



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Paul Alejandro, Coronel Andrade

Erarbeitung von Empfehlungen für die messtechnikgerechte Konstruktion

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Paul Alejandro, Coronel Andrade

**Erarbeitung von Empfehlungen für die
messtechnikgerechte Konstruktion**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Produktionstechnik und Management
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Ing. Mauricio de Campos Porath
Zweitprüfer/in: Prof. Dr. Ing. Christian Müller

Abgabedatum: 11.04.2025

Zusammenfassung

Name des Studierenden: Paul Alejandro, Coronel Andrade

Thema der Masterthesis: Erarbeitung von Empfehlungen für die messtechnikgerechte Konstruktion

Stichworte

Design for Inspection (DFI), Geometrische Produktspezifikation (GPS),
Koordinatenmesstechnik (KMG), Messunsicherheit, Wiederholbarkeit.

Kurzzusammenfassung

Diese Masterarbeit befasst sich mit der Entwicklung praxisorientierter Empfehlungen zur prüfgerechten geometrischen Produktspezifikation im Sinne des Design for Inspection (DFI). Ziel ist es, Konstruktionsrichtlinien zu formulieren, die eine zuverlässige, normgerechte und wirtschaftliche Inspektion von Bauteilen bereits in der frühen Entwicklungsphase ermöglichen. Aufbauend auf einer fundierten Analyse einschlägiger GPS-Normen sowie etablierter DFX-Ansätze, werden zunächst allgemeine DFI-Prinzipien formuliert. Daran anschließend werden vier Experimente unter realitätsnahen Bedingungen durchgeführt, die zentrale Einflussfaktoren auf Messzugänglichkeit, Stabilität und Wiederholgenauigkeit untersuchen. Die Ergebnisse dienen der Ableitung spezifischer Empfehlungen zur Optimierung von Toleranzspezifikationen und Bezugssystemen. Abschließend wird eine strukturierte Methodik zur Implementierung von DFI in vier Entwicklungsphasen vorgestellt, einschließlich der Nutzung standardisierter Checklisten. Die Arbeit leistet damit einen Beitrag zur Integration messtechnischer Anforderungen in den Konstruktionsprozess und zur Steigerung der Produktqualität über den gesamten Lebenszyklus hinweg.

Name of Student: Paul Alejandro, Coronel Andrade

Title of the paper: Development of Recommendations for Metrology-Compliant Design in Mechanical Engineering Components

Keywords

Design for Inspection, Geometrical Product Specification (GPS), Coordinate Measuring Machine (CMM), Measurement Uncertainty, Repeatability

Abstract

This master's thesis addresses the development of practical recommendations for product oriented geometric specification based on the principles of Design for Inspection (DFI). The goal is to formulate design guidelines that ensure reliable, standardized, and cost-effective inspection of components from the early stages of development process. Drawing upon an in-depth analysis of relevant GPS standards

and established DFX methodologies, the thesis begins by defining general DFI principles. These are followed by four experiments conducted under realistic conditions, investigating key factors affecting measurement accessibility, stability, and repeatability. The experimental findings are used to collect specific recommendations for optimizing tolerancing strategies and datum structures. Finally, a structured methodology for implementing DFI across four development phases is proposed, including standardized checklists. This work contributes to the integration of metrological considerations into the design process and supports enhanced product quality throughout the lifecycle.

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion

Erarbeitung von Empfehlungen für die messtechnikgerechte Konstruktion

Masterarbeit

im Studiengang

Produktionstechnik und Management

vorgelegt von

Coronel Andrade, Paul Alejandro



Hamburg

am 10.04.2025

Gutachter: Prof. Dr. Ing. Mauricio de Campos Porath (HAW-Hamburg)

Gutachter: Prof. Dr. Ing. Christian Müller (HAW-Hamburg)

1	Tabelleverzeichnis.....	VI
2	Abbildungsverzeichnis.....	VI
3	Einleitung.....	1
4	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	3
5	Stand der Technik.....	5
5.1	Koordinatenmesstechnik.....	5
5.1.1	Prinzip der Koordinatenmesstechnik.....	6
5.1.2	Gerätetechnik.....	7
5.1.3	Sensoren	10
5.1.4	Ermittlung der Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen	15
5.2	Relevante GPS-Normen für die Umsetzung von DFI.....	16
5.2.1	Bedeutung der GPS-Normen für DFI.....	16
5.2.2	Auswahl und Tolerierung geometrischer Merkmale.....	17
5.2.3	Anwendung des Hüllbedingungenkonzepts	18
5.2.4	Form- und Lagetoleranzen im Kontext der Messbarkeit	19
5.2.5	Relevanz der ISO-Normen für DFI-konforme Zeichnungen	19
5.2.6	Zwischenreferenzflächen in der GPS-konformen Konstruktionspraxis.....	20
5.3	Design for X (DFX)	21
5.3.1	Desing for Inspection (DFI).....	21
5.3.2	Anwendung der DFI.....	23
5.3.3	Vorteile und Herausforderungen der DFI-Implementierung	25
6.	Allgemeine Empfehlungen.....	27
6.1.	Messung von Kreisbögen mit kleinen Winkeln und großen Radien.....	27
6.2.	Auswahl und Definition von Bezugsebenen.....	29
6.3.	Konstruktion von Prüfmerkmalen	31
6.4.	Neigungen und Fasen	34
6.5.	Notizen und Dokumentation auf den Zeichnungen	36
7.	Versuchen	38
7.1.	Experiment 1: Einfluss der Neigung auf die dimensionsbezogene Messung – Bewertung der messtechnischen Stabilität bei unterschiedlichen Tasterkugeldurchmessern.....	40
7.2.	Experiment 2: Einfluss der Tasterlänge auf die Messgenauigkeit – Analyse von Biegung und Vibration bei der Prüfung zylindrischer Oberflächen	43
7.3.	Experiment 3: Strategische Auswahl von Bezügen – Einfluss auf die Messstabilität und Wiederholgenauigkeit bei der Positionsbestimmung	46
7.4.	Experiment 4: Optimierung der Definition von Bezügen – Bewertung der Reduktion von Referenzflächen ohne Beeinträchtigung der Messgenauigkeit	48

7.5.	Gesamtsynthese der experimentellen Untersuchungen und Ausblick auf die Umsetzung des DFI	51
8.	Implementierung DFI	52
8.1.	Phase 1: Frühe Validierung der Messzugänglichkeit (basierend auf Experiment 1)	53
8.2.	Phase 2: Optimierung der Auswahl von Bezügen (basierend auf den Experimenten 3 und 4)	55
8.3.	Phase 3 Berücksichtigung des Messequipments und dessen Einfluss auf die Inspektionsstabilität (basierend auf Experiment 2)	57
8.4.	Phase 4: Einsatz virtueller Inspektionssimulationen zur frühzeitigen Validierung der Messbarkeit	58
8.5.	Dokumentation, Standardisierung und kontinuierliche Optimierung des DFI	61
9.	Zusammenfassung und Ausblick	64
10.	Literatur	66
11.	Anhang	70
	Anhang A: Messkörper von Eurometron und seinen Maßen	70
	Anhang B: Taster	71
	Anhang C: Messstrategie und Ergebnisse:	72
	Messtrategie	72
	C-1. Experiment	72
	C-2. Experiment 2	73
	C-3. Experiment	75
	C-4. Experiment 4	76
	Anhang D: Checklisten für die Implementierung des DFI	78
	D-1. Checklist für Phase 1	78
	D-2. Bewertungsprotokoll für Bezugsflächen	79
	D-3. DFI-Checkliste zur frühen Entwurfsüberprüfung (Phase 1)	80
	D-4 Dokumentationsvorlage für Inspektionswege	82
	D-5 Validierungsprotokoll zur Überprüfung der DFI-Kriterien am Prototyp	83

1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Inspektionsfunktionen im Rahmen von DFI [26]	23
Tabelle 2. Maße der Taster für die Versuchen/Experimenten	71
Tabelle 3. Messung-.....	72
Tabelle 4. Messung-.....	73
Tabelle 5. Messung-.....	75
Tabelle 6. Messung-.....	76
Tabelle 7. Checkliste zur Messzugänglichkeit (DFI Phase 1)	78
Tabelle 8. Bewertungsprotokoll (Experiment 3 als Beispiel).....	79
Tabelle 9. DFI-Entwurfsüberprüfung	80
Tabelle 10. Inspektionswege-DFI.....	82
Tabelle 11. Validierungsprotokoll.....	83

2 Abbildungsverzeichnung

Abbildung 1. Konventionelle Bauarten für Koordinatenmessgeräte. [4]	7
Abbildung 2. unkonventionelle Bauarten für Koordinatenmessgeräte. [4]	8
Abbildung 3. Tastelemente. a) Tastelemente mit Antastkugel, Verlängerungen, b) Scheibentaster. [4]	9
Abbildung 4. Kugelnorm, Marke Zeiss. [4]	10
Abbildung 5. Komponenten eines 3D Tastsystems. [4]	12
Abbildung 6. Sensoren für KMG. [8].....	14
Abbildung 7. System der geometrischen Produktspezifikation. [17].....	18
Abbildung 8. Vereinbarung der Hüllbedingung auf einer technischen Zeichnung. [8].....	18
Abbildung 9. Linienprofiltoleranz bei Radien mit kleinen Winkeln [27]	28
Abbildung 10. Lange Bezugssystem.....	31
Abbildung 11. vernünftige Zugänglichkeit I	33
Abbildung 12. Neigung	36
Abbildung 13. 1. Versuch- Seitenansicht.....	41
Abbildung 14. 2. Versuch- Schnittansicht	43
Abbildung 15. Erste Variante von Eurometron	46
Abbildung 16. 3. Versuch	48

Abbildung 17. 4. Versuch	51
Abbildung 18. Inspektionsfunktionen-Implementierung der DFI.....	63
Abbildung 19. 3D-Darstellung von Eurometron GmbH [28].....	70
Abbildung 20. Vorlage Taster- Zeiss	71
Abbildung 21. Graphik- Experiment 1	72
Abbildung 22. Graphik-Experiment 2	73
Abbildung 23. Graphik, Experiment 4	75
Abbildung 24. Graphik-Experiment 4	76

3 Einleitung

Im Laufe der Jahre hat sich die Messtechnikbranche kontinuierlich weiterentwickelt und auf die Konstruktion und Optimierung von Geräten in verschiedenen industriellen Bereichen spezialisiert. Insbesondere bei Komponenten hochpräziser Geräte stellen die gestiegenen Anforderungen an die geometrische Genauigkeit eine große Herausforderung für die Messtechnik dar. Diese Komplexität führt in der Praxis nicht selten zu Schwierigkeiten bei der Prüfplanung und Qualitätssicherung, insbesondere dann, wenn kritische Merkmale erst spät im Entwicklungsprozess messtechnisch berücksichtigt werden. Dadurch steigt nicht nur der Aufwand in der Fertigung und Qualitätssicherung, sondern es entstehen auch zusätzliche Kosten sowie potenzielle Risiken für die Funktionssicherheit des Endprodukts. [1]

Vor diesem Hintergrund gewinnt das frühzeitige Einbeziehen von Prüfanforderungen bereits in der Konstruktionsphase zunehmend an Bedeutung. Dies hat zur Entwicklung innerhalb methodischer Ansätze geführt, die unter dem Begriff Design for X (DFX) zusammengefasst werden. DFX bezeichnet ein systematisches Konstruktionsparadigma, das darauf abzielt, unterschiedliche Aspekte des Produktlebenszyklus, etwa Fertigung (DFM), Montage (DFA), Nachhaltigkeit (DFS), Kosten (DFC) oder Inspektion (DFI), bereits während der Entwurfsphase zu berücksichtigen [2]. Ziel ist es, durch gezielte konstruktive Maßnahmen die Effizienz in Produktion und Betrieb zu erhöhen, potenzielle Fehlerquellen zu minimieren, Kosten zu senken und die Gesamtqualität sowie Nachhaltigkeit des Produkts zu verbessern.

Im Fokus dieser Arbeit steht das Konzept Design for Inspection (DFI). Dieses zielt darauf ab, die geometrische Auslegung von Bauteilen so zu gestalten, dass die spätere dimensionelle Prüfung effizient, zuverlässig und normgerecht durchgeführt werden kann. Durch die systematische Integration messtechnischer Überlegungen in die Konstruktion sollen typische Messprobleme frühzeitig erkannt und vermieden werden. Damit leistet DFI einen zentralen Beitrag zur Reduktion von Prüfaufwand und Nacharbeit und fördert die durchgängige Rückverfolgbarkeit und Qualitätssicherung im Entwicklungsprozess. [3]

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst übergreifende, aus der Fachliteratur und geltenden Normen abgeleitete Prinzipien des Design for Inspection (DFI) aufgearbeitet, mit dem Ziel, grundlegende Empfehlungen für die geometrische Auslegung von Bauteilen in frühen Entwicklungsphasen zu formulieren. Diese allgemeinen Handlungsempfehlungen richten sich

an Konstrukteurinnen und Konstrukteure, die eine prüfgerechte Gestaltung technischer Produkte anstreben, und dienen als methodische Grundlage für die spätere experimentelle Validierung. Aufbauend auf diesen theoretischen Leitlinien werden im weiteren Verlauf der Arbeit spezifische DFI-Empfehlungen auf Basis von vier gezielt konzipierten Experimenten abgeleitet, die an exemplarischen mechanischen Komponenten unter realitätsnahen Bedingungen durchgeführt wurden.

Die Experimente analysieren zentrale Einflussgrößen auf die Messzugänglichkeit, Stabilität und Wiederholbarkeit im Kontext der Koordinatenmesstechnik (KMG) und liefern datenbasierte Erkenntnisse zur Optimierung geometrischer Spezifikationen im Hinblick auf deren Inspektionsfähigkeit.

Ziel der Arbeit ist es somit, auf Grundlage eines wissenschaftlich fundierten und zugleich praxisorientierten DFI-Ansatzes konkrete Empfehlungen für die Konstruktion geometrischer Merkmale zu formulieren, die eine effektive und wirtschaftliche Integration von Prüfprozessen in den Produktentwicklungszyklus ermöglichen. Die frühzeitige Berücksichtigung der Inspektionsanforderungen trägt dabei nicht nur zur Reduktion von Messunsicherheiten und Prüfkosten bei, sondern fördert auch die funktionsgerechte Absicherung der Produktqualität über den gesamten Lebenszyklus hinweg.

4 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit besteht darin, praxisorientierte Empfehlungen für die geometrische Produktspezifikation zu erarbeiten, wobei der Fokus auf Komponenten technischer Produkte liegt, die hohe Anforderungen an die Maßhaltigkeit und Inspektionsfähigkeit stellen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der frühzeitigen Integration messtechnischer Überlegungen im Sinne des Design for Inspection (DFI). Zur Erreichung dieses Ziels werden die folgenden Teilaufgaben bearbeitet:

1. **Identifikation zentraler Konzepte und Grundlagen:** Durch eine umfassende Literaturrecherche werden die wesentlichen Elemente des Design for X (DFX)-Ansatzes herausgearbeitet, wobei besonderes Augenmerk auf das Teilkonzept Design for Inspection (DFI) gelegt wird. Es gilt, ein tragfähiges theoretisches Fundament zu entwickeln, das die spätere Umsetzung und Bewertung sinnvoll unterstützt.
2. **Erarbeitung allgemeiner DFI-Empfehlungen:** Basierend auf wissenschaftlicher Literatur, branchenspezifischen Standards und etablierten Best Practices werden allgemeine Empfehlungen zur geometrischen Produktspezifikation formuliert. Diese berücksichtigen insbesondere die Anforderungen an eine effektive und normgerechte Qualitätsprüfung.
3. **Experimentelle Validierung:** Um die Wirksamkeit und Anwendbarkeit der erarbeiteten Empfehlungen zu evaluieren, werden gezielte Experimente durchgeführt. Diese beinhalten unter anderem den Vergleich der Inspektionsqualität und -effizienz vor und nach der Umsetzung der DFI-Prinzipien, insbesondere unter Einsatz taktiler Koordinatenmesstechnik.
4. **Ableitung spezifischer Handlungsempfehlungen:** Aus der Analyse der Experimente werden gezielt konstruktive Empfehlungen abgeleitet. Dabei stehen die Optimierung der Prüfplanung, der Zugang zu relevanten Merkmalen sowie die Reduzierung potenzieller Messunsicherheiten im Fokus.

5. **Überführung in Konstruktionsrichtlinien:** Abschließend werden die validierten Erkenntnisse systematisch in Konstruktionsrichtlinien überführt, sodass eine nachhaltige Integration in zukünftige Entwicklungsprozesse gewährleistet ist. Diese unterstützt eine stärkere Standardisierung und Konsistenz bei der geometrischen Auslegung prüfkritischer Bauteile.

Dieser strukturierte Forschungsansatz verfolgt das Ziel, die Inspektionsfähigkeit technischer Produkte bereits in der frühen Entwicklungsphase zu sichern. Dadurch sollen nicht nur Qualität und Effizienz der Prüfprozesse verbessert, sondern auch strategische Potenziale zur Kostensenkung und Prozessvereinfachung erschlossen werden.

5 Stand der Technik

Dieses Kapitel erläutert zentrale Begriffe und Prinzipien der Koordinatenmesstechnik, die für das Verständnis der in dieser Arbeit behandelten Thematik wesentlich sind. Darüber hinaus wird das Konzept Design for Inspection (DFI) im Kontext aktueller Entwicklungen in der Messtechnik analysiert und seine Relevanz für die frühzeitige Integration in die Produktentwicklung begründet.

5.1 Koordinatenmesstechnik

Koordinatenmessgeräte (KMG) sind hochpräzise, vielseitig einsetzbare Messsysteme, die in zahlreichen Bereichen der Fertigungsindustrie, von der Kleinserienproduktion bis zur Großindustrie, verwendet werden. Ihr Hauptzweck liegt in der Erfassung geometrischer Merkmale von Bauteilen, die mit konventionellen Messmitteln nur unzureichend oder mit hohem Aufwand geprüft werden könnten. KMGs setzen ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem physikalisch um und ermöglichen so eine exakte Positionsbestimmung einzelner Messpunkte im Raum [4].

Obwohl es auch andere Messsysteme gibt, die kartesische Messergebnisse liefern, zeichnen sich klassische KMGs insbesondere durch ihre geradlinig geführten Bewegungsachsen (X, Y, Z) aus, was sie für die Erfassung komplexer Bauteilgeometrien besonders geeignet macht. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus auf KMG-Systeme gelegt, die mit einem kartesischen Achsenlayout arbeiten. Weitere Varianten wie zylinder- oder polar-koordinatige Systeme werden nicht näher betrachtet [4].

Die grundlegende Funktion eines KMGs besteht darin, die reale Oberfläche eines Werkstücks durch taktile oder optische Antastung zu erfassen und daraus metrologische Informationen wie Formabweichungen, Maßhaltigkeit, Positions- und Lagebeziehungen abzuleiten [5]. Die Erfassung erfolgt dabei punktuell oder flächenhaft durch Sensoren, deren Daten anschließend

rechnerisch ausgewertet werden. Je nach Sensorik und Auswertung können Richtungsvektoren bestimmt werden, die eine Gruppierung der Messpunkte nach Oberflächenausrichtung ermöglichen – ein Aspekt, der wesentlich zur Erhöhung der Messgenauigkeit beiträgt [4].

5.1.1 Prinzip der Koordinatenmesstechnik

Dieses Kapitel widmet sich den grundlegenden Begriffen und Konzepten der Koordinatenmesstechnik, die als methodische und normative Basis für die Analyse und Umsetzung des Design for Inspection (DFI) in dieser Arbeit dienen. Im Zentrum stehen dabei zentrale Prinzipien der geometrischen Produktspezifikation (GPS) sowie die relevanten ISO-Normen, insbesondere ISO 1101, ISO 5459 und ISO 14405, welche die form- und lagebezogene Tolerierung im technischen Zeichnungswesen regeln. [6]

Ein besonderer Fokus liegt auf der Messbarkeit geometrischer Merkmale, da diese nicht nur durch die Fertigungstechnologie, sondern maßgeblich durch die Toleranzangaben und deren Interpretation beeinflusst wird [7]. Die korrekte Anwendung der genannten Normen ermöglicht die Definition funktionaler, prüfbarer und wirtschaftlich kontrollierbarer Geometrieansprüche, ein zentrales Anliegen im Sinne des DFI [1]. Form- und Lagetoleranzen müssen im Zusammenhang mit der messtechnischen Umsetzung gedacht werden, wobei Aspekte wie Zugänglichkeit, Stabilität von Bezügen und Wiederholgenauigkeit des Messprozesses bereits in der Konstruktionsphase berücksichtigt werden sollten [8].

Darüber hinaus wird die Rolle der GPS-Normen im Kontext DFI-konformer Zeichnungen analysiert: Eine prüfgerechte Spezifikation setzt voraus, dass die gewählten Toleranzen nicht nur funktional relevant, sondern auch messtechnisch überprüfbar sind [6]. In diesem Zusammenhang wird gezeigt, wie durch die frühzeitige Anwendung von ISO-konformen Regeln die Inspektionsfähigkeit eines Bauteils verbessert und gleichzeitig die Rückführbarkeit und Verlässlichkeit der Messergebnisse gesichert werden kann.

5.1.2 Gerätetechnik

I. Gerätaufbau

In diesem Abschnitt werden die zwei Gerätaufbauten beschrieben und unterschieden. Dies sind die folgenden:

- Konventionelle Koordinatenmessgeräte
- Unkonventionelle Koordinatenmessgeräte

In der konventionellen Koordinatenmessgeräte-Familie stehen der Portalbauart, der Auslegerbauart, der Brückenbauart und der Ständerbauart, die in der Abbildung 2 dargestellt wird. [4]

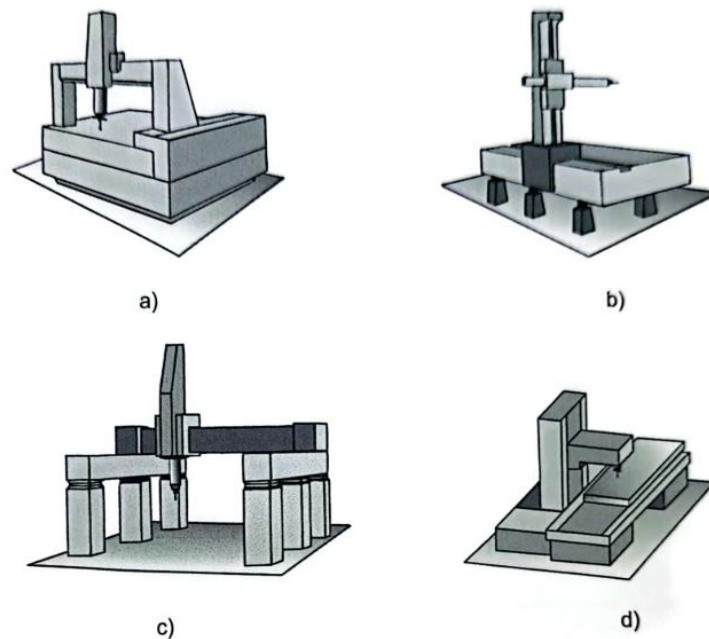


Abbildung 1. Konventionelle Bauarten für Koordinatenmessgeräte. [4]

Die Messgeräte „a“ und „c“ in der Abb. 1, die sogenannte KMG nach Portal- und Brückenbauart, bieten eine gute Genauigkeit zum genauen Messen und auch bei großen Messbereichen geringe Messunsicherheit. Das Messgerät in der Abb. 1 „b“ bietet eine gute Zugänglichkeit, das Werkstück kann von drei Seiten zugeführt werden. Sie werden vorwiegend im Karosserie- sowie im Groß- und Schwermaschinenbau eingesetzt [4]. Das Messgerät „d“ ist ein KMG nach Ständerbauart, der aufgrund ihres großen Messbereichs häufig zum Prüfen von Blech-, Guss- oder Stahlteilen im Fahrzeug-, Flugzeug- und Schiffbau eingesetzt werden, bietet ein Höchstmaß an Zugänglichkeit. [4]

Unkonventionellen Messgeräte werden in dieser Arbeit nicht behandelt. Einige, die in Unternehmen verwendet werden sind die folgenden: Lasertracker, Gelenkarmessgeräte, Computertomografie und Indoor GPS-Systeme. Die Abbildung 2 zeigt einige Messgeräte, wie beispielweise a) Gerät mit Gelenkarm, b) Knickarmgerät, c) Lasertracker. [4]

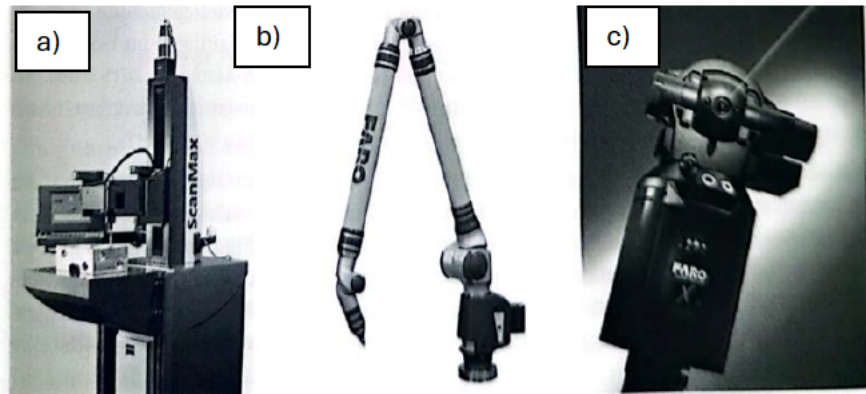


Abbildung 2. unkonventionelle Bauarten für Koordinatenmessgeräte. [4]

II. Tastelemente, Einmessen, Mehrfachtaster und Tasterradiuskorrektur

Tastelemente

In der Praxis werden Taststifte mit Rubinkugeln am meisten verwendet. Je nach der Nutzung kommen sie mit oder ohne Verlängerungen zum Einsatz. Dieser Einsatz kann vertikal, horizontal oder in beliebigen Winkellagen kommen. In der Abbildung 3 wird die verschiedene Tastelement dargestellt. Für das ganze Bauteil werden oft Bäume mit mehreren Tastelementen aufgebaut, wie beispielweise beim Messen von Zahnrädern. In speziellen Fällen werden Scheibentaster verwendet. [9] [4]

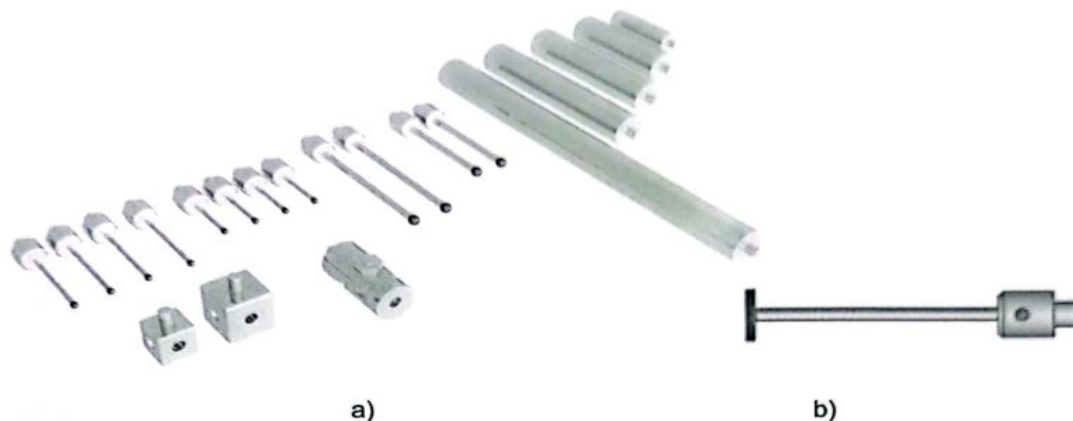


Abbildung 3. Tastelemente. a) Tastelemente mit Antastkugel, Verlängerungen, b) Scheibentaster. [4]

Einmessen

Beim mechanischen Antasten mit Tastkugeln werden die Koordinaten des Mittelpunkts der Tastkugel erfasst, nicht die des tatsächlichen Berührungspunktes. Die Antastkraft kann dabei zu einer leichten Biegung des Taststifts führen, wodurch der effektive Radius der Tastkugel kleiner als der geometrische Radius ist [4]. Zur Bestimmung dieses effektiven Radius wird ein Kugelnormal verwendet, wie in Abbildung 4 dargestellt. Das Kugelnormal besitzt eine bekannte, kalibrierte Kugelform mit minimaler Formabweichung und dient als Referenzkörper. Beim Antasten dieser Referenzkugel in verschiedenen Raumrichtungen misst das Koordinatenmessgerät mehrere Punkte auf der Kugeloberfläche. Aus den gemessenen Koordinaten wird der scheinbare Kugeldurchmesser berechnet. Die Differenz zwischen dem bekannten Kalibrierdurchmesser des Kugelnormals und dem gemessenen Durchmesser wird verwendet, um den effektiven Tastkugelradius zu bestimmen. Auf diese Weise wird der Einfluss von Biegung, Schaltverhalten und mechanischen Abweichungen im Taststift korrigiert. Der berechnete effektive Radius wird anschließend im Messsystem hinterlegt und für alle weiteren Messungen berücksichtigt. [4]



Abbildung 4. Kugelnorm, Marke Zeiss. [4]

Mehrfachtaster

Die Nutzung von der Kugel der Abb. 4 ist nicht nur, um die Kalibrierung durchzuführen, sondern auch die gegenseitige Position von Mehrfachrastern zu bestimmen. Die Position des Mittelpunkts des Kugelnormales wird mithilfe des ersten Tasters bestimmt. Dann mit dem zweiten Taster, usw. Die Unterschiede in den Positionen des Kugelnormales werden als relative Positionen der verschiedenen Antastkugeln gespeichert. Dann kann mit beliebig vielen Antastelementen gemessen werden, die Relativpositionen werden verrechnet und die praktische Messung wird durchgeführt, als ob nur ein Tastelement im Einsatz wäre. Beim Antasten muss allerdings jeweils festgehalten werden, mit welchem Tastelement effektiv angetastet wird. [4] [9]

5.1.3 Sensoren

Die zunehmende Komplexität moderner Bauteilgeometrien sowie die steigenden Anforderungen an Flexibilität und Genauigkeit in Fertigungsprozessen haben den Bedarf an leistungsfähigen Sensorsystemen in der Koordinatenmesstechnik (KMG) erheblich verstärkt. Insbesondere taktile Sensoren sind in der industriellen Praxis weit verbreitet, da sie zuverlässige Informationen über Maß-, Form- und Lagetoleranzen liefern und eine hohe Messwiederholbarkeit ermöglichen. [4]

Für eine präzise Erfassung der geometrischen Merkmale muss eine exakte Zuordnung zwischen dem Längenmesssystem der KMG und der Oberfläche des Werkstücks erfolgen. Diese Anforderung wird in der Norm DIN EN ISO 10360 durch den Begriff des Messkopfsystems definiert [10]. Dabei handelt es sich um die Gesamtheit der Komponenten, die notwendig sind, um den Kontakt zwischen dem Sensor und der Bauteiloberfläche messtechnisch nutzbar zu machen. [7]

Damit Messungen normgerecht, wirtschaftlich und zerstörungsfrei durchgeführt werden können, müssen Sensorsysteme eine Reihe zentraler Anforderungen erfüllen:

- **Reproduzierbarkeit der Antastung:** Die Positionserfassung muss bei wiederholten Messungen innerhalb der spezifizierten Antastunsicherheit übereinstimmen, um eine belastbare Wiederholgenauigkeit zu gewährleisten.
- **Anpassungsfähigkeit an komplexe Geometrien:** Die Sensorik muss auch bei kompliziert geformten Bauteilen eine vollständige Antastung ermöglichen.
- **Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen:** Externe Störungen wie Vibrationen aus dem Fertigungsumfeld oder thermische Schwankungen dürfen das Messergebnis nicht signifikant beeinflussen.
- **Wirtschaftlichkeit:** Aspekte wie Anschaffungskosten, Langlebigkeit, Wartungsaufwand und Einsatzflexibilität sind entscheidend für die Auswahl des Sensorsystems im industriellen Kontext. [4]

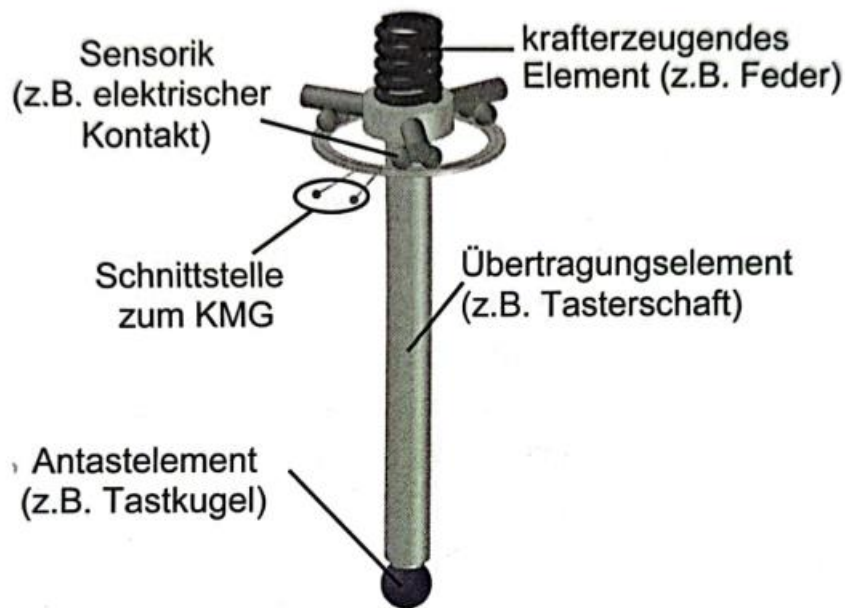


Abbildung 5. Komponenten eines 3D Tastsystems. [4]

Abbildung 5 zeigt den schematischen Aufbau eines typischen taktilen 3D-Tastsystems. Die zentralen Komponenten lassen sich wie folgt strukturieren [4]:

- **Antastelement** (Tasterspitze): Es stellt den direkten Kontakt zur Oberfläche des Werkstücks her und überträgt die definierte Antastkraft. Die Auswahl von Material und Geometrie (z. B. Kugeldurchmesser) beeinflusst die Genauigkeit und Empfindlichkeit der Messung.
- **Übertragungselement** (Tasterstift): Es leitet die durch den Kontakt erzeugte mechanische Bewegung an das Sensorelement weiter. Für optimale Messeigenschaften sind hohe Steifigkeit, geringe thermische Ausdehnung und ein möglichst geringes Gewicht erforderlich.
- **Kraft erzeugendes bzw. regulierendes Element**: In der Regel kommen Federmechanismen zum Einsatz, die eine isotrope und kontrollierte Antastkraft gewährleisten. Die Höhe dieser Kraft muss entsprechend der Empfindlichkeit und Größe des Tastelements angepasst werden.
- **Sensorik**: Sie detektiert die Kontaktaufnahme und wandelt die mechanische Information in elektrische Signale um, die der KMG-Steuerung übermittelt werden.

- **Schnittstelle zum KMG:** Diese Komponente überträgt die Signale an die Auswerteeinheit der Messmaschine und ermöglicht deren Integration in das Gesamtsystem. [4]

Die korrekte Auswahl und Kalibrierung dieser Komponenten ist entscheidend für die Erreichung der messtechnischen Anforderungen gemäß der zugrunde liegenden Toleranzspezifikationen [4]. Im Kontext des DFI bedeutet dies, dass bereits bei der Konstruktion des Bauteils berücksichtigt werden sollte, welche Art von Sensorik zum Einsatz kommt, um die Messbarkeit der Merkmale zu gewährleisten und die Inspektionskosten zu minimieren. [11]

I. Sensoren für KMG

In der Abbildung 6 wird die verschiedene Art von Sensoren, die in KMG verwendet werden. In der Gruppe der taktilen Sensoren sind die schaltenden Systeme und messende Systeme relevant.

Schaltende Systeme bzw. Tastsysteme (in Englisch „Touch-Trigger Probes“), mit diesem Sensor wird nur der Moment des Antastens erfasst. Danach wird ein Signal an die Maschinensteuerung weitergegeben, so dass die Achsenpositionen gelesen und an die Messsoftware übermittelt werden. Diese Sensoren liefern keine Information über die Richtung der Antastung, dann müssen der Geschwindigkeitsvektor des KMG herangezogen werden. [7]

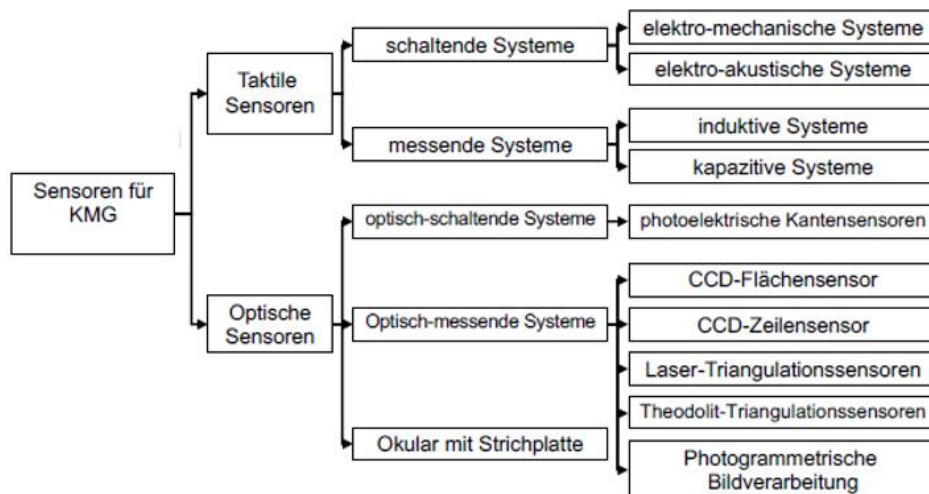


Abbildung 6. Sensoren für KMG. [8]

Messende Systeme bzw. Tastsysteme können andererseits quantitativ Richtung und Antastkraft des Tasters ermitteln. Diese messen die Antastkraft bzw. Auslenkung des Sensors im Moment des Antastens in den drei Koordinatenachsen. Die Auslenkung wird dann zur Position der Maschinenachsen addiert. Mit diesen Sensoren können durch scannende Messung viele Punkte erfasst werden, das bedeutet, dass Freiformkonturen in kurzer Zeit genau digitalisiert werden können. Der Preis ist Vergleich zu den schaltenden Systemen hoch. [8]

II. Software:

Im KMG werden die Systemsoftware und Messsoftware zur Verfügung gestellt. Die Messsoftware eines KMG ist zuständig für Aufgaben wie [5]:

- Programmierung des Messablaufs (CNC-Programm)
- Ausführung des Programms
- Mathematische Verarbeitung der erfassten Punkte
- Dokumentation
- Kommunikation mit externen Systemen

CNC-Programme werden nach einer der folgenden Methoden erstellt [5]:

- Manuelle Programmierung: konventionelle Programmierung in einer bestimmten Programmiersprache.

- Teach-in: Die Messung wird von Bediener beim ersten Mal manuell durchgeführt. Dieser Messablauf wird von der Messsoftware aufgezeichnet und in Form eines CNC-Programms gespeichert.
- Offline-Programmierung am CAD-Modell: Der Messablauf wird anhand eines 3D-CAD-Modells des Werkstücks geplant.

5.1.4 Ermittlung der Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen

Die Ermittlung der Messunsicherheit stellt einen zentralen Aspekt in der Bewertung der messtechnischen Aussagekraft von Koordinatenmessungen dar. Die international anerkannten Normen DIN EN ISO 10360 sowie die Richtlinienreihe VDI/VDE 2617 [10] legen die metrologischen Kenngrößen und standardisierten Prüfverfahren für Koordinatenmessgeräte (KMG) fest. Diese Prüfmethoden zielen insbesondere auf die Maschinenperformance ab und ermöglichen eine vergleichbare Zertifizierung des KMGs unter definierten Laborbedingungen. Sie sind jedoch nicht darauf ausgelegt, die aufgabenspezifische Messunsicherheit bei realen Prüfaufgaben unter praxisnahen Bedingungen zu bestimmen [12] [4].

Die aufgabenspezifische Messunsicherheit ist stark abhängig von Faktoren wie der Bauteilgeometrie, der Anzahl und Verteilung der Messpunkte, der Formabweichungen der Oberflächen sowie der eingesetzten Tasterkonfiguration. Bei der Prüfung realer Werkstücke (insbesondere bei komplexen oder funktionskritischen Geometrien) reicht die Gerätecharakteristik allein nicht aus, um verlässliche Aussagen über die Qualität der Messergebnisse zu treffen. [13]

Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren verschiedene Ansätze zur Bestimmung dieser aufgabenspezifischen Unsicherheit entwickelt. Drei praxisrelevante Methoden sind hervorzuheben [4]:

1. Simulation mit virtuellen Koordinatenmessgeräten (VCMM): Diese Methode basiert auf der numerischen Nachbildung des Messprozesses in einer digitalen Umgebung, wobei Maschinenfehler, Antastunsicherheiten, Ausrichtungsfehler und andere Einflussgrößen modelliert werden. [12] [14]
2. Verwendung von kalibrierten Referenzwerkstücken: Durch wiederholte Messungen an Referenzkörpern mit bekannten Sollwerten kann die Streuung der Messergebnisse

empirisch erfasst und zur Ableitung der Messunsicherheit verwendet werden. Diese Methode ist sehr praxisnah, jedoch auch ressourcenintensiv. [15]

3. Berechnung nach dem GUM-Ansatz: Die auf dem Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) basierende Berechnungsmethode ist in der VDI/VDE detailliert beschrieben und stellt eine systematische Vorgehensweise zur Abschätzung der Messunsicherheit auf Basis identifizierter Einflussgrößen dar. Dabei werden Einzelkomponenten der Messabweichung (z. B. Tasterabweichung, Antastkraft, Temperaturdrift) geschätzt und in einer Unsicherheitsbilanz rechnerisch zusammengeführt. [12]

Im Kontext des DFI gewinnt die Messunsicherheitsanalyse zusätzlich an Bedeutung, da sie es ermöglicht, bereits in der Entwurfsphase Abschätzungen über die messtechnische Absicherung der Produktspezifikation vorzunehmen. Insbesondere bei der Festlegung funktionaler Toleranzen sollte berücksichtigt werden, ob die erwartete Messunsicherheit mit der vorgesehenen Prüfmethode vereinbar ist. So kann durch geeignete Toleranzgestaltung nicht nur die Fertigung, sondern auch die spätere Prüfung wirtschaftlicher und zuverlässiger erfolgen. [16]

5.2 Relevante GPS-Normen für die Umsetzung von DFI

Die geometrische Produktspezifikation (GPS) nach ISO bildet das normative Fundament für die eindeutige Beschreibung, Prüfung und Kommunikation geometrischer Anforderungen technischer Bauteile. Ihre systematische Anwendung ist essenziell, um bereits in der Konstruktionsphase sicherzustellen, dass die definierte Geometrie nicht nur funktional, sondern auch prüfbar und wirtschaftlich herstellbar ist [17]. Im Kontext des Design for Inspection (DFI) dient das GPS-Regelwerk somit als zentrale Brücke zwischen Konstruktion und Messtechnik [6].

5.2.1 Bedeutung der GPS-Normen für DFI

Die GPS-Normenfamilie stellt eine standardisierte geometrische Sprache bereit, die alle Phasen des Produktentwicklungsprozesses – vom Design über die Fertigung bis hin zur Prüfung – miteinander verknüpft. Für die Umsetzung von DFI ist insbesondere die präzise Definition von Form-, Richtungs-, Lage- und Maßtoleranzen entscheidend, um die Inspektionsfähigkeit

geometrischer Merkmale frühzeitig abzusichern. Die Normen ISO 1101, ISO 5459 und ISO 14405-1 bieten hierfür die methodische Grundlage:

- **ISO 1101** legt die Regeln zur Spezifikation von Form- und Lagetoleranzen sowie deren Darstellung in technischen Zeichnungen fest.
- **ISO 5459** definiert die Bildung und Anwendung von Bezügen und Bezugssystemen, die für eine stabile und wiederholbare Messung unerlässlich sind.
- **ISO 14405-1** beschreibt die linearen Größenmaßelemente (z. B. Zylinder, Kugel, Parallelebenen) und deren Tolerierungsstrategien. [17] [17]

5.2.2 Auswahl und Tolerierung geometrischer Merkmale

In ISO 14405 werden lineare Größenmaße in funktionale Kategorien unterteilt (z. B. Zylinderdurchmesser, Kugeldurchmesser, Abstände zwischen Ebenen). Im Design for Inspection ist entscheidend, dass diese Maße so spezifiziert werden, dass ihre Prüfung mit üblichen taktilen oder optischen Verfahren ohne zusätzliche Sondermittel möglich ist. [18]

Besonderes Augenmerk verdienen auch Zweipunktgrößenmaße, da sie durch Formabweichungen beeinflusst werden können. Ihre Verwendung erfordert eine bewusste Bewertung der Stabilität und Wiederholgenauigkeit der Messung, um mögliche Unsicherheiten im Inspektionsprozess zu minimieren. [6]

Ergänzend ermöglichen globale Größenmaßmerkmale (GN, GX, GG) eine gezielte Auswahl toleranzrelevanter Auswerteprinzipien – ein Aspekt, der insbesondere in automatisierten Prüfprozessen (z. B. mit KMG) berücksichtigt werden sollte. [17]

In Abbildung 7 wird bei der Norm DIN EN ISO 14405-1 die lineare Größenmaße erwähnt, welche den Durchmesser und den Abstand parallel liegender Ebenen umfassen. Ebenso behandelt die Norm DIN EN ISO 14405-2 lineare Maße, die Stufenmaße sowie Abstände von Achsen und Mittelebenen betreffen. [19]



Abbildung 7. System der geometrischen Produktspezifikation. [17]

5.2.3 Anwendung des Hüllbedingungenkonzepts

Die Hüllbedingung gemäß ISO 14405-1 ist besonders relevant bei funktionskritischen Maßen wie z. B. Passungen oder Mindestspielen. Im DFI-Kontext ermöglicht ihre gezielte Anwendung, dass trotz Formabweichungen die maßliche Funktionalität (z. B. Montierbarkeit) erhalten bleibt. Dies reduziert das Risiko von Nacharbeiten und verbessert die Prozesssicherheit. Ihre Darstellung in Zeichnungen mittels des E-Symbols (Envelope) sollte daher insbesondere bei rotationssymmetrischen Teilen oder bei axialen Passflächen in Betracht gezogen werden. (Abb. 8) [13]

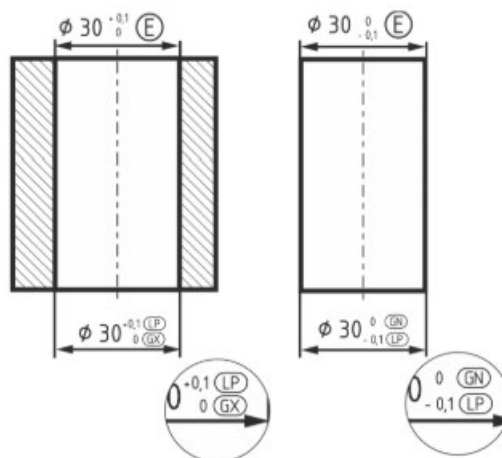


Abbildung 8. Vereinbarung der Hüllbedingung auf einer technischen Zeichnung. [8]

5.2.4 Form- und Lagetoleranzen im Kontext der Messbarkeit

Form- und Lagetoleranzen legen die zulässige Abweichung realer Flächen und Linien von der idealen Geometrie fest. Für die erfolgreiche Umsetzung von DFI müssen diese Toleranzen so gewählt werden, dass sie eindeutig messbar sind und die Funktion des Bauteils nicht gefährden. Besonders wichtig ist hierbei die eindeutige Verknüpfung mit Bezugssystemen, wie sie ISO 5459 vorsieht [20].

Das Bezugssystem (Primär-, Sekundär- und Tertiärbezug) legt die Freiheitsgrade fest, die bei der Ausrichtung des Bauteils auf der Messmaschine fixiert werden. Eine stabile und praxisgerechte Auswahl dieser Bezüge verbessert die Wiederholgenauigkeit der Messung erheblich – wie in den Experimenten 3 und 4 gezeigt wird (vgl. Abschnitt. 7.3 und 7.4) [6]

5.2.5 Relevanz der ISO-Normen für DFI-konforme Zeichnungen

Eine DFI-konforme Zeichnung geht über die rein funktionale Beschreibung eines Bauteils hinaus und integriert systematisch alle Informationen, die für eine zuverlässige und wirtschaftliche Inspektion erforderlich sind. Die Anwendung der relevanten GPS-Normen – insbesondere ISO 1101, ISO 5459, ISO 14405-1 und ISO 8015 [21] bildet dabei das normative Rückgrat für die geometrische Produktspezifikation im Kontext des Design for Inspection. [22]

Wie in der Literatur betont wird, ist es essenziell, dass die geometrische Spezifikation nicht nur die Funktion des Bauteils abbildet, sondern gleichzeitig auch inspektionsfähige Merkmale definiert, die mit gängigen Messverfahren reproduzierbar überprüft werden können, [4]. Dies bedeutet konkret: Toleranzen müssen so gewählt werden, dass sie von den verfügbaren Messsystemen eindeutig erfasst und bewertet werden können, und die Bezugssysteme müssen eine stabile und wiederholbare Lagefixierung ermöglichen – sowohl bei der Fertigung als auch bei der Prüfung. [6]

Die ISO 1101 liefert das Rahmenwerk zur Definition von Form- und Lagetoleranzen sowie deren korrekter grafischer Darstellung. Aus DFI-Sicht besonders relevant ist die Möglichkeit, Toleranzzonen explizit zu definieren, die eine eindeutige Messstrategie erlauben, beispielsweise durch Bezug auf Achsen, Mittelebenen oder spezifische Punkte [23]. Die ISO 5459 ergänzt dies durch Regeln zur Konstruktion funktionaler Bezugssysteme. Eine fehlerhafte oder nicht optimierte Bezüge-Hierarchie kann zu unzuverlässigen Messergebnissen führen. Die

klare Definition von primären, sekundären und tertiären Bezügen bildet daher die Grundlage für stabile Inspektionsbedingungen. [24]

Die ISO 14405-1 wiederum spezifiziert verschiedene Arten linearer Größenmaße (z. B. lokale Zweipunktmaße vs. globale Größenmaße) und erlaubt die Anwendung der Hüllbedingung ("Envelope Requirement"), welche insbesondere bei Passungen oder funktionskritischen Flächen die Einhaltung funktionaler Anforderungen sicherstellt – ohne dabei auf zusätzliche Formtoleranzen angewiesen zu sein. Dies unterstützt die Strategie des DFI, Messunsicherheiten zu minimieren und Prüfprozesse zu vereinfachen, indem redundante oder schwer überprüfbare Spezifikationen vermieden werden. [17]

Insgesamt ermöglichen diese Normen die Definition von Zeichnungen, die sowohl eine funktionale als auch eine messbare Darstellung der Geometrie enthalten. Eine DFI-konforme Zeichnung ist daher nicht nur normgerecht, sondern auch auf die messtechnische Realität der Produktion abgestimmt – sie reduziert Interpretationsspielräume, vermeidet überflüssige Prüfaufwände und trägt damit zur Qualitätssicherung bei minimalem Aufwand bei. Besonders für KMUs ohne spezialisierte ERP-Systeme oder umfangreiche Prüfplanungstools stellen solche Zeichnungen eine praxisnahe Lösung zur Steigerung der Prozesssicherheit dar. [23]

5.2.6 Zwischenreferenzflächen in der GPS-konformen Konstruktionspraxis

Ein praxisrelevantes, wenn auch in der Literatur bislang selten explizit benanntes Element zur Verbesserung der Prüfstrategie ist der Einsatz sogenannter Zwischenreferenzflächen. Dabei handelt es sich um planare Hilfsflächen, die zusätzlich zur eigentlichen funktionalen Geometrie konstruiert werden und als stabile Antastplattformen dienen – insbesondere in schwer zugänglichen Bereichen mit geneigten oder vertieften Merkmalen. Es wird detailliert beschrieben, wie sekundäre und tertiäre Bezüge zur Stabilisierung von Bezugssystemen eingesetzt werden können, geht daraus auch hervor, dass zusätzliche Referenzgeometrien außerhalb der primären Funktionskette gezielt zur Verbesserung der Wiederholgenauigkeit verwendet werden dürfen, sofern sie eindeutig definierbar und zugänglich sind. [6]

Auch wird diese Strategie implizit aufgegriffen: Dort zeigen Simulationsergebnisse, dass bei steileren Neigungen der Einsatz planarer Flächen in direkter Nähe zu kritischen Geometrien zu einer signifikanten Reduktion der Messunsicherheit führt [25]. In der Praxis bedeutet dies, dass Zwischenreferenzflächen gezielt so platziert werden, dass die Tastkugel entlang einer stabilen,

ebenen Fläche geführt und der Kontaktwinkel optimiert werden kann. Besonders bei Tastern mit größerem Kugeldurchmesser – bei denen der sogenannte „Mittelungseffekt“ lokaler Unebenheiten stärker wirkt – bieten solche Hilfsflächen eine Möglichkeit, systematische Winkelfehler zu vermeiden und die Ausrichtung zu standardisieren.

Die Anwendung dieses Konzepts hat direkten Einfluss auf die Auslegung prüfgerechter Geometrien im Sinne des Design for Inspection (DFI). Durch die Integration von Zwischenreferenzflächen bereits im CAD-Modell wird nicht nur die Zugänglichkeit verbessert, sondern auch die Prozessfähigkeit (z. B. Cg/Cgk-Werte) der Inspektion erhöht. Zudem erlaubt dieser Ansatz die Umsetzung robusterer Bezugssysteme gemäß ISO 5459, da die Stabilität der Antastung durch gezielte geometrische Maßnahmen gestützt wird. [20]

5.3 Design for X (DFX)

Im Zuge globaler Märkte, wachsender Wettbewerbsdynamik und zunehmend komplexer Produktanforderungen sehen sich Unternehmen gezwungen, ihre Entwicklungs- und Fertigungsprozesse neu auszurichten. Die Reduktion von Lebenszykluszeiten, steigende Qualitätsansprüche sowie Nachhaltigkeitsziele fordern ein Umdenken in der Produktentwicklung. Vor diesem Hintergrund gewinnen methodische Ansätze an Bedeutung, die eine vorausschauende, funktions- und fertigungsgerechte Konstruktion ermöglichen. Einer dieser Ansätze ist das Konzept Design for X (DFX). [1]

Allen DFX-Varianten liegt der Grundgedanke zugrunde, dass kritische Anforderungen nicht erst im Nachgang optimiert, sondern von Anfang an konstruktiv integriert werden. So entsteht ein gesamtheitlicher Entwicklungsansatz, bei dem das Zusammenspiel von Konstruktion, Fertigung, Qualitätssicherung und Nutzung frühzeitig synchronisiert wird. Die DFX-Familie umfasst mittlerweile über 40 dokumentierte Kategorien, die je nach Produkt und Branche unterschiedlich stark ausgeprägt zum Einsatz kommen [3].

5.3.1 Design for Inspection (DFI)

Die Sicherstellung einer zuverlässigen Qualitätsprüfung gehört zu den Schlüsselfaktoren erfolgreicher Produktentwicklung – insbesondere, wenn Prüfmerkmale schwer zugänglich, unklar spezifiziert oder mit unangemessenen Toleranzen versehen sind. Eine ineffiziente Inspektionsstrategie kann zu Ausschuss, Nacharbeit, Zeitverlust oder Sicherheitsrisiken führen. Das Konzept Design for Inspection (DFI) adressiert diese Problematik gezielt und verfolgt das

Ziel, die Prüfbarkeit technischer Produkte bereits in der Entwurfsphase systematisch sicherzustellen. [23]

DFI-Prinzipien unterstützen Konstrukteurinnen und Konstrukteure dabei, Prüfmerkmale so zu definieren und zu positionieren, dass sie messtechnisch eindeutig interpretierbar und mit den verfügbaren Messmitteln zuverlässig zugänglich sind. Dies betrifft sowohl die Auswahl geeigneter Geometriemerkmale und Bezüge als auch die normgerechte Spezifikation der Toleranzen. Durch die frühzeitige Anwendung von DFI können potenzielle Messprobleme identifiziert, Prüfaufwände reduziert und die Rückverfolgbarkeit über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg sichergestellt werden [14].

Ein effektiver DFI-Ansatz berücksichtigt dabei unter anderem folgende Fragestellungen:

- Welche Merkmale müssen geprüft werden?
- Wie sind diese geometrisch zu spezifizieren und zu tolerieren?
- Sind sie mit den vorhandenen Messsystemen zugänglich und auswertbar?
- Wie werden Prüfdaten dokumentiert, ausgewertet und rückverfolgt?
- Wie wirkt sich die Messstrategie auf Prüfkosten und Zykluszeiten aus? [14]

Die Anwendung von DFI erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Konstruktion, Messtechnik und Qualitätssicherung. Besonders wichtig ist dabei die Einhaltung relevanter Normen, insbesondere der GPS-Normenreihe (Geometrische Produktspezifikation), um die eindeutige Umsetzung der Konstruktionsabsicht zu ermöglichen. [6]

Wesentliche Prinzipien eines DFI-konformen Konstruktionsprozesses beinhalten [6]:

- Die Nutzung der ISO-GPS-Normen zur eindeutigen Festlegung geometrischer Toleranzen;
- Die Definition prüfbarer Produktmerkmale mit realistisch umsetzbaren Toleranzen;
- Die Sicherstellung der Zugänglichkeit von Prüfmerkmalen für Koordinatenmessgeräte (KMG);
- Die Berücksichtigung messtechnischer Grenzen bei der Auswahl von Bezügen;

- Die frühzeitige Klärung, wie Prüfmerkmale gemessen, dokumentiert und rückverfolgt werden sollen. [3] [2]

Durch die frühzeitige Berücksichtigung dieser Punkte kann DFI dazu beitragen, die Prüfbarkeit systematisch zu verbessern, Prüfkosten zu reduzieren und die Produktqualität nachhaltig zu sichern [1]. Der folgende Abschnitt widmet sich der experimentellen und methodischen Umsetzung dieser Prinzipien in konkreten Konstruktions- und Inspektionsszenarien.

5.3.2 Anwendung der DFI

Die praktische Anwendung von Design for Inspection (DFI) zielt darauf ab, potenzielle Prüfprobleme bereits im digitalen Entwurfsstadium zu erkennen und zu eliminieren. Dabei geht es nicht nur darum, prüfrelevante Merkmale korrekt zu definieren, sondern auch darum, frühzeitig die geeigneten Prüfstrategien, Messmittel und Referenzsysteme festzulegen. Eine durchdachte Inspektionsplanung beginnt idealerweise mit einer Analyse möglicher Ausfallursachen, ein bewährtes Werkzeug hierfür ist die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA [25]) oder auch ISHIKAWA [23]. Diese Methode identifiziert systematisch potenzielle Fehlerquellen, deren Ursachen und Auswirkungen, und bietet eine strukturierte Grundlage für die Ausrichtung der Inspektionsstrategie [14].

Eine angepasste Darstellung aus [23] zeigt, dass die effektive Umsetzung von Design for Inspection (DFI) typischerweise fünf Hauptfunktionen der Inspektionsplanung umfasst. Diese wurden in der vorliegenden Arbeit leicht modifiziert, um die spezifische Implementierungsstrategie im Kontext der durchgeführten Experimente abzubilden.

Die Funktionen – Setup, Present, Search, Decision und Respond – repräsentieren einen strukturierten Ablauf, der alle Phasen der Prüfplanung während des Produktlebenszyklus umfasst. Tabelle 1 fasst diese Funktionen zusammen und bildet die methodische Grundlage für die in Kapitel 8 dargestellten DFI-Phasen.

Tabelle 1. Inspektionsfunktionen im Rahmen von DFI [26]

Schritt	Beschreibung

Setup	Festlegung der zu prüfenden Komponenten und Prozesse; Sicherstellung, dass geeignete Inspektionssysteme bereitstehen (z. B. korrekt kalibriert).
Present	Überprüfung, ob Komponenten die spezifizierten Anforderungen erfüllen, bevor nachgelagerte Fertigungsphasen beginnen.
Search	Durchführung gezielter Tests zur Validierung von Funktion und Konformität unter realen Bedingungen.
Decision	Bewertung und Klassifizierung von Messergebnissen; Entscheidung über Konformität basierend auf präziser Toleranzanalyse.
Respond	Umsetzung von Korrekturmaßnahmen und Dokumentation der Inspektionsprozesse zur Sicherstellung der Rückverfolgbarkeit.

Neben der strukturierten Prozessgestaltung ist ein zentraler Aspekt der modernen DFI-Anwendung die virtuelle Simulation des Messprozesses ermöglichen solche Simulationen eine frühzeitige Validierung der geometrischen Auslegung und der Messstrategie direkt in der digitalen Konstruktionsumgebung [14]. Dies bietet zahlreiche Vorteile:

- Optimierung des Referenzsystems: Durch Simulation können verschiedene Ausrichtmethoden (z. B. 3-Punkte- oder PLP-Ausrichtung) getestet werden, um die optimale Bezugssystemdefinition festzulegen [14].
- Validierung der Bauteilgeometrie: Komplexe Formen oder ungünstige Positionierungen können vor der Fertigung erkannt und angepasst werden, z. B. durch das Hinzufügen nicht-funktionaler Merkmale zur Fixierung.
- Prüfbarkeit komplexer Merkmale: Die Messbarkeit sehr kleiner oder schwer zugänglicher Merkmale kann durch virtuelle Planung überprüft und verbessert werden.
- Kollisionsvermeidung und Pfadoptimierung: Die Trajektorie des Tastsystems wird simulativ getestet, um Kollisionen zu vermeiden und Prüfzeiten zu reduzieren.
- Planung von Spannvorrichtungen: Auch Haltevorrichtungen können im digitalen Raum entworfen und validiert werden, um eine kollisionsfreie Fixierung zu gewährleisten.

- Schulung und Dokumentation: Simulierte Messungen können zur Schulung von Bedienpersonal sowie zur Dokumentation standardisierter Prüfpläne verwendet werden. [14] [23]

Durch diese digitalen Werkzeuge wird DFI nicht nur zu einem methodischen Prinzip, sondern zu einem integralen Bestandteil eines modernen, simulationsgestützten Entwicklungsprozesses. Die Anwendung virtueller Messsimulationen reduziert nicht nur Risiken, sondern erhöht die Effizienz der Prüfprozesse erheblich – insbesondere im Zusammenspiel mit CAD/CAM-Systemen, CAQ-Schnittstellen und automatisierter Koordinatenmesstechnik [26].

Insgesamt führt die konsequente Anwendung von DFI zu einer stärkeren Abstimmung zwischen Konstruktion und Qualitätssicherung, verkürzt Inspektionszeiten, verbessert die Rückverfolgbarkeit und trägt wesentlich zur Robustheit und Wirtschaftlichkeit technischer Produkte bei [26].

5.3.3 Vorteile und Herausforderungen der DFI-Implementierung

Die Integration von Design for Inspection (DFI) in den Produktentwicklungsprozess bietet eine Vielzahl von Vorteilen für Unternehmen, die auf eine effiziente und qualitätsgesicherte Fertigung angewiesen sind. Gleichzeitig bringt die Implementierung von DFI auch bestimmte Herausforderungen mit sich, insbesondere in komplexen Entwicklungsumgebungen oder bei Produkten mit engen Toleranzanforderungen. Im Folgenden werden die wichtigsten Vorteile und typischen Herausforderungen systematisch dargestellt [26].

Vorteile

1. Frühzeitige Identifikation potenzieller Messprobleme
DFI ermöglicht es, bereits während der Konstruktionsphase kritische Merkmale zu identifizieren, die später schwer oder nur mit hohem Aufwand zu prüfen wären. Dadurch können fehleranfällige Designs frühzeitig überarbeitet werden.
2. Optimierte Prüfstrategien und reduzierte Prüfkosten
Durch die gezielte Auslegung von Geometrien für eine effiziente Messung – etwa durch gut zugängliche Prüfflächen und eindeutige Bezüge – können Prüfzeiten und -kosten signifikant reduziert werden.

3. Verbesserte Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Qualitätssicherung
DFI fördert die interdisziplinäre Abstimmung, insbesondere zwischen Konstrukteuren, Fertigungsplanern und Messtechnikern. Dies erhöht die Konsistenz zwischen Konstruktionsabsicht und Prüfpraxis.
4. Erhöhte Prozesssicherheit und Rückverfolgbarkeit
Die strukturierte Definition und Dokumentation von Prüfmerkmalen erleichtert die Nachverfolgung und Validierung während der gesamten Produktlebensdauer – ein entscheidender Vorteil für auditsichere Prozesse.
5. Weniger Nacharbeit und Ausschuss
Eine durchdachte Prüfplanung vermeidet nicht nur unnötige Messungen, sondern reduziert auch das Risiko fehlerhafter Bauteile, was direkt zur Senkung der Ausschussrate beiträgt. [14]

Herausforderungen

1. Informationsbedarf und Dokumentationsaufwand
Die Umsetzung von DFI erfordert eine präzise und durchgängige Dokumentation prüfrelevanter Informationen über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg. Dies stellt besonders bei stark variantenreichen Produkten eine Herausforderung dar.
2. Frühzeitige Festlegung prüfrelevanter Merkmale
DFI verlangt, dass Prüfmerkmale, Bezüge und Toleranzen bereits in frühen Konstruktionsphasen spezifiziert werden. Dies kann zu Unsicherheiten führen, wenn beispielsweise die finale Fertigungstechnologie noch nicht vollständig feststeht.
3. Schulung und Sensibilisierung der Konstrukteure
Eine erfolgreiche Anwendung von DFI setzt voraus, dass Konstrukteurinnen und Konstrukteure mit den Prinzipien der GPS-Normen, der Koordinatenmesstechnik sowie den Anforderungen an prüfgerechtes Design vertraut sind.
4. Technologische Grenzen der Messtechnik
Auch bei optimaler Auslegung kann es vorkommen, dass komplexe Geometrien oder sehr kleine Merkmale nicht ohne Weiteres prüfbar sind. In solchen Fällen müssen Kompromisse gefunden oder alternative Messstrategien entwickelt werden.

5. Initialer

Implementierungsaufwand

Die Einführung von DFI erfordert Anpassungen in den Entwicklungsprozessen, neue Checklisten, Schulungsmaßnahmen und gegebenenfalls die Erweiterung bestehender Software-Tools (z. B. CAD/CAE/CAQ-Integration). Der damit verbundene Mehraufwand amortisiert sich jedoch in der Regel mittelfristig durch höhere Qualität und geringere Kosten. [14] [26]

6. Allgemeine Empfehlungen

Die Konstruktion mechanischer Bauteile erfordert nicht nur eine präzise Fertigung, sondern auch eine sorgfältige Planung der geometrischen Spezifikation und der späteren Inspektionsprozesse. Die Methodik des Design for Inspection (DFI) ist dabei von zentraler Bedeutung, um sicherzustellen, dass die Prüfbarkeit von Bauteilen von Beginn an in die Entwicklung integriert ist. In diesem Abschnitt werden grundlegende, praxisorientierte Empfehlungen vorgestellt, die sich aus der Fachliteratur, den geltenden GPS-Normen und etablierten industriellen Best Practices ableiten. Sie bilden den konzeptionellen Rahmen für die später analysierten experimentellen Empfehlungen.

6.1. Messung von Kreisbögen mit kleinen Winkeln und großen Radien

Die präzise Erfassung Kreisbögen mit kleinen Winkeln und großen Radien an schwer zugänglichen oder beengten Geometriebereichen stellt eine wiederkehrende Herausforderung in der industriellen Messtechnik dar. Koordinatenmessgeräte (KMG) stoßen insbesondere bei der Antastung spitzwinkliger Geometrien an physikalische und zugangsbedingte Grenzen. Dies führt zu erhöhten Messunsicherheiten, reduzierter Wiederholgenauigkeit und potenziellen systematischen Fehlern. Besonders bei kleinen Winkeln, wie sie bei Kreisausschnitten oft auftreten, wird die Unsicherheit der Radienmessung durch die eingeschränkte Messstrecke signifikant verstärkt. [27]

Im Sinne des Design for Inspection (DFI) kann daraus die Empfehlung abgeleitet werden, in solchen Fällen eine Linienprofiltoleranz gemäß ISO 1101 verwendet werden, anstatt den Radius direkt mit einer Maßtoleranz zu versehen. Dieser alternative Tolerierungsansatz erlaubt eine robustere und messsichere Beschreibung der Geometrie. Die hier dargestellten Ergebnisse

basieren auf virtuellen Monte-Carlo-Simulationen, die mit der VCMM-User-Methode durchgeführt wurden. Diese Methode ermöglicht die a-priori-Ermittlung der messaufgabenspezifischen Unsicherheit bei Koordinatenmessungen. Simuliert wurde die Messung eines Kreisbogenradius (30° Spannwinkel) auf einem zylindrischen Prüfkörper mittels taktilen Scannens mit einer Antastgeschwindigkeit von 1 mm/s und einem Punktabstand von 0,02 mm. So zeigen die Simulationsergebnisse eine deutlich geringere Messunsicherheit für die Profillinientoleranz ($U = 5,4 \mu\text{m}$) im Vergleich zur direkten Radientoleranz ($U = 9,7 \mu\text{m}$). Diese Differenz unterstreicht die metrologische Überlegenheit der Profiltoleranz in Situationen mit begrenztem Messzugang. [27]

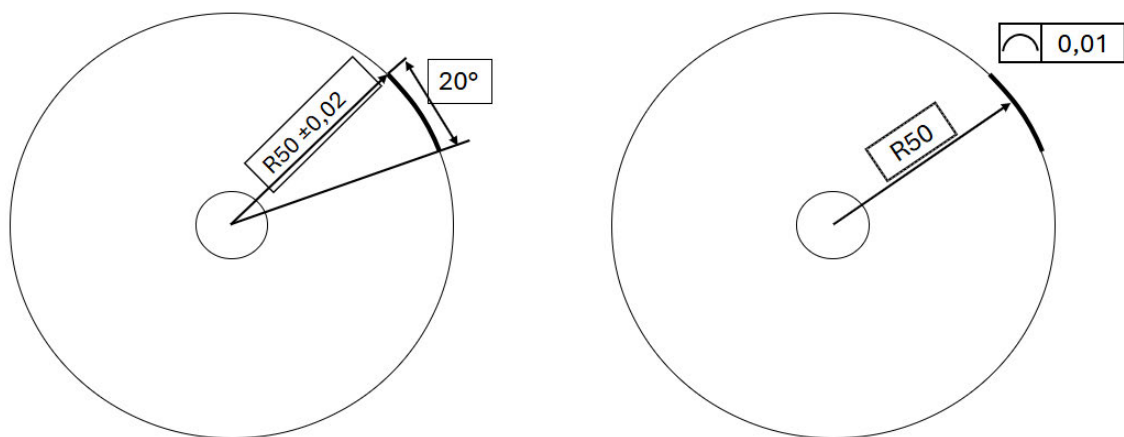


Abbildung 9. Linienprofiltoleranz bei Radien mit kleinen Winkeln [27]

Die Vorteile dieses Tolerierungsprinzips werden in Abbildung 9 verdeutlicht. Auf der linken Seite wird ein Radius von 50 mm mit einer Winkelöffnung von 20° und einer Maßtoleranz von $\pm 0,02$ mm dargestellt. Rechts hingegen ist derselbe Ausschnitt mit einer Profillinientoleranz von 0,01 mm spezifiziert, bezogen auf ein klar definiertes Bezugssystem. Diese Definition schafft eine stabilere und auswertungssichere Toleranzzone, die sowohl die Inspektionsfähigkeit als auch die Wiederholgenauigkeit erhöht.

Zur weiteren Verbesserung der Messbarkeit Kreisbögen mit kleinen Winkeln empfiehlt sich im DFI-Kontext die Integration von planaren Zwischenreferenzflächen in unmittelbarer Nähe der

kritischen Winkelgeometrie. Solche Flächen ermöglichen eine reproduzierbare Ausrichtung des Tasters und dienen gleichzeitig als stabile Auflage zur Reduktion von Antastunsicherheiten. Durch die Kombination dieser Gestaltungsprinzipien mit GPS-konformen Bezugssystemen nach ISO 5459 kann die Prüfbarkeit Kreisbögen mit kleinen Winkeln signifikant gesteigert werden – ohne die Funktionalität des Bauteils zu beeinträchtigen. [27]

Insgesamt zeigt sich, dass die konsequente Anwendung von GPS-konformen Tolerierungsprinzipien, unterstützt durch simulationsgestützte Entscheidungsfindung, eine zentrale Grundlage für die Umsetzung des DFI-Ansatzes bei Bauteilen mit kritischen Winkelgeometrien bildet. [27]

6.2. Auswahl und Definition von Bezugsebenen

Die Auswahl geeigneter Bezugselemente stellt eine zentrale Grundlage für die geometrische Produktspezifikation (GPS) sowie für die messtechnische Auswertung dar. Bezüge definieren die räumliche Orientierung des Bauteils im Messraum und ermöglichen eine normkonforme, eindeutige Interpretation von Toleranzen [6]. Im Kontext des Design for Inspection (DFI) ist die gezielte und strategische Definition dieser Bezugselemente ein entscheidender Schritt zur Sicherstellung der Prüfbarkeit, zur Minimierung von Messunsicherheiten und zur Verbesserung der Wiederholbarkeit von Messergebnissen. [26]

Grundsätzlich sollten Bezugselemente so gewählt werden, dass sie auf funktionalen, stabilen und gut zugänglichen Flächen des Bauteils liegen. Diese Flächen müssen durch das Messsystem zuverlässig erfasst werden können und eine hohe geometrische Qualität aufweisen. Es gilt, instabile, raue oder schwer zugängliche Flächen zu vermeiden, da diese zu unzuverlässigen Messergebnissen und erhöhten Interpretationsrisiken führen können. Eine klare Definition ist dabei besonders wichtig, um zwischen der realen Fläche am Bauteil (Bezugselement) und dem in der Zeichnung spezifizierten, tolerierten Merkmal (Bezugsmerkmal) eindeutig unterscheiden zu können. Nur so kann sichergestellt werden, dass die geometrische Interpretation und die messtechnische Realisierung übereinstimmen [6].

Im Sinne der vollständigen Einschränkung aller sechs Freiheitsgrade eines Körpers (Translation und Rotation entlang der X-, Y- und Z-Achse) empfiehlt sich eine klassische dreistufige Bezugsbildung gemäß ISO 5459. Diese setzt sich typischerweise aus drei orthogonalen Elementen zusammen:

- **Primärbezug:** Eine großflächige, planare Fläche zur Einschränkung von drei Freiheitsgraden (z. B. Translation in Z und Rotation um X und Y),
- **Sekundärbezug:** Eine Linie, Achse oder Fläche zur Einschränkung von zwei weiteren Freiheitsgraden (z. B. Translation in Y und Rotation um Z),
- **Tertiärbezug:** Ein Punkt oder eine Fläche zur Einschränkung der letzten Bewegungsfreiheit (z. B. Translation in X). [6]

In Abbildung 10 ist ein Beispiel für ein vollständiges Bezugssystem dargestellt. Die Fläche **A** wurde als Primärbezug gewählt, da sie eine großflächige und funktionale Auflagefläche bietet. **B** befindet sich entlang einer längsgerichteten Basislinie, die als Sekundärbezug die Ausrichtung stabilisiert. Der Tertiärbezug **C** ist senkrecht zu den ersten beiden definiert und schließt das System ab. Diese Konfiguration erlaubt eine eindeutige räumliche Referenzierung und stellt sicher, dass alle weiteren Maße und Toleranzen in einem konsistenten Koordinatensystem bewertet werden können.

Neben der geometrischen Definition spielt auch die Stabilität der Bezugselemente eine entscheidende Rolle, welche durch geeignete Bezugstoleranzen gemäß ISO 5459 gesichert werden kann. So kann beispielsweise die Ebenheit einer Bezugsfläche mit einer spezifischen Toleranz versehen werden, um ihre messtechnische Funktion zu garantieren. Nur so ist eine eindeutige und wiederholbare Bestimmung des tatsächlichen Bezugssystems möglich, insbesondere bei funktionskritischen Merkmalen [6].

Die Festlegung der Bezüge hat zudem direkten Einfluss auf die Messstrategie, etwa bei der Wahl von Antastpunkten, der Softwareauswertung und der Verständlichkeit der Zeichnung im interdisziplinären Austausch. Daher sollten Bezüge in enger Abstimmung zwischen Konstruktion und Qualitätssicherung festgelegt werden.

Schließlich ist auch die mechanische Fixierung des Bauteils eng mit der Bezugsstrategie verbunden. Die Spannvorrichtung sollte so gewählt sein, dass sie sich an der Geometrie und den definierten Bezügen orientiert, um reproduzierbare Messbedingungen sicherzustellen und

vermeiden.



Ein zentrales Kriterium stellt dabei der Durchmesser von Bohrungen dar. Dieser sollte so gewählt werden, dass handelsübliche KMG-Taster – meist mit Tastkugeldurchmessern ab 2 mm – zuverlässig eingeführt und entlang der Bohrungsachse geführt werden können. Bei tiefen Bohrungen ($>3 \times$ Durchmesser) steigt das Risiko für Antastunsicherheiten exponentiell, da die Taster durch ihre Länge an Steifigkeit verlieren, was zu Schwingungen, Deformation und damit zu erhöhter Messunsicherheit führt. In solchen Fällen wird empfohlen, funktional tolerierbare

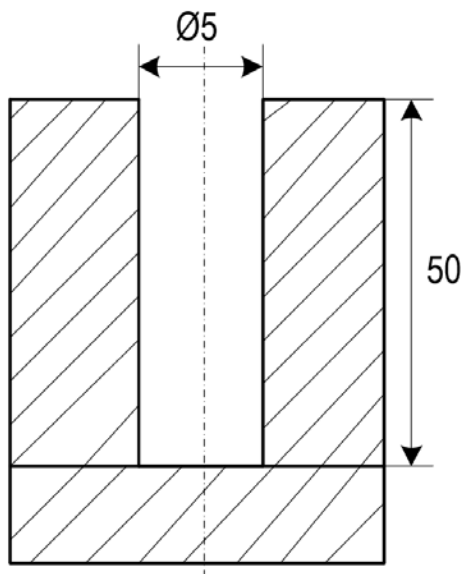
Geometrieerweiterungen wie Einführfasen, Stufen oder zusätzliche Freistriche vorzusehen, um die Stabilität des Tasters während der Antastung zu erhöhen [27].

Darüber hinaus sollte der Einsatz von Lage- bzw. Positionstoleranzen gemäß ISO 5458 gegenüber rein linearen Maßangaben bevorzugt werden. Die Positionsangabe in Form eines dreidimensionalen Toleranzraums erlaubt eine umfassendere Bewertung der Merkmalslage, da sie die Translation und Rotation in allen drei Raumrichtungen einschließt. Dies verbessert nicht nur die Vergleichbarkeit der Messwerte, sondern vereinfacht die Analyse in modernen KMG-Auswertesystemen erheblich. [20]

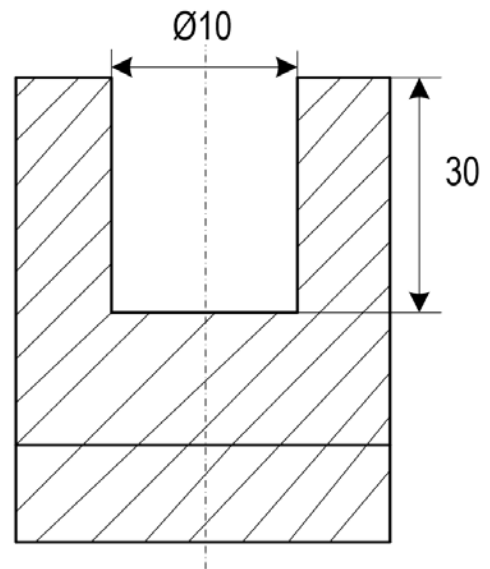
Ein weiterer entscheidender Aspekt ist die Gestaltung von Vertiefungen und Kavitäten, welche häufig schwer zugänglich sind. Die Integration von mehrstufigen Vertiefungen oder differenzierten Durchmessern im Innenprofil kann die Zahl der zugänglichen Abtastpunkte erhöhen, ohne die Funktionalität des Bauteils zu beeinträchtigen. [27]



Abschnitt A-A



Option 1



Option 2

Abbildung 11. vernünftige Zugänglichkeit I

Abbildung 11 illustriert diesen Zusammenhang anhand zweier Optionen zur Gestaltung einer axialen Bohrung:

- Option 1 zeigt eine 5 mm-Bohrung mit einer Tiefe von 50 mm – ein klassisches Beispiel für eine messtechnisch anspruchsvolle Geometrie, die nur mit sehr schlanken und schwingungsempfindlichen Tastern inspiziert werden kann. Die hohe Antastunsicherheit, erhöhte Tasterabnutzung und potenziell unzureichende Wiederholgenauigkeit machen diese Konfiguration in DFI-kritischen Anwendungen problematisch.
- Option 2 stellt eine gestufte Bohrung mit einem erweiterten Durchmesser (10 mm) im oberen Bereich dar. Durch diese funktional unkritische Geometrie Anpassung wird nicht nur die Zugänglichkeit verbessert, sondern auch die Tasterbelastung reduziert und die Messwiederholbarkeit signifikant erhöht. Solche Konstruktionsentscheidungen haben direkten Einfluss auf die Messunsicherheit und damit auf die Gesamteffizienz der Qualitätssicherung.

Im Sinne eines umfassenden DFI-Ansatzes sollten Konstrukteurinnen und Konstrukteure systematisch bewerten, ob kleine oder schwer erreichbare Merkmale durch gezielte geometrische Modifikationen messtechnisch optimiert werden können. Dies ermöglicht eine frühzeitige Sicherstellung der Inspektionsfähigkeit, reduziert den Bedarf an kostenintensiven Sondertastern und vereinfacht die Prüfstrategie bei Serienteilen erheblich. Darüber hinaus tragen solche Maßnahmen zur Standardisierung innerhalb der technischen Zeichnungen bei und fördern die reibungslose Kommunikation zwischen Konstruktion und Qualitätssicherung.

6.4. Neigungen und Fasen

Neigungen und Fasen zählen zu den häufig vorkommenden Gestaltungselementen in der Konstruktion mechanischer Bauteile. Trotz ihrer funktionalen Relevanz stellen sie aus messtechnischer Sicht häufig eine Herausforderung dar – insbesondere dann, wenn sie in schwer zugänglichen oder tiefen Bereichen eines Bauteils liegen. Werden solche Elemente nicht von Anfang an prüfgerecht ausgelegt, kann dies zu erheblichen Problemen bei der Inspektion führen, beispielsweise durch unzugängliche Geometrien, hohe Messunsicherheiten oder einen unverhältnismäßig hohen Prüfaufwand.

Ein zentrales Prinzip des Design for Inspection (DFI) besteht daher darin, die Zugänglichkeit von Fasen und geneigten Flächen für Koordinatenmessgeräte (KMG) bereits während der Konstruktionsphase systematisch zu berücksichtigen. Konstrukteurinnen und Konstrukteure sollten vermeiden, Fasen oder scharfkantige Übergänge in tiefen, engen Kavitäten zu platzieren, bei denen ein direkter Zugang des Tastsystems eingeschränkt ist. Stattdessen empfiehlt sich der Einsatz moderat geneigter Übergänge (z. B. 45°-Flächen), Freiräume zur erleichterten Annäherung des Tasters sowie gut positionierte Referenzflächen zur sicheren Ausrichtung.

Ein zusätzlicher empfehlenswerter Ansatz im DFI-Kontext ist die Integration flacher Zwischenreferenzflächen in direkter Nachbarschaft zur geneigten Geometrie. Diese ermöglichen eine reproduzierbare Ausrichtung des Tasters, reduzieren systematische Fehler bei der Antastung und erhöhen die Wiederholgenauigkeit der Messung. Dadurch kann die Prozessfähigkeit (z. B. gemessen anhand von Cg/Cgk-Werten) der Inspektion nachhaltig verbessert werden.

Abbildung 12 veranschaulicht zwei kontrastierende Konstruktionslösungen, die diese Prinzipien praxisnah gegenüberstellen. In Option 1 befindet sich eine 45°-geneigte Fläche (nicht im Sinne einer typischen Fase, sondern als schräger Übergang) am Ende einer 50 mm tiefen Sackbohrung. Aufgrund der großen Tiefe, des fehlenden seitlichen Zugangs sowie der ungünstig platzierten Bezugselemente ist die Messung dieser Geometrie nur eingeschränkt möglich. Ein Antasten mit konventionellen Tastern ist kaum realisierbar; Sondertaster oder aufwändige Vorrichtungen wären erforderlich, um zuverlässige Ergebnisse zu erzielen. Solche Konstellationen erhöhen nicht nur die Messunsicherheit, sondern erschweren auch die normgerechte Erfassung des Merkmals.

Im Gegensatz dazu zeigt Option 2 eine optimierte Auslegung im Sinne des DFI: Die Tiefe der Sackbohrung wurde auf 20 mm reduziert, was die direkte Zugänglichkeit zur 45°-Fläche deutlich verbessert. Darüber hinaus wurde ein seitlicher Zugang geschaffen, der eine freie Annäherung des Tasters aus einem alternativen Winkel erlaubt. Die Referenzflächen wurden auf gut zugänglichen, ebenen Bereichen positioniert und ermöglichen dadurch eine stabile Ausrichtung des Koordinatensystems.

Diese konstruktiven Maßnahmen erhöhen nicht nur die Messsicherheit, sondern tragen auch zur Reduktion von Prüfzeit und Tasterverschleiß bei. Die dargestellte Optimierung zeigt exemplarisch, wie bereits geringfügige Anpassungen in der Geometrie zu einer signifikanten Verbesserung der Inspektionsfähigkeit führen können. Im Sinne des DFI wird damit die funktionale Integrität des Bauteils über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg abgesichert – ohne zusätzliche Kosten oder technische Hürden im Prüfprozess.



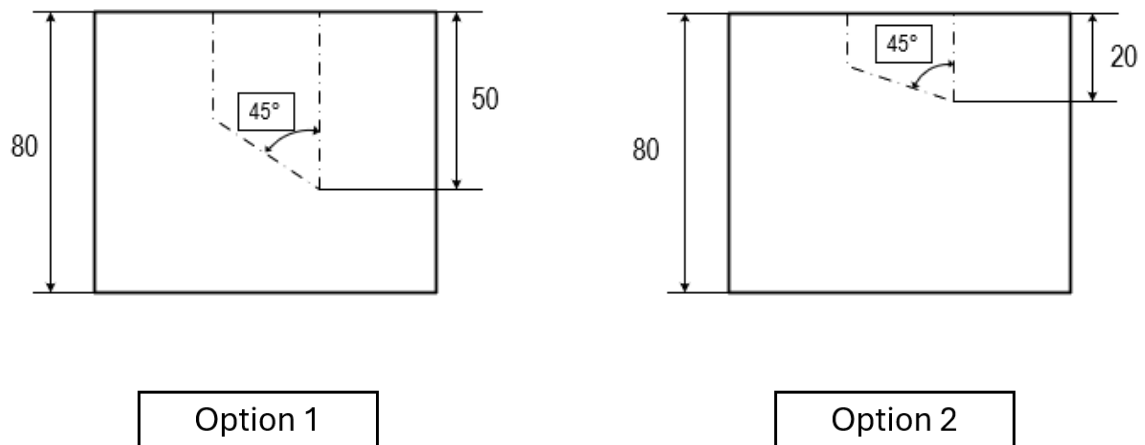


Abbildung 12. Neigung

6.5. Notizen und Dokumentation auf den Zeichnungen

Eine klare, vollständige und normgerechte technische Dokumentation ist ein zentrales Element der prüfgerechten Konstruktion und spielt eine entscheidende Rolle bei der Umsetzung des Design for Inspection (DFI). Technische Zeichnungen sind das verbindende Kommunikationsmittel zwischen Konstruktion, Fertigung und Qualitätssicherung. Um Missverständnisse und Interpretationsspielräume zu vermeiden, müssen sie so gestaltet sein, dass alle prüfrelevanten Informationen eindeutig, nachvollziehbar und vollständig übermittelt werden. [6]

Insbesondere bei funktionskritischen oder schwer messbaren Geometrien sollten Zeichnungen spezifische Hinweise enthalten, wie diese Merkmale inspiziert werden sollen. Dazu gehören beispielsweise [6]:

- die bevorzugten Tasterdurchmesser oder -typen (z. B. Standard-, Zylindertaster, sphärische Taster),
- empfohlene Messstrategien (z. B. Antastpunktanzahl, Tastwege, Toleranzauswertung nach ISO-GPS),
- Hinweise auf notwendige Bezugssysteme oder Ausrichtungsmerkmale,
- Anforderungen an Oberflächenzustand und Sauberkeit vor der Messung. [15]

Solche technischen Notizen unterstützen nicht nur das Messteam bei der korrekten Durchführung der Prüfung, sondern ermöglichen auch eine automatisierte oder

halbautomatisierte Auswertung mit KMG-Software, z. B. in ZEISS Calypso, und fördern die Rückverfolgbarkeit im Sinne qualitätsgesicherter Dokumentation [26].

Darüber hinaus empfiehlt es sich, zusätzliche Detailansichten oder isometrische Darstellungen in den Zeichnungen zu integrieren. Diese können besonders bei Fasen, Neigungen, tiefen Bohrungen oder komplexen Profilen die räumliche Interpretation erleichtern. Durch vergrößerte Schnitte, Explosionsdarstellungen oder Ansichten aus Messperspektive wird verdeutlicht, wie ein Merkmal gemessen werden soll, insbesondere in Bezug auf das Bezugssystem und die Positionierung des Werkstücks.

Solche Visualisierungen tragen dazu bei, Abweichungen zwischen Konstruktionsabsicht und Prüfpraxis zu minimieren, reduzieren die Einarbeitungszeit für das Prüfpersonal und stärken die Konsistenz der Auswertung über verschiedene Chargen hinweg.

Im Rahmen eines DFI-orientierten Konstruktionsprozesses ist es daher unerlässlich, die technische Zeichnung nicht nur als formales Ausgabedokument, sondern als aktives Planungsinstrument zu verstehen. Die Einbindung gezielter Anmerkungen und Darstellungsmittel stellt sicher, dass die Prüfstrategie von Anfang an auf die realen Bedingungen der Fertigung und Qualitätssicherung abgestimmt ist ein wesentliches Ziel dieser Arbeit.

7. Versuchen

Die folgenden Experimente dienen der gezielten Analyse zentraler Fragestellungen, die in der frühen Konstruktionsphase berücksichtigt werden sollten, um eine effiziente und zuverlässige dimensionsbezogene Prüfung der später gefertigten Bauteile zu gewährleisten. Aus Sicht des Design for Inspection (DFI) ist es von entscheidender Bedeutung, bereits während der Entwurfsphase jene Konstruktionsmerkmale zu identifizieren, die sich maßgeblich auf die Inspektionsfähigkeit, Messgenauigkeit und Wiederholbarkeit auswirken. Dabei liegt der Fokus dieser experimentellen Validierungen nicht auf der nachträglichen Optimierung fertigungstechnischer Prozesse, sondern auf der proaktiven Entwicklung konkreter Empfehlungen für Konstrukteure, um Prüfaufwände zu reduzieren, Messunsicherheiten zu minimieren und die Auslegung geometrischer Toleranzen im Sinne einer prüfgerechten Gestaltung abzustimmen.

Die vier durchgeführten Untersuchungen behandeln jeweils einen typischen Aspekt, der die messtechnische Zugänglichkeit, Stabilität und Wiederholbarkeit direkt beeinflusst: Die Wirkung von Flächenneigungen (Experiment 1), der Einfluss von Tasterlängen (Experiment 2), die Auswahl und Hierarchisierung von Bezügen (Experiment 3) sowie die Möglichkeit zur Vereinfachung von Bezugssystemen (Experiment 4). Jedes dieser Experimente liefert empirisch fundierte Erkenntnisse, die in konkrete Handlungsempfehlungen für die frühe

Designphase überführt werden können und zur konsequenten Umsetzung des DFI-Ansatzes im industriellen Umfeld beitragen.

Ergänzend zur Darstellung der Versuchsergebnisse enthält jeder Abschnitt eine kurze Analyse, welche die gemessenen Effekte aus der Perspektive des Design for Inspection interpretiert. Dadurch wird nicht nur der Zusammenhang zwischen experimenteller Beobachtung und konstruktiver Maßnahme verdeutlicht, sondern auch eine Brücke zur praxisgerechten Umsetzung geschlagen. Im Anschluss an den experimentellen Teilen folgt ein umfassender Implementierungsteil, in dem die gewonnenen Erkenntnisse systematisch in Form von DFI-basierten Gestaltungsprinzipien und Empfehlungen aufbereitet und in den Kontext realer Konstruktionsprozesse überführt werden.

Alle in dieser Arbeit durchgeführten Experimente wurden im Koordinatenmesstechniklabor der HAW Hamburg unter industrienahen Bedingungen realisiert. Als Prüfkörper kam ein standardisiertes Referenzbauteil der Firma Eurometron GmbH zum Einsatz, das gezielt für die Analyse geometrischer Merkmale und Prüfstrategien entwickelt wurde. Zur Ermittlung und Verifikation der Bauteilabmessungen sowie der Bezugsdefinitionen diente der Kalibrierschein MFC-2018-01 von Eurometron, die kalibrierten Sollwerte und zulässige Toleranzen dokumentiert.

Zur Referenzierung der realen Geometriemaße sowie zur Sicherstellung der metrologischen Rückführbarkeit wurde der Kalibrierschein MFC-2018-01 der Firma Eurometron GmbH verwendet, der die vollständige Kalibrierung des verwendeten Prüfkörpers gemäß DAkkS-Standards dokumentiert [28]. Im Anhang A dieser Arbeit befindet sich eine 3D-Darstellung des verwendeten Prüfkörpers. Diese Visualisierung wurde nicht vom Verfasser selbst erstellt, sondern zu Dokumentationszwecken übernommen. Die in dieser Arbeit enthaltenen 2D-Zeichnungen hingegen wurden eigenständig angefertigt.

Die Programmierung der Messstrategien sowie die Durchführung der Auswertungen erfolgten mit der Software Zeiss Calypso, welche die Erstellung normgerechter Prüfpläne gemäß ISO-GPS ermöglicht. Diese einheitliche Plattform gewährleistete eine konsistente Versuchsdurchführung über alle vier Experimente hinweg und bildete die Grundlage für die vergleichende Bewertung der Messergebnisse im Kontext des Design for Inspection (DFI).

Die spezifischen Abmessungen der eingesetzten Taster sowie die vollständigen Messergebnisse (jeweils 50 Einzelmessungen pro Experiment) sind im Anhang C dieser Arbeit dokumentiert. Die tabellarische Darstellung dort ermöglicht eine detaillierte Nachvollziehbarkeit der durchgeführten Prüfungen. Auf eine vollständige Integration dieser umfangreichen Daten in den Haupttext wurde bewusst verzichtet, um die Lesbarkeit und Übersichtlichkeit der experimentellen Darstellung nicht zu beeinträchtigen.

7.1. Experiment 1: Einfluss der Neigung auf die dimensionsbezogene Messung – Bewertung der messtechnischen Stabilität bei unterschiedlichen Tasterkugeldurchmessern

Die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Tasterkugeldurchmesser auf die dimensionsbezogene Messung definierter geneigter Flächen liefert wichtige Erkenntnisse für die prüfgerechte Gestaltung von Bauteilgeometrien. In diesem Experiment wurde analysiert, wie sich der Einsatz von Tastern mit 2 mm und 4 mm Kugeldurchmesser auf die Wiederholgenauigkeit der Messung auswirkt, wenn eine feste Flächenneigung von 10° vorliegt. Ziel war es zu bewerten, inwieweit sich durch die gezielte Auswahl des Messequipments – unter Berücksichtigung geometrischer Einschränkungen – eine stabile und wiederholgenaue Messung gewährleisten lässt. Dies ist besonders relevant im Sinne des Design for Inspection (DFI), das eine frühzeitige Abstimmung zwischen Geometrieauslegung und verfügbaren Messstrategien erfordert.

Die Ergebnisse unterstützen somit die DFI-Prämisse, dass nicht nur die Geometrie selbst, sondern auch die Kompatibilität mit dem eingesetzten Messequipment in der Konstruktionsphase berücksichtigt werden muss, um Messunsicherheiten zu minimieren und Prüfprozesse effizient zu gestalten.

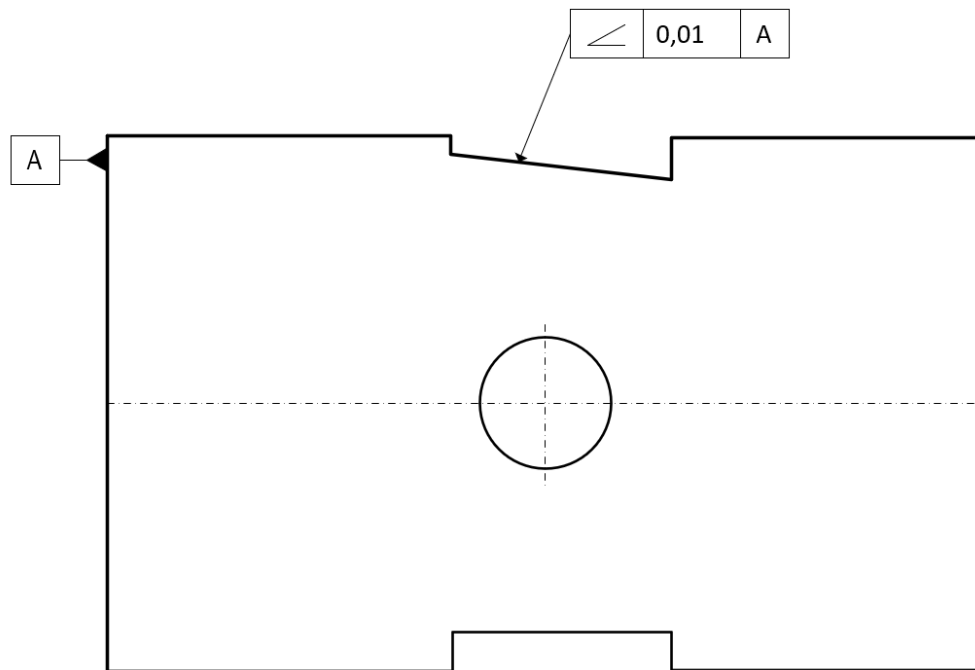


Abbildung 13. 1. Versuch- Seitenansicht

Die Messungen (Abb.13) erfolgten unter stabilen Bedingungen auf einer Koordinatenmessmaschine (KMG), wobei der Einfluss der Kugeldurchmesser gezielt isoliert, betrachtet wurde. Die Messstrategie wurde so gewählt, dass entlang der geneigten Fläche reproduzierbar gemessen werden konnte. Pro Kugeldurchmesser wurden jeweils 50 Einzelmessungen durchgeführt. Die anschließende Auswertung erfolgte mittels zweiseitigem T-Test (nach T-Student) zur Analyse der Mittelwertdifferenzen sowie F-Test (nach Fischer) zur Analyse der Varianzunterschiede.

Die Resultate zeigten, dass der Mittelwert bei Verwendung der 2-mm-Kugel 0,01242 mm betrug, während der Mittelwert bei der 4-mm-Kugel leicht höher bei 0,01533 mm lag. Der T-Test ergab einen t-Wert von $-29,444$ und einen p-Wert von $4,68E-40$, womit ein signifikant unterschiedlicher Mittelwert festgestellt wurde. Trotz der geringen Differenz in der absoluten Höhe der Mittelwerte weist dieses Ergebnis auf einen konsistenten systematischen Unterschied hin, der messtechnisch relevant sein kann, insbesondere bei engen Toleranzen. Es zeigt sich,

dass selbst bei vergleichbarer Position der gemessenen Punkte die Kugelgröße einen Einfluss auf das gemittelte Messergebnis hat.

Der F-Test offenbarte eine noch deutlichere Auswirkung der Kugeldurchmesser auf die Messstabilität. Während die Varianz bei der 2-mm-Kugel bei $4,11\text{E}-07 \text{ mm}^2$ lag, betrug sie bei der 4-mm-Kugel $7,73\text{E}-08 \text{ mm}^2$ ein Unterschied, der mit einem F-Wert von 5,318 und einem p-Wert von $1,63\text{E}-08$ als statistisch hochsignifikant eingestuft werden kann. Der kritische F-Wert bei einem Signifikanzniveau von 5 % liegt bei 1,607, womit auch die Varianzunterschiede als signifikant gelten. Diese Ergebnisse belegen eine deutlich höhere Streuung bei kleineren Kugeldurchmessern, was im Kontext des DFI als kritisch zu bewerten ist. Die Ergebnisse von diesem Experiment sind im Anhang C-1 (Abb. 21 und Tabelle 3) vorhanden.

Trotz der klaren Unterschiede in der Messwertstreuung war es im Rahmen dieses Experiments nicht möglich, Neigungswinkel über 10° zu untersuchen. Diese Begrenzung resultiert aus den konstruktiven Eigenschaften des Prüfkörpers sowie aus Einschränkungen der Tastergeometrie und des eingesetzten Messsystems. In vielen realen Anwendungsszenarien (etwa in Gussteilen, Freiformflächen oder bei Montageanschlüssen) treten jedoch deutlich steilere Neigungswinkel auf. Studien wie [23] zeigen, dass insbesondere bei Neigungen $\geq 15^\circ$ die Wiederholbarkeit der Messung drastisch abnimmt, sofern keine geeigneten Zwischenreferenzflächen oder gestufte Zugangsbereiche vorgesehen werden. In solchen Fällen kommt es häufig zu Instabilität des Tastsystems, systematischen Winkelfehlern und einer erhöhten Varianz. [23]

Die Kombination aus experimentellen Daten und Literaturbefunden legt nahe, dass bereits bei moderaten Neigungen ($> 10^\circ$) der Kontaktbereich der größeren Tasterkugel zu einer unerwünschten Glättung der Oberfläche führt, wodurch lokale Geometrieabweichungen nicht korrekt erfasst werden. Darüber hinaus lässt sich die erhöhte Streuung bei größeren Kugeldurchmessern teilweise durch den instabileren Kontaktwinkel sowie die stärkere Abhängigkeit von der lokalen Oberflächentopographie erklären, was zu variableren Tastpunkten und damit zu einer geringeren Wiederholbarkeit führt. Dies bestätigt die diskutierte Annahme, dass profilierte oder gekrümmte Oberflächen unter großen Kugeldurchmessern übermäßig nivelliert werden, was zu systematischen Messabweichungen führt. [23]

In Anbetracht dieser Ergebnisse und der identifizierten Limitationen erscheint eine weiterführende Untersuchung mit speziell gefertigten Prüfkörpern, größeren Neigungswinkeln (z. B. 15° – 30°) und adaptiven Tasterstrategien (z. B. Winkeltaster oder optische Systeme) als

nächster sinnvoller Schritt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden im folgenden Kapitel hinsichtlich ihrer praktischen Relevanz für die Anwendung des Design for Inspection (DFI) reflektiert und in konkrete Handlungsempfehlungen überführt. [23]

7.2. Experiment 2: Einfluss der Tasterlänge auf die Messgenauigkeit – Analyse von Biegung und Vibration bei der Prüfung zylindrischer Oberflächen

Die Analyse des Einflusses der Tasterlänge bei der Messung von Zylindern ist entscheidend, um zu verstehen, wie geometrische Toleranzen und Prüfstrategien optimiert werden können, um die Zuverlässigkeit des metrologischen Prozesses zu verbessern. In diesem Experiment wurde untersucht, wie sich die Länge eines Tasters auf die Erfassung eines Zylinders auswirkt. Beide eingesetzten Taster verfügten über denselben Kugeldurchmesser von 8 mm, unterschieden sich jedoch in ihrer effektiven Länge: Ein Taster hatte eine Standardlänge von 140 mm, der zweite wurde durch die Verwendung einer Verlängerung auf 180 mm verlängert, da keine längeren Taster mit gleichem Kugeldurchmesser zur Verfügung standen.

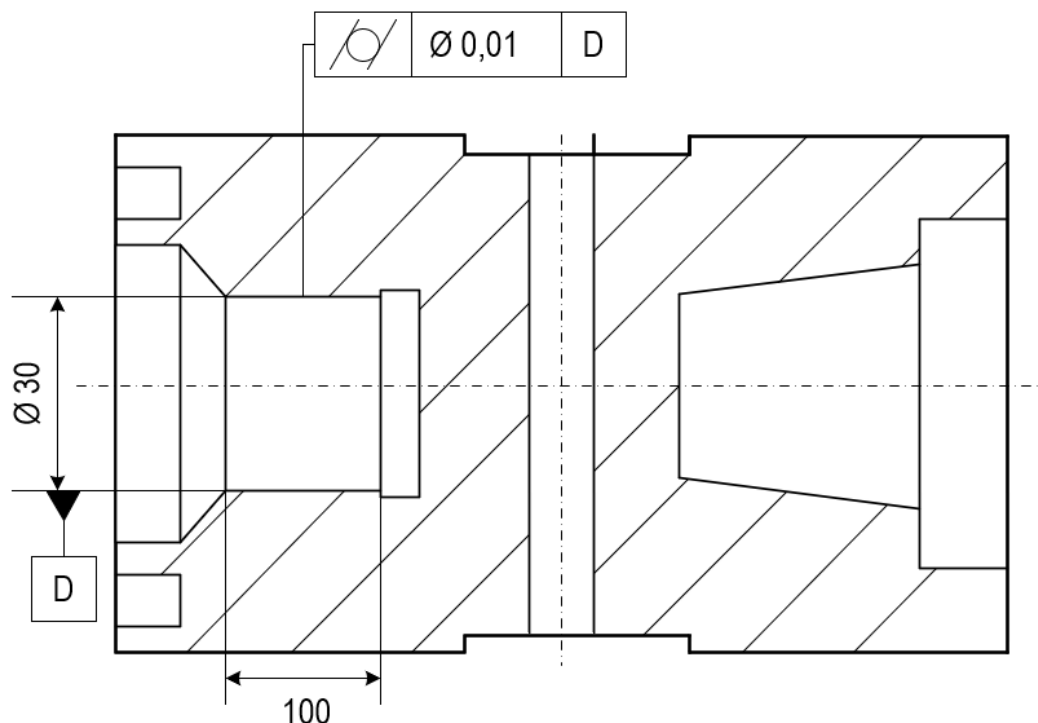


Abbildung 14. 2. Versuch- Schnittansicht

Der Fokus dieses Experiments lag auf der Untersuchung, wie sich Unterschiede in der Tasterlänge auf die Präzision bei der vollständigen Vermessung eines Zylinders auswirken –

insbesondere im Hinblick auf die Dimensionsstabilität und die Wiederholgenauigkeit entlang verschiedener axialer Abschnitte. Der untersuchte Zylinder entspricht der Achse des Merkmals D (siehe Abb. 14) und wurde über seine gesamte Länge hinweg erfasst.

Zur Strukturierung des Experiments wurden zwei Haupt-Hypothesen formuliert: Die Nullhypothese postulierte, dass die Länge des Tasters keinen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse habe – das heißt, dass sowohl der kurze (140 mm) als auch der verlängerte Taster (180 mm) vergleichbare Ergebnisse in Bezug auf Mittelwert und Streuung liefern sollten. Die Alternativhypothese hingegen nahm an, dass ein längerer Taster infolge erhöhter Biegeverformungen und möglicher Schwingungseinflüsse zu einer größeren Streuung der Messdaten führen kann, insbesondere in bestimmten Bereichen entlang der Zylinderachse.

Zur statistischen Auswertung wurden jeweils 50 Wiederholungen pro Tasterlänge durchgeführt und mit einem zweiseitigen T-Test sowie einem F-Test nach Fisher analysiert. Die Ergebnisse des T-Tests ergaben einen t-Wert von 43,33 bei einem p-Wert von $2,81\text{E-}65$, womit die Nullhypothese bezüglich der Mittelwertgleichheit klar verworfen werden muss. Die Messwerte der längeren Tasterkonfiguration (180 mm) wichen signifikant vom kürzeren Taster ab. Im Gegensatz dazu zeigte der F-Test ein Varianzverhältnis von $0,836\text{ mm}^2$ das unter dem kritischen Wert von $0,622\text{ mm}^2$ lag, jedoch mit einem p-Wert von $0,265$ keine signifikante Varianzunterschiede aufzeigte. Die Ergebnisse von diesem Experiment sind im Anhang C-2 (Abb. 22, Tabelle 4) vorhanden.

Diese Resultate zeigen ein differenziertes Bild: Während die Messmittelwerte zwischen beiden Konfigurationen des Tasters signifikant voneinander abweichen, bleibt die Streuung der Messergebnisse vergleichbar. Dies legt nahe, dass nicht zufällige Schwingungen oder Biegeeffekte, sondern systematische Abweichungen für den Unterschied verantwortlich sind – beispielsweise bedingt durch die Veränderung der Tastgeometrie im Raum und den resultierenden Kontaktwinkel zur Oberfläche.

Im Sinne des DFI zeigt dieses Experiment, dass die Verlängerung eines Tasters, selbst bei identischer Kugelgröße, zu messbaren und systematischen Abweichungen führen kann, die sich auf die dimensionale Bewertung auswirken. Konstrukteurinnen und Konstrukteure sollten daher in der Entwurfsphase nicht nur die Zugänglichkeit der Geometrie bewerten, sondern auch die Auswirkungen längerer Konfigurationen des Tasters im Prüfprozess mitberücksichtigen. Eine geeignete geometrische Auslegung – etwa durch Zwischenreferenzflächen oder durch die

Ausrichtung des Zylinders – kann helfen, systematische Abweichungen zu kompensieren und so eine präzisere Wiederholung zu gewährleisten. Die konkreten DFI-Empfehlungen aus diesem Experiment werden im nächsten Kapitel systematisch abgeleitet.

Diese Vorgehensweise steht im engen Zusammenhang mit den Erkenntnissen aus Experiment 1, in dem ebenfalls gezeigt wurde, dass Zwischenreferenzflächen bei geneigten Flächen mit großen Kugeldurchmessern die Wiederholbarkeit deutlich verbessern können. Beide Experimente unterstreichen die Bedeutung einer vorausschauenden Geometriegestaltung zur Sicherstellung der Messbarkeit unter realen Bedingungen.

Darüber hinaus können diese Referenzflächen mit funktionalen Bezügen kombiniert werden, um die Ausrichtung des Bauteils zu verbessern und sicherzustellen, dass lokale Abweichungen nicht fälschlicherweise, als Fertigungsfehler interpretiert werden. In Anwendungen, bei denen der Zylinder eine präzise Koaxialität zu anderen Komponenten aufweisen muss, kann die Festlegung strategisch platzierter Bezüge dazu beitragen, dass die Messung die realen Montagebedingungen besser abbildet. Bezüge können auf idealisierte Geometrielemente wie Achsen oder Referenzflächen zurückgeführt werden, die durch KMG-Systeme definiert werden und zur präzisen Ausrichtung des Bauteils beitragen. [6]

Ein weiterer entscheidender Aspekt ist die Orientierung des Werkstücks während der Messung. Frühere Studien [23] zeigen, dass Messungen in einer geneigten Position (z. B. 45°) eine geringere Streuung aufweisen als Messungen in horizontaler Ausrichtung. Wann immer möglich, sollte der Konstrukteur daher prüfen, ob eine günstige Orientierung der Bauteilgeometrie gewählt werden kann, um eine stabilere Messsituation zu ermöglichen. Ist dies aufgrund funktionaler Anforderungen nicht machbar, können zusätzliche Referenzflächen integriert werden, um eine optimale Positionierung des Bauteils in der KMG zu gewährleisten. [23]

Die Analyse dieses Experiments zeigt, dass die Länge des Tasters einen signifikanten Einfluss auf die Wiederholbarkeit der Messung haben kann, insbesondere im Hinblick auf systematische Abweichungen. Allerdings ließ sich in der vorliegenden Untersuchung – trotz eines signifikanten Unterschieds im Mittelwert – keine erhöhte Streuung bei der längeren Tasterkonfiguration nachweisen. Dies deutet darauf hin, dass der Einfluss der Tasterlänge auf die Varianz nicht pauschal angenommen werden kann, sondern stark von den konkreten Messbedingungen und der Ausrichtung des Prüfkörpers abhängt.

7.3. Experiment 3: Strategische Auswahl von Bezügen – Einfluss auf die Messstabilität und Wiederholgenauigkeit bei der Positionsbestimmung

Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit der Bewertung des Einflusses unterschiedlicher Strategien zur Auswahl und Hierarchisierung von Bezügen auf die Wiederholgenauigkeit bei der Positionsmessung eines Zylinders. Ziel des Experiments war es, die messtechnische Relevanz der Reihenfolge der Bezugsflächen auf die Stabilität der Messergebnisse zu analysieren. Dabei stand insbesondere die Frage im Fokus, ob bestimmte Kombinationen oder die gezielte Umordnung von Bezügen eine statistisch signifikante Reduktion der Messwertstreuung bewirken können, ohne dass sich der Mittelwert der Messdaten verändert. Dieses Thema ist von zentraler Bedeutung für die industrielle Messtechnik, da in der Praxis häufig geometrisch gleichwertige, aber messtechnisch unterschiedlich stabile Bezugsflächen zur Verfügung stehen, deren Auswahl die Zuverlässigkeit des gesamten Prüfprozesses beeinflussen kann.

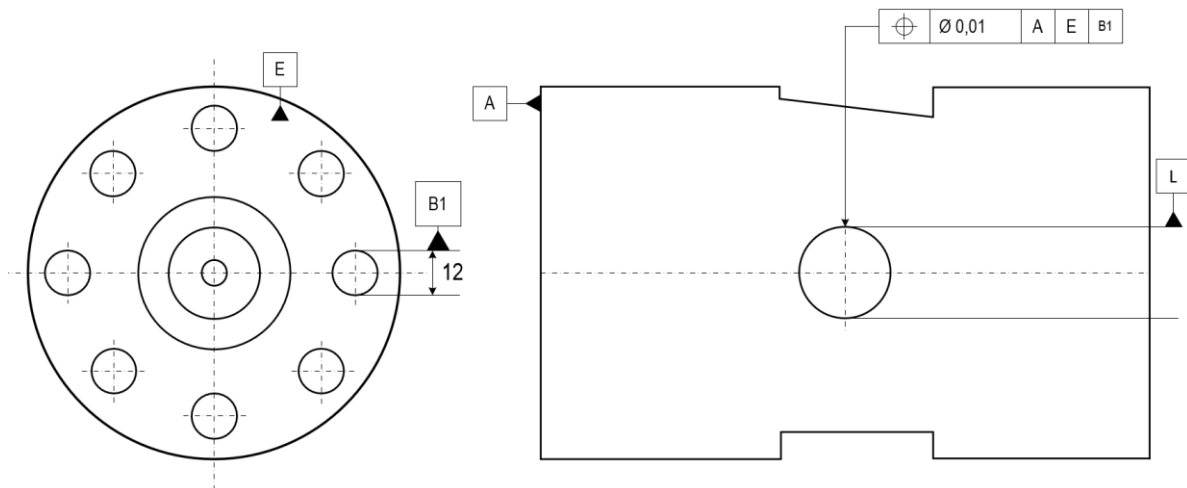


Abbildung 15. Erste Variante von Eurometron

Die Position des Zylinders L diente dabei als Zielmerkmal, das in zwei unterschiedlichen Konfigurationen bezüglich der Bezugsdefinition ausgewertet wurde. In der ersten Variante wurde die Referenzstruktur in der Reihenfolge A1 - B1 - E (Abb. 15) definiert, während in der zweiten Variante die Reihenfolge auf A1 - E - B1 (Abb. 16) umgestellt wurde. Beide Konfigurationen erfüllten geometrisch die Anforderungen an eine vollständige Bezugskette mit

drei Freiheitsgradbeschränkungen, unterschieden sich jedoch hinsichtlich der Lage und Flächenausdehnung des sekundären und tertiären Bezugs. Die Fläche E wies im Vergleich zu B1 eine deutlich größere Auflagefläche auf, was als möglicher Einflussfaktor auf die mechanische Stabilität während der Messung vermutet wurde. [6]

Zur Bewertung der Messergebnisse wurden zwei statistische Methoden angewendet: der T-Test nach T-Student zur Analyse der Mittelwertdifferenz und der F-Test nach Fischer zur Untersuchung der Varianz. Die Ergebnisse des T-Tests zeigten, dass sich die Mittelwerte der beiden Messreihen nicht signifikant voneinander unterscheiden ($p > 0,05$). Dies deutet darauf hin, dass die absolute Positionsgenauigkeit des gemessenen Zylinders unabhängig von der Reihenfolge der Bezugsdefinition konstant blieb. Dieses Erkenntnis ist insofern bedeutsam, als sie zeigt, dass die Auswahl der Bezüge keine systematische Verschiebung der Messergebnisse verursacht.

Demgegenüber offenbarte der F-Test einen signifikanten Unterschied in der Streuung der Messdaten. Die Konfiguration mit der Fläche E als sekundärem Bezug (A1 - E - B1; Abb. 16) zeigte eine deutlich geringere Varianz im Vergleich zur umgekehrten Reihenfolge (A1 - B1 - E; Abb. 15), mit einem F-Wert von 1504,57 und einem niedrigen p-Wert von 1,2879E-98. Dieser Befund weist darauf hin, dass die mechanische Stabilität des sekundären Bezugs einen unmittelbaren Einfluss auf die Wiederholgenauigkeit des gesamten Messprozesses ausübt. Eine größere Auflagefläche des sekundären Bezugselements reduziert offenbar die Gefahr ungewollter Lageveränderungen oder Kippbewegungen während der Messung, was zu einer höheren Konsistenz in den erfassten Positionsdaten führt. Die Ergebnisse von diesem Experiment sind im Anhang C-3 (Abb. 23, Tabelle 5) vorhanden.

Die gewonnenen Ergebnisse liefern somit einen empirischen Nachweis dafür, dass sich die Reihenfolge und physikalische Ausgestaltung von Bezügen erheblich auf die Streuung der Messergebnisse auswirken können, auch wenn die Geometrie des zu messenden Merkmals und die messtechnische Vorgehensweise unverändert bleiben. In praxisnahen Messszenarien, in denen hohe Anforderungen an Wiederholbarkeit und Messsicherheit gestellt werden, können solche Unterschiede einen großen Einfluss auf die Qualitätssicherung haben. Das Experiment belegt darüber hinaus, dass messtechnisch relevante Unterschiede nicht zwangsläufig mit großen geometrischen Veränderungen oder funktionalen Modifikationen der Bauteilgeometrie

verbunden sein müssen, sondern bereits durch die gezielte Festlegung der Bezugsstrategie entstehen können.

Insgesamt zeigt Experiment 3 (Abb. 16), dass die Wahl und Anordnung von Bezügen ein entscheidender Parameter für die Kontrolle der Messunsicherheit sind. Während sich die Mittelwerte als stabil erwiesen, konnte durch die Veränderung der Hierarchie der Bezugselemente eine signifikante Verbesserung der Wiederholgenauigkeit erzielt werden. Diese Erkenntnis erweitert die in den Experimenten 1 und 2 gewonnenen Einsichten um die Perspektive der Referenzstruktur und legt die Grundlage für eine differenzierte Betrachtung der Einflussfaktoren auf die metrologische Prozessstabilität bei der geometrischen Qualitätsprüfung.

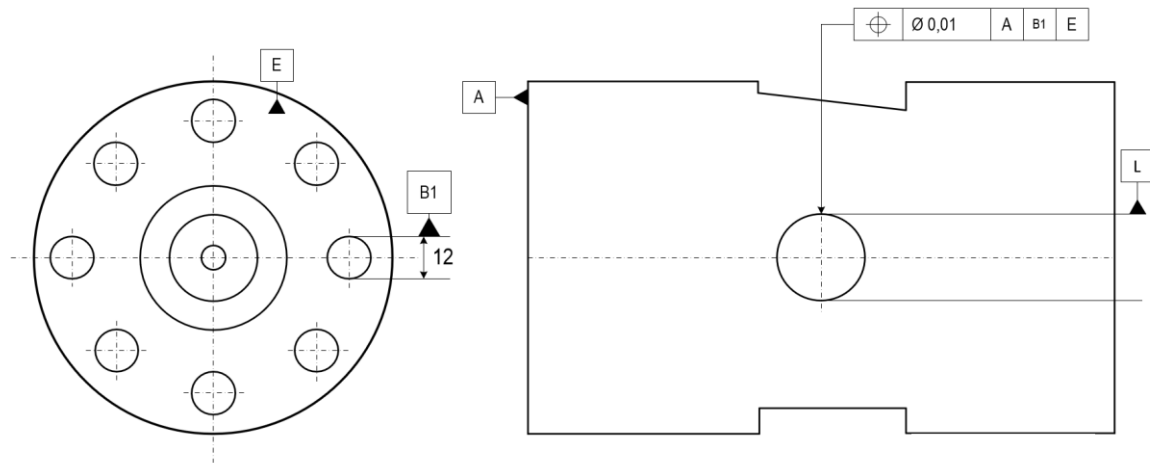


Abbildung 16. 3. Versuch

7.4. Experiment 4: Optimierung der Definition von Bezügen – Bewertung der Reduktion von Referenzflächen ohne Beeinträchtigung der Messgenauigkeit

Die Vereinfachung von Bezugssystemen bei der Prüfung mechanischer Bauteile stellt ein zentrales Thema in der dimensionellen Messtechnik sowie in der Optimierung des Designs for Inspection (DFI) dar. In diesem vierten Experiment wurde untersucht, ob der Verzicht auf einen tertiären Bezug die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Positionsmessung des Zylinders L in einem geometrisch definierten, jedoch funktional neutralen Prüfkörper beeinflusst. Ziel der Untersuchung war es, festzustellen, ob ein vereinfachtes Bezugssystem mit nur zwei Bezügen ausreicht, um stabile und reproduzierbare Messergebnisse zu gewährleisten, ohne die

Zuverlässigkeit des Prüfprozesses zu beeinträchtigen, eine Fragestellung von hoher Relevanz im Kontext des DFI.

Hierfür wurden zwei Bezugskonfigurationen miteinander verglichen. In der ersten Konfiguration diente A1 als primärer Bezug, B1 als sekundärer und E als tertiärer Bezug (System A1-B1-E Abb. 15). In der zweiten, vereinfachten Konfiguration wurde auf den sekundären Bezug B1 verzichtet und die größere zylindrische Fläche E übernahm die Rolle der Sekundärreferenz, wodurch das System A1-E (Abb. 17) entstand. Diese Anpassung erlaubte es zu bewerten, ob die Eliminierung eines tertiären Bezugs einen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse hat, insbesondere da die Fläche E geometrisch auch den Bereich von B1 abdeckt und eine größere Kontaktfläche bietet.

Für beide Konfigurationen wurden systematische Messreihen durchgeführt. Die Auswertung der Daten erfolgte mittels T-Test und F-Fischer-Test, um sowohl die Mittelwertunterschiede als auch die Streuung der Messergebnisse statistisch zu analysieren.

Zur Strukturierung der Studie wurden zwei Hypothesen definiert. Die Nullhypothese postulierte, dass die Reduktion der Bezüge keinen signifikanten Einfluss auf die Messgenauigkeit habe. Die Alternativhypothese hingegen ging davon aus, dass die Entfernung eines Bezugs die Stabilität und Reproduzierbarkeit der Messung negativ beeinflusst.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine solche Vereinfachung nur dann praktikabel ist, wenn das Bauteil im vereinfachten Bezugssystem wiederholbar positioniert werden kann. Bei erhöhter Fertigungsvarianz oder in Systemen mit hohen Anforderungen an die geometrische Stabilität kann ein dritter Bezug dennoch notwendig bleiben, um eine robuste Ausrichtung zu gewährleisten.

Die praktische Relevanz dieser Erkenntnisse zeigt sich insbesondere im Vergleich zum dritten Experiment, in dem die Hierarchie der Bezüge verändert wurde (von A1-B1-E zu A1-E-B1), um die Messstabilität zu optimieren. Dort wurde nachgewiesen, dass eine größere Auflagefläche eines sekundären Bezugs (E statt B1, Abb.17) die Streuung der Messergebnisse deutlich reduziert. In direkter Fortführung dieses Ansatzes prüft das vierte Experiment nun, ob unter bestimmten Bedingungen ein Bezug ganz entfallen kann, mit ähnlich positiven Ergebnissen.

Die Mittelwerte der beiden Konfigurationen lagen mit 0.24401816 mm und 0.24405612 mm nahezu identisch beieinander. Dies deutet darauf hin, dass der Wegfall des tertiären Bezugs keine signifikante Beeinträchtigung der Mittelwertgenauigkeit zur Folge hatte. Der durchgeführte t-Test ergab eine t-Statistik von -6.88 und einen zweiseitigen p-Wert von 1.0034E-08, was trotz minimaler Mittelwertdifferenz statistisch signifikant ist. Diese Signifikanz ist jedoch auf die hohe Wiederholgenauigkeit der KMG zurückzuführen und muss in Relation zur absoluten Differenz betrachtet werden, die im Bereich weniger Mikrometer liegt.

Die Streuung der Daten wurde durch den F-Test mit einer Prüfgröße von 0.994 analysiert. Der resultierende p-Wert von 0.4926 und der kritische F-Wert von 0.6252 belegen, dass keine signifikante Varianzunterschiede zwischen den beiden Bezugskonfigurationen festgestellt wurden. Dies bestätigt, dass das vereinfachte Bezugssystem unter den gewählten Bedingungen eine gleichwertige Wiederholgenauigkeit ermöglicht wie das vollständige System. Die Ergebnisse von diesem Experiment sind im Anhang C-4 (Abb. 24, Tabelle 6) vorhanden.

Auch in Bezug auf Experiment 2 lassen sich Parallelen ziehen: Dort wurde gezeigt, wie wichtig die Stabilität und Ausrichtung eines Bauteils ist, wenn lange Taster eingesetzt werden. Eine stabile Bezugskonfiguration spielt dabei eine zentrale Rolle, um Messabweichungen infolge von Tasterbiegung und Vibrationen zu minimieren. Argumente, die auch hier gelten, wenn über den Verzicht auf Bezüge nachgedacht wird.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Mittelwerte der beiden Bezugskonfigurationen nahezu identisch waren und keine signifikante Abweichung aufwiesen. Dies spricht dafür, dass die Präzision im Sinne des Mittelwerts durch den Wegfall des tertiären Bezugs nicht beeinträchtigt wurde. Der F-Fischer-Test ergab zudem eine Varianzverhältnis nahe 1, was auf eine vergleichbare Messstreuung in beiden Fällen hindeutet. Somit kann geschlossen werden, dass die vereinfachte Bezugskonfiguration die Stabilität der Messung nicht wesentlich verschlechtert hat.

Letztlich hängt die Entscheidung zur Vereinfachung eines Bezugssystems stark vom Verwendungszweck des Bauteils ab. In hochpräzisen Baugruppen, etwa in der Luft- und Raumfahrt, ist eine robuste und vollständige Bezugsdefinition unerlässlich. In weniger komplexen Anwendungen hingegen kann eine Vereinfachung zur Effizienzsteigerung beitragen, ohne die Qualität der Prüfung zu beeinträchtigen. [23]

Diese Ergebnisse sind aus der Perspektive des DFI besonders relevant: Sie zeigen, dass unter bestimmten geometrischen und funktionalen Voraussetzungen der Verzicht auf einen zusätzlichen Bezug möglich ist, ohne die metrologische Integrität des Prüfergebnisses zu gefährden. Damit liefern sie eine empirisch fundierte Grundlage zur Diskussion über die mögliche Vereinfachung von Bezugssystemen im Rahmen der zeichnungsgerechten Auslegung und Prüfplanung.

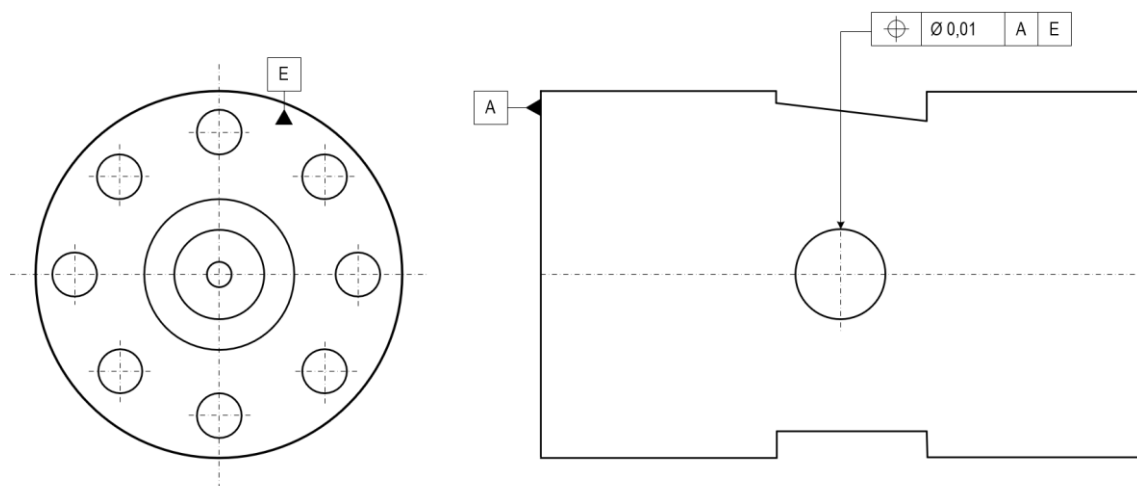


Abbildung 17. 4. Versuch

7.5. Gesamtsynthese der experimentellen Untersuchungen und Ausblick auf die Umsetzung des DFI

Die vier durchgeführten Experimente bildeten den zentralen empirischen Kern dieser Arbeit und dienten der gezielten Analyse maßgeblicher Konstruktionsmerkmale, welche die messtechnische Zugänglichkeit, Wiederholbarkeit und Stabilität von Koordinatenmessungen beeinflussen. Jedes Experiment fokussierte dabei einen spezifischen Einflussfaktor – von geometrischen Neigungen (Experiment 1) über Tasterlängen (Experiment 2), bis hin zur Auswahl und Hierarchisierung von Bezügen (Experiment 3) sowie zur möglichen Vereinfachung von Bezugssystemen (Experiment 4).

Trotz ihrer thematischen Differenzierung offenbaren die Ergebnisse aller vier Untersuchungen eine gemeinsame Grundtendenz: Die Qualität und Effizienz der dimensionsbezogenen Prüfung wird nicht allein durch die Wahl des Messmittels bestimmt, sondern maßgeblich durch Entscheidungen, die bereits in der frühen Phase der Konstruktion getroffen werden. Faktoren wie die Orientierung von Flächen, die Länge des verwendeten Tasters, die geometrische

Stabilität von Bezugsflächen oder die Anzahl der definierten Bezüge wirken sich direkt auf die Messunsicherheit aus – insbesondere bei engen Toleranzvorgaben und komplexen Geometrien.

Zudem wurde in allen Experimenten deutlich, dass messtechnische Probleme häufig durch konstruktive Maßnahmen gezielt vermieden werden können, ohne die Funktionalität des Bauteils zu beeinträchtigen. Die Integration von Zwischenreferenzflächen, die Verwendung stabiler Bezugsflächen oder die gezielte Orientierung der Geometrie im Hinblick auf die Messstrategie ermöglichen eine deutliche Reduktion der Streuung, eine verbesserte Wiederholbarkeit und damit eine signifikante Optimierung des gesamten Inspektionsprozesses.

Zur besseren Einordnung der experimentellen Befunde wird jedem Versuch ein kurzer analytischer Abschnitt beigefügt, in dem die Ergebnisse aus der Perspektive des Design for Inspection (DFI) reflektiert werden. Diese Einordnung ermöglicht eine differenzierte Bewertung der Einflussfaktoren auf die Messbarkeit und bildet zugleich die Grundlage für die im folgenden Kapitel dargestellten Handlungsempfehlungen zur praktischen Umsetzung des DFI-Ansatzes. Dort werden die zentralen Erkenntnisse systematisch in konkrete Gestaltungsprinzipien überführt, die Konstrukteurinnen und Konstrukteuren helfen sollen, die Inspektionsfähigkeit technischer Produkte bereits in der Designphase abzusichern

8. Implementierung DFI

Dieses Kapitel präsentiert eine strukturierte Methodologie zur praktischen Umsetzung des Design for Inspection Ansatzes (DFI) in industriellen Anwendungen. Ziel ist es, Konstrukteurinnen und Konstrukteuren konkrete Strategien bereitzustellen, mit denen sich geometrische Merkmale von Bauteilen bereits in der frühen Entwicklungsphase so gestalten lassen, dass eine effiziente, wiederholbare und wirtschaftliche Inspektion gewährleistet ist. [29]

Die vorgeschlagene Methodologie basiert auf den normativen Grundlagen der ISO 1101 und ISO 5459 sowie auf den empirischen Erkenntnissen der vorangegangenen vier Experimente. Diese werden in einem mehrphasigen Implementierungsmodell zusammengeführt, das zentrale Aspekte wie Messzugänglichkeit, Auswahl und Vereinfachung von Bezügen, Einfluss messtechnischer Parameter sowie digitale Validierung durch Simulation umfasst. [6]

Zur besseren Orientierung zeigt Tabelle 1 die wichtigsten Inspektionsfunktionen im DFI-Kontext. Sie gliedern sich in die fünf Schritte Setup, Present, Search, Decision und Respond, die gemeinsam den Rahmen für einen systematischen, rückverfolgbaren Prüfprozess bilden.

Ergänzend dazu veranschaulicht ein Flussdiagramm (Abb. 19) am Ende dieses Kapitels die vier zentralen Implementierungsphasen der DFI-Strategie: Von der Validierung der Messzugänglichkeit über die Optimierung der Bezugsauswahl und die Berücksichtigung des Messequipments bis hin zum Einsatz virtueller Inspektionssimulationen. Jede Phase ist praxisorientiert aufgebaut und enthält konkrete Handlungsempfehlungen, die sich direkt aus den Experimenten ableiten lassen.

Diese strukturierte Herangehensweise ermöglicht es, potenzielle Inspektionsprobleme frühzeitig zu erkennen, Qualitätskosten zu reduzieren und die Konsistenz zwischen Konstruktionsabsicht und messtechnischer Umsetzung nachhaltig zu verbessern.

8.1. Phase 1: Frühe Validierung der Messzugänglichkeit (basierend auf Experiment 1)

Die Messzugänglichkeit stellt einen entscheidenden Faktor für die Wiederholbarkeit und Genauigkeit des dimensionalen Prüfprozesses dar, insbesondere bei geneigten oder schwer zugänglichen Flächen. Die experimentellen Ergebnisse deuten darauf hin, dass geneigte Oberflächen – insbesondere bei einem Antastwinkel, der deutlich von der Normalrichtung abweicht – die Wiederholgenauigkeit der Messung negativ beeinflussen können. Dies gilt vor allem dann, wenn keine geeignete Bezugsebene zur Ausrichtung vorhanden ist. Der vergrößerte Kontaktbereich bei flachem Anstellwinkel kann zu einem Mittelungseffekt führen, bei dem lokale Unebenheiten der Oberfläche geglättet und dadurch systematische Fehler überlagert werden. Dieser Effekt war bei der Verwendung eines Tasters mit größerem Kugeldurchmesser (4 mm) deutlich ausgeprägter als bei einem kleineren (2 mm), was sich in einer höheren Messwertstreuung zeigte. Zwar lässt sich die genaue quantitative Auswirkung nicht isoliert bestimmen, doch weisen diese Ergebnisse auf die Notwendigkeit hin, Taster möglichst in Normalrichtung zur Oberfläche zu führen, um die Einflussfaktoren zu minimieren.

Aus Sicht des DFI lassen sich drei zentrale Strategien identifizieren, um die Zugänglichkeit und Stabilität des Messprozesses unter diesen Bedingungen zu verbessern. Erstens wird die Integration von Zwischenreferenzflächen empfohlen, insbesondere in Bereichen mit Neigungen

über 15° [23], da diese die Möglichkeit bieten, den Tasterkontakt über strategisch platzierte, planare Plattformen entlang der Neigung zu stabilisieren. Diese Flächen sollten gemäß ISO 1101 mit Planheitstoleranzen von maximal $\pm 0,01$ mm und Oberflächenprofiltoleranzen von nicht mehr als $\pm 0,02$ mm ausgelegt werden, um ihre Funktion als zuverlässige Messreferenzen zu gewährleisten. [6]

Zweitens wird der Einsatz von CAD-basierten Simulationswerkzeugen und virtuellen Prüfumgebungen hervorgehoben, die es ermöglichen, die Messzugänglichkeit bereits vor der Fertigung zu analysieren. Die Simulation des Prüfablaufs im 3D-Modell erlaubt es, geometrische Einschränkungen zu identifizieren, die optimale Orientierung des Bauteils auf der Koordinatenmessmaschine (KMG) zu bewerten und geeignete Tasterkonfigurationen in Abhängigkeit vom Anstellwinkel und von kritischen Geometriemerken zu validieren. [14]

Als dritte ergänzende Strategie, insbesondere dann, wenn geometrische Anpassungen aus funktionalen oder fertigungstechnischen Gründen nicht möglich sind, wird im Rahmen des DFI die gezielte Neuausrichtung des Bauteils während der Prüfung empfohlen. Wie im Experiment dokumentiert wurde, kann durch eine geneigte Anordnung des Prüflings im KMG-System, beispielsweise mittels angepasster Spannvorrichtungen oder durch Koordinatenrotation, ein günstigerer Anstellwinkel zwischen Taster und Oberfläche erzielt werden. Diese Maßnahme stabilisiert nicht nur den Kontaktpunkt, sondern reduziert auch die Auswirkungen von Tasterbiegung und lateraler Ablenkung, wodurch die Wiederholbarkeit der Messdaten verbessert wird, ohne dass Änderungen am funktionalen Design des Bauteils erforderlich sind. [6]

Die frühzeitige Validierung der Messzugänglichkeit mittels dieser Strategien ermöglicht es dem Konstrukteur, potenziell kritische Prüfbedingungen rechtzeitig zu erkennen und die Geometrie entsprechend anzupassen. Eine sachgerechte Anwendung des DFI führt dabei nicht nur zu einer höheren metrologischen Qualität, sondern verkürzt Prüfzeiten, verringert Nacharbeit und stellt sicher, dass die funktionalen Spezifikationen des Produkts mit der realen Messfähigkeit des Systems in Einklang stehen.

Zur operativen Umsetzung der in dieser Phase beschriebenen Strategien wird im Anhang (Tabelle 7 im Anhang D-1) eine Checkliste sowie Entwurfsüberprüfungsbericht (Tabelle 9 im Anhang D-3) zur Validierung der Inspektionsfähigkeit zur frühzeitigen Bewertung der Messzugänglichkeit bereitgestellt

8.2. Phase 2: Optimierung der Auswahl von Bezügen (basierend auf den Experimenten 3 und 4)

Die präzise Definition von Bezugsflächen stellt einen entscheidenden Aspekt im Prozess der dimensionalen Inspektion dar, da sie maßgeblich die geometrische Stabilität des Messsystems sowie die Wiederholgenauigkeit der erfassten Werte bestimmt. In dieser zweiten Phase der Umsetzung des Design for Inspection (DFI)-Ansatzes wird eine methodische Strategie zur Optimierung der Bezugsauswahl in der frühen Konstruktionsphase vorgeschlagen. Diese basiert auf den empirischen Erkenntnissen aus den Experimenten 3 und 4 mit dem Ziel, dem Konstrukteur konkrete Kriterien an die Hand zu geben, die es ermöglichen, funktionale und stabile Bezüge festzulegen, die Messwertstreuung zu minimieren und, sofern technisch sinnvoll, die Anzahl der Bezüge zu reduzieren, ohne die Messgenauigkeit zu beeinträchtigen.

Eine erste zentrale Strategie besteht in der gezielten Auswahl großflächiger, funktionaler Bezugsflächen, die eine hohe Stabilität im Messprozess gewährleisten. Experiment 3 zeigte deutlich, dass die Hierarchie der Bezüge (insbesondere die Wahl des sekundären Bezugs) einen signifikanten Einfluss auf die Streuung der Positionsmessung eines Zylinders hat. Der Vergleich zweier Konfigurationen, bei denen die Flächen B1 und E jeweils als sekundärer beziehungsweise tertiärer Bezug definiert wurden, belegte, dass die größere und stabilere Fläche E als sekundärer Bezug zu einer deutlich geringeren Messwertvariabilität führte. Diese Ergebnisse unterstreichen, dass insbesondere der sekundäre Bezug entscheidend zur messtechnischen Wiederholgenauigkeit beiträgt. Im Sinne des DFI sollten daher bevorzugt geometrisch ausgedehnte und stabil gelagerte Flächen als funktionale Bezüge verwendet werden. Die Norm ISO 5459 bietet hierfür ein normatives Rahmenwerk, das dem Konstrukteur klare Richtlinien zur Definition solcher Bezüge im Kontext des gesamten Bauteildesigns vorgibt. [20]

Eine zweite Strategie betrifft die gezielte Reduktion der Anzahl an Bezügen, sofern die verbleibenden Referenzflächen eine hinreichende Stabilität für die Messausrichtung bieten. Experiment 4 evaluierte die Möglichkeit, den tertiären Bezug zu eliminieren, indem eine natürliche Fläche der Prüfkörpergeometrie die Rolle des sekundären Bezugs übernimmt. Der Vergleich der Konfigurationen A1–B1–E und A1–E zeigte, dass sowohl der Mittelwert als auch

die Streuung der gemessenen Zylinderposition nahezu identisch blieben. Infolgedessen lässt sich feststellen, dass unter geeigneten geometrischen Voraussetzungen eine Vereinfachung des Bezugssystems realisierbar ist, ohne die Aussagekraft der Inspektion zu gefährden. Im Rahmen des DFI kann diese Reduktion der Bezüge dazu beitragen, die Messzugänglichkeit zu verbessern, die Komplexität der Ausrichtung zu verringern und den Prüfaufwand in Produktionsumgebungen zu reduzieren. Wichtig ist jedoch, dass die verbleibenden Bezüge in der Lage sind, die erforderlichen Freiheitsgrade gemäß ISO 5459 sicher zu fixieren, damit die Wiederholbarkeit der Inspektion gewährleistet bleibt. [23]

Als dritte Handlungsempfehlung wird die konsequente Anwendung von Prinzipien geometrischer Stabilität bei der Bezugsauswahl betont. Experiment 3 hat gezeigt, dass unstabile Referenzflächen, insbesondere bei der Definition des sekundären Bezugs, zu einer signifikant höheren Streuung der Messergebnisse führen können. Um dies zu vermeiden, sollte der Konstrukteur die geometrische Eignung jeder Bezugsfläche bereits in der Designphase bewerten. Hierfür eignen sich insbesondere digitale Simulationswerkzeuge innerhalb von CAD-Umgebungen, mit denen die Bauteilausrichtung auf der Messmaschine virtuell überprüft und potenzielle Instabilitäten vor der Fertigung erkannt werden können. Die Einhaltung der Normen ISO 1101 und ISO 5459 stellt dabei sicher, dass die ausgewählten Referenzflächen die funktionale Realität des Bauteils korrekt abbilden und eine wiederholbare Inspektion unterstützen. [29]

Die Norm ISO 1101 stellt dabei klar, dass die Auswahl und Definition von Bezügen so erfolgen müssen, dass eine stabile und wiederholbare Messung gewährleistet ist. In Übereinstimmung mit sollen Bezüge funktionale Bedingungen der Bauteile widerspiegeln und eine repräsentative Messung ermöglichen. Wenn natürliche Geometrien, wie eine Zylinderfläche und eine Planfläche, eine eindeutige Lagebestimmung erlauben, kann auf zusätzliche Bezüge verzichtet werden, vorausgesetzt, die Messunsicherheit bleibt innerhalb der zulässigen Grenzen. [6]

Aus diesen Erkenntnissen ergeben sich für Konstrukteure mehrere zentrale Empfehlungen: Erstens sollte, wann immer möglich, die Anzahl der Bezüge reduziert werden, um die Prüfprozesse effizienter zu gestalten. Zweitens sind natürliche Geometrien des Bauteils als potenzielle Bezüge zu identifizieren und zu evaluieren. Drittens muss die Eignung vereinfachter Bezugssysteme stets durch Wiederholbarkeitsstudien abgesichert werden.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Experimente 3 und 4, dass eine strategische Auswahl und Reduktion von Bezügen, orientiert an funktionaler Relevanz, geometrischer Stabilität und pragmatischer Einfachheit, die Basis für stabile, wiederholbare und wirtschaftlich optimierte Messprozesse bildet. Die frühzeitige Integration dieser Überlegungen in den Konstruktionsprozess stärkt die Umsetzung des DFI-Ansatzes als praxisorientiertes Werkzeug zur Verbesserung der Interaktion zwischen geometrischer Spezifikation und messtechnischer Kontrolle.

Zur praktischen Anwendung der beschriebenen Prinzipien wird im Anhang D-2 anhand des dritten Experiments ein Beispiel zur Auswahl und Bewertung von Bezugsflächen präsentiert (siehe Tabelle 8). Dieses Beispiel zeigt, wie eine gezielte Bezugsauswahl unter Berücksichtigung von Stabilität und Funktionalität erfolgen kann im Sinne einer prüfgerechten Gestaltung gemäß dem DFI-Ansatz.

8.3. Phase 3 Berücksichtigung des Messequipments und dessen Einfluss auf die Inspektionsstabilität (basierend auf Experiment 2)

Die Wahl und Konfiguration des Messequipments beeinflussten maßgeblich die Genauigkeit und Wiederholbarkeit dimensionsbezogener Prüfprozesse. Während Experiment 2 detailliert die Auswirkungen unterschiedlicher Tasterlängen auf die Messstreuung bei der Inspektion eines Zylinders untersucht hat, liegt der Fokus dieser Phase auf der Ableitung konkreter Designentscheidungen, die solche Effekte bereits in der frühen Konstruktionsphase berücksichtigen.

Für Konstrukteurinnen und Konstrukteure bedeutet dies, dass der Einsatz langer Taster zwar aus Gründen der Zugänglichkeit erforderlich sein kann, jedoch stets auch designseitig zu berücksichtigen ist, um systematische Fehlerquellen zu vermeiden. So sollte bereits in der Entwurfsphase geprüft werden, ob geometrische Maßnahmen, wie verkürzte Merkmaltiefen, zusätzliche Freiräume oder alternative Positionen, die Verwendung eines überlangen Tasters vermeiden können. Lässt sich dies funktional nicht realisieren, ist die Optimierung der Bauteilausrichtung während der Messung ein relevanter Kompensationsansatz. Wie das Experiment zeigte, kann eine veränderte Orientierung, etwa durch eine geneigte Positionierung des Prüflings, helfen, den Taster in einem günstigeren Winkel zu führen und so systematische Einflüsse zu minimieren. [6]

Ein weiterer Aspekt betrifft die strategische Orientierung des Bauteils während der Inspektion. Das Experiment belegte, dass die Streuung der Messergebnisse signifikant reduziert werden konnte, wenn die Messung in einer geneigten Position von 45° anstelle der horizontalen Lage durchgeführt wurde. Dies lässt darauf schließen, dass durch eine geeignete Ausrichtung des Prüfkörpers die Krafteinwirkung auf den Taster reduziert und eine stabilere Messumgebung geschaffen werden kann.

Ergänzend dazu ist die frühzeitige Simulation potenzieller Tasterzugänge ein wichtiger Bestandteil DFI-konformer Konstruktion. Softwaregestützte Analysen in CAD-Umgebungen ermöglichen es, kritische Geometrien frühzeitig zu erkennen und gezielt anzupassen. Dies betrifft nicht nur die reine Zugänglichkeit, sondern auch den Einfluss von Tasterdurchbiegung und Winkelabweichung auf die Stabilität des Antastpunkts. Die Festlegung realistischer Toleranzen (abgestimmt auf das zu erwartende Messverhalten) wird dadurch erleichtert und stärkt die Übereinstimmung zwischen funktionaler Spezifikation und messtechnischer Machbarkeit. [14]

Die Ergebnisse dieser Phase unterstreichen, dass die Bewertung des Messequipments nicht ausschließlich der Messtechnik überlassen bleiben darf, sondern integraler Bestandteil einer DFI-gerechten Produktentwicklung ist. Durch die Berücksichtigung potenzieller systematischer Einflüsse bereits in der Geometriegestaltung kann nicht nur die Prüfbarkeit erhöht, sondern auch die Aussagekraft der Messergebnisse entscheidend verbessert werden - ein zentrales Ziel des Design for Inspection.

8.4. Phase 4: Einsatz virtueller Inspektionssimulationen zur frühzeitigen Validierung der Messbarkeit

Der Einsatz von Inspektionssimulationen in virtuellen Umgebungen stellt einen entscheidenden Fortschritt in der Umsetzung des Design for Inspection (DFI) dar, da er eine frühzeitige Validierung der Messbarkeit eines Designs ermöglicht, noch bevor ein physisches Bauteil gefertigt wird. Mit den Fortschritten in der digitalen Technologie und dem Einsatz von CAD-basierten Simulations- sowie Virtual-Reality-Tools können zentrale Aspekte wie die Zugänglichkeit für Messtaster, die geometrische Stabilität von Bezugsflächen und die Wiederholbarkeit des Prüfprozesses umfassend analysiert werden, ohne dass physische Prototypen notwendig sind. Diese Phase des DFI basiert auf der Integration digitaler Validierungsmethoden, mit dem Ziel, bereits im Vorfeld sicherzustellen, dass das endgültige

Design den messtechnischen Anforderungen genügt, die Messunsicherheit minimiert wird und die Qualitätssicherung effizienter gestaltet werden kann. [14] [23]

Zahlreiche aktuelle Studien zur digitalen Fertigung bestätigen die Relevanz dieser Methodik. Insbesondere die Untersuchung zur Anwendung von Virtual-Reality-Technologien in der industriellen Messtechnik zeigt, dass die Integration von Simulationswerkzeugen in CAD-Umgebungen eine vorausschauende Beurteilung der Inspektionsfähigkeit geometrischer Merkmale erlaubt. Diese Möglichkeit ist vor allem in Branchen mit hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit wie der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie oder der Medizintechnik von großer Bedeutung. In solchen Kontexten können bereits geringe Messabweichungen die Funktionstüchtigkeit ganzer Baugruppen beeinträchtigen, weshalb die frühzeitige Validierung der Messzugänglichkeit in virtuellen Umgebungen unerlässlich ist.

Zur effektiven Umsetzung dieser digitalen Simulationsverfahren werden im Rahmen dieser Phase zentrale Handlungsempfehlungen vorgeschlagen. Erstens ist die Durchführung von Validierungen im CAD bereits vor der Fertigung zu etablieren, um potenzielle Inspektionsprobleme frühzeitig zu erkennen. Für die spezifische Überprüfung der Messzugänglichkeit kritischer Merkmale sollten allerdings CAD-basierte Messsoftwarelösungen wie Zeiss Calypso, PC-DMIS oder Metrolog X4 eingesetzt werden. Diese ermöglichen die Simulation von Tasterpfaden und die Analyse möglicher Kollisions- oder Zugänglichkeitsprobleme unter Berücksichtigung des eingesetzten Messequipments. Durch die Integration solcher Softwarelösungen kann überprüft werden, ob Toleranzen messbar spezifiziert wurden und ob das vorhandene Messequipment den Anforderungen gerecht wird. Automatisierte Reports unterstützen Konstrukteurinnen und Konstrukteure dabei, frühzeitig Anpassungen vorzunehmen, um die messtechnische Umsetzbarkeit zu verbessern, ohne dabei funktionale Anforderungen zu beeinträchtigen. [23]

Zweitens ist ein gezielter Einsatz digitaler Messsimulationen zur Analyse der Zugänglichkeit empfehlenswert. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Phase 1 des DFI, in der die Bedeutung der Zugänglichkeit für die Stabilität des Inspektionsprozesses analysiert wurde, ermöglicht der Einsatz spezialisierter Simulationssoftware die realitätsnahe Nachbildung von Messbedingungen. Dies betrifft insbesondere Messungen mit Koordinatenmessgeräten (KMG) oder optischen Scannern, bei denen physische Restriktionen eine vollständige Erfassung behindern können. Durch die virtuelle Bewertung von Primär- und Sekundärbezügen sowie

potenziellen Interferenzen zwischen Bauteil und Sensorik kann die Positionierung in der KMG optimiert, die Datenstreuung reduziert und die Stabilität der Messung verbessert werden. [6]

Drittens ist die Entwicklung standardisierter Validierungsmethoden ein entscheidender Schritt zur systematischen Umsetzung der Inspektionssimulationen im Produktentwicklungsprozess. Hierzu zählt die Integration einer metrologischen Freigabephase im CAD-Arbeitsablauf, in der die Inspektionsfähigkeit des Designs mit den verfügbaren Technologien überprüft und dokumentiert wird. Checklisten zur Bewertung der Messzugänglichkeit, inklusive klar definierter Kriterien zur Erreichbarkeit kritischer Punkte, tragen zur Nachverfolgbarkeit des Validierungsprozesses bei und stellen sicher, dass die gewählten Strategien in der Produktion umsetzbar sind. Ein Abgleich der Simulationsergebnisse mit realen Inspektionsdaten aus der Erstserienfertigung erlaubt darüber hinaus eine kontinuierliche Verbesserung der digitalen Validierungsmodelle.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt in dieser Phase ist die gezielte Schulung des Konstruktionsteams in der Anwendung messtechnischer Simulationssoftware. Die effektive Integration von Tools wie PTC Creo in den Entwicklungsprozess setzt voraus, dass das technische Personal in der Lage ist, Inspektionsszenarien virtuell zu modellieren, die Messbarkeit systematisch zu bewerten und entsprechende Designanpassungen vorzunehmen [29]. Dies stärkt die Umsetzung des DFI-Prinzips, wonach Messstrategien integraler Bestandteil des Produktdesigns sein sollten.

Ein praxisnahes Beispiel für die Umsetzung virtueller Inspektionssimulationen findet sich dabei, die ein digitales Werkzeug zur Bewertung der Inspektionsfähigkeit von Schweißnähten in Triebwerkskomponenten der Luftfahrtindustrie entwickelt haben. Das Tool basiert auf einem sogenannten Inspectability Index (I_i), der als Verhältnis zwischen Zugangslänge (L) und lokalem Radius (R) an der Prüfposition definiert ist ($I_i = L/R$). Damit lässt sich bereits im CAD-Modell abschätzen, ob ein Bereich mit Standardinspektionsmethoden zugänglich ist oder nicht. In der vorgestellten Anwendung wurde anhand dieses Index die Zugänglichkeit verschiedener Schweißnähte in einem hohlen Turbinenrahmen bewertet und farblich in Grün (gute Inspektionsbedingungen), Gelb (eingeschränkte Bedingungen) und Rot (nicht prüfbar) eingestuft. Die geometrischen Varianten konnten so bereits in der Konzeptphase nach ihrer Inspektionsfähigkeit verglichen und mit anderen Anforderungen, etwa Strukturfestigkeit oder Aerodynamik, abgewogen werden. Dieses Beispiel verdeutlicht, wie digitale Tools dazu

beitragen können, die Prüfbarkeit von Bauteilen systematisch zu bewerten und kostspielige Nacharbeiten durch frühzeitige Designanpassungen zu vermeiden [29]

Die Implementierung virtueller Inspektionssimulationen unterstützt das DFI als ganzheitlichen Ansatz zur Optimierung der Produktqualität. Die frühzeitige Validierung der Messzugänglichkeit in CAD erlaubt es, geometrische Merkmale realitätsnah zu prüfen, Restriktionen zu vermeiden und den Messprozess stabiler zu gestalten. Durch die Standardisierung der Validierungsmethodik und die Schulung der Designteams wird sichergestellt, dass die Prinzipien des Design for Inspection nachhaltig in industrielle Entwicklungsprozesse integriert werden – mit dem Ergebnis einer erhöhten Prozesssicherheit, reduzierten Anpassungskosten und einer verbesserten funktionalen Übereinstimmung zwischen Design und Inspektion. [29]

In dieser Phase wird zudem eine Vorlage zur Bewertung der Inspektionsfähigkeit eines Bauteils vorgestellt. Diese ist in der Tabelle 10, die im Anhang D-4, enthalten und auch wird im Anhang D-5 ein Validierungsprotokoll (Tabelle 11) vorgestellt, das bei der Überprüfung von Prototypen hinsichtlich ihrer Inspektionsfähigkeit eingesetzt werden kann. Beide Vorlagen dienen als praxisnahes Instrument zur standardisierten Planung und Dokumentation prüfrelevanter Merkmale im Sinne des Design for Inspection (DFI).

8.5. Dokumentation, Standardisierung und kontinuierliche Optimierung des DFI

Die erfolgreiche Umsetzung des Design for Inspection (DFI) erfordert nicht nur technische Prinzipien, sondern ebenso eine strukturierte Integration in die betrieblichen Abläufe der Produktentwicklung und Qualitätssicherung. Um sicherzustellen, dass prüfrelevante Aspekte wie Messzugänglichkeit, Stabilität der Bezüge und Tolerierbarkeit systematisch und reproduzierbar berücksichtigt werden, ist eine umfassende Dokumentation und Standardisierung des DFI-Prozesses unerlässlich.

Ein zentrales Element hierbei ist die Entwicklung und Nutzung interner Leitfäden und Checklisten, die Konstrukteurinnen und Konstrukteuren ermöglichen, bereits in frühen Entwicklungsphasen systematisch zu überprüfen, ob das Bauteil für eine zuverlässige Inspektion geeignet ist. Solche Checklisten sollten Kriterien wie Tasterzugänglichkeit,

geeignete Bezugselemente, geometrische Stabilität sowie die Übereinstimmung mit normativen Anforderungen (z. B. ISO 1101, 5459 [6]) enthalten. [30]

Zur Sicherstellung der Prüfbarkeit jedes Designs empfiehlt sich zudem die Erstellung standardisierter Validierungsberichte. Diese dokumentieren die messtechnische Überprüfung relevanter Merkmale anhand vordefinierter Kriterien und dienen sowohl als Kommunikationsmittel zwischen Konstruktion, Messtechnik und Fertigung als auch als Grundlage für spätere Rückverfolgbarkeit und Optimierung.

Um die Wirksamkeit der DFI-Maßnahmen messbar zu machen, ist die Einführung quantitativer Leistungskennzahlen (KPIs) sinnvoll. Diese können etwa die Reduktion von Prüfzeiten, Wiederholmessungen, Ausschussquoten oder Inspektionskosten abbilden. Durch die kontinuierliche Analyse dieser Kennzahlen lassen sich Schwachstellen im Prüfprozess identifizieren und gezielt beheben. [31]

Ein weiterer wichtiger Baustein ist die regelmäßige Durchführung interner Audits, in denen exemplarische Bauteile rückblickend analysiert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in den kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) ein und stärken die Langzeitwirkung des DFI-Ansatzes. [32]

Insgesamt entsteht durch die Kombination aus dokumentierten Standards, definierten Metriken und regelmäßiger Überprüfung ein dynamischer, adaptiver DFI-Prozess, der sich in unterschiedliche industrielle Kontexte übertragen lässt und langfristig zu einer robusteren und wirtschaftlicheren Qualitätsabsicherung beiträgt.

Fazit: Das vorliegende Kapitel hat gezeigt, dass die Integration des Design for Inspection (DFI) in die frühe Phase der Produktentwicklung nicht nur die Prüfbarkeit technischer Bauteile verbessert, sondern auch das Potenzial besitzt, die Qualitätssicherung in industriellen Prozessen langfristig zu transformieren. Dabei wird deutlich, dass DFI kein isoliertes Konstruktionsprinzip darstellt, sondern als interdisziplinäre Brücke zwischen Konstruktion, Messtechnik und Fertigung verstanden werden muss.



Abbildung 18. Inspektionsfunktionen-Implementierung der DFI

Ein zentrales Ergebnis ist, dass viele Inspektionsprobleme nicht durch aufwändige Prüfstrategien, sondern durch eine vorausschauende Gestaltung geometrischer Merkmale bereits im Design vermieden werden können. Der strukturierte Einsatz von Checklisten, Validierungsberichten und interner Standardisierung bietet eine pragmatische Möglichkeit, diese Prinzipien im Unternehmensalltag zu verankern, auch ohne große Investitionen in digitale Plattformen oder ERP-Systeme [13] [26], siehe Anhang D.

Diese Erkenntnis ist besonders für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) von Bedeutung, die häufig nicht über dieselben Ressourcen wie Großunternehmen verfügen. Die im Anhang D dieser Arbeit enthaltenen praxisorientierten Vorlagen sollen genau diesen Unternehmen eine Einstiegshilfe bieten, um DFI schrittweise und realitätsnah umzusetzen.

Zugleich wurde deutlich, dass die fortlaufende Reflexion und Bewertung der DFI-Maßnahmen ein wichtiger Bestandteil für deren nachhaltige Wirksamkeit sind. Der Aufbau eines kontinuierlichen Monitoringsystems, wie Abb. 18 (mit klar definierten Metriken zur Bewertung der Messbarkeit, Wiederholbarkeit und wirtschaftlichen Effizienz) ist dabei ebenso wichtig wie

der systematische Dialog zwischen Konstruktion und Qualitätssicherung. Nur so lässt sich gewährleisten, dass DFI nicht als Einmalmaßnahme, sondern als dynamischer Verbesserungszyklus verstanden wird

Langfristig eröffnet DFI das Potenzial, Prüfprozesse nicht nur effizienter, sondern auch robuster und anpassungsfähiger zu gestalten, gerade in einem industriellen Umfeld, das zunehmend von kurzen Entwicklungszyklen, steigender Komplexität und wachsendem Qualitätsdruck geprägt ist.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass der Design-for-Inspection-Ansatz (DFI) ein wirksames Instrument darstellt, um die geometrische Produktspezifikation bereits in der frühen Konstruktionsphase systematisch so auszulegen, dass die messtechnische Zugänglichkeit, Wiederholgenauigkeit und Prüfaufwände optimiert werden können. Aufbauend auf einer fundierten Literaturrecherche und der Analyse etablierter Normen wurden zunächst allgemeine Konstruktionsprinzipien abgeleitet, die sich in konkreten Handlungsempfehlungen für Konstrukteurinnen und Konstrukteure niederschlagen. Ergänzt wurde dieser theoretische Teil durch vier gezielte Experimente, die typische Herausforderungen bei der taktilen Koordinatenmesstechnik unter industrienahen Bedingungen beleuchteten.

Ein zentrales Ergebnis betrifft die Bedeutung der Messzugänglichkeit in Zusammenhang mit geneigten Flächen. Im Experiment 1 konnte gezeigt werden, dass bei einer Flächenneigung von nur 10° bereits eine signifikant höhere Streuung der Messwerte auftritt, wenn ein Taster mit größerem Kugeldurchmesser (4 mm statt 2 mm) eingesetzt wird ($F = 5,318$; $p < 0,05$). Dieses Erkenntnis unterstreicht die Relevanz einer vorausschauenden geometrischen Gestaltung zur Vermeidung ungünstiger Tastbedingungen. In Experiment 2 wurde nachgewiesen, dass die Verlängerung des Tasters zu einer deutlich höheren Messwertvariabilität führt ($F = 119,7$; $p < 0,01$), was die Notwendigkeit bestätigt, Stabilitätseinflüsse bei der Auswahl des Messequipments konstruktiv zu berücksichtigen.

Besonders deutlich wurde der Einfluss der Bezugsauswahl im Experiment 3: Der Wechsel der sekundären Bezugsfläche von B1 zu E führte zu einer signifikanten Reduktion der Streuung bei der Positionsbestimmung des Prüfzylinders ($F = 1504,57$; $p < 0,001$), obwohl die Mittelwerte beider Messreihen nahezu identisch blieben. In Experiment 4 konnte darüber hinaus demonstriert werden, dass unter bestimmten Voraussetzungen die Reduktion des Bezugssystems. Beispielsweise, durch den Verzicht auf einen tertiären Bezug, ohne signifikanten Genauigkeitsverlust möglich ist. Dies zeigt, dass eine Vereinfachung der Spezifikation unter funktionaler Abwägung durchaus praktikabel ist.

Die Arbeit erfüllt somit die gesteckten Ziele: Es wurden nicht nur theoretisch fundierte und normkonforme Prinzipien des DFI herausgearbeitet, sondern auch experimentell überprüft, wie diese im realen Konstruktionsprozess zur Anwendung kommen können. Durch die Ableitung praktischer Empfehlungen, die direkt auf die Analyse der Messstabilität, Bezugssysteme, Messzugänglichkeit und Ausrüstungswahl zurückgehen, wird ein praxisnahes Werkzeug bereitgestellt, das Unternehmen, unabhängig von ihrer Größe, bei der Verbesserung der Produktqualität und Prüfplanung unterstützen kann.

Darüber hinaus wurde aufgezeigt, dass DFI nicht auf komplexe Softwarelösungen angewiesen ist: Im Anhang D dieser Arbeit findet sich ein praxisnahes Checklistenbeispiel, das insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen eine kostengünstige Möglichkeit bietet, DFI-Strukturen in den Entwicklungsprozess zu integrieren. Die Digitalisierung dieses Prozesses eröffnet zusätzliches Potenzial für die langfristige Standardisierung und Schulung in Organisationen.

Trotz der erreichten Erkenntnisse bleiben zahlreiche Aspekte des Design for Inspection (DFI) offen, die zukünftige Forschungsarbeiten vertiefen könnten. So wäre es etwa sinnvoll, den Einfluss komplexerer Geometrien – wie Freiformflächen oder mehrstufige Innenkonturen – auf die Messzugänglichkeit und Wiederholbarkeit systematisch zu untersuchen. Auch der Einsatz optischer und hybrider Messsysteme im Rahmen des DFI wurde in dieser Arbeit nicht behandelt, bietet jedoch bedeutendes Potenzial für weiterführende Studien, insbesondere im Hinblick auf nicht-taktile Prüfstrategien. Darüber hinaus könnten branchenspezifische Implementierungsstrategien entwickelt werden, etwa für die Luftfahrt- oder Medizintechnik, in denen besonders hohe Anforderungen an Prüfprozesse bestehen. Auch der Nutzen automatisierter DFI-Checklisten in CAD-Systemen und deren Integration in bestehende PLM-Umgebungen eröffnet ein zukunftsorientiertes Forschungsfeld, um DFI als digitalen Standard in den Produktentwicklungsprozess zu überführen.

Insgesamt leistet die Arbeit einen Beitrag zur systematischen Etablierung von Design for Inspection als konstruktionsnaher Methode, um Prüfprozesse gezielt von Anfang an mitzugestalten und so nicht nur die messtechnische Qualität, sondern auch die Effizienz des gesamten Produktentstehungsprozesses zu verbessern.

10. Literatur

- [1] A. Velling, „Design for X (DFX) Methods,“ Fractory , 17 06 2021. [Online]. Available: https://fractory.com/design-for-x-dfx/#Types_of_DFX. [Zugriff am 01 07 2024].
- [2] M.-C. Chiu und G. E. Okudan, „Evolution of Design for X Tools Applicable to Design Stages: A Literature Review,“ Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical

Conferences & Computers and Information in Engineering Conference
IDETC/CIE, Bde. %1 von %2DETC2010-29091, Nr. ASME, pp. 1-12, 2010.

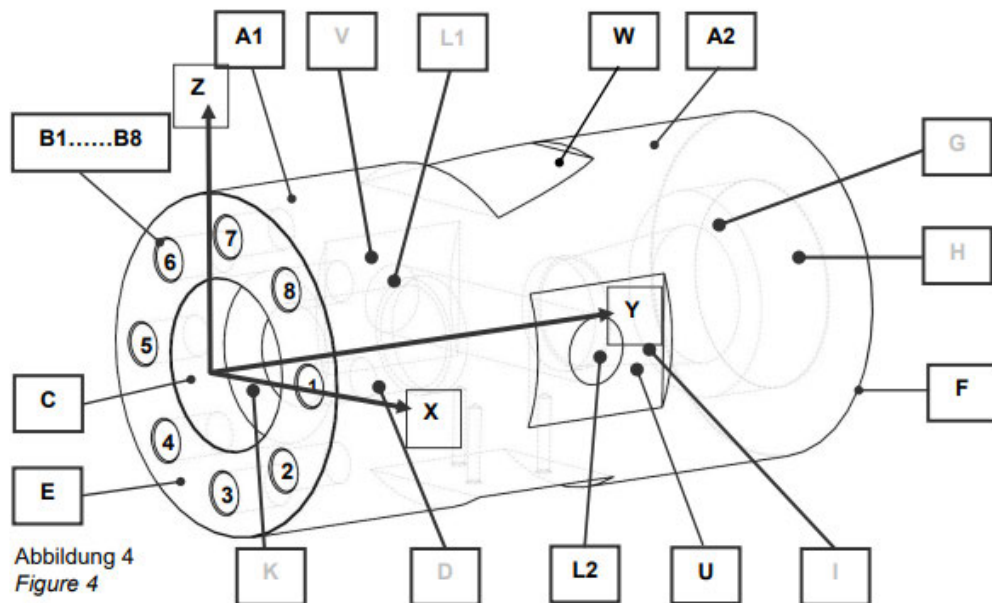
- [3] G. Q. Huang, Desig for X. Concurrent engineering imperatives, New York: Chapman & Hall, 1996.
- [4] A. Weckenmann, Koordinatenmesstechnik. Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen., München: HANSER, 2012.
- [5] R. J. Hocken und P. H. Pereira, Coordinate Measuring Machines and Systems, Florida: CRC Press Taylor & Francis Group, 2012.
- [6] G. Henzold, Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection. A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards. Kapitel: 2, 3, 12, 13, USA: Butterworth-Heinemann, 2021.
- [7] M. d. C. Porath, Koordinatenmesstechnik, Vorlage Messtechnik in der Produktion, HAW-Hamburg : PowerPoint-Präsentation, nicht veröffentlicht, 2024.
- [8] T. Pfeifer und R. Schmitt, Fertigungsmesstechnik, München : Oldenbourg , 2010.
- [9] T. Pfeifer, Koordinatenmesstechnik für die Qualitätssicherung, Berlin: Springer, 1992.
- [10] Carl Zeiss IQS Deutschland GmbH, „DIN EN ISO 10360 Normenreihe für Koordinatenmessgeräte,“ [Online]. Available: <https://www.zeiss.de/messtechnik/entdecken/themen/din-en-iso-10360.html>.
- [11] K. Yang und B. El-Haik, Design for Six Sigma: Roadmap to product development, USA: McGeaw-Hill, 2008.
- [12] M. d. C. Porath, Fähigkeit von Prozessen - Messtechnik in der Produktion. Vorlesungsunterlagen, HAW-Hamburg: PowerPoint-Präsentation, nicht veröffentlicht, 2024.
- [13] G. Effenberger, R. Schmitt und E. Dietrich, „Geometrische Produktspezifikation- Vom Konstruktionsmerkmal zur Messgröße,“ in Handbuch Messtechnik in der industriellen Produktion. , München, Carl Hanser Verlag , 2023.
- [14] C. Codre, C. Neamtu, M. Dragomir und D. Hurgoiu, „Virtual Reality - A Tool for Integrating "Design for Inspection" in Product Development,“ Proceedings of the 4 International Conference „Metrology in Production Engineering”, pp. pg. 309-312, ISBN 978-83-89333-30-8, 2020.
- [15] M. Porath, Mündliche Mitteilung: Hinweise zur Erstellung der Messstrategie, HAW-Hamburg, 2024.
- [16] M. Hernla, „Michael Hernla: Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen,“ 03 06 2021. [Online]. Available: <http://www.dr-hernla.de/Hernla%20UKM%202020%20Kurzfassung.pdf>. [Zugriff am 01 05 2024].
- [17] M. d. C. Porath, Geometrische Produktspezifikation - ISO. Vorlesungsunterlagen, HAW-Hamburg: PowerPoint-Präsentation, nicht veröffentlicht, 2024.

- [18] M. Weidemann, „ISO-GPS: Matrix-Modell und Grundsätze“, DGQ, [Online]. Available: <https://www.dgq.de/fachbeitraege/iso-gps-matrix-modell-und-grundsaeetze/>. [Zugriff am 01 05 2024].
- [19] R. Schmitt und E. Dietrich, Handbuch Messtechnik in der industriellen Produktion. Valide Messergebnisse planen, erhalten, auswerten und verteilen, München: Hanser, 2023.
- [20] 5. DIN ISO, „Bezüge und Bezugssysteme nach DIN ISO 5459“, 3DIMETIK, 06 08 2024. [Online]. Available: <https://3dimetik.de/glossar/din-iso-5459/>. [Zugriff am 01 12 2024].
- [21] I. I. Standard, „ISO 8015:2011 Geometrical product specifications (GPS) — Fundamentals — Concepts, principles and rules“, ISO , 06 2011. [Online]. Available: <https://iso.org/standard/55979.html>. [Zugriff am 01 05 2024].
- [22] D. I. f. N. DIN, „Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf“, Januar 2017. [Online].
- [23] C. DSouza, „Design for Inspection: Optimizing Medical Device Designs for Manufacturing and Inspection through Case Studies Using Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T) in According with ASME Y14.5 2018 Standards“, SSRN, NJ 07960, 2024.
- [24] M. Weidemann, „ISO-GPS: Ausgewählte Normen- eine Einordnung“, DGQ, [Online]. Available: <https://www.dgq.de/fachbeitraege/iso-gps-ausgewaehlte-normen-eine-einordnung/>. [Zugriff am 01 05 2024].
- [25] B. Borsalli, „FMEA- Qué es y cómo implementarlo en su empresa“, SoftExpert Blog, 20 09 2021. [Online]. [Zugriff am 01 07 2024].
- [26] J. Priest und J. Sanchez, Product Development and Design for Manufacturing, Boca Raton: CRC Press <https://doi.org/10.1201/9781420026825>, 2001.
- [27] M. d. C. Porath, T. Hageney und H. Mietzner, „Improvement of Geometric Product Specification through a priori Evaluation of Uncertainty of CMM Measurements“, XXIV IMEKO World Congress "Think Metrology", pp. 1-4, 26 08 2024.
- [28] Eurometron, Kalibrierschein MFC-2018-01, Kalibriernummer 58540, DAkkS-akreditiert, Aalen, Deutschland: nicht veröffentlicht, 2023.
- [29] S. Ronald, F. Elgh und P. Andersson, „Design for Inspection - Evaluation the Inspectability of Aerospace Components in the Early Stages of Design.“, 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017 27-30 June, Modena Italy, ScienceDirect, 2017.
- [30] MISUMI, „Form und Lagetoleranzen nach ISO 1101 und japanische Norm JIS B 0001: Die wichtigsten Infos“, [Online]. Available: <https://de.misumi-ec.com/de/techblog/technisches-handbuch/form-und-lagetoleranzen-nach-iso-1101-und-japanische-norm-jis-b-0001-die-wichtigsten-infos/>. [Zugriff am 01 05 2024].

- [31] R. Faria, „KPIs in the Design Process,“ Cognizant Benelux Blog, https://www.cognizant.com/nl/en/insights/blog/articles/kpis-in-the-design-process?utm_source=chatgpt.com, 2023.
- [32] B. Holger, B. Peik und S. Zischka, Grundlagen Qualitätsmanagement von den Werkzeugen über Methoden zum TQM, Deutschland: Springer Vieweg, 2024.
- [33] V. Läßle und U. Drescher, „ISO GPS Warum Sie Geometrische Produktspezifikationen richtig anwenden sollten,“ konstruktionspraxis, 10 04 2019. [Online]. Available: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/warum-sie-geometrische-produktspezifikationen-richtig-anwenden-sollten-a-819171/>. [Zugriff am 01 05 2024].
- [34] G. Effenberger, „Geometrische Produktspezifikation GPS- eine unvollständige Bestandsaufnahme,“ 01 2012. [Online]. Available: <https://www.piq-online.de/fileadmin/mediamanager/PIQ-Artikel/GPS1.pdf>. [Zugriff am 01 05 2024].
- [35] HOMMEL-ETAMIC, „Form- und Lagetoleranzen in der Praxis nach DIN EN ISO 1101: Präzise Formmessung,“ [Online]. Available: <https://www.hommel-etamic.com/de-de/produkte-messtechnik/formmesstechnik-formline/iso-1101>. [Zugriff am 01 05 2024].
- [36] M. Weidemann, ISO-GPS: Tolerierungsgrundsätze, <https://www.dgq.de/fachbeitraege/iso-gps-tolerierungsgrundsaeetze/>.
- [37] H. Mietzner, Mündliche Mitteilung: Hinweise zur Messung, HAW Hamburg: nicht veröffentlicht, 2024.

11. Anhang

Anhang A: Messkörper von Eurometron und seinen Maßen



Feature	Element	Dimension
A1 + A2	2 Cylinders (external)	2 Cylinders: D = 100 mm, L = 70 mm
B1 - B8	Pitch circle	D = 12 mm, L = 20 mm, (8 • 45°)
C	Cylinder (internal)	D = 50 mm, L = 20 mm
D	Cylinder (internal)	D = 30 mm, L = 45 mm
E	Plane (ring)	D _{internal} = 50 mm, D _{external} = 100 mm
F	Plane (ring)	D _{internal} = 60 mm, D _{external} = 100 mm
G	Plane (ring)	D _{internal} = 40 mm, D _{external} = 60 mm
H	Cylinder (internal)	D = 60 mm, L = 25 mm
I	Cone (internal)	Angle = 11,4°, L = 45 mm
K	Cone (internal, short)	Angle = 120°, L = 5,77 mm
L1 + L2	Cylinder (internal)	D = 20 mm, L = 90 mm
U	Plane	L = 50 mm • 40 mm
V	Plane	L = 50 mm • 40 mm
W	Plane (inclination)	Angle = 10°, L = 50 • (20 – 60) mm

Abbildung 19. 3D-Darstellung von Eurometron GmbH [28]

Anhang B: Taster

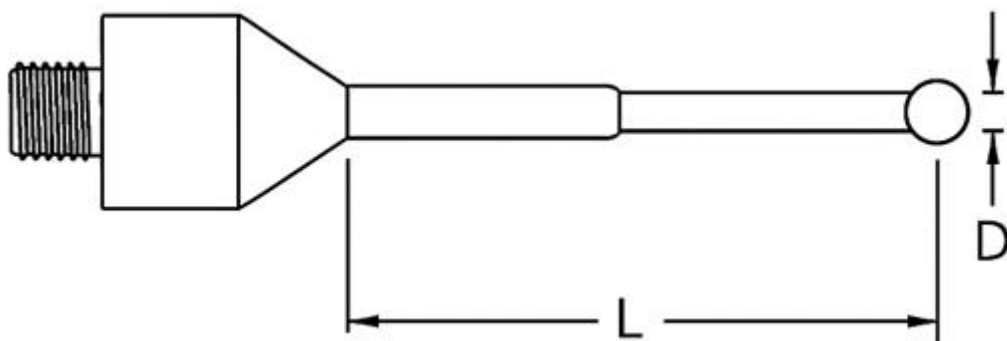


Abbildung 20. Vorlage Taster- Zeiss

Tabelle 2. Maße der Taster für die Versuchen/Experimenten

Taster	Länge (mm) L	Durchmesser (mm) D
1	50-Z	2
2	50-X	2
3	50-X	2
4	100-Y	5
5	140-Y	8
6	180-Y	8

Anhang C: Messstrategie und Ergebnisse:

Messtrategie

- Ziel des Experiments definieren
- Hypothesen definieren
- Versuchsaufbau erstellen: Prüfstück, Varianten, Änderungen, Merkmale, bewertete Parameter, Taster, Basissystem.
- Simulation: Wiederholungen, Sacnning, höchste Punktedichte; 10° mehr messen und 5! Am Anfang und am Ende ignorieren. Filter-Gauß-Filter 50 W/U
- Statistische Analyse: T-Test, F-Fischer

C-1. Experiment 1

Tabelle 3. Messung-Experiment 1

2mm	4mm
0.013856	0.015465
0.015232	0.015435
0.01324	0.015638
0.012519	0.015333
0.013303	0.014864
0.013224	0.015577
0.012191	0.01556
0.013546	0.015164
0.013088	0.015579
0.012739	0.0155
0.01239	0.014995
0.012757	0.015302
0.012046	0.015614
0.012329	0.015519
0.011868	0.015431
0.012015	0.015369
0.011907	0.015496
0.012074	0.015532

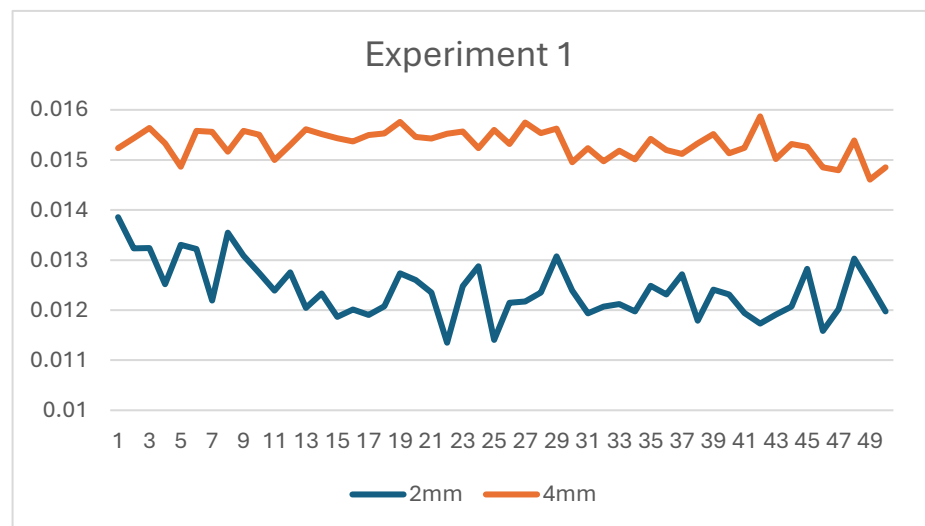


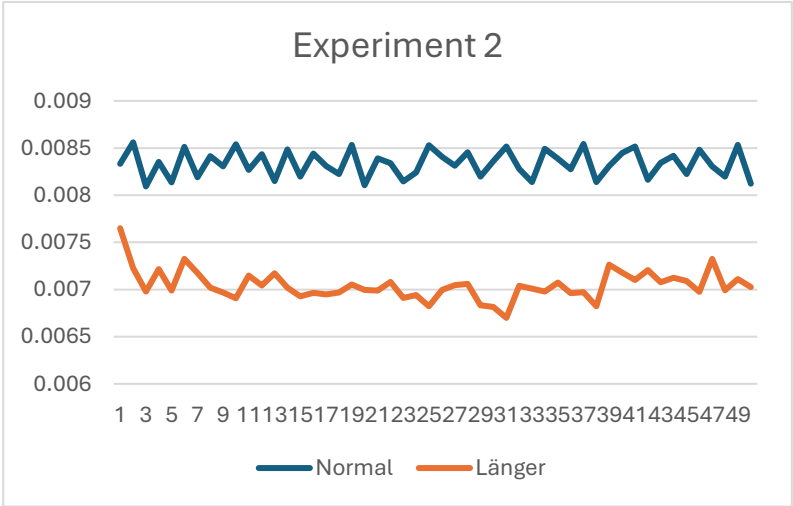
Abbildung 21. Graphik- Experiment 1

0.012736	0.015762
0.012598	0.015456
0.012353	0.015425
0.011349	0.015522
0.012478	0.015567
0.012877	0.015233
0.011404	0.015602
0.012147	0.015321
0.01217	0.015748
0.012353	0.015534
0.013073	0.015623
0.012393	0.014956
0.011938	0.015237
0.012072	0.01497
0.012121	0.015187
0.011975	0.015013
0.012484	0.015419
0.012312	0.015198
0.012714	0.015119
0.011787	0.015332
0.012409	0.015514
0.012315	0.015132
0.011942	0.015239
0.01173	0.015869
0.011912	0.015018
0.012073	0.015315
0.012825	0.01526
0.011582	0.014853
0.012018	0.014796
0.01303	0.015389
0.01251	0.014607

C-2. Experiment 2

Tabelle 4. Messung-
Experiment 2

Normal	Länge
0.0083328	0.0076501
0.00856078	0.007227
0.0080931	0.0069778
0.00835271	0.0072159



0.00813547	0.0069883
0.0085139	0.0073237
0.00819123	0.007174
0.0084156	0.0070198
0.00830541	0.0069686
0.00853987	0.0069075
0.00826712	0.0071479
0.00843388	0.0070435
0.00814875	0.0071714
0.00848624	0.0070197
0.00819753	0.0069281
0.00844018	0.0069664
0.00831062	0.0069478
0.00822409	0.0069675
0.00853274	0.007053
0.00810567	0.0069974
0.00839188	0.00699
0.00834122	0.0070811
0.00814733	0.0069093
0.00824107	0.0069416
0.00852994	0.0068227
0.00840766	0.0069969
0.00831389	0.0070484
0.00845501	0.0070601
0.00819642	0.006834
0.00835877	0.0068166
0.00851788	0.0066995
0.00828043	0.00704
0.00813798	0.0070103
0.00849263	0.0069783
0.00838601	0.0070731
0.00827659	0.0069609
0.00854422	0.0069716
0.00813987	0.0068226
0.00830814	0.0072654
0.0084489	0.00718
0.00851721	0.0071005
0.00816354	0.0072066
0.00834278	0.0070757
0.00841732	0.0071246
0.00822541	0.0070895
0.00848176	0.006976
0.00830592	0.0073252

0.00819873	0.0069932
0.00853364	0.0071104
0.00812387	0.0070255

C-3. Experiment 3

Tabelle 5. Messung-
Experiment 3

3 Datums	Anders
0.2445519	0.2467628
0.2444105	0.2465346
0.2442659	0.2467152
0.2441962	0.2463086
0.244276	0.2465066
0.2443482	0.246612
0.2442401	0.2465798
0.2442437	0.2464414
0.2442356	0.2463195
0.2440943	0.2464143
0.2439231	0.2460165
0.2438202	0.2460869
0.2436217	0.2458631
0.2435822	0.2457391
0.2441213	0.2464075
0.2438703	0.2460862
0.2439829	0.2463572
0.2436527	0.2460824
0.2435752	0.2457198
0.2434497	0.2458093
0.2435101	0.2458365
0.2438213	0.2465121

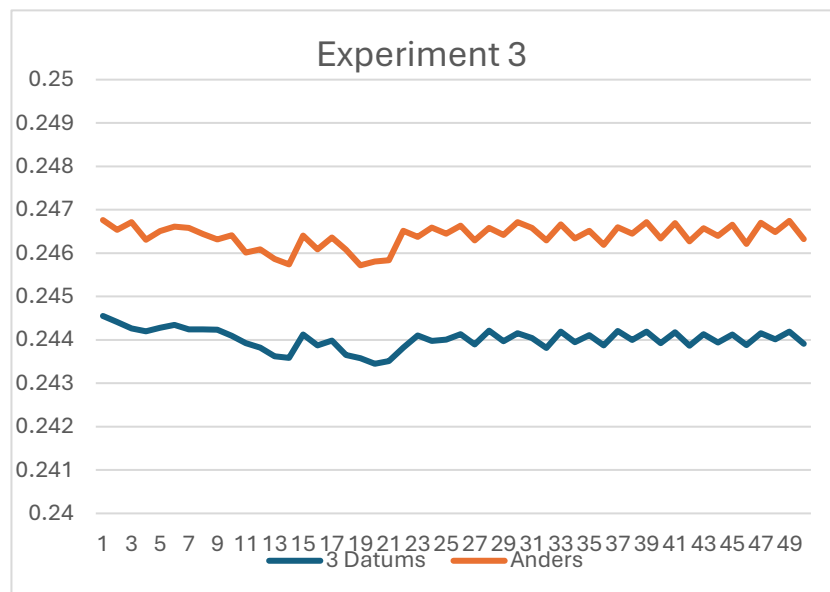


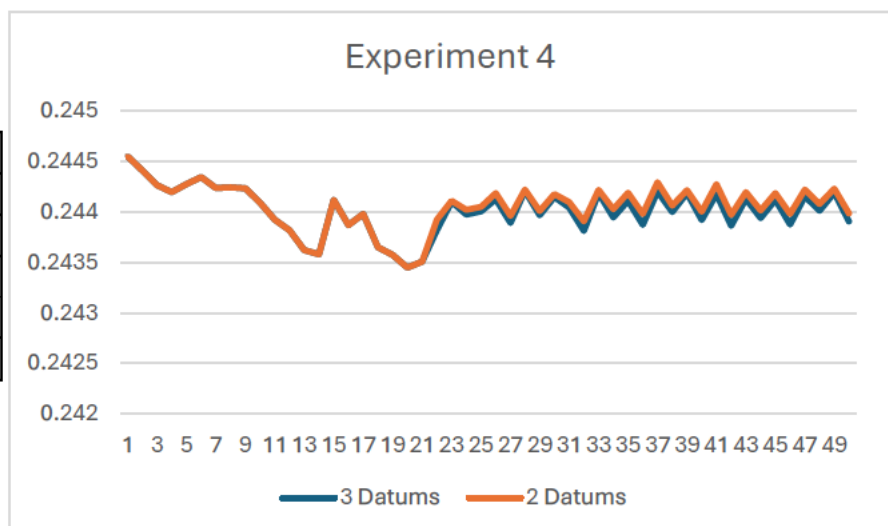
Abbildung 23. Graphik, Experiment 4

0.2441032	0.2463784
0.2439756	0.2465892
0.2440087	0.2464523
0.2441279	0.2466312
0.2438921	0.2462957
0.2442094	0.2465783
0.2439682	0.2464231
0.2441513	0.2467123
0.2440457	0.2465834
0.2438126	0.2462945
0.2441879	0.2466651
0.2439473	0.2463412
0.2441105	0.2465124
0.2438752	0.2461895
0.2442047	0.2465983
0.2439993	0.2464519
0.2441882	0.2467125
0.2439215	0.2463381
0.2441786	0.2466897
0.2438654	0.2462751
0.2441302	0.2465748
0.2439407	0.2463952
0.2441225	0.2466562
0.2438782	0.2462115
0.2441567	0.2466994
0.2440124	0.2464873
0.2441921	0.2467431
0.2439086	0.2463214
0.2441352	0.2466102

C-4. Experiment 4

Tabelle 6. Messung-
Experiment 4

3 Datums	2 Datums
0.2445519	0.2445519
0.2444105	0.2444105
0.2442659	0.2442659
0.2441962	0.2441962
0.244276	0.244276



0.2443482	0.2443482
0.2442401	0.2442401
0.2442437	0.2442437
0.2442356	0.2442356
0.2440943	0.2440943
0.2439231	0.2439231
0.2438202	0.2438202
0.2436217	0.2436217
0.2435822	0.2435822
0.2441213	0.2441213
0.2438703	0.2438703
0.2439829	0.2439829
0.2436527	0.2436527
0.2435752	0.2435752
0.2434497	0.2434497
0.2435101	0.2435101
0.2438213	0.2439245
0.2441032	0.2441128
0.2439756	0.2440234
0.2440087	0.2440512
0.2441279	0.2441874
0.2438921	0.2439635
0.2442094	0.2442217
0.2439682	0.2440098
0.2441513	0.2441784
0.2440457	0.2440992
0.2438126	0.2439087
0.2441879	0.2442193
0.2439473	0.2440289
0.2441105	0.2441897
0.2438752	0.2439802
0.2442047	0.2442951
0.2439993	0.2440658
0.2441882	0.2442156
0.2439215	0.2440027
0.2441786	0.2442785
0.2438654	0.2439732
0.2441302	0.2441963
0.2439407	0.2440154
0.2441225	0.2441878
0.2438782	0.2439826
0.2441567	0.2442239
0.2440124	0.2440795

0.2441921	0.2442317
0.2439086	0.2439875

Anhang D: Checklisten für die Implementierung des DFI

D-1. Checklist für Phase 1

Tabelle 7. Checkliste zur Messzugänglichkeit (DFI Phase 1)

Punkt	Beschreibung	Status	Kommentare
Zugänglichkeit der kritischen Flächen	Sind alle prüfrelevanten Flächen mit dem KMG-Sensor erreichbar?	☐ Ja ☐ Nein	
Sichtbarkeit aus funktionalen Winkeln	Sind die kritischen Merkmale aus geeigneten Winkeln sichtbar und antastbar?	☐ Ja ☐ Nein	
Klare Referenzflächen	Sind ausreichend große und stabile Referenzflächen für die Ausrichtung definiert?	☐ Ja ☐ Nein	

Definierte Befestigungspunkte	Beeinträchtigen Befestigungspunkte die Messmerkmale nicht?	☐ Ja ☐ Nein	
Inspektionssimulation durchgeführt	Wurde die Zugänglichkeit virtuell vorab überprüft (z.B. in CAD)?	☐ Ja ☐ Nein	

D-2. Bewertungsprotokoll für Bezugsflächen

Tabelle 8. Bewertungsprotokoll (Experiment 3 als Beispiel)

Bezugsfläche (Beispiel)	Funktionale Relevanz (z. B. Montageflächen, Dichtfläche)	Geometrische Stabilität (z. B. groß, plan, steif)	Zugänglichkeit für Taster(Freiraum, Kollision, Winkel)	Empfohlen als Primär / sekundär / Tertiär / Nicht geeignet	Kommentar

Zylinder A	Hoch – Montagereferenz	Hoch – groß, gut gelagert	Gut – freizugänglich	Primärbezug	Sehr stabil, Referenz in vorheriger Konstruktion verwendet
Zylinder B	Mittel – Führung für Lager	Gering – kleine Fläche, nicht plan	Eingeschränkt – tiefe Lage, begrenzter Zugang	Nicht geeignet	Erschwerte Wiederholgenauigkeit
Fläche E)	Hoch – Funktionsfläche	Hoch-robust, großflächig	Sehr gut – 360° zugänglich	Sekundärbezug	Bereits in Konfiguration A1-E erfolgreich getestet
Fläche X (z.B. kleine Tasche)	Niedrig – nur für Messzwecke	Gering-instabil, flexibel	Schwer erreichbar – kleine Öffnung	Nicht geeignet	Ausschuss empfohlen

D-3. DFI-Checkliste zur frühen Entwurfsüberprüfung (Phase 1)

Tabelle 9. DFI-Entwurfsüberprüfung

Allgemeine Informationen	
Projektname:	
Entwurfsnummer:	
Überprüfungsdatum:	

Überprüfter	Beobachtungen	Erforderliche Maßnahmen	Verantwortlicher	Frist
Zugänglichkeit der kritischen Flächen	(Kommentare zur Zugänglichkeit der kritischen Flächen)	(Maßnahmen zur Verbesserung der Zugänglichkeit)		
Sichtbarkeit und Zugänglichkeit	(Kommentare zur Sichtbarkeit und Zugänglichkeit der Merkmale)	(Erforderliche Maßnahme)		
Vereinfachung komplexer Geometrien	(Kommentare zur Vereinfachung des Designs)	(Erforderliche Anpassungen)		
Referenzflächen und Befestigungen	(Bewertung der Referenzflächen und ihrer Stabilität sowie Befestigungsmöglichkeiten)	(Erforderliche Anpassungen)		
Kompatibilität mit Inspektionswegen	(Ergebnisse aus Simulationen oder Sichtbarkeitanalysen)	(Erforderliche Anpassungen)		
Dokumentation der Toleranzen	(Überprüfung der Vollständigkeit und Normkonformität der Toleranzangaben)	(Erforderliche Korrekturen)		
Ergebnisse der Inspektionssimulation	(Abgleich mit CAD-basierten Prüfsimulationen)	(Anpassung aufgrund identifizierter Restriktionen)		

Zusätzliche Kommentare	(Allgemeine Beobachtungen und Feedback)	Weitere Maßnahmen nach Rücksprache		
---------------------------	---	---	--	--

D-4 Dokumentationsvorlage für Inspektionswege

Tabelle 10. Inspektionswege-DFI

Allgemeine Informationen					
Name des Teils:					
Plannummer:					
Dokumentationsdatum:					
Dokumentationsversion:					
Autor:					
Schritt	Beschreibung des Inspektionsweges	Oberfläche/Merkmal zu messen	Empfohlene Bauteilausrichtung	Erforderliche KMG-Ausrüstung	Beobachtungen
1	Messstrategie für Merkmal 1	(z.B. zylindrische Bohrung Ø20 mm)	Horizontal auf Planfläche* A	Taster Ø2 mm. 45° - Anstellung	Begrenzter Zugang durch Nachbarfläche
2	Antastpfad und Orientierung für Fläche 2	(z.B. geneigte Fläche 10°)	Geneigt 30° auf Vorrichtung XY	Taster Ø4 mm, Scanmodus	Vorsicht bei Biegung
3	Ablauf für die Prüfung des Profils entlang X-Achse	(z.B. Profilform ISO 1101)	Standardausrichtung auf Bezugssystem* A-B	Kugeltaster Ø3 mm, Linearabtastung	Abweichung entlang der Mitte beachten

„Planfläche A“, „Zylinderfläche C“ oder „Bezug B“ sind als Platzhalter zu verstehen und sollen typische Geometrien verdeutlichen, die bei der Festlegung von Prüfmerkmalen, Ausrichtungen und KMG-Konfigurationen berücksichtigt werden. In einer realen Anwendung sind diese durch konkrete Flächenbezeichnungen aus dem jeweiligen Bauteildesign zu ersetzen.

D-5 Validierungsprotokoll zur Überprüfung der DFI-Kriterien am Prototyp

Tabelle 11. Validierungsprotokoll

Allgemeine Informationen					
Projektname:					
Prototypnummer:					
Validierungsdatum:					
Verantwortlicher für die Überprüfung:					
Validierter Punkt	Ergebnisse der Validierung	Empfohlene Maßnahmen	Verantwortliche	Frist	
Zugänglichkeit der kritischen Flächen	(Beobachtungen zur Zugänglichkeit der Prüfmerkmale)	(Maßnahmen zur Verbesserung der Zugänglichkeit)			
Sichtbarkeit und Zugänglichkeit	(Ergebnisse zur Sichtbarkeit aus geeigneten Winkeln)	(Erforderliche Maßnahmen)			
Referenzflächen und Befestigungen	(Ergebnisse zur Stabilität der Bezugs- und Fixierflächen)	(Optimierung der Referenzdefinition oder Fixierung)			
Kompatibilität mit Inspektionswegen	(Rückmeldung zur Umsetzbarkeit des Inspektionsweges)	(Erforderliche Anpassungen an Geometrie oder Strategie)			
Zusätzliche Kommentare	(Allgemeine Beobachtungen oder Verbesserungsvorschläge)	(Weiterführende Maßnahmen)			