 1: Relevante ISO-GPS-Normen (angepasst aus [19]).

Thema	Nummer	Bezeichnung	Erscheinungsdatum
GPS-Konzept und Grundlagen	DIN EN ISO 14638	Matrix-Modell	2015
	DIN EN ISO 8015	Grundlagen-, Prinzipien und Regel	2011
	DIN EN ISO 17450-1	Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung	2012
	DIN EN ISO 17450-2	Grundsätze, Spezifikationen, Operatoren, Unsicherheiten, Mehrdeutigkeiten	2013
	DIN EN ISO 25378	Merkmale und Bedingungen-Begriffe	2011
Dimensionelle Tolerierung	DIN EN ISO 14405-1	Dimensionelle Tolerierung- Teil1: Lineare Größenmaße	2017
	DIN EN ISO 14405-2:	Dimensionelle Tolerierung-Teil2: Andere als lineare oder Winkelgrößenmaße	2019
	DIN EN ISO 14405-3	Dimensioneile Tolerierung-Teil3: Winkelgrößenmaße	2017
	DIN EN ISO 286-1; 2	ISO-Toleranzsystem für Längenmaße	2019
Geometrische Tolerierung	DIN EN ISO 22432	Zur Spezifikation und Prüfung benutzte Geometrieelement	2012
	DIN EN ISO 5459	Bezüge und Bezugs- systeme	2016
	DIN EN ISO 1101	Geometrische Tolerierung-Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf	2017

	DIN EN ISO 2692	Maximum-Material-Bedingung (MMR), Minimum-Material-Bedingung (LMR) Reziprozitäts-bedingung (RPR)	2015
	DIN EN ISO 1660	Profiltolerierung	2017
	E ⁷ DIN EN ISO 22081	Allgemeine geometrische und Maßspezifikationen	2019
	E ² DIN EN ISO 21920-1; 2; 3	Angabe der Oberflächenbeschaffenheit; Profile	2020
Technische Produktdokumentation TPD	DIN EN ISO 3040	Bemaßung und Tolerierung- Kegel	2016
	DIN EN ISO 10579	Bemaßung und Tolerierung Nichtformstabiler Teile	2013
	DIN EN ISO 13715	TPDKanten mit unbestimmter Gestalt-Angaben und Bemaßung	2020
	DIN EN ISO 129-1	Angabe von Maßen und Toleranzen-Teil 1: Grundlagen	2020

3.5.2 Das GPS-MATRIXMODELL

Die Darstellung und Beschreibung des GPS-Modells nach DIN EN ISO 14638:2015 erfolgt als Matrix (siehe Tabelle 2). Diese Matrix hat neun Zeilen mit Kategorien geometrischer Merkmale sowie sieben Spalten Kettenglieder (A bis G), als Teil der universellen GPS-Normenkette.

Im Folgenden eine kurze Beschreibung der Kettenglieder:

„**A** Die im Kettenglied **Symbole und Angaben** angeführten Normen definieren die Form und Proportionen der Symbole, Angaben und Modifikatoren und legen Regeln für deren Anwendung fest. Sie erklären auch, wie Spezifikationen zu lesen und allgemein zu verstehen sind.

„**B** Das Glied **Anforderungen an Geometrieelemente** besteht aus ISO-GPS-Normen, die die Toleranzmerkmale, Toleranzzonen, Einschränkungen und Parameter definieren. Dazu gehören jene Normen, die die geometrischen Merkmale, Größenmerkmale, Parameter für die Oberflächenbeschaffenheit, die Form, Größe und Lage der Toleranzzonen und die Definitionen der Parameter festlegen.

„**C** Das Glied **Merkmale von Geometrieelementen** besteht aus ISO-GPS-Normen, die die Merkmale und Bedingungen der geometrischen Elemente von einem Werkstück definieren. Dazu gehören Normen, die Prozesse der Aufteilung, Extraktion, Filtration, Assoziierung und Sammlung der Konstruktion festlegen.

⁷ E = Entwurf

„**D** Das Glied **Übereinstimmung und Nicht-Übereinstimmung** besteht aus ISO-GPS-Normen, die die Anforderungen für den Vergleich zwischen Spezifikationsanforderungen und Verifizierungsergebnissen definieren. Dazu gehören Normen, die Standardwerte definieren, Regeln für die Einhaltung und Nichteinhaltung festlegen und Normen, die sich mit der Unsicherheit befassen.

„**E** Das Glied **Messung** umfasst die ISO-GPS-Normen, die die Anforderungen an die Messung geometrischer Elemente und die Bedingungen definieren.

„**F** Das Kettenglied **Messgeräte** enthält ISO-GPS-Normen, die die Anforderungen an die für die Messung verwendete Ausrüstung festlegen.

„**G** Das Glied **Kalibrierung** enthält ISO-GPS-Normen, die die Anforderungen an die Kalibrierung und Kalibrierungsverfahren für Messgeräte definieren.

„Die Normenketten sind zusammenhängende Normen, die sich auf die gleiche geometrische Eigenschaft beziehen, wie zum Beispiel, Größenmaß von Kegeln, Größenmaß von Kugeln oder Größenmaß von Zylindern. Demnach wird für die korrekte Anwendung der Norm auch die Kenntnis der restlichen Normenketten vorausgesetzt“ [69]⁸.

Die Kettenglieder sind nach den Phasen der Entwicklung eines Produktes aufgelistet und beinhalten jeweils alle ISO-GPS-Normen, die sich auf eine bestimmte Funktion bei der Spezifikation und Verifizierung eines geometrischen Merkmals beziehen [19]. Die Tabelle 2 unten zeigt als Beispiel die erste Zeile der allgemeinen GPS-Matrix in Bezug auf die Größenmaß.

⁸ Diese Stelle aus dem Englischen übertragen vom Autor

Tabelle 2: Für Größenmaß ausgefülltes Matrix-Modell der ISO-GPS-Normen [20]

	Kettenglieder						
	A	B	C	D	E	F	G
	Symbole und Angaben	Anforderungen an Geometrielemente	Merkmale von Geometrielementen	Übereinstimmung Und Nicht-Übereinstimmung	Messung	Messgeräte	Kalibrierung
	ISO 14405-1	ISO 14405-1	ISO 286-1	ISO/TR 16015	ISO 1938-1	ISO 463	ISO/TS 15530-3
	ISO 286-1	ISO 286-1	ISO/TS 16610			13385-1	ISO/TS 15530-4
		ISO 286-2	ISO 14405-1			13385-2	ISO/TR 16015
						ISO 3650	Reihe ISO/TS 16610
						ISO/TR 1605	Reihe ISO 14253
						ISO/TS 23165	
						Reihe ISO 14253	
						Reihe ISO 10360	

Das Größenmaß gehört zu den wichtigsten geometrischen Merkmalen überhaupt. Jede Zelle der allgemeinen GPS-Matrix sollte mindestens einen Standard enthalten. Nur das Größenmaß erfüllt diese Anforderung, siehe Tabelle 2 oben. Allerdings sind viele Zellen anderer Kettenglieder (z.B. Abstand) noch leer, weil es an entsprechenden Normen fehlt. In vielen Fällen beeinflusst der Standard mehrere Kettenglieder, daher können mehrere Zellen gefüllt sein. Die Tabelle 3 unten zeigt ein Beispiel für das GPS-Matrix-Schema gemäß ISO 5459 - Geometrische Toleranzen - Bezugspunkte und Bezugssysteme.

<i>Tabelle 3 Bestehende Normen in Bezug auf "Merkmale von Geometrieelementen" dargestellt in einer GPS-Matrix, vgl. [19] und [69]</i>		Kettenglieder						
		A	B	C	D	E	F	G
		Symbole und Angaben	Anforderungen an Geometrielemente	Merkmale von Geometrieelementen	Übereinstimmung Und Nicht-Übereinstimmung	Messung	Messgeräte	Kalibrierung
1	Größenmaß			ISO 286-1 Reihe ISO/TS16610 ISO 14405-1				
2	Abstand			ISO 14405-1 ISO 14405-2				
3	Form			ISO1101 ISO 1660 ISO 3040 ISO 12181-1 ISO 12181-2 ISO 12780-1 ISO 12780-2				
4	Richtung			S01101 ISO 1660 ISO 2692 ISO 5458				
5	Ort			S01101 ISO 1660 ISO 2692 ISO 5458				
6	Lauf			ISO1101				
7	Oberflächenbeschaffenheit: Profil			ISO 4287 ISO 4288 ISO 12085 ISO 13565 ISO 16610-21 ISO 13565				
8	Oberflächenbeschaffenheit: Fläche			ISO 25178-601				
9	Oberflächenunvollkommenheit	Spezifikation				Verifikation		

3.5.3 Wichtigste Grundsätze des ISO-GPS Normensystems

Die ISO-GPS basiert auf elementaren Grundsätze, die auf der ISO 8015 beruhen.

Die wichtigsten Grundsätze sind folgend aufgelistet:

- Grundsatz des Aufrufens
- Grundsatz des Geometrieelements
- Grundsatz der Unabhängigkeit
- Grundsatz der Dualität
- Grundsatz der GPS-Normenhierarchie
- Grundsatz der bestimmenden Zeichnungen
- Grundsatz der Dezimaldarstellung
- Grundsatz der Standardfeststellung
- Grundsatz der Referenzbedingungen
- Grundsatz des starren Werkstückes
- Grundsatz der Funktionsbeherrschung
- Grundsatz der allgemeinen Spezifikation
- Grundsatz der Verantwortlichkeit [18].

Kunststoffteile sind (noch) nicht in der ISO-GPS Norm beschrieben, hier hat die ISO 291:2008 Gültigkeit

Abbildung 3.10 unten zeigt, durch welche Angaben das komplette ISO-GPS-System aufgerufen wird [18]

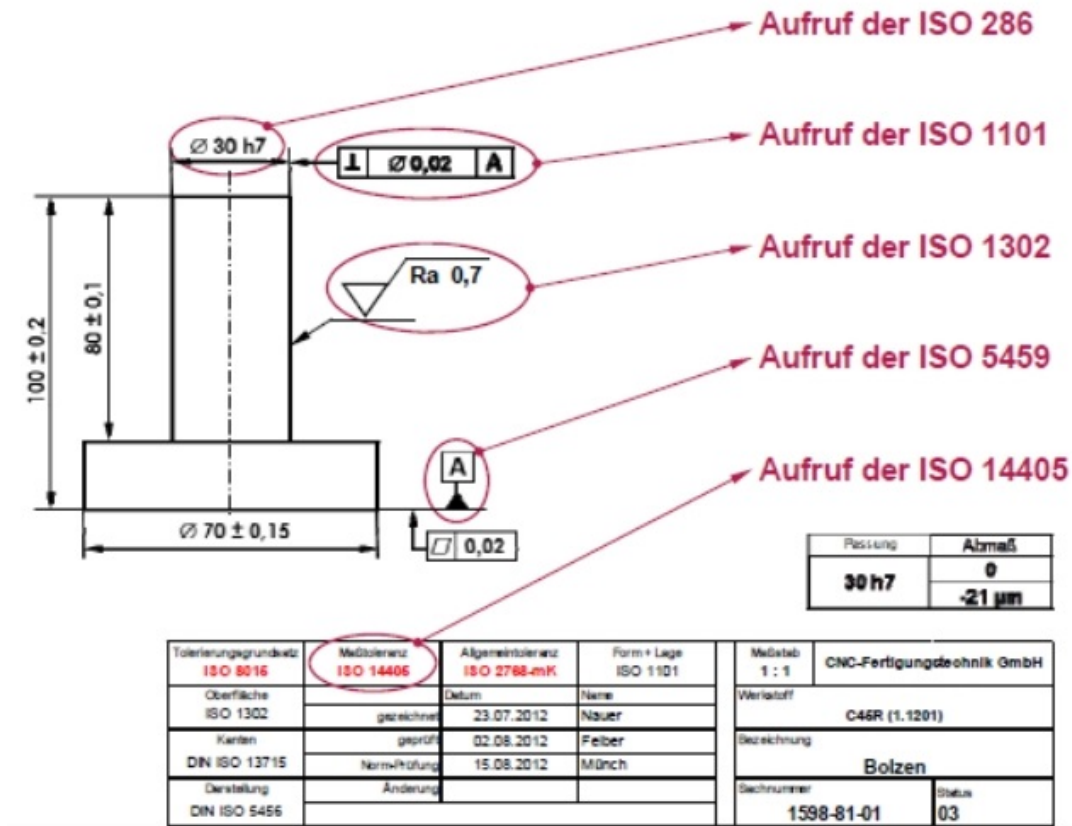


Abbildung 3.10 Angaben, durch welche das ISO-GPS-System aufgerufen wird [13]

Einige Vorteile der Anwendung der ISO-GPS-Standards sind folgend aufgelistet

- Die Anzahl der zu prüfenden Merkmale lässt sich reduzieren was zu Verringerung der Prüfkosten führt.
- Vermindern von Kommunikation und Koordination, extern und intern, besonders wichtig bei internationaler Zusammenarbeit.
- Produkthaftungsrisiken gegenüber Kunden und Zulieferbetrieben reduzierbar.
- Durchgängige Nutzung der digitalen Informationen und damit Senkung der Entwicklungskosten und der Entwicklungszeiten.
- Durchführung der Verifikation auf Basis der Vorschriften der Qualitätsmanagementsysteme (z.B. ISO 9001).
- Möglichkeit zum Einbringen des „digitalen Zwillings“ (Industrie 4.0).

- Jede technische Zeichnung wie beispielsweise Abb. 3.10 oben ist ein Vertragsdokument, welches bei richtiger Anwendung der ISO-GPS-Standards im Fall der Fälle auch vor Gericht Bestand hat [21].

3.6 Normen in der Nanotechnologie

In der Nanomesstechnik sind internationale Messnormen noch in der Entwicklung, obwohl die Messgeräte der Fertigungsmesstechnik die Anforderungen in der Mikro- und Nanotechnologie erfüllen,

Um nachzuweisen, dass ein bestimmtes Produkt oder Verfahren eine bestimmte Anforderung erfüllt, ist eine quantitative Messung erforderlich, die auch Messungen im Nanobereich umfassen muss. Für die Anwendung der Nanomesstechnik ist es daher von entscheidender Bedeutung, praktische Standards zu entwickeln und festzulegen.

3.7 Nachweis der Konformität von geometrischen Merkmalen

Konformität heisst „Erfüllung einer Anforderung“ (ISO 9000:2005:31). Die Prüfung der Konformität ist somit der Nachweis, dass ein Werkstück, ein Prozess, ein System oder auch eine Dienstleistung bestimmten festgelegten Kriterien, rechtlichen Vorschriften und Spezifikationen technischer Art entspricht und dass die Abweichungen zulässig sind. In der Produktionsmesstechnik geht es bei Konformitätsprüfungen fast immer um Bauteile und Werkstücke. [10]. Die Konformitätsprüfung ist die Hauptaufgabe der Produktionsmesstechnik. Dabei werden geeignete Prüfverfahren verwendet, die die Konformität feststellen, indem sie die spezifizierten Merkmale und das Ergebnis der Messung vergleichen. Um eine Konformitätsprüfung sinnvoll durchzuführen, müssen zunächst Toleranzen, das heißt zulässige Maß-, Form- und Lageabweichungen, festgelegt werden. Der Messtechniker beginnt mit dem Lesen der Spezifikation unter Berücksichtigung des nicht idealen Oberflächenmodells, um die spezifizierten Merkmale zu kennen. Sein Ausgangspunkt ist die Werkstückoberfläche, es werden Schritte des Prüfplans, abhängig von der Messeinrichtung, definiert. Die spezifizierten Merkmale werden mit dem Messergebnis verglichen und so die Konformität festgestellt. Allerdings ist zu bedenken: „Die im Grunde einfache Unterscheidung zwischen spezifikationskonformen und nicht- spezifikationskonformen Prüfmerkmalen gelingt nur selten fehlerfrei, weshalb einzelne Prüfentscheidungen falsch sein können (Fehler 1.

und 2.Art). Ein zusätzliches Problem stellt die bei der Erfassung der Prüfmerkmale unvermeidbare Messunsicherheit dar“ [10].

Zum Konformitätsnachweis von Werkstücken gehört auch die regelmäßige Überwachung der verwendeten Messmittel selbst, die durch Qualitätsmanagement-Norm ISO 9001 festgelegt und geregelt wird [22]. Norm ISO 9001 ist definiert als die Gesamtheit „der Kalibrierung, Justierung, Eichung sowie Instandhaltung von Prüfmitteln und Prüfhilfsmitteln“ (DGQ, Deutsche Gesellschaft für Qualität) [82].

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Verifizierung keine Sicherheit betreffend solcher Fehler bietet, die schon in der Spezifikation enthalten waren.

4 Messunsicherheit

Aus praktischer Sicht ist die Durchführung einer fehlerfreien Messung nicht möglich. „Das Messergebnis stellt nur den Näherungswert für den wahren Wert der Messgröße dar und das Ziel jeder Messung ist es, an den wahren Wert“ [83] der Messgröße heranzukommen. Zu den unvermeidlichen Messabweichungen gehören zum Beispiel systematische Abweichungen oder zufällige Abweichungen. Das vollständige Messergebnis setzt sich zusammen aus dem heraus gerechneten „Schätzwert für den wahren Wert einer Messgröße und der Messunsicherheit“ [60], mit der der Schätzwert angebar ist.

Messabweichung, Messfehler

Die Ursachen für Messabweichungen sind sehr vielfältig. Sie können zum Beispiel durch Umgebungsbedingungen (Temperatur, Schmutz, Vibrationen etc.), durch das Messmittel, durch das Werkstück oder durch die Messpersonals selbst verursacht werden.

Theoretisch kann der Messfehler definiert werden als die Differenz zwischen dem gemessenen Wert einer Messung (Istwert) und dem wahren Messwert. Da der wahre Wert der gemessenen Größe jedoch nie bekannt sein kann, wird diese Definition ungenau und problematisch. Eine Lösung für diese problematische Situation wird in VIM dargestellt, indem zusätzlich zur Hauptdefinition zwei Unterdefinitionen für den Messfehler verwendet werden, siehe Gleichung 4.2 [23]:

Messfehler = Gemessener Wert – Referenzwert (Gleichung 4.2)

Dieses Konzept kann für beide der folgenden Fälle verwendet werden:

- a) Für den Fall eines einzigen Referenzwertes, auf den man Bezug nehmen kann. Dies gilt dann, wenn mit einem Messnormal gemacht wird, dessen Messunsicherheit zu vernachlässigen ist oder bei Gegebensein eines konventionellen Größenwertes, bei dem der Messfehler bekannt ist.
- b) Für den Fall, dass die Messgröße mit einem einzigen tatsächlichen Wert bzw. einer Menge tatsächlicher Werte mit vernachlässigbarem Bereich dargestellt werden soll, wobei in der Messfehler nicht bekannt ist [23].

Die Interpretation dieser Definitionen ist, dass der Messfehler in den meisten Fällen unbekannt ist und nur dann bekannt sein kann, wenn Kalibrierungsmessungen mit Referenzstandards bekannt sind. Dies bedeutet jedoch nicht automatisch, dass die Qualität eines Messergebnisses nicht quantitativ ausgedrückt werden kann.

Ungeachtet der Tatsache, dass der Messfehler unbekannt ist, wird der Begriff und das Konzept der Messunsicherheit verwendet, um quantitative Beurteilungen und Vergleiche von Messergebnissen vorzunehmen.

Der Begriff der Messunsicherheit

Jede Messung, egal ob die Messung einer Temperatur, einer Geschwindigkeit, einer Länge oder eines Gewichts, ist mit einer gewissen Messunsicherheit verbunden. Das kann dazu führen, dass ein funktionsfähiges Werkstück als fehlerhaft oder ein fehlerhaftes Produkt als funktionsfähig eingestuft wird. Die Messunsicherheit weist der Messgröße die zugeordnete Streuung der Messwerte zu. Kenntnis über die Messunsicherheit ist eine notwendige Voraussetzung, um Konformitätsprüfungen durchführen zu können. Ohne ihre Kenntnis kann die Rückführung der Messergebnisse auf das internationale Einheitssystem nicht gewährleistet werden [10].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Messunsicherheit angibt, wie gut das Messergebnis den wahren Wert der Messgröße widerspiegelt. Die Messunsicherheit ist wichtig für die Bewertung der Zuverlässigkeit eines Messergebnisses und für die Risikobewertung, ob ein Messergebnis einen vordefinierten Grenzwert überschreitet. Mittlerweile gehört die Messunsicherheit zu den wichtigsten Werkzeugen der industriellen Qualitätssicherung [10].

Bestimmung der Messunsicherheit

Die Messunsicherheit U ist in der Norm ISO DIN 14253-2 definiert. In der Entwurfsphase eines Werkstückes werden seine Spezifikationen durch zwei Grenzwerte, nämlich durch die untere Spezifikationsgrenze und die obere Spezifikationsgrenze vorgegeben.

Je nachdem, ob das Messergebnis innerhalb oder außerhalb der Spezifikationsgrenzen liegt, wird die Entscheidung für die Konformität bzw. Nichtkonformität mit der Spezifikation getroffen.

Eine Entscheidung unter Vernachlässigung der Messunsicherheit zu treffen, ist jedoch kein akzeptabler Ansatz mehr, da jede Art von Messung immer einige Messunsicherheiten enthält, die berücksichtigt werden müssen.

Die Messunsicherheit u ist durch das VIM festgelegt als "Nichtnegativer Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die der Messgröße auf der Grundlage der benutzten Information beigeordnet ist" [69]. Dieser Parameter lässt sich über die Standardabweichung der Messreihe und der zur Messreihe passenden Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung bestimmen [24].

Die Standardabweichung gilt als der beste Schätzwert und „ist definiert als die nicht negative Quadratwurzel der Varianz“ [71].

Varianz der Stichprobe x_1, \dots, x_n ist durch die Formel (3.3) definiert.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 \quad (n > 1) \quad \text{(Gleichung 4.3)}$$

Um die Standardabweichung zu berechnen, muss man zunächst den Mittelwert \bar{x} der Messwerte x_j ($j = 1, 2, \dots, n$) bestimmen.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad \text{(Gleichung 4.4)}$$

Damit lässt sich die Standardabweichung s als Maß für die Streuung der Stichprobenwerte x_1, x_1, \dots, x_n um ihren Mittelwert \bar{x} bestimmen. Sie beschreibt die mittlere Abweichung der Messwerte von ihrem Mittelwert [71].

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad \text{(Gleichung 4.5)}$$

Um die Messunsicherheit zu bewerten, muss die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Stichprobe bekannt sein. Dabei besteht die Schwierigkeit darin, die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung richtig zu identifizieren, also zu erkennen, um welche Verteilung es sich handelt. Stichproben mit $n > 20$ sind annähernd normalverteilt. Je höher die Anzahl der Beobachtungen, desto besser ist diese Annäherung.

Wenn die Stichprobe sehr klein ($n < 20$) gewählt wird, werden die Stichprobenmessungen in der Regel nicht mehr normalverteilt sein. Man geht in diesem Fall von einer Student-t-Verteilung aus. Es können aber noch andere Verteilungen vorkom-

men, wie zum Beispiel rechteckige Verteilungsform oder Dreiecksverteilung, die durch Überlagerung von zwei gleich breiten Rechteckverteilungen resultieren [24].

Die Abbildung 4.11 unten zeigt die unterschiedlichen Verteilungsfunktionen. Der Wert a bezeichnet dabei den Grenzwert [24].

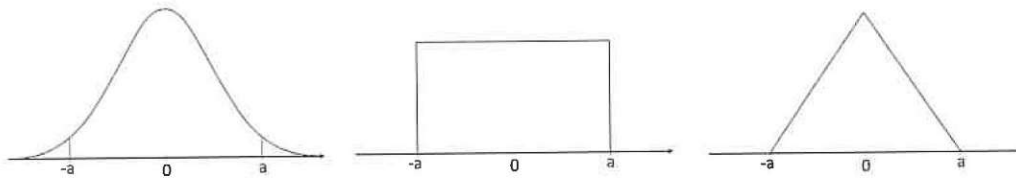


Abbildung 4.11 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen: von links Normalverteilung, Rechtecksverteilung, Dreiecksverteilung [24]

Wenn die Stichprobenwerte normalverteilt sind bzw. aus einer normalverteilten Grundgesamtheit stammen und die Standardabweichung als Messunsicherheit betrachtet wird, würden nur etwa 68 % der Messwerte im Bereich zwischen $\bar{x} - s$ und $\bar{x} + s$ liegen. Abbildung 4.12 unten mit der erweiterten Messunsicherheit [24].

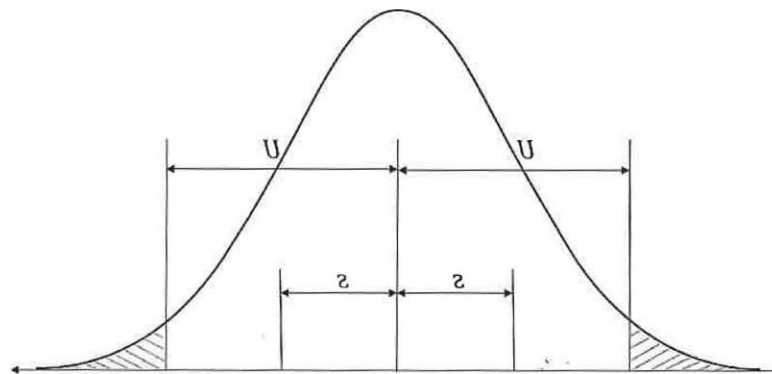


Abbildung 4.12 Erweiterte Messunsicherheit mit Konfidenzniveau von 95% $U(Y) = 2 \cdot u(y)$ [24]

Da häufig verwendetes Konfidenzniveau bei 95% liegt, multipliziert man die Messunsicherheit ($u = s$) mit einem Erweiterungsfaktor $k = 2$ und erweitert sie [24]. Daraus ergibt sich die erweiterte Messunsicherheit U , definiert als: $U = k \cdot s$ (Gleichung 4.6)

Die erweiterte Unsicherheit U muss ebenfalls innerhalb des vollständigen Messergebnisses angegeben werden;

Die Abbildung 4.12 ist so zu interpretieren, dass die Messwerte mit einer 95% Wahrscheinlichkeit im Intervall $\pm U$ liegen und somit nur mehr ein Risiko von 5% bestünde, dass die Messwerte außerhalb des Bereichs liegen [24].

Besitzt die Stichprobe eine t-Verteilung, so wird die erweiterte Messunsicherheit U mit dem Faktor t gebildet: $U = t \cdot s$ (Gleichung 4.7)

Die Student-t-Verteilung ähnelt der Normalverteilung, hat aber einen größeren Unsicherheitsbereich.

Abbildung 4.13 unten zeigt eine t-Verteilung für $n = 2$. Für $n \rightarrow \infty$ konvergiert die t-Verteilung gegen die Normalverteilung. Man kann annehmen, dass für $n > 30$ die t-Verteilung in guter Näherung durch eine Normalverteilung ersetzt werden kann [25].

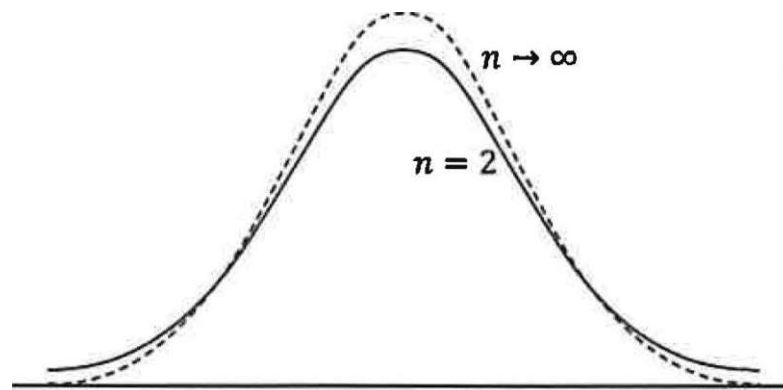


Abbildung 4.13 Student-t-Verteilung für $n = 2$ und [25] x

Mit der Gleichung $Y = y \pm U$ (Gleichung 4.8) erhält man das Messergebnis für Messgröße Y unter Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheit U , wobei Y das Messergebnis als Gesamtaussage angibt, y die beste Schätzung für die Messgröße Y darstellt, und U die erweiterte Unsicherheit darstellt [24].

Die Konformität ist bewiesen, wenn und nur wenn Y vollständig innerhalb der Spezifikationszone liegt. Im Falle des genauen Gegenteils, d. h. wenn Y vollständig außerhalb des Spezifikationsbereichs liegt, ist die Nichtübereinstimmung bewiesen.

In allen anderen Fällen ist es nicht möglich, eine eindeutige Entscheidung zu treffen entweder für die Konformität oder für die Nicht-Konformität. Die Messwerte im kritischen Bereich müssen entweder genauer beurteilt oder genauer bestimmt werden [26].

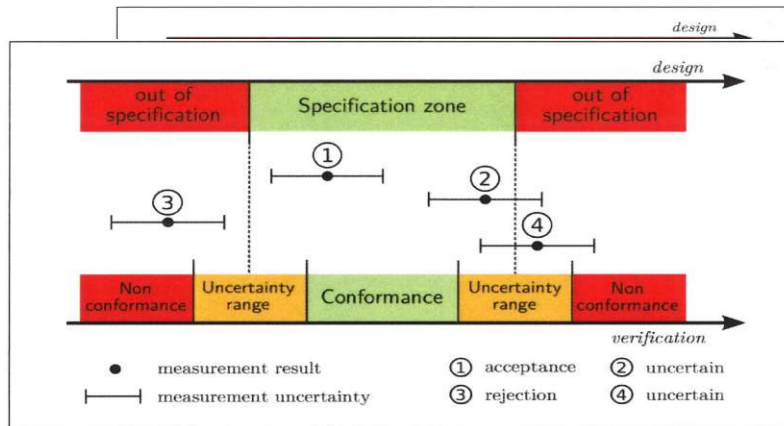


Abbildung 4.14 Schematische Darstellung des Nachweises der Konformität oder Nicht-Konformität mit der Spezifikation nach ISO 14253-1 [26]

Die Abbildung 4.14 oben zeigt die zusätzliche Zone zwischen der Konformitäts- und der Nicht-Konformitätszone. Diese zusätzliche Zone wird als kritischer Bereich bezeichnet und umfasst mathematisch den Bereich zwischen $y - U$ und $y + U$.

Abbildung 4.15 unten zeigt die Beziehung zwischen der zunehmenden Messunsicherheit und der (Nicht-)Konformitätszone nach ISO DIN 14253-1. Abbildung 4.15 zeigt auch, dass man einen Bereich bestimmen kann, für den es zu einer Übereinstimmung mit der Spezifikation kommt.

Dabei ist zu beachten, dass die zu bestimmende Zielmessunsicherheit U_r den oberen Grenzwert dieser Messunsicherheit nicht überschreitet. Die Messunsicherheit U muss die Bedingung $U \leq U_r$ erfüllen. Oft ist es ausreichend, für die Messunsicherheit U die Fehlergrenzen des Messmittels zu verwenden. Meistens ist es hinreichend wenn man für die Messunsicherheit U die Fehlergrenzen des Messmittels zu verwendet [27].

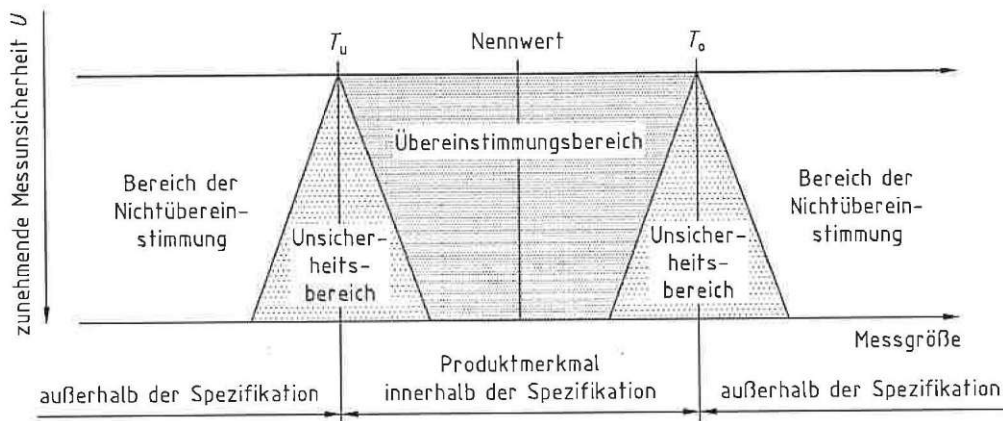


Abbildung 4.15 Beziehung zwischen der Übereinstimmungs- und Unsicherheitsbereiche in Abhängigkeit der Größe der Messunsicherheit [27]

Die Spezifikation für das Merkmal und somit eine Übereinstimmung ist statt gegeben, wenn die Bedingung:

$$USG + U < y < OSG - U \quad (\text{Gleichung 4.9})$$

gilt. Dabei ist USG die untere Spezifikationsgrenze, OSG die obere Spezifikationsgrenze, U die erweiterte Messunsicherheit und y der angegebene Messwert der Messgröße Y.

Eine Nichtübereinstimmung liegt vor falls folgendes gilt:

$$y < USG - U \quad (\text{Gleichung 4.10})$$

$$\text{bzw. } y > OSG + U \quad (\text{Gleichung 4.11})$$

Bewertung der Messunsicherheit

Der Bewertungsprozess der Messunsicherheit geschieht im wesentlichen in drei Phasen: Formulierung, Ausbreitung (Elaboration) und Zusammenfassung.

Formulierungsphase

1. Definition der Ausgangsgröße Y (der Messgröße),
2. Identifizierung der Eingangsgrößen, von denen Y abhängt,
3. Entwicklung eines Messmodells, das Y mit den Eingangsgrößen verknüpft, und
4. Zuweisung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung zu den Eingangsgrößen auf der Grundlage des verfügbaren Wissens

Ausbreitungsphase

Die Ausbreitungsphase für die Bewertung der Messunsicherheit ist bekannt als die Propagierung von Verteilungen, für die verschiedene Ansätze zur Verfügung stehen, darunter

1. der GUM-Messunsicherheitsrahmen, der die Anwendung des Gesetzes der Fortpflanzung der Messunsicherheit und die Charakterisierung der Ausgangsgröße Y durch eine Normal- oder t-Verteilung darstellt,
2. analytische Methoden, bei denen eine mathematische Analyse verwendet wird, um eine algebraische Verteilung für die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Y zu finden, und
3. Monte-Carlo-Methode, bei der eine Annäherung an die Verteilungsfunktion für Y numerisch ermittelt wird, indem zufällige Ziehungen aus den Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Eingangsgrößen vorgenommen werden und das Modell bei den resultierenden Werten ausgewertet wird [29].

Zusammenfassende Phase

Sie besteht darin, die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Eingangsgrößen durch das Messmodell zu propagieren, um die Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Ausgangsgröße Y zu erhalten, und unter Verwendung dieser Verteilung zusammenzufassen, um Folgendes zu erhalten

1. der Erwartungswert von Y , der als Schätzung für y angenommen wird,
2. die Standardabweichung von Y , die als die mit y verbundene Messunsicherheit $u(y)$ betrachtet wird, und
3. ein Überdeckungsintervall, das Y mit einer bestimmten Überdeckungswahrscheinlichkeit enthält.

Es gibt im Großen und Ganzen drei Ansätze, um die Messunsicherheit zu bewerten;

- Leitfaden zur Angabe der Messunsicherheit (GUM)
- Analytische Methoden
- Monte-Carlo-Verfahren

Ein weiterer Ansatz, der ursprünglich eine Alternative zur GUM-Methode darstellt, aber im Wesentlichen der GUM-Methode entspricht, ist in ISO 14352-2 unter dem Namen Procedure for Uncertainty Management (PUMA) beschrieben. Der Grundgedanke dieser Norm ist die Implementierung eines iterativen Ansatzes, um die

Messunsicherheit so genau wie nötig unter Einhaltung von Abbruchkriterien zu bewerten. So können die Kosten der Bewertung optimiert und in vernünftigen Grenzen gehalten werden [29].

Überblick über den GUM

Der GUM ist die Abkürzung für "Guide to the expression of Uncertainty in Measurement" [72], und ist ein Regelwerk zur Abschätzung von Messunsicherheiten, das vom ISO/BIPM (Internationales Büro für Maß und Gewicht) im Jahr 1993 veröffentlicht und im Jahr 2008 überarbeitet wurde. Eine laufende Überarbeitung begann im Jahr 2014. Dieser Leitfaden enthält die für die Gesamtmessunsicherheit erforderlichen Faktoren und mögliche Lösungsmethoden.

Ziel dies Leitfadens ist der Aufbau eines international einheitlichen, standardisierten Verfahrens zur Bestimmung und Angabe der Messunsicherheit um eine solide Grundlage für einen weltweiten Vergleich von Messergebnissen zu gewährleisten.

Es gibt zwei Arten von Methoden zur Bewertung aller Einflussfaktoren auf die Messung, die auch miteinander kombiniert werden können:

- 1) Die Messunsicherheit wird durch statistische Analyse von Messwerten berechnet.
- 2) die Messunsicherheit wird durch andere Mittel berechnet, nicht durch Analyse,

Für jede Einflussgröße wird angegeben, mit welcher Methode sie gemessen wird und wie stark sie die Gesamtmessunsicherheit beeinflussen. Dieser Ansatz soll dazu beitragen, eine realistische und nachvollziehbare Messunsicherheit zu ermitteln. Der GUM hat vor allem in der Kalibrierung an Bedeutung gewonnen, er kann und sollte aber auf alle Situationen der Messung angewendet werden [29].

Bewertung der Messunsicherheit nach der GUM-Methode

Meistens wird eine Messgröße Y aus N verschiedenen Eingangsgrößen X_1, X_2, \dots, X_N durch eine Funktion f berechnet. Sie wird nicht direkt bestimmt.

Ein allgemeines Modell für Messungen wird also wie folgt formuliert;

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \text{ (Gleichung 4.12)}$$

Darauf aufbauend können die in GUM [28] vorgestellten Schritte zur Bewertung und Angabe der Messunsicherheit wie folgt zusammengefasst werden [30]:

1. Es muss eine vollständige Beschreibung des Modells und der Beziehungen erfolgen.
2. Alle relevanten Korrekturen (z. B. für Temperatur, Luftdruck und Spannung) müssen identifiziert und durchgeführt werden.
3. Alle Quellen und Ursachen der Messunsicherheit müssen in einer Messunsicherheitsanalyse aufgeführt werden.
4. Der Schätzwert y des Messwerts Y und seine kombinierte Messunsicherheit $u_c(y)$, die sich aus der quadratischen Fortpflanzung der Unsicherheit ergibt und ihre Einheiten müssen angegeben werden.
5. Das angegebene Vertrauensniveau k , zugeordnet dem Bereich $y \pm k \times u_c(y)$, und die Methode zur Bestimmung des Vertrauensniveaus k müssen beschrieben werden.

5 Messgeräte für die Produktion und Qualitätskontrolle

Die Abbildung 5.16 unten gibt einen Überblick über Geräte und Hilfsmittel in der Fertigungsmesstechnik [10].

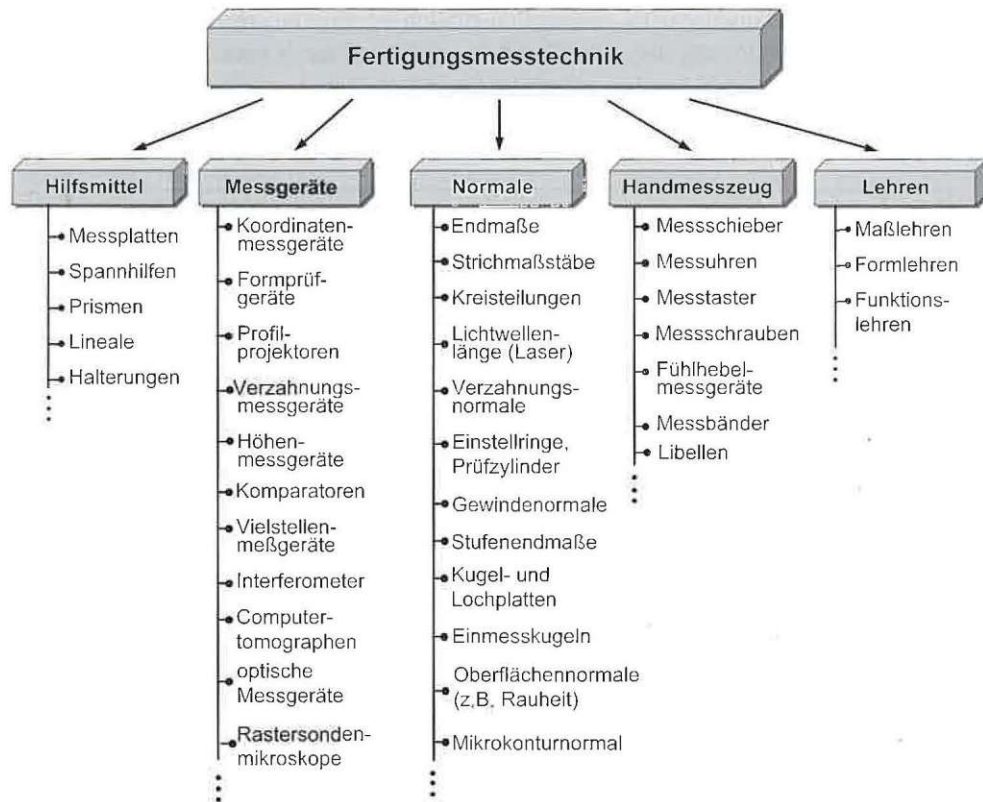


Abbildung 5.16 Hilfsmittel und Geräte in der Fertigungsmesstechnik [10]

Der Messtechniker steht vor dem Beginn der Messung vor der Entscheidung über die Auswahl eines dieser Messmittel. Auswahlkriterien sind neben der Eignung für die gestellte Messaufgabe die geforderte Genauigkeit, der Einsatzort und der Umfang der Prüfung [10]. Der Messtechniker muss sich auch über die Wirtschaftlichkeit der Messmethode und des verwendeten Messmittels bewusst sein. Messtechniker müssen identifizieren, welches Messverfahren die Funktion am besten abbildet. Wichtig ist auch die Rückführung über Verfahren mit bekannter Messunsicherheit (nur taktile).

Für komplexere Prüfaufgaben, z. B. Positionstoleranzen oder sich wiederholende Messungen, sind herkömmliche KMGs sehr nützlich.

Die Anforderungen an die Messinstrumente sind in den letzten Jahren auf Grund zunehmender Komplexität der Bauteile und rasanter Entwicklung in der Nanotechnologie massiv gestiegen. Dadurch sind automatisierbare, allgemeine und flexible Messgeräte entstanden, mit denen komplexe Teile in großer Stückzahl hoch genau und schnell geprüft werden können [10].

5.1 Koordinatenmesstechnik und KMGs

Die Koordinatenmesstechnik entwickelte sich relativ spät, da ihre Wirkungsweise maßgeblich auf der mathematischen Analyse von Messpunkten auf den Werkstückoberflächen beruht. Entstanden ist die Koordinatenmesstechnik etwa 1950 bis Mitte der 1960er-Jahre. Erst Anfang der 1970er-Jahre nachdem kostengünstige Rechner für die Messdatenauswertung zur Verfügung standen, konnte sich die Koordinatenmesstechnik zu ihrer heutigen Bedeutung in der Fertigungstechnik entwickeln [46].

Prinzip der Koordinatenmesstechnik

Koordinatenmesstechnik ist ein universelles Messverfahren, bei dem die Oberfläche des Werkstückes in einem Koordinatenmesssystem Punkt für Punkt abgetastet wird. Die zu bestimmenden Merkmale werden aus den Punkten der Oberflächen in mehreren Zwischenschritten ermittelt [46].

Mit Hilfe der Koordinatenmesstechnik lassen sich folgende Konstruktionsmerkmale ermitteln [46]:

- Maße, Abstände und Winkel,
- Formabweichungen,
- Lagebeziehungen.

„Es gibt Merkmale, die direkt am zugeordneten Geometrieelement bestimmt werden können. (z.B. Durchmesser, Länge, Rundheit, Achse, Lot Geradheit, Ebenheit). Andere Merkmale ergeben sich aus der Verknüpfung von zwei oder mehreren zugeordneten Geometrieelementen: Abstand, Winkel, Schnittpunkt, Symmetriepunkt, Achse, Ebene oder Rechtwinkligkeit“ [33].

Alle Messpunkte, welche vom Koordinatenmessgerät an der Ist-Form vom Bauteil gemessen werden, werden mit den geometrischen Daten der Nennform verglichen, und die Abweichungen von den Nennmaßen, sowie Form- und Lageeigenschaften

werden aus diesem Vergleich ermittelt, Siehe [46]. Die Abbildung 5.17 unten zeigt das Grundprinzip der Koordinatenmesstechnik.

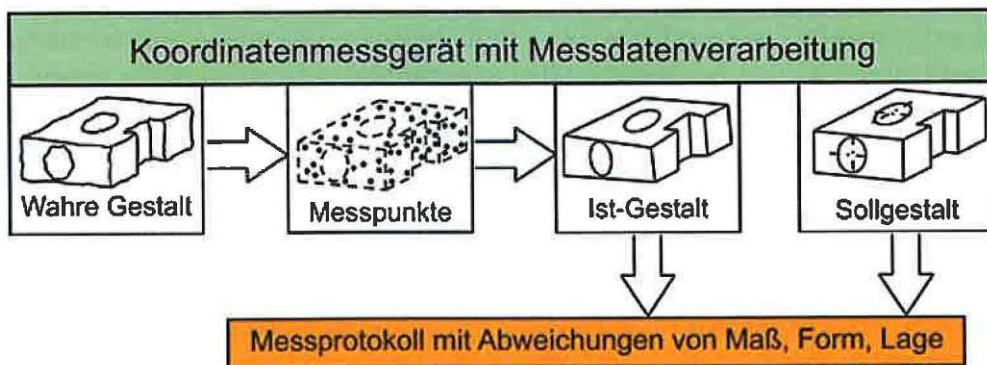


Abbildung 5.17 Grundprinzip der Koordinatenmesstechnik [46]

Merkmale: Im Gegensatz zu Koordinatenmessgeräten lassen konventionelle Messgeräte mit nur einer Messachse in der Regel nur Messungen einzelner Punkte, Abstände oder Durchmesser von geometrischen Merkmalen zu. Das Zusammenwirken der Eigenschaften aller geometrischen Merkmale (wie z.B.: Winkel, Schnittpunkt, Symmetrieebene oder Rechtwinkeligkeit), die entscheidend für die Funktion eines Bauteiles sind, können nur in einem gemeinsamen Bezugssystem, nämlich dem KMG, beurteilt werden [10].

Anwendungen:

KMGs sind vielseitig einsetzbar und eignen sich für Einzelmessungen, kleine und mittlere Stückzahl. Sie werden zur Prüfung von komplexen Werkstücken wie Motor-Getriebe- und Pumpengehäusen, Pumpengehäusen, Turbinenschaufeln, Achsschenkelgelenken, Lenkungsstreben, Zahnrädern, Schneckengetrieben und Gewindespindeln eingesetzt. In diesem Zusammenhang werden berührende und/oder berührungslose Sensoren eingesetzt, um die erforderlichen Messpunkte zu erfassen und zu sammeln.

Die Tabelle 4 unten zeigt einen Vergleich zwischen den Merkmalen der konventionellen Messtechnik und der Koordinatenmesstechnik.

Tabelle 4 Vergleich zwischen den Merkmalen der konventionellen Messtechnik und der Koordinatenmesstechnik [48]

Konventionelle Messtechnik	Koordinatenmesstechnik
Manuelles und zeitaufwändiges Ausrichten des Werkstückes	Manuelles Ausrichten nicht notwendig
Einzweckmessgeräte lassen sich nur schwer an wechselnde Messaufgaben anpassen	Einfache Anpassung an wechselnde Messaufgabe durch Software
Vergleich einzelner Messungen mit Artefaktmaßen, das heißt, Messgeräteblöcke, Ringmessgeräte oder andere	Vergleich von Messungen mit mathematischen oder numerischen Modellen Bestimmung von Größe, Form, Lage und Orientierung in einem Aufbau unter Verwendung eines Referenzsystems
Separate Bestimmung der Größe, Form, Lage und Ausrichtung mit verschiedenen Aufbauten	Bestimmung von Größe, Form, Lage und Orientierung in einem Aufbau unter Verwendung eines Referenzsystems
Die Person, die die Messungen durchführt, muss hochqualifiziert sein	Eine Person, die die Messungen durchführt, muss nicht hochqualifiziert sein, wenn ein Programm für diese Aufgabe vorhanden ist
Der manuelle Charakter der Methoden behindert den Durchsatz - kann nicht automatisch gemacht werden	Einsatz ist weniger abhängig vom Bediener - kann vollautomatisch durchgeführt werden

5.1.1 Kategorien von KMGs

Am häufigsten wird das kartesische Koordinatensystem benützt (drei senkrechte Messachsen zueinander, in x-, y- und z-Richtung). Darüber hinaus gibt es KMGs mit Winkelmesssystemen [46].

Die Bauweise von Koordinatenmessgeräten lässt sich grob in folgende zwei Arten kurz beschreiben:

- Durch kartesische Koordinatenachsen geführte KMGs, die man auch als konventionelle Koordinatenmessgeräte bezeichnet.

- Unkonventionelle Koordinatenmessgeräte, die keine kartesische Koordinatenachsen besitzen. Stattdessen sind diese KMGs beispielsweise durch Zylinder- oder Kugelkoordinaten geführte.
- Unkonventionelle KMGs eignen sich für spezielle Aufgaben wie etwa Laser-Tracker oder Computertomografie.

Die vier Grundtypen von KMGs sind solche mit [46]

- Auslegerbauweise
- Portalbauweise
- Brückenbauweise
- Ständerbauweise

5.1.2 Arten von KMG-Tastern

Tastensysteme bilden das Herzstück der Koordinatenmesstechnik. Dabei gibt es verschiedene Typen von Tastern. Sie lassen sich in berührende und berührungslose Tastensysteme einteilen. Während die berührenden Tastensysteme die Strukturen durch Berührung der Werkstücke erfassen, müssen berührungslose Tastensysteme die Werkstücke nicht mechanisch berühren, sondern nutzen andere Technologien und Methoden als den mechanischen Kontakt. Dadurch ermöglichen sie die Durchführung schnellerer Messungen mit wesentlich höheren Messpunktdichten. Auf der anderen Seite bieten berührende (taktile) Tastensysteme bessere Eigenschaften in Bezug auf Zuverlässigkeit und Genauigkeit [10].

5.1.3 Multisensor-KMGs

Multisensor-KMGs verwenden eine Kombination aus mehreren Sensoren. Die Eigenschaften dieser Sensoren hängen in der Regel von ihren verschiedenen Anwendungen ab. Zu ihren Unterscheidungsmerkmalen gehören in diesem Zusammenhang die Größe der Objektmerkmale, die sie untersuchen können, die Art der Objektmerkmale, die sie untersuchen können (Kante, Oberfläche) und ihre Eignung für die schnelle Erfassung einer großen Anzahl von Messpunkten (Scannen). Für die Durchführung komplexer Messaufgaben ist es in der Regel erforderlich, mehrere verschiedene Sensoren für einen einzigen Messdurchgang einzusetzen [39].

Gegenwärtig sind verschiedene Arten von Sensoren erhältlich. Jeder dieser taktilen, optischen, optoelektronischen oder anderen Arten von Sensoren funktionieren unterschiedlich und ermöglichen daher Messungen, die auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien beruhen. Die anspruchsvolle Anforderung an die zukünftigen

tigen Multisensor-KMGs oder generell an die Messgeräte besteht darin, dass sie unabhängig von verwendeten Sensortypen, Messort und -zeit idealerweise gleiche Messergebnisse liefern sollen [26].

Der Erfolg der Kombination verschiedener Sensoren in Multisensor-KMMs hängt hauptsächlich von drei Kriterien ab;

- Zusammenwirken der Sensoren,
- die geeignete Verarbeitung der Signale für die Messaufgabe und
- Verknüpfung der von den Sensoren gelieferten Messdaten.

Zusammenfassend lassen sich die praktischen Vorteile, die Multisensor-KMMs mit sich bringen, wie folgt aufzählen;

- Verschiedene geometrische Merkmale auf einem Werkstück werden mit den für die jeweiligen Teilaufgaben am besten geeigneten Sensoren gemessen [26], und ein ganzheitliches Modell des Werkstücks wird in nur einem Messdurchgang erstellt.
- Das Innere eines Werkstückes kann mit iCT inspiziert werden, während seine äußeren Merkmale mit einem taktilen Sensor geprüft und gemessen werden.

Dies ist besonders vorteilhaft bei der Vermessung von Metallwerkstücken mit Kunststoff-Außenflächen, die ansonsten aufgrund der Überbelichtung höchst problematisch sind.

5.1.4 Zugehörige Normen und Richtlinien für KMGs

Obwohl es mehrere, aber grundsätzlich ähnliche nationale Normen und Richtlinien gibt, wie z.B. VDI/VDE 2617 (Verein Deutscher Ingenieure) [76], ist die weltweit anerkannte und am weitesten verbreitete Norm für KMGs die von der ISO herausgegebene internationale Norm ISO 10360. Diese Normen und Richtlinien der Koordinatenmesstechnik befassen sich im Wesentlichen mit der Genauigkeit und Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten. Aufgrund des Umfangs dieser Arbeit werden hier nur die wichtigsten und relevanten Teile behandelt.

ISO 10360: Abnahme- und Wiederholungsprüfungen für KMGs

Die Norm ISO 10360 ist eigentlich eine Reihe von Normen und erläutert die erforderlichen Verfahren und Schritte zur Durchführung von Leistungsbewertungstests für herkömmliche KMGs. Von den verschiedenen Teilen der Norm ist der zweite Teil, d. h. die ISO 10360-2:2009, der wichtigste und daher am häufigsten verwendete Teil. Sie erläutert die erforderlichen Schritte eines Leistungstests, um die Leistung der Größenmessung zu bewerten.

Die Tabelle 5 unten gibt einen Überblick über alle aktuellen Normen der ISO 10360 Reihe

Tabelle 5: Überblick über die Normenreihe ISO 10360 [92]

Teil	Inhalt
ISO 10360-1:2000 + Corr 1:2002	Begriffe
ISO 10360-2:2009	KMG eingesetzt für Längenmessungen
ISO 10360-3:2000	KMG mit Drehtisch als 4.Achse
ISO 10360-4:2000 und Cor. 1:2002	KMG im Scanningmodus
ISO 10360-5:2010	KMG mit berührenden Einzel- und Mehrfachtastsystemen
ISO 10360-6:2001 und Cor. 1:2007	Fehlerabschätzung nach Gauß
ISO 10360-7:2011	KMG mit Bildverarbeitungssystem
ISO 10360-8:2013	KMG mit optischen Abstandssensoren
ISO 10360-9:2013	KMG mit Mehrfach-Tastsystemen
ISO 10360-10	Laser Tracker zur Messung von Punkt-zu-Punkt-Abständen
ISO/WD 10360-11	Computertomografie
ISO/FDIS 10360-12	KMG mit Gelenkarm

5.1.5 Stärken und Nachteile von KMGs

Die **Stärken** sind: „Koordinatenmessgeräte können eine effektive Lösung für die Prüfung von Teilen und Komponenten sein, sei es in der Vorproduktion, in der Inline- oder Endkontrolle. Wenn sie innerhalb eines etablierten Qualitätsprüfungs-Ablaufs eingesetzt werden, können KMGs mit ihrer unerschütterlichen Fähigkeit, bis in den Submillimeterbereich hinein präzise“ [50] eine Vielzahl von Geometrien messen. Hinzu kommt noch ihre relativ lange Lebensdauer. Koordinatenmessgeräte können ein Jahrzehnt oder länger im Einsatz bleiben.

Nachteile

- Ein hochwertiges Koordinatenmessgerät ist teuer in der Anschaffung. Die Installation ist ein weiterer Kostenfaktor. Die Bedienung der KMGs erfordert ausgebildete Fachkräfte.
- Beim Bedienen des KMGs selbst ist eine Erstkalibrierung notwendig. Darüber hinaus muss das Gerät für die zu messenden Werkstücke programmiert werden. Die einmalige Prüfung von schwierigen Konstruktionen und Werkstücken kann aufgrund der notwendigen Programmierung viel kosten.
- Werkstücke müssen stets, meist zeitaufwendig, korrekt platziert und fixiert werden, bevor die Messung stattfinden kann. Große Teile sind schwierig zu handhaben.
- Eine weitere Schwierigkeit ist, dass der Taster das zu messende Werkstück berühren muss, was manchmal schwer oder nicht möglich ist [50].

5.2 Berührungslose Messverfahren

Im folgenden werden die wichtigsten berührungslosen Messverfahren behandelt.

5.2.1 3D-Scanner

3D-Scannen stellt eine alternative zur konventionellen Koordinatenmesstechnik dar. Der Einsatzbereich umfasst Qualitätsprüfung komplexer Aufgaben höchster Ansprüche, Inspektion eines Werkstückes ohne physischen Kontakt, ebenso Reverse or Back Engineering. Ein 3D-Scanner kann ein Produkt in einigen Minuten mit sehr hoher Genauigkeit (Submillimeterbereich) erfassen [50].

Auch bei Anwendungen, die eine hohe Dichte an Messdaten erfordern, wie z. B. bei der Berechnung eines Oberflächenprofils zur geometrischen Dimensionierung und Tolerierung, ist der Einsatz von 3D-Scannern sinnvoll, da sie die Messung einer sehr großen Datenmenge auf sehr effektive Weise ermöglichen [52].

Funktionsprinzipien von 3D-Scannern

Es gibt mehrere Arten von 3D-Scantechnologien, die nach völlig unterschiedlichen Prinzipien arbeiten. Sie werden in zwei Hauptkategorien eingeteilt: aktive Scanner und passive Scanner. Jede Kategorie umfasst mehrere Technologien zur 3D-Digitalisierung; hier werden jedoch nur die relevanten für Qualitätskontrolle oder Inspektionsanwendungen beschrieben. Jede Technologie hat ihre eigenen Merkmale, aber der allgemeine Arbeitsablauf ist für alle 3D-Scanner derselbe [52].

Vorteile vom 3D-Scannern

Der Hauptvorteil von 3D-Scannern ist die einfache Handhabung selbst für Anfänger, Mobilität und schnelle Erfassungszeiten. Dadurch können selbst komplizierte Aufgaben der Qualitätsprüfung und -sicherung schnell und effektiv erledigt werden.

3D Scanner sind in der Anschaffung vergleichsweise billig, haben leichtes Gewicht und im Gegensatz zu KMGs keine Installationskosten. 3D Scanner können mit Softwareerweiterungen zum Scannen ausgestattet werden, womit eine Verbesserung der Ergebnisse möglich ist.

Bei einem zu 100% berührungslosen optischen Messgerät besteht kein Risiko einer Beschädigung des Objekts durch den Bediener. „Dabei kann es sich um feine Silikonteile für die Luft- und Raumfahrt, oder wichtige forensische Beweise“ handeln [50].

5.2.2 Berührungslose (optische) 3D-KMGs

In der optischen 3-D-Koordinatenmesstechnik geht es hinsichtlich Methodik um drei essentielle Ziele [74]. Erstens sollen berührungslose optische Verfahren und Messgeräte die Messung von sehr großen Bauteilen (z.B. Luftfahrt und Schiffbau) ermöglichen, die normalerweise über das Messvolumen eines konventionellen KMGs hinausgehen.

Zweitens sollten die optischen 3D-Messungen sehr rasch durchgeführt werden. Beispielsweise sollen die Bewegungen des Werkstückes während des Montierens nachvollzogen und Deformierungen gemessen werden können

Drittens sollen solche Methoden zur Anwendung kommen, die mit relativ wenig Zeiteinsatz eine Vielzahl von eng nebeneinander liegenden Tastpunkten auf Freiformflächen erfassen können [46].

Diese Methoden werden sowohl zur „Qualitätssicherung als auch für Reverse-Engineering-Anwendungen eingesetzt. Durch die heutigen Möglichkeiten der Fertigungstechnik (mehrsprachige Fräszentren, Rapid-Prototyping-Verfahren, etc.) werden komplexe Geometrien und Freiformflächen immer häufiger zu Konstruktions- und Designelementen“ [46]. Bei vielen Konstruktions- und Designelementen ist eine Rückführung auf simple geometrische Merkmale nicht möglich. Daher bleiben bei der Messung der Konstruktionselemente oft die Berührungspunkte selbst im Fokus und nicht die resultierenden geometrischen Merkmale. Es ist eine entsprechend große Dichte von Berührungspunkten erforderlich, damit die Oberfläche bei jeder Krüm-

mung durch Berührungspunkten dargestellt werden kann. „Die Dichte variiert je nach Qualitätsanforderungen und Änderung der Krümmung. Die dazu notwendigen Punktwolken umfassen typischerweise einige Zehntausend, Hunderttausend, in speziellen Fällen sogar einige Millionen Antastpunkte“ [74].

Daraus ergeben sich hohe Ansprüche betreffend der Qualität der Messtechnik: die Messpunkte müssen mit hoher Geschwindigkeit aufgenommen werden, die Berührungspunkte müssen aus Messpunkten berechnet werden, die Berührungspunkte müssen verarbeitet und dargestellt werden, die Datenverarbeitung fordert hohe Rechenleistung und hohe Speicherkapazität.

5.2.3 Streifenprojektionsverfahren

Streifenprojektionsverfahren haben sich sehr rasch entwickelt, bedingt durch die rasch fortschreitende Kameratechnik einerseits und die sich steigernde Leistungsfähigkeit der Computer andererseits und werden seit Anfang der 90er Jahre industriell eingesetzt [46]. Bei dieser Technik werden Bildsequenzen verwendet um die Oberflächenform von Objekten berührungslos digitalisiert und dreidimensional darstellen zu können.

Prinzip der Streifenprojektion

Das Messprinzip der Streifenprojektion beruht darauf, dass mit Hilfe von projizierten Streifen mehrere Lichtschnitte gleichzeitig oder in schneller Folge auf das Werkstück gebracht werden. Diese Lichtschnitte werden von einer Kamera aus einer anderen Richtung aufgenommen. Die Streifen können mit Hilfe von einem Projektor erzeugt werden, siehe Abbildung 5.18 unten. Zur schnelleren und genaueren Oberflächenvermessung werden jedoch gleichzeitig mehrere Streifenmuster in den Messprozess projiziert. Zur eindeutigen Unterscheidung der Streifen sind sie codiert [46].

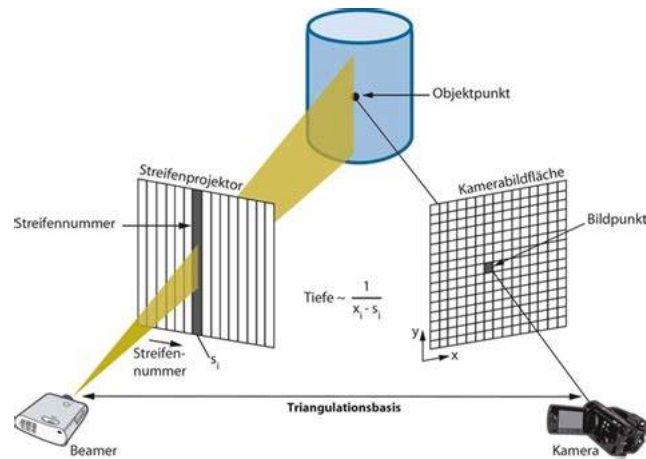


Abbildung 5.18 Prinzip der Streifenprojektion [77]

Derzeit werden häufig Streifenprojektionssysteme auch mit zwei Kameras angeboten. Der Projektor kann wegen Hitzeentwicklung Probleme machen. Und da schaffen zwei Kameras eine Abhilfe [46].

Merkmale: Die Streifenprojektionsmethode „mit Bildverarbeitung ist ein automatisiertes Verfahren zur Messung von ebenen oder gekrümmten Flächen mit diffus reflektierender Oberfläche. Probleme können auftreten beim Messen von Flächen mit sehr hohem Reflexionsgrad (Spiegel) oder sehr geringe Reflexion (matte schwarze Oberfläche). In diesen Fällen kann die Oberfläche mit einem diffus und gut reflektierenden Material besprüht werden, um die Messergebnisse zu verbessern“ [74].

Bei den Verfahren der Streifenprojektion existieren ein paar Optionen beim Herstellen, Aufnehmen und Auswerten der Streifen. Die Optionen „unterscheiden sich in den erreichbaren Messbereichen, Genauigkeiten, in der Geschwindigkeit und der Fähigkeit, dynamische Messungen zu ermöglichen usw.“ [74].

Messbereich und Messunsicherheit haben einen linearen Zusammenhang. Es gibt mehrere Möglichkeiten, den Messbereich zu vergrößern [46].

Anwendungen der Streifenprojektion:

Die Streifenprojektionssystemen werden für 3D-Oberflächenerfassung eingesetzt. Ihr Anwendungsbereich ist äußerst vielfältig. Sie werden z.B. in der industriellen Vermessung von Werkzeugen, zur Qualitätssicherung, zur Fehlererkennung, beim Orten von Rissen und Falten, usw. verwendet. Streifenprojektion findet auch in der

Medizin, im Bereich der Zahntechnik und Pathologie, im Bereich der Archäologie und Kunst Anwendung.

Um die Flexibilität zu steigern wurde in den letzten Jahren auch handgeführte Scanner nach dem Streifenprojektion-Prinzip entwickelt [46].

Vor- und Nachteile der Streifenprojektion

Vorteile	Nachteile
Absolute Geometrie Vermessung	Bedingt für bewegte Objekte geeignet
Eignung für große Messobjekte	Streut diffus, nicht für alle Oberflächen geeignet
Automatisierbare Vermessungen	Vorhandensein von Abschattungen
Leichter Transport	
Aufbau der Messung unkompliziert	
Sehr genau	
Ohne schädliche Strahlung	
Erfassung der Textur ist möglich	

Messbereich/Messgenauigkeit der Streifenproduktion

Durch den Einsatz von verschiedenen Objektiven kann das Messvolumen auf die jeweilige Messaufgabe angepasst werden, es liegt zwischen $0,5\text{mm}^3$ und 4m^3 . Eine Messgenauigkeit von ca. $0,003\text{ mm}$ kann erreicht werden, wobei die maximal erreichbare Höhenauflösung bezogen auf die Abtastlänge bei 1:10000 liegt. Das Streifenprojektionsverfahren hat im Vergleich zum Lichtschnittverfahren eine deutlich höhere Genauigkeit was auf den scharfen Streifenübergang von schwarz auf weiß zurückzuführen ist [54].

Die Digitalisierung der großen Messobjekten erfordern viele Messpunkten und somit hohe Datenvolumen wodurch die Anforderungen an den Messrechner und das Messprogramm massiv zunehmen, was auch letztendlich zur Begrenzung des maximale Messvolumen führt [54].

5.2.4 Messgeräte mit Photogrammetrie-Prinzip

Photogrammetrie wurde parallel zur Fotografie entwickelt, und durch die Entwicklung der digitalen Fotografie ist sie ein nützliches und vielseitiges Messinstrument geworden, insbesondere für große Werkstücke [46]. Form und Lage von Messobjekten ließen sich nun mithilfe der Photogrammetrie aus Bildern rekonstruieren.

Photogrammetrie bedeutet "Messen nach Fotos" [53]. Sie wurde 1858 von dem Architekten Albert Meydenbauer erfunden und gegen Ende des 20. Jahrhunderts fand sie auch in der Fertigungsmesstechnik Anwendung.

Photogrammetrie ermöglicht beispielsweise digitale geometrische Modelle, die weiter in CAD-Systemen verarbeitet werden können, ebenso graphische Darstellungen (Karten, Pläne von Liegenschaften mit Höhenlinienangaben, dreidimensionale Fotomodelle, die CAD-Modelle herstellen [54].

Prinzip der Photogrammetrie

Das Prinzip der Photogrammetrie ist, „aus zwei Bildern, die aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden die dreidimensionalen Koordinaten oder die Form eines Werkstücks durch Stereomessung abzuleiten. Anwendungen in der Fertigungsmesstechnik arbeiten in der Regel mit kodierten Markern, die auf dem Werkstück befestigt werden. Anschließend werden mit einer handelsüblichen Digitalkamera mehrere Bilder aus verschiedenen Richtungen aufgenommen“ [46].

Vor- und Nachteile der Photogrammetrie [54]

Vorteile	Nachteile
Geeignet für große Messobjekte	Genauigkeit begrenzt
Fast alle Oberflächeneigenschaften	Automatisierung schwierig
Verwendbarkeit von üblichen Kameras	Vorbereitungen notwendig
Erfassung der Textur möglich	Nicht für kleine Messbauteile geeignet
Leicht transportierbar. Keine gefährliche Strahlung	Nur für ruhende Objekte geeignet

Messbereich und Genauigkeit der Photogrammetrie

Die Genauigkeit lässt sich durch die folgende Formel ermitteln:

Objektgenauigkeit = Bildkoordinatenmessgenauigkeit × Bildmassstabszahl.

Die Genauigkeit hängt von der Größe des Messobjektes ab. Trotz dieser Abhängigkeit liefert dieses Verfahren erstaunlich genaue 3D-Vermessungen.

Photogrammetrie ermöglicht ein Messbereich von wenigen Millimetern bis zu sehr großen Landoberflächen [54].

Merkmale:

Die Photogrammetrie liefert die 3D-Koordinaten von Punkten im Raum, die durch die entsprechenden Marker bestimmt werden. Es müssen sehr gute, verzerrungsarme Objektive verwendet werden. Vor Beginn der Messung muss daher sichergestellt werden, dass solche entsprechenden Markierungen an allen relevanten Stellen angebracht sind. Moderne Photogrammetrie-Systeme „arbeiten mit hochauflösenden digitalen Spiegelreflexkameras [(DSLR)]. Es müssen sehr gute, verzeichnungsfreie Objektive verwendet werden. Damit werden größenabhängige Reproduzierbarkeiten erreicht, z. B. $3 \mu\text{m} + 7 \frac{\mu\text{m}}{m} (3 \sigma)$ “ [46].

Photogrammetrie-Systeme sind gut kompatibel mit anderen Scannern wie etwa Streifenproduktion. Über ausgewählte Werkstückpunkte (Strukturen oder Marker) lassen sich Daten gewinnen.

Typische Anwendungen der Photogrammetrie

Die Photogrammetrie wird vor allem für die 3D-Vermessung von großen Objekten eingesetzt, d.h. wenn eine große Anzahl von Punkten erfasst werden sollen. „Verwendet man mehrere stationäre Kameras und Blitzbeleuchtung, lassen sich dynamische Vorgänge, wie die Verformung von Behältern unter Last beobachten.. Auch das Biegerichten, das elastisch-plastische Verformen von Blechen und Rohren, lässt sich mit Hilfe der Photogrammetrie optimieren“ [46].

Weitere Anwendungen sind Landvermessungen zur Erstellung von topografischen Karten, Vermessung von archäologischen Objekten, Gebäuden und großen Anlagen. Diese Technik wird auch bei der Unfallrekonstruktion eingesetzt [54].

5.2.5 Theodolit

Theodolite gab es schon im 16. Jahrhundert für Astronomie und Landvermessung. Die moderne Version der Theodolite wird heute noch in der Fertigungsmesstechnik bei großen Werkstücken (Schiffbau, Flugzeugbau, Roboter) verwendet. Der moderne Theodolit ist nur im Prinzip mit der mittelalterlichen Version identisch. Die Messmethode basiert auf dem Triangulationsprinzip, Sie sind relativ leicht

transportierbar und haben hohen Messbereich. Ihre Messunsicherheit (einige 100 m Messbereich) liegt typischerweise „im Bereich von 0,1 mm bis 1 mm“ [46].

5.2.6 Laser-Tracker

Das Funktionsprinzip eines Laser-Trackers ist die Kombination eines Theodoliten mit einem Laser-Interferometer. Er ist ein unverzichtbares Werkzeug der Fertigungsmesstechnik für Qualitätsmessvorgänge, Einsatz bei größeren Werkstücken, die Positionsbestimmung ist aus einer Entfernung von mehreren Metern möglich.

„Der **Messbereich** von Laser-Trackern liegt im Bereich von ca. 50 m. Die **Messunsicherheit** beträgt ca. 40 $\mu\text{m}/\text{m}$. Es werden Messfrequenzen bis in den kHz-Bereich erreicht. Der Vorteil dieses Messverfahrens liegt in der Möglichkeit, Ortskoordinaten im Raum zu scannen und viele Messpunkte in kleinen Zeitabständen zu erfassen und auszuwerten“ [46].

Als portables KMG eignet sich der Laser-Tracker mit berührendem Tastsystem besonders für die Messung großer Werkstücke und verdeckter Tastpunkte, die vom Laser-Tracker aus nicht direkt einzusehen und erkennbar sind. „Es können Messunsicherheiten im Bereich von $U = 0,1 \text{ mm } U (k = 2)$ bei einem Messbereich von 15 m und Bewegungen des Messkopfsystems bis zu 1 m/s erreicht werden“ [46].

5.2.7 Laser-Tracer

Laser Tracer eignen sich für hoch genaue Längen- und Entfernungsmessungen von beweglichen Messobjekten und Kalibrierung von Werkzeugmaschinen und wurden auf der Basis des interferometrischen Messverfahren (Michelson Interferometer) entwickelt. Die Laser-Tracer sind so konstruiert, dass sie der Bewegung eines am Messobjekt angebrachten Reflektors mittels reaktionsschneller Laserverfolgung folgen können. Dies ermöglicht hochpräzise Messungen von Längen in nahezu jeder Raumrichtung, siehe [54].

Prinzip des Laser-Tracers

Das Licht aus einer Laserlichtquelle wird in zwei Teilstrahlen aufgeteilt. Ein Teilstrahl (Objektstrahl) erreicht das Messobjekt und gelangt dann zurück zum Messgerät. Nach der Überlagerung der Teilstrahlen kommt es zu Interferenzen. Durch Beobachtung der Intensitätsänderungen auf dem Detektor können Rückschlüsse auf die Abstandsänderungen gezogen werden.

Nach der Überlagerung der Teilstrahlen entstehen Interferenzen. Durch die Beobachtung der Änderungen der Intensität am Detektor können Rückschlüsse auf die Abstandsänderungen gezogen werden [54].

Vor- und Nachteile des Laser-Tracers [54]

Vorteile	Nachteile
Zum Messgerät sind große Abstände möglich	Keine 100prozentige Genauigkeit
Genauigkeit extrem hoch	Sicherheitsmaßnahmen für Laser notwendig
Automatisierung der Messung möglich	Aufwendige Vorbereitungen notwendig
Vermessungen großer Flächen möglich	Relativ komplexer Aufbau
Messobjektbewegungen können sehr genau verfolgt werden	

Messgenauigkeit

Der Messbereich bei Längenmessungen erstreckt sich auf bis zu 15 Meter. Die Messabweichungen sind vom Messbereich abhängig und liegen zwischen $0.2\mu\text{m}$ und 1mm , und es kann eine Auflösung von $0,001\ \mu\text{m}$ erreicht werden. Diese hohe Genauigkeit wird durch die Verwendung eines Referenzspiegels, welcher als eine sphärische Kugel ausgeführt ist, erreicht. Der interferometrische Messaufbau bewegt sich dabei um diese Kugel, wodurch die mechanischen Fehler eliminiert werden. Aufgrund des Aufbaus haben Temperaturschwankungen keinen Einfluss auf die Genauigkeit, siehe [54].

Typische Anwendungen des Laser-Tracers

Die Laser-Tracer eignen sich in erster Linie für hoch genaue Entfernungsmessungen. Bei gleichzeitiger Verwendung von mehreren Laser-Tracern können auch 3D-Vermessungen vorgenommen werden. Da dies aber nicht so sehr wirtschaftlich ist, werden einzelne Laser-Tracer meist „zur höchstgenauen Kalibrierung von Werkzeugmaschinen oder Koordinatenmessgeräten oder auch als Referenzmesssystem zum Abgleich anderer Messeinrichtungen eingesetzt“ [46]. Mithilfe von Laser-Tracern können also Roboter, Werkzeugmaschinen, Parallelkinematiken und sonstige Fertigungsanlagen mit beweglichen Komponenten kalibriert bzw. ständig überwacht werden, vgl. [54].[50].

5.2.8 Computertomografie

Die Computertomografie (CT) ist die Auswertung „einer Vielzahl von aus verschiedenen Richtungen aufgenommenen Röntgenbildern“ [78] mit Hilfe eines Computers. Die mathematische Grundlage für die Verrechnung von aufgenommenen Röntgenaufnahmen aus verschiedenen Richtungen zu einem 3D-Ergebnis lieferte im Jahre 1917 der Mathematiker Johann Radon. Die digitale Computertomografie ist seit ca. 1971 möglich und wurde häufig in der Medizin eingesetzt [54].

Im Gegensatz zu allen anderen messtechnischen Systemen hat CT die Möglichkeit, die inneren Strukturen von Teilen und Baugruppen zu analysieren, ohne sie in Stücke zu schneiden und zu zerstören.

Prinzip des Verfahrens Computertomografie

Aufgrund der sehr kurzen Wellenlänge des Strahls durchdringt die Röntgenstrahlung das Messobjekt. Um ein 3D-Ergebnis zu erreichen, werden Röntgenaufnahmen des Messobjektes aus unterschiedlichen Blickrichtungen aufgenommen und dann computergestützt zu einem 3D-Bild verarbeitet [54].

Vor- und Nachteile der Computertomografie

Es gibt mehrere Gründe für den Einsatz von iCT-Systemen in der Messtechnik anstelle anderer Messinstrumente und -systeme. Die Möglichkeit der Inspektion innerer Bereiche von Werkstücken, der Wegfall von Aufspannungen und Messung der Dichteverteilungen sind nur einige davon. Es ist jedoch zu beachten, dass diese vorteilhafte Technologie auch einige Nachteile hat, z.B. in Bezug auf die Größe des Messobjektes. Die Zusammenstellung unten zeigt die wichtigsten Vor- und Nachteile von CT-Systemen [54].

Vorteile	Nachteile
Erfassung innere und verdeckter Strukturen	Sehr gefährliche Strahlung
Messungen automatisierbar	Teuer in der Anschaffung
Erfassung der kompletten Geometrie	Relativ langsame Messung
Messung der Dichteverteilungen	Zum Teil große Messkabinen erforderlich
	Lediglich für kleinere und mittelgroße Objekte geeignet

	Schwingungsisolierung notwendig
--	---------------------------------

Messbereich/Messgenauigkeit des Verfahrens Computertomografie

Wegen der gefährlichen Strahlung muss die Röntgenstrahlung von der Umgebung abgeschirmt werden. Daher sind die Abmessungen der Messgeräte entsprechend groß.

Das maximale Gewicht der Messobjekte ist begrenzt und kann bis zu ca. 150 kg betragen. Es gibt jedoch spezielle Scanner, die z.B. komplette LKW durchleuchten können. Die erreichbare Genauigkeit moderner CT - Systeme liegt im nm-Bereich (für Messobjekte bis 20-50 mm²). Die Detailerkennung ist ≤ 150 nm. Dies ermöglicht auch die Erkennung sehr kleiner Fehler. Abhängig von der gewünschten geometrischen Auflösung und damit auch von der Anzahl der Einzelmessungen und den Abmessungen des Bauteils liegt die Dauer der Messung zwischen wenigen Sekunden und einigen Minuten [54].

Messprinzip

Die Hauptkomponenten eines typischen CT-Systems können wie folgt klassifiziert werden:

- Eine Röntgenquelle (entweder Fächerstrahl- oder Kegelstrahlquelle)
- Ein Röntgendetektor (entweder Linien- oder Flachdetektor)
- Ein Drehtisch zwischen Röntgenstrahler und Detektor
- Eine Recheneinheit

Bei CT-Systemen durchdringt ein Röntgenstrahl das Werkstück, wobei der Strahl absorbiert oder zerstreut wird. Aus den Übertragungseigenschaften und Wechselwirkungen des Strahles mit dem Bauteil nimmt der Detektor des CT-Systems Informationen in Form von Bildern auf. „Die Information über das Werkstück wird somit aus der Abschwächung der Röntgenstrahlung beim Durchdringen des Materials gewonnen. Üblicherweise wird eine Kegelstrahltomographie“ [46] verwendet.

Der Prüfling liegt „zwischen Strahlungsquelle und Detektor auf einer Drehachse“ [46]. Das Werkstück wird auf dem Drehtisch platziert und man erhält Bilder aus verschiedenen Perspektiven. Für die Ermittlung der Gestalt des Werkstückes werden mehrere hundert Bilder aus verschiedenen Positionen benötigt.

Typische Anwendungen der Computertomografie

Die Computertomografie ermöglicht Einblicke in das Innere der Messobjekte. Dies ermöglicht die Erfassung und Untersuchung von Poren, Hohlräumen und Rissen. Darüber hinaus können die Dichteverteilungen visualisiert werden. Diese messtechnischen Eigenschaften machen CT zu einem wichtigen Messverfahren für die Automobil-, Zuliefer-, Kunststoff- und Elektronikindustrie. Auch Faserverbundwerkstoffe können untersucht werden. Verschiedene Verbindungsstellen (z. B.: Schweiß-, Klebe- und Lötverbindungen) stellen oft Schwachstellen in einer Konstruktion dar und sind deshalb besonders zu prüfen. Die CT ist auch für diese Anwendungszwecke gut geeignet und ermöglicht die Visualisierung visuell verborgener Fehler. Die CT-Analyse ermöglicht auch eine zerstörungsfreie Prüfung von unterschiedlichen formschlüssigen Fugeverbindungen. Die CT wird vor allem in der industriellen, zerstörungsfreien (Werkstück-)Prüfung eingesetzt, findet aber auch zunehmend Anwendung in der 3D-Geometrievermessung. Aus den ermittelten Messdaten kann dann ein CAD-Modell erstellt werden. Anhand des CAD-Modells werden z. B. Form- und Positionsanalysen in Bezug auf das Sollmodell vorgenommen, um z. B. einen Fertigungsprozess zu lenken [54]. CT wird zur Ermittlung von Fehlern in Gussteilen oder zur Durchführung von plausiblen Maßkontrollen und für viele andere anspruchsvolle Messaufgaben eingesetzt. Aufgrund der rasanten Entwicklung der CT-Systeme, speziell in Bezug auf die Messgeschwindigkeit, sind CT-Systeme für genaue Überwachung der Produktionssysteme und -prozesse gut einsetzbar [45].

Teile-zu-CAD-Vergleiche

Mit CT kann man ein Werkstück mit seinem CAD-Modell vergleichen. Das Ergebnis einer CT-Messung ist typischerweise eine 3D-Punktwolke. Die beim Teil-zu-CAD-Vergleich mit den Punkten des CAD-Modells abgeglichen wird, um so Maßunterschiede und Abweichungen zu ermitteln und Informationen über die Genauigkeit zu sammeln. In diesem Zusammenhang werden oft verschiedene Farben bei der Darstellung von Modellen verwendet, um die Lesbarkeit und Interpretation von Ergebnissen, Abweichungen und Analysen zu verbessern. Dazu gehört auch die Erkennung von unzureichendem und überschüssigem Material, Verrenkungen und Verzerrungen. Aufgrund der vorteilhaften Eigenschaften der CT ist dieser komplizierte Prozess relativ schnell und unkompliziert [55].

Teil-zu-Teil-Vergleiche

In diesem Fall werden die farbcodierten visuellen Ergebnisse von CT verwendet, um z.B. gleiche Art, aber unterschiedliche Teile aus der identischen Form oder Werkstücke zu vergleichen, die aus verschiedenen Losen oder mit verschiedenen Werkzeugen hergestellt wurden. Auf diese Weise ermöglicht CT dem Benutzer, Abmessungen und andere Abweichungen zwischen diesen Teilen zu identifizieren (oft im Vergleich zu einem Goldstandardteil) und erleichtert die Durchführung von Qualitätsanalysen für diese Teile [55].

Maßprüfungen

Zur Programmierung von Bemaßungen werden Werkstückzeichnungen und ein CAD-Modell verwendet, und aufgrund dieser Fähigkeit liefern Maßprüfungen mit CT doppelt so schnell Ergebnisse wie die herkömmlichen Messtechniklösungen. Ein fertiges Maßprüfungsprotokoll kann in nur wenigen Minuten nach der Programmierung und dem Scannen des Teils erstellt werden [55].

Analyse der Montage

Da es sehr schwierig und mühsam ist, Details im Gesamtaufbau zu beobachten und mögliche Fehler zu erkennen, werden sie oft übersehen. Als Lösung für dieses Problem ermöglicht iCT die schnelle Erkennung und unkomplizierte Analyse von Merkmalen wie Einschlüssen, Passungen, Dichtungen, Hohlräumen, Schnittstellen. Die Besonderheit von CT liegt darin, dass diese Aufgaben ohne Demontage oder Zerlegung des Teils durchgeführt werden können. Zur Erkennung von Passungenauigkeiten und Funktionsmängeln können mit CT nun auch bisher verborgene Werkstücke in Baugruppen problemlos überprüft werden [55].

Reverse Engineering

Wie bereits erwähnt, ist das typische Endergebnis eines 3D-CT-Scans eine 3D-Punktwolke. Im Anschluss an einen 3D-CT-Scan kann diese Punktwolke in eine Datendatei im STL (Stereolithografie Format) umgewandelt werden, um ein CAD-Modell zu erstellen. Anhand dieses CAD-Modells können sehr genaue Prototypen effizient und reibungslos abgeformt oder 3D Druck gemacht werden [55].

Internationale Normen und Richtlinien für CT

Im Zusammenhang mit der taktilen und optischen Koordinatenmesstechnik gibt es internationale Normen und Richtlinien, die weltweit anerkannt sind und verwendet werden. Sie erläutern die entsprechenden Verfahren für diese Messinstrumente und

bilden eine gemeinsame Grundlage für deren Verständnis. Im Zusammenhang mit der industriellen CT befinden sich internationale Normen und Richtlinien für die Anwendung von CT-Systemen für messtechnische Zwecke und die Bewertung von Messfehlern und Unsicherheitsquellen allerdings noch in der Entwicklung. Die Hauptgründe dafür sind die hohe Anzahl und Komplexität der Einflussfaktoren und das fehlende Know-how über ihre Eigenschaften, da die Anwendung dieser Technologie im Bereich der Metrologie relativ neu ist. „Eine ISO-Norm in der Reihe 10360 ist in Vorbereitung“ [46].

In der Tabelle 6 unten sind die derzeit verfügbaren internationalen Normen für den Einsatz von CT-Systemen aufgeführt. Sie beschreiben hauptsächlich das allgemeine Prinzip und die Terminologie. Daneben gibt es eine weitere Richtlinie „der VDI/VDE Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (GMA)“ [79].

Tabelle 6: Normen für den Einsatz von CT-Systemen [37]

Internationaler Standard	Titel
ISO 15708-1	Zerstörungsfreie Prüfung - Strahlenverfahren - Computertomografie - Teil 1: Grundlagen (2002)
ISO 15708-2	Zerstörungsfreie Prüfung - Strahlenverfahren - Computertomografie - Teil 2: Prüfverfahren (2002)
EN 16016-1	Zerstörungsfreie Prüfung - Bestrahlungsverfahren - Computertomografie - Teil 1: Terminologie (2011)
EN 16016-2	Zerstörungsfreie Prüfung - Bestrahlungsverfahren - Computertomografie - Teil 2: Prinzip, Ausrüstung und Proben (2011)
EN 16016-3	Zerstörungsfreie Prüfung - Bestrahlungsverfahren - Computertomografie - Teil 3: Betrieb und Auswertung (2011)
EN 16016-4	Zerstörungsfreie Prüfung - Bestrahlungsverfahren - Computertomografie - Teil 4: Qualifizierung (2011)
ISO/WD 10360-11	Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Abnahme- und Reverifizierungsprüfungen Prüfungen für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Computertomografie (2011)
ASTM E 1695-95	Standardprüfverfahren für die Messung der Leistung von Computertomographen (CT) Systemleistung (2006)
ASTM E 1441-11	Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging (2011)
ASTM E 1570-11	Standard Practice for computed Tomographic (CT) Examination (2011)
ASTM E 1672-12	Standard Guide for Computed Tomographic (CT) System Selection (2012)

5.2.9 Konfokale Mikroskopie

Das Prinzip der konfokalen Mikroskopie wurde zum ersten Mal von M. Minsky 1957 vorgestellt und zum Patent angemeldet (als US301346). Er verwendete Weißlicht zur punktuellen Messobjektbeleuchtung. Das weiße Licht ließ sich zu der damaligen Zeit nicht mit hohen Intensitäten auf das Messobjekt fokussieren. Ein effizienter Einsatz dieser Messmethode war bis dahin aufgrund der nicht vorhandenen, geeigneten Lichtquelle nicht möglich. Erst mit der Entwicklung der Laser in den 1980er Jahren wurde die konfokale Mikroskopie zu einem industrietauglichen Messprinzip. In den

letzten Jahren entstanden – basierend auf der konfokalen Mikroskopie – eine Reihe von Messmethoden, die das Auflösungsvermögen bzw. die Scangeschwindigkeit verbessert haben [54].

Prinzip der konfokalen Mikroskopie

Das Licht wird auf die Messobjektoberfläche fokussiert. Durch eine geschickte Anordnung von Lochblenden wird lediglich das reflektierte Licht, welches aus der Fokusebene kommt, durchgelassen. Dadurch gewinnt man eine Information bezüglich des Messobjektes [54].

Vor und Nachteile der konfokalen Mikroskopie

Vorteile	Nachteile
Keine Abschattungen(Bohrungen messbar)	Keine absolute Messung
Hohe Genauigkeit	Kleiner Messfleck
Messung automatisierbar	Großflächige Vermessung nicht wirtschaftlich
Rauheitsmessungen möglich	Nicht für alle Oberflächen(diffus streuend)
kompakt(leicht transportierbar)	Kleine Abstand zum Messobjekt
LED-Beleuchtung ungefährlich für Augen	

Messbereich/Messgenauigkeit der konfokalen Mikroskopie

Der vertikale Messbereich erstreckt sich von 50nm bis 100mm. Der laterale Messbereich liegt zwischen $100\mu\text{m}^2$ und 50 mm^2 . Die lateralen und vertikalen Genauigkeiten betragen wenige Nanometer und sind im den Biowissenschaften, wie bei einem konventionellem, von der verwendeten Lichtquelle limitiert. Bei den technischen Anwendungen ist die Genauigkeit in erster Linie von dem Systemrauschen vorgegeben, da das Maximum nicht mehr eindeutig bestimmt werden kann [54].

Typische Anwendungen der Konfokalen Mikroskopie

Die konfokalen Mikroskope werden für mikrostrukturelle 3D-Oberflächenvermessung eingesetzt. Aufgrund des hohen Auflösungsvermögens sind auch Messungen der Rauheit durchführbar. Konfokale Mikroskope sind in der Halbleiterherstellung integrierbar, um primär Schichtdickenmessungen und die Suche nach Fehlstellen zu ermöglichen. Im Medizin- und Biologiebereich werden mit Hilfe der konfokalen Mikroskopie Untersuchungen von lebendigem Gewebe durchgeführt. Dadurch, dass das

Licht eine gewisse Eindringtiefe hat, sind auch Analysen von in der Tiefe liegenden Strukturen bedingt möglich [54].

Rauheitsmessung - Vergleich von optischem und taktilem Verfahren

Neben den taktilen Verfahren zur Messung der Rauheit von Oberflächen gibt es zunehmend optische Methoden. Diese sind in der Lage, Vermessungen durchzuführen ohne das Werkstück zu berühren. Unter anderem dient das Licht dabei als Messmedium auf der Grundlage von Absorption, Reflektion, Interferenz und Fokussierung. Die Verfahren erlauben das Erstellen von digitalen Abbildern durch flächenhaftes Scannen. Mit den optische Sensoren ist es möglich, alle visuell erreichbaren Flächen zu erfassen und auszuwerten. Anforderungen, welche an diese Verfahren gestellt werden, findet man in der Norm DIN EN ISO 25178-6.

Wie bereits oben beschrieben, sind die Kenngrößen und Parameter in der Oberflächenmesstechnik vielfältig. In folgender Tabelle 7 sind die Vor- und Nachteile taktiler Verfahren gegenüber optischen Verfahren aufgelistet.

Tabelle 7: Vor und Nachteile taktiler Verfahren gegenüber optischer Verfahren [54]

Taktile Verfahren		Optische Verfahren	
Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
Relativ kompakt	Nur linienhafte Messungen	Flächenhafte Messungen	Beeinträchtigung bei hoher Flankensteilheit
Relativ kostengünstig	Vermessung nur bedingt automatisierbar	Vermessung automatisierbar	Teuer in der Anschaffung(zu taktilen Handgräten)
Kann leichte Schmutzpartikel entfernen	Vorschubapparat erforderlich	Oberflächen können abgegriffen und der Abdruck analysiert werden	Leichte Schmutzpartikel werden zur Oberfläche hinzugerechnet
Leichter Ölfilm/Wasserfilm stört die Messung nur unwesentlich	Relativ lange Messzeit	Schnelle qualitative Darstellung des Messergebnisses(in Echtzeit)	Ölfilm/Wasserfilm stört die Messung wesentlich
	Verschleiß der Messspitze	Teilweise kompakt(leicht transportabel)	
	Keine weichen Oberflächen messbar	Kontaktlos, dadurch auch bei weichen Oberflächen einsetzbar	Stark reflektierende Oberflächen nur bedingt vermessbar
	Kann Oberfläche beschädigen(Riefen,Kratzer)	Ggf. großer Messabstand realisierbar	
	Erfordert Kontakt zur Oberfläche	Häufig multifunktionale Ausstattung der Messgeräte	
	Tastspitze hat Auswirkungen auf die Genauigkeit der Messung	Keine Kollisionsgefahr beim Anfahren	
	Nicht alle Parameter können erfasst werden	Alle Parameter können erfasst werden	
	A/D-Wandler erforderlich		
	Begrenzter Messbereich		
	Kollisionsgefahr beim Anfahren der Messspitze auf die Oberfläche		

Typische Anwendungen der optischen Verfahren

Während bei den taktilen Messverfahren in der Regel die Bauteiloberfläche abgefahren und somit primär die Oberflächenrauigkeit gemessen wird, besitzen optische Messverfahren weitreichendere Möglichkeiten der Objekterfassung. Der Übergang zur klassischen 3D-Konturvermessung ist hierbei nicht eindeutig definiert. So können kleine Strukturen der Oberflächenrauigkeit zugeordnet werden oder gehören bereits der 3D-Kontur des Werkstückes an. Im Kapitel „3D-Vermessung“ sind daher bereits einige Verfahren beschrieben worden, die auch hier in diesem Kapitel zu Vermessung der Oberflächenrauigkeit bzw. Oberflächenkontur wieder herangezogen werden. Auf eine erneuerte detaillierte Beschreibung wird daher hier verzichtet und auf das jeweilige Kapitel verwiesen. Weiterhin wird hier nicht mehr auf die taktilen Verfahren eingegangen, da erstens die Vorteile der optischen Messgeräte überwiegen und zweitens in dem hier vorliegenden Handbuch primär auf optische Verfahren eingegangen werden [54].

Übersicht der optischen Verfahren

Zur hoch genauen Oberflächenmessung sind integrierte Fertigungsmesssysteme mit vollständiger Automatisierung notwendig, um Anforderungen an Industrie 4.0 gerecht zu werden. Neben komplexen Geometrien mit zunehmenden engen Toleranzen steigt gleichzeitig die Forderung nach nachweisbarer und rückführbarer Qualitätssicherung.

Für die optische Messtechnik hat das vor allem zwei Konsequenzen. Zum einen müssen hochauflösende Messverfahren den Sprung vom bis dato eher laborlastigen Einsatz in die Fertigung schaffen. Zum anderen gilt es, dem Anwender durch neue Technologien Möglichkeiten zu eröffnen, Kosten zu sparen und mit minimalen Aufwand maximale Qualitätssicherung zu leisten [54].

5.2.10 Absolut messendes Interferometer

Die High End Messgeräte mit hoher Genauigkeit bei großen Entfernungen sind die absolut messenden Interferometer. Sie erlauben „die Positionsbestimmung bis zu einer Genauigkeit von $0,5 \mu\text{m}/\text{m}$ auf Messstrecken bis zu 20 m - gleich mit bis zu 100 Kanälen“ [74].

Messprinzip

Beim gewöhnlichen Interferometer gibt es einen sehr eingeschränkten Bereich der Eindeutigkeit in der Größenordnung „einer halben Lichtwellenlänge. Größere Distanzen können durch Zählen der Interferenzstreifen ermittelt werden“ [74]. Anders im Falle des absolut messenden Interferometers. Dort wird die Absolut-Position vom Messreflektor direkt fest gestellt. Erreicht wird dies durch das gleichzeitige Messen mit vielen Wellenlängen. Die so entstehenden Schwebungen „erzeugen synthetische Wellenlängen, die wesentlich größer sein können als die ursprünglich verwendeten Lichtwellenlängen“ [74].

Merkmale

Im Unterschied zum normalen Interferometer ist bei diesem Interferometertyp durch Absolutmessung des Abstandes eine Unterbrechung des Messstrahls während der Messung möglich, und wenn der Messstrahl dann frei ist, wird seine aktuelle Lage vom Messsystem von selbst gemessen. „Dabei erlauben die synthetischen Wellenlängen die grobe Definition der Abstände, die Kombination mit den Einzelwellenlängen garantiert die sehr hohe Messgenauigkeit des Systems. Diese Interferometer können derzeit bis zu 100 Kanälen gleichzeitig aufgebaut werden, so dass die 3D-Positionsbestimmung mehrerer Punkte gleichzeitig möglich ist“ [74].

Anwendungen:

Das absolut messende Interferometer kann die Absolut-Position bestimmen mit einer Messunsicherheit „von $0,5 \mu\text{m/m}$ in einem Messvolumen bis zu $20 \times 20 \times 20 \text{ m}^3$. Dadurch ergeben sich eine Vielzahl von Anwendungen, von der Kalibrierung großer Werkzeugmaschine zur messtechnischen Überwachung von Produktionsmaschinen oder Vorrichtungen im Betrieb, von der metrologischen Überwachung von Roboterbewegungen zur Messung von Verformungen und Schwingungen an Bauteilen und Systemen“ [74].

5.2.11 Interferometrische Abstands- bzw. Entfernungsmessung

Die Interferometrie kann als eine hochwertige Messmethode definiert werden, bei der die Interferenz von Wellen wie etwa Licht-, Schall- oder Radiowellen genutzt wird. Zur Abstandmessung wird das Michelson-Interferometer eingesetzt, eine weit verbreitete Bauart mit vielen Ausführungen, erfunden vom Physiker Albert Abraham Michelson, 1981. Michelson-Interferometer werden überall dort eingesetzt, wo hochgenaue Abstandsmessungen durchgeführt werden müssen. Zwei Spiegel und ein

Strahlenteiler sind die Hauptbestandteile. Das Licht wird in zwei Strahlen aufgeteilt, die unterschiedliche Wege zurücklegen, sobald es den Strahlteiler durchläuft. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Strahlteiler teilweise reflektiert wird. Die beiden unterschiedlichen Wege führen zu den beiden unterschiedlichen Spiegeln. Dort werden sie reflektiert und am Strahlteiler wieder vereinigt und kommen dann gemeinsam am Detektor an. Eine Phasendifferenz, die durch die unterschiedlichen Strahlgänge entsteht, erzeugt ein Streifenmuster der Interferenz. Die Aufgabe des Detektors ist es, das Streifenmuster zu analysieren, um gewünschte Eigenschaften, z.B. Wellenmerkmale oder Spiegelverschiebungen, zu bestimmen.

Prinzip der interferometrischen Abstands- bzw. Entfernungsmessung

Bei der Laserinterferometrie erhält man ein Interferenzmuster, wenn sich zwei Strahlen überlagern, die entweder durch Teilung eines Strahls in zwei Strahlen, in einen Objekt- und einen Referenzstrahl, oder durch die Verwendung von zwei Lichtstrahlen erzeugt werden. Nach der Reflexion des Objektstrahls von der Profiloberfläche und dem Zurücklegen von unterschiedlich langen Strecken werden die beiden Lichtfronten überlagert. Aus der Veränderung des Interferenzmusters lässt sich die Abstandsverschiebung des Messobjekts mit hoher Präzision bestimmen.

Das sichtbare Licht hat eine kurze Wellenlänge, und es ist möglich, selbst sehr kleine Unterschiede in den optischen Wegen zwischen zwei Strahlen zu erkennen, da sie unterschiedliche Interferenzmuster erzeugen [54].

Messgenauigkeit / Messbereich der interferometrischen Abstands- bzw. Entfernungsmessung

Trotz ihres einfachen Aufbaus weisen alle Interferometer eine sehr hohe Genauigkeit auf (bis zu 1 nm). Mit einer Erweiterung des Interferometers, bei der z.B. leicht unterschiedliche Laserwellenlängen an beiden Armen verwendet werden, wird die Genauigkeit weiter erhöht. Zusätzlich zur Interferenz treten Schwebungen auf, wenn sich die beiden Teilwellen überlagern. Ein Vergleich der nicht am Spiegel reflektierten Teilwellen (Referenzschwebung) ermöglicht eine noch höhere Genauigkeit, 0,01 nm. Der Messbereich kann durch Signalkodierung bis auf mehrere Meter erweitert werden. Somit können sowohl extrem kleine als auch große Abstandsänderungen zuverlässig erkannt werden.

Aufgrund der großen Kohärenzlänge moderner Lasersysteme ist es möglich, Entfernungänderungen auch von weit entfernten Messobjekten (sogar einige hundert Me-

ter) zu erfassen. [54]. Tabelle 8 zeigt die Vor- und Nachteile des Laserinterferometers.

Tabelle 8 Vor- und Nachteile des Laserinterferometers

Vorteile	Nachteile
Extrem hohe Genauigkeit	Keine absolute Messung
sowohl extrem kurze als auch große Abstandsänderungen messbar	Kleiner Messfleck
Messung automatisierbar	Großflächige Vermessung nicht wirtschaftlich
Kompakt (leicht transportabel)	Hoher Vorbereitungsaufwand
	Interpretierbarkeit der Messwerte
	empfindlich auf störende Vibrationen
	evtl. Gefährdung durch Laser

Typische Anwendungen der interferometrischen Abstands- bzw. Entfernungsmessung

Diese Methode wird hauptsächlich für hochpräzise Längenmessungen verwendet, dort wo eine extrem hohe Genauigkeit erforderlich ist. Diese Methode wird daher sehr häufig bei der Kalibrierung und Kontrolle verschiedener Bewegungssysteme, z. B. Werkzeugmaschinen und KMGs, in der modernen Fertigungsmesstechnik eingesetzt. Wenn mehrere Messpunkte erfasst werden, kann auch die Oberfläche vermessen werden [54].

Betreffend Messverfahren zur interferometrischen Abstands- und Entfernungsmessung gibt es die homodyne und die heterodyne Interferometrie.

Die homodyne Interferometrie entspricht in ihrem Grundaufbau dem Michelson-Interferometer und wird zur hochpräzisen Abstandsmessung eingesetzt. Die Bezeichnung homodyn bedeutet, dass eine Lichtquelle mit einer Wellenlänge verwendet wird. Zwei Spiegel und ein Strahlenteiler sind die Hauptbestandteile eines Michelson-Interferometers.

Ein Laserstrahl trifft auf einen Strahlteiler und wird in zwei kohärente Strahlenbündel gleicher Intensität aufgeteilt. Ein Teilstrahl gelangt zum feststehenden Referenzspiegel und wird zurück zum Strahlteiler reflektiert. Der zweite Strahl (Objektstrahl) wird an

dem Messspiegel, der mit dem zu messenden Objekt verschoben wird, zum Strahlteiler zurückgeworfen. An dem Strahlteiler werden die beiden Strahlen wieder vereinigt. Dort interferieren sie miteinander und kommen dann gemeinsam am Detektor an. Die Abhängigkeit der Phase Φ von der Abstandsdifferenz des Messspiegels ergibt sich zu:

$$\phi = 2 \frac{2 * \pi}{\lambda} \Delta s \quad (\text{Gleichung 5.13})$$

„Eine eindeutige Aussage kann für diese Ausführungsform nur im Bereich des Phasenunterschieds zwischen $\Phi=0$ und $\Phi=2,\pi$ getroffen werden“ [54].

„Je nach Unterschied der optischen Wege s_1 und s_2 (optischer Weg = Weg x Brechzahl) versteckt sich das Licht am Empfänger oder es schwächt sich ab. Wenn die Reflektoren ihre Positionen nicht verändern, ändert sich die Lichtintensität am Empfänger“ [74].

Bewegt sich der Messspiegel jedoch entlang der Messstrecke s_1 , „dann registriert der Empfänger Hell-Dunkel-Wechsel. Dies führt zu einem Wechsel von hellen und dunklen Streifen, die vom Empfänger als Impulse gezählt werden können. Die Wellenlänge des Lichtes bestimmt die Anzahl der Hell-Dunkel-Periode je mm Messweg. Eine Hell-Dunkel-Periode entspricht einer halben Wellenlänge, was im sichtbaren Bereich des Lichtes etwa $0,3 \mu\text{m}$ ist“ [74]. Anders ausgedrückt: „Die Wegänderung kann durch Abzählen der Intensitäts-maxima bzw.-minima berechnet werden. Dabei entspricht jedes gezählte Maximum oder Minimum einer Abstandsänderung um $\lambda/2$ “ [54].

Zu den berührungslosen Messverfahren gehört auch der Encoder, der im folgenden Kapitel ausführlicher besprochen werden soll.

5.3 Encoder

Ein Encoder kann als ein Sensor für mechanische Bewegungen definiert werden, der als Reaktion auf eine Bewegung (Verschiebung oder Geschwindigkeit) digitale Signale an eine Bewegungssteuerung liefert. Der Encoder erfasst die Position, Geschwindigkeit, Richtung und/oder Zählungen und wandelt die so gewonnenen Informationen in analoge/digitale elektrische Impulse oder in elektronische Signale um. Diese Signale werden dann an eine Steuereinheit zurückgesendet und interpretiert, d.h. eskaliert, um ein Wert darzustellen, der dann im Programm verwendet wird [63]. In der Abbildung 5.19 unten ist der Encoder-Feedback-Prozess dargestellt.

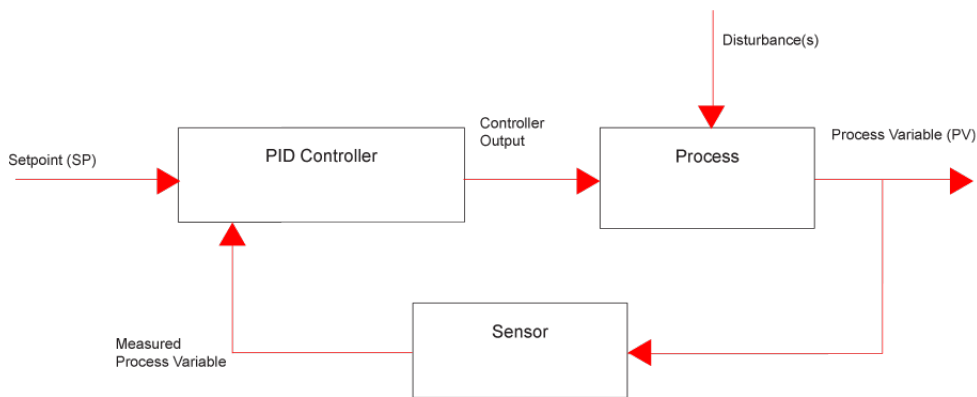


Abbildung 5.19 Encoder Feedback Process [63]

5.3.1 Art der Bewegung

Was die Art der Bewegung betrifft, lassen sich Encoder in zwei Typen unterteilen: lineare und rotierende Encoder. Ein linearer Encoder reagiert auf eine Bewegung entlang einer Bahn, während ein rotierender Encoder (auch Drehwinkelgeber genannt) auf eine Drehbewegung reagiert [63].

5.3.2 Funktionsweise

Anhand des Ausgangssignals unterscheidet man zwischen Inkrementalencoder (i.e. Inkrementalgeber) und Absolut-Encoder. Ein Inkrementalgeber erzeugt eine Folge von Impulsen, die zur Bestimmung von Position und Geschwindigkeit verwendet werden können. Ein Absolut-Encoder erzeugt eindeutige Bitkonfigurationen, um Positionen direkt zu verfolgen. Abhängig von der Sensortechnologie, die auch für Encoder entscheidend ist, können die Encoder in berührende und berührungslose unterteilt werden. Bei berührenden Encodern sind Bürsten oder Fingersensoren notwendig, die die elektrische Signalübertragung zur Anzeige von Positionsänderungen sicherstellen. Hingegen verwendet man bei berührungslosen Encodern optische, kapazitive oder magnetische Sensortechnologien, um sowohl Positions- als auch Bewegungsinformationen zu erfassen [61].

5.3.3 Arten von Encoder

Je nach den Anforderungen an die Anwendung können bestimmte Arten von Encodern besser geeignet sein als andere.

Berührende Encoder

Encoder, die einen mechanischen Kontakt zwischen einem Stiftsensor oder einer Bürste und der Kodierscheibe herstellen, werden als Kontaktdrehgeber klassifiziert. Die Kodierscheibe (Abbildung 5.22) enthält mehrere konzentrische Ringe oder Spuren. Die vier Spuren auf der Scheibe stellen einen Binärcode dar, der sich aus 2^0 , 2^1 , 2^2 , 2^3 zusammensetzt. Die Zahlen 0 bis 15 werden durch entsprechende Kontaktsensoren kodiert, die mit B_0 , B_1 , B_2 , B_3 bezeichnet sind. Bei der Drehung der Scheibe berühren die Sensoren abwechselnd leitende Streifen und benachbarte Isolatoren. Auf diese Weise wird eine Reihe von Rechteckwellenmustern erzeugt [61].

Die Messung einer Wellenposition ist ein häufiges Anwendungsbeispiel, bei dem ein einheitliches Muster verwendet wird. Jede Art von Ungleichmäßigkeit ist ein Hinweis auf eine Fehlerquelle. Wenn die Segmente ungleichmäßig verteilt sind, führt dies zu einem Positionsfehler. Darüber hinaus tritt ein Fehler aufgrund der Exzentrizität auf, der vom Wellenwinkel (als Sinusfunktion) abhängt [61].

Übersicht der optischen Verfahren

Neben den kontaktbehafteten Encodern, d.h. Encodern, die eine elektrische Verbindung nutzen, um die kodierte Scheibe zu lesen, gibt es auch Encoder, die berührungslose, physikalische Abtasttechnologien nutzen, um Positions- oder Bewegungsinformationen zu erfassen. Diese Encoder werden als berührungslose Encoder klassifiziert und in drei Hauptkategorien unterteilt, nämlich optische, kapazitive und magnetische Encoder [61].

Optische Encoder

Man unterscheidet den inkrementalen, absoluten, und kommutierenden optischen Encoder.

Funktionsprinzip des inkrementalen optischen Encoders

Der inkrementale optische Encoder ist ein Messgerät, das aus einer LED (Leuchtdiode), einem Lichtdetektor und einer transparenten Scheibe besteht. Inkrementale Encoder verwenden optisches Licht, um die Position/Geschwindigkeit über eine transparente Scheibe zu erfassen. Die transparente Scheibe enthält undurchsichtige Abschnitte, die in gleichen Abständen angeordnet sind, um das Licht abzulenken, während die transparenten Abschnitte den Durchgang von Licht ermöglichen. Eine Leuchtdiode strahlt Licht durch die transparenten Teile der Scheibe. Das durchschei-

nende Licht wird von einem Fotodetektor erfasst, der ein elektrisches Signal ausgibt. Der Encoder erzeugt bei seiner Drehung eine Folge von Impulsen in gleichmäßigen Abständen. Der Ausgang von inkrementalen Encodern wird in Impulsen pro Umdrehung gemessen, die zur Verfolgung der Position oder zur Bestimmung der Geschwindigkeit verwendet werden. Optische Encoder eignen sich besonders für die präzise Positionsbestimmung in der Industrieautomation [63].⁹

In der Abbildung 5.20 unten ist die Funktionsweise des optischen Encoders mit den Bauelementen dargestellt.

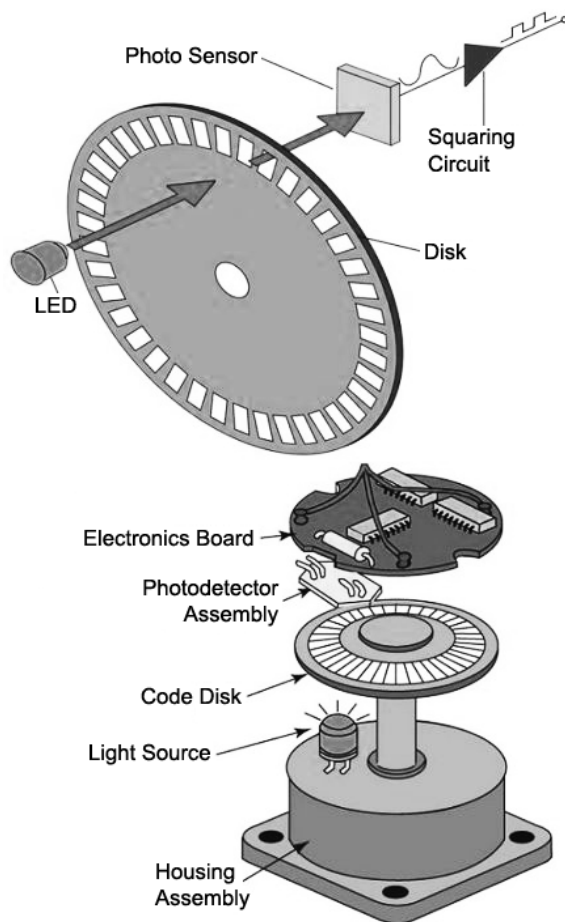


Abbildung 5.20 Prinzip des optischen Encoders [63]

Ein einkanaliger Ausgang wird in der Regel für Anwendungen verwendet, bei denen die Bewegungsrichtung keine Rolle spielt, ähnlich wie bei einem Tachometer. In Fällen, in denen die Richtungserkennung wichtig ist, wird ein 2-Kanal-Quadratur-Ausgang verwendet. Die beiden Kanäle, A und B, sind in der Regel um 90 elek-

⁹ Diese Stellen aus dem Englischen paraphrasiert vom Autor

trische Grad phasenverschoben, und die elektronischen Komponenten bestimmen die Richtung anhand der Phasenbeziehung zwischen den beiden Kanälen. Die Position eines inkrementalen Encoders wird durch Addieren aller Impulse durch einen Zähler berechnet. Wenn man weiß, wie viele Impulse der jeweilige Geber in einer Umdrehung hat, ergibt der finale Zählerstand geteilt durch die Impulse pro Umdrehung die Anzahl der vom Motor durchgeführten Umdrehungen [63]. Die Abbildung 5.21 unten zeigt die vom inkrementalen Encoder erzeugte Impulsfolge.

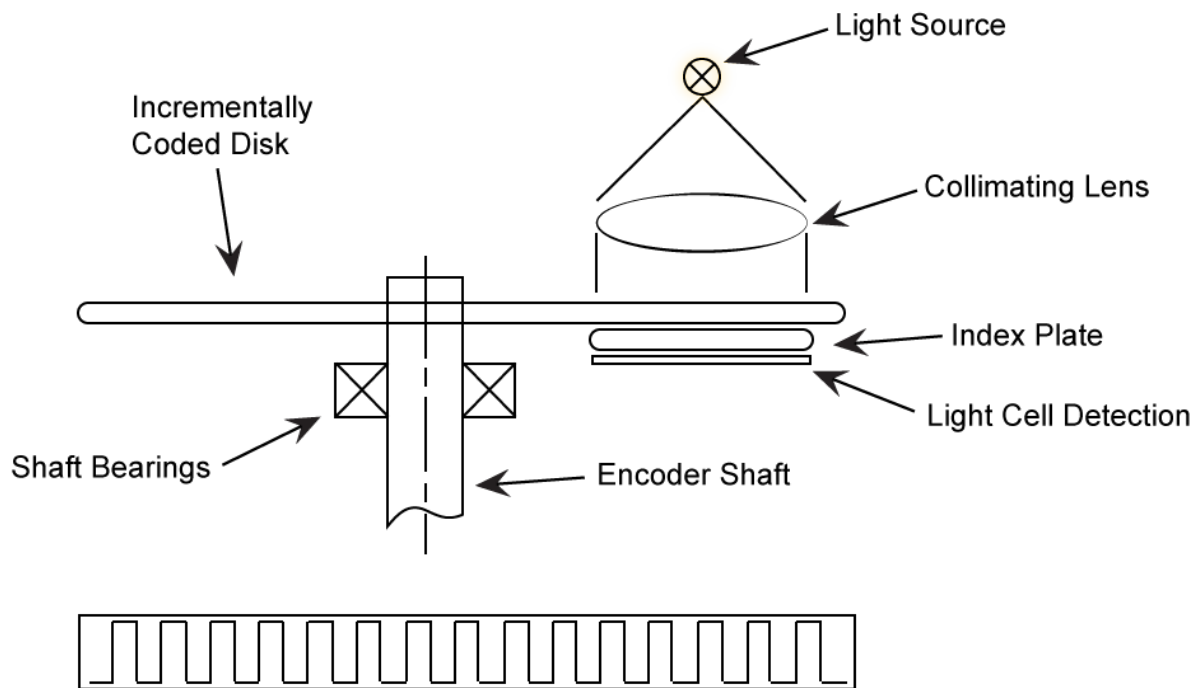


Abbildung 5.21 Vom inkrementalen Encoder erzeugte Impulsfolge [63]

Ein Schwachpunkt des inkrementalen Encoders ist der Zählverlust, der bei Stromausfall auftritt. Beim Neustart muss das Gerät auf eine Ausgangsposition referenziert werden, um den Zähler neu zu initialisieren. Es gibt jedoch einige Inkrementalen Encoder, die mit einem dritten Kanal (dem Indexkanal) ausgestattet sind. Der Indexkanal erzeugt einen einzelnen Signalimpuls pro Umdrehung der Drehgeberwelle und wird häufig als Referenzmarke verwendet. Die Referenzmarke wird dann als Startposition bezeichnet, von der aus die Zählung oder Positionsverfolgung fortgesetzt werden kann [63].

Inkrementale Encoder sind nicht so genau wie absolute Encoder, da es zu Interferenzen oder Fehlmessungen kommen kann.

Absolute optische Encoder

Ein absoluter Encoder enthält ähnliche Komponenten wie ein inkrementaler Encoder. Er verfügt über einen Fotodetektor und eine LED-Lichtquelle, aber anstelle einer Scheibe mit gleichmäßig verteilten Linien verwendet ein absoluter Encoder eine Scheibe mit konzentrischen Kreismustern.

Funktionsprinzip des absolut optischen Encoders

Absolut-Encoder verwenden eine stationäre Blende zwischen dem Fotodetektor und der Encoderscheibe. Die Abbildung 5.22 unten zeigt die absolute Drehwertgeberscheibe mit konzentrischem Kreismuster.



Abbildung 5.22 Absolute Drehwertgeberscheibe mit konzentrischem Kreismuster [63]

Das von einem Absolutwertgeber erzeugte Ausgangssignal besteht aus digitalen Bits, die einer eindeutigen Position entsprechen. Die Bitkonfiguration wird durch das Licht erzeugt, das der Fotodetektor bei der Drehung der Scheibe empfängt. Die empfangene Lichtkonfiguration wird in einen Gray-Code umgewandelt. Folglich hat jede Position ihre eigene eindeutige Bitkonfiguration [63].

Typische Anwendungen des optischen Encoders

Zu den typischen Anwendungen gehören die Temperaturregelung, Drehzahlregelung, Menüauswahl und Lautstärkeregelung.

Der Einsatzbereich optischer Encoder ist in der Prozesssteuerung der Fertigungsindustrie, bei Automatisierungsgeräten und in der industriellen Robotik. Der optische Encoder liefert Positionsdaten und Daten zu Entfernung, Geschwindigkeit sowie Richtung. Sie eignen sich hervorragend für die präzise Positionsbestimmung in der Industrieautomation. Encoder messen zuverlässig Drehzahl, Geschwindigkeit und Beschleunigung [62].

Vor- und Nachteile eines optischen Encoders

Der Nachteil ist, dass er anfällig für Umwelteinflüsse wie Hitze, Stöße, Staub und Schmutz ist. Die Vorteile sind Kostengünstigkeit, hohe Auflösung, sehr große Genauigkeit und Robustheit.

Kommutierender optischer Encoder

Ein kommutierender Encoder enthält die gleichen grundlegenden Komponenten wie der Inkremental Encoder, jedoch zusätzlich Kommutierungsspuren entlang der Außenkante der Scheibe für die U/V/W-Ausgabe [63].

Das Prinzip des optischen Kommutierungencoders ist, dass es auf die gleiche Weise wie inkrementale optische Encoder arbeitet, indem die Position mit Hilfe vom optischem Licht und einer geschlitzten Encoderscheibe verfolgt wird.

Kapazitive Encoder

Kapazitive Encoder vereinen die besten Aspekte von optischen und magnetischen Encodern in einem robusten, zuverlässigen Gerät, eignen sich jedoch nicht für große Motorwellen (größer als 8 mm Durchmesser). Kapazitive Encoder können sowohl inkremental als auch absolut sein.

Relativ neu unter den Encoder wurden kapazitive Encoder entwickelt, um spezifischen Anforderungen gerecht zu werden, und sie werden unter den berührungslosen Encodern am seltensten eingesetzt. In Bezug auf die Robustheit sind sie den magnetischen Encodern ähnlich und bieten eine hohe Robustheit, Genauigkeit; Auflösungswerte sind jedoch niedriger als bei den optischen [61].

Magnetische Encoder

Magnetische Encoder sind eine Art von Drehwertgeber, die mit Hilfe von Sensoren Änderungen der Magnetfelder eines rotierenden magnetisierten Rads oder Rings erkennen [61].

Prinzip des magnetischen Drehwertgebers

Ein magnetischer Encoder besteht aus drei Komponenten: einer Scheibe, einem Hall-Effekt- oder magnetoresistiven Sensor und einem Auswertekreis. Die Scheibe ist magnetisiert und verfügt über abwechselnd gleichmäßig verteilte Nord- und Südpole an ihrem Rand. Der Sensor erkennt Änderungen des Magnetfeldes, wenn sich die Scheibe dreht. Der Sensor erkennt die kleinen Verschiebungen in der Position N>>S und S>>N. und wandelt die Informationen in ein digitales Signal um. Es gibt viele Methoden zur Erkennung von Magnetfeldänderungen, aber die beiden Haupttypen, die in Encodern verwendet werden, sind der Hall-Effekt und der magnetoresistive Sensor. Wenn die Elektronen magnetisch abgelenkt werden, erzeugt dies eine Spannungsänderung, die von einem Hall-Effekt-Sensor erkannt werden kann. Andererseits gibt es Widerstände, die für das Magnetfeld empfindlich sind. Magnetoresistive Sensoren nutzen diese Art von Widerständen. Sie erkennen eine durch ein Magnetfeld verursachte Widerstandsänderung und erzeugen ein sinusförmiges Signal. Dieses kann dann in ein Rechtecksignal umgewandelt werden [63].

Es gibt verschiedene Faktoren, die zusammen den Auflösungswert in magnetischen Drehwertgebern beeinflussen, z.B. die Anzahl der Sensoren und die Anzahl der magnetisierten Polpaare. In diesem Zusammenhang sollte berücksichtigt werden, dass Hall-Effekt-Sensoren im Vergleich zu magnetoresistiven Sensoren kostengünstiger sind. Allerdings bieten magnetoresistive Sensoren im Allgemeinen eine höhere Präzision und ein geringeres Signalrauschen [63]. Abbildung 5.23 unten zeigt das Schema des Encoder-Rotors mit Nord- und Südpolen.

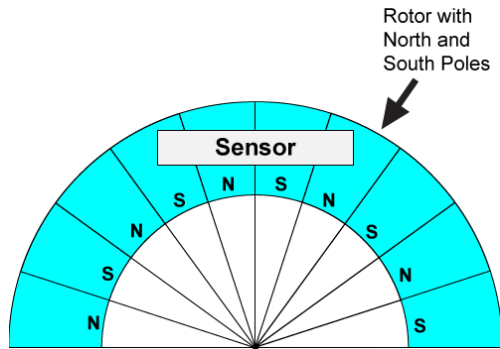


Abbildung 5.23 Encoder-Rotor mit Nord- und Südpolen [63]

Hall-Effekt-Sensorik

Der Sensor erzeugt und verarbeitet Hall-Effekt-Signale und erzeugt ein Quadratursignal, wie es bei optischen Encodern üblich ist. Das Ausgangssignal wird durch die Messung der magnetischen Flussverteilung auf der Oberfläche des Chips erzeugt. Die Ausgabegenauigkeit hängt von der radialen Platzierung des ICs in Bezug auf den Zielmagneten ab. Die Chipfläche sollte parallel zum Magneten liegen, damit der Luftspalt zwischen Magnet und Sensor über die gesamte Sensorfläche gleichmäßig ist [63].

Vorteile des magnetischen Drehwertgebers gegenüber dem optischen

Magnetische Drehwertgeber vermeiden die drei Schwachstellen, die optische Drehwertgeber aufweisen, nämlich:

- 1) Dichtungsfehler, die das Eindringen von Verunreinigungen ermöglichen
- 2) Das Zerbrechen der optischen Platte bei Vibrationen oder Stößen
- 3) Lagerausfälle

Magnetische Geräte, die so konstruiert sind, dass sie die unter 1) und 2) genannten Ausfallarten effektiv beseitigen, bieten die Möglichkeit, auch Lagerausfälle zu reduzieren. Magnetische Drehwertgeber machen keine Fehler aufgrund von Verunreinigungen, da ihre Sensoren Schwankungen der im Rotor eingebetteten Magnetfelder erkennen. Öl, Schmutz und Wasser beeinflussen diese Magnetfelder nicht [63].

Hall-Effekt-Sensoren sind im Allgemeinen kostengünstiger und weniger genau als magnetische Widerstandssensoren. Das bedeutet, dass Hall-Effekt-Sensoren, wenn sie in einem Encoder verwendet werden, mehr "Jitter" bzw. Fehler im Signal erzeugen, die durch Sensorschwankungen verursacht werden [63]. Magnetische Encoder

sind robuster und können unter Bedingungen arbeiten, bei denen Schmutz, Staub, Öl und andere Umwelteinflüsse eindringen, bieten aber nicht die gleiche Auflösung wie die der optischen Encoder. Magnetische Encoder sind sowohl in rotierenden als auch in linearen Konfigurationen erhältlich.

Eigenschaften magnetischer Encoder

Was den magnetischen Encoder auszeichnet ist, dass er robust ist und Vibrieren und Ersschüttern sehr gut aushält. Weiteres ist er gegen Schmutz, Öl und Feuchtigkeit, nicht empfindlich. Allerdings ist er anfällig für magnetische Störung, die von Elektromotoren herrührt. Auch ist der Bereich der zulässigen Betriebstemperatur eingeschränkt. „Zwar wurden viele Verbesserungen an magnetischen Encodern vorgenommen, diese bieten jedoch in der Regel eine geringere Auflösung und Genauigkeit als optische und kapazitive Encoder“ [63].

Rotierender vs. Linearencoder

Wie aus den Namen ersichtlich ist, werden lineare Drehwertgeber zur Messung und Erkennung von Bewegungen entlang einer linearen Bahn verwendet, während ein rotierender Drehwertgeber in der Lage ist, Drehbewegungen zu erkennen und zu messen. [61].

Inkrementale Drehwertgeber

Ein inkrementaler Drehwertgeber wird auch als Quadratur-Drehwertgeber bezeichnet. Diese Art von Drehwertgebern besitzen Sensoren, die eine optische, mechanische oder magnetische Indexzählung für die Winkelmessung verwenden [61].

Lineare Encoder

Lineare Encoder sind für die Messung linearer Bewegungen und nicht für die Messung von Drehbewegungen ausgelegt. Sie werden in der Regel mit linearen Komponenten wie Blöcken und Schienen verwendet. Sie sind weniger robust und eignen sich eher für Anwendungen in einer staub- und schmutzfreien Umgebung. Ein linearer Encoder besteht typischerweise aus einem Maßstab, der nichts anderes als ein kodierter Streifen ist, und einem Messkopf. Die Position wird durch den Sensorkopf identifiziert. Dazu liest er die Abstände zwischen den Kodierungen aus der Skala und wandelt die Position in ein analoges oder digitales Signal um, das in eine digitale Anzeige erscheint. Auflösungswerte von linearen Encodern werden in

Impulsen pro Abstand ausgedrückt, z. B. Impulse pro inch (ppi), Impulse pro Millimeter (ppm)). Die Auflösung des Maßstabs wird im Voraus durch die eingebetteten Markierungen festgelegt, die vom Abtastkopf erfasst werden.

Sowohl optischer als auch magnetischer Linear Encoder funktionieren nach diesem Verfahren. Sie unterscheiden sich jedoch in ihren physikalischen Eigenschaften [63].

Funktionsprinzip des optischen Linear Encoders

Die Lichtquelle und die Linse erzeugen einen parallelen Lichtstrahl, der durch die vier Fenster der Abtastplatte fällt. Die vier Abtastfenster sind um 90 Grad gegeneinander verschoben. Das Licht fällt dann durch den Glasmaßstab und wird von Fotosensoren erfasst. Der Maßstab wandelt dann den erfassten Lichtstrahl um, wenn sich die Abtasteinheit bewegt. Die Erkennung des Lichts durch den Fotosensor führt zu sinusförmigen Wellenausgängen. Das lineare Encodersystem kombiniert dann die verschobenen Signale, um zwei sinusförmige Ausgänge zu erzeugen, die symmetrisch, aber um 90 Grad phasenverschoben zueinander sind. Ein Referenzsignal wird erzeugt, wenn ein fünftes Muster auf der Abtastplatte mit einem identischen Muster auf dem Maßstab ausgerichtet wird [63].

Funktionsprinzip des magnetischen linearen Encoders

Ein magnetisches lineares Encoder-System verwendet einen magnetischen Abtastkopf und einen magnetischen Maßstab, um einen TTL oder Analogausgang für die Kanäle A und B zu erzeugen. Wenn der magnetische Sensor am magnetischen Maßstab vorbeiläuft, erkennt der Sensor die Änderung des Magnetfelds und gibt ein Signal aus. Die Frequenz dieses Ausgangssignals ist proportional zur Messgeschwindigkeit und zur Verschiebung des Sensors. Da ein linearer Encoder die Änderung des Magnetfelds erfasst, haben Licht, Öl, Staub und Schmutz keine Auswirkungen auf diese Art von System; daher bieten sie eine hohe Zuverlässigkeit in rauen Umgebungen [63].

Physikalische Eigenschaften von linearen Encodern

Die Hauptbestandteile von magnetisch linearen Encodern (Längenmessgerät) sind eine Abtasteinheit, ein Sensor, ein Messwertempfänger oder ein Abtastkopf, gepaart mit einem übertragenden, reflektierenden, Maßstab, der die Position kodiert. Der Maßstab eines linearen Encoders (Längenmessgerät) besteht in der Regel aus Glas und ist an einem Träger befestigt, während die Abtasteinheit eine Lichtquelle,

Fotozellen und ein zweites Glasteil, die Abtastplatte, enthält. Insgesamt ist der lineare Encoder in der Lage, Bewegungen in digitale oder analoge Signale umzuwandeln, um die Veränderung der Position im Laufe der Zeit zu bestimmen [63].

Drehwertgeber (rotary encoder)

Ein Drehwertgeber besteht in der Regel aus einer internen kodierten Scheibe und einem Abtastkopf, der zur Bestimmung der Drehposition verwendet wird. Er ermöglicht die Erfassung von Winkelpositionen. Lineare Encoder können analog zu einem Maßband definiert werden, während ein Drehwertgeber mit einem Messrad vergleichbar ist.

Rotierend vs. Linear

Es gibt zwei grundlegende Geometrien für Encoder: lineare und rotierende. Rotierende Encoder (Drehwertgeber) und Linearencoder (Längenmessgerät) funktionieren auf ähnliche Weise. Wie die Namen schon andeuten, messen Linearencoder die Bewegung entlang eines Weges, während Drehwertgeber Rotationsbewegungen erkennen. Somit bestimmt die Anwendung, welches Messgerät für die Aufgabe am besten geeignet ist.

Ein Linearencoder besteht in der Regel aus einem Maßstab (einem kodierten Streifen) und einem Messkopf, der die Abstände zwischen den Kodierungen der Skalen liest, um die Position zu bestimmen. Die Auflösung eines Linearencoders wird in Impulsen pro Abstand gemessen, in Impulsen pro inch (ppi), pro Millimeter, usw. Die Skala (der codierte Streifen) hat eine festgelegte Auflösung mit eingebetteten Markierungen oder darauf befindlichen Markierungen, die vom Kopf gelesen werden. Ein Linearencoder mit einer Auflösung von 100 ppi würde 100 Markierungen für jeden Zentimeter Bewegung ablesen.

Im Gegensatz zur Messung der Auflösung von Linearencodern wird die Auflösung von Rotary Encodern (Drehwertgebern) gemessen in Impulsen pro Umdrehung (PPR), auch bekannt als "Strichzahl". Ein Drehwertgeber besteht in der Regel aus einer internen kodierten Scheibe und einem Abtastkopf, der zum Ablesen der Drehposition verwendet wird. Ein linearer Encoder ist einem Maßband sehr ähnlich, während ein rotierender Encoder eher einem Messrad ähnelt. Ein Drehwertgeber mit einer Auflösung von 100 ppr würde bei jeder Umdrehung 100 Markierungen auf seiner codierten Scheibe lesen [64].

Inkrementale vs. absolute Encoder

In Bezug auf das Ausgangssignal können Encoder in zwei große Kategorien unterteilt werden: inkrementale und absolute Encoder. Wie lineare und rotierende Encoder, haben inkrementale und absolute Encoder Ähnlichkeiten, unterscheiden sich aber in der Verdrahtung und Identifizierung von Bewegungen. Ein Inkrementalgeber liest nur Impulse, um Informationen über die Relativbewegung der Welle zu liefern. Er hat keine Informationen über die Position, wenn er eingeschaltet ist. Er kann nur anzeigen, wie weit sich die Welle seit dem Einschalten des Encoders bewegt hat. Er meldet diese Positionsänderungen mit elektrischen "Impulsen" zurück. Diese Impulsströme können entweder einkanalig (ein Ausgangskabel vom Encoder) oder zweikanalig (zwei Kabel) sein. Man kann sich einen inkrementalen Encoder wie ein Maßband vorstellen, auf dem keine Zahlen stehen, sondern nur Striche: Man kann feststellen, wie weit man sich bewegt hat, aber man weiß nicht genau, wo man sich befindet, es sei denn, man misst von einem bekannten Punkt aus [64].

Inkrementale Encoder

Mit inkrementalen Encodern ist es lediglich möglich, Daten über die relative Bewegung eines Objekts zu erfassen. Es gibt also keine Daten über ihre erste Position (beim Einschalten), sondern nur, wie weit das Objekt bewegt wurde. Diese Veränderungen werden dann in Form von elektrischen Impulsen zurückgemeldet. Die Art dieser Impulsströme kann sowohl ein- als auch zweikanalig sein [64].

Absolut-Encoder

Absolut-Encoder hingegen können dem Anwender zusätzlich die Information liefern, wo genau sich das bewegte Objekt befand. Sie haben sich vor allem in der Robotik und Automation etabliert, bei denen ein Referenzierungsprozess (Homing) nicht einfach oder schnell ist. Aufgrund der Eigenschaften von Absolutwertgebern können absolute Encoder mit einem Kompass kombiniert werden [64]. Die Tabelle 9 unten zeigt den Vergleich von inkrementalen und absoluten Encodern.

Tabelle 9 Vergleich von inkrementalen und absoluten Encodern

	Inkremental		Absolut
	Einkanalig	Quadrature	
Komplexität	Einfacher		Komplexer
Output	Geschwindigkeit, Verschiebung	Geschwindigkeit und Richtung	Geschwindigkeit und absolute Position
Ist eine Referenzierung beim Start erforderlich?	Ja		Nein
Auflösung	Bis zu 10k PPR (direct read)		Bis zu 22-bit (ST) / 12-bit (MT)
Kommunikation über Protokoll?	Nein	Nein	Ja
kosten	Im Allgemeinen niedriger		Im Allgemeinen höher

Der Auflösungswert eines konventionellen Absolut-Encoders (Absolutwertgebers) ähnelt dem eines Inkremental Encoders (Inkrementalgebers) (z. B. Impulse pro Umdrehung, ppr, ppi), aber diesmal wird der Ausgang im Binärformat anstelle von Hochgeschwindigkeitsimpulsströmen ausgedrückt.

Die maximale Auflösung des Encoders ist 2^n , wobei n = Anzahl der Ausgangsdrähte des Encoders.

So hat z.B. ein 8-Puls-Absolut-Encoder 3 Ausgänge, ein 32-Puls-Absolut-Encoder 5 Ausgänge, ein 16-Puls-Absolut-Encoder 4 Ausgänge. Der aktuelle Positions-Istwert kann auch bei einem Stromausfall bekannt sein. Dies liegt vor allem daran, dass jede Position in der Umdrehung des Absolut-Encoders (Absolutwertgebers) einem eindeutigen Binärwert entspricht.

Ein Nachteil der Absolutwertgeber ist, dass sie nicht die Anzahl der Umdrehungen zählen können, was durch den Einsatz von Multi-Turn-Absolut-Encodern leicht zu bewerkstelligen ist [64].

Encoder-Anwendungen

Ein Encoder kann in Anwendungen eingesetzt werden, die eine Rückmeldung von Position, Geschwindigkeit, Entfernung usw. erfordern. Unabhängig davon, ob es bei einer Anwendung um Geschwindigkeit, Richtung oder Entfernung geht, die umfangreichen Fähigkeiten eines Encoders ermöglichen es dem Benutzer, die ermittelten

Informationen für eine präzise Steuerung zu nutzen. Die Anwendungsmöglichkeiten der Encoder sind vielfältig, sie sind in vielen Branchen die bevorzugte Technologie: In der Automobilindustrie werden Drehwertgeber als Sensoren für mechanische Bewegungen zur Kontrolle der Geschwindigkeit eingesetzt. In der Unterhaltungsindustrie sind Drehgeber in Bürogeräten wie PC-basierten Scannern, Druckern und Scannern weit verbreitet. Außerdem werden Encoder in der Robotik und in anderen Industriebereichen (Werkzeug-, Prüf-, Montage-, Bohr- Verpackungsmaschinen etc.) eingesetzt. In der medizinischen Industrie werden Encoder bei Scannern, bei mikroskopischen oder nanoskopischen Bewegungssteuerungen von automatisierten Geräten und Dosierpumpen eingesetzt. Encoder werden auch bei wissenschaftlichen Geräten eingesetzt, und auch das Militär verwendet Encoder (z.B. bei Ortungsantennen) [63].

Auswahl eines Encoders

Zunächst muss der Typ des Encoders bestimmt werden, der die Anforderungen des Anwenders am besten entspricht. Es gibt viele verschiedene Überlegungen, wenn es darum geht, welchen Encodertyp man für eine bestimmte Anwendung verwenden soll. Welche Art von Bewegung wird gemessen? Rotierend oder linear? In welcher Art von Umgebung soll der Drehgeber eingesetzt werden? Optische Drehwertgeber eignen sich besser für saubere Umgebungen, in denen sie nicht mit Staub, Öl, Schmutz usw. in Berührung kommen. Misst man eine Drehbewegung in einer Umgebung, wo Staub, Öl und Schmutz berücksichtigt werden müssen, dann ist man mit einem robusteren, staub- schmutz- und flüssigkeitbeständigem magnetischen oder kapazitiven Encoder eher besser bedient. Da magnetische Drehwertgeber in der Regel kompakt konstruiert sind, eignen sie sich besser für Anwendungen, wo nur wenig Raum zu Verfügung ist [63].

Um herauszufinden, welcher magnetische Drehgeber für die Anwendung am besten geeignet ist, sollten folgende Punkte beachtet werden:

Bei der Auswahl von magnetischen Drehwertgebern ist zu berücksichtigen, ob der Ausgang inkremental oder absolut ist, ebenso ist die Auflösung zu beachten:

Inkrementaler oder absoluter Ausgang

Inkrementelle Ausgangsformen haben die Form von Rechteckausgängen. Bei einer Anwendung, die einen inkrementalen magnetischen Drehgeber erfordert, ist das

Ausgangssignal entweder Null oder die Versorgungsspannung. Das Ausgangssignal eines Inkrementalgebers ist immer eine Rechteckwelle, da der hohe (Eingangsspannungswert) und der niedrige (Null) Signalwert umgeschaltet werden.

Absolute magnetische Drehgeber arbeiten ähnlich wie inkrementale Drehgeber, jedoch mit anderen Ausgabemethoden. Die Auflösung eines absoluten Drehgebers wird in Bits ausgedrückt, und der Ausgang ist relativ zu seiner gegebenen Position. Anstelle eines kontinuierlichen Flusses von Impulsen wie bei Inkrementalgebern hat der Absolutwertgeber für jede Position ein eigenes Signal. Ein absoluter Encoder hat 10 Bits und nicht 1.024 PPR wie ein inkrementeller Encoder.

Auflösung (CPR)

Die Auflösungen von inkrementalen magnetischen Drehgeber schwankt zwischen 20 und 10.000 CPR, und die der absoluten magnetischen Drehgeber 8 bis 17 Bit/Multiturn [64].

Auswahl eines linear magnetischen Encoders

Magnetische Längenmessgeräte werden häufig in Anwendungen mit linearen Komponenten, wie z. B. Führungsschienen und Blöcken, eingesetzt. Sie eignen sich jedoch auch für rotierende Anwendungen, wenn der Maßstab in einer Ringform montiert ist. Während sich der magnetische Sensor entlang des magnetischen Maßstabs oder Rings bewegt, erfasst er die Verschiebung und gibt ein TTL-Signal aus. Die Frequenz des Ausgangssignals ist proportional zur Messgeschwindigkeit und zur Verschiebung des Sensors [64].

Zusammenfassend die **Vorteile und Nachteile** von Encodern:

Zu den **Vorteilen** gehören: Encoder sind äußerst zuverlässig und genau, haben eine hohe Auflösung, können in bestehende Anwendungen integriert werden, sind verschmelzbar mit Industrie 4.0 und darüber hinaus sehr kompakt.

Die Nachteile sind, dass magnetische Encoder für Funkstörungen anfällig sind und optische Encoder durch direkten Lichteinfall gestört werden können und für Staubverunreinigungen anfällig sind.

6 Umkehrspiel

Das Umkehrspiel kann wie folgt definiert werden, es „ist ein Fehler bei der Positionierung, der durch die Umkehrung der Fahrtrichtung verursacht wird. Es wird durch ein Spiel zwischen den Elementen des mechanischen Systems verursacht“ [56]. Da es dann auftritt, wenn man sich einem bestimmten Punkt aus entgegengesetzten Richtungen nähert, wirkt es sich nicht auf unidirektionale Eigenschaften aus. Das Umkehrspiel hat jedoch einen entscheidenden Einfluss auf die bidirektionale Wiederholgenauigkeit. Die Kompensation des Umkehrspiel kann durch Positionsregler erfolgen [56]. Abbildung 6.24 unten stellt das Umkehrspiel im Getriebe dar.

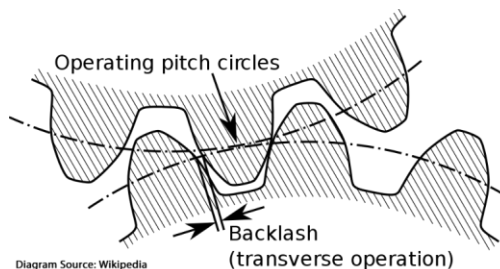


Abbildung 6.24 Umkehrspiel im Getriebe [56]

In mechanischen und elektromechanischen Systemen ist es oft nicht möglich, an einer bestimmten Position genau dieselben Positionswerte zu erhalten, wenn die Position erst aus einer Richtung und dann aus der entgegengesetzten Richtung angefahren wird. Die Differenz zwischen den Positionswerten wird als **Umkehrfehler** bezeichnet.

Der Umkehrfehler setzt sich aus dem so genannten Umkehrspiel und dem Hysteresefehler zusammen. Die Einflüsse dieser beiden Größen voneinander zu isolieren, ist jedoch oft recht mühsam, besonders in komplexen Bewegungssystemen, in denen verschiedene Teile und Komponenten miteinander interagieren.

Ein **Hysteresefehler** ist hingegen der andere beitragende Anteil des Umkehrfehlers. „Der Hysteresefehler ist eine Abweichung zwischen der tatsächlichen und der befohlenen Position verursacht durch Elastizität, die sich im Bewegungssystem angesammelt hat. Er beeinträchtigt die Genauigkeit und die bidirektionale Wiederholgenauigkeit“ [56]. Der Grund für Hysteresefehler ist die Nichtlinearität der

Ausgangsbewegung zur Eingangsbewegung im Falle einer Umkehrung der Bewegungsrichtung. Anders als das Umkehrspiel tritt die Hysterese in allen mechanischen Systemen.

Das Getriebeispiel, das manchmal auch als Leerlauf oder Totgang bezeichnet wird, wird durch den Abstand zwischen den Zähnen zweier ineinandergreifender Zahnräder verursacht. Obwohl das Umkehrspiel auf Grund der verursachenden geringen Positionsgenauigkeit und oft größeren Verschleiß in den Bauteilen in der Regel unerwünscht ist, kann es manchmal auch von Vorteil sein, ein gewisses Spiel zu haben. Es dient vor allem dazu, Verspannungen zu vermeiden, Temperaturschwankungen zu berücksichtigen, bietet ausreichend Platz für das Schmierfett und sorgt für einen reibungslosen Zahnradeingriff. Das Getriebeispiel verhindert eine Überhitzung und Zahnschäden und gewährleistet damit einen reibungslosen Betrieb des Zahnradsatzes oder der Zahnräder. Zahnräder können besser montiert und gewartet werden, und auch die Lebensdauer wird verlängert. Darüber hinaus gleicht das Spiel, den Spalt zwischen den Zahnflanken sowie maschinelle Bearbeitungsfehler seitens des Getriebes aus und verhindert, dass sich das Getriebe unter Last verformt [56]. Bei der Konstruktion von Zahnrädern wird ein optimaler Wert für das Spiel festgelegt, und die Erfahrung aus der Massenproduktion zeigt, welche Abweichungen die Zahnradsätze bei jeder Anwendung aufweisen dürfen, um die Qualitätsziele zu erreichen.

Aufgrund der Hin- und Herbewegung eines Getriebes oder Reduktionsgetriebes wird der Spieleffekt umso größer, je länger die Laufstrecke ist. Ein solcher mechanischer Totgang führt zu einem erheblichen Leerlauf zwischen der Antriebs- und der Abtriebsschwelle des Reduktionsgetriebes, was eine präzise Positionierung in einigen Anwendungen erschwert, z. B. in Geräten wie Instrumenten, Werkzeugmaschinen und Robotern. Die Abbildung 6.25 unten zeigt die Funktionsweise des Umkehrspiels.

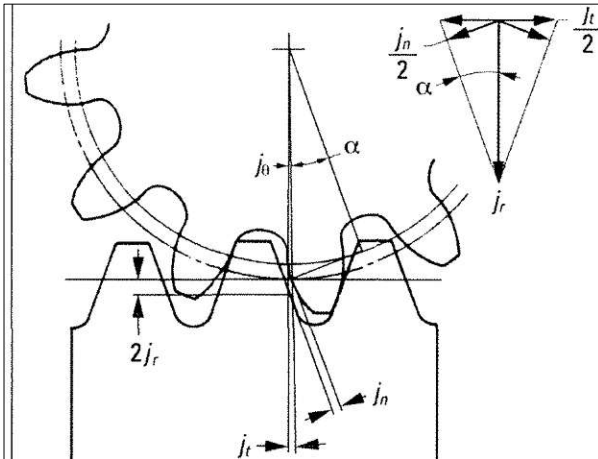


Abb. 6.25 Funktionsweise des Umkehrspiels [56]

Für Anwendungen, die eine besondere Genauigkeit erfordern, ist es notwendig, die Präzision bei der Konstruktion, maschinellen Bearbeitung und Montage von Zahnrädern zu verbessern oder spezielle Arten von nicht-konventionellen Reduktionsgetrieben für den Zahnradantrieb zu verwenden.

Solche Reduktionsgetriebe können ein sehr geringes oder gar kein Getriebespiel aufweisen und eignen sich für Anwendungen, bei denen Leistung wichtiger ist als Kosten [56].

Das Getriebespiel wird üblicherweise in Winkelminuten (arcmin) oder Winkelsekunden (arcsec) gemessen. 1 Winkelminute = 1/60 eines Winkelgrades = 0,0167 Grad. Das Umkehrspiel ist deswegen problematisch, weil es die Positionsgenauigkeit bei manchen Anwendungen wie Robotern, Messinstrumenten, Exoskeletten usw. negativ beeinflusst.

6.1 Positionsgenauigkeit

„Die Genauigkeit ist die Differenz zwischen der tatsächlichen und der erwarteten Position eines mechanischen Systems. Sie wird üblicherweise in Mikrometern oder Bogensekunden pro Wegstrecke bei einer Abweichung von $\pm 3\sigma$ angegeben. Zum Beispiel bedeutet eine Genauigkeit von $\pm 3\mu\text{m}$ ($\pm 20\text{arcsec}$), bei $\pm 3\sigma$ pro 300mm (300Grad) Wegstrecke, dass, wenn die Achse sich auf eine Position bewegt, die 300mm (300Grad) entfernt von der aktuellen Position ist, dass die endgültige Position in 99,7% der Fälle zwischen 299.997mm (300.0056Grad) und 300.003mm

(299.9944 Grad) sein wird. Die Genauigkeit wird durch das Messsystem (Encoder, Laserinterferometer...), dem Antriebsmechanismus und der Art der Lagerung beeinflusst“ [56].

Das Umkehrspiel beeinträchtigt nicht nur die Positionsgenauigkeit, sondern auch die Wiederholgenauigkeit der Bewegung.

6.2 Wiederholgenauigkeit der Bewegung

„Die Wiederholgenauigkeit [der Bewegung] ist die Fähigkeit eines Bewegungssystems, über viele Versuche unter identischen Bedingungen eine Sollposition zuverlässig zu erreichen. Die unidirektionale Wiederholgenauigkeit ist die Fähigkeit, eine Bewegung in nur einer Richtung zu wiederholen (und ignoriert die Wirkung von Umkehrspiel oder Hysterese im System). Die bidirektionale Wiederholgenauigkeit ist die Fähigkeit, eine Bewegung in beide Richtungen zu wiederholen. Standardmäßig wird die Messung der Wiederholgenauigkeit am unbelasteten System vorgenommen“ [56].

6.3 Spiel mindernde Konstruktionen und Methoden zur Minimierung des Umkehrspiels

Obwohl das Spiel eine Flexibilität in Bezug auf z. B. Schmierung, thermische und mechanische Ausdehnungen sowie Verklebungen schafft, behindert es die Wiederholgenauigkeit von Bewegungssystemen. Bei bestimmten Anwendungen z.B. von Robotern und Werkzeugmaschinen ist das Spiel eine unerwünschte Eigenschaft und sollte minimiert werden. Für diese Anwendungen gibt es drei grundlegende Möglichkeiten, das Umkehrspiel zu verringern oder auf Nullwert zu reduzieren, nämlich Präzisionsgetriebe, modifizierte Getriebe und spezielle Konstruktionen, bei denen andere Komponenten als Zahnräder verwendet werden [57]. Die Tabelle 10 unten liefert eine Übersicht über die Umkehrspielkontrollmechanismen.

Tabelle 10 Überblick über die Umkehrspielkontrollmechanismen

Typische Methode der Umkehrspielkontrolle	Relative Kosten	Häufigste Verwendung	Typisches Umkehrspiel
Dicht montierte Zahnräder (einstellbare Mitte und federbelastet)	mittel	Am weitesten verbreitete Methode	etwa 1/4 Grad
Federbelastete geteilte Zahnräder	niedrig	Leichte Lasten wie Instrumente	Nahe am Nullpunkt
Kunststofffüller	niedrig	Niedrige Geschwindigkeiten und leichte Lasten.	Keine Daten
Kegelförmige Zahnräder	hoch	Niedrige Drehzahlen	Keine Daten
Vorgespannter Zahnräder	mittel	Begrenzte Rotation Anwendungen: Instrumente	Nahe bei Null

6.4 Präzisionszahnräder

Als Faktoren, die das Umkehrspiel erhöhen, können Lagerspiel, Montagetoleranzen und Fertigungsfehler genannt werden. Diese Fehler können in Präzisionsgetrieben durch den Einbau von eng tolerierten Teilen minimiert werden. Präzisionsgetriebe werden nicht als Massenproduktion, sondern in kleinen Losen hergestellt. Dies ermöglicht es den Herstellern, spezielle Bearbeitungsmethoden zu verwenden und damit die Abweichungen zu minimieren. Die Spielwerte sind typischerweise auf zwei Grad begrenzt und werden in Anwendungsbereichen wie der Messtechnik eingesetzt. Einheiten mit höherer Präzision, die ein Spiel von Null oder nahezu Null erreichen, werden z. B. in der Robotik und in der Präzisionsmesstechnik eingesetzt [81].

Modifizierte Konstruktion

Das Umkehrspiel kann durch verschiedene Modifikationen der Getriebekonstruktion verringert oder beseitigt werden. In einigen Fällen werden die Zahnräder bei der Erstmontage auf ein bestimmtes Zahnspiel eingestellt. Da das Zahnspiel aufgrund von Verschleiß zunimmt, muss es nachjustiert werden.

Bei anderen Konstruktionen hingegen werden ineinander greifende Zahnräder mit Hilfe von Federn über ihre Lebensdauer auf einem gleichmäßigen Spielniveau gehalten. Sie sind jedoch in der Regel auf Anwendungen mit geringer Belastung beschränkt. Für Getriebe mit vielen Stufen und kumulativem Spiel ist die Federmethode gut geeignet. Die federbelasteten Versionen eignen sich am besten für Antriebe mit geringem Drehmoment und unidirektionalen Antrieben.

Kurze Achsabstände, federbelastete geteilte Zahnräder, Kunststofffüllstoffe, konische Zahnräder und vorgespannte Zahnräder können als die am häufigsten angewandten Methoden zur Spielreduzierung genannt werden [57].

Abbildung 6.26 zeigt Zahnräder mit verstellbarer Mitte, die in einem festen Abstand arretiert werden, um ein geringes Spiel zu erreichen. Eine federbelastete Version hält sie spielfrei zusammen [57].

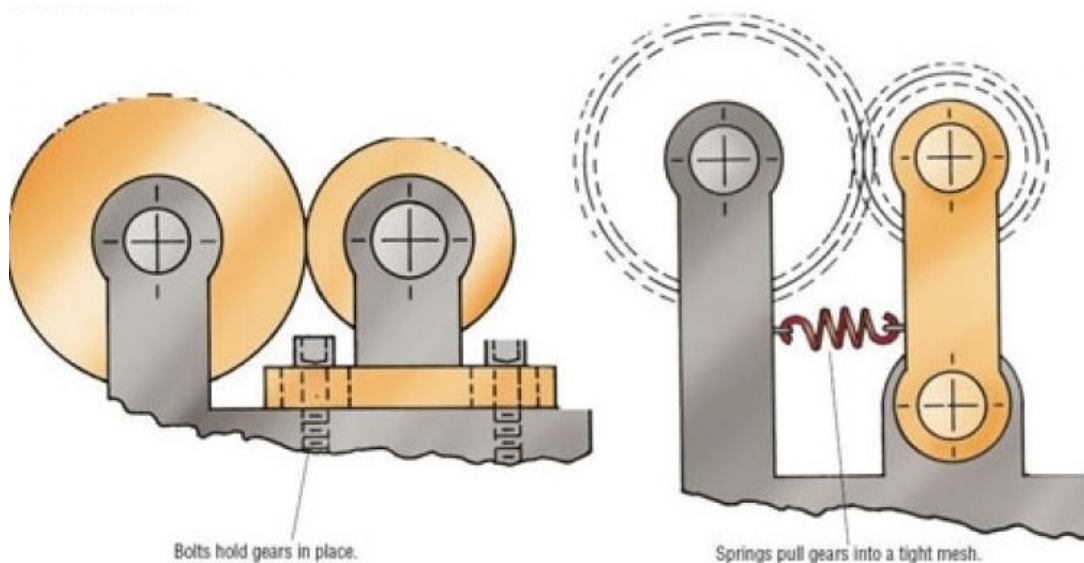


Abbildung 6.26 Methode zur Minimierung des Getriebespiels [57]

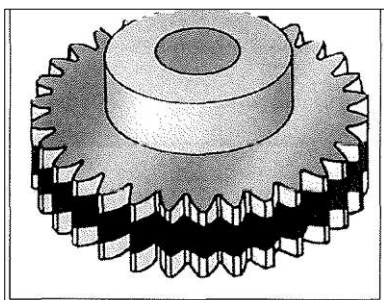
Bei den oben genannten Methoden ist die Verkürzung des Abstands zwischen den Zahnrädern die einfachste und am häufigsten angewandte Methode. Es gibt zwei Möglichkeiten: entweder werden die Zahnräder auf einen festen Abstand eingestellt und mit Schrauben fixiert, oder eines wird gegen das andere gefedert, um einen engeren Eingriff zu erreichen. Auf diese Weise werden die Zahnräder enger miteinander verzahnt, wobei der Abstand zwischen den Zähnen sehr gering oder gleich Null ist [57].

Feste Baugruppen werden in der Regel in Schwerlastanwendungen eingesetzt, bei denen Untersetzungsgetriebe ihre Drehrichtung umkehren müssen (bidirektional). Obwohl sie "fixiert" sind, müssen sie möglicherweise während des Betriebs nachjustiert werden, um den Zahnverschleiß auszugleichen. Kegelar-, Stirnar-, Schräg- und Schneckengetriebe sind für feste Anwendungen geeignet. Hingegen

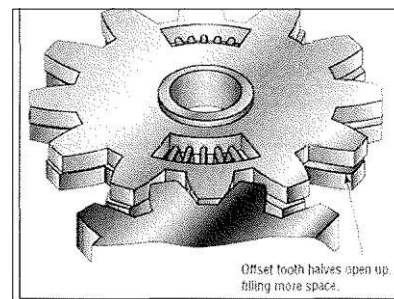
haben federbelastete Baugruppen ein konstantes Spiel von Null und eignen sich im Allgemeinen für Anwendungen mit niedrigem Drehmoment.

Bei einer anderen Konstruktion werden zwei Zahnradhälften nebeneinander montiert. Eine Hälfte bleibt auf einer Welle befestigt, während die andere Hälfte durch Federn leicht gedreht wird. Da die effektive Zahndicke größer wird, wird die Zahnlücke des Gegenzahnrad vollständig ausgefüllt, wodurch der Spielfehler beseitigt wird. Diese Konstruktion wird als geteilte Verzahnung bezeichnet und im Allgemeinen bei Anwendungen mit niedrigen Drehzahlen und geringer Belastung eingesetzt [57].

Eine andere Konstruktion verwendet ein Stück elastisches Material, das durch die Mitte der Verzahnung läuft (Abbildung 6.27). Das Spiel kann durch die Ausdehnung des Kunststofffüllers über das Zahnprofil hinaus aufgefangen werden, obwohl es auch durch Materialverschleiß und Verformung zunehmen kann. Die Zahndicke wird durch die Drehung der beiden Hälften des Zahnprofils in umgekehrter Richtung vergrößert (Abbildung 6.28). Es gibt Ausführungen, die federbelastet sind und solche, die durch Schrauben zusammengehalten werden [57].



*Abbildung 6.27
Verbundzahnrad mit einem Kunststoff-Mittel-element [57]*



*Abbildung 6.28
Konstruktion einer geteilten Verzahnung [57]*

Es gibt auch einen Ansatz mit kegelförmigen Stirnrädern und Schrägstirnrädern. Die Zähne dieser Zahnräder sind in einem bestimmten leichten Winkel geschnitten, um eine sich verjüngende Zahnform zu erzeugen. Die Zahnlücke wird durch die Bewegung der Zahnräder gegeneinander in axialer Richtung erzeugt [57].

Eine Methode, die als Vorspannung des Zahnradsatzes bezeichnet wird, bietet eine vorteilhafte Möglichkeit zur Verringerung des Zahnflankenspiels. Bei dieser Konstruktion wird eine Seite der Eingriffszähne durch ein Gewicht oder eine Torsionsfeder

belastet, die sich auf dem letzten angetriebenen Rad befindet. Eine weitere nützliche Konstruktion ist das Zweiwege-Getriebe. Hier sind die gleichen Zahnräder parallel angeordnet [57].

Sonderausführungen

Wenn die Anforderungen an ein geringes Spiel oder spielfreies Übertragen sehr hoch sind, müssen spezielle Getriebetypen und -konstruktionen verwendet werden, bei denen andere Komponenten zum Einsatz kommen als herkömmliche Zahnräder. Die Abbildung 6.29 unten zeigt, wie ein Gewicht oder eine Feder am Ende eines Zahnradgetriebes die Zähne in Kontakt hält [57].

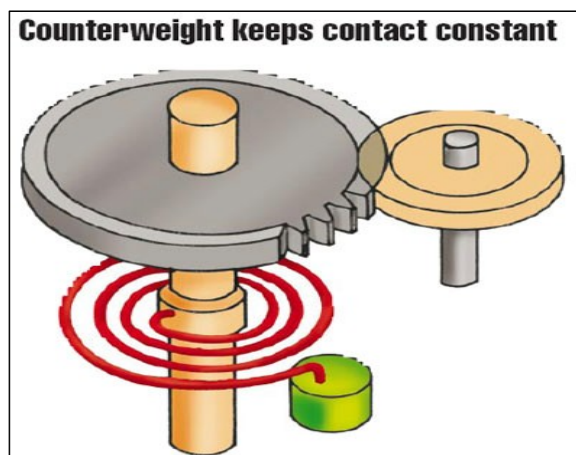


Abbildung 6.29 Ein Gewicht oder eine Feder am Ende eines Zahnradgetriebes hält die Zähne in Kontakt [57]

In diesem Zusammenhang sind epizyklische Antriebe, Traktionsantriebe, harmonische Antriebe und Zykloidgetriebe die wichtigsten Beispiele. Diese Instrumente bieten eine hohe Leistung und sind daher relativ teuer [57].

Bei harmonischen Antrieben erfolgt die Bewegungsübertragung durch die elastische Auslenkung einer flexiblen Keilverzahnung. Das Umkehrspiel kann bei diesen Antrieben auf 1 Bogenminute oder weniger reduziert werden. In der Praxis liegen die typischen Werte jedoch bei 10 bis 15 Bogenminuten. Sie werden hauptsächlich in der Automation und Robotik eingesetzt [57]. Die Abbildung 6.30 unten zeigt, wie sich durch das Zusammenschieben von kegelförmigen Zahnrädern in axialer Richtung das Zahnspiel verringert.

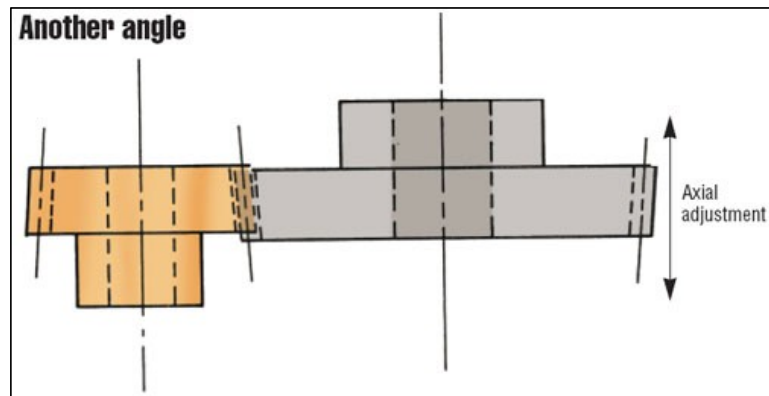


Abb. 6.30 Das Zusammenschieben von kegelförmigen Zahnrädern in axialer Richtung verringert das Zahnspiel [57].

Zykloidgetriebe haben keine Zahnräder, sondern nutzen vorgespannte Kugeln, Stifte oder Rollen für die Drehmomentübertragung. Sie sind spielfrei und arbeiten relativ geräuscharm. Damit sie ihren spielfreien Modus beibehalten, ist es erforderlich, ihre Vorspannung nachzuspannen. Sie sind robust gegen hohe Vibrations- und Stoßbelastungen und haben Wirkungsgrade von bis zu 95% [57].

Bei Planetengetrieben wird eine epizyklische Bewegung durch eine außermittig angeordnete Scheibe auf einer Eingangswelle erzeugt, die wiederum Planetenräder in einem nicht bewegten Hohlzahnradrad dreht [57].

Ein- und Abtriebsrollen, die druckbelastet sind, werden in Traktionsantriebe zur Übertragung des Drehmomentes eingesetzt. Diese Art der Konstruktion findet bei größeren Maschinen wie Aufzügen, Lokomotiven und Hubschraubergetrieben Anwendung [57].

Bei Zykloidgetrieben wird die Drehbewegung nur über Stirnräder auf exzentrische Wellen (Kurbelwellen) übertragen, die mit zwei Nocken verbunden sind. Diese Nocken, die zur symmetrischen Lastverteilung um 180° zueinander versetzt angeordnet sind, rollen am außen liegenden Bolzenring ab, der genau eine Teilung mehr hat als die Nocken. Bei einer vollen Umdrehung der Nocken bewegen sich die Nocken exzentrisch um genau eine Teilung weiter.

Harmonischer Antrieb

Der harmonische Antrieb, auch Wellgetriebe oder Oberschwingungsantrieb genannt (engl. Harmonic Drive, Harmonic Gear, Strain Wave Gearing) wurde in den 1950er Jahren entwickelt. Es ist ein mechanisches Getriebe, um die Drehzahl und die Kraftübertragung zu ändern. Harmonic Drive Einbausätze sind aus drei Präzisionsbauteilen zusammengesetzt: Wave Generator, Flex Spline und Circular Spline wie die Abbildung 6.31 unten zeigt.

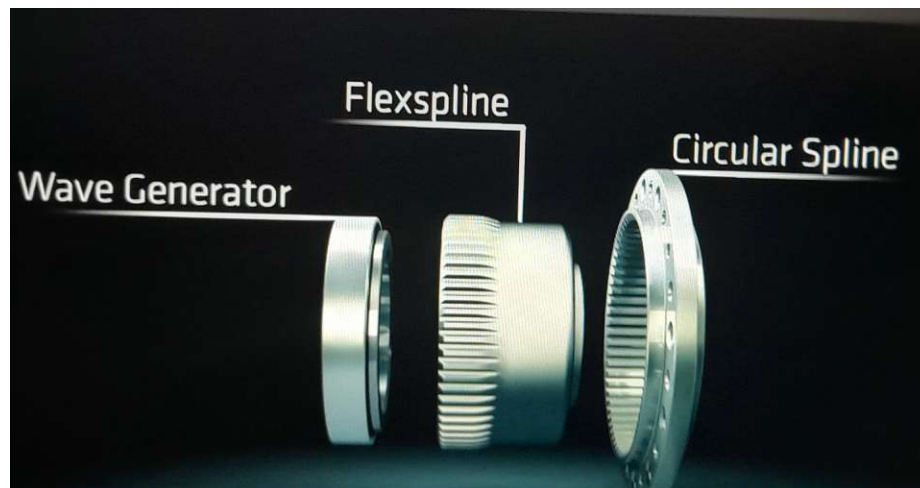


Abbildung 6.31 Einbausätze des Harmonic Drivs [58]

Der Wave Generator des Harmonischen Antriebs ist der Antriebsteil des Getriebes. Der Corpus besteht aus einer elliptisch geformten Stahlscheibe und trägt ein speziell entwickeltes Kugellager. Der Wave Generator wird in einer hochfesten und torsionssteifen, aber dennoch flexiblen Stahlbüchse mit Außenverzahnung, den Flexspline, eingesetzt. An diesem Flexspline ist der Abtriebswelle befestigt. Flexspline kann zuverlässig hohe Lasten übertragen. Das nicht bewegliche Element des Getriebes ist der Circular Spline, ein starrer Stahlring mit Innenverzahnung.

Vorteile des harmonische Getriebes

- kompakt, geringeres Gewicht, kleine Größe, große Tragfähigkeit,
- großes Übersetzungsverhältnis
- hohe Übertragungsgenauigkeit
- hohe Drehmomentübertragung
- spielfrei und höchst effizient

Anwendungen des harmonischen Antriebes

Der harmonische Antrieb ist spielfrei, funktioniert höchst präzise und wird weltweit in allen Bereichen der Antriebstechnik verwendet.

„Derzeit werden etwa 90% der Oberwellen-Antriebe in der Roboterindustrie und Präzisionspositionierungssystemen eingesetzt, und Oberwellen-Antriebe sind zu einem wichtigen Grundbestandteil der modernen Industrie geworden“ [58].

7 Experimentelle Studie

Dieses Kapitel beschreibt die experimentelle Arbeit zur Bestimmung des Umkehrspiels in einem harmonischen Getriebe, durchgeführt im Hochpräzisionsmessraum-Nanometrologie-Labor des AuM der TU Wien. Es wird die Struktur und der Aufbau der durchgeführten Messungen beschrieben. Die angewandte Methodik, die vorhandenen Parameter und verschiedene Schlüsselpunkte werden ebenfalls vorgestellt und erläutert. Auf sehr einfache Art und Weise wird ein Wert einer ein Getriebe spiel repräsentierenden Größe eines harmonischen Getriebes ermittelt und so Kenntnis über den aktuellen Zustand und die Funktionsgenauigkeit des Getriebes gewonnen.

7.1 Hintergrund der Messung

Als Umkehrspiel bezeichnet man den Abstand zwischen den Zähnen zweier ineinandergreifender Zahnräder. Bei der Konstruktion von Zahnrädern wird ein optimaler Wert für das Spiel festgelegt. Die Aufgabe der Messtechnik ist die Kontrolle und Prüfung dieses optimalen Wertes während und nach der Fertigung.

Das Zahnflankenspiel ist ein wichtiger Parameter beim Läppen und bei Prüfverfahren für Zahnräder. Eine grundlegende Anforderung an den Läppprozess ist die Kontrolle des Spiels nahe dem Auslegungswert, um eine reibungslose Montage und geringere Geräuschentwicklung des Zahnradsatzes zu ermöglichen. Historisch gesehen gab es viele Versuche, Messwandler und andere ähnliche mechanische Vorrichtungen einzusetzen, um das Spiel in den Getrieben zu erfassen. Dank moderner Sensorik können heute die tatsächlichen Spielwerte in den Getrieben während der Fertigung und des Betriebes genau erfasst und ständig überwacht werden.

7.2 Methodik

Das Hauptaugenmerk des praktischen Teils dieser Arbeit liegt auf der Bestimmung der Funktionstauglichkeit und Genauigkeit des harmonischen Getriebes, ob es funktions-, fertigungs- und qualitätsgerecht produziert ist. Die Funktions-, Fertigungs- und Qualitätsgerechtigkeit soll durch die Untersuchung des Umkehrspiels mit einem magnetischen Encoder und der Prüfung der Messwerte des Encoders mit dem Laser Interferometer ermittelt werden.

Zunächst wird der Messaufbau entworfen, die erforderlichen Schritte aufgezeichnet und die fehlenden Komponenten festgelegt. Danach erfolgt die Beschaffung dieser

Ausrüstungen. Danach wird der Messaufbau auf einem Drehbankbett aufgebaut, seine Stabilität und Rundlaufwerte überprüft und eingestellt. Sobald der Aufbau stabil und bereit für die Messungen ist, wird das Harmonic Drive mit Hilfe eines hochauflösenden Messgeräts, d.h. eines berührungslosen magnetischen Längenmessgeräts mit Hall-Sensor gemessen und gleichzeitig mit einem leistungsfähigeren und präziseren Messgerät, d.h. einem Laserwinkelinferometer, verglichen und überprüft. Die Ergebnisse der beiden Messungen werden anschließend statistisch ausgewertet und in entsprechenden Tabellen dargestellt. Es werden Mittelwerte, Standardabweichungen und alle Kenngrößen der Positioniergenauigkeit, insbesondere des Umkehrspiels, ermittelt (in Übereinstimmung mit ISO (20-2:2014)). So werden die ermittelten Werte von jedem System (Linearer Magnetencoder und Laserinterferometer) zunächst untereinander und dann miteinander verglichen. Schließlich werden die Ergebnisse und ihre Bedeutung bewertet und interpretiert.

7.2.1 Messraum und Umgebungsbedingungen - Hochpräzisionsmessraum Nanometrologie

Mit der rasanten Entwicklung der Fertigungstechnologien ist die Hochpräzisionsmesstechnik zu einem wesentlichen Bestandteil moderner industrieller Anwendungen geworden. Darüber hinaus ist sie auch im Bereich der wissenschaftlichen Forschung von großer Bedeutung, da die Anforderungen an messtechnische Anwendungen rasch steigen.

Was die Genauigkeit betrifft, so können die Anforderungen nur von Messsystemen erfüllt werden, die Messergebnisse mit Messunsicherheit im Submikrometer- und Nanometerbereich liefern. Die gleichen Anforderungen gelten auch für die zugehörigen Messräume. Ohne einen Messraum, in dem die geeigneten Umgebungsbedingungen geregelt und sichergestellt sind, können reproduzierbare und konsistente Messergebnisse im Nano- und Picobereich selbst bei Verwendung genauester Messsysteme nicht erreicht werden. Nur ein gut gestalteter Messraum oder ein Labor kann international anerkannte, vergleichbare und rückführbare Messergebnisse mit möglichst geringen Messunsicherheiten gewährleisten.

Die wichtigsten Umgebungseinflüsse auf die Messunsicherheit sind: Temperatur (Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung), Vibration, Luftfeuchtigkeit und Verschmutzung.

Die strukturelle Organisation eines Präzisionsmessraumes stellt sicher, dass die störenden Einflüsse reduziert und konstant gehalten werden. Das Hochpräzisionsmessraum-Labor für Nanometrologie der TU Wien demonstriert die Anforderungen an einen solchen Raum und die Besonderheiten der technischen Umsetzung. Die Tabelle 11 unten zeigt die Messbedingungen des Laborraumes an der TU Wien, wo die Messungen stattgefunden haben.

Tabelle 11 Nanometrologie-Daten vom Raum Labor TU Wien

Länge, L [m] × Breite, B [m] × Höhe, H [m]	12 × 5,8 × 2,8
Bodenfläche [m ²]	70
Raumvolumen [m ³]	195
Luftumwälzungsrate [h ⁻¹]	28 Änderungen
Prozentualer Anteil der Frischluft	18
Bezugstemperatur [°C]	20 ± 0, 1
Relative Luftfeuchtigkeit [%]	45 ± 5
Luftfiltration	99,97 % aller Partikel größer als 0,3 µm
Schwingungsisolierung - Maximale Bodenamplituden bei Frequenzen von mehr als 5 Hz	0.05µm

7.2.2 Verwendete Komponenten und Ausrüstungen

Die Hauptmessgeräte und einige sekundäre Komponenten können wie folgt aufgelistet werden,

- Ein auf Hall-Effekt-Sensor basierender linearer magnetischer Encoder (AS5311 der Firma AMS)
- Mehrpoliges Magnetband
- Zwei Laserinterferometersysteme (der Firma Hewlett Packard)
- Harmonic Drive
- eine geeignete abgesetzte Welle
- Ein Stahlbankblock
- Drehbank (der Firma Car! Zeiss Jena)

Ein allgemeiner Überblick über das harmonische Getriebe wurde bereits im Kapitel 6 gegeben.

Allgemeiner Überblick über den AS5311

Der Encoder, mit dem der Versuchsaufbau ausgestattet ist, ist ein inkrementaler Linearwegsensor der Firma AMS¹⁰ mit der Modellnummer AS5311.

Beschreibung: Bei seiner Markteinführung zeichnete sich der AS5311 durch eine beeindruckende Eigenschaft aus: er war der erste lineare Magnetencoder mit Hall-Effekt-Sensor, der eine Auflösung im Submikrometerbereich erreichte. Der AS5311 kann als inkrementaler Positionssensor für lineare und rotatorische Bewegungen beschrieben werden, der auf berührungsloser magnetischer Sensortechnologie basiert. Es handelt sich um einen berührungslosen, hochauflösenden linear magnetischen Encoder, der auch zur Messung von Drehwinkeln eingesetzt werden kann. Zur Durchführung von Positions- und Bewegungsmessungen wird ein mehrpoliger Magnetstreifen oder -ring mit einer Polpaarbreite von 2 mm benötigt. Der Abstand zwischen dem Hall-Sensor und dem Magnetstreifen beträgt typischerweise 0,3 mm bis 0,6 mm [65].

Das Ausgangssignal des Magnetsensors kann entweder als serieller Bitstrom, als PWM-Signal (Pulsweitenmodulation) oder als ABI-Encodersignal (Application Binary Interface) erfasst werden. Die Auflösung bei der Auswertung des ABI-Signals beträgt 2^{10} pro 2 mm Polpaar, was $1,95 \mu\text{m}$ pro Schritt und $6,76''$ als Winkel entspricht. Auf der genormten Quadratur-Ausgangsschnittstelle mit einem Indeximpuls (=ABI) liegen 4096 Impulse (12 Bit) pro 2,0 mm Polpaarlänge mit einer maximalen Geschwindigkeit von 650mms^{-1} [65].

Der berührungslose, hochauflösende, magnetische Encoder wird zur genauen Erfassung und Messung von sowohl translatorischen als auch Rotationsbewegungen mit einer Auflösung von $< 0,5 \mu\text{m}$ eingesetzt [65].

Es handelt sich um ein Chip-System, das integrierte Hall-Elemente, ein analoges Front-End und eine digitale Signalverarbeitung auf einem einzigen Chip vereint, verpackt in einem kleinen 20-Pin-Gehäuse im TSSOP-Format.

Die Abbildung 7.32 unten links zeigt den Magnetencoder Typ AS5311 mit mehrpoligem Magnetstreifen für Linear-Bewegungserfassung. Die Abbildung 7.33 rechts

¹⁰ AMS AG steht für die Austriamicrosystems AG, die von Osram übernommen wurde.

unten zeigt A11 S53 mit mehrpoligen Ringmagneten zur Erfassung der Drehbewegung.

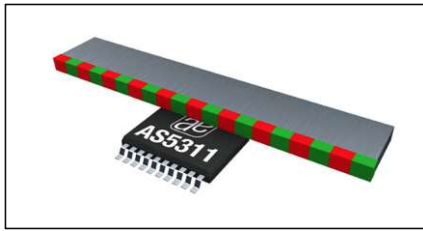


Abbildung 7.32 AS5311 mit mehrpoligem Magnetstreifen für Linear-Bewegungserfassung [68]



Abbildung 7.33 AS5311 mit mehrpoligen Ringmagneten zur Erfassung der Drehbewegung [68]

Die Abbildung 7.34 unten zeigt das Blockschaltbild des linearen Magnetencoders mit Hall-Sensor.

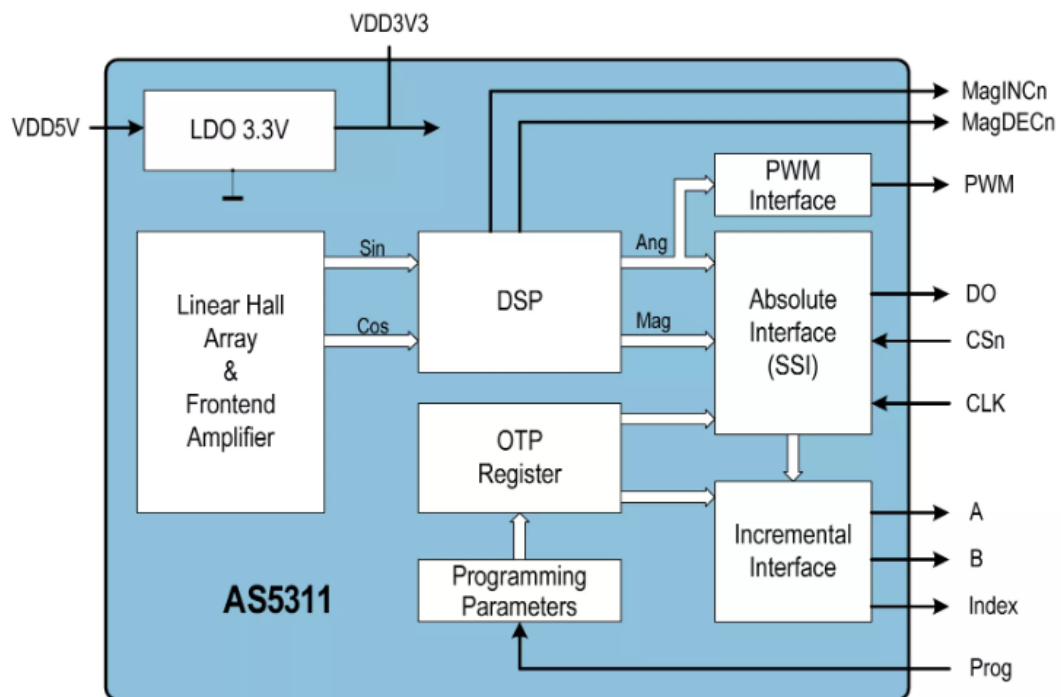


Abbildung 7.34 AS5311 Blockschaltbild [65]

Die absolute Messung liefert eine sofortige Anzeige der Magnetposition innerhalb eines Polpaares mit einer Auflösung von 488 nm pro Schritt (12 Bit über 2,0 mm). Diese digitalen Daten sind als serieller Bitstrom und als PWM-Signal verfügbar.

Darüber hinaus steht ein Inkrementalausgang mit einer Auflösung von $1,95 \mu\text{m}$ pro Schritt zur Verfügung. Für jedes Polpaar wird einmal ein Indeximpuls erzeugt (einmal pro $2,0 \text{ mm}$). Die Verfahrensgeschwindigkeit im Inkrementalmodus beträgt bis zu 650 mm s^{-1} . Durch einen internen Spannungsregler kann der AS5311 entweder mit $3,3\text{V}$ oder 5V betrieben werden. Je nach Anwendung kann der AS5311 sowohl mit mehrpoligen Bandmagneten als auch mit mehrpoligen Ringmagneten, sowohl radial als auch axial magnetisiert, betrieben werden. Der AS5311 ist in einem bleifreien (PB-freien) TSSOP-20Gehäuse erhältlich und für einen Umgebungstemperaturbereich von $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $125 \text{ }^\circ\text{C}$ geeignet [65].

Der AS5311 bildet zusammen mit dem Magnetstreifen die zwei einzigen Komponenten, die für den Aufbau eines robusten Positionsrückmeldesystems mit Submikron-Auflösung erforderlich sind.

Dank seines kleinen Formfaktors kann der AS5311 in Autofokus-, und Zoomsysteme in Kameras, in Schaltsysteme, in der Faseroptik oder in andere Mikropositionierungsanwendungen integriert werden, bei denen es auf engem Raum ankommt und eine hohe Auflösung erforderlich ist. Der AMS Encoder bietet außerdem erweiterte Diagnosefunktionen, die die Positionierung des Magneten über dem Gerät ständig überwachen. Diese Funktionen ermöglichen eine frühzeitige Erkennung von Fehlern in mechanischen Systemen. Darüber hinaus kompensiert das Gerät die negativen Auswirkungen unerwünschter externer Magnetfelder und gewährleistet so zusätzliche Sicherheit und Robustheit des Systems [65].

Messprinzip: Das Messprinzip des AS5311 basiert auf der Verwendung von Hall-Elementen, die auf der standardmäßigen komplementären Metalloxid-Halbleitertechnologie (CMOS) beruhen. Die horizontal angeordneten Hall-Elemente sind empfindlich für ein Magnetfeld, das senkrecht zu ihrer Oberfläche steht. Das bedeutet, dass nur die Magnetfelder, die senkrecht zur Oberfläche des integrierten Schaltkreises (IC) stehen, einen Einfluss auf das Messsignal haben. Der Magnetstreifen, der eigentlich für die Bestimmung einer linearen Bewegung konzipiert ist, kann für die Erfassung einer Drehbewegung gekrümmt und anschließend für die Messung eines Winkels verwendet werden. Es ist zu beachten, dass der Fehler umso kleiner ist, je größer der Krümmungsradius des Magnetbandes ist.

Zwei Hall-Schalter gleiten über ein magnetisiertes mehrpoliges Band. Die Hall-Schalter schalten sich in Reaktion auf das sich ändernde Magnetfeld ein und erzeugen so ein Rechtecksignal. Wenn die Länge des Magnetpols bekannt ist, kann ermittelt werden, wie weit sich der Magnetstreifen relativ zum Hall-Schalter bewegt hat. Die beiden Hall-Schalter sind so positioniert, dass ihr Rechtecksignal um 90° phasenverschoben ist. Daher ist es möglich, die Bewegungsrichtung zu bestimmen. Allerdings ermöglicht dieses Verfahren die Aufteilung der kleinstmöglichen Polpaarlänge (ca. 0,5 mm) nur in vier Zonen [65].

Es bleibt nur die Möglichkeit der Interpolation, um die Auflösung zu erhöhen. Das Rechtecksignal des Hall-Schalters ist für die weitere Signalverarbeitung ungünstig, weshalb lineare Hallsensoren verwendet werden. Lineare Hallsensoren liefern ein Ausgangssignal, das proportional zur Stärke des Magnetfeldes ist, das senkrecht zum Hall-Sensor steht. Ein Hall-Sensor, der über den Magnetstreifen gleitet, gibt sinusförmige Signale ab, da das Magnetfeld eines mehrpoligen Magnetbandes sinusförmig ist. Werden vier verschiedene Elemente verwendet, die einen Abstand von einer halben Pollänge zueinander haben, erhält man vier harmonische Signale. Diese sind um 90° zueinander phasenverschoben. Die vier Signale entsprechen einem Sinus-, einem Cosinus-, einem invertierten Sinus- und einem invertierten Cosinuskurve. Durch Kombination jedes harmonischen Signals mit dem invertierten Gegenstück erhält man ein weiteres Signal mit doppelt so großer Amplitude. Dies setzt voraus, dass ein Eingangssignal invertiert werden muss, was bedeutet, dass die Interferenz durch die äußeren Magnetfelder invertiert wird. Dadurch ist es möglich, jede Störung, die durch Magnetfelder in der Nähe des Sensors verursacht wird, aufzuheben. Die beiden resultierenden Signale können mit Hilfe eines Analog-Digital-Wandlers und eines digitalen Signalprozessors (DSP) in ein hochauflösendes digitales Signal mit Phase und Betrag umgewandelt werden [65].

Die Sensoren der AMS-AG verwenden ein System namens Coordinate to Rotation Digital Computer (CORDIC) für die Verarbeitung von Oberschwingungssignalen. Die differentiellen Sinus- und Cosinussignale werden durch einen Analog-Digital-Wandler in ein digitales Signal umgewandelt. Ein Zeiger auf dem Einheitskreis kann durch Projektion in seine vertikalen und horizontalen Komponenten zerlegt werden. Auf dem Einheitskreis entspricht die Komponente, die auf die Abszisse projiziert wird, dem Kosinus des Winkels zwischen dem Zeiger und der Koordinatenachse. Die

vertikale Komponente ist gleich dem Sinus. Ein Zeiger im Einheitskreis kann also durch die beiden harmonischen Signale eindeutig bestimmt werden. Der eingeschlossene Winkel bestimmt die Position des Zeigers ebenfalls eindeutig und eine Drehung von 360° entspricht der Breite eines Polpaares. Die Anzahl der diskreten Schritte innerhalb einer Drehung vom Zeiger wird als Interpolationsfaktor bezeichnet. Je mehr Schritte es gibt, desto höher ist die Auflösung des Sensors. Innerhalb eines Polpaares, das eine Länge von 2 mm hat, sind $256 \times 4 = 1024$ diskrete Schritte möglich, was einer Auflösung von 2^{10} Bit entspricht [65].

Der AS5311 kann auch zur Winkelmessung eingesetzt werden. Dazu muss das Magnetband gekrümmt werden und am Sensor vorbeigeführt werden. Wenn der Ursprung des Krümmungsradius bekannt ist, kann der überstrichene Winkel berechnet werden [65].

Die verschiedenen Arten von Ausgängen in Bezug auf die Magnetposition sind in Abbildung 7.35 unten dargestellt. Der absolute serielle Ausgang zählt von 0 bis 4095 innerhalb eines Polpaares und wiederholt sich mit jedem folgenden Polpaar. Ebenso beginnt der PWM-Ausgang mit einer Impulsbreite von $1 \mu\text{s}$, erhöht die Impulsbreite mit jedem Schritt von $0,488 \mu\text{m}$ und erreicht am Ende jedes Polpaares eine maximale Impulsbreite von $4097 \mu\text{s}$. Für jedes Polpaar wird einmal ein Indeximpuls erzeugt. An den Ausgängen A und B werden für jedes Polpaar 256 Inkrementalimpulse erzeugt. Die Ausgänge A und B sind um 90° phasenverschoben, was zu 1024 Flanken pro Polpaar führt. Da sich die inkrementellen Ausgänge auch bei jedem Polpaar wiederholen, wird eine konstante Folge von Impulsen erzeugt, während sich der Magnet über den Chip bewegt [65].

Die Abbildung 7.35 unten zeigt AS5311-Ausgänge in Abhängigkeit von der Magnetposition.

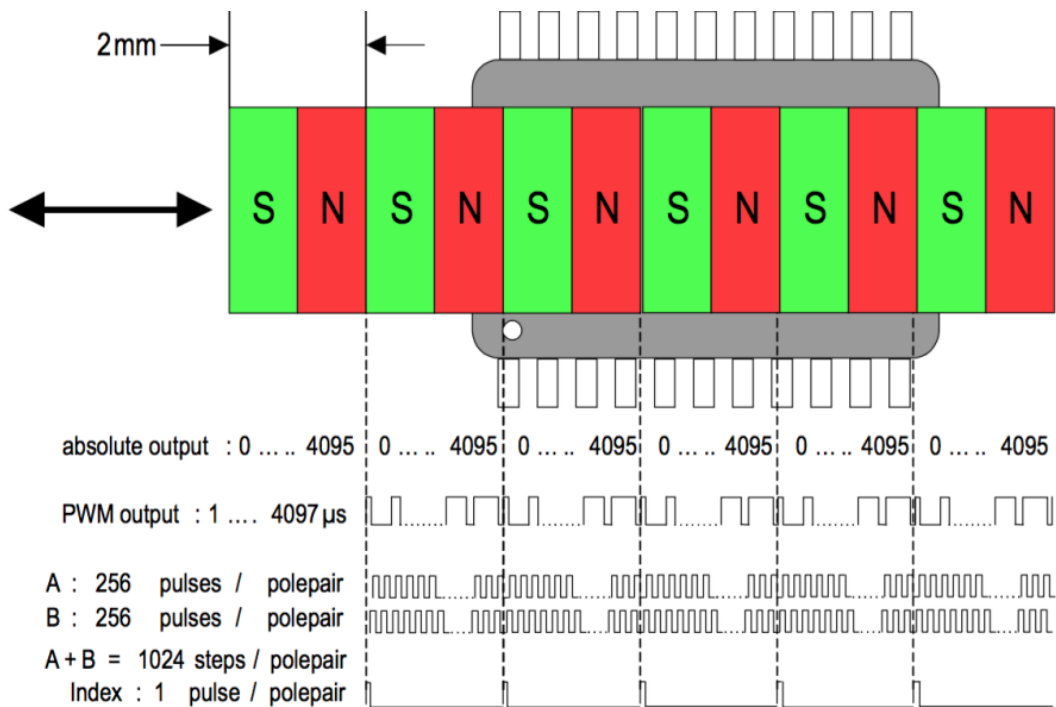


Abbildung 7.35 AS5311-Ausgänge in Abhängigkeit von der Magnetposition [65]

Anwendungsbereiche: Die Hauptanwendungsbereiche, in denen der AS5311 arbeitet, können wie folgt beschrieben werden [65]:

- Robotik
- Rückführung von Mikroantrieben
- Rückführung von Servoantrieben
- Ersatz von optischen Encodern

Allgemeiner Überblick über das Laser-Winkel-Interferometer Systeme

Es werden zwei Lasermesssysteme der Firma Hewlett Packard verwendet, die speziell für die Durchführung einer Vielzahl von sehr genauen Messungen im Rahmen der Fertigungsmesstechnik konzipiert sind.

Mit diesen tragbaren und leichten Messsystemen können Abstands-, Geschwindigkeits-, Winkel-, Ebenheits-, Geradheits-, Rechtwinkligkeits- und Parallelitätsmessungen durchgeführt werden. Die Abbildung 7.36 unten zeigt die Hauptkomponenten der verwendeten Laser-Winkel-Interferometer-Systeme.



Abbildung 7.36 Hauptkomponenten der verwendeten Laser-Winkel-Interferometer-Systeme

7.3 Messungen am Harmonic Drive. Messungen mit Hilfe des magnetischen Encoders AS5311

In Übereinstimmung mit den oben genannten Zielen dieses Abschnitts wurde zunächst ein Harmonic Drive, ein Reitstock und eine abgesetzte Welle angeschafft. Auf der abgesetzten Welle wird das Magnetband positioniert, um die Winkelpositionen mit Hilfe eines auf Hall-Sensoren basierenden magnetischen Encoders zu erfassen. Anschließend wird die Messanordnung inklusive Magnet Encoder auf einem Drehbankbett im Nanometrologie-Labor des AuM aufgebaut. Das Harmonic Drive wird senkrecht montiert und die abgesetzte Welle etwa zwischen Reitstock und Harmonic Drive platziert und zentriert. Mittels einiger Schrauben, T-Muttern und Spannpratzen werden die einzelnen Komponenten des Aufbaus auf dem Drehbankbett fixiert. Die Abbildung 7.37 unten zeigt das Harmonic Drive verbunden mit abgesetzter Welle und Reitstock auf einem Drehbankbett.

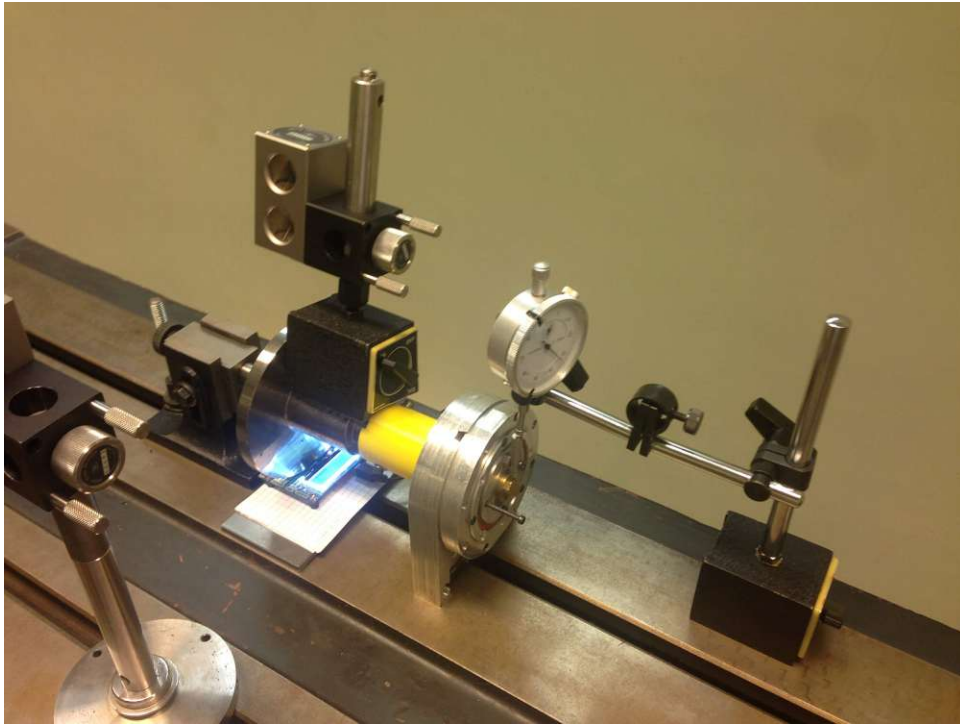


Abbildung 7.37 Harmonic Drive verbunden mit abgesetzter Welle und Reitstock auf einem Drehbankbett

Sobald die Befestigung auf dem Drehbankbett abgeschlossen ist, wird die Stabilität der gesamten Einrichtung überprüft und korrigiert. Die Rundlaufwerte und die Konzentriertheit der Rotationsachse des Harmonic Drive, der abgesetzten Welle und der Reitstockspitze werden mit einer Messuhr gemessen.

Nach der Feineinstellung, bis die Werte innerhalb akzeptabler Grenzen liegen, wird der magnetische Encoder AS5311 unter dem größten Abschnitt der abgesetzten Welle, auf dem das Magnetband montiert ist, angebracht.

Während sich das Harmonic Drive dreht, dreht sich auch die abgesetzte Welle mit. So wird die Drehbewegung durch den Hall-Sensor des AS5311 erkannt und die Winkelpositionsinformation erfasst, wobei die Drehpositionen für die eine Drehrichtung die gleichen sind wie die Drehpositionen für die entgegengesetzte Drehrichtung. Die Aufzeichnungen der Drehpositionen erfolgten auch gleichzeitig mit dem Laserinterferometer. Auf diese Weise werden das Umkehrspiel, die uni-/bidirektionale Wiederholgenauigkeit sowie andere Positionierungseigenschaften des Getriebes ermittelt.

Nach der Einstellung von drei verschiedenen Referenzwinkeln, bei denen anschließend die Messwerte ermittelt werden, werden diese Winkelpositionen ins-

gesamt achtmal angefahren, jeweils viermal in positiver Richtung (im Uhrzeigersinn) und viermal in die entgegengesetzte Richtung (gegen den Uhrzeigersinn). Für jeden Halt werden die Messergebnisse von der Flüssigkristallanzeige (LCD) des AS5311 abgelesen und die Abweichungen aufgezeichnet. Anhand dieser Daten werden die erforderlichen Werte für das Umkehrspiel, die uni-/bidirektionale Wiederholgenauigkeit und die Positioniergenauigkeit berechnet und eine entsprechende Statistik erstellt (Tabellen).

Danach werden neun neue Winkelpositionen eingestellt und deren Messwerte ermittelt. Dieser Vorgang wird acht mal wiederholt.

Die Abbildung 7.38 unten zeigt den Aufbau für die Messungen mit dem Magnetencoder.

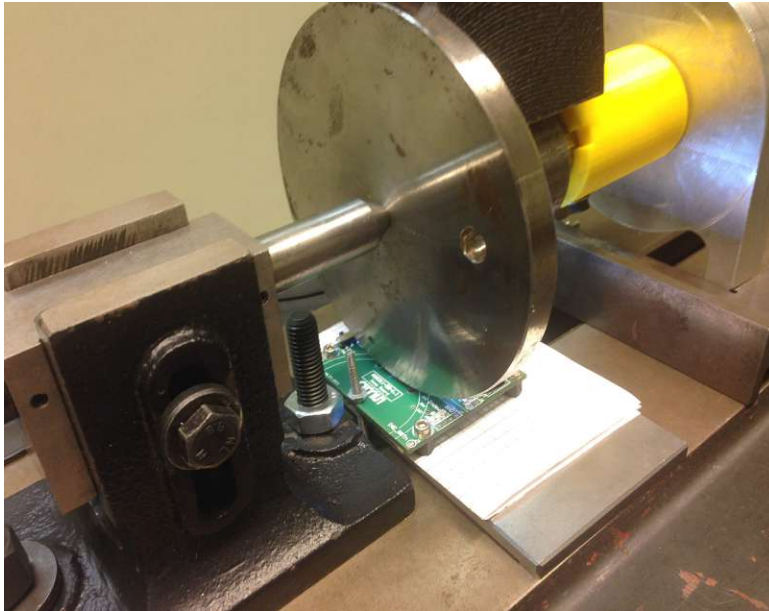


Abbildung 7.38 Aufbau für die Messungen mit dem Magnetencoder

Messungen mit Hilfe des Laserinterferometersystems

Um die bisherigen Ergebnisse zu verifizieren bzw. validieren und genauere Ergebnisse zu erhalten, werden dieselben Eigenschaften auch gleichzeitig mit einem Laserwinkelinterferometersystem gemessen. Die Abbildung 7.39 unten zeigt den Aufbau für die Messungen mit dem Laserinterferometer.



Abbildung 7.39 Aufbau für die Messungen mit dem Laserinterferometersystem

Die gesammelten Messergebnisse werden mit denen des magnetischen Encoders AS5311 verglichen. Abschließend werden die Ergebnisse der beiden Messungen statistisch ausgewertet und in einer Tabelle dargestellt. Es werden Mittelwerte, Standardabweichungen und alle Kenngrößen der Positioniergenauigkeit, insbesondere das Umkehrspiel, ermittelt (in Übereinstimmung mit der ISO 230-2:2014).

Da der theoretische Hintergrund der Laserwinkelinterferometrie bereits in Abschnitt 5 dargestellt ist, werden in diesem Abschnitt nur die praktischen Überlegungen und Schritte erläutert sowie die Messergebnisse angeführt.

Zunächst wird der Winkelreflektor des Laser-Winkelinterferometersystems auf der oberen Fläche der abgesetzten Welle in unserem Messaufbau montiert. Dabei wird ein Magnetfuß verwendet, um die Stabilität des Winkelreflektors auf dieser Fläche zu gewährleisten. Dann wird mit Hilfe einer Wasserwaage überprüft, ob der Winkelreflektor genau waagrecht auf der Fläche liegt. Anschließend wurde er in die Position gebracht, in der er genau waagrecht ist. Zweitens wurde die Laserstrahlquelle auf einem Stativ montiert und ihre Höhe entsprechend der Höhe des Winkelreflektors eingestellt.

Im nächsten Schritt wird das Winkelinterferometer zwischen Laserstrahlquelle und Winkelreflektor platziert und die Höhe und die Position genau eingestellt, um sicherzustellen, dass der aus der Quelle kommende Laserstrahl auf geradem Weg durch das Winkelinterferometer in den Reflektor gelangt und somit eine ausreichende Signalstärke für unsere Messungen erreicht wird.

Nachdem alle Vorkehrungen bezüglich des Aufbaus getroffen sind, wird ein Messplan erstellt, nach dem die zu messenden Winkelpositionen zunächst aus der einen Richtung (positiv) und dann aus der anderen Richtung (negativ) angefahren und die entsprechenden Ergebnisse manuell aufgezeichnet werden. Drei verschiedene Winkel mit einem Abstand von 360° zueinander werden angefahren und deren Werte festgehalten, und nach dem dritten Punkt wird eine zusätzliche Bewegung von 2 Grad ausgeführt, um einen möglichen Wert für das Umkehrspiel von bis zu 2 Grad zu erfassen. Anschließend wird das harmonische Getriebe in umgekehrter Richtung gedreht und die vordefinierten drei Winkelpositionen im Uhrzeigersinn angefahren und gemessen, um Informationen über die Positioniergenauigkeit zu erhalten.

Dieser Vorgang wird achtmal wiederholt, um statistisch aussagekräftige Informationen zu erhalten. Abschließend wird mit den gesammelten Messergebnissen eine Statistiktabelle (in Übereinstimmung mit der ISO 230-2:2014) erstellt und der mittlere Wert des Umkehrspiels ermittelt (Tabellen 16,17 und 18,19). Die Abbildung 7.40 unten zeigt den Aufbau der Messung mit der Messuhr.

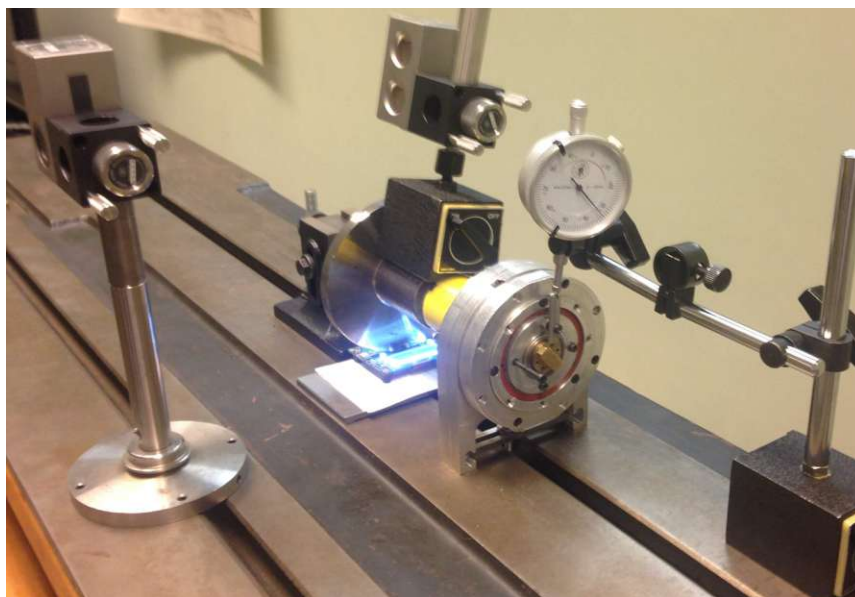


Abbildung 7.40 Aufbau der Messung mit einer Messuhr

8 Auswertung

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse des Umkehrspiels des harmonischen Getriebes aus der Messung durch den Einsatz des linearen magnetischen Encoders AS5311 und Laserinterferometer dargestellt, die im praktischen Teil dieser Arbeit durchgeführt wurden. Die statistische Auswertung der Messwerte wird anhand von Tabellen und Diagrammen dargestellt (ISO 230:2-2014). Anschließend werden die erzielten Messergebnisse diskutiert und interpretiert.

In der Untersuchung ging es darum, die Funktionsfähigkeit und Genauigkeit des Harmonic Drives zu bestimmen. Mit dem linear magnetischen Encoder AS5311 wurde geprüft, ob ein Umkehrspiel beim Harmonic Drive vorkommt und wenn ja, wie groß es ist.

In Anbetracht der erzielten Messergebnisse sowie deren Vergleich untereinander kann die qualitative Interpretation der durchgeführten Messungen wie folgt sein. Die ermittelten Messergebnisse des Harmonic Drives aus der ersten Messreihe, die unter Verwendung des linearen Magnetencoders AS5311 durchgeführt sind, sind in der Tabelle 12 unten dargestellt. Die Spezifikationen des AS5311 finden sich im Anhang. Die messtechnischen Merkmale der Messuhr finden sich in Anhang 2.

8.1 Erste Messung

Bei der ersten Messung werden mit der Messuhr die Referenzwinkelpositionen (0° , 360° , 720° , 1080°) eingestellt und die entsprechenden Werte des Magnetencoders und des Laserinterferometers in einer Tabelle eingetragen.

Die Auswertung, die Messergebnisse des Harmonic Drives mit dem Magnetencoder von der ersten Messung finden sich unten in Tabelle 12.

Die Tabelle mit den erfassten Messwerten mit dem Magnetencoder und Laserinterferometer von Winkelpositionen $0-1080^\circ$ findet sich in Anhang 3.

Tabelle 12: Messergebnisse mit Magnetencoder - erste Messung des Umkehrspiels des Harmonic Drives

Nummer der Messung	Magnetic Encoder Resultate (Grad)											
	0.0000			360.0000			720.0000			1080.0000		
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	
1	0.0000	0.1688	6.0410	6.2800	12.1750	12.3533	18.2615	18.4663				
2	0.0372	0.1556	6.0448	6.2591	12.1560	12.3495	18.2255	18.4721				
3	0.0422	0.1518	6.0467	6.2876	12.1807	12.3779	18.2387	18.4986				
4	0.0000	0.1631	6.0524	6.2989	12.1807	12.3837	18.2539	18.4816				
5	0.0159	0.1441	6.0068	6.2667	12.1674	12.3666	18.2141	18.4663				
6	0.0555	0.1992	6.0619	6.2989	12.1389	12.4044	18.2311	18.5005				
7	0.0324	0.1669	6.0353	6.2535	12.1124	12.3514	18.2198	18.4645				
8	0.0511	0.1859	6.0619	6.2914	12.1314	12.3704	18.2293	18.4892				
1	0.0000	0.1688	0.0410	0.2800	0.1750	0.3533	0.2615	0.4663				
2	0.0372	0.1556	0.0448	0.2591	0.1560	0.3495	0.2255	0.4721				
3	0.0422	0.1518	0.0467	0.2876	0.1807	0.3779	0.2387	0.4986				
4	0.0000	0.1631	0.0524	0.2989	0.1807	0.3837	0.2539	0.4816				
5	0.0159	0.1441	0.0068	0.2667	0.1674	0.3666	0.2141	0.4663				
6	0.0555	0.1992	0.0619	0.2989	0.1389	0.4044	0.2311	0.5005				
7	0.0324	0.1669	0.0353	0.2535	0.1124	0.3514	0.2198	0.4645				
8	0.0511	0.1859	0.0619	0.2914	0.1314	0.3704	0.2293	0.4892				
xi	0.0293	0.1669	0.0439	0.2795	0.1553	0.3696	0.2342	0.4799				
si	0.0217	0.0181	0.0177	0.0178	0.0254	0.0189	0.0164	0.0148				
3*si	0.0651	0.0543	0.0530	0.0534	0.0761	0.0566	0.0491	0.0443				
Ri=6*si	0.1758	0.1086	0.1060	0.1068	0.1522	0.1132	0.0983	0.0887				
xi+3si	0.0944	0.2212	0.0969	0.3329	0.2314	0.4263	0.2834	0.5242				
xi-3*si	-0.0358	0.1126	-0.0091	0.2261	0.0792	0.3130	0.1851	0.4355				
Bi	0.1376			0.2357		0.2143		0.2456				
3si(+) + 3si(-) + Bi	0.2571			0.3421		0.3470		0.3391				
Mittlere Bi-directional Abweichung xi	0.0981			0.1617		0.2625		0.3571				
Mittlere Bi					0.2083							
Maximum Bi					0.2456							
Mittlere Abweichung der xi(s)					0.2198							

Als B_i in Tabelle 12 oben wird der Umkehrwert an einer Position bezeichnet. Der Umkehrwert ist der Differenz zwischen den aus den beiden Richtungen ermittelten mittleren unidirektionalen Positionsabweichungen der Annäherung an eine Position P_i . Der Umkehrwert ist ein Maß für das Spiel (ISO 230:2-2014). Siehe auch die Tabelle im Anhang 3.

Die Messung aus dem ersten Versuch mit dem Magnetencoder AS5311 liefert für das mittlere Umkehrspiel den Wert $\bar{B}_i = 222 \mu\text{m}$.

In der Tabelle 13 unten ist die Auswertung der ersten Messung der Messunsicherheit des Magnetencoders. Als Näherung ist eine Normalverteilung angenommen.

Tabelle 13 Auswertung der Messunsicherheit Magnetencoder, erste Messung

Messergebnisse (mm) Encoder		
Mittleres Umkehrspiel \bar{B}_i		0,222
Standardabweichung s		0,036
Messergebnis B_i	$\bar{B}_i \pm 3s$	0,222 ± 0,108
Gesamtabweichung	$U_{ges} = 3s + U_{Gr}$	0,133
Messergebnis B_i	$\bar{B}_i \pm U_{ges}$	0,222 ± 0,133

Abweichung vom Mittelwert m	$m = \frac{3s}{\sqrt{n}}$	0,054
Messergebnis B_i	$B_i \pm m$	$0,222 \pm 0,054$
Messergebnis B_i	$\bar{B}_i \pm (m + U_{ges})$	$0,222 \pm 0,187$
Messergebnis mit erweiterter Messunsicherheit	$Y = y \pm U$ $U = k \cdot s = k \cdot U_{ges}$	$B_i = 0,222 \pm 0,266$

Messabweichung der Messuhr $U_u = 15 \mu\text{m}$

Messabweichung des Encoder $U_{enc} = 10 \mu\text{m}$

Messunsicherheit der Geräte $U_{Gr} = U_u + U_{enc} = 25 \mu\text{m} = 0,025 \text{mm}$

Gesamtabweichung $U = U_{Gr} + 3s = 0,025 + 0,108 = 0,133 \text{mm}$

Es gibt ein Umkehrspiel mit dem Mittelwert $0,222 \text{mm}$. Die Unsicherheit beträgt

$U = 0,133 \text{mm}$, d.h. der wahre Messwert liegt mit 68,3% Wahrscheinlichkeit im Intervall zwischen $0,355$ und $0,089 \text{mm}$.

Erweiterte Messunsicherheit: $Y = y \pm U \quad U = k \cdot s$

Die erweiterte Messunsicherheit berechnet sich wie folgt:

$$U = k \cdot s = 2 \times 0,133 = 0,266 \text{mm}$$

$$B_i = 0,222 \pm 0,266$$

Mit dieser Erweiterung liegen die Messwerte mit einer 95 % Wahrscheinlichkeit im Intervall $\pm U$ und somit nur mehr ein Risiko von 5% bestünde, dass die Messwerte außerhalb des Bereichs liegen

Unten in Abbildung 8.41 ist die graphische Darstellung der Ergebnisse der Messung des Harmonic Drive mit dem Magnetencoder aus der ersten Messung des Umkehrspiels (ISO 230:2-2014).

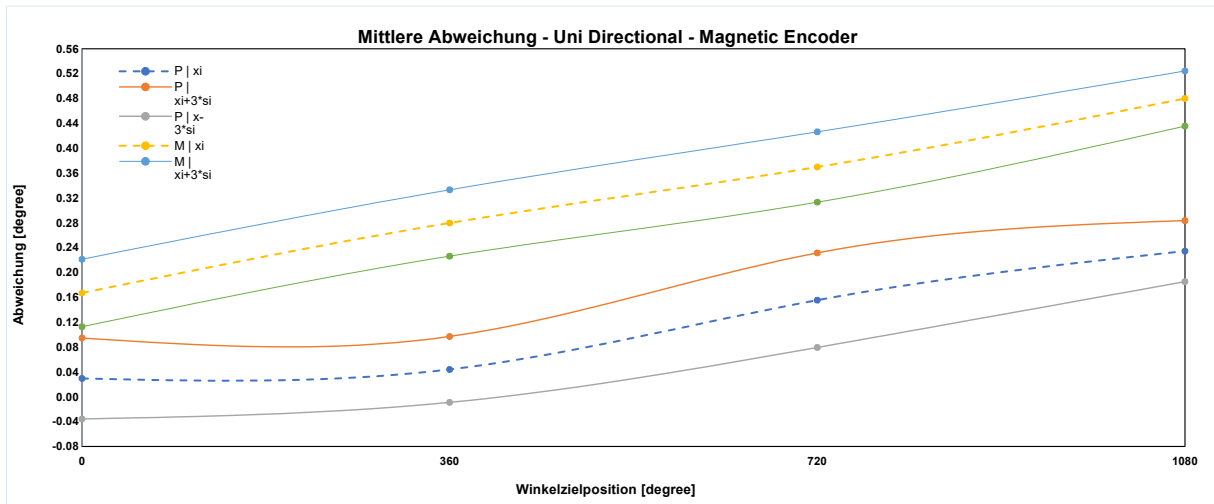


Abbildung 8.41 Graphische Darstellung der Messergebnisse der Positionsmessung mit dem Magnetecoder.

In der Abbildung 8.41 oben beschreibt $P|x_i$ die mittlere unidirektionale Positionsabweichung an einer Position P_i über der Winkelposition. Um den Mittelwert entsteht eine Streuung der gemessenen Positionen, die als Standardabweichung S dargestellt ist. $P|x_i \pm 3s_i$ kennzeichnet das Ergebnis der Messreihe. Da die Verteilung annähernd als normalverteilt angenommen ist, kann man erwarten, dass 2/3 aller Messwerte zwischen $\bar{x} + 3s$ und $\bar{x} - 3s$ liegen.

M ist die mittlere bidirektionale Positionsabweichung einer Achse. M ist definiert als die Differenz zwischen dem algebraischen Maximum und Minimum der mittleren bidirektionalen Positionsabweichungen x an jeder Position einer beliebigen Position P_i entlang oder um die Achse (ISO-230:2-2014). Die Graphik in Abbildung 8.41 zeigt, dass die mittleren Positionsabweichungen x entlang der Achse relativ konstante Streuung aufweisen.

Die erzielten Messergebnisse des Harmonic Drives aus der ersten Messung, die unter Verwendung des Laserinterferometersystems ermittelt wurden, werden in der Tabelle 14 unten dargestellt.

Tabelle 14: Messergebnisse mit Laser Interferometer - erste Messung des Umkehrspiels des Harmonic Drives

Nummer der Messung	Laser Interferometer Resultate (Grad)											
	0.0000			360.0000			720.0000			1080.0000		
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
1	0.0000	0.1392	5.9572	6.1342	12.1022	12.2844	18.3419	18.5250				
2	-0.0311	0.1311	5.9608	6.1169	12.0808	12.2806	18.3575	18.5308				
3	-0.0342	0.1300	5.9550	6.1350	12.0969	12.3017	18.3597	18.5414				
4	-0.0272	0.1383	5.9647	6.1492	12.1094	12.3106	18.3289	18.5350				
5	-0.0422	0.1256	5.9272	6.1294	12.0908	12.2978	18.3247	18.5194				
6	-0.0347	0.1553	5.9544	6.1436	12.0978	12.3294	18.3144	18.5361				
7	-0.0303	0.1439	5.9511	6.1219	12.0969	12.3031	18.3342	18.5325				
8	-0.0372	0.1486	5.9531	6.1978	12.0889	12.3069	18.3194	18.5311				
1	0.0000	0.1392	-0.0428	0.1342	0.1022	0.2844	0.3419	0.5250				
2	-0.0311	0.1311	-0.0392	0.1169	0.0808	0.2806	0.3575	0.5308				
3	-0.0342	0.1300	-0.0450	0.1350	0.0969	0.3017	0.3597	0.5414				
4	-0.0272	0.1383	-0.0353	0.1492	0.1094	0.3106	0.3289	0.5350				
5	-0.0422	0.1256	-0.0728	0.1294	0.0908	0.2978	0.3247	0.5194				
6	-0.0347	0.1553	-0.0456	0.1436	0.0978	0.3294	0.3144	0.5361				
7	-0.0303	0.1439	-0.0489	0.1219	0.0969	0.3031	0.3342	0.5325				
8	-0.0372	0.1486	-0.0469	0.1978	0.0889	0.3069	0.3194	0.5311				
xi	-0.0296	0.1390	-0.0470	0.1410	0.0955	0.3018	0.3351	0.5314				
si	0.0128	0.0100	0.0113	0.0252	0.0087	0.0153	0.0168	0.0068				
3*si	0.0384	0.0301	0.0338	0.0757	0.0261	0.0459	0.0504	0.0203				
Ri=6*si	-0.1777	0.0602	0.0677	0.1514	0.0522	0.0918	0.1008	0.0406				
xi+3si	0.0088	0.1691	-0.0132	0.2167	0.1216	0.3477	0.3855	0.5517				
xi-3*si	-0.0681	0.1089	-0.0809	0.0653	0.0694	0.2559	0.2847	0.5111				
Bi	0.1686			0.1881		0.2063		0.1963				
3si(+)+3si(-)+Bi	0.2372			0.2976		0.2783		0.2670				
Mittlere Bi-direktionale Abweichung xi	0.0547			0.0470		0.1986		0.4333				
Mittlere Bi					0.1898							
Maximum Bi					0.2063							
Mittlere Abweichung der xi(s)					0.3863							

Die Messung aus dem ersten Versuch mit dem Laser Interferometer, siehe Tabelle 14 oben, liefert für das mittlere Umkehrspiel den Wert $\bar{B}_i = 195 \mu\text{m}$.

Die Tabelle 15 unten zeigt die Auswertung der Messunsicherheit des Laser Interferometers, erste Messung.

Tabelle 15 Auswertung der Messunsicherheit Laser Interferometer, erste Messung

Messergebnisse (mm) Laserinterferometer		
Mittleres Umkehrspiel \bar{B}_i		0,195
Standardabweichung s		0,0165
Messergebnis B_i	$\bar{B}_i \pm 3s$	0,195 \pm 0,0495
Gesamtabweichung	$U_{ges} = 3s + U_{Gr}$	0,0674
Messergebnis B_i	$\bar{B}_i \pm U_{ges}$	0,195 \pm 0,0674
Abweichung vom Mittelwert m	$m = \frac{3s}{\sqrt{n}}$	0,0248
Messergebnis B_i	$\bar{B}_i \pm m$	0,195 \pm 0,0248
Messergebnis B_i	$Y = y \pm U$ $U = k \cdot s = k \cdot U_{ges}$	0,195 \pm 0,1348

Messauflösung des Lasers beträgt $\lambda/64$ (10nm)

Messabweichung des Lasers $U_l = 0.0029\mu\text{m}$

In der Abbildung 8.42 unten findet sich die graphische Darstellung der Messergebnisse mit dem Laserinterferometer.

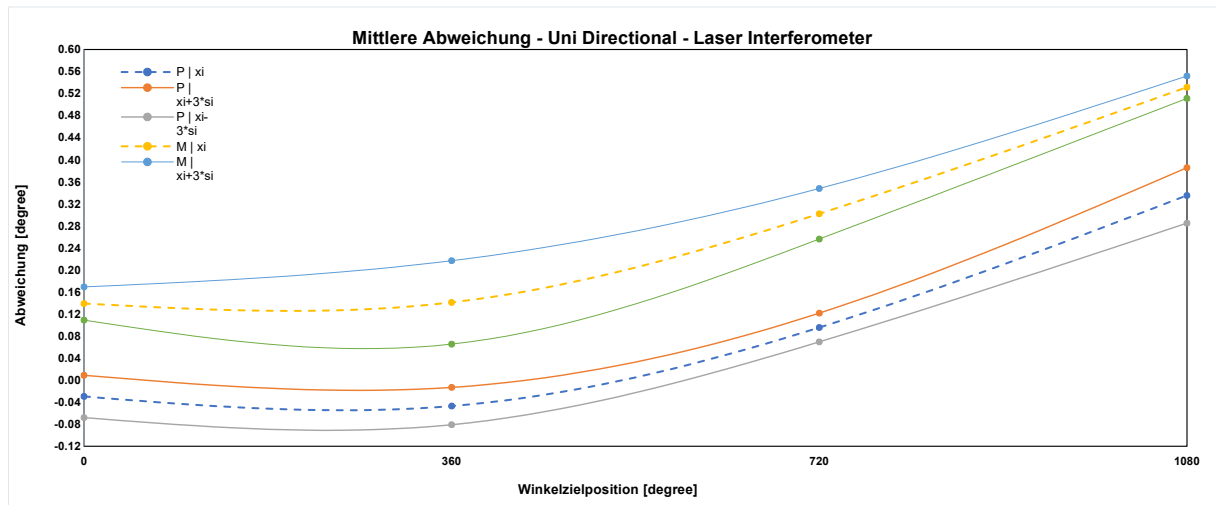


Abbildung 8.42 Graphische Darstellung der Messergebnisse mit Laserinterferometer

Die Graphik oben in Abbildung 8.42 zeigt, dass die mittlere Positionsabweichung an einer Position P_i geringere Streuung hat als die des Encoders, dagegen die mittlere Positionsabweichungen x entlang der Achse größere Streuung aufweisen als die des Encoders.

8.2 Zweite Messung

Bei der zweiten Messung werden mit der Messuhr die Referenzwinkelpositionen (0° , 0.25° , 0.5° , 0.75° , 1° , 1.25° , 1.5° , 1.75° , 2°) eingestellt und die entsprechenden Werte des Magnetencoders und des Laserinterferometers in einer Tabelle eingetragen.

Die ermittelten Messergebnisse des Harmonic Drives aus der zweiten Messung, die unter Verwendung des linearen Magnetencoders AS5311 durchgeführt wurden, sind in der Tabelle 16 unten dargestellt.

Die erfassten Messwerte des Harmonic Drives mit dem Magnetencoder und Laserinterferometer von Winkelpositionen 0 bis 2° finden sich in der Tabelle im Anhang 4.

Tabelle 16: Messergebnisse mit Magenencoder – zweite Messung des Umkehrspiels des Harmonic Drives

Messung Nummer	Magnetic Encoder Resultate (Grad)																							
	0.0000		0.2500		0.5000		0.7500		1.0000		1.2500		1.5000		1.7500		2.0000							
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-				
1	0.0000	-0.0151	0.2466	0.2262	0.5197	0.4951	0.7890	0.7644	1.0394	1.0129	1.2822	1.2366	1.5610	1.4794	1.8702	1.8000	2.1508	2.1243						
2	-0.0133	0.0000	0.2333	0.2447	0.5026	0.5140	0.7757	0.7379	1.0271	0.9825	1.2689	1.2234	1.5458	1.4927	1.8644	1.8171	2.1547	2.1414						
3	0.0019	-0.0227	0.2485	0.2195	0.5197	0.4760	0.7910	0.7416	1.0375	0.9884	1.2822	1.2290	1.5615	1.5003	1.8702	1.8266	2.1528	2.1452						
4	-0.0171	-0.0022	0.2447	0.2367	0.5197	0.4956	0.7795	0.7446	1.0223	0.9940	1.2803	1.2308	1.5914	1.4953	1.8307	1.8087	2.1567	2.1381						
5	-0.0124	0.0033	0.2408	0.2415	0.5304	0.4979	0.7899	0.7467	1.0213	0.9924	1.2777	1.2256	1.5572	1.4921	1.8560	1.8184	2.1445	2.1352						
6	-0.0038	-0.0050	0.2390	0.2457	0.5083	0.5135	0.7795	0.7388	1.0318	0.9841	1.2765	1.2212	1.5534	1.4923	1.8416	1.8195	2.1388	2.1328						
7	0.0038	-0.0072	0.2485	0.2468	0.5178	0.5121	0.7910	0.7346	1.0413	0.9855	1.2841	1.2221	1.5629	1.4921	1.8475	1.8212	2.1388	2.1309						
8	0.0000	-0.0067	0.2447	0.2454	0.5160	0.5132	0.7871	0.7353	1.0356	0.9866	1.2803	1.2239	1.5572	1.4915	1.8649	1.8220	2.1395	2.1327						
1	0.0000	-0.0151	-0.0034	-0.0238	0.0197	-0.0049	0.0390	0.0144	0.0394	0.0129	0.0322	-0.0134	0.0610	-0.0206	0.1202	0.0500	0.1508	0.1243						
2	-0.0133	0.0000	-0.0167	-0.0053	0.0026	0.0140	0.0257	-0.0121	0.0271	-0.0175	0.0189	-0.0266	0.0458	-0.0073	0.1144	0.0671	0.1547	0.1414						
3	0.0019	-0.0227	-0.0015	-0.0305	0.0197	-0.0240	0.0410	-0.0084	0.0375	-0.0116	0.0322	-0.0210	0.0615	0.0003	0.1202	0.0766	0.1528	0.1452						
4	-0.0171	-0.0022	-0.0053	-0.0133	0.0197	-0.0044	0.0295	-0.0054	0.0223	-0.0060	0.0303	-0.0192	0.0914	-0.0047	0.0807	0.0587	0.1567	0.1381						
5	-0.0124	0.0033	-0.0092	-0.0085	0.0304	-0.0021	0.0399	-0.0033	0.0213	-0.0076	0.0277	-0.0242	0.0572	-0.0079	0.1060	0.0684	0.1445	0.1352						
6	-0.0038	-0.0050	-0.0110	-0.0043	0.0083	0.0135	0.0295	-0.0132	0.0318	-0.0159	0.0285	-0.0288	0.0534	-0.0077	0.0916	0.0695	0.1388	0.1328						
7	0.0038	-0.0072	-0.0015	-0.0032	0.0178	0.0121	0.0410	-0.0154	0.0413	-0.0145	0.0341	-0.0279	0.0629	-0.0079	0.0975	0.0712	0.1388	0.1309						
8	0.0000	-0.0067	-0.0053	-0.0046	0.0160	0.0132	0.0371	-0.0147	0.0356	-0.0134	0.0303	-0.0261	0.0572	-0.0085	0.1149	0.0720	0.1395	0.1327						
xi	-0.0051	-0.0070	-0.0067	-0.0117	0.0168	0.0022	0.0353	-0.0073	0.0321	-0.0092	0.0290	-0.0234	0.0613	-0.0080	0.1057	0.0667	0.1471	0.1351						
si	0.0080	0.0084	0.0053	0.0102	0.0083	0.0135	0.0061	0.0098	0.0077	0.0098	0.0048	0.0052	0.0133	0.0068	0.0145	0.0085	0.0076	0.0065						
3*si	0.0240	0.0252	0.0158	0.0307	0.0250	0.0406	0.0183	0.0293	0.0232	0.0293	0.0144	0.0157	0.0400	0.0175	0.0434	0.0254	0.0227	0.0195						
Ri=6*si	0.0480	0.0505	0.0316	0.0614	0.0500	0.0813	0.0367	0.0587	0.0463	0.0587	0.0287	0.0314	0.0799	0.0351	0.0869	0.0508	0.0454	0.0390						
xi+3si	0.0189	0.0183	0.0091	0.0190	0.0418	0.0426	0.0537	0.0221	0.0552	0.0201	0.0434	-0.0077	0.1013	0.0095	0.1491	0.0921	0.1698	0.1546						
xi-3*si	-0.0291	-0.0322	-0.0225	-0.0424	-0.0082	-0.0385	0.0170	-0.0366	0.0089	-0.0385	0.0147	-0.0391	0.0213	-0.0256	0.0623	0.0413	0.1244	0.1156						
Bi	-0.0019		-0.0050		-0.0146		-0.0426		-0.0413		-0.0524		-0.0693		-0.0390		-0.0120							
3si(+)+3si(-)+Bi	0.0511		0.0515		0.0803		0.0903		0.0937		0.0825		0.1268		0.1079		0.0542							
Mittlere Bi-directional Abweichung xi	-0.0060		-0.0092		0.0095		0.0140		0.0114		0.0028		0.0266		0.0862		0.1411							
Mittlere Bi					0.0309																			
Maximum Bi					0.0693																			
Mittlere Abweichung der xis)					0.0307																			

Die Messung aus dem zweiten Versuch mit dem Magnetencoder AS5311 lieferte für das mittlere Umkehrspiel den Wert $\bar{B}_i = 31,2 \mu\text{m}$. Siehe Tabelle 16 oben mit den Messergebnissen Magnetencoder (zweite Messung) des Umkehrspiels des Harmonic Drives. Siehe auch Tabelle im Anhang 4 (0-2°)

In der Tabelle 17 unten ist die Auswertung der Messunsicherheit des Magnetencoders, zweite Messung. Als Näherung ist eine Normalverteilung angenommen.

Tabelle 17 Auswertung Messunsicherheit des Magnetencoders, zweite Messung

Messergebnisse (mm) Encoder		
Mittleres Umkehrspiel \bar{B}_i		0,0312
Standardabweichung s		0,0694
Messergebnis B_i	$\bar{B}_i \pm 3s$	0,0312 ± 0,2082
Gesamtmessunsicherheit	$U_{ges} = 3s + U_{Gr}$	0,2332
Messergebnis B_i	$\bar{B}_i \pm U_{ges}$	0,0312 ± 0,2332
Abweichung vom Mittelwert m	$m = \frac{3s}{\sqrt{n}}$	0,0693
Messergebnis B_i	$\bar{B}_i \pm m$	0,0312 ± 0,693
Messergebnis mit erweiterter Messunsicherheit	$Y = y \pm U$ $U = k \cdot s = k \cdot U_{ges}$	0,0312 ± 0,4664

In der Abbildung 8.43 unten ist die graphische Darstellung der Messergebnisse mit dem Magentencoder, zweite Messung.

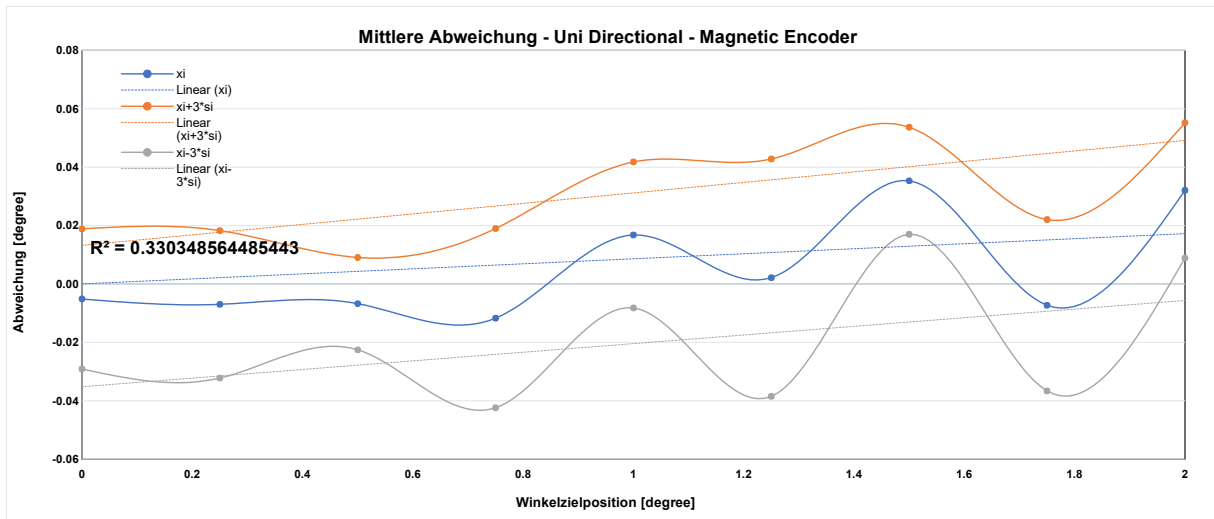


Abbildung 8.43 Graphische Darstellung Messergebnisse mit dem Magnetencoder, zweite Messung

Die erzielten Messergebnisse des Harmonic Drives aus der zweiten Messreihe, die unter Verwendung des Laserinterferometersystems ermittelt wurden, wurden in der Tabelle 18 unten dargestellt.

Tabelle 18: Messergebnisse mit Laser Interferometer - zweite Messung des Umkehrspiels des Harmonic Drives

Nummer der Messung	Laser Interferometer Resultate (Grad)																									
	0.0000		0.2500		0.5000		0.7500		1.0000		1.2500		1.5000		1.7500		2.0000									
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-								
1	-0.0158	-0.0306	0.2247		0.2047	0.4914		0.4675	0.7547		0.7306	1.0531		0.9739	1.2375		1.1928	1.5108		1.4308	1.8142		1.7453	2.0897		2.0636
2	-0.0286	-0.0158	0.2117		0.2228	0.4747		0.4858	0.7417		0.7047	0.9878		0.9442	1.2244		1.1800	1.4958		1.4439	1.8086		1.7619	2.0936		2.0806
3	-0.0139	-0.0381	0.2264		0.1981	0.4914		0.4489	0.7567		0.7083	0.9981		0.9497	1.2375		1.1856	1.5114		1.4514	1.8142		1.7714	2.0917		2.0842
4	-0.0325	-0.0181	0.2228		0.2150	0.4914		0.4678	0.7456		0.7114	0.9831		0.9553	1.2358		1.1872	1.5406		1.4464	1.7756		1.7539	2.0956		2.0772
5	-0.0278	-0.0194	0.2192		0.2197	0.5019		0.4700	0.7556		0.7133	0.9819		0.9536	1.2331		1.1822	1.5072		1.4433	1.8003		1.7633	2.0936		2.0744
6	-0.0208	-0.0206	0.2172		0.2239	0.4803		0.4853	0.7456		0.7036	0.9822		0.9456	1.2319		1.1778	1.5033		1.4436	1.7861		1.7644	2.0781		2.0719
7	-0.0122	-0.0228	0.2264		0.2247	0.4894		0.4839	0.7567		0.7014	1.0017		0.9469	1.2394		1.1786	1.5128		1.4433	1.7919		1.7661	2.0781		2.0703
8	-0.0161	-0.0222	0.2228		0.2236	0.4878		0.4850	0.7528		0.7022	0.9961		0.9461	1.2358		1.1806	1.5072		1.4428	1.8089		1.7669	2.0786		2.0719
xi	-0.0158	-0.0306	-0.0253		-0.0453	-0.0086		-0.0325	0.0047		-0.0194	0.0531		-0.0261	-0.0125		-0.0572	0.0108		-0.0692	0.0642		-0.0047	0.0897		0.0636
2	-0.0286	-0.0158	0.2117		-0.0272	-0.0253		-0.0142	-0.0083		-0.0453	-0.0122		-0.0558	-0.0256		-0.0700	-0.0042		-0.0561	0.0586		0.0119	0.0936		0.0806
3	-0.0139	-0.0381	-0.0236		-0.0519	-0.0086		-0.0511	0.0067		-0.0417	-0.0019		-0.0503	-0.0125		-0.0644	0.0114		-0.0486	0.0642		0.0214	0.0917		0.0842
4	-0.0325	-0.0181	-0.0272		-0.0350	-0.0086		-0.0322	-0.0044		-0.0366	-0.0169		-0.0447	-0.0142		-0.0628	0.0406		-0.0536	0.0256		0.0039	0.0956		0.0772
5	-0.0278	-0.0194	-0.0308		-0.0303	0.0019		-0.0300	0.0056		-0.0367	-0.0181		-0.0464	-0.0169		-0.0678	0.0072		-0.0567	0.0503		0.0133	0.0836		0.0744
6	-0.0208	-0.0206	-0.0328		-0.0261	-0.0197		-0.0147	-0.0044		-0.0464	-0.0078		-0.0544	-0.0181		-0.0722	0.0033		-0.0564	0.0361		0.0144	0.0781		0.0719
7	-0.0122	-0.0228	-0.0236		-0.0253	-0.0106		-0.0161	0.0067		-0.0486	0.0017		-0.0531	-0.0106		-0.0714	0.0128		-0.0567	0.0419		0.0161	0.0781		0.0703
8	-0.0161	-0.0222	-0.0272		-0.0264	-0.0122		-0.0150	0.0028		-0.0478	-0.0039		-0.0519	-0.0142		-0.0694	0.0072		-0.0572	0.0589		0.0169	0.0786		0.0719
xi	-0.0210	-0.0234	-0.0286		-0.0334	-0.0115		-0.0257	0.0011		-0.0406	-0.0008		-0.0478	-0.0158		-0.0669	0.0111		-0.0568	0.0500		0.0117	0.0861		0.0743
si	0.0077	0.0073	0.0051		0.0100	0.0081		0.0132	0.0060		0.0096	0.0229		0.0096	0.0047		0.0051	0.0131		0.0057	0.0142		0.0083	0.0074		0.0064
3*si	0.0231	0.0220	0.0153		0.0301	0.0244		0.0395	0.0179		0.0287	0.0686		0.0287	0.0141		0.0153	0.0392		0.0172	0.0426		0.0249	0.0222		0.0192
Ri=6*si	0.0462	0.0441	0.0306		0.0602	0.0489		0.0790	0.0357		0.0573	0.1371		0.0574	0.0283		0.0306	0.0784		0.0345	0.0852		0.0498	0.0443		0.0384
xi+3si	0.0021	-0.0014	-0.0133		-0.0034	0.0130		0.0138	0.0190		-0.0119	0.0678		-0.0191	-0.0014		-0.0516	0.0503		-0.0396	0.0925		0.0366	0.1083		0.0935
xi-3*si	-0.0441	-0.0455	-0.0439		-0.0635	-0.0359		-0.0652	-0.0167		-0.0692	-0.0693		-0.0766	-0.0297		-0.0822	-0.0280		-0.0740	0.0074		-0.0132	0.0640		0.0551
Bi	-0.0025				-0.0048			-0.0143			-0.0417			-0.0471			-0.0514			-0.0680			-0.0383			-0.0118
3si(+)+3si(-)+Bi	0.0476				0.0502			0.0782			0.0882			0.1444			0.0608			0.1244			0.1058			0.0532
Mittlere Bi-directional Abweichung xi	-0.0222				-0.0310			-0.0186			-0.0197			-0.0243			-0.0412			-0.0228			0.0308			0.0802
Mittlere Bi								0.0311																		
Maximum Bi								0.0680																		
Mittlere Abweichung der xis)								0.0077																		

Die Messung der zweiten Messreihe mit Laserinterferometer liefert für das mittlere Umkehrspiel den Wert $\bar{B}_i = 32 \mu\text{m}$, siehe Tabelle 18 oben.

Die Tabelle 19 unten ist die Auswertung der zweiten Messung der Messunsicherheit des Laserinterferometers.

Tabelle 19 Auswertung der Messunsicherheit Laser Interferometer, zweite Messung

Messergebnisse (mm) Laserinterferometer		
Mittleres Umkehrspiel \bar{B}_i		0,0320
Standardabweichung s		0,0721
Messergebnis B_i	$\bar{B}_i \pm 3s$	$0,0320 \pm 0,2163$
Gesamtmessunsicherheit	$U_{ges} = 3s + U_{Gr}$	0,2342
Messergebnis B_i	$\bar{B}_i \pm U_{ges}$	$0,0320 \pm 0,2342$
Abweichung vom Mittelwert m	$m = \frac{3s}{\sqrt{n}}$	0,0721
Messergebnis B_i	$\bar{B}_i \pm m$	$0,0320 \pm 0,0721$
Messergebnis mit erweiterter Messunsicherheit	$Y = y \pm U$ $U = k \cdot s = k \cdot U_{ges}$	$0,0320 \pm 0,4684$

Die Abbildung 8.44 unten ist die graphische Darstellung der Messergebnisse des zweiten Versuchs mit Laserinterferometer, zwei Grad.

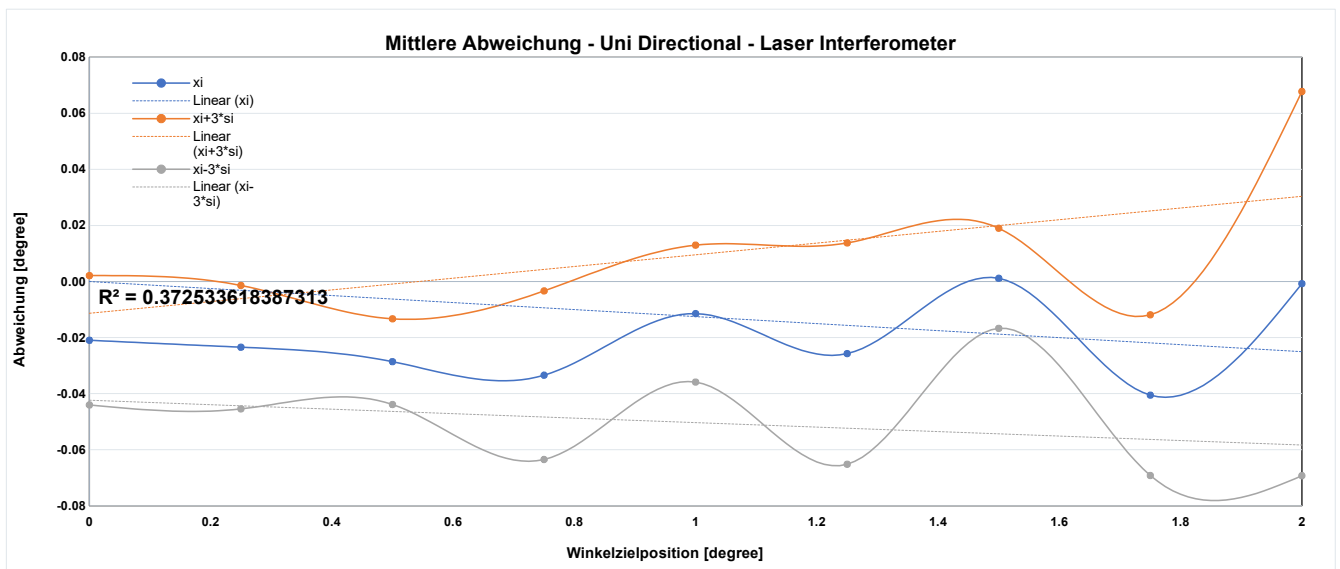


Abbildung 8.44 Graphische Darstellung der Messergebnisse Laserinterferometer

Die Graphiken der Abbildungen 8.43 und 8.44 von der zweiten Messung zeigen, dass die Abweichungen vom Mittelwert stark schwanken.

8.3 Resultat

Es wurde mit dem Magnetencoder und Laserinterferometer untersucht, ob das harmonische Getriebe ein Umkehrspiel aufweist.

Die Messergebnisse mit dem **Encoder** aus dem **ersten Versuch** und deren statistische Auswertung zeigen, dass das Harmonic Drive ein mittleres Umkehrspiel von 0,222 mm aufweist mit einer Messunsicherheit $U = 0,133$ mm.

Die Messergebnisse mit dem **Laserinterferometer** aus dem **ersten Versuch** und deren statistische Auswertung zeigen, dass das Harmonic Drive ein mittleres Umkehrspiel von 0,195 hat mit einer Messunsicherheit $U = 0,674$ mm.

Die Messergebnisse mit dem **Encoder** aus dem **zweiten Versuch** und deren statistische Auswertung zeigen, dass das Harmonic Drive ein mittleres Umkehrspiel von 0,0312 mm aufweist mit einer Messunsicherheit $U = 0,2332$ mm.

Die Messergebnisse mit dem **Laserinterferometer** aus dem **zweiten Versuch** und deren statistische Auswertung zeigen, dass das Harmonic Drive ein mittleres Umkehrspiel von 0,0320 hat mit einer Messunsicherheit $U = 0,2342$ mm.

Die Messergebnisse zeigen auch, dass die Messungen mit dem linear magnetischen Encoder AS5311 nur geringfügige Unterschiede mit den Messungen des Laser-Winkelinterferometers aufweisen.

In Anbetracht der Tatsache, dass die Laserinterferometersysteme heutzutage häufig als Referenz- und Kalibrierungssysteme verwendet werden, kann man sagen, dass der AS5311 relativ scharfe, genaue und zuverlässige Werte liefert. Der magnetische Encoder kann bei der Messung des Umkehrspiels von Zahnrädern und Getrieben eingesetzt und in Werkzeugmaschinen zur Überwachung des Umkehrspiels integriert werden, um Funktions-, und Fertigungs- und Qualitätsgerechtheit festzustellen.

9 Zusammenfassung

Im Rahmen der Präzisionsmesstechnik, Automatisierung, Robotik und biomedizinischen Anwendungen wird die Messung des Umkehrspiels und damit verbundene Positioniergenauigkeit zu einer anspruchsvollen Aufgabe der Produktionsmesstechnik, verbunden mit vielen Herausforderungen, denen durch laufende Weiterentwicklung begegnet wird.

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit war zweifach. Im theoretischen Teil wurde Hintergrundwissen über die moderne Fertigungsmesstechnik hinsichtlich funktions-, fertigungs- und qualitätsgerechter Prüfung von Werkstücken vermittelt, wie etwa

- die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen und Trends der modernen Fertigungsmesstechnik,
- die verschiedenen Messinstrumente der Fertigungsmesstechnik,
- die Bedeutung der Positioniergenauigkeit, und
- die Messmethoden für die Ermittlung des Umkehrspiels.

Das Hauptziel des praktischen Teils war hingegen die Untersuchung des Umkehrspiels des Harmonic Drives mit Hilfe eines linear magnetischen Encoders. Es wurde untersucht, ob Funktionstauglichkeit und Positioniergenauigkeit des harmonischen Getriebes noch gewährleistet ist oder ob durch Fertigungsfehler oder Abnutzung ein Umkehrspiel stattfindet.

Die Untersuchung des Umkehrspiels wurde realisiert durch die Messung des Umkehrspiels des Harmonic Drives sowohl mit einem linear magnetischen Encoder als auch mit einem Laser-Winkel-Interferometer, sowie durch den Vergleich und die statistische Auswertung der Messergebnisse.

Die erhaltenen Ergebnisse wurden miteinander verglichen und statistisch gemäß ISO 230-2:2014 ausgewertet.

Im ersten Messversuch beträgt der ermittelte Wert des Umkehrspiels mit dem Magnetencoder $\bar{B}_i = 0,2220$ mm, und die Messunsicherheit beträgt $U=0,1330$ mm. Der Laserinterferometer liefert $\bar{B}_i = 0,1950$ mm, die Messunsicherheit ist $U = 0,0674$ mm.

Im zweiten Messversuch werden zwischen 0° und 2° verschiedene Referenzwinkel angefahren und anschließend die Messwerte ermittelt. Der Wert des Umkehrspiels

durch Messung mit dem Magnetencoder beträgt $\bar{B}_i = 0,0312 \mu\text{m}$ und der der Messunsicherheit $U = 0,2332 \text{ mm}$.

Die ermittelten Werte mittels Laserinterferometer im zweiten Versuch sind:

$$\bar{B}_i = 0,0320 \mu\text{m} \text{ und } U = 0,2341 \text{ mm}.$$

Die Messungen mit dem linear magnetischen Encoder AS5311 weisen nur geringfügige Unterschiede mit den Messungen des Laser-Winkelinterferometers auf.

Es kann der Schluss gezogen werden, dass der lineare magnetische Encoder AS5311 in der Lage ist, das Umkehrspiel mit hoher Genauigkeit zu ermitteln und eine gleichwertige Alternative zum Laserinterferometer ist.

Aufgrund des Vergleichs der Messwerte des Magnetencoders mit denen des Laserinterferometers kann der Schluss gezogen werden, dass auch der magnetische Encoder für die Messung des Umkehrspiels in Getrieben geeignet ist und exakte Werte liefert, d.h. die funktions- fertigungs- und qualitätsgerechte Kontrolle durchführen kann.

Durch den Einbau eines Magnetencoders in ein Getriebe wie z.B. in Werkzeugmaschinen kann das Spiel ständig überwacht und Informationen über den Zustand des Getriebes digital an den Benutzer übermittelt werden. Durch den Einsatz des Magnetencoders können Fehler erkannt und notwendige Maßnahmen wie Reparaturen, Servicearbeiten usw. veranlasst werden.

Durch seine Kompaktheit, Genauigkeit und Einfbaufähigkeit hat der magnetische Encoder das Potential, die moderne Produktionsmesstechnik zu revolutionieren und die Fortschritte der Industrie 4.0 voranzutreiben. Ein weiterführender Gedanke wäre, den Encoder nicht nur im Nanobereich zu entwickeln, sondern zu erforschen, ob er noch weiter miniaturisiert werden kann.

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 2.1 Ishikawa-Diagramm [66]
- Abbildung 3.2 Grob- und Feingestalt in der Fertigungstechnik [9]
- Abbildung 3.3 Maße und Abmaße an einer Welle und an einer Bohrung[12]
- Abbildung 3.4 Formabweichung einer Bohrung[15]
- Abbildung 3.5 Beispiele für Form- und Lagetoleranzen [13]
- Abbildung 3.6 Toleriertes Bezugssystem einer Welle [13]
- Abbildung 3.7 Mittenrauwert Ra [13]
- Abbildung 3.8 Gemittelte Rautiefe [13]
- Abbildung 3.9 Beispiel für Rz in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens[13]
- Abbildung 3.10 ISO-GPS_System [13]
- Abbildung 4.11 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen: von links
Normalverteilung, Rechteckverteilung, Dreieckverteilung [24]
- Abbildung 4.12 Erweiterte Messunsicherheit mit Konfidenzniveau von 95% $U(Y) = 2 \cdot u(y)$ [24]
- Abbildung 4.13 t- Verteilung für $n= 2$ und [25]
- Abbildung 4.14 Schematische Darstellung des Nachweises der Konformität oder Nicht-Konformität mit der Spezifikation nach ISO 14253-1[26]
- Abbildung 4.15 Beziehung zwischen der Übereinstimmungs- und Unsicherheitsbereiche in Abhängigkeit der Größe der Messunsicherheit
- Abbildung 5.16 Hilfsmittel und Geräte in der Fertigungsmesstechnik [10]
- Abbildung 5.17 Grundprinzip der Koordinatenmesstechnik [46]
- Abbildung 5.18 Prinzip der Streifenprojektion [77]
- Abbildung 5.19 Encoder Feedback Process [63]
- Abbildung 5.20 Prinzip des Optischen Encoders [63]
- Abbildung 5.21 Vom Inkremental Encoder erzeugte Impulsfolge [63]
- Abbildung 5.22 Absolute Drehwertgeberscheibe mit konzentrischem Kreismuster [63]
- Abbildung 5.23 Encoder Rotor mit Nord- und Südpolen [63]
- Abbildung 6.24 Umkehrspiel im Getriebe [56]
- Abbildung 6.25 Funktionsweise des Umkehrspiels [56]
- Abbildung 6.26 Methode zur Minimierung des Getriebe spiels [57]

- Abbildung 6.37 Verbundzahnrad mit einem Kunststoff-Mittelement [57]
- Abbildung 6.28 Konstruktion eines geteilten Scherengetriebes [57]
- Abbildung 6.29 Ein Gewicht oder eine Feder am Ende eines Zahnradgetriebes hält die Zähne in Kontakt [57]
- Abbildung 6.30 Das Zusammenschieben von kegelförmigen Zahnrädern in axialer Richtung verringert das Zahnspiel [57].
- Abbildung 6.31 Einbausätze des Harmonic Drivs [58]
- Abbildung 7.32 AS5311 mit mehrpoligem Magnetstreifen für Linear-Bewegungserfassung [68]
- Abbildung 7.33 AS5311 mit mehrpoligen Ringmagneten zur Erfassung der Drehbewegung [68]
- Abbildung 7.34 AS5311 Blockschaltbild [65]
- Abbildung 7.35 AS5311 - Ausgänge in Abhängigkeit von der Magnetposition [65]
- Abbildung 7.36 Hauptkomponenten der verwendeten Laser-Winkel-Interferometer-Systeme
- Abbildung 7.37 Harmonic drive verbunden mit abgesetzter Welle und Reitstock auf einem Drehbankbett
- Abbildung 7.38 Aufbau für die Messungen mit dem Magnetencoder
- Abbildung 7.39 Aufbau für die Messungen mit dem Laserinterferometersystem
- Abbildung 7.40 Aufbau der Messung mit einer Messuhr
- Abbildung 8.41 Graphische Darstellung der Messergebnisse der Positionsmessung mit Magnetencoder
- Abbildung 8.42 Graphische Darstellung der Messergebnisse mit Laser Interferometer
- Abbildung 8.43 Graphische Darstellung der Messergebnisse mit dem Magnetencoder
- Abbildung 8.44 Graphische Darstellung der Messergebnisse Laserinterferometer

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1 Relevante ISO-GPS-Normen (angepasst aus [19]).
- Tabelle 2 Für Größenmaß ausgefülltes Matrix-Modell der ISO-GPS-Normen [20]
- Tabelle 3 Bestehende Normen in Bezug auf "Merkmale von Geometrieelementen" dargestellt in einer GPS-Matrix. Siehe [19] und [69]
- Tabelle 4 Vergleich zwischen den Merkmalen der konventionellen Messtechnik und der Koordinatenmesstechnik [48]
- Tabelle 5 Überblick über die Normenreihe ISO 10360
- Tabelle 6 Normen für den Einsatz von CT-Systemen
- Tabelle 7 Vor- und Nachteile taktiler Verfahren gegenüber optischer Verfahren
- Tabelle 8 Vor- und Nachteile des Laserinterferometers
- Tabelle 9 Vergleich von inkrementalen und absoluten Encodern
- Tabelle 10 Überblick über die Umkehrspielkontrollmechanismen
- Tabelle 11 Nanometrologie-Daten vom Raum Labor TU-Wien
- Tabelle 12 Messergebnisse mit dem Magnetencoder - erste Messung des Umkehrspiels des Harmonic Drives
- Tabelle 13 Auswertung der Messunsicherheit Magnetencoder, erste Messung
- Tabelle 14 Messergebnisse mit Laser Interferometer - erste Messung des Umkehrspiels des Harmonic Drives
- Tabelle 15 Auswertung der Messunsicherheit Magnetencoder, zweite Messung
- Tabelle 16 Messergebnisse mit Magnetencoder - zweite Messung des Umkehrspiels des Harmonic Drives
- Tabelle 17 Messergebnisse mit Laser Interferometer - erste Messung des Umkehrspiels des Harmonic Drives
- Tabelle 18 Messergebnisse mit Laser Interferometer - erste Messung des Umkehrspiels des Harmonic Drives
- Tabelle 19 Auswertung der Messunsicherheit Magnetencoder, zweite Messung

Literaturverzeichnis

- [1] <https://1000-zitate.de/9333/Miss-alles-was-sich-messen-laesst.html> (01.07.2023)
- [2] *Jidoka: Meaning & Lean Manufacturing Examples*. (n.d.). SafetyCulture. <https://safetyculture.com/topics/jidoka/#:~:text=The%20origin%20of%20Jidoka%20can> (20.08.2023)
- [3] *YouTube*. (n.d.). www.youtube.com. <https://www.youtube.com/watch?v=vlbssEMzhMo> (11.01.2023, verwendete Stellen aus dem Englischen übertragen vom Autor)
- [4] [https://www.bing.com/videos/search?q=youtube+jidoka+\(lean+Term\)&view=detail&mid=06390C552E6F717983D206390C552E6F717983D2&FORM=VIRE](https://www.bing.com/videos/search?q=youtube+jidoka+(lean+Term)&view=detail&mid=06390C552E6F717983D206390C552E6F717983D2&FORM=VIRE) (13.08.2023, Minute 3:45-3:55, diese Stelle übersetzt vom Autor)
- [5] <https://www.produktion.de/technik/industrie-4-0-die-intelligente%20fabrik%20der%20zukunft> (15.01.2023)
- [6] *Was ist Industrie 4.0 und wie funktioniert es? | IBM*. (n.d.). www.ibm.com. <https://www.ibm.com/de-de/topics/industry-4-0> (15.01.2023)
- [7] leaacker. (2019, October 10). *Aktuelle Trends in der Messtechnik*. Industrie-Wegweiser. <https://industrie-wegweiser.de/messtechnik-trends/> (16.01.2023)
- [8] Bracht, U., Geckler, D., & Wenzel, S. (2018). *Digitale Fabrik*. Springer Vieweg.
- [9] <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00287-017-1061-2.pdf>
- [10] Weckenmann, A., *Koordinatenmesstechnik: flexible Strategien für funktions – und fertigungsgerechtes Prüfen* (2., Vollständig überarbeitete Auflage). München: Hanser Verlag 2012.
- [11] Roithmeier, R. (2020). *Prüfgerechte Tolerierung Maß, Form und Lage* (3.Auflage) Opferkuch GmbH, Ellwangen
- [12] Decker, K.,H. *Maschinenelemente: Gestaltung und Berechnung* (9.Auflage) Carl Hanser Verlag München Wien, 1985
- [13] <https://www.ingenieurkurse.de/maschinenelemente-1/toleranzen-> (08.03.2023)
- [14] <https://3dimetik.de/glossar/unabhaengigkeitsprinzip/> (08.03.2023)
- [15] Haberbauer,H., Bodenstern,F. (2009). *Maschinenelemente: Gestaltung, Berechnung, Anwendung* (15.Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [16] Weckenmann, A., Humienny, Z. et al. (2001). *Geometrische Produktspezifikation (GPS): Kurs für technische Universitäten*. Erlangen [u.a.] Lehrstuhl QFM.
- [17] <https://de.wikipedia.org/wiki/Geometrische-Produktspezifikation>(19.01.2023)
- [18] Köppe-Schmidt, C. (2018, May 2). *ISO-GPS: Matrix-Modell und Grundsätze*. Deutsche Gesellschaft Für Qualität. <https://www.dgg.de/fachbeitraege/iso-gps-matrix-modell-und-grundsaeetze/> (21.01.2023)

- [19] Brabec, D., et al., (2021). ISO GPS: Einführung in die Geometrische Produktspezifikation (1. Auflage). Haan-Gruiten, 2021
- [20] DIN EN ISO 14638:2015-12. Geometrische Produktspezifikation (GPS)-Matrix Modell.
- [21] <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/warum-sie-geometrische-produktspezifikationen-richtig-anwenden-sollten-a-819171/> (15.08.2023)
- [22] DIN EN ISO 9001:2015-11. Qualitätsmanagementsysteme-Anforderungen.
- [23]. B. Brinkmann and D. V, Internationales Wörterbuch der Metrologie: Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) Deutsch-englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007, ser. Beuth Wissen. Beuth Verlag GmbH, 2012, ISBN: 9783410224730. <https://books.google.at/books?id=7HZXXByoiGQC>.
- [24] Hernla, M. (2016). Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen: Ermittlung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit der Unsicherheitsbilanzen. Renningen: Expert Verlag.
- [25]. Papula, L. (2011). Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler-Band 3. (6., überarbeitete und erweiterte Auflage). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- [26] 'Geometrical product specifications (gps) - inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – part 1: decision rules for proving conformity or nonconformity with specifications', International Organization for Standardization, Geneva, CH, Standard, 2013.
- [27] DIN EN ISO 14253-2:2018-09. Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 2: Anleitung zur Schätzung der Unsicherheit bei GPS-Messungen, bei der Kalibrierung von Messgeräten und bei der Produktprüfung (ISO 14253-2:2011).
- [28] *Grundlagen der Messunsicherheit.* (n.d.). www.testotis.de. <https://www.testotis.de/know-how/wissens-center/wissen-messunsicherheit> (20.06.2023)
- [29] J. C. for Guides in Metrology, 'Jcgm 100: Evaluation of measurement data - guide to the expression of uncertainty in measurement', JCGM, Tech. Rep., 2008
- [30] Osanna, P.,H.,et al., (2006) 'Produktionsmesstechnik vom Blickpunkt der internationalen Qualitätsmanagementnormen En/ISO 9000:2000 aus gesehen'.
- [31]. <http://de.wikipedia.org/wiki/Fertigungsmesstechnik> (10. 02.2023)
- [32] Pfeifer, T.,(2001) Fertigungsmesstechnik, München ; Wien: Oldenbourg, 2002, ISBN: 3-486-25885-0.
- [33] Keferstein, Claus P., Marxer, M. (2015). Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren (8., vollständig überarbeitete. und erweiterte Auflage). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015. ISBN: 978-3-8348-2583-4
- [34] D. Imkamp, A. Gabbia and J. Berthold, 'Challenges and trends in manufacturing metrology-vdi/vde roadmap', in Internationales Wissenschaftliches Kolloquium : IWK (Technische Universität Ilmenau) » 58. IWK (2014), 2014. [Online].

[http://www.Db-thueringen.de/servlets/ DerivateServlet/Derivate- 30617/ ilm1-2014iwk-104.pdf](http://www.Db-thueringen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-30617/ilm1-2014iwk-104.pdf)

- [35] Imkamp, D., Frankenfeld, T.: Schnittstellen zur informationstechnischen Integration von Geräten der Fertigungsmesstechnik in die automatisierte Produktion, in: Tagungsband zur Automation 2009, 16.-17. Juni 2009, Baden-Baden, VDI Verlag Düsseldorf 2009
- [36] B. Brinkmann and D.V, Internationales Wörterbuch der Metrologie: Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) Deutsch-englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007, ser. Beuth Wissen. Beuth Verlag GmbH, 2012, ISBN: 9783410224730. [Online]. https://books.google.at/books?id=7HZXXByo_iGQC
- [37] Pavel Müller. (2012). *Coordinate Metrology by Traceable Computed Tomography*.
- [38] Bosse, H., Koenders, L., Schmitt, R.: Von Mikro zu Nano - Roadmap Fertigungsmesstechnik 2020 (Teil 3), Qualität und Zuverlässigkeit QZ, 54. Jg., 2009, Nr. 7, S. 28-31.
- [39] Frenz, H., Schenuit, E.: Sinkende Toleranzschwelle – Roadmap. Fertigungsmesstechnik 2020 (Teil 7), Qualität und Zuverlässigkeit QZ, 54. Jg., 2009, Nr. 11, S. 47-49.
- [40] Naß, M., Berthold, J.: Basis neuer Messtechnologien - Roadmap Fertigungsmesstechnik 2020 (Teil 8), Qualität und Zuverlässigkeit QZ, 55. Jg. 2010, Nr. 1, S. 53-55.
- [41] Imkamp, D., Sommer, K.-D.: Für eine sichere Fertigung, Roadmap Fertigungsmesstechnik 2020 (Teil 4), in: Qualität und Zuverlässigkeit QZ, 54. Jg., 2009, Nr. 8, S. 31-33.
- [42] Weckenmann, A., et al.: Multisensor Data Fusion in Dimensional Metrology, CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009) 701–722.
- [43] Berndt, D., Bauer, N. und F.-A. Vision, Leitfaden zu Grundlagen und Anwendungen der optischen 3-D-Messtechnik. Fraunhofer-IRB Verlag, 2003, ISBN: 9783816762973. [Online]. Available: [https:// books.google.at/books?id=W4XKLtZ8igC](https://books.google.at/books?id=W4XKLtZ8igC).
- [44] J. Kruth, M. Bartscher, S. Carmignato, R. Schmitt, L. De Chiffre and A. Weckenmann, 'Computed tomography for dimensional metrology', CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, Vol.60(2), pp.821-842, issn: 0007-8506.
- [45] Schnell, H.: Hochgeschwindigkeits-Computertomografie zur schnellen, zerstörungsfreien und intelligenten Inspektion und Prozessoptimierung von Aluminium-Gussteilen, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2011.
- [46] Keferstein, Claus P., Marxer, M. (2015). Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren (8., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015. ISBN: 978-3-8348-2583-4
- [47] DIN EN ISO 10360-1:2003-07. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 1: Begriffe.

- [48] R. Hocken and P. Pereira, Coordinate Measuring Machines and Systems, Second Edition, CRC Press, 2012, [Online]. <https://books.google.at/books?id=TGzLBQAAQBAJ>
- [49] DIN EN ISO 9001:2015-11. Qualitätsmanagementsysteme- Anforderungen
- [50] <https://www.artec3d.com/de/learning-center/what-is-cmm-machine> (21.3.2023)
- [51] R. Nol, Lasermesstechnik reagiert besonders schnell; 1. Aufl. Ser. Praxis-Profiline. Würzburg: Vogel Industrie Medien, 2006, pp. 15-17, ISBN: 3-8259-1941-2. [Online]. Available: <http://publications.rwth-aachen.de/reco rd/89403>
- [52] Measurement technologies in quality control purposes, Teaching Manual, version 1.0, Creaform Inc., Creaform Inc. [Online]. http://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_quality_en_24832814.pdf. [Measurement Technologies in QC Purposes \(creaform3d.com\)](https://www.creaform.com/Measurement-Technologies-in-QC-Purposes)
- [53] Kraus; K., Geometrische Infomnationen aus Photographien und Laser scannerafnahmen; photogrammetrie, 8., vollst. Bearb.u.erw.Aufl., erw. Aufl., ser. de Gruyter Lehrbuch. Berlin [u.a.]: de Gruyter, 2014, Aufl. bis 2000 im Dümmler Verlag ersch., ISBN: 3-11-017708-0; 978- 3110-1770-84
- [54] Schuth, M., Buerakov, W.,Handbuch optische Messtechnik: Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung, ISBN: 978-3-446-43634-3 Carl Hanser Verlag GmbH& Co.KG,München.
- [55] Industrial computed tomography scanning, [Online]. <https://www.qualitymag.com/articles/92255-industrial-computed-tomography-scanning> (20.6.2023)
- [56] <https://www.etel.ch/de/bewegungssysteme/definitionen/> (20.08.2023)
- [57] S. J. O'Neil. (1st Mar. 2002). [Methoden zur Minimierung des Getriebebaus | Maschinenkonstruktion \(machinedesign.com\)](https://www.machinedesign.com/methoden-zur-minimierung-des-getriebebaus/) (17.06.2023]
- [58] <https://de.laifualgroup.com/characteristics-and-application-of-harmonic-drive.html> [Eigenschaften und Anwendung des Harmonischen Antriebs - Zhejiang Laifual Drive Co., Ltd \(laifualgroup.com\)](https://www.laifualgroup.com/Eigenschaften-und-Anwendung-des-Harmonischen-Antriebs-Zhejiang-Laifual-Drive-Co.-Ltd) (17.08.2023)
- [59] [https://www.harmonicdrive.net/technology/Harmonic Drive® strain wave gear - zero backlash | Harmonic Drive | Harmonic Drive](https://www.harmonicdrive.net/technology/Harmonic-Drive%20strain-wave-gear-zero-backlash) (02.04.2023)
- [60] Pfeifer, T., & Schmitt, R. (2010). *Fertigungsmesstechnik*. Oldenbourg Verlag.
- [61] Online:http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~tcs3/tcs3/0306_conceptual_design/Docs/05_Encoders/encoder_primer.pdf (2.4.2023)
- [62] <https://www.celeramotion.com/microe/de/optischer-encoder> (14.05.223)
- [63] <https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/encoder-guide.php> (01.07.2023)
- [64] <https://cdn.automationdirect.com/static/press/encoder-white-paper.pdf> (02.07.2023)
- [65] *Product Document Published by ams OSRAM Group.* (n.d.). https://ams.com/documents/20143/36005/AS5311_DS000200_2-00.pdf/575d252f-096b-e5ab-5d8f-d504fd005062 (28.8.2023, Datenblatt Encoder AS5311)

- [66] <https://www.bing.com/images/search?q=ishikawa-diagramm&form=IQFRML&first=1&cw=1177&ch=244> (17.08.2023)
- [67] Dutschke, W. (2002). *Form und Lage*. https://doi.org/10.1007/978-3-322-96810-4_11 (01.07.2023)
- [68] Demirtas, G, (2016) Einsatz und Genauigkeit von Drehtischen in der modernen Produktionsmesstechnik. Analyse und Evaluierung der Umkehrspanne mittels eines Inkrementalgebers, Laserinterferometers und Koordinatenmessgerätes. Diplomarbeit TU-Wien.
- [69] Durakbasa, N. (2018), *Basic Nanotechnology and Nanometrology*. Wien, 2018. TU-Wien.
- [70] B. Brinkmann and D. V, *Internationales Wörterbuch der Metrologie: Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) Deutsch-englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007*, ser. Beuth Wissen. Beuth Verlag GmbH, 2012, isbn: 9783410224730.
- [71] Zollondz, H. D. (2016). *Lexikon Qualitätsmanagement Handbuch des Modernen Managements auf der Basis des Qualitätsmanagements*. Berlin De Gruyter Oldenbourg.
- [72] https://www.bipm.org/documents/20126/50065290/JCGM_GUM_6_2020.pdf/d4e77d99-3870-0908-ff37-c1b6a230a337 (16.08.2023)
- [73] Osanna, P. H., Durakbasa, M. N., & Kräuter, L. (2009). Industrial Metrology of the Viewpoint of Nanotechnology and Nanometrology. *Tehnika*, 3(Vol.9), 9–16. <http://hdl.handle.net/20.500.12708/165985>.
- [74] Keferstein, C. P., Marxer, M., & Bach, C. (2018). *Fertigungsmesstechnik*. 9. überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer Vieweg. 2018.
- [75] Toyota Industries Corporation. (2014). *The Story of Sakichi Toyoda | Toyota Industries Corporation*. Toyota-Industries.com. https://www.toyota-industries.com/company/history/toyoda_sakichi/ (24.08.2023)
- [76] <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdivde-2617-blatt-10-genauigkeit-von-koordinatenmessgeraeten-kenngroessen-und-deren-pruefung-annahme-und-bestaetigungspruefung-von-lasertrackern> (17.08.2023)
- [77] *heise online*. Heise Online. <http://www.heise.de> (18.08.2023)
- [78] *Informationsdienst Wissenschaft - News*. (n.d.). Idw-Online.de. <http://idw-online.de> (19.08.2023)
- [79] *Heinz Nixdorf Institut: Startseite*. (n.d.). www.hni.uni-paderborn.de. <http://www.hni.uni-paderborn.de> (16.08.2023)
- [80] *IVAM - IVAM Fachverband für Mikrotechnik*. (n.d.). www.ivam.com. <http://ivam-microtechnology.net> (18.08.2023)
- [81] Osanna, P.,H., Durakbasa, M.N, Afjehi-Sadat A. (2006). *Gemetrische Produkt-Spezifikation und Verifikation – GPS*. TU-Wien, ISBN3-901888-14-4.

- [82] *Page-Tec e.K. - Softwareentwicklung.* (2022). Qm-World.de. <http://www.qm-world.de> (21.8.2023)
<https://www.hanser-elibrary.com/doi/pdf/10.3139/9783446429475.fm> (17.08.2023)
- [83] Klein, M. (2013). *Klein Einführung in die DIN-Normen.* Springer-Verlag.
- [84] Committee.iso.org. <https://committee.iso.org/home/tc213> (22.08.2023)
- [85] <https://www.europa-lehrmittel.de/leseprobe/10212-1.pdf> (22.08.2023)
- [86] *OPUS 4 – KOBV.* (n.d.). www.kobv.de. <http://opus4.kobv.de> (23.8.2023)
- [87] *JCGM GUM-6:2020 Guide to the expression of uncertainty in measurement - Part 6: Developing and using measurement models Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure -Partie 6: Élaboration et utilisation des modèles de mesure.* (n.d.). https://www.bipm.org/documents/20126/50065290/JCGM_GUM_6_2020.pdf/d4e77d99-3870-0908-ff37-c1b6a230a337 (23.8.2023)
- [88] *Alle Seiten - Unionpedia.* (n.d.). De.unionpedia.org. <https://de.unionpedia.org/Messverst%C3%A4rker> (27.8.2023)
- [89] Bauer J. (2016) Präsentation im Rahmen der Lehrveranstaltung Prof. Durakbasa, 311.169 Intelligente Automation der QS und Produktionsmesstechnik „Jidoka“ im Rahmen von IMFiF) Intelligent Multi - Functions Integrated Factory)“ Juni 2016 AuM-TuWien
- [90] Kneppers, R., & Packard, H. (n.d.). https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/VN151_HP_Laser_Interferometers.pdf (28.8.2023, Datenblatt Laser Interferometer)
- [91] *Datenblatt für Messuhren Data Sheet Dial Gauges.* (n.d.). https://www.kaefer-messuhren.de/files/kaefer-messuhren/pdf/datenblaetter/1038_1209_mu52t.pdf (28.8.2023)
- [92] *ISO : Begriffe - PDF Free Download.* (n.d.). Docplayer.org. <https://docplayer.org/79042002-Iso-begriffe.html> (01.09.2023)

Anhang

Anhang 1: Wichtige Spezifikationen von AS5311 (aus Datenblatt [89])

Symbol	Parameter	Not	Max	Units
INL_{opt}	Integral non-linearity (optimum)	Maximum error with respect to the best line fit. Ideal magnet $T_{AMB} = 25\text{ °C}$	± 5.6	μm
INL_{temp}	Integral non-linearity(over temperature)	Maximum error with respect to the best line fit. Ideal magnet $T_{amb} = -30\text{ to }70\text{ °C}$	± 10	μm
DNL	Diferential non-Linearity	10 bit, no missing codes	± 0.97	μm
TN	Transition noise	1 Sigma	0.6	μmRMS

Anhang 2: Messuhr, aus Datenblatt Käfer Messuhren [91].

Messtechnische Merkmale DIN EN ISO 463

Messwertumkehrspanne (MPE)	3 μm
Wiederholgrenze (MPE)	3 μm
Messabweichung (MPE) der Anzeige über einen Bereich von	
1/10 Umdrehung	5 μm
1/2 Umdrehung	9 μm
1 Umdrehung	10 μm
Messbereich	15 μm

Anhang 3: Erfasste Messwerte des Harmonic Drive mit Magnetencoder und Laserinterferometer, erste Messung

	0-1080°	Umdrehungen			Grad		Differenzen			
		1. Messung			Magnetic Encoder (Grad)	Laser-Interferometer (Grad)	Differenz (Grad)	Magnetic Encoder (Grad)	Laser-Interferometer (Grad)	Differenz (Grad)
		Winkel-position (Grad)	Encoder (µm)	Laser (Arc/s)						
1	+	0	0.0	0	0.0000	0.0000	0.0000			
		360	6220.7	21446	6.0410	5.9572	0.0838	6.0410	5.9572	0.0838
		720	12537.1	43568	12.1750	12.1022	0.0727	6.1340	6.1450	-0.0110
		1080	18804.7	66031	18.2615	18.3419	-0.0804	6.0866	6.2397	-0.1532
		>1080								
	-	1080	19015.6	66690	18.4663	18.5250	-0.0587	-18.4663	-6.2406	-12.2258
		720	12720.7	44224	0.0000	12.2844	-12.2844	6.2800	-6.1503	12.4303
		360	6466.8	22083	6.2800	6.1342	0.1458	-6.1112	-5.9950	-0.1162
		0	173.8	501	0.1688	0.1392	0.0296			
2	+	Messreihe	Encoder	Laser	Encoder (Grad)	Laser (Grad)	Laser (Grad)	Encoder (Grad)	Laser (Grad)	Differenz (Grad)
		0	38.3	-112	0.0372	-0.0311	0.0683			
		360	6224.6	21459	6.0448	5.9608	0.0840	6.0076	5.9919	0.0157
		720	12517.6	43491	12.1560	12.0808	0.0752	6.1112	6.1200	-0.0088
		1080	18767.6	66087	18.2255	18.3575	-0.1320	6.0695	6.2767	-0.2072
	-	>1080								
		1080	19021.5	66711	18.4721	18.5308	-0.0588	-6.1226	-6.2503	0.1277
		720	12716.8	44210	12.3495	12.2806	0.0689	-6.0903	-6.1636	0.0733
		360	6445.3	22021	6.2591	6.1169	0.1422	-6.1036	-5.9858	-0.1177
		0	160.2	472	0.1556	0.1311	0.0245			
3	+	Messreihe	Encoder	Laser	Encoder (Grad)	Laser (Grad)	Laser (Grad)	Encoder (Grad)	Laser (Grad)	Differenz (Grad)
		0	43.5	-123	0.0422	-0.0342	0.0764			
		360	6226.6	21438	6.0467	5.9550	0.0917	6.0045	5.9892	0.0153
		720	12543.0	43549	12.1807	12.0969	0.0837	6.1340	6.1419	-0.0080
		1080	18781.2	66095	18.2387	18.3597	-0.1210	6.0580	6.2628	-0.2048
	-	>1080								
		1080	19048.8	66749	18.4986	18.5414	-0.0428	-6.1206	-6.2397	0.1191
		720	12746.1	44286	12.3779	12.3017	0.0763	-6.0903	-6.1667	0.0763
		360	6474.6	22086	6.2876	6.1350	0.1526	-6.1358	-6.0050	-0.1308
		0	156.3	468	0.1518	0.1300	0.0218			
4	+	Messreihe	Encoder	Laser	Encoder (Grad)	Laser (Grad)	Laser (Grad)	Encoder (Grad)	Laser (Grad)	Differenz (Grad)
		0	47.1	-98	0.0457	-0.0272	0.0730			
		360	6232.4	21473	6.0524	5.9647	0.0877	6.0066	5.9919	0.0147
		720	12543.0	43594	12.1807	12.1094	0.0712	6.1283	6.1447	-0.0164
		1080	18796.9	65984	18.2539	18.3289	-0.0749	6.0733	6.2194	-0.1462
	-	>1080								
		1080	19031.3	66726	18.4816	18.5350	-0.0534	-6.0979	-6.2244	0.1265
		720	12752.0	44318	12.3837	12.3106	0.0731	-6.0847	-6.1614	0.0767
		360	6486.3	22137	6.2989	6.1492	0.1498	-6.1358	-6.0108	-0.1250
		0	168.0	498	0.1631	0.1383	0.0248			
5	+	Messreihe	Encoder	Laser	Encoder (Grad)	Laser (Grad)	Laser (Grad)	Encoder (Grad)	Laser (Grad)	Differenz (Grad)
		0	16.4	-152	0.0159	-0.0422	0.0581			
		360	6185.5	21338	6.0068	5.9272	0.0796	5.9909	5.9694	0.0215
		720	12529.3	43527	12.1674	12.0908	0.0766	6.1606	6.1636	-0.0031
		1080	18755.9	65969	18.2141	18.3247	-0.1106	6.0467	6.2339	-0.1871
	-	>1080								
		1080	19015.6	66670	18.4663	18.5194	-0.0531	-6.0998	-6.2217	0.1219
		720	12734.4	44272	12.3666	12.2978	0.0688	-6.0999	-6.1683	0.0685
		360	6453.1	22066	6.2667	6.1294	0.1373	-6.1226	-6.0039	-0.1187
		0	148.4	452	0.1441	0.1256	0.0186			
6	+	Messreihe	Encoder	Laser	Encoder (Grad)	Laser (Grad)	Laser (Grad)	Encoder (Grad)	Laser (Grad)	Differenz (Grad)
		0	57.2	-125	0.0555	-0.0347	0.0903			
		360	6242.2	21436	6.0619	5.9544	0.1074	6.0063	5.9892	0.0172
		720	12500.0	43552	12.1389	12.0978	0.0412	6.0770	6.1433	-0.0663
		1080	18773.4	65932	18.2311	18.3144	-0.0833	6.0922	6.2167	-0.1245
	-	>1080								
		1080	19050.8	66730	18.5005	18.5361	-0.0356	-6.0961	-6.2067	0.1106
		720	12773.4	44386	12.4044	12.3294	0.0750	-6.1055	-6.1858	0.0803
		360	6486.3	22117	6.2989	6.1436	0.1553	-6.0998	-5.9883	-0.1114
		0	205.1	559	0.1992	0.1553	0.0439			
7	+	Messreihe	Encoder	Laser	Encoder (Grad)	Laser (Grad)	Laser (Grad)	Encoder (Grad)	Laser (Grad)	Differenz (Grad)
		0	33.4	-109	0.0324	-0.0303	0.0627			
		360	6214.8	21424	6.0353	5.9511	0.0842	6.0028	5.9814	0.0215
		720	12472.7	43549	12.1124	12.0969	0.0155	6.0771	6.1458	-0.0687
		1080	18761.7	66003	18.2198	18.3342	-0.1144	6.1073	6.2372	-0.1299
	-	>1080								
		1080	19013.7	66717	18.4645	18.5325	-0.0680	-6.1131	-6.2294	0.1164
		720	12718.8	44291	12.3514	12.3031	0.0484	-6.0979	-6.1811	0.0832
		360	6439.5	22039	6.2535	6.1219	0.1315	-6.0866	-5.9781	-0.1085
		0	171.9	518	0.1669	0.1439	0.0230			
8	+	Messreihe	Encoder	Laser	Encoder (Grad)	Laser (Grad)	Laser (Grad)	Encoder (Grad)	Laser (Grad)	Differenz (Grad)
		0	52.6	-134	0.0511	-0.0372	0.0883			
		360	6242.2	21431	6.0619	5.9531	0.1088	6.0108	5.9903	0.0205
		720	12492.2	43520	12.1314	12.0889	0.0425	6.0695	6.1358	-0.0664
		1080	18771.5	65950	18.2293	18.3194	-0.0902	6.0979	6.2306	-0.1326
	-	>1080								
		1080	19039.1	66712	18.4892	18.5311	-0.0420	-6.1188	-6.2242	0.1054
		720	12738.3	44305	12.3704	12.3069	0.0634	-6.0790	-6.1092	0.0302
		360	6478.5	22312	6.2914	6.1978	0.0936	-6.1055	-6.0492	-0.0563
		0	191.4	535	0.1859	0.1486	0.0373			

