

Modellbasierter Multi-Distanz-Messansatz zur optischen Messung der Verzahnungsgeometrie

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von

Marc Christoph Pillarz M. Sc.
geboren am 26.10.1990 in Hamburg

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer,
Universität Bremen
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte,
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Februar 2023

Kurzfassung

Um die Zuverlässigkeit von Verzahnungen zu erhöhen, insbesondere von Großverzahnungen mit Durchmessern > 1 m oder Normalmodulen > 10 mm, wächst der Bedarf an schnellen, skalierbaren Messsystemen zur Qualitätsprüfung der Geometrie aller Zähne. Taktile Standard-Verzahnungsmesssysteme sind präzise, aber aufgrund des individuell begrenzten Messvolumens und der limitierten Messgeschwindigkeit nur bedingt für eine schnelle Qualitätsprüfung aller Zähne verschieden großer Verzahnungen geeignet. Aktuelle optische Verzahnungsmessansätze, die gegenüber taktile Messsystemen vergleichbare Messunsicherheiten erzielen und höhere Messgeschwindigkeiten ermöglichen, sind noch nicht für die schnelle Qualitätsprüfung aller Zähne an Großverzahnungen erprobt.

Ziel dieser Arbeit ist es daher einen modellbasierten Multi-Distanz-Messansatz zur skalierbaren Verzahnungsmessung einzuführen, der schnelle optische Messungen der Geometrie aller Zähne mit einer Messunsicherheit < 30 % der geforderten Toleranzen für eine Verzahnungsqualität 6 ermöglicht. Zur Bewertung der gemessenen Verzahnungsgeometrie wird der Formparameter Grundkreisradius ausgewählt, der linear mit der klassischen Abweichungskenngröße Profil-Winkelabweichung korreliert und ein Lösungsansatz zur Auswertung des Grundkreisradius auf Basis des Geometriemodells einer Evolventenverzahnung erarbeitet. Für die schnelle, skalierbare Messung der Geometrie aller Zähne werden drei Messstrategien des Multi-Distanz-Messansatzes vorgestellt, die entweder eine statische multisensorische oder eine dynamische lateral- beziehungsweise rotatorisch-scannende Messstrategie mit flexibel positionierbaren optischen Abstandssensoren verfolgen. Diese Arbeit fokussiert sich primär auf den rotatorisch-scannenden Multi-Distanz-Messansatz.

Simulationen verifizieren zunächst den modellbasierten Lösungsansatz zur Auswertung des Grundkreisradius. Monte-Carlo-Simulationen rotatorisch-scannender Multi-Distanzmessungen belegen anschließend, dass unabhängig von der Zahnradgröße die theoretisch erreichbare Messunsicherheit des Grundkreisradius auf Basis einer definierten Kalibrierunsicherheit und Sensorunsicherheit die Unsicherheitsanforderungen von Verzahnungsqualität 6 erfüllt. Zur Auswahl optischer Sensoren zur Multi-Distanzmessung validieren Untersuchungen an Zahnflanken die Eignung eines handelsüblichen Laser-Triangulationssensors und erstmals die eines konfokal-chromatischen Sensors für Multi-Distanzmessungen von Verzahnungen. Obwohl handelsübliche optische Sensoren nicht für Zahnformmessungen ausgelegt sind, werden anwendungsbezogene Sensorunsicherheiten erreicht, mit denen die Unsicherheitsanforderungen für den Grundkreisradius für die Verzahnungsqualität 6 erfüllt werden können. Rotatorisch-scannende Messungen an einem mittelgroßen Zahnrad validieren daraufhin den Multi-Distanz-Messansatz für Verzahnungsmessungen. Sowohl für den mittleren als auch für den zahnindividuellen Grundkreisradius und damit auch für die Profil-Winkelabweichung wird eine Messunsicherheit ≤ 30 % der geforderten Toleranz für die Verzahnungsqualität 6 erreicht. Weitere Experimente an einer Großverzahnung demonstrieren die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes. Hinsichtlich der zufälligen Messabweichungen erfüllen sowohl der mittlere als auch der zahnindividuelle Grundkreisradius die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6. Ein Vergleich mit taktile Referenzmessungen belegt, dass die Messunsicherheit der optisch erfassten zahnindividuellen Grundkreisradien das Niveau taktile Verzahnungsmessungen erreicht. Der realisierte rotatorisch-scannende Multi-Distanz-Messansatz misst zudem die Profilgeometrie aller Zähne innerhalb einer Minute, unabhängig von der Zahnradgröße, und ist damit bis zu 15-mal schneller als taktile Messsysteme. Der optische modellbasierte Multi-Distanz-Messansatz mit skalierbarem Messvolumen ist damit eine erfolgversprechende Alternative für Verzahnungsmessungen.

Abstract

To increase the reliability of gears, especially large gears with diameters > 1 m or normal modules > 10 mm, there is a growing need for fast, scalable measuring systems for quality inspection of the geometry of all teeth. Tactile standard gear measuring systems are precise, but due to the individually limited measuring volume and the limited measuring speed, they are only conditionally suitable for a fast quality inspection of all teeth of different sizes. Current optical gear measurement approaches, which achieve comparable measurement uncertainties to tactile measurement systems and enable higher measurement speeds, have not yet been tested for rapid quality inspection of all teeth on large gears.

Therefore, the aim of this work is to introduce a model-based multi-distance measurement approach for scalable gear measurement that enables fast optical measurements of the geometry of all teeth with a measurement uncertainty < 30 % of the required tolerances for a gear quality grade 6. For the evaluation of the measured gear geometry the shape parameter base circle radius is selected, which correlates linearly with the classical deviation parameter profile slope deviation and a solution approach for the evaluation of the base circle radius based on the geometry model of an involute gear is developed. For fast, scalable measurement of the geometry of all teeth, three measurement strategies of the multi-distance measurement approach are presented, which follow either a static multisensory or a dynamic lateral- or rotational-scanning measurement strategy with flexibly positionable optical distance sensors. This work focuses primarily on the rotational-scanning multi-distance measurement approach.

Simulations first verify the model-based solution approach for evaluating the base circle radius. Monte Carlo simulations of rotationally-scanning multi-distance measurements then demonstrate that, regardless of gear size, the theoretically achievable measurement uncertainty of the base circle radius based on a defined calibration uncertainty and sensor uncertainty meets the uncertainty requirements of gear quality grade 6. For the selection of optical sensors for multi-distance measurement, investigations on tooth flanks validate the suitability of a commercially available laser triangulation sensor and, for the first time, that of a confocal-chromatic sensor for multi-distance measurements of gears. Although commercially available optical sensors are not designed for tooth shape measurements, application-specific sensor uncertainties are achieved that can satisfy base circle radius uncertainty requirements for gear quality grade 6. Rotational-scanning measurements on a medium-sized gear then validate the multi-distance measurement approach for gear measurements. A measurement uncertainty ≤ 30 % of the required tolerance for gear quality grade 6 is achieved for both the mean and the tooth-individual base circle radius and thus also for the profile slope deviation. Further experiments on a large gear demonstrate the scalability of the multi-distance measurement approach. With respect to the random measurement deviations, both the mean and the tooth-individual base circle radii meet the uncertainty requirements for gear quality grade 6. A comparison with tactile reference measurements proves that the measurement uncertainty of the optically measured tooth-individual base circle radii reaches the level of tactile gear measurements. The implemented rotary-scanning multi-distance measurement approach also measures the profile geometry of all teeth within one minute, regardless of the gear size, and is thus up to 15 times faster than tactile measurement systems. The optical model-based multi-distance measurement approach with scalable measurement volume is thus a promising alternative for gear measurements.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ) an der Universität Bremen. Die wesentlichen Inhalte dieser Arbeit wurden während der Bearbeitung des von der DFG geförderten Projekts MultiSenseo erstellt.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater und Institutsleiter des BIMAQ, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer, dafür, dass er mir die wissenschaftliche Weiterqualifikation ermöglicht hat. Ich danke ihm für die intensive Begleitung, fachliche Unterstützung, den Zuspruch und die Motivation zur Fertigstellung dieser Arbeit und nicht zuletzt für die Begutachtung dieser Arbeit. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte für die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens.

Ein herzliches Dankeschön geht an alle meine Kolleg:innen und ehemaligen Kolleg:innen am BIMAQ für das angenehme, freundliche Arbeitsklima und die fachliche und persönliche Unterstützung. Insbesondere bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Axel von Freyberg und Dr.-Ing. Dirk Stöbener für das Vertrauen und die immerwährende inhaltliche Unterstützung und persönliche Förderung. Für die zahlreichen wertvollen Anregungen danke ich außerdem Michael Sorg, Dr.-Ing. Jan Osmer, Dr. Ing. Merlin Mikulewitsch, Dr. Ing. Christoph Vanselow, Gert Behrends, Daniel Gleichauf und Marina Terlau. Frank Horn danke ich für die unentwegte Unterstützung bei der Durchführung von Messungen. Uwe Reinhard und Werner Behrendt danke ich für die Hilfe bei technischen Fragestellungen. Außerdem bedanke ich mich bei Eva Schultze für die organisatorische Hilfe bezüglich meiner Promotion und für den motivierenden Zuspruch.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Egor Maul, Philipp Thomanek und Kevin Phung für ihre Unterstützung als studentische Hilfskraft oder die Zusammenarbeit im Rahmen von Abschlussarbeiten bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Auch meiner Familie und meinen Freunden danke ich für den positiven Zuspruch während der Bearbeitung dieser Arbeit. Mein ganz besonderer Dank gilt außerdem meinen Eltern Renate und Holger sowie meiner Schwester Sarah für die bedingungslose Unterstützung und Förderung und den liebevollen Rückhalt auf meinem bisherigen Lebensweg.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stand der Forschung und Technik	2
1.3	Zielsetzung und Struktur der Arbeit	9
2	Grundlagen der Multi-Distanzmessung	11
2.1	Formparameter Grundkreisradius	11
2.2	Geometriemodell zur Berechnung des Grundkreisradius	12
2.3	Lösung des inversen Problems	14
2.4	Multi-Distanz-Messansatz zur Lösung des inversen Problems	16
2.4.1	Statischer multisensorischer Messansatz	17
2.4.2	Dynamischer lateral-scannender Messansatz	19
2.4.3	Dynamischer rotatorisch-scannender Messansatz	21
2.4.4	Messdatentransformation und Signalauswertung	23
3	Verifikation	27
3.1	Modellbasierte Lösung des inversen Problems	27
3.1.1	Mittlerer Grundkreisradius	28
3.1.2	Zahnindividueller Grundkreisradius	30
3.1.3	Fazit	32
3.2	Messunsicherheitsabschätzung	32
3.2.1	Messbarkeitsgrenzen	33
3.2.2	Skalierbarkeit und dynamischer Bereich	41
3.3	Fazit	44
4	Charakterisierung optischer Sensoren	45
4.1	Spezifikation der optischen Sensoren	46
4.1.1	Sensorprinzipien	46
4.1.2	Sensoreigenschaften	48
4.2	Experimenteller Aufbau zur Sensorcharakterisierung	49
4.3	Einfluss der Zahnflankengeometrie - Neigung	51
4.3.1	Vorabbetrachtung	52
4.3.2	Messobjekt und Messdatenauswertung	53
4.3.3	Experimentelle Ergebnisse	56
4.4	Einfluss der Zahnflankenoberfläche - Rauheit und Reflexionsvermögen	61
4.4.1	Vorabbetrachtung	61

4.4.2	Messobjekt und Messdatenauswertung	62
4.4.3	Experimentelle Ergebnisse	64
4.5	Einfluss der Zahnradgeometrie - Mehrfachreflexionen	67
4.5.1	Vorabbetrachtung	67
4.5.2	Messobjekt und Messdatenauswertung	68
4.5.3	Experimentelle Ergebnisse	70
4.6	Fazit - Eignung der Sensoren zur Zahnformmessung	73
5	Validierung	77
5.1	Taktile Referenzmessungen	77
5.2	Experimenteller Messaufbau	78
5.2.1	Messobjekte	79
5.2.2	Messanordnung	80
5.2.3	Kalibrierung am Beispiel einer Offset-Korrektion	83
5.3	Ergebnisse der Multi-Distanzmessungen und Messunsicherheitsdiskussion	85
5.3.1	Validierung des Multi-Distanz-Messansatzes an einer mittelgroßen Verzahnung	85
5.3.2	Demonstration der Skalierbarkeit am Beispiel einer Großverzahnung	90
5.3.3	Dynamischer Bereich des Multi-Distanz-Messansatzes	99
5.4	Fazit	100
6	Zusammenfassung und Ausblick	103
6.1	Ausgangslage der Arbeit	103
6.2	Wissenschaftlicher Fortschritt	104
6.3	Weiterführender Forschungsbedarf	110
	Literaturverzeichnis	112
	Eigene Veröffentlichungen	121
	Betreute studentische Arbeiten	123

1 Einleitung

1.1 Motivation

Verzahnungen dienen der Übertragung von Drehmomenten und sind eine Schlüsseltechnologie für zum Beispiel den Fahrzeugbau einschließlich der Elektromobilität, die Schiff-, Luft- Raumfahrt und die Windenergie [Cro2011, Urb2021]. Die Qualität der gefertigten Zahnflankengeometrie ist dabei maßgebend für die Funktionalität und Lebensdauer der Getriebe [Goc2003]. In der Verzahnungstechnologie ist die Evolvente die meist genutzte Form der Zahnflanke [Fri2016]. Bereits Abweichungen von der Nenngeometrie im Mikrometerbereich können zu vorzeitigem Verschleiß der Zahnräder und folglich zu Ausfällen von ganzen Getrieben führen. Die Herstellung von Verzahnungen mit evolventischen Zahnflanken erfolgt daher nach standardisierten Verzahnungsqualitäten. Hierbei werden Fertigungstoleranzen bis zu einstelligen Mikrometern gefordert [DIN2018a].

Aufgrund der engen Fertigungstoleranzen wird bei der Qualitätsprüfung von Verzahnungen auf die goldene Regel der Messtechnik, das heißt eine Messunsicherheit in der Größenordnung von 10 % der Toleranz [Ber1968], derzeit verzichtet. Nach der DIN ISO 18653 werden üblicherweise mit $k = 2$ erweiterte Messunsicherheiten bis 30 % der Toleranzen gefordert [DIN2009]. Die erforderliche Messunsicherheit ist dabei abhängig von der Größe der Verzahnung, der zu messenden Abweichungskenngröße und der Verzahnungsqualität. Für die Abweichungskenngröße Profil-Winkelabweichung ergeben sich beispielsweise bei Verzahnungen bis zu 1 m Durchmesser und einer geforderten Verzahnungsqualität 6 Messunsicherheiten $\leq 4,2 \mu\text{m}$ für $k = 2$, vgl. Tabelle 1.1. Um eine gleichmäßige und zuverlässige Kraftübertragung unter Last zu gewährleisten, sind somit Qualitätsprüfungen der Zahngeometrie mit niedriger einstelliger Mikrometerunsicherheit notwendig.

Große Verzahnungen mit einem Durchmesser von ≥ 1 m und beziehungsweise oder mit einem Normalmodul von ≥ 10 mm stellen in der geometrischen Messtechnik eine besondere Herausforderung dar. Der Normalmodul ist ein Maß für die Größe der Zähne und berechnet sich aus dem Quotienten von Kopfkreisdurchmesser und Zähnezahl [DIN1976]. Der Kopfkreisdurchmesser einer Verzahnung entspricht dem Außendurchmesser. Mit zunehmendem Durchmesser und Normalmodul des Zahnrads steigt das Verhältnis des Zahnraddurchmessers zur erforderlichen Messunsicherheit, obwohl die Toleranzen zunehmen, vgl. Tabelle 1.1. Der erforderliche Dynamikbereich des Messsystems nimmt dementsprechend mit zunehmender Zahnradgröße stetig zu [Sch2016]. Darüber hinaus sind Qualitätsprüfungen von Großverzahnungen aufgrund der metergroßen Abmessungen und bis zu tonnenschweren Massen mit einem hohen logistischen Aufwand verbunden. Zur Qualitätsprüfung von Großverzahnungen unterschiedlicher Größe werden daher flexible

Messsysteme mit skalierbarem Messvolumen und einem großen dynamischen Bereich benötigt.

Tabelle 1.1: Vergleich zweier verschieden großer Verzahnungen aus klassischem Werkzeugstahl hinsichtlich ausgewählter (Geometrie-)Parameter, Fertigungstoleranzen für Verzahnungsqualität 6 (VQ6) für die Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha T}$ nach [DIN2018a] und die daraus resultierenden abgeschätzten erforderlichen Messunsicherheiten $u_{f_{H\alpha}, VQ6}$ nach [DIN2009] und dynamischen Bereiche $d_a/u_{f_{H\alpha}, VQ6}$.

	kleine Verzahnung	Großverzahnung
Kopfkreisdurchmesser d_a	105 mm	1020 mm
Normalmodul m_n	3,75 mm	12 mm
Zähnezahl z	26	83
Masse m	≈ 1 kg	≈ 1000 kg
Toleranzen $f_{H\alpha T}$ (Verzahnungsqualität 6)	7,9 μm	13,9 μm
Messunsicherheit $u_{f_{H\alpha}, VQ6}$ für $k = 2$	2,4 μm	4,2 μm
dynamischer Bereich $d_a/u_{f_{H\alpha}, VQ6}$	44214	245423

Außerdem kommt es bei der Fertigung von Großverzahnungen durch das im Vergleich zu kleinen Verzahnungen größere Spanvolumen und die längere Bearbeitungszeit zu einem asymmetrischen Wärmeeintrag und einem spürbaren Werkzeugverschleiß. Deshalb kann nicht davon ausgegangen werden, dass die einzelnen Zähne annähernd die gleiche Form und Oberflächengüte haben. Zur Steigerung der Zuverlässigkeit von Getrieben muss daher die Geometrie jedes einzelnen Zahns umfangreich gemessen und auch bei der Auswertung der Abweichungskenngrößen berücksichtigt werden [Bal2015, Goc2012]. Mit steigender Zähnezahl nimmt jedoch die erforderliche Messzeit proportional zu, weshalb schnelle Messsysteme für die umfangreiche Messung aller Zähne erforderlich sind.

Zusammengefasst existiert ein hoher Bedarf an schnellen Verzahnungsmesssystemen mit einem flexibel skalierbarem Messvolumen und großem dynamischen Bereich, die die Zahnflanken aller Zähne umfangreich erfassen und die Verzahnungsgeometrie mit niedriger einstelliger Mikrometerunsicherheit messen.

1.2 Stand der Forschung und Technik

Die Qualitätsprüfung der Geometrie von evolventischen Verzahnungen ist funktionsorientiert und in der Norm DIN ISO 1328-1 und in der VDI/VDE Richtlinie 2612 Blatt 1 standardisiert. Sie umfasst die Datenerfassung der Istgeometrie und die anschließende Datenauswertung auf Basis spezifizierter Toleranzen [DIN2018a, VDI2018]. Die Erfassung der Istgeometrie einer Verzahnung beinhaltet zur funktionsorientierten Qualitätsprüfung typischerweise in einem ersten Schritt die Ermittlung der Position der Bezugsachse des Zahnradsitzes beziehungsweise der Lage und Ausrichtung der Verzahnung in einem Messkoordinatensystem. Basierend auf der Lage und Ausrichtung der Verzahnung im Messkoordinatensystem wird ein Bezugskoordinatensystem der Verzahnung für die nachfolgende Datenerfassung der Zahnflankengeometrie erstellt. In dem Bezugskoordinatensystem wer-

den dafür je eine Profil- und eine Flankenlinie auf der Oberfläche der Zahnflanken und ein weiterer Messpunkt pro Zahnflanke auf Höhe des Teilkreises in einer Ebene senkrecht zur Drehachse der Verzahnung gemessen [Goc2017], vgl. Bild 1.1.

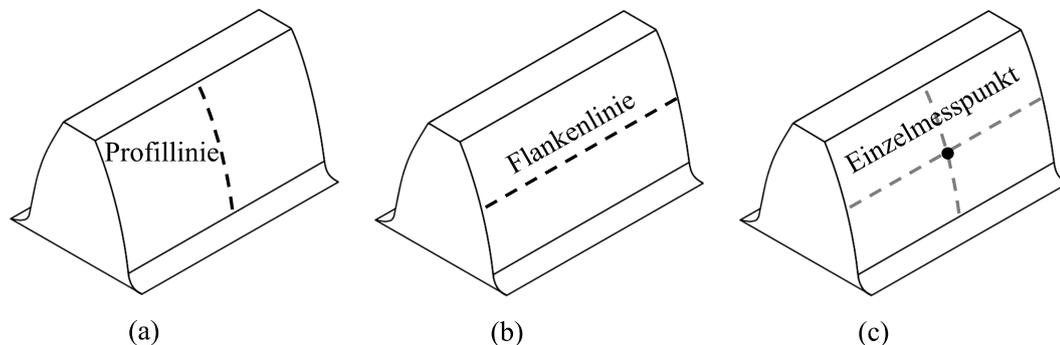


Bild 1.1: Messung (a) einer Profillinie im Stirnschnitt, (b) einer Flankenlinie auf Höhe des Teilkreises und (c) eines Punktes im Stirnschnitt auf der Zahnflanke auf Höhe des Teilkreises. Der Stirnschnitt beschreibt eine Ebene senkrecht zur Drehachse der Verzahnung. Der Teilkreisdurchmesser ergibt sich aus dem Produkt von Zähnezahl und Normalmodul.

Das Bezugskordinatensystem ist darüber hinaus auch für die normgerechte Datenauswertung notwendig. Die Datenauswertung beruht in der Regel auf einem Vergleich der Messdaten mit der Nenngeometrie der zu prüfenden Verzahnung. Üblicherweise wird nach der Total Least Squares Methode die ideale Nenngeometrie an die gemessenen Daten im Bezugskordinatensystem approximiert. Die ermittelten Residuen stellen dabei die lokalen Abweichungen zwischen Ist- und Nenngeometrie dar. Anhand definierter Abweichungskenngrößen wird daraufhin die Zahnflankengeometrie hinsichtlich der spezifizierten Toleranzen bewertet. Die Abweichungskenngrößen lassen sich dabei in Form- und Lageabweichungen unterteilen [DIN2018a]. Zu den Formabweichungen gehören unter anderem die Profil- und Flankenlinienabweichungen, die auf Basis der Profil- beziehungsweise Flankenlinienmessung bestimmt werden. Die Auswertung der Formabweichungen beispielsweise erfolgt mit Ausgleichsrechnungen basierend auf den Residuen aus der zuvor durchgeführten Approximation der Nenngeometrie an die Messdaten. Zu den Lageabweichungen zählen Teilungs- und Rundlaufabweichungen, welche anhand der zusätzlichen Messpunkte auf den Zahnflanken auf der Höhe des Teilkreises berechnet werden.

Die mit der Verzahnungsgeometrie einhergehende eingeschränkte Zugänglichkeit für Messtechnik erfordert Verzahnungsmesssysteme mit kontinuierlicher Neupositionierung der Sensorik beziehungsweise der Verzahnung, um die Istgeometrie vollständig erfassen zu können. In der Verzahnungsmesstechnik haben sich daher im wesentlichen zwei Messstrategien zur Messung der Verzahnungsgeometrie bewährt. Bei der ersten Messstrategie wird die Sensorik mittels Positioniereinheiten kontinuierlich relativ zu einem statisch eingespannten Zahnrad ausgerichtet und bewegt. Ein Vorteil dieser Messstrategie ist die universelle Anwendbarkeit für verschiedene Verzahnungsgeometrien. Bei der zweiten Messstrategie hingegen wird das Zahnrad auf einem Drehtisch eingespannt und kontinuierlich relativ zur Sensorik ausgerichtet und positioniert. Die Kombination von Sensorik und Drehtisch er-

möglicht die Messung aller Zahnflanken innerhalb einer Umdrehung. Je nach verwendetem Sensorprinzip und Rotationsgeschwindigkeit sind grundsätzlich kurze Messzeiten unter 10 Minuten aller Zahnflanken realisierbar. In beiden Messstrategien wird die Oberfläche der Zahnflanke mittels der Sensorik schrittweise beziehungsweise kontinuierlich gemessen.

Zur Erfassung der Istgeometrie von Verzahnungen werden im wesentlichen taktile Messverfahren, in jüngster Zeit vermehrt auch immer mehr berührungslose optische Messverfahren eingesetzt und untersucht. Der nachfolgende aktuelle Stand der Forschung und Technik der Verzahnungsmessung wird daher in taktile und optische Messverfahren gegliedert. Zudem wird der aktuelle Stand der Technik zur Messung der Verzahnungsgeometrie im Rahmen dieser Arbeit anhand der drei Kriterien Messunsicherheit, Skalierbarkeit und Messgeschwindigkeit bewertet.

Für die Qualitätsprüfung der Geometrie von Verzahnungen sind taktile Messverfahren, wie Koordinatenmessgeräte (KMG) und Verzahnungsmessgeräte (VMG) Goldstandard [Goc2003, Goc2017, Hos2020]. KMG verfolgen die Strategie die Sensorik gegenüber dem Messobjekt zu verfahren. Sie bestehen aus einem taktilen Tastsystem mit beweglichen, rückführbaren Linearachsen zur Positionierung des Tasters. VMG sind speziell für die Qualitätsprüfung von Verzahnungen entworfene Messsysteme. Ebenfalls sind VMG mit einem taktilen Tastsystem mit typischerweise zwei Linearachsen und zusätzlich einem Drehtisch ausgestattet. Bei der Verzahnungsmessung wird die Verzahnung drehbar eingespannt und relativ zum Tastsystem positioniert. Das taktile Tastsystem kann daraufhin parallel zur Drehachse und in radialer Richtung bewegt werden. Mit dem taktilen Tastsystem von KMG und VMG werden die Oberflächen der Zahnflanken üblicherweise punktweise, seriell abgetastet und die Messpositionen im Messvolumen registriert. Der Taster wird hierfür jeweils in die Zahnlücken bewegt. Eine dynamische Messung aller Zahnflanken innerhalb einer kontinuierlichen Drehung ist mit VMG beispielsweise nicht möglich. Im Anschluss wird die in Form einer Punktwolke erfasste Istgeometrie mit der Nenngeometrie verglichen und die Abweichungskenngrößen mit kommerzieller Software modellbasiert ausgewertet.

KMG und VMG zeichnen sich durch eine erreichbare Antastunsicherheit $\leq 1 \mu\text{m}$ beziehungsweise einer maximal zulässigen Messabweichung $MPE_E = (0,9 + L/350) \mu\text{m}$ ($L =$ gemessene Länge in mm) für die Geometriemessung von Verzahnungen aus [Peg2009, Sci2011]. KMG mit Messvolumina von bis zu $5 \text{ m} \times 11 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}$ und einem $MPE_E = (7 + L/250) \mu\text{m}$ ermöglichen zudem hohe dynamische Bereiche [Dus2010]. Um diese Mikrometermessabweichungen erreichen zu können, müssen die jeweiligen Positioniereinheiten taktiler Messsysteme steif miteinander verbunden sein. KMG und VMG bestehen daher aus stabilen, schweren Materialien und das Messvolumen ist nur für eine maximale Bauteilgröße festgelegt und nicht skalierbar [Peg2009, Fra2011]. Zudem ist die Messgeschwindigkeit durch die taktile serielle Datenerfassung limitiert, weshalb umfangreiche Messungen aller Zahnflanken zeitaufwändig sind. Bei Standard-Verzahnungsprüfungen mit KMG und VMG werden daher typischerweise nur vier über den Umfang des Zahnrads verteilte Zähne gemessen [Bal2015, Goc2017]. Selbst für diesen reduzierten Stichprobenumfang bedarf es Messzeiten von circa 5 Minuten [Ni2016]. Eine aussagefähige und zuverlässige Qualitätsprüfung der Verzahnungsgeometrie ist mit dem reduzierten stichprobenartigen

Prüfumfang nur eingeschränkt möglich. KMG und VMG mit taktilen Sensoren sind daher für die schnelle Messung aller Zahnflanken von verschiedenen großen Verzahnungen nur bedingt geeignet. Darüber hinaus sind hinsichtlich der erreichbaren Antastunsicherheiten und Messgeschwindigkeiten im Bereich der taktilen Verzahnungsmesstechnik keine wesentlichen Entwicklungen mehr zu erwarten [Goc2003].

Optische Messverfahren mit beispielsweise punktweise messende Abstandssensoren, zeichnen sich durch hohe axiale Auflösungen im nm-Bereich aus und ermöglichen grundsätzlich schnelle Messungen mit Messraten bis in den zweistelligen kHz-Bereich. Gerade in Kombination mit einem Drehtisch können optische Messverfahren mit hohen Messraten einen erheblichen Geschwindigkeitsvorteil gegenüber taktilen Messsystemen durch rotatorisch-scannende Verzahnungsmessungen bieten. Die Messdauer von Verzahnungsmessungen kann unabhängig von der Größe der Verzahnung auf bis zu 1 Minute verkürzt werden. Die Verwendung optischer Linien- oder Flächensensoren steigert zudem den Informationsgehalt [Ges2009], sodass innerhalb einer Drehung alle Zahnflanken vollständig erfasst werden können. Aus diesen Gründen wurde beziehungsweise wird in der optischen Verzahnungsmesstechnik primär die Messstrategie mit Drehtisch und Sensorik verfolgt.

In der optischen Verzahnungsmesstechnik finden beispielsweise interferometrische Ansätze Anwendung. Takeoka et al. stellten 2007 und 2008 ein Laser-interferometrisches Messgerät zur Messung der Profilgeometrie eines kleinen Evolventennormals mit einer Zahnflanke vor [Tak2007, Tak2008]. Die Erfassung des Evolventenprofils erfolgte mittels eines fokussierten Lasers und nach dem Prinzip des Abrollens der Evolvente. Experimentelle Untersuchungen zeigten, dass es zur Messung der Profilgeometrie einer polierten Messoberfläche bedarf. Im Ergebnis konnten daraufhin Abweichungen der Zahnflankenform im Submikrometerbereich erfasst werden. Eine weitere Auswertung klassischer Abweichungskenngrößen wurde darüber hinaus nicht durchgeführt. Auch eine Messdauer zur Erfassung der Profilgeometrie wurde nicht charakterisiert. In den Jahren 2011 und 2014 präsentierten Fang et al. einen interferometrischen Messansatz mit Phasenshift-Technik zur vollständigen flächigen Erfassung der Geometrie einer Zahnflanke von mittelgroßen Zahnrädern ($d_a \approx 139$ mm) [Fan2011, Fan2014]. Fang et al. bestimmten die Abweichungen zwischen Ist- und Nenngeometrie und validierten die interferometrischen Messungen mit taktilen Referenzmessungen. Nachdem systematische Messabweichungen aufgrund von Abweichungen in der Messanordnung kompensiert wurden, stimmten die Messergebnisse in Profil- und Flankenlinienmessung mit der Referenz überein. Durch den flächigen Messansatz zur vollständigen Erfassung der Zahnflankengeometrie kann die Messdauer gegenüber seriell messenden Verfahren erheblich reduziert werden. Der Messaufbau ist jedoch nur zur Messung einer einzelnen Zahnflanke geeignet und Fang et al. quantifizieren keine Messdauer für die Messung aller Zahnflanken. Mit einem frequenzmodulierten interferometrischen Sensor (frequency-modulated continuouswave Laser-Radars) in Kombination mit einem KMG untersuchten Balzer et al. die punktweise scannende Erfassung der Verzahnungsgeometrie [Bal2015, Bal2017]. Der Strahlengang des interferometrischen Sensors wurde über eine Faseroptik in den Sensorkopf des KMG geführt und mit Hilfe des Koordinatenmessgeräts bewegt. Aufgrund einer festen Messrichtung des Sensors wurden die zu messenden

Zahnflanken mit einem Drehtisch vor dem optischen Sensor positioniert und dann mittels des KMG geführten Sensors scannend abgetastet. Die Messdaten wurden anschließend konventionell nach der DIN ISO 1328-1 ausgewertet. Profil- und Flankenlinienmessungen zeigen, dass die erzielten Messabweichungen nur teilweise mit den taktilen Referenzmessungen übereinstimmen und innerhalb der geforderten Toleranzen liegen. Gleiches gilt für die Messergebnisse der Teilungs- und Rundlaufmessungen. Gegenüber klassischen taktilen Messsystemen wurde zudem kein maßgeblicher Geschwindigkeitsvorteil erreicht, da hohe Scangeschwindigkeiten zu vermehrten Vibrationen im Messsystem und damit zu zusätzlichen Unsicherheitsbeiträgen führten. Im Ergebnis ist gegenwärtig kein auf der Interferometrie basierendes optisches Verzahnungsmessverfahren für die schnelle Messung aller Zahnflanken geeignet.

Häufig untersuchte Messansätze für die optische Verzahnungsmessung basieren auf dem Prinzip der Triangulation und können punkt-, linien- und flächenorientierte Messungen durchführen. Younes et al. stellten 2005 ein Messverfahren basierend auf punktförmigen Triangulationssensoren in Kombination mit einem Drehtisch zur Messung der Verzahnungsgeometrie aller Zähne vor [You2005a, You2005b]. An verschiedenen großen Zahnrädern mit einem Normalmodul bis 6 mm wurden in einem einminütigen Messdurchlauf unter anderem Teilungs- und Profilmessungen durchgeführt. Mit einem eigens entwickelten Algorithmus wurden die erfassten Messdaten mit der Nenngeometrie verglichen und Profilabweichungen ermittelt. Die erforderliche Messunsicherheit zur Beurteilung der Toleranzen für die Verzahnungsqualität 6 nach DIN ISO 1328-1 wird jedoch nicht erreicht. Trotz einer hohen Messgeschwindigkeit und der umfangreichen Messung aller Zähne ist das Messsystem nicht für schnelle Verzahnungsmessung geeignet.

Messkonzepte für Verzahnungsmessungen auf der Basis von Laser-Linien-Triangulationssensoren werden in [Aue2019, Tia2019, Guo2020] vorgestellt. Mit einem Sensorsystem bestehend aus zwei gegenüberliegenden Triangulationssensoren und einem Drehtisch erfassten Tian et al. die Geometrie aller Zahnflanken einer kleinen Verzahnung ($d_a < 40$ mm) in einem Messdurchlauf [Tia2019]. Anschließend wurden auf Basis der Messdaten Abweichungen zu Referenzmessungen berechnet. Nach der Kompensation systematischer Messabweichungen aufgrund von einer unbekanntem Messanordnung wurden verbleibende Messabweichungen von bis zu $59 \mu\text{m}$ erreicht. Diese erreichte Messabweichung ist jedoch hinsichtlich der geforderten Toleranzen für Verzahnungen nicht ausreichend, weshalb der Messansatz von Tian et al. derzeit nicht für schnelle Verzahnungsmessungen mit einstelliger Mikrometerunsicherheit geeignet ist. Auerswald et al. präsentierten 2019 einen Laser-Linien-Triangulationsansatz für die Messung großer Schrägverzahnungen. Mittels einer Linearachse als Scaneinheit wurde die gesamte Zahnflanke mit dem Laser-Linien-Triangulationssensor erfasst. Zur Datenauswertung haben Auerswald et al. einen modellbasierten Ansatz auf der Grundlage des Geometriemodells einer Evolvente verwendet, wobei Ist- und Nenngeometrie in einem gemeinsamen Bezugskoordinatensystem miteinander verglichen wurden. Im Mittel weicht die gemessene Zahnflankenform um $\pm 8,2 \mu\text{m}$ von der Nenngeometrie ab. Klassische Abweichungskenngrößen wurden nicht weiter berechnet. Auerswald et al. zeigten auch, dass Mehrfachreflexionen infolge der reflektierenden und gekrümmten Oberfläche des Zahns je nach Sensorausrichtung

die Messabweichungen beeinflussen. Aufgrund der flächigen Messung konnte gegenüber einer klassischen taktilen Verzahnungsprüfung ein Beschleunigungsfaktor von 5700 erreicht werden [Aue2019]. Der Messansatz wurde jedoch nur für die umfangreiche Messung einer einzelnen Zahnflanke ausgelegt und ist damit nicht für die schnelle Verzahnungsprüfung aller Zähne eines Zahnrads geeignet. In 2020 zeigten Guo et al. die erfolgreiche Messung der Verzahnungsgeometrie eines kleinen Zahnrads ($d_a < 100\text{mm}$) mit einem Laser-Linien-Triangulationssensor und einem Drehtisch. Nach geometrischer Kalibrierung der Messanordnung wurden in einem Messdurchlauf Teilungs- und Profilabweichungen aller Zahnflanken flächig erfasst und anschließend mit taktilen Referenzmessungen validiert. Zur Berechnung der Messabweichungen wurde im kalibrierten Messkoordinatensystem ebenfalls ein Vergleich zwischen Ist- und Nenngeometrie durchgeführt. Die optisch gemessenen Teilungsabweichungen weichen um $3\text{ }\mu\text{m}$ und die Profilabweichungen nur um $1\text{ }\mu\text{m}$ von den taktilen Messungen ab [Guo2020]. Obwohl die Messdauer für die Messung aller Zahnflanken nicht quantifiziert wurde, sind basierend auf dem rotatorisch-scannenden flächigen Messansatz Messzeiten < 10 Minuten zu erwarten. Dies bedarf es jedoch zunächst in weiteren experimentellen Untersuchungen zu validieren.

Die Streifenprojektion und Moiré-Technik sind die überwiegend angewandten flächenorientierten Messansätze zur Verzahnungsmessung auf Basis des Triangulationsprinzips. Im Jahr 2000 präsentierten Peter et al. einen Messansatz auf Basis eines Streifenprojektors und einem Drehtisch zur Erfassung der zahnindividuellen Oberflächengeometrie mittelgroßer Schrägverzahnungen ($d_a \approx 100\text{mm}$) [Pet2000]. Während Abweichungskenngrößen zur Bewertung der Verzahnungsgeometrie nicht quantifiziert wurden, konnte die Form der Zahnflanke mit Messabweichungen von ca. $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ erfasst werden. Zur Berechnung der Messabweichungen verwendeten Peter et al. einen Auswerteansatz, bei dem mittels einer Abstandsfunktion Abweichungen zwischen der Soll- und Istevolvente bestimmt werden. Als großen Vorteil dieses flächigen Messansatzes nannten Peter et al. die schnelle Datenerfassung. Eine Messdauer wurde jedoch nicht näher quantifiziert. Ein weiterer Messansatz für die 3D-Verzahnungsmessung mit einem Streifenprojektor wurde 2006 von Meeß et al. demonstriert [Mee2006]. Meeß et al. implementierten hierfür einen Streifenprojektor in ein opto-taktiles Koordinatenmessgerät und führten Profil- und Flankenlinienmessungen an einer kleinen Verzahnung ($d_a \approx 82\text{mm}$) durch. Mit einem zusätzlichen Drehtisch wurde das Messobjekt zum orts- und richtungsfesten Sensor positioniert. Meeß et al. wählten dabei eine sequentielle teilungsbezogene Messung der jeweiligen einzelnen Zahnflanken. Abweichungskenngrößen wurden anschließend konventionell nach der Norm ausgewertet. Die erzielten Messunsicherheiten sind jedoch hinsichtlich der geforderten Toleranzen für Verzahnungsqualität 6 nicht ausreichend. Mit dem HN-C3030 bietet die Firma Nikon seit 2016 ein 3D-Verzahnungsmesssystem für Verzahnungen bis 300 mm Durchmesser an, das auf der Streifenprojektion in Kombination mit einer computergestützten Sensorsteuerung und einem Drehtisch beruht [Nik2016]. Eine zusätzliche Software wertet entsprechend der DIN ISO 1328-1 Abweichungskenngrößen im zuvor eingemessenen Messkoordinatensystem aus. Erreichbare Messunsicherheiten für die Abweichungskenngrößen wurden jedoch nicht weiter spezifiziert. Die maximal zulässige Abweichung beträgt $MPE_E = (1,6 + 4L/1000)\text{ }\mu\text{m}$ ($L =$ gemessene Länge in mm). Mit

dem rotatorisch-scannenden flächigen Messansatz sind umfangreiche Qualitätsprüfungen aller Zahnflanken innerhalb 5 Minuten möglich. Sciammarella et al. zeigten 2005 [Sci2005], dass die 3D-Messung der Verzahnungsgeometrie mit der Moiré-Technik vergleichbare Ergebnisse wie Koordinatenmessgeräte erzielt. Zur 3D-Messung des Zahnprofils wurde ein Moiré-Projektor mit einem Drehtisch und Linearachsen zur Justage der Messanordnung kombiniert. Mittels mathematischer Transformationsrechnungen wurden die optisch erfassten Messdaten anschließend mit taktilen Referenzmessungen verglichen und Messabweichungen bestimmt. Die erreichbare Messabweichung bei der Profilmessung ist im Betrag $< 3 \mu\text{m}$. Abweichungskenngrößen wurden darüber hinaus nicht berechnet. Ebenso wurde keine Aussage zur Messgeschwindigkeit quantifiziert. Auch Chen et al. zeigten das Potenzial der Moiré-Technik für die 3D-Verzahnungsmessung und geben Messabweichungen entlang der Profil- und Flankenlinien eines Zahns eines kleinen Zahnrads ($d_a = 40 \text{ mm}$) an [Che2019]. Die Messabweichungen wurden mit einem in Matlab entwickelten Auswertalgorithmus durch Vergleich mit taktilen Referenzmessungen ermittelt. Entlang der Profillinie wurden Messabweichungen $< 5 \mu\text{m}$ und entlang der Flankenlinie $< 4 \mu\text{m}$ erzielt. Eine Auswertung definierter Abweichungskenngrößen wurde nicht durchgeführt. Darüber hinaus wurde der Messansatz bisher nicht für die Messung mehrerer Zahnflanken in einem Messdurchlauf ausgelegt. In 2021 präsentierten Urbas et al. einen scannenden 3D-Messansatz zur umfangreichen Verzahnungsmessung auf Basis eines Streifenprojektors ATOS Compact Scan 5 M der Firma GOM Metrology in Kombination mit einem Drehtisch [Urb2021]. Am Beispiel von kleinen Polymer-Verzahnungen mit einem Kopfkreisdurchmesser von 22 mm demonstrierten Urbas et al. das Anwendungspotenzial des Messansatzes und bestimmten mit einem zusätzlich entwickelten Auswertansatz klassische Abweichungskenngrößen. Die Ergebnisse stimmten in guter Näherung mit taktilen Referenzmessungen überein. Um die Zahnflankengeometrie messen zu können, müssen die Oberflächen der Zähne jedoch mit einem Antireflexionspulver beschichtet werden. Im Vergleich zu taktilen Messungen, erfordert die Erfassung der Geometrie des gesamten Zahnrads einen deutlich geringeren Zeitaufwand. Eine Messdauer wurde allerdings nicht quantifiziert. Zusammengefasst bieten die derzeitigen optischen Triangulationsverfahren großes Potenzial für die schnelle umfangreiche Qualitätsprüfung von Verzahnung mit Messunsicherheiten bis in den einstelligen Mikrometerbereich.

Die vorgestellten Messansätze zur optischen Verzahnungsmessung wurden im wesentlichen an kleinen beziehungsweise mittelgroßen Verzahnungen mit Kopfkreisdurchmessern von bis zu $\approx 139 \text{ mm}$ validiert. Lediglich Auerswald et al. präsentierten Messergebnisse einer Zahnflankenmessung an einer großen Schrägverzahnung. Der Messansatz von Auerswald et al. war jedoch nicht für die Messung aller Zahnflanken geeignet. Im Ergebnis bietet der aktuelle Stand der Forschung und Technik derzeit keine optischen Messansätze zur Qualitätsprüfung von Großverzahnungen.

Ein weiteres vielversprechendes Messprinzip für die optische Verzahnungsmessung ist das konfokal-chromatische Sensorprinzip. Insbesondere die Anwendbarkeit des konfokal-chromatischen Sensorprinzips an spiegelnden metallischen Oberflächen ist für die Verzahnungsmessungen interessant. Zudem erreichen konfokal-chromatische Abstandssensoren Abstandsunsicherheiten im niedrigen einstelligen Mikrometerbereich. Messraten von bis

zu 70 kHz [Mic2022] ermöglichen außerdem kurze Messdurchläufe und dynamische Messkonzepte zur Erfassung der Verzahnungsgeometrie. Untersuchungen zur Eignung des konfokal-chromatischen Sensorprinzips für schnelle Verzahnungsmessungen an kleinen Verzahnungen als auch an Großverzahnungen stehen noch aus.

Nach aktuellem Stand der Forschung und Technik bestehen verschiedene Ansätze zur Qualitätsprüfung der Geometrie von Verzahnungen. Nach wie vor stellen taktile Koordinaten- und Verzahnungsmessgeräte den Goldstandard für die Verzahnungsmessung dar. Taktile Verfahren sind präzise, jedoch hinsichtlich der Messgeschwindigkeit und des Messvolumens limitiert. Optische Messansätze zur Qualitätsprüfung von Verzahnungen erreichen mittlerweile vergleichbare Messunsicherheiten, bei deutlich höherer Messgeschwindigkeit. Die jeweiligen Messansätze sind derzeit jedoch nicht für die umfangreiche Qualitätsprüfung aller Zähne von Großverzahnungen ausgelegt und das konfokal-chromatische Prinzip ist für Verzahnungen bislang noch nicht erprobt. Zusammengefasst existiert aktuell kein Verzahnungsmesssystem mit skalierbarem Messvolumen, welches eine schnelle Messung der Geometrie beziehungsweise Geometrieparameter aller Zahnflanken mit niedriger einstelliger Mikrometerunsicherheit insbesondere auch für größere Verzahnungen ermöglicht.

1.3 Zielsetzung und Struktur der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Validierung eines modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes zur Verzahnungsmessung, der schnelle optische Messungen der Geometrie aller Zahnflanken innerhalb 5 Minuten ermöglicht. Hierbei soll insbesondere eine Skalierbarkeit der Messung ermöglicht werden, um die Geometrie von kleinen und auch Großverzahnungen messen zu können. Typischerweise werden bei der Bewertung der Verzahnungsgeometrie definierte Abweichungskenngrößen auf Basis der Abweichungen zwischen Ist- und Nenngeometrie ausgewertet. Hierzu muss zunächst ein Bezugskoordinatensystem ermittelt werden. Die Abweichungskenngrößen korrelieren jedoch auch mit Formparametern einer Verzahnung. In dieser Arbeit soll direkt aus den gemessenen Daten der Formparameter Grundkreisradius modellbasiert berechnet werden, ohne zuvor ein Bezugskoordinatensystem zu bestimmen. Am Beispiel des Grundkreisradius soll daraufhin geklärt werden, ob eine Messunsicherheit $< 30\%$ der Toleranzen für Verzahnungsqualität 6 für verschiedene Verzahnungsgrößen erzielt und welcher maximale dynamische Bereich erreicht werden kann. Zudem sollen das Potenzial kommerzieller optischer Sensoren zur Verzahnungsmessung sowie Querempfindlichkeiten charakterisiert werden, um geeignete Sensoren zur optischen Multi-Distanzmessung von Verzahnungen zu identifizieren.

Kapitel 2 stellt die methodischen Grundlagen für den modellbasierten Multi-Distanz-Ansatz zur Messung der Verzahnungsgeometrie dar. Der Formparameter Grundkreisradius wird eingeführt und dessen Zusammenhang mit der klassischen Abweichungskenngröße Profil-Winkelabweichung erläutert. Anschließend folgt die Veranschaulichung des geometrischen Modells von Evolventenverzahnungen und das daraus resultierende zu lösende

inverse Problem, um den Grundkreisradius zu bestimmen. Abschließend werden drei verschiedene Messstrategien des Multi-Distanz-Messansatzes zur Lösung des inversen Problems sowie eine entsprechende Messdatentransformation beziehungsweise Signalauswertung vorgestellt.

Theoretische Betrachtungen kombiniert mit Monte-Carlo-Simulationen verifizieren in Kapitel 3 den modellbasierten Auswerteanatz zur Lösung des inversen Problems und anschließend den Multi-Distanz-Messansatz zur optischen Messung der Verzahnungsgeometrie. In einer anschließenden Messunsicherheitsabschätzung werden die Messbarkeitsgrenzen in Abhängigkeit von der kalibrierten Sensoranordnung, Sensoranzahl beziehungsweise Messpunkteanzahl und Sensorunsicherheit quantifiziert. Darauf basierend wird die Skalierbarkeit des Messansatzes charakterisiert und der theoretisch erreichbare dynamische Bereich bestimmt.

In Kapitel 4 wird die Eignung kommerziell erhältlicher optischer Sensoren für die Verzahnungsmessung mit dem Multi-Distanz-Messansatz charakterisiert und hinsichtlich der Messunsicherheitsabschätzung aus Kapitel 3 bewertet. Es wird geklärt, inwieweit die Sensorspezifikationen für ebene definierte Oberflächen, auch an metallisch glänzenden, gekrümmten Zahnflanken gelten. Insbesondere wird hierbei die Hypothese verfolgt, dass die aus der Zahnflankenkrümmung resultierende Neigung zwischen der Zahnflankennormalen und der Sensorachse, die Oberflächenrauheit und Mehrfachreflexionen die erreichbare Unsicherheit bei der Zahnflankenformmessung maßgeblich beeinflussen. Folglich wird die an Zahnflanken erreichbare Sensorunsicherheit hinsichtlich dieser Querempfindlichkeiten quantifiziert.

Kapitel 5 widmet sich der Validierung des modellbasierten skalierbaren Multi-Distanz-Messansatzes zur Messung der Verzahnungsgeometrie. Hierzu werden Referenzmessungen mit einem taktilen Groß-Koordinatenmessgerät vorgestellt, welche die Eignung des skalierbaren Multi-Distanz-Ansatz für Verzahnungsmessungen bestätigen sollen. Daraufhin werden Messergebnisse optischer Multi-Distanzmessungen an einer kleinen Verzahnung präsentiert, um den modellbasierten Messansatz grundsätzlich zu validieren. Die erreichbare Messunsicherheit wird angesichts der theoretischen Messunsicherheitsabschätzung und den taktilen Referenzmessungen diskutiert und bewertet. Weitere optische Multi-Distanzmessungen an einer Großverzahnung sollen die Skalierbarkeit des Messansatzes und die angestrebte Messunsicherheit validieren. Auf Basis der erzielten Messunsicherheit wird der maximal erreichbare dynamische Bereich bestimmt, um den Messansatz gegenüber dem aktuellen Stand der Technik einzuordnen.

Abschließend werden die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit in Kapitel 6 zusammengefasst und ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben.

2 Grundlagen der Multi-Distanzmessung

Dieses Kapitel erläutert die Grundlagen zur Multi-Distanzmessung der Geometrie von nicht modifizierten geradverzahnten Evolventenverzahnungen. In Abschnitt 2.1 erfolgt die Beschreibung des Formparameters Grundkreisradius, der formgebend für die Profilgeometrie der Zahnflanken ist. Der Grundkreisradius wird in dieser Arbeit als grundlegender Formparameter einer Evolventenverzahnung zur Validierung des Multi-Distanz-Messansatzes herangezogen und dient als Kriterium für die Bewertung der Qualität der Istgeometrie der Verzahnungen. Abschnitt 2.2 stellt daraufhin ein auf Evolventenverzahnungen basierendes Geometriemodell zur Berechnung des Grundkreisradius vor. Die Berechnung des Grundkreisradius ist dabei mit einem inversen Problem verknüpft, dessen Lösung Abschnitt 2.3 beschreibt. Anschließend präsentiert Abschnitt 2.4 drei Messstrategien des Multi-Distanz-Messansatzes zur Erfassung der Profilgeometrie der Zahnflanken. Die während der Multi-Distanzmessung erfassten Abstandsinformationen müssen zudem für die modellbasierte Auswertung des Grundkreisradius in Messkoordinaten transformiert werden. Diese Messdatentransformation wird ebenfalls in Abschnitt 2.4 erörtert.

2.1 Formparameter Grundkreisradius

Zur Validierung des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes charakterisiert diese Arbeit die Istgeometrie von Evolventenverzahnungen anhand des Grundkreisradius. Der Grundkreisradius ist der formgebende Parameter für die Profilgeometrie der Zahnflanken bei der Konstruktion von Evolventenverzahnungen. Durch das Abrollen eines straff gespannten Fadens auf einem Grundkreis entsteht eine Bahnkurve, die die Form einer Evolvente beschreibt. Die mathematische Evolvente stellt dabei den Verlauf der Profilgeometrie der Zahnflanken von Evolventenverzahnungen dar (vgl. Bild 2.1). Die Krümmung der Evolvente ist von dem Radius r_b des Grundkreises abhängig und nimmt mit fortlaufendem Abwickeln des Fadens stetig ab.

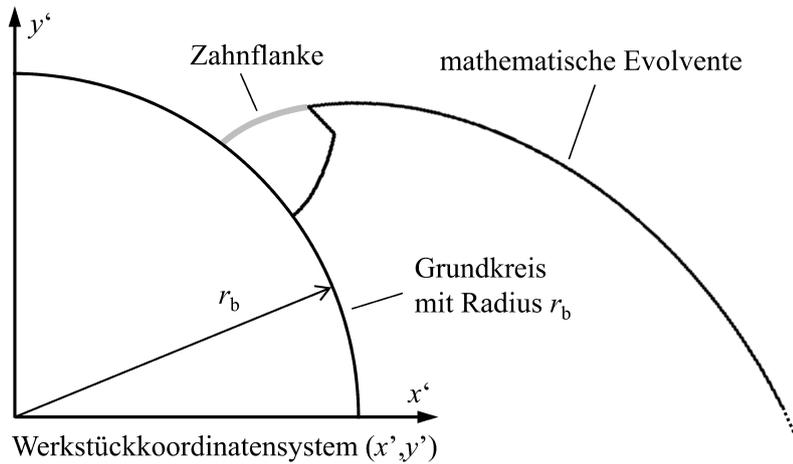


Bild 2.1: Prinzipische Skizze zur Erzeugung einer Zahnflanke aus einer mathematischen Evolvente auf Basis eines Grundkreises mit dem Radius r_b im Werkstückkoordinatensystem (x', y'). Die Krümmung der Evolvente hängt vom Radius des Grundkreises ab. Die tatsächliche Zahnflanke (grau) stellt nur einen kleinen Teil der theoretischen mathematischen Evolvente dar.

Üblicherweise wird bei einer Standard-Verzahnungsmessung beispielsweise die Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$ zur Bewertung der tatsächlichen Zahnflankengeometrie erfasst und nicht der Grundkreisradius. Die Profil-Winkelabweichung ist definiert als die Abweichung zwischen der tatsächlichen Winkellage und der Sollwinkellage einer einzelnen Zahnflanke und wird in μm angegeben [Lin2016]. Bei Evolventenverzahnungen lassen sich die Profil-Winkelabweichung und der tatsächliche Grundkreisradius ineinander umrechnen. Der tatsächliche Grundkreisradius einer Verzahnung berechnet sich gemäß der Beziehung

$$r_b = r_{b,n} \cdot \frac{\bar{f}_{H\alpha}}{L_\alpha} + r_{b,n} \quad (2.1)$$

aus dem Nenngrundkreisradius $r_{b,n}$, der mittleren Profil-Winkelabweichung $\bar{f}_{H\alpha}$ über alle Zähne und einem zuvor definierten Auswertebereich mit der Wälzweglänge L_α . Der Grundkreisradius r_b ist somit ein Mittelwert über alle Zähne, ein mittlerer Grundkreisradius. Zur Berechnung des zahnindividuellen Grundkreisradius ist anstelle der mittleren Profil-Winkelabweichung die zahnindividuelle Profil-Winkelabweichung einzusetzen. Durch Anwendung von Gleichung (2.1) und nach DIN ISO 1328-1 [DIN2018a] können die Grundkreisradiustoleranzen für die verschiedenen Verzahnungsqualitäten bestimmt werden. Auch lassen sich durch Anwendung von Gleichung (2.1) und der Durchführung von klassischen taktilen Referenzmessungen der Profil-Winkelabweichung darüber hinaus Referenzwerte für den Grundkreisradius zur Validierung der Multi-Distanzmessungen ermitteln.

2.2 Geometriemodell zur Berechnung des Grundkreisradius

Die Geometrie einer Evolventenverzahnung kann in Abhängigkeit von dem Grundkreisradius r_b mit einem geometrischen Modell nach [Gün2001, Goc2003, Stö2011] beschrieben

werden. Bild 2.2 zeigt die Geometrie einer Evolventenverzahnung in einer Ebene und veranschaulicht den Zusammenhang mit dem Grundkreisradius.

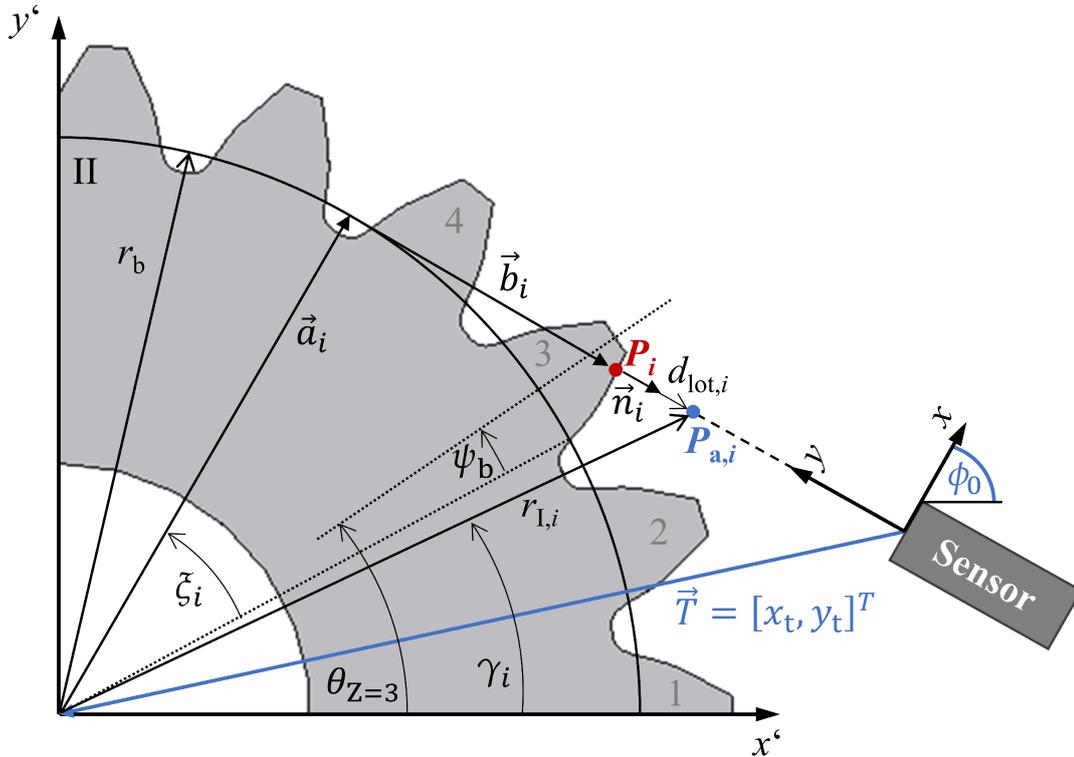


Bild 2.2: Geometriemodell zur Berechnung des Grundkreisradius r_b einer nicht modifizierten Evolventenverzahnung mit Werkstückkoordinatensystem (x', y') in einem Messkoordinatensystem (x, y) , ausgehend von einem Messpunkt $P_{a,i}$, dem Fußpunkt P_i der Nenngeometrie für den lotrechten Abstand $d_{lot,i}$ und den Lageparametern $(\xi_i, \theta_Z, \psi_b, x_t, y_t, \phi_0)$. Der lotrechte Abstand des Messpunktes zur Nenngeometrie des Zahnrads ist zur Veranschaulichung vergrößert dargestellt. Das Bild ist verändert nach [Pil2021].

Zur Beschreibung der Geometrie einer evolventischen Zahnflanke werden neben dem Grundkreisradius r_b die Lageparameter Wälzwinkel ξ_i , Winkel θ_Z zur Mittelachse des Zahnes Z und der Zahndickenhalbwinkel ψ_b benötigt. In dem Werkstückkoordinatensystem (x', y') ergibt sich ein Punkt P'_i mit $i = 1$ auf einer idealen evolventischen Zahnflanke des Zahns Z

$$P'_i = \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = \vec{a}_i + \vec{b}_i = r_b \cdot \begin{bmatrix} \cos(\xi_i + \theta_Z - \psi_b) \\ \sin(\xi_i + \theta_Z - \psi_b) \end{bmatrix} + r_b \cdot \xi_i \cdot \begin{bmatrix} \sin(\xi_i + \theta_Z - \psi_b) \\ -\cos(\xi_i + \theta_Z - \psi_b) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

aus der Addition des Radialvektors \vec{a}_i und des Tangentialvektors \vec{b}_i [Gün2001, Goc2003]. Der Vektor \vec{a}_i hat die Länge des Grundkreisradius r_b des Zahnrads. Der Winkel von \vec{a}_i setzt sich aus dem Wälzwinkel ξ_i zum Punkt P'_i , dem Winkel θ_Z und dem Zahndickenhalbwinkel ψ_b zusammen. Der tangentielle Vektor \vec{b}_i besitzt die Länge $r_b \cdot \xi_i$ und steht senkrecht zu Vektor \vec{a}_i .

Die Zahnflankengeometrie wird jedoch in einem Mess- beziehungsweise Sensorkoordinatensystem (x, y) erfasst. Gleichung (2.2) muss daher um einen Translationsvektor

$\vec{T} = [x_t, y_t]^T$ sowie einem Drehwinkel ϕ_0 zum Werkstückkoordinatensystem ergänzt werden

$$P_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = r_b \cdot \begin{bmatrix} \cos(\zeta_i + \theta_Z - \psi_b + \phi_0) \\ \sin(\zeta_i + \theta_Z - \psi_b + \phi_0) \end{bmatrix} + r_b \cdot \zeta_i \cdot \begin{bmatrix} \sin(\zeta_i + \theta_Z - \psi_b + \phi_0) \\ -\cos(\zeta_i + \theta_Z - \psi_b + \phi_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Zur Berechnung des Grundkreisradius muss Gleichung (2.3) nach r_b umgestellt und das inverse Problem

$$r_b = f(P_i, \zeta_i, \theta_Z, \psi_b, x_t, y_t, \phi_0) \quad (2.4)$$

gelöst werden. Neben dem gesuchten Grundkreisradius r_b sind der zum Punkt P_i zugeordnete Wälzwinkel ζ_i und die Transformationsparameter (x_t, y_t, ϕ_0) unbekannt. Insgesamt sind damit fünf Parameter nicht bekannt und das Gleichungssystem ist mit nur einem Punkt $P_i = (x_i, y_i)$ unterbestimmt.

2.3 Lösung des inversen Problems

Zur Lösung des inversen Problems beziehungsweise zur Berechnung des Grundkreisradius nach Gleichung (2.4) sind weitere Punkte P_i mit $i = 1 \dots N_{\text{ges}}$

$$P_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = r_b \cdot \begin{bmatrix} \cos(\zeta_i + \theta_Z - \psi_b + \phi_0) \\ \sin(\zeta_i + \theta_Z - \psi_b + \phi_0) \end{bmatrix} + r_b \cdot \zeta_i \cdot \begin{bmatrix} \sin(\zeta_i + \theta_Z - \psi_b + \phi_0) \\ -\cos(\zeta_i + \theta_Z - \psi_b + \phi_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix}, i = 1 \dots N_{\text{ges}} \quad (2.5)$$

auf der Zahnflanke erforderlich, um ein Gleichungssystem mit der selben Anzahl an Gleichungen und unbekanntem Parametern zu erhalten. Mit jedem weiteren Punkt P_i kommt ein weiterer unbekannter Parameter ζ_i zum Gleichungssystem hinzu, sodass $4 + i$ unbekannte Parameter vorliegen. Um das inverse Problem zu lösen, sind mindestens vier Punkte ($i = 1 \dots 4$) mit 8 Koordinaten erforderlich, um ein Gleichungssystem mit der gleichen Anzahl an Gleichungen und Unbekannten zu erhalten.

Typischerweise weicht die tatsächlich gemessene Zahnflankengeometrie von der idealen evolventischen Geometrie ab. Ein Messpunkt

$$P_{a,i} = \begin{bmatrix} x_{a,i} \\ y_{a,i} \end{bmatrix} = P_i + \frac{d_{\text{lot},i}}{|\vec{n}_i|} \cdot \vec{n}_i \quad (2.6)$$

ergibt sich aus der Addition eines Punkts P_i einer idealen Evolvente und einem Lotabstand $d_{\text{lot},i}$, der in Normalenrichtung

$$\vec{n}_i = \begin{bmatrix} \sin(\zeta_i + \theta_Z - \psi_b + \phi_0) \\ -\cos(\zeta_i + \theta_Z - \psi_b + \phi_0) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

zur idealen Evolvente orientiert ist (vgl. Bild 2.2). Der Lotabstand ist dabei ein Maß für die Abweichung der Messdaten zur idealen Evolvente. Die Berechnung des Grundkreisradius erfolgt daraufhin iterativ mittels der Methode der kleinsten Quadrate. Durch die Minimierung der Summe der quadrierten Lotabstände zwischen den Messdaten und der idealen Zahnflankengeometrie

$$\min_{r_b, \xi_i, \phi_0, x_t, y_t} \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{ges}}} d_{\text{lot},i}^2 \right) \quad (2.8)$$

wird eine ideale Evolvente in die Messdaten approximiert. Die ideale Evolvente wird dabei in Abhängigkeit von dem gesuchten Grundkreisradius r_b sowie von den unbekanntem Parametern $(\xi_i, x_t, y_t, \phi_0)$ berechnet. Nach [Gün2001, Stö2012] werden die Lotabstände zwischen Messdaten und idealer Evolvente durch

$$d_{\text{lot},i} = r_b \cdot \left(\sqrt{\frac{r_{L,i}^2}{r_b^2} - 1} - \text{fladir} \cdot \left(\gamma_i - \theta_Z + \psi_b + \arctan \left(\text{fladir} \cdot \sqrt{\frac{r_{L,i}^2}{r_b^2} - 1} \right) \right) \right) \quad (2.9)$$

bestimmt. Der Parameter fladir definiert dabei einen Faktor für die auszuwertende Zahnflankenseite (linke Seite:-1, rechte Seite:1). Der Ausdruck

$$\xi_i = \sqrt{\frac{r_{L,i}^2}{r_b^2} - 1} \quad (2.10)$$

berechnet die entsprechenden Wälzwinkel ξ_i der Fußpunkte der Lotabstände auf der idealen Evolvente implizit durch die Parameter r_b und $r_{L,i}$. Der Parameter

$$r_{L,i} = \sqrt{(x_{a,i} - x_t)^2 + (y_{a,i} - y_t)^2} \quad (2.11)$$

beschreibt dabei den Polarradius des Messpunktes $P_{a,i}$ im Werkstückkoordinatensystem und

$$\gamma_i = \arctan \left(\frac{y_{a,i} - y_t}{x_{a,i} - x_t} \right) \quad (2.12)$$

den dazugehörigen Polarwinkel.

Zusammengefasst berechnet Gleichung (2.8) modellbasiert den tatsächlichen Grundkreisradius aus den gemessenen Zahnflanken. Im Vergleich zur klassischen Verzahnungsprüfung wird die Istgeometrie der Evolventenverzahnung somit direkt auf Basis der Messdaten der erfassten Zahnflanken am Beispiel des Grundkreisradius bewertet. Das vorherige Einmessen des Werkstückkoordinatensystems auf Basis des Zahnradsitzes als Bezugskordinatensystem und der Vergleich der Messdaten mit der Nenngeometrie des Zahnrads sind im hier vorgestellten modellbasierten Ansatz zunächst nicht enthalten. Die Geometrie der Zähne ist jedoch gemäß DIN ISO 1328-1 mit Bezug auf die Bezugsachse des Zahnradsitzes definiert. Der realisierte modellbasierte Ansatz erlaubt daher noch keine funktionsorientier-

te Auswertung, da das berechnete Werkstückkoordinatensystem nicht zwangsweise der Lage und Ausrichtung der Bezugsachse des Zahnradsitzes entspricht. Der modellbasierte Ansatz ermittelt somit zunächst nicht die spezifizierte Geometrie der Zähne, sondern eine Geometrie mit einer aus der Verzahnung abgeleiteten Bezugsachse.

Die Grundkreisradiusapproximation ist ein komplexes nichtlineares Minimierungsproblem mit mehrdimensionalem Lösungsraum, da die gemessenen Zahnflanken nur einen Teil der mathematischen Evolvente abbilden (vgl. Bild 2.1). Grundsätzlich beeinflusst eine unvollständige beziehungsweise Erfassung eines Geometrieelements die Unsicherheit bei der Approximation von Geometrieparametern, wie Hernla et al. am Beispiel einer Kreisapproximation belegen [Her1992]. Bei der modellbasierten Auswertung des Grundkreisradius ist zu unterscheiden, ob ein mittlerer Grundkreisradius r_b auf Basis einer mittleren idealen Evolvente über alle Zahnflanken oder ein zahnindividueller Grundkreisradius $r_{b,Z}$ auf Basis einer zahnindividuellen idealen Evolvente gesucht ist. Im Vergleich zur Approximation des mittleren Grundkreisradius, wo die Messpunkte gleichmäßig um den Mittelpunkt des Zahnrads verteilt sind, erhöht die ungleichmäßige, insbesondere lokale Verteilung der Messpunkte einer einzelnen Zahnflanke bei der zahnindividuellen Approximation die Wahrscheinlichkeit, das globale Minimum nicht zu finden. Dies hat zur Folge, dass die approximierten zahnindividuellen Grundkreisradien mit systematischen Abweichungen behaftet sind. Zur Reduzierung der systematischen Abweichungen bei der zahnindividuellen Grundkreisradiusberechnung wird daher eine zweistufige Approximation verwendet, wobei der mehrdimensionale Lösungsraum schrittweise gelöst wird. In der ersten Approximationsstufe werden die unbekannt Parameter $(r_b, \xi_i, x_t, y_t, \phi_0)$ über alle gemessenen Zähne gemäß Gleichung (2.8) bestimmt. Anschließend erfolgt in der zweiten Approximationsstufe ebenfalls nach Gleichung (2.8) die Berechnung der zahnindividuellen Grundkreisradien, wobei die zuvor berechneten Parameter (x_t, y_t, ϕ_0) gesperrt sind. Durch diese Limitierung der freien Parameter in der zweiten Stufe, können die systematischen Abweichungen bei der Approximation zahnindividueller Grundkreisradien reduziert werden. Zusammengefasst präsentiert dieser Abschnitt einen Lösungsansatz, mit dem der tatsächliche Grundkreisradius über alle Zähne und individueller Zähne nach Gleichung (2.8) modellbasiert aus den gemessenen Zahnflanken bestimmt werden kann.

2.4 Multi-Distanz-Messansatz zur Lösung des inversen Problems

Eine umfangreiche Erfassung der Geometrie aller Zähne mit vielen Messpunkten ($N_{\text{ges}} \geq 4$) ist für die modellbasierte Auswertung des Formparameters Grundkreisradius erforderlich. Dieser Abschnitt stellt drei Messstrategien eines Multi-Distanz-Messansatzes zur optischen Messung der Profilgeometrie der Zahnflanken vor. In Unterabschnitt 2.4.1 wird ein multisensorischer Messansatz präsentiert, wobei eine Vielzahl optischer Sensoren punktweise die Zahnflankengeometrie eines statisch gelagerten Zahnrads messen. Unterabschnitt 2.4.2 veranschaulicht daraufhin einen lateral-scannenden Messansatz, bei dem dynamisch gela-

gerte optische Sensoren jeweils die Profilgeometrie einzelner Zahnflanken lateral scannen. Im Anschluss beschreibt der Unterabschnitt 2.4.3 einen weiteren dynamischen rotatorisch-scannenden Messansatz, bei dem das Zahnrad rotiert und mindestens ein fest positionierter, ausgerichteter optischer Sensor die Profilgeometrie aller Zahnflanken kontinuierlich erfasst. Anschließend folgt in Unterabschnitt 2.4.4 am Beispiel des rotatorisch-scannenden Messansatzes die Messdatentransformation und Signalauswertung zur Lösung des inversen Problems.

2.4.1 Statischer multisensorischer Messansatz

Eine Prinzipskizze des multisensorischen Ansatzes zur Multi-Distanz-Messung der Zahnflankengeometrie zeigt Bild 2.3. Eine Vielzahl n optischer Abstandssensoren wird zur Durchführung statischer Verzahnungsmessungen verwendet, wobei weder das Zahnrad noch die Sensoren während der Messung mittels Positionseinheiten bewegt werden. Um die Geometrie der Verzahnung aller Zahnflanken beziehungsweise auf Basis aller Zahnflanken zu bewerten, ist pro Zahn mindestens ein optischer Sensor erforderlich. Ist die Sensoranzahl kleiner als die Zähnezahl, bedarf es mehrerer Messungen zur Erfassung der Geometrie aller Zähne. Damit das inverse Problem anschließend gemäß Gleichung (2.4) lösbar ist, müssen mindestens $n = 4$ optische Sensoren gleichzeitig eingesetzt werden.

Die einzelnen Sensoren sind über den Umfang der Verzahnung verteilt und in einer Ebene auf die Zahnflankenoberflächen ausgerichtet. Die Ausrichtung der Sensoren kann je nach zu messender Zahnflankenseite, zu messendem Zahnflankenbereich und auszuwertenden Formparameter variabel eingestellt werden. Bei Evolventenverzahnungen ist eine Messung senkrecht zur Zahnoberfläche möglich, wenn die Sensoren hinter der Zahnflanke tangential zum Nenngrundkreis des Zahnrades angeordnet sind. Bei der senkrechten Sensorausrichtung muss allerdings die eingeschränkte Zugänglichkeit durch benachbarte Zähne berücksichtigt werden. Um die gesamte Zahnflanke optisch zu erfassen, müssen einige Sensoren daher in Richtung der Zahnradmitte gedreht werden. Zur Lösung des inversen Problems ist bei der Sensorausrichtung darauf zu achten, dass die Sensoren unterschiedliche Punkte auf den Zahnflanken messen, um Singularitäten in der modellbasierten Auswertung zu vermeiden. Durch eine flexible Positionierung der Sensoren ist das Messvolumen zusätzlich entsprechend der Größe des Messobjekts skalierbar.

Jeder Sensor misst im jeweiligen Sensorkoordinatensystem einen Abstand d_i zur Oberfläche einer Zahnflanke. Die sensorspezifischen gemessenen Abstände müssen anschließend in Koordinaten eines allgemeinen Messkoordinatensystems (x, y) umgerechnet werden. Hierzu werden die exakten Positionen und Ausrichtungen der optischen Sensoren benötigt, die jedoch nicht bekannt sind. Daher müssen die Sensoren hinsichtlich der Sensorpositionen und -ausrichtungen in einem gemeinsamen Messkoordinatensystem justiert beziehungsweise kalibriert werden. Eine geeignete Strategie zur Kalibrierung der Messanordnung mit mehreren Sensoren ist allerdings nicht Gegenstand dieser Arbeit und muss zukünftig untersucht werden. Anschließend kann gemäß Abschnitt 2.3 der Grundkreisradius über alle Zähne oder zahnindividuell berechnet werden.

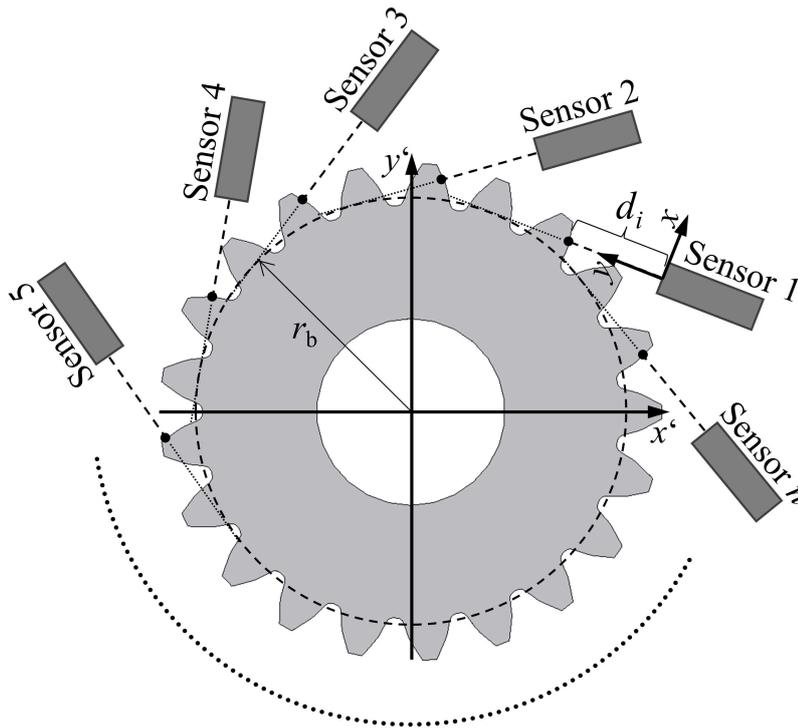


Bild 2.3: Statischer Multi-Sensor-Messansatz bestehend aus $n \geq 4$ optischen Sensoren in einem gemeinsamen Messkoordinatensystem (x, y) zur Multi-Distanzmessung der Profilgeometrie eines nicht modifizierten Zahnrades mit Werkstückkoordinatensystem (x', y') . Die Sensoren sind über den Umfang der Verzahnung in einer Ebene verteilt und auf die Zahnflanken ausgerichtet. Jeder Sensor misst dabei den Abstand d_i zur Oberfläche, hier am Beispiel eines Sensors veranschaulicht. Die Sensoranordnung kann der Größe der Verzahnung angepasst werden und ermöglicht ein flexibel skalierbares Messvolumen. Auf Basis der gemessenen Profilgeometrie kann anschließend das inverse Problem gemäß Gleichung (2.4) zur Berechnung des Grundkreisradius r_b modellbasiert gelöst werden. Das Bild ist verändert nach [Pil2020].

Der statische multisensorische Messansatz zeichnet sich vor allem durch die Flexibilität in der Messanordnung aus. Eine senkrechte Sensorausrichtung auf die Zahnflankenoberfläche bietet die Möglichkeit, Sensoren mit niedrigen Akzeptanzwinkel $< 5^\circ$ einzusetzen. Konventionelle taktile Verzahnungsmesssysteme benötigen zur rückführbaren Sensorpositionierung steife Konstruktionen und mechanisch fest miteinander verbundene Linearachsen. Aufgrund des flexiblen multisensorischen Messkonzepts ist dies bei dem statischen multisensorischen Messansatz nicht erforderlich. Daher eignet sich der statische Multisensor-Messansatz insbesondere für den mobilen Einsatz für skalierbare Verzahnungsmessungen und bewirkt einen Paradigmenwechsel in der Verzahnungsmesstechnik. Anstelle das Messobjekt zum Messsystem zu transportieren, kann das Messsystem zum Messobjekt befördert und der logistische Aufwand einer Messung reduziert werden. Dieser Paradigmenwechsel ist speziell für die Messung großer, schwerer Messobjekte interessant, wie zum Beispiel Großverzahnungen. Die Verwendung mehrerer optischer Abstandssensoren ermöglicht zudem eine parallele Datenerfassung, was zu kurzen Messzeiten < 1 min führt.

Bei einer senkrechten Ausrichtung der Sensoren auf die Zahnflankenoberfläche ist der Zahnfuß der Zahnflanke durch benachbarte Zähne optisch nicht zugänglich. Um die gesam-

te Profilgeometrie der Zahnflanke zu erfassen, sind bei Großverzahnungen Sensoren mit Akzeptanzwinkeln von circa 30° erforderlich. Außerdem erfordert der statische Multisensor-Messansatz zur Messung von Großverzahnungen Sensoren mit Messbereichen ≥ 30 mm. Darüber hinaus ist der statische multisensorische Messansatz primär zur Erfassung mittlerer Formparameter ausgelegt. Die Auswertung zahnindividueller Formparameter erfordert eine hohe Anzahl an Sensoren von mindestens der Anzahl der Zähne z multipliziert mit zwei (vgl. Abschnitt 2.3), da jeder Sensor nur einen Punkt auf der Zahnflanke misst. Wird zudem eine hohe Messpunktdichte zur Charakterisierung des Grundkreisradius gefordert, muss die Sensoranzahl erheblich gesteigert werden. Der Einsatz vieler Sensoren ist allerdings mit einem hohen logistischen Aufwand bezüglich der Anordnung und Justierung verbunden. Aussagen über die zahnindividuelle Geometrie aller Zahnflanken sind daher eingeschränkt möglich und bedürfen daher alternativ eine teilungsbezogene zahnindividuelle Sensoranordnung, wodurch wiederum die Messzeit ansteigt.

2.4.2 Dynamischer lateral-scannender Messansatz

Alternativ ist es möglich, die zur Erfassung der zahnindividuellen Formparameter erforderliche Sensoranzahl zu reduzieren, indem die optischen Sensoren eine zusätzliche Scanbewegung ausführen. Mit der scannenden Messstrategie steigt gleichzeitig die Messpunktdichte auf der Zahnflanke an. Im Folgenden wird ein Messansatz vorgestellt, der eine dynamisch lateral-scannende Messstrategie verfolgt.

n optische Abstandssensoren werden zur Messung des Zahnflankenprofils mit einem Lineartisch kombiniert, um die Sensoren lateral zu den jeweiligen Zahnflanken zu verfahren und dabei die Profilgeometrie zu erfassen. Die optischen Sensoren werden rechtwinklig zur Verfahrachse der Lineareinheit angeordnet. Durch die zusätzliche scannende Bewegung der Sensoren kann die gesamte Profilgeometrie eines Zahns mit nur einem Sensor gemessen werden. Um die Geometrie aller Zahnflanken zu erfassen, ist pro Zahn ein Sensor einzusetzen. Ist die Zähnezahl größer als die Sensoranzahl, müssen teilungsbezogene Mehrfachmessungen durchgeführt werden. Der dynamische lateral-scannende Messansatz ist in Bild 2.4 am Beispiel eines Zahnrad mit dem Werkstückkoordinatensystem (x', y') und einem Sensor mit dem Messkoordinatensystem (x, y) in Kombination mit einem Lineartisch mit der Verfahrachse g veranschaulicht.

Die optischen Abstandssensoren sind in einer Ebene der Verzahnung angeordnet und entsprechend des zu messenden Zahnflankenbereichs ausgerichtet. Wie auch beim statischen Multisensor-Messansatz müssen die Sensoren zur Erfassung des gesamten Zahnflankenprofils in Richtung Zahnradmitte gedreht werden. Aufgrund des lateral-scannenden Messansatzes und der Evolventengeometrie der Zahnflanken entsteht unabhängig von der Sensorausrichtung zwischen der Zahnflankennormalen und der Sensorachse ein sich ständig ändernder Neigungswinkel. Durch eine flexible Positionierung der Sensoren, kann auch bei diesem Ansatz das Messvolumen entsprechend der Größe der Verzahnung skaliert werden.

Die Sensoren messen im jeweiligen Sensorkoordinatensystem während der lateralen Scanbewegung kontinuierlich die Abstände d_i zu den Zahnflanken, wodurch hohe Mess-

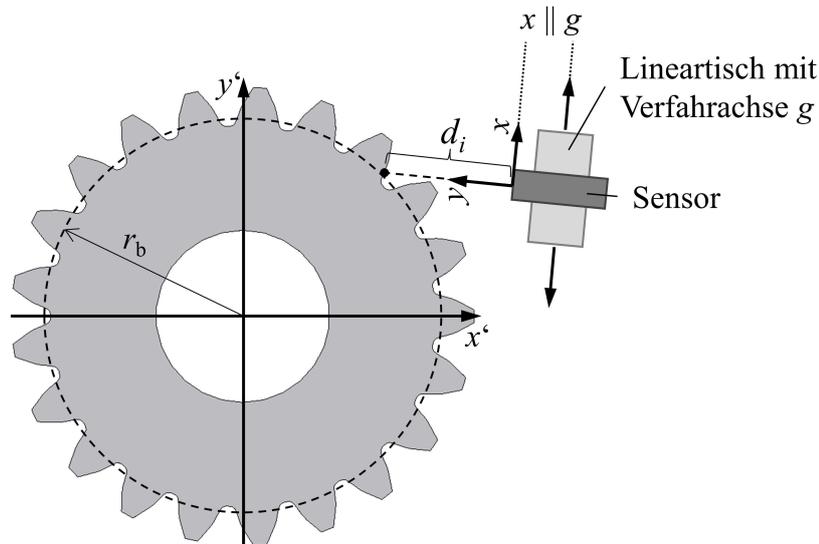


Bild 2.4: Darstellung des dynamischen lateral-scannenden Messansatzes zur Multi-Distanzmessung der Zahnflankengeometrie eines nicht modifizierten Zahnrades mit Werkstückkoordinatensystem (x', y') am Beispiel eines optischen Sensors mit Messkoordinatensystem (x, y) , der mit einem Lineartisch zur lateral-scannenden Bewegung entlang der Verfahrachse g kombiniert ist. Während des lateralen Scans werden kontinuierlich die Abstände d_i zur Zahnflanke erfasst. Die Anordnung der Sensoren des lateral-scannenden Messansatzes kann der Zahnradgröße angepasst werden und ermöglicht ein flexibel skalierbares Messvolumen. Auf der Grundlage der gemessenen Profilgeometrie kann dann das inverse Problem nach Gleichung (2.4) modellbasiert gelöst werden, um den Grundkreisradius r_b zu berechnen. Das Bild ist verändert nach [Pil2021].

punktedichten möglich sind. Damit anschließend aus den Messdaten der gesuchte Grundkreisradius ausgewertet werden kann, müssen die einzelnen Sensoren in ein gemeinsames Messkoordinatensystem (x, y) überführt und die erfassten Messdaten in Koordinaten $P_{a,i} = (x_{a,i}, y_{a,i})$ umgerechnet werden. Hierzu bedarf es einer entsprechenden Justierung und Kalibrierung der Messanordnung, welche zukünftig noch erarbeitet werden muss. Wird jedoch nur ein Sensor verwendet, dann gilt $P_{a,i} = (x_{a,i}, y_{a,i} = d_i)$, da Sensor- und Messkoordinatensystem gleich sind.

Vorteil des dynamischen lateral-scannenden Messansatzes ist der kleine erforderliche Messbereich, um die Profilgeometrie der Zahnflanken verschieden großer Verzahnungen zu erfassen. Zur Messung der gesamten Zahnflanke einer Großverzahnung ist ein Messbereich $< 10\text{mm}$ ausreichend. Ein kleinerer Messbereich wirkt sich zudem positiv auf die Messunsicherheit der Sensoren aus, denn üblicherweise steigt die Messunsicherheit mit größer werdendem Messbereich. Gepaart mit der Skalierbarkeit des Messansatzes durch die flexible Positionierung der Sensoren, ist ein hoher dynamischer Bereich zu erwarten. Aufgrund der scannenden Bewegung der Sensoren ermöglicht der lateral-scannende Messansatz die Bewertung zahnindividueller Zahnflanken auf Basis einer hohen Messpunktedichte. Die hohe Messpunktedichte reduziert zudem den Einfluss zufälliger Messabweichungen, indem die auszuwertenden Formparameter über viele Messpunkte gemittelt werden. Im Vergleich zum statischen multisensorischen Messansatz werden ein Sensor und nicht mindestens zwei Sensoren pro Zahn zur Erfassung zahnindividueller Formparameter benötigt, wenn alle Zahnflanken gleichzeitig gemessen werden sollen. Eine parallele Datenerfassung

steigert zudem die Messgeschwindigkeit gegenüber konventioneller taktiler Messsysteme erheblich.

Ein Nachteil des dynamischen lateral-scannenden Messansatzes ist die Abhängigkeit der Anzahl der Sensoren von der Verzahnungsgeometrie der zu messenden Verzahnung. Insbesondere bei großen Verzahnungen mit vielen Zähnen ist weiterhin eine hohe Sensoranzahl erforderlich, um die Profilgeometrie aller Zahnflanken innerhalb eines Messdurchlaufs zu erfassen. Alternativ sind Mehrfachmessungen notwendig, wobei das Zahnrad jeweils um die Teilung rotiert werden muss. Die Messzeit würde sich bei einer teilungsbezogenen Messstrategie jedoch deutlich verlängern. Durch den notwendigen Einsatz von Lineartischen ist der lateral-scannende Messansatz zudem im Vergleich zum multisensorischen Ansatz nur eingeschränkt mobil einsetzbar. Ebenfalls ist ein weiterer Beitrag zur Messunsicherheit durch die Scanbewegung zu beachten. Auch ist zu berücksichtigen, dass unabhängig von der Sensoranordnung immer ein Neigungswinkel zwischen der Zahnflankennormalen und der Sensorachse auftritt. Die einzusetzenden Sensoren müssen daher einen großen Akzeptanzwinkel $\approx 30^\circ$ aufweisen.

2.4.3 Dynamischer rotatorisch-scannender Messansatz

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Sensoranzahl und zur Steigerung der Messpunktedichte bei der Multi-Distanzmessung von Verzahnungen stellt die rotatorisch-scannende Messstrategie dar. Anstelle die optischen Sensoren entlang der Zahnflanken für eine scannende Messung zu bewegen, wird das Messobjekt rotiert. Bild 2.5 zeigt den Ansatz zur rotatorisch-scannenden Messung der Profilgeometrie der Zahnflanken. $n \geq 1$ optischen Abstandssensoren sind zur scannenden Datenerfassung zusätzlich mit einem Drehtisch kombiniert, auf dem das zu messende Zahnrad konzentrisch montiert ist. Durch die kontinuierliche Rotation des Messobjekts wird nur ein Sensor benötigt, um die Profilgeometrie aller Zahnflanken innerhalb eines Messlaufs zu erfassen.

Auch hier sind die Sensoren über den Umfang des Zahnrades in einer Ebene verteilt und in Richtung Zahnflankenoberfläche orientiert. Ebenfalls ist die Ausrichtung und Positionierung der Sensoren variabel an die zu messende Flankenseite, den zu erfassenden Zahnflankenbereich und die auszuwertenden Formparameter anpassbar. Die flexible Sensorpositionierung ermöglicht ein skalierbares Messvolumen. Zusammen bilden die Sensoren und der Drehtisch im Drehzentrum ein gemeinsames Messkoordinatensystem (x, y) .

Während die Verzahnung mit dem Werkstückkoordinatensystem (x', y') rotiert, erfassen die optischen Abstandssensoren im jeweiligen Sensorkoordinatensystem kontinuierlich die Profilgeometrie der Zahnflanken in Form von Abständen d_i in Abhängigkeit vom Drehwinkel α_i . Diese scannende Datenerfassung resultiert in einem überbestimmten Gleichungssystem und ermöglicht sowohl die Bestimmung des mittleren als auch zahnindividuellen Grundkreisradius. Damit anschließend die gesuchten Formparameter ausgewertet werden können, müssen die gemessenen Abstände zuvor in Koordinaten des allgemeinen Messkoordinatensystems (x, y) umgerechnet werden. Diese Messdatentransformation erfordert die Kenntnisse der genauen Sensorposition und -orientierung sowie der Drehtischabwei-

chungen. Die exakte Sensorposition und -ausrichtung sind allerdings unbekannt, weshalb das Messsystem vorher entsprechend justiert und kalibriert werden muss. Einen ersten Ansatz zur Kalibrierung der Messanordnung des dynamischen rotatorisch-scannenden Messansatzes veranschaulicht Abschnitt 5.2.3 am Beispiel eines Sensors.

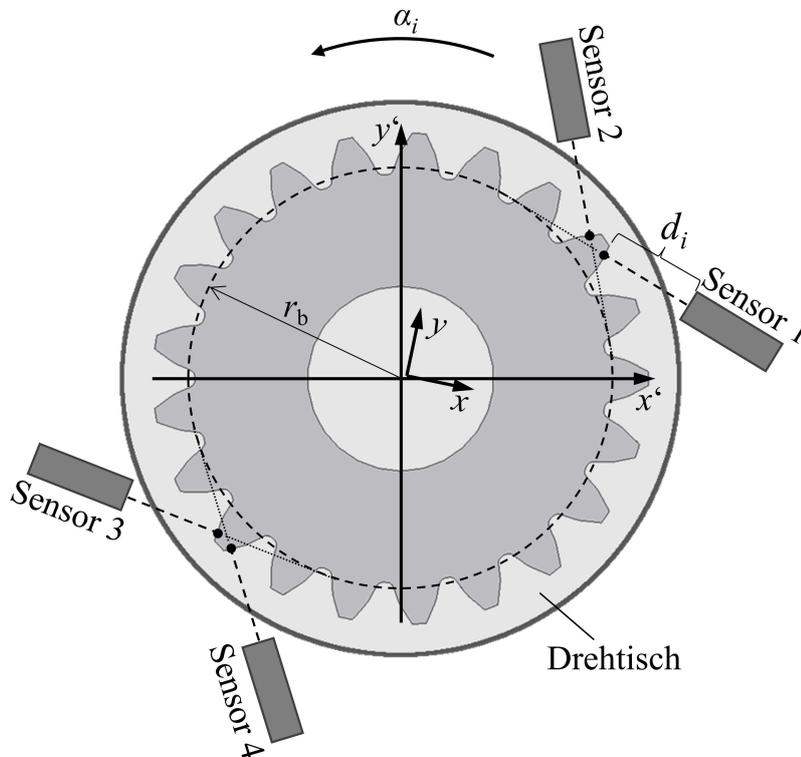


Bild 2.5: Rotatorisch-scannender Messansatz bestehend aus $n \geq 1$ optischen Abstandssensoren in Kombination mit einem Drehtisch zur scannenden Multi-Distanzmessung der Profilgeometrie aller Zähne eines nicht modifizierten Zahnrades mit Werkstückkoordinatensystem (x', y') . Das Messkoordinatensystem (x, y) befindet sich im Drehzentrum des Drehtisches. Jeder Sensor misst während der Rotation die vom Drehwinkel α_i abhängigen Abstände d_i zur Oberfläche der Zahnflanken, hier an einem Sensor eingezeichnet. Die Anordnung der $n \geq 1$ Sensoren kann je nach Messaufgabe variiert und mit einer Skalierung der Zahnradgröße mit skaliert werden. Sollen beispielsweise innerhalb einer Drehung beide Zahnflankenseiten gemessen werden, sind mindestens $n = 2$ optische Sensoren erforderlich, je einer pro Zahnflankenseite. Auf Basis der scannend gemessenen Profilgeometrie ist anschließend das inverse Problem gemäß Gleichung (2.4) zur Berechnung des Grundkreisradius r_b modellbasiert lösbar. Das Bild ist verändert nach [Pil2022].

Der dynamische rotatorisch-scannende Messansatz zur Multi-Distanzmessung besteht ebenfalls durch die Flexibilität und Skalierbarkeit bezüglich der Sensoranordnung, was insbesondere die Messung verschieden großer Verzahnungen ermöglicht. Die variable Sensorausrichtung bietet die Möglichkeit Sensoren mit Akzeptanzwinkel $< 5^\circ$ zu verwenden. Durch die rotatorisch-scannenden Messstrategie lässt sich mit nur einem Sensor die Profilgeometrie einer Zahnflankenseite aller Zahnflanken innerhalb einer Umdrehung messen. Gegenüber der statischen multisensorischen und lateral-scannenden Messung wird so die Anzahl der benötigten Sensoren deutlich reduziert. Die Verwendung schneller optischer Abstandssensoren führt außerdem zu hohen Messpunktedichten auf den Zahnflanken, sodass mittlere als auch zahnindividuelle Formparameter ausgewertet werden können.

Die auszuwertenden Formparameter können über mehrere Messpunkte gemittelt werden, was den Einfluss zufälliger Messabweichungen reduziert. Im Vergleich zu konventionellen taktilen Verzahnungsmesssystemen ist zudem eine erhebliche Reduzierung der Messzeit auf < 1 min möglich.

Auch bei diesem Messansatz ist die eingeschränkte optische Zugänglichkeit der Zahnflanke zu berücksichtigen. Soll insbesondere auch die Geometrie des Profils im Bereich des Zahnfußes bewertet werden, so müssen die optischen Sensoren in Richtung Zahnradmitte ausgerichtet werden. Bei der rotatorisch-scannenden Datenerfassung ergibt sich daraufhin von Zahnfuß bis Zahnkopf ein stetig ändernder Neigungswinkel zwischen der Normalen der Zahnflankenoberfläche und der Sensorachse. Der maximale Neigungswinkel tritt dabei am Zahnfuß auf und erfordert Sensoren mit Akzeptanzwinkeln von circa 30° . Zur Messung von Großverzahnungen wird wie beim statischen Mutlisensor-Messansatz ein Messbereich von ≥ 30 mm benötigt, damit die Sensoren in die Zahnlücken eindringen können. Des Weiteren müssen durch den Einsatz eines Drehtisches zusätzliche Unsicherheitsbeiträge aufgrund von Taumel und Exzentrizität mit beachtet werden. Ebenfalls ist durch die Notwendigkeit des Drehtisches die Flexibilität in der Messanordnung im Vergleich zu dem statischen und lateral-scannenden Messansatz eingeschränkter.

Ziel dieser Arbeit ist die Validierung des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes zur schnellen skalierbaren Messung und Bewertung der Profilgeometrie aller Zähne eines Zahnrads. Alle drei erarbeiteten Messstrategien des Multi-Distanz-Messansatzes können die Profilgeometrie aller Zähne durch eine parallele Datenerfassung oder Scanbewegung in Kombination mit schnellen optischen Sensoren erfassen. Eine flexible und mobile Positionierung beziehungsweise Ausrichtung der Sensoren ermöglicht grundsätzlich die Skalierbarkeit des Messvolumens. Um die Geometrie aller Zähne gleichzeitig zu erfassen, bedarf der multisensorische Messansatz oder auch der lateral-scannende Messansatz jedoch eine hohe Anzahl an Sensoren, die mindestens der Zähnezahl der zu messenden Verzahnung entsprechen muss. Der rotatorisch-scannende Messansatz ermöglicht dahingehend die schnelle skalierbare Multi-Distanzmessung der Profilgeometrie aller Zähne mit nur einem Sensor, weshalb im Rahmen dieser Arbeit zunächst der rotatorisch-scannende Messansatz zur Validierung des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes gewählt wird.

2.4.4 Messdatentransformation und Signalauswertung

Die modellbasierte Auswertung des Formparameters Grundkreisradius erfordert Messkoordinaten, um das inverse Problem gemäß Gleichung (2.4) lösen zu können. Mittels des Multi-Distanz-Messansatzes werden jedoch Abstandsinformationen gemessen, welche zunächst in Messkoordinaten transformiert werden müssen. Die Messdatentransformation und die nachfolgende Signalauswertung der Messdaten zur Approximation des Grundkreisradius sind am Beispiel einer rotatorisch-scannenden Multi-Distanzmessung mit einem optischen Sensor in Bild 2.6 zusammengefasst. Für die modellbasierte Auswertung des Grundkreisradius nach Abschnitt 2.3 müssen die drehwinkelabhängigen Abstände d_i in Koordinaten transformiert werden. In einem ersten Schritt werden dazu die Sensorkoor-

dinaten $P_{s,i}$ berechnet. Im Anschluss erfolgt die Transformation der Sensorkoordinaten in das allgemeine Messkoordinatensystem (x, y) . Da die exakte Position und Anordnung der jeweiligen eingesetzten Sensoren nicht bekannt ist, bedarf es einer Einmessung der Sensor- beziehungsweise Messanordnung, beispielsweise durch eine geometrische Kalibrierung. Entsprechend der eingemessenen Sensoranordnung werden die Sensorkoordinaten gemäß der Transformationsvorschrift (R_s : Sensorausrichtung, \vec{T}_s : Sensorposition) zwischen Sensor- und Messkoordinatensystem und der Rotationsmatrix R_α mit dem Drehwinkel α_i in Messkoordinaten P_i transformiert. Nach der Aufbereitung der Messdaten in Koordinaten des allgemeinen Messkoordinatensystems, folgt die Signalauswertung und Lösung des inversen Problems gemäß des eingeführten modellbasierten Auswertansatzes (vgl. Abschnitt 2.3). Zur Erfassung des mittleren Grundkreisradius r_b wird in einer ersten Approximationsstufe nach der Methode der kleinsten Quadrate eine ideale Evolvente in die Messpunkte P_i aller Zähne approximiert. Die Berechnung der idealen Evolvente erfolgt dabei in Abhängigkeit von dem gesuchten mittleren Grundkreisradius sowie von den freien Parametern $(\xi_i, x_t, y_t, \phi_0)$. Soll darüber hinaus auch die Geometrie der einzelnen Zähne überprüft werden, wird der iterative modellbasierte Auswertansatz um eine zweite Approximationsstufe ergänzt. Die zweite Approximationsstufe berechnet nach der Methode der kleinsten Quadrate auf Basis der in Stufe 1 bestimmten Zahnradposition (x_t, y_t, ϕ_0) im Messkoordinatensystem und den zahnindividuellen Messdaten pro Zahn eine ideale Evolvente mit entsprechendem zahnindividuellen Grundkreisradius $r_{b,Z}$.

Zusammengefasst stellt das Kapitel 2 einen Lösungsansatz zur Multi-Distanzmessung der Profilgeometrie von Verzahnungen mit anschließender modellbasierter Auswertung am Beispiel des Formparameters Grundkreisradius vor.

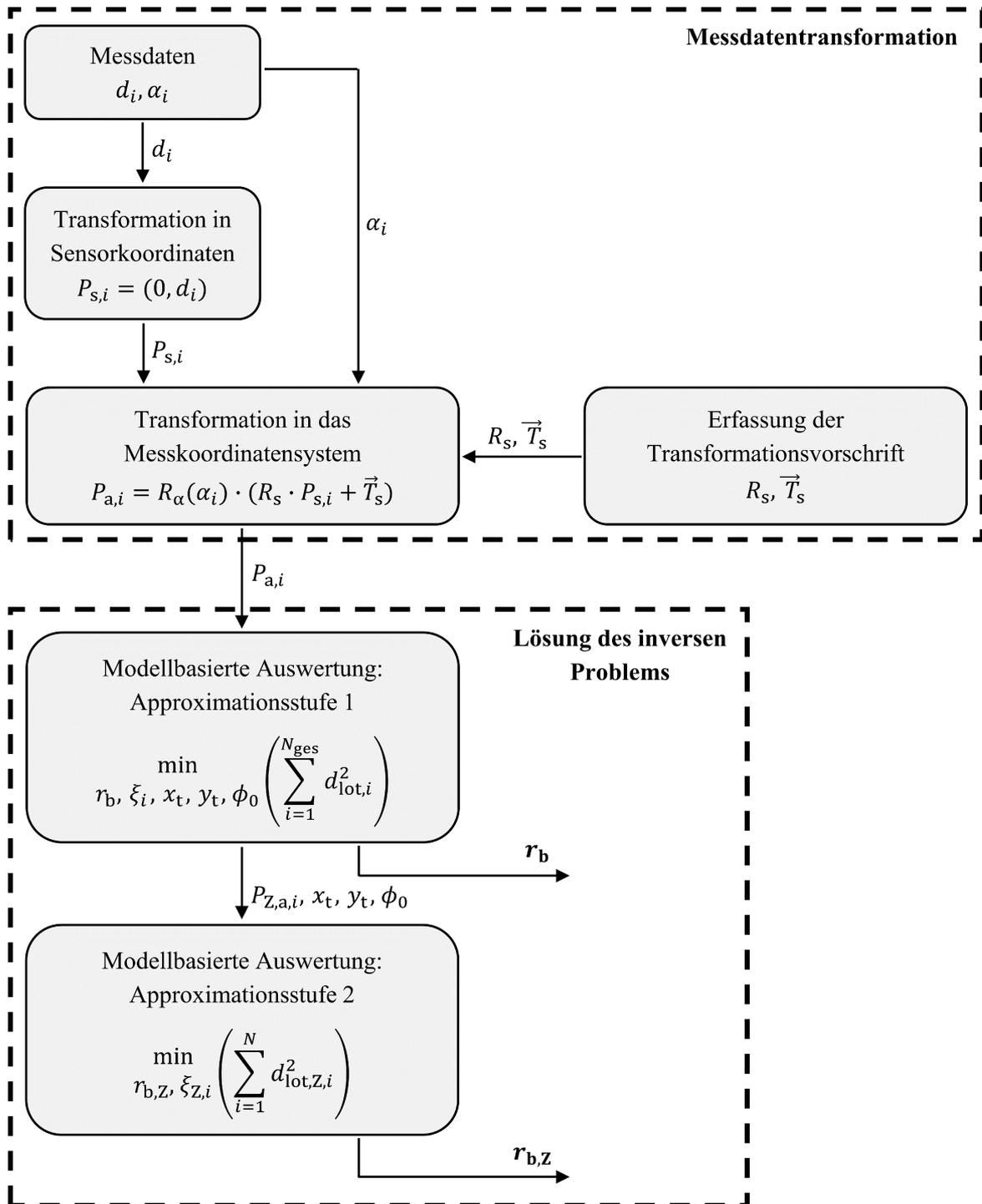


Bild 2.6: Messdatentransformation am Beispiel rotatorisch-scannender Messdaten in Messkoordinaten und anschließende Lösung des inversen Problems zur Berechnung des Grundkreisradius. Der mittlere Grundkreisradius r_b wird modellbasiert mit einer einstufigen Approximation bestimmt. Zur Ermittlung der zahnindividuellen Grundkreisradien $r_{b,Z}$ bedarf es eine zweite Approximationsstufe.

3 Verifikation

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Verifikation des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes zur Messung der Verzahnungsgeometrie und der Lösbarkeit des inversen Problems gemäß Gleichung (2.4). Abschnitt 3.1 verifiziert den modellbasierten Ansatz aus Kapitel 2 zur Lösung des inversen Problems, indem Punkte einer idealen Evolventenverzahnung simuliert und anschließend der Grundkreisradius modellbasiert bestimmt werden. Mit der modellbasierten Auswertung des Grundkreisradius wird gleichzeitig die Lösbarkeit des inversen Problems veranschaulicht. Anschließend folgt in Abschnitt 3.2 die Abschätzung der theoretisch erreichbaren Messunsicherheit bei der Grundkreisradiusapproximation, wobei Messbarkeitsgrenzen hinsichtlich einer Kalibrierunsicherheit und Sensorrauschen diskutiert werden.

3.1 Modellbasierte Lösung des inversen Problems

Ziel dieses Abschnitts ist die Verifikation des modellbasierten Ansatzes aus Kapitel 2 und Lösung des inversen Problems gemäß Gleichung (2.4) für die Multi-Distanzmessung von Verzahnungen. Am Beispiel eines simulierten Zahnrads sollen der mittlere Grundkreisradius r_b (Unterabschnitt 3.1.1) und der zahnindividuelle Grundkreisradius $r_{b,Z}$ (Unterabschnitt 3.1.2) bestimmt werden. Die Bewertung der Grundkreisradiusapproximation erfolgt daraufhin durch einen Vergleich mit der simulierten Nenngeometrie des Zahnrads. Zusätzlich werden neben dem gesuchten Formparameter Grundkreisradius auch die freien Transformationsparameter (x_t, y_t, ϕ_0) zwischen dem Mess- und Werkstückkoordinatensystem betrachtet und hinsichtlich des Simulationsszenarios bewertet. Im Folgenden werden die Randbedingungen und Annahmen für die Simulationen erläutert.

Als Messobjekt wird ein geradverzahntes Zahnrad mit Evolventenprofil mit idealer Geometrie simuliert. In der Praxis auftretende Fertigungsabweichungen werden bei dieser Verifikation nicht berücksichtigt. Die (Geometrie-)Parameter des simulierten Zahnrads und die geforderte Fertigungstoleranz für den Grundkreisradius für Verzahnungsqualität 6 sind in der Tabelle 3.1 zusammengefasst. Die Fertigungstoleranz für den Grundkreisradius wurde dabei auf Basis der in der Norm DIN ISO 1328-1 angegebenen Fertigungstoleranz für die Profil-Winkelabweichung [DIN2018a] und Gleichung (2.1) berechnet.

Für die Verifikation des modellbasierten Auswertansatzes werden Messpunkte auf den idealen Zahnflanken des Zahnrads simuliert. Die Verteilung der Messpunkte basiert dabei auf einer senkrecht zur Oberfläche stehenden Sensorausrichtung, das heißt es gilt eine eingeschränkte optische Zugänglichkeit durch benachbarte Zähne zu beachten. Die Anzahl der simulierten Messpunkte hängt von den jeweilig auszuwertenden Formparametern mittlerer beziehungsweise zahnindividueller Grundkreisradius ab. Die exakte Anzahl

Tabelle 3.1: (Geometrie-)Parameter der simulierten mittelgroßen Verzahnung zur Verifikation der Lösbarkeit des inversen Problems. Zusätzlich sind die geforderten Toleranzen nach [DIN2018a] und die daraus abgeleitete Messunsicherheit nach [DIN2009] sowie der dynamische Bereich zu Bewertung der Verzahnungsqualität 6 (VQ6) angegeben.

	simulierte Verzahnung
Kopfkreisdurchmesser d_a	105 mm
Normalmodul m_n	3,75 mm
Zähnezahl z	26
Grundkreisradius r_b	45,8100 mm
Toleranz r_{bT} (Verzahnungsqualität 6)	20,4 μm
Messunsicherheit $u_{r_b, VQ6}$ für $k = 2$	6,1 μm
dynamischer Bereich $d_a / u_{r_b, VQ6}$	17168

der Messpunkte wird in den entsprechenden Unterabschnitten 3.1.1 und 3.1.2 erläutert. Darüber hinaus werden zur Verifikation des modellbasierten Ansatzes zur Lösung des inversen Problems zwei verschiedene Simulationsszenarien generiert, in denen die Position des Zahnrads im Messkoordinatensystem variiert. Szenario 1 simuliert eine ideale Positionierung des Zahnrads im Zentrum des Messkoordinatensystem. Szenario 2 hingegen stellt ein zum Messkoordinatensystem verschobenes und rotiertes Zahnrad dar und soll einer realen Messung entsprechen. Die Parameter der Simulationsszenarien sind in der Tabelle 3.2 aufgelistet.

Tabelle 3.2: Simulationsszenarien im Rahmen der Verifikation der Lösbarkeit des inversen Problems. Szenario 1 umfasst die ideale Positionierung einer Verzahnung im Mittelpunkt des Messkoordinatensystems. Szenario 2 betrachtet ein im Messkoordinatensystem verschobenes und rotiertes Zahnrad.

Parameter	Szenario 1	Szenario 2
Translation x_t	0 mm	0,1500 mm
Translation y_t	0 mm	0,0500 mm
Drehwinkel ϕ_0	0°	1,5000°

Die Startwerte für die iterative Lösung des inversen Problems betragen $x_{t0} = 0\text{ mm}$, $y_{t0} = 0\text{ mm}$ für die Translationsparameter und $\phi_0 = 0^\circ$ für die Rotation zwischen dem Mess- und Werkstückkoordinatensystem. Weiterhin werden Abweichungen der Messpunkte von der idealen Geometrie durch Unsicherheiten in der Abstandsmessung und in der Kalibrierung der Sensoranordnung vernachlässigt. Im Rahmen der Verifikation werden dementsprechend zunächst nur systematische Abweichungen resultierend aus der modellbasierten Auswertung untersucht.

3.1.1 Mittlerer Grundkreisradius

Zur Lösung des inversen Problems sind gemäß Gleichung (2.4) mindestens vier Messpunkte erforderlich, damit kein unterbestimmtes Gleichungssystem vorliegt. Dementsprechend reichen zur Berechnung des mittleren Grundkreisradius r_b und damit zur Verifikation des modellbasierten Auswertansatzes theoretisch je ein Messpunkt an vier verschiedenen

Zähnen aus. Das Ziel dieser Arbeit ist jedoch die Bewertung der Verzahnungsgeometrie am Beispiel des mittleren Grundkreisradius auf Basis aller Zähne. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Verifikation des modellbasierten Ansatzes zur Auswertung des mittleren Grundkreisradius pro Zahn ein Messpunkt simuliert. Die Gesamtanzahl der simulierten Messpunkte beträgt somit 26. Die Messpunkte sind dabei gemäß der senkrechten Sensorausrichtung über den Wälzwinkel ζ_i im optisch zugänglichen Bereich auf den Zahnflanken verteilt. Die Auswertung des mittleren Grundkreisradius der simulierten Messdaten erfolgt daraufhin in einer einstufigen Approximation nach Abschnitt 2.3. Die Ergebnisse der Simulationen sind in den nachfolgenden Tabellen veranschaulicht. Tabelle 3.3 zeigt die Ergebnisse für den mittleren Grundkreisradius und die freien Transformationsparameter (x_t, y_t, ϕ_0) für eine ideale Zahnradpositionierung im Messkoordinatensystem (Szenario 1). In Tabelle 3.4 sind zusätzlich die Ergebnisse für eine zum Messkoordinatensystem verschobene Zahnradpositionierung dargestellt (Szenario 2). Es sind jeweils die Sollwerte und approximierten Istwerte aufgelistet.

Tabelle 3.3: Simulationsergebnisse der Approximation des mittleren Grundkreisradius r_b für Szenario 1. Zur Verifikation der Lösbarkeit des inversen Problems wird pro Zahn ein Messpunkt simuliert. Die Messpunkte sind dabei zahnübergreifend über den Wälzwinkel auf den Evolventen verteilt. Die Tabelle zeigt jeweils die Sollwerte und die approximierten Istwerte der freien Parameter.

Parameter	Sollwert	Istwert
Grundkreisradius r_b	45,8100 mm	45,8100 mm
Translation x_t	0 mm	$-4 \cdot 10^{-6}$ mm
Translation y_t	0 mm	$-2 \cdot 10^{-6}$ mm
Drehwinkel ϕ_0	0°	$-1 \cdot 10^{-5}$ °

Tabelle 3.4: Simulationsergebnisse der Approximation des mittleren Grundkreisradius r_b für Szenario 2. Auch hier wird zur Verifikation der Lösbarkeit des inversen Problems ein Messpunkt pro Zahn simuliert. Die Messpunkte sind zahnübergreifend in äquidistanten Wälzwinkeln auf den Evolventen verteilt. Dargestellt sind die Sollwerte und die approximierten Istwerte der freien Parameter.

Parameter	Sollwert	Istwert
Grundkreisradius r_b	45,8100 mm	45,8099 mm
Translation x_t	0,1500 mm	0,1500 mm
Translation y_t	-0,0500 mm	-0,0500 mm
Drehwinkel ϕ_0	1,5000°	1,5001°

Unabhängig von der simulierten Position des Zahnrads verifizieren die Ergebnisse hinsichtlich der gewählten Randbedingungen die Lösbarkeit des inversen Problems mittels des modellbasierten Auswertansatzes. Die maximal auftretende Abweichung für den mittleren Grundkreisradius r_b beträgt $-0,1 \mu\text{m}$ und ist damit angesichts der geforderten Messunsicherheit (vgl. Tabelle 3.1) für den Grundkreisradius vernachlässigbar. Auch die Translationsparameter (x_t, y_t) werden mit Abweichungen im einstelligen Nanometerbereich

bestimmt. Der approximierter Drehwinkel ϕ_0 zwischen Mess- und Werkstückkoordinatensystem wird zudem mit Abweichungen in der Größenordnung einstelliger Winkelsekunden berechnet.

3.1.2 Zahnindividueller Grundkreisradius

Wie in Abschnitt 2.3 erläutert, bedarf es zur Auswertung zahnindividueller Grundkreisradien $r_{b,Z}$ eine zweistufige Approximation. In der ersten Approximationsstufe werden sowohl die freien Parameter (x_t, y_t, ϕ_0) als auch der mittlere Grundkreisradius r_b auf der Basis aller Zähne ausgewertet. Die dabei bestimmten Transformationsparameter (x_t, y_t, ϕ_0) werden daraufhin für die zweite Approximationsstufe gesperrt und somit der mehrdimensionale Lösungsraum eingegrenzt. Dies ermöglicht es anschließend, die zahnindividuellen Grundkreisradien auf Basis der zahnindividuellen Messdaten auszuwerten. Gemäß Abschnitt 2.3 sind zur Lösung der zweiten Approximationsstufe mindestens $N = 2$ Messpunkte pro Zahn erforderlich. Multipliziert mit der Zähnezahl von 26 ergeben sich für die Simulation der zahnindividuellen Grundkreisradiusapproximation 52 Messpunkte. Die Messpunkte wurden entsprechend der senkrechten Sensorausrichtung in dem größtmöglichen optisch zugänglichen Zahnflankenbereich simuliert, jeweils in Richtung Zahnfuß und Zahnkopf. Dabei werden die jeweiligen Messpunkte pro Zahn zusätzlich auf unterschiedlichen Wälzwinkeln verteilt, um Singularitäten zu vermeiden und um für die erste Approximationsstufe ein lösbares überbestimmtes Gleichungssystem zu erhalten. Im Rahmen der Verifikation werden ideale Zahnflanken betrachtet und zahnindividuelle Formabweichungen treten nicht auf. Aus diesem Grund erfolgt die Verifikation der modellbasierten Auswertung des zahnindividuellen Grundkreisradius ausschließlich anhand der approximierten Parameter einer einzelnen Zahnflanke. Die nachfolgenden Tabellen fassen die Ergebnisse der Verifikation der modellbasierten Auswertung des zahnindividuellen Grundkreisradius für die zwei simulierten Zahnradpositionierungen zusammen. Die Ergebnisse der approximierten Parameter für eine ideale Zahnradpositionierung (Szenario 1) sind in Tabelle 3.5 dargestellt. Tabelle 3.6 verifiziert die zahnindividuelle Grundkreisapproximation am Beispiel einer zum Messkoordinatensystem verschobene Zahnradpositionierung (Szenario 2). Die Tabellen zeigen die vorgegebenen Sollwerte und die berechneten Istwerte der jeweiligen Approximationsstufe.

Tabelle 3.5: Simulationsergebnisse des approximierten zahnindividuellen Grundkreisradius $r_{b,Z}$ am Beispiel eines Zahns für Simulationsszenario 1. Im Rahmen der Verifikation der Lösbarkeit des inversen Problems werden pro Zahn $N = 2$ Messpunkte simuliert. Die Verteilung der Messpunkte ist einer Multi-Distanz-Messung mit senkrechter Sensoranordnung nachempfunden, das heißt die Messpunkte sind jeweils in Richtung Zahnfuß und Zahnkopf verteilt. Die Approximation der zahnindividuellen Grundkreisradien erfolgt zweistufig, wobei in Stufe 1 zunächst die Lageparameter (x_t, y_t, ϕ_0) und der mittlere Grundkreisradius r_b bestimmt werden (vgl. Istwerte Stufe 1). In der zweiten Stufe wird dann auf Basis der Lageparameter aus Stufe 1 der zahnindividuelle Grundkreisradius approximiert.

Parameter	Sollwert	Istwert Stufe 1	Istwert Stufe 2
Grundkreisradius r_b	45,8100 mm	45,8100 mm	-
zahnindividueller Grundkreisradius $r_{b,Z=1}$	45,8100 mm	-	45,8100 mm
Translation x_t	0 mm	$-1 \cdot 10^{-8}$ mm	-
Translation y_t	0 mm	$1 \cdot 10^{-9}$ mm	-
Drehwinkel ϕ_0	0°	$3 \cdot 10^{-6}^\circ$	-

Tabelle 3.6: Simulationsergebnisse für den approximierten zahnindividuellen Grundkreisradius $r_{b,Z}$ eines Zahns für Simulationsszenario 2. Pro Zahn werden $N = 2$ Messpunkte simuliert, wobei die Verteilung der Messpunkte einer Multi-Distanz-Messung mit senkrechter Sensoranordnung nachempfunden ist. Die Messpunkte sind jeweils in Richtung des Zahnfußes und Zahnkopfes verteilt. Die Berechnung der zahnindividuellen Grundkreisradien erfolgt innerhalb einer zweistufigen Approximation, wobei in Stufe 1 zunächst die Lageparameter (x_t, y_t, ϕ_0) und der mittlere Grundkreisradius r_b bestimmt werden (vgl. Istwerte Stufe 1). In der zweiten Approximationsstufe wird dann auf Basis der Lageparameter aus Stufe 1 der zahnindividuelle Grundkreisradius bestimmt.

Parameter	Sollwert	Istwert Stufe 1	Istwert Stufe 2
Grundkreisradius r_b	45,8100 mm	45,8100 mm	-
zahnindividueller Grundkreisradius $r_{b,Z=1}$	45,8100 mm	-	45,8100 mm
Translation x_t	0,1500 mm	0,1500 mm	-
Translation y_t	-0,0500 mm	-0,0500 mm	-
Drehwinkel ϕ_0	$1,5000^\circ$	$1,5000^\circ$	-

Die Ergebnisse der zweistufigen zahnindividuellen Grundkreisradiusapproximation verifizieren die Lösbarkeit des inversen Problems mittels des in Kapitel 2 vorgestellten modellbasierten Auswerteansatzes. Die ermittelten numerischen Abweichungen der in der zweiten Stufe approximierten zahnindividuellen Grundkreisradien betragen unabhängig vom Simulationsszenario wenige Submikrometer. Hinsichtlich der Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 sind die numerischen Abweichungen vernachlässigbar klein.

3.1.3 Fazit

Im Ergebnis verifizieren die Simulationen den modellbasierten Ansatz zur Lösung des inversen Problems und Auswertung des Formparameters Grundkreisradius. Mittels der einstufigen Approximation können auf Basis der Geometrie aller Zähne der mittlere Grundkreisradius sowie die Zahnradposition im Messkoordinatensystem bestimmt werden. Eine separate Einmessung des Werkstückkoordinatensystems als Bezugskordinatensystem ist nicht erforderlich. Bereits ein Messpunkt pro Zahn reicht aus, um den mittleren Grundkreisradius mit Submikrometerabweichungen zu berechnen. Eine zweite Stufe ermöglicht daraufhin die Approximation des zahnindividuellen Grundkreisradius, wobei die in Stufe 1 ermittelten freien Transformationsparameter der Zahnradposition im Messkoordinatensystem in Stufe 2 als konstante Parameter vorgegeben werden. Auch mittels des zweistufigen Approximationsansatzes sind für den zahnindividuellen Grundkreisradius Submikrometerabweichungen erreichbar. Die Lösbarkeit des inversen Problems (Gleichung (2.4)) ist damit bestätigt.

3.2 Messunsicherheitsabschätzung

Ziel dieser Arbeit ist es, mit dem modellbasierten Multi-Distanz-Messansatz die Geometrie von Zahnrädern entsprechend den Unsicherheitsanforderungen für eine Verzahnungsqualität 6 zu erfassen. Unterabschnitt 3.2.1 schätzt daher die Messbarkeitsgrenzen des Multi-Distanz-Messansatzes hinsichtlich systematischer sowie zufälliger Einflüsse durch eine Einmessung der Sensoranordnung und Sensorrauschen am Beispiel einer mittelgroßen Verzahnung ab. Unterabschnitt 3.2.2 verifiziert daraufhin die Skalierbarkeit des Messansatzes, indem die erreichbare Messunsicherheit sowie der erreichbare dynamische Bereich bei der Grundkreisradiusapproximation für Großverzahnungen bestimmt werden.

Für die Abschätzung der erreichbaren Messunsicherheit werden rotatorisch-scannende Multi-Distanzmessungen mit einem optischen Sensor an verschieden großen Evolventenverzahnungen simuliert. Es werden ein idealer Drehtisch mit konstanter Drehgeschwindigkeit zur Rotation der Verzahnungen und eine konzentrische Positionierung der Zahnräder im Drehzentrum angenommen. Zudem ist der simulierte Abstandssensor senkrecht zur Oberfläche der Zahnflanken ausgerichtet, wodurch potenzielle Einflüsse durch variierende Neigungswinkel zwischen Sensorachse und Zahnflankennormale zunächst vernachlässigt werden. Zusätzlich wird von einer geometrisch eingemessenen und unsicherheitsbehafteten Sensoranordnung ausgegangen, sodass die Sensorposition und -ausrichtung im Messkoordinatensystem bekannt sind. Die simulierte rotatorisch-scannende Multi-Distanzmessung wird hierbei durch verbleibende systematische und zufällige Abweichungen von der kalibrierten Sensoranordnung und durch zufällige Abweichungen in der Abstandsmessung beeinflusst. Die Einflussfaktoren werden jeweils in Unterabschnitt 3.2.1 detailliert diskutiert.

Als Messobjekte werden drei verschiedene nicht modifizierte ideale Evolventenverzahnungen betrachtet, dessen Geometrieparameter Tabelle 3.7 zusammenfasst. Formabweichungen werden nicht betrachtet. Zusätzlich sind in der Tabelle die geforderten Messunsicherheiten für Verzahnungsqualität 6 gemäß DIN ISO 1328-1 und DIN ISO 18653

angegeben [DIN2018a, DIN2009]. An der mittelgroßen Verzahnung werden zunächst die systematischen und zufälligen Einflüsse durch die Einmessung der Sensoranordnung und Sensorrauschen bei der Multi-Distanzmessung untersucht und die Messbarkeitsgrenzen bestimmt. Die Verifikation der Skalierbarkeit des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes wird daraufhin an den Großverzahnungen demonstriert.

Tabelle 3.7: Geometrieparameter der simulierten Verzahnungen zur Abschätzung der Messbarkeitsgrenzen und zur Verifikation der Skalierbarkeit des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes. Darüber hinaus zeigt die Tabelle die geforderte Messunsicherheit $u_{r_b, VQ6}$ entsprechend einer Verzahnungsqualität 6 (VQ6) nach [DIN2018a, DIN2009].

	mittelgroße Verzahnung	Großverzahnung 1	Großverzahnung 2
Kopfkreisdurchmesser d_a	105 mm	480 mm	1104 mm
Normalmodul m_n	3,75 mm	12 mm	16 mm
Zähnezahl z	26	38	67
Messunsicherheit $u_{r_b, VQ6}$ für $k = 2$	6,1 μm	11,2 μm	21,5 μm

3.2.1 Messbarkeitsgrenzen

Dieser Abschnitt quantifiziert anhand von Simulationen die Messbarkeitsgrenzen des Multi-Distanz-Messansatzes am Beispiel einer mittelgroßen Verzahnung. Außerdem wird geprüft, ob die geforderte Messunsicherheit für den Grundkreisradius für Verzahnungsqualität 6 erreichbar ist. Die simulierte Multi-Distanzmessung wird dabei von Abweichungen aus einer kalibrierten Sensoranordnung des Multi-Distanz-Messansatzes und Abweichungen in der Abstandsmessung beeinflusst. Im Folgenden werden die systematischen und zufälligen Einflüsse der Kalibrierung der Messanordnung und der Abstandsmessung auf die Grundkreisradiusapproximation untersucht.

Kalibrierung der Sensoranordnung

Wie Abschnitt 2.4.4 erklärt, bedarf die modellbasierte Auswertung des Grundkreisradius die Umrechnung der gemessenen Abstände in Messkoordinaten. Für diese Messdatentransformation müssen die Position und Ausrichtung des Sensors im Messkoordinatensystem bekannt sein. Eine unbekannt oder abgeschätzte Sensoranordnung führt ansonsten zu erheblichen systematischen Abweichungen bei der Grundkreisradiusapproximation. Im Rahmen der Simulationen wird von einer geometrisch kalibrierten Sensoranordnung ausgegangen, wobei die Sensorposition und -ausrichtung in einem Messkoordinatensystem eingemessen sind. Die eingemessene Sensoranordnung ist jedoch auch mit verbleibenden systematischen und zufälligen Messabweichungen behaftet, was die erreichbare Messunsicherheit bei der Grundkreisradiusapproximation beeinflusst. Im Folgenden werden zunächst die Auswirkungen systematischer Messabweichungen in der eingemessenen Sensoranordnung auf die Multi-Distanzmessung abgeschätzt. Auf Basis der Abschätzung können daraufhin die Anforderungen für die Kalibrierstrategie der Sensoranordnung

abgeleitet werden, um Effekte durch systematische Messabweichung weitestgehend zu reduzieren.

Die geometrische Kalibrierung der Sensoranordnung ist in einer Ebene mit drei freien Parametern verbunden, einem Winkel δ der die Ausrichtung des Sensors definiert und jeweils der x - und y -Komponente der Sensorposition im Messkoordinatensystem. Weichen die eingemessene Sensorausrichtung und -position von der eigentlichen Sensoranordnung systematisch ab, werden die gemessenen drehwinkelabhängigen Abstände verzerrt in Messkoordinaten transformiert. Als Folge sind systematische Abweichungen des Grundkreisradius bei der modellbasierten Auswertung zu erwarten.

Eine Parameterstudie untersucht daher separat die Einflüsse der Abweichungen der einzelnen freien Parameter der Sensoranordnung auf die Grundkreisradiusapproximation. Kovarianzen werden zunächst nicht berücksichtigt. Um den systematischen Einfluss einer abweichenden Sensorausrichtung abzuschätzen, wird die tatsächliche Sensorausrichtung schrittweise mit definierten Winkelabweichungen $\Delta\delta$ im Intervall $[-0,2^\circ; 0,2^\circ]$ überlagert. Zur Abschätzung des Einflusses einer abweichenden Sensorposition, wird auf die tatsächlich simulierte Sensorposition jeweils in x - und y -Richtung des Messkoordinatensystems eine Positionsabweichung Δx beziehungsweise Δy addiert. Die Abweichungen Δx und Δy der Komponenten der Sensorposition betragen dabei Werte im Bereich von $[-0,2 \text{ mm}; 0,2 \text{ mm}]$. Weiterhin wird zur Abschätzung der systematischen Einflüsse durch die geometrische Kalibrierung der Sensoranordnung eine ideale Abstandsmessung ohne Streuung angenommen. Zusätzlich wird eine Abhängigkeit von der Messpunktezahl N pro Zahn untersucht. Die simulierte Anzahl an Messpunkten pro Zahn betragen 4, 10, 100 und 1000. Die systematischen Einflüsse durch die Kalibrierung werden am Beispiel des mittleren Grundkreisradius bestimmt.

Die Ergebnisse der Simulationen sind in Bild 3.1 veranschaulicht. Bild 3.1 (a) stellt dabei die Abweichung Δr_b des modellbasierten mittleren Grundkreisradius in Abhängigkeit von einer um $\Delta\delta$ abweichenden Sensorausrichtung dar. In Bild 3.1 (b) ist dagegen die Grundkreisradiusabweichung Δr_b abhängig von einer in x -Richtung des Messkoordinatensystems abweichenden x -Position des Sensors um Δx abgebildet. Den Einfluss der um Δy abweichenden Sensorposition in y -Richtung auf die Grundkreisradiusapproximation zeigt Bild 3.1 (c).

Verbleibende systematische Abweichungen in der kalibrierten Sensoranordnung führen erwartungsgemäß zu systematischen Messabweichungen bei der Bestimmung des mittleren Grundkreisradius. Unabhängig von den untersuchten freien Parametern ($\Delta\delta$, Δx , Δy) der Sensoranordnung, ist eine parabelförmige Abhängigkeit der Grundkreisradiusabweichung Δr_b von der abweichenden Sensoranordnung zu erkennen. Mit betragsmäßig steigender systematischer Abweichung der Sensorausrichtung δ beziehungsweise der x - und y -Komponente der Sensorposition nimmt die Empfindlichkeit für die Grundkreisradiusabweichung zu. Beispielsweise führen bereits Abweichungen von der Sensorausrichtung von $\Delta\delta = \pm 0,1^\circ$ zu Grundkreisradiusabweichungen von $-1 \mu\text{m}$. Ein Einfluss der Messpunktezahl ist nicht sichtbar. Grundsätzlich ist zu beachten, dass die quantifizierten von $\Delta\delta$, Δx , Δy abhängigen Grundkreisradiusabweichungen für eine definierte Messanordnung

gelten. Bei einer Änderung der Messanordnung, ist eine Änderung der Größenordnungen der jeweiligen Grundkreisradiusabweichungen zu erwarten.

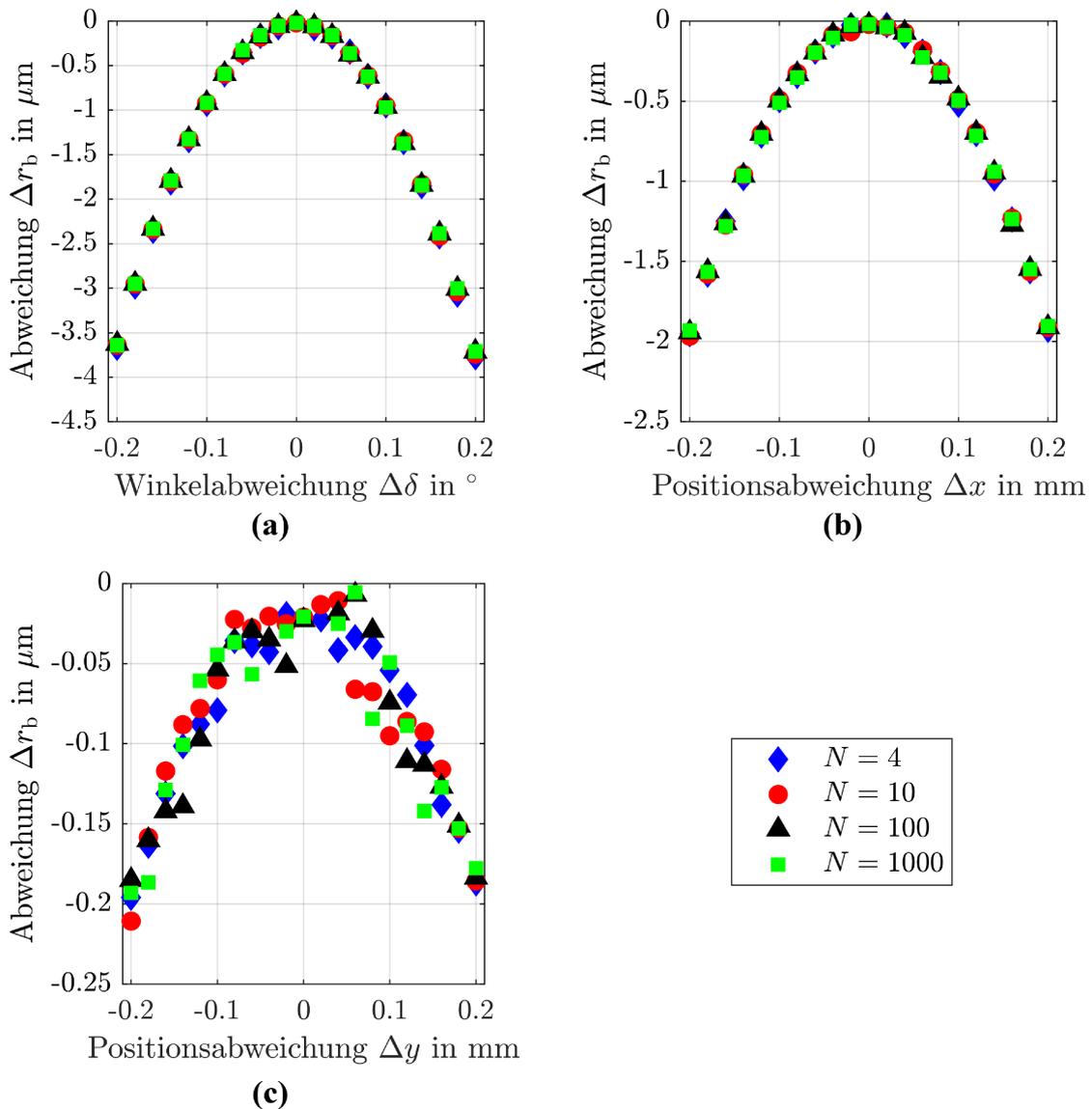


Bild 3.1: Ergebnisse der Parameterstudie zur Untersuchung systematischer Einflüsse einer abweichenden Sensoranordnung auf die Grundkreisradiusapproximation am Beispiel einer mittelgroßen Verzahnung (vgl. Tabelle 3.7). In (a) sind die Abweichungen Δr_b des mittleren Grundkreisradius aufgrund einer systematisch abweichenden Sensorausrichtung $\Delta\delta$ dargestellt. Die Einflüsse einer systematisch abweichenden Sensorposition zeigen (b) für die Positionsabweichung in x -Richtung und (c) für die Positionsabweichung in y -Richtung. Die ermittelten Grundkreisradiusabweichungen gelten für die simulierte Messanordnung.

Üblicherweise überlagern sich die systematischen Einflüsse der eingemessenen Sensorausrichtung und der jeweiligen Komponenten der Sensorposition und korrelieren dann miteinander. Damit einhergehend steigt die resultierende systematische Messabweichung bei der Berechnung des Grundkreisradius an. Eine Beispielrechnung auf Basis des Simulationsmodells zeigt, dass mit fest vorgegebenen systematischen Abweichungen ($\Delta\delta = -0,1^\circ$, $\Delta x = -0,1\text{ mm}$, $\Delta y = 0,1\text{ mm}$) die Abweichung des Grundkreisradius $\approx 3,4\mu\text{m}$ beträgt.

Zusammenfassend ist bei der geometrischen Kalibrierung der Sensoranordnung darauf zu achten, systematische Messabweichungen, sofern bekannt, zu kompensieren.

Unter realen Messbedingungen ist die verbleibende systematische Abweichung aus der geometrischen Kalibrierung der Sensoranordnung unbekannt und nach jeder neuen Kalibrierung unterschiedlich. Eine Korrektur der systematischen Abweichung ist nicht möglich. Nach dem *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) ist eine unbekannte, nicht zu korrigierende systematische Abweichung wie eine zufällige Abweichung zu behandeln [JCG2008] und überlagert sich mit den weiteren zufälligen Abweichungen aus der Kalibrierung der Sensorausrichtung und Sensorposition.

Davon ausgehend, dass die geometrische Kalibrierung der Sensoranordnung die systematischen Einflüsse weitgehend kompensiert, soll im Folgenden der Einfluss der zufälligen Messabweichung aus der Kalibrierung der Sensoranordnung auf die Bestimmung des Grundkreisradius charakterisiert werden.

Zur Untersuchung des Einflusses der zufälligen Abweichung aus der geometrischen Kalibrierung werden für eine erste Schätzung die Sensorausrichtung mit einem normalverteilten Rauschen mit einer Standardabweichung von $0,05^\circ$ und die x - beziehungsweise y -Komponenten der Sensorposition jeweils mit einer Standardabweichung von $0,005$ mm versehen. Anschließend bestimmen Monte-Carlo-Simulation in $w = 1000$ Wiederholungen den Grundkreisradius und die Standardunsicherheit $u_{r_b,k}$ als Maß für den Unsicherheitsbeitrag aus der Kalibrierung. Die Abstandsmessungen zur Oberfläche der Zahnflanken werden im Rahmen dieser Monte-Carlo-Simulation als ideal angesehen. Zusätzlich wird die Messpunkanzahl zwischen 4, 10, 100 und 1000 variiert. Es werden jeweils der Einfluss der zufälligen Abweichung aus der geometrischen Kalibrierung auf die Grundkreisradiusapproximation des mittleren und zahnindividuellen Grundkreisradius bestimmt. Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation zeigt Bild 3.2. In Bild 3.2 (a) ist die Standardunsicherheit $u_{r_b,k}$ für den mittleren Grundkreisradius in Abhängigkeit von der Messpunkanzahl pro Zahn dargestellt. Bild 3.2 (b) bildet analog die Standardunsicherheit $u_{r_b,z,k}$ für den zahnindividuellen Grundkreisradius ab. Die grauen Kreuze symbolisieren dabei die ermittelten Standardunsicherheiten des Grundkreisradius.

Die Monte-Carlo-Simulationen verifizieren, dass die Standardunsicherheit des mittleren beziehungsweise zahnindividuellen Grundkreisradius und damit der Einfluss einer zufällig streuenden Kalibrierung der Sensoranordnung mit steigender Messpunkanzahl N pro Zahn mit a/\sqrt{N} erheblich abnehmen. Der Parameter a kennzeichnet einen konstanten Faktor, der vom gesuchten Formparameter und von der Geometrie des Zahnrads abhängt. Eine schwarze gestrichelte Linie veranschaulicht jeweils den angenäherten funktionellen Zusammenhang in Bild 3.2. Eine hohe Empfindlichkeit der erreichbaren Standardunsicherheit des Grundkreisradius gegenüber der Messpunkanzahl ist daher insbesondere im Bereich $N = 4$ bis 100 Messpunkten pro Zahn zu beobachten. Die für 4 beziehungsweise 10 Messpunkte pro Zahn ermittelte Standardunsicherheit ist zudem größer, als die geforderte erweiterte Messunsicherheit von $6,1 \mu\text{m}$ ($k = 2$) für eine Verzahnungsqualität 6. Eine Erhöhung der Anzahl der Messpunkte von 4 auf 100 bewirkt daraufhin bereits eine Reduzierung der Standardunsicherheit um bis zu 70 % (mittlerer Grundkreisradius) beziehungsweise 75 % (zahnindividueller Grundkreisradius) auf $\leq 2 \mu\text{m}$ ($k = 1$). Wird die Anzahl der Mess-

punkte pro Zahn weiter beispielsweise auf 1000 Messpunkte erhöht, reduziert sich der Unsicherheitsbeitrag auf unter $1 \mu\text{m}$. Im Vergleich zur Standardunsicherheit des mittleren Grundkreisradius ist die jeweils erreichbare Standardunsicherheit des zahnindividuellen Grundkreisradius im Mittel um 17 % größer.

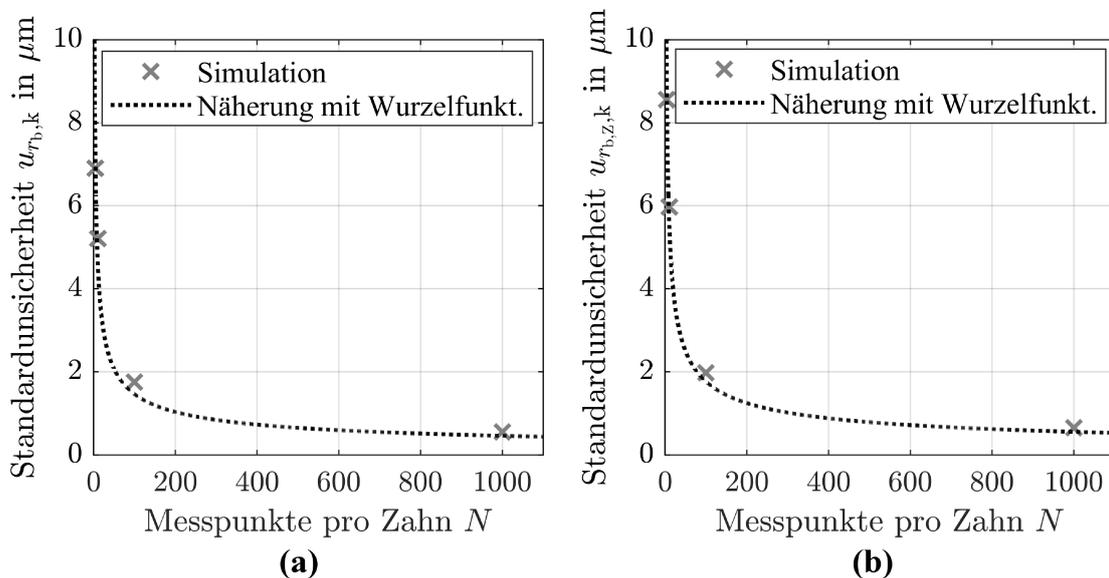


Bild 3.2: Simulationsergebnisse zur Abschätzung des Unsicherheitsbeitrags aus der Kalibrierung der Messanordnung. (a) zeigt den Unsicherheitsbeitrag $u_{r_b,k}$ für den mittleren Grundkreisradius und (b) den Unsicherheitsbeitrag $u_{r_{b,z},k}$ für den zahnindividuellen Grundkreisradius einer mittelgroßen simulierten Verzahnung in Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte N pro Zahn. Im Rahmen der Monte-Carlo-Simulationen sind die Sensorausrichtung mit einem normalverteilten Rauschen mit einer Standardabweichung von $0,05^\circ$ und die x - beziehungsweise y -Komponenten der Sensorposition jeweils mit einer Standardabweichung von $0,005 \text{ mm}$ versehen. Zusätzlich veranschaulicht eine Näherung den funktionellen Zusammenhang.

Abstandssensor

Eine weitere Unsicherheitsquelle in der Multi-Distanzmessung des Formparameters Grundkreisradius stellt der optische Abstandssensor dar. Während das Zahnrad beim rotatorisch-scannenden Multi-Distanz-Messansatz rotiert, misst der simulierte optische Sensor mit einer Messrate von mindestens 1 kHz kontinuierlich drehwinkelabhängige Abstände zur Oberfläche der Zahnflanken. Die gemessenen Abstände sind dabei mit einer zufälligen Messabweichung behaftet. Den Einfluss der zufälligen Messabweichung der Abstandsmessung auf die Multi-Distanzmessung des Grundkreisradius quantifizieren erneut Monte-Carlo-Simulationen mit $w = 1000$ Wiederholungen. Die Unsicherheit u_s der Abstandsmessung wird dabei als normalverteiltes Rauschen mit einer Standardabweichung von $0,5 \mu\text{m}$ bis $5 \mu\text{m}$ simuliert und anschließend auf die simulierten Abstände addiert. Auch hier wird die Anzahl der Messpunkte pro Zahn um 4, 10, 100 und 1000 variiert. Typischerweise ist die optische Zugänglichkeit in die Zahnflanke durch eine Abschattung der Nachbarzahnflanken eingeschränkt, weshalb die Messpunkte im äußeren Bereich der Evolvente simuliert werden. Zudem wird von einer idealen geometrischen Kalibrierung der Sensoranordnung ausgegangen. Als Maß für den Messunsicherheitsbeitrag resultierend aus der Abstands-

messung wird die Standardunsicherheit des Grundkreisradius für den mittleren als auch zahnindividuellen Grundkreisradius der $w = 1000$ Wiederholungen betrachtet.

Die Simulationsergebnisse stellt Bild 3.3 dar. Bild 3.3 (a) veranschaulicht die Standardunsicherheit $u_{r_b,s}$ für den approximierten mittleren Grundkreisradius abhängig von der simulierten Abstandsunsicherheit u_s und zusätzlich von der Messpunktezahl. Bild 3.3 (b) zeigt in analoger Darstellung die Ergebnisse der erreichbaren Standardunsicherheit $u_{r_b,Z,s}$ für die zahnindividuelle Grundkreisradiusapproximation.

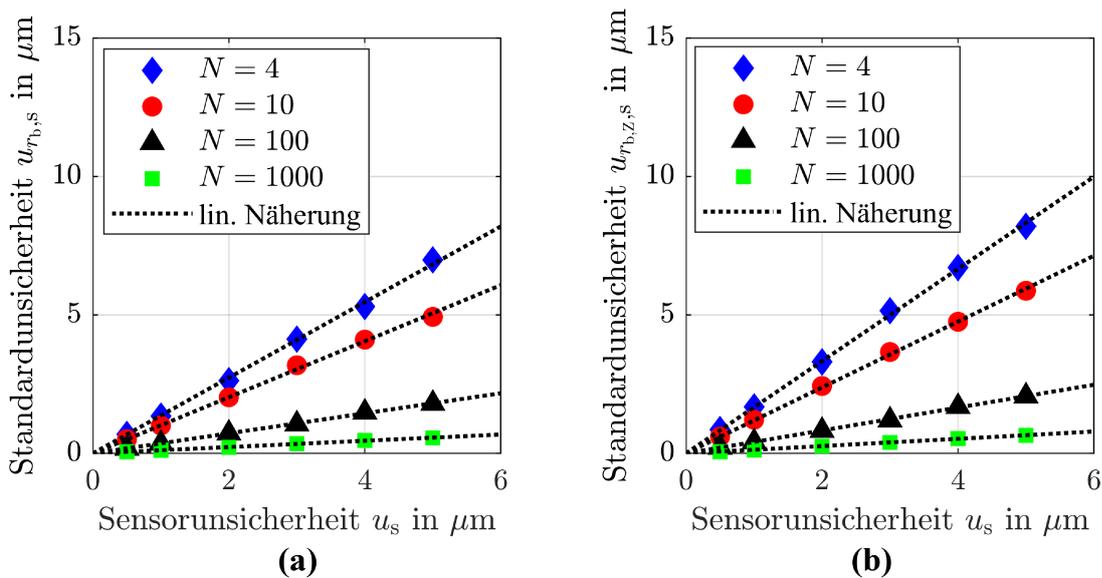


Bild 3.3: Simulationsergebnisse zur Abschätzung des Unsicherheitsbeitrags aus der Abstandsmessung. (a) zeigt den Unsicherheitsbeitrag $u_{r_b,s}$ für den mittleren Grundkreisradius und (b) den Unsicherheitsbeitrag $u_{r_b,Z,s}$ für den zahnindividuellen Grundkreisradius einer mittelgroßen simulierten Verzahnung in Abhängigkeit von der Sensorunsicherheit u_s eines optischen Abstandssensors. Weiterhin wird die Abhängigkeit von der Messpunkteanzahl N pro Zahn dargestellt. Die Monte-Carlo-Simulationen veranschaulichen einen linearen funktionellen Zusammenhang.

Die Monte-Carlo-Simulationen belegen, dass jeweils die Standardunsicherheit des mittleren, als auch zahnindividuellen Grundkreisradius mit zunehmendem Sensorrauschen steigen. Die Standardunsicherheit des zahnindividuellen Grundkreisradius ist dabei 20 % größer als die Standardunsicherheit des mittleren Grundkreisradius. Ein linearer Zusammenhang zwischen der Sensorunsicherheit und der resultierenden Unsicherheit des mittleren und auch zahnindividuellen Grundkreisradius ist zu erkennen und in Bild 3.3 als schwarz gestrichelte Linie gekennzeichnet. Die Steigung des linearen Zusammenhangs hängt dabei insbesondere von der Messpunkteanzahl ab und ist proportional zu $1/\sqrt{N}$. Auf Basis der Monte-Carlo-Simulationen ergibt sich der lineare Zusammenhang zwischen der Standardunsicherheit des Grundkreisradius des simulierten Zahnrads, der Sensorunsicherheit und der Messpunktezahl daher zu $b/\sqrt{N} \cdot u_s$. Der Parameter b beschreibt einen vom gesuchten Formparameter und von der Geometrie des Zahnrads abhängigen konstanten Faktor.

Ein Anstieg der Messpunkte pro Zahn reduziert erwartungsgemäß den Einfluss der Sensorunsicherheit und die Empfindlichkeit der Grundkreisradiusunsicherheit gegenüber der

Sensorunsicherheit. Bei einem Anstieg der Messpunkte pro Zahn von 4 auf 1000 lässt sich unabhängig vom Sensorrauschen eine Reduktion der Standardunsicherheit des mittleren und zahnindividuellen Grundkreisradius von circa 92 % erzielen. Zusammengefasst belegt die Unsicherheitsbetrachtung, dass die Messpunktezahzahl pro Zahn die zufälligen Beiträge aus einer unsicherheitsbehafteten geometrischen Kalibrierung und Abstandsmessung auf die Grundkreisradiusapproximation maßgeblich beeinflusst. Wird die Verzahnungsgeometrie mit beispielsweise 1000 Messpunkten pro Zahn erfasst, sind jeweils aus der Kalibrierung oder Abstandsmessung Unsicherheitsbeiträge $< 1 \mu\text{m}$ ($k = 1$) erreichbar.

Kombinierte Unsicherheit des Grundkreisradius

Bei der optischen Multi-Distanzmessung des Grundkreisradius überlagern sich jedoch die Einflüsse der unsicherheitsbehafteten geometrischen Kalibrierung und Abstandsmessung. Im Folgenden werden die Messbarkeitsgrenzen des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes für die Grundkreisradiusapproximation am Beispiel der kombinierten Messunsicherheit quantifiziert.

Zur Verifikation der erreichbaren Messunsicherheit wird die kombinierte, mit $k = 2$ erweiterte Unsicherheit, resultierend aus den zufälligen Beiträgen der Kalibrierung und Abstandsmessung, mit Monte-Carlo-Simulationen mit $w = 1000$ Wiederholungen abgeschätzt. Es wird geprüft, ob der modellbasierte Messansatz die Unsicherheitsanforderungen für eine Verzahnungsqualität 6 erfüllt. DIN ISO 18653 fordert Messunsicherheiten $< 30 \%$ der Toleranzen [DIN2009], sodass sich für das simulierte mittelgroße Zahnrad für eine Verzahnungsqualität 6 eine erweiterte Messunsicherheit von $6,1 \mu\text{m}$ ($k = 2$) für den Grundkreisradius ergibt.

Bild 3.4 zeigt die Simulationsergebnisse der erweiterten kombinierten Messunsicherheit u_{r_b} für den mittleren Grundkreisradius (a) und $u_{r_{b,z}}$ für den zahnindividuellen Grundkreisradius (b). Zusätzlich ist die Abhängigkeit der kombinierten Unsicherheit von der simulierten Messpunktezahzahl pro Zahn dargestellt. Eine zweite Ordinate veranschaulicht die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 anhand der relativen Unsicherheit, die das Verhältnis zwischen der jeweiligen absoluten Messunsicherheit und der geforderten Grundkreisradiustoleranz $r_{b,tol}$ darstellt. Gemäß den Anforderungen darf die relative Messunsicherheit einen Wert von 0,3 nicht überschreiten.

Die Ergebnisse verifizieren die Erreichbarkeit einer Messunsicherheit für die rotatorisch-scannende Multi-Distanzmessung von Zahnradern mit Verzahnungsqualität 6 sowohl für den mittleren als auch zahnindividuellen Grundkreisradius. Bereits ab ≥ 100 Messpunkten pro Zahn und für Sensorunsicherheiten $\leq 5 \mu\text{m}$ ($k = 1$), beträgt die mit $k = 2$ erweiterte kombinierte Messunsicherheit des mittleren und zahnindividuellen Grundkreisradius $\leq 6 \mu\text{m}$. Die Zielsetzung einer relativen Unsicherheit $\leq 0,3$ wird damit erfüllt. Bis zu einer Sensorunsicherheit $\leq 4 \mu\text{m}$ ($k = 1$) dominiert dabei unabhängig von der Messpunktezahzahl der Unsicherheitsbeitrag der simulierten Kalibrierung die erreichbare Messunsicherheit. Die Monte-Carlo-Simulationen belegen zudem, dass es zur Einhaltung der Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 eine Mindestanzahl an 25 Messpunkten pro Zahn bedarf. Die Streuung der Abstandsmessungen darf dabei jedoch nicht $1 \mu\text{m}$ ($k = 1$) überschreiten. Als Konsequenz geht hervor, dass die Einhaltung der Unsicherheitsanforde-

rungen für Verzahnungsqualität 6 mit punktförmigen Multi-Distanzmessungen nur mit einer scannenden Messstrategie realisierbar ist. Soll der Grundkreisradius beispielsweise mit einer statischen Umsetzung des Multi-Distanz-Messansatzes (vgl. Abschnitt 2.4.1) bestimmt werden, sind zur Einhaltung der Unsicherheitsanforderungen zwangsläufig Liniensensoren einzusetzen.

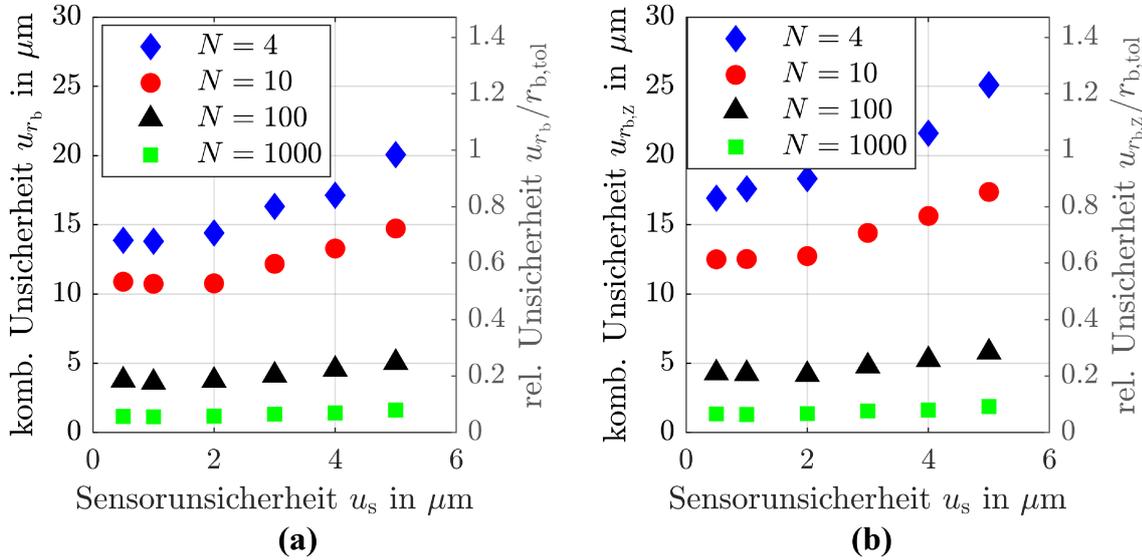


Bild 3.4: Kombinierte, mit $k = 2$ erweiterte Messunsicherheit u_{r_b} für (a) den mittleren Grundkreisradius und $u_{r_{b,z}}$ für (b) den zahnindividuellen Grundkreisradius in Abhängigkeit von der Sensorunsicherheit und Messpunkteanzahl pro Zahn. Als zweite Ordinate ist jeweils die relative Unsicherheit bezogen auf die geforderte Grundkreisradiustoleranz für Verzahnungsqualität 6 angegeben. Die Simulationen gelten für eine rotatorisch-scannende Multi-Distanzmessung.

Simulationen mit 1000 Messpunkten pro Zahn bestätigen daraufhin das Potenzial der Multi-Distanzmessung mit modellbasierter Auswertung des Grundkreisradius. Unabhängig von der Sensorunsicherheit und dem gesuchten Formparameter unterschreitet die abgeschätzte Grundkreisradiusunsicherheit die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 deutlich und erfüllt die Anforderungen von $u_{r_b, VQ3} \leq 2,2 \mu\text{m}$ ($k = 2$) für Verzahnungsqualität 3 (VQ3). Beträgt die Sensorunsicherheit $\leq 1 \mu\text{m}$ ($k = 1$), so sind mit 1000 Messpunkten pro Zahn theoretisch erweiterte Grundkreisradiusunsicherheiten $< 1,5 \mu\text{m}$ ($k = 2$) erreichbar, was den Unsicherheitsanforderungen von Verzahnungsqualität 2 entspricht. Die theoretisch erreichbare Messunsicherheit wird dann primär durch den Unsicherheitsbeitrag der simulierten Kalibrierung begrenzt.

Zusammenfassend verifizieren die Monte-Carlo-Simulationen am Beispiel des Grundkreisradius, dass der modellbasierte Multi-Distanz-Messansatz die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 gemäß DIN ISO 18653 erfüllt. Mit einer hohen Messpunktezahl pro Zahn $N \geq 1000$ sind zudem erweiterte Messunsicherheiten gemäß Verzahnungsqualität 3 beziehungsweise Verzahnungsqualität 2 erreichbar. Die Simulationen belegen damit, dass der Multi-Distanz-Messansatz mit scannender Messstrategie ein erfolgversprechender Ansatz zur Messung der Verzahnungsgeometrie ist.

3.2.2 Skalierbarkeit und dynamischer Bereich

Große Verzahnungen mit metergroßen Durchmessern und beziehungsweise oder Normalmodulen ≥ 10 mm sind für die geometrische Messtechnik besonders herausfordernd. Bei steigendem Durchmesser und Normalmodul des Zahnrads nimmt der Dynamikbereich, das Verhältnis des Zahnraddurchmessers zur erforderlichen Messunsicherheit zu, obwohl die geforderten Toleranzen ebenfalls steigen. Ein stetig ansteigender Dynamikbereich des Messsystems wird demnach mit zunehmender Zahnradgröße benötigt, um den Unsicherheitsanforderungen nach DIN ISO 18653 gerecht zu werden. Als Maß für die Zahnradgröße dient in dieser Arbeit der Kopfkreisdurchmesser d_a , weshalb der dynamische Bereich hier als das Verhältnis zwischen Kopfkreisdurchmesser und Messunsicherheit des Grundkreisradius definiert ist. Für die Qualitätsprüfung von Großverzahnungen unterschiedlicher Größe werden deshalb flexible Messsysteme mit skalierbarem Messvolumen und einem großen Dynamikbereich gefordert. Dieser Abschnitt überprüft daher, ob mittels des Multi-Distanz-Messansatzes trotz einer Skalierung der Zahnradgröße die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 erreicht werden. Die Verifikation der Skalierbarkeit erfolgt dabei anhand zwei weiterer simulierter Zahnräder mit skaliertem Geometrie (vgl. Tabelle 3.7) gegenüber der mittelgroßen Verzahnung aus Abschnitt 3.2.1 und zunächst anhand des mittleren Grundkreisradius. Anschließend erfolgt auf Basis der theoretisch erreichbaren Unsicherheit und der jeweiligen Zahnradgröße die Berechnung des erreichbaren Dynamikbereichs.

Analog zu Abschnitt 3.2.1 wird mittels Monte-Carlo-Simulationen mit $w = 1000$ Wiederholungen jeweils die erreichbare erweiterte Messunsicherheit u_{r_b} des mittleren Grundkreisradius bestimmt. Mit der Skalierung der Zahnradgeometrie nimmt gemäß DIN ISO 1328-1 und Gleichung (2.1) die Grundkreisradiustoleranz $r_{b,tol}$ zu. Aus diesem Grund wird die Skalierbarkeit am Beispiel der relativen Unsicherheit, dem Verhältnis der erreichbaren Messunsicherheit und der geforderten Toleranzen, bewertet. Bis auf eine der jeweiligen skalierten Zahnradgeometrie angepassten idealen Messanordnung, sind die Randbedingungen der Simulationen im Vergleich zu Abschnitt 3.2.1 nicht verändert. Die Sensorausrichtung wird weiterhin mit einem normalverteilten Rauschen mit einer Standardabweichung von $0,05^\circ$ und die x - beziehungsweise y -Komponenten der Sensorposition jeweils mit einer Standardabweichung von $0,005$ mm versehen. Die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes für die Erfassung des Grundkreisradius wird daraufhin für eine Abstandsmessung mit definierter Sensorunsicherheit von $u_s = 5 \mu\text{m}$ und für $N = 1000$ Messpunkte pro Zahn demonstriert. Auf Basis der berechneten erweiterten Grundkreisradiusunsicherheiten wird anschließend der theoretisch erreichbare Dynamikbereich des Multi-Distanz-Messansatzes abgeschätzt und mit den Anforderungen für Verzahnungsqualität 6 verglichen.

Die Ergebnisse zur Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes zeigt Bild 3.5. Während Bild 3.5 (a) zunächst die Absolutwerte der erweiterten kombinierten Messunsicherheit u_{r_b} für den mittleren Grundkreisradius in Abhängigkeit vom Kopfkreisdurchmesser d_a veranschaulicht, stellt Bild 3.5 (b) die relativen Unsicherheiten abhängig vom Kopfkreisdurchmesser dar. Die Ergebnisse zu den jeweiligen Zahnrädern sind mit unterschiedlichen Markern gekennzeichnet.

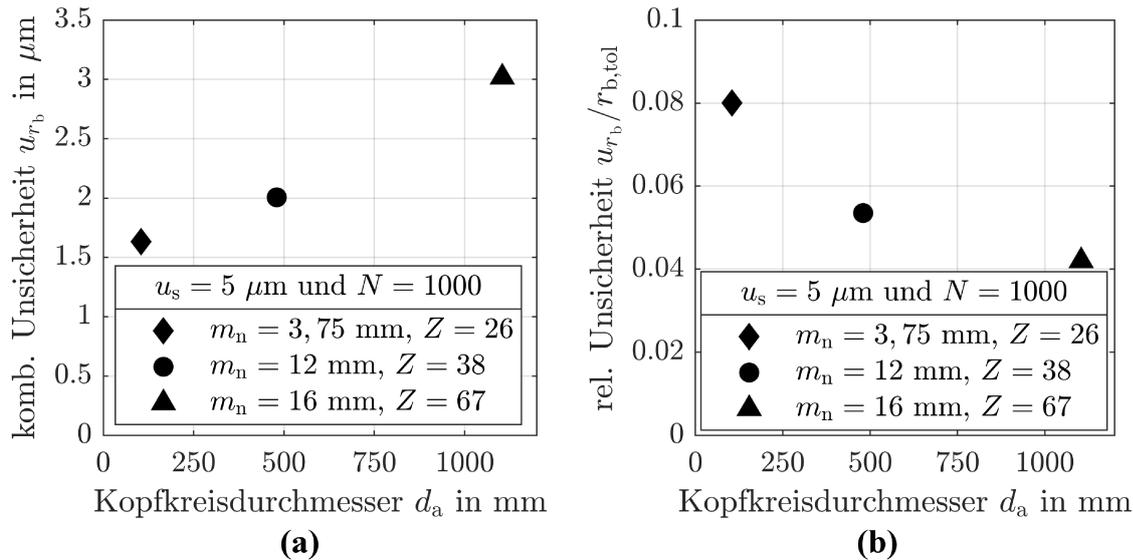


Bild 3.5: Simulationsergebnisse zur Verifizierung der Skalierbarkeit für eine definierte Sensorunsicherheit von $u_s = 5 \mu\text{m}$ und $N = 1000$ Messpunkten pro Zahn. In (a) ist die mit $k = 2$ erweiterte kombinierte Messunsicherheit u_{r_b} des mittleren Grundkreisradius gegenüber dem Kopfkreisradius d_a der simulierten Zahnräder aufgetragen. Die relative Messunsicherheit in Abhängigkeit von dem Kopfkreisradius ist in (b) veranschaulicht.

Unabhängig von der Zahnradgröße sind hinsichtlich der simulierten Randbedingungen (Kalibrierunsicherheiten, Sensorunsicherheit, Messanordnung) relative Unsicherheiten $< 0,3$ erreichbar. Die Unsicherheitsanforderungen für den Grundkreisradius für Verzahnungsqualität 6 werden erfüllt, womit die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes grundsätzlich verifiziert ist. Wie erwartet, steigt die absolute Messunsicherheit des mittleren Grundkreisradius mit einer Skalierung der Zahnradgröße an (vgl. Bild 3.5 (a)). Trotz der Skalierung der Verzahnungen auf über 1 m Durchmesser, sind mit einer Abstandsunsicherheit $\leq 5 \mu\text{m}$ ($k = 1$) und 1000 Messpunkten pro Zahn weiterhin Grundkreisradiusunsicherheiten im niedrigen einstelligen Mikrometerbereich ($\leq 5 \mu\text{m}$) ($k = 2$) erreichbar. Zwar nimmt die absolute Unsicherheit mit der Skalierung der Zahnräder zu, die Zunahme der geforderten Grundkreisradiustoleranzen ist jedoch circa um den Faktor 2 größer. Mit steigendem Kopfkreisradius sinkt daher die ermittelte relative Unsicherheit des Grundkreisradius (vgl. Bild 3.5 (b)). Unter den simulierten Randbedingungen erfüllt der modellbasierte Multi-Distanz-Messansatz mit zunehmenden Zahnradradius in der Theorie sogar Unsicherheitsanforderungen bis zu Verzahnungsqualität 1. Der modellbasierte Multi-Distanz-Messansatz eignet sich demnach insbesondere für die Messung von Großverzahnungen.

Die Eignung des Multi-Distanz-Messansatzes für die Erfassung des Grundkreisradius von Großverzahnungen verdeutlicht zusätzlich der erreichbare dynamische Bereich. In Bild 3.6 sind die Ergebnisse des ermittelten dynamischen Bereichs d_a/u_{r_b} bezüglich der Unsicherheit des mittleren Grundkreisradius gegenüber dem Kopfkreisradius der jeweiligen Verzahnungen aufgetragen. Auch hier kennzeichnen unterschiedliche Marker die zahnradabhängigen Ergebnisse. Zusätzlich sind zum Vergleich die gemäß DIN ISO 18653

und DIN ISO 1328-1 abgeschätzten geforderten dynamischen Bereiche für Verzahnungsqualität 6 eingezeichnet.

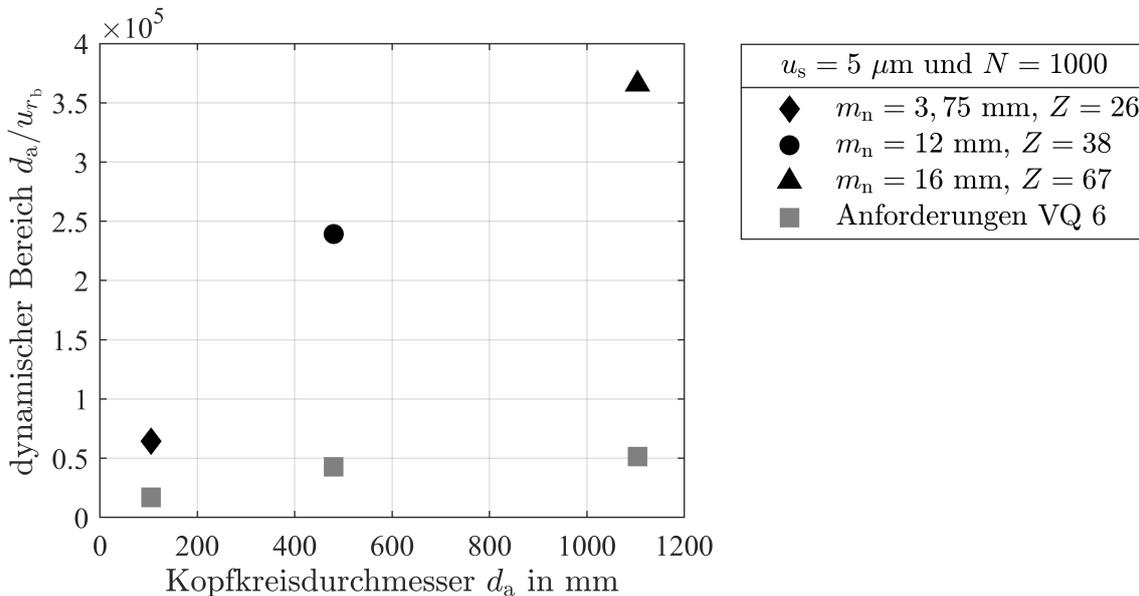


Bild 3.6: Dynamischer Bereich d_a/u_{r_b} bezüglich der ermittelten erweiterten Unsicherheit u_{r_b} des mittleren Grundkreisradius in Abhängigkeit von der Zahnradgröße der simulierten Verzahnungen. Als Maß für die Zahnradgröße dient der Kopfkreisdurchmesser d_a der Verzahnung. Der erreichbare dynamische Bereich ist für eine Sensorunsicherheit von $u_s = 5 \mu\text{m}$ und $N = 1000$ Messpunkten pro Zahn berechnet. Zusätzlich ist vergleichend der erforderliche Dynamikbereich für die Qualitätsprüfung von Verzahnungsqualität 6 angegeben.

Im Ergebnis übertreffen die ermittelten dynamischen Bereiche die Mindestanforderungen für Verzahnungsqualität 6 und verifizieren noch einmal die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes. Mit einem ansteigenden Zahnraddurchmesser nimmt der dynamische Bereich erheblich zu. Die Zunahme der ermittelten absoluten Messunsicherheit ist damit kleiner als der Skalierungsfaktor des Kopfkreisdurchmessers der Verzahnungen. Insbesondere bei Großverzahnungen ist der berechnete erreichbare dynamische Bereich daher um ein Vielfaches größer, als der geforderte Dynamikbereich für Verzahnungsqualität 6. Im Vergleich ist der abgeschätzte dynamische Bereich der simulierten Verzahnung mit einem Kopfkreisdurchmesser von 100 mm um den Faktor 4 größer, während der Dynamikbereich der simulierten Großverzahnung mit einem Kopfkreisdurchmesser von 1102 mm um den Faktor 7 größer ist, als der geforderte Dynamikbereich. Die Ergebnisse des Dynamikbereichs heben damit die Anwendbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes für Großverzahnungsmessungen hervor.

Vergleichbare Ergebnisse veranschaulichen die Simulationen zur Verifikation der Skalierbarkeit am Beispiel des zahnindividuellen Grundkreisradius. Gegenüber den theoretisch abgeschätzten Unsicherheiten des mittleren Grundkreisradius sind die Messunsicherheiten des zahnindividuellen Grundkreisradius geringfügig größer. Die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 werden ebenfalls unabhängig von der Zahnradgröße eingehalten und bieten darüber hinaus keine weiteren neuen Erkenntnisse. Aus diesem Grund wurde auf eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse verzichtet.

Zusammenfassend verifizieren die Simulationen die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes mit modellbasierter Auswertung. Unabhängig von der Größe der simulierten Zahnräder werden hinsichtlich der gewählten Randbedingungen erweiterte kombinierte Messunsicherheiten $< 0,3$ der Grundkreisradiustoleranz erzielt, was den Anforderungen für Verzahnungsqualität 6 entspricht. Der dynamische Bereich steigt darüber hinaus mit zunehmender Zahnradgröße erheblich an und hebt damit die Eignung des Multi-Distanz-Messansatzes insbesondere für die Messung von großen Verzahnungen beziehungsweise Großverzahnungen hervor.

3.3 Fazit

Theoretische Untersuchungen an idealen Verzahnungen verschiedener Größe verifizieren den modellbasierten skalierbaren Multi-Distanz-Messansatz zur Erfassung und Bewertung der Verzahnungsgeometrie am Beispiel des Formparameters Grundkreisradius. Simulationen belegen zunächst die modellbasierte Lösbarkeit des inversen Problems (vgl. Gleichung (2.4)), sodass der gesuchte Formparameter Grundkreisradius direkt aus den Messdaten bestimmbar ist, ohne vorher ein Bezugswerkstückkoordinatensystem einzumessen. Anschließende Monte-Carlo-Simulationen zeigen, dass unabhängig von dem gesuchten Formparameter (mittlerer oder zahnindividueller Grundkreisradius) und unabhängig von der Zahnradgröße Grundkreisradiusunsicherheiten $< 30\%$ der Toleranzen nach Verzahnungsqualität 6 erreichbar sind. Der theoretisch bestimmte dynamische Bereich des Multi-Distanz-Messansatzes ist dabei um bis zu einem Faktor 7 größer, als der für Verzahnungsqualität 6 geforderte dynamische Bereich und belegt insbesondere die Eignung des Messansatzes für Großverzahnungsmessungen. Die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes ist damit verifiziert. Eine Messunsicherheitsabschätzung hat zudem ergeben, dass zufällige Einflüsse auf die Messunsicherheit resultierend aus einer Kalibrierung der Sensoranordnung und der Sensorunsicherheit maßgeblich durch eine Erhöhung der Messpunkte pro Zahn reduziert werden können. Mit beispielsweise 1000 Messpunkten pro Zahn und einer Sensorunsicherheit von $5\ \mu\text{m}$ ($k = 1$), erfüllt der modellbasierte Multi-Distanz-Messansatz abhängig von der Unsicherheit aus der Kalibrierung theoretisch die Unsicherheitsanforderungen für \leq Verzahnungsqualität 3.

4 Charakterisierung optischer Sensoren

Die Unsicherheit des Sensorsystems bei der Zahnformmessung trägt mitunter maßgeblich zur Messunsicherheit des auszuwertenden Grundkreisradius bei. Zur Validierung des skalierbaren Multi-Distanz-Messansatzes sollen in dieser Arbeit kommerziell erhältliche optische Abstandssensoren verwendet werden. Die Verzahnungsmessung ist jedoch für optische Sensoren herausfordernd. Kommerziell erhältliche optische Sensoren sind typischerweise für eine senkrechte Sensorausrichtung auf ebenen Oberflächen mit definierten Rauheiten spezifiziert. Durch die eingeschränkte optische Zugänglichkeit durch benachbarte Zähne kann eine senkrechte Sensoranordnung bei der Verzahnungsmessung nicht immer realisiert werden. Um die gesamte Zahnflanke zu erfassen, müssen die Sensoren beispielsweise in Richtung des Zahnfuß geneigt werden. Durch die gekrümmte Zahnflankengeometrie entsteht so ein stetig variierender Neigungswinkel zwischen der Oberflächennormalen und Sensorachse. Zusätzlich erschweren die Oberflächeneigenschaften der metallisch glänzenden Zahnflanke die optische Verzahnungsmessung, insbesondere auch durch die in Kombination mit der Zahnradgeometrie möglichen auftretenden Mehrfachreflexionen. Aus diesem Grund gilt es zu untersuchen, inwieweit die für eine senkrechte Sensoranordnung spezifizierten Sensordaten auch für die Erfassung der Zahnflankenform zutreffen. Um das Potenzial handelsüblicher optischer Sensoren für die Anwendung an Verzahnungen zu verstehen, soll die an Verzahnungen erreichbare Sensorunsicherheit u_s hinsichtlich der Einflussgrößen:

1. Zahnflankengeometrie - Neigung
2. Zahnflankenoberfläche - Rauheit und Reflexionsvermögen
3. Zahnradgeometrie - Mehrfachreflexionen

für zwei Sensoren charakterisiert werden. Die Sensorunsicherheit der Zahnformmessung wird im Folgenden auch als anwendungsbezogene Sensorunsicherheit bezeichnet.

In Abschnitt 4.1 werden zunächst die optischen Sensoren mit den jeweiligen Sensorspezifikationen eingeführt. Abschnitt 4.2 beschreibt den allgemeinen experimentellen Aufbau zur Charakterisierung der optischen Sensoren und zur Abschätzung der erreichbaren Sensorunsicherheit bei der Zahnformmessung hinsichtlich der zuvor aufgezählten Einflussfaktoren. Anschließend erfolgt in Abschnitt 4.3 die Untersuchung des Einflusses der Neigung der Zahnflankengeometrie auf die optische Zahnformmessung. Abschnitt 4.4 diskutiert daraufhin den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit hinsichtlich der Rauheit und das damit verbundene Reflexionsvermögens auf die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit. In Abschnitt 4.5 wird der durch die Zahnradgeometrie mögliche verursachte Einfluss von Mehrfachreflexionen charakterisiert. Das Kapitel schließt daraufhin mit einem Fazit, in dem die Eignung der optischen Sensoren für Multi-Distanzmessungen diskutiert wird (vgl. Abschnitt 4.6).

4.1 Spezifikation der optischen Sensoren

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Eignung von zwei verschiedenen kommerziell erhältlichen optischen Abstandssensoren für die Multi-Distanzmessung von Verzahnungen untersucht werden. Das Ziel ist es, jeweils die für die Zahnformmessung erreichbare Sensorunsicherheit zu bestimmen. Untersucht werden in dieser Arbeit ein punktförmiger Laser-Triangulationssensor und ein punktförmiger konfokal-chromatischer Sensor. Zunächst werden in Unterabschnitt 4.1.1 die Grundlagen zu den jeweiligen Sensorprinzipien dargelegt. Anschließend folgt in Unterabschnitt 4.1.2 eine Auflistung der spezifizierten Sensoreigenschaften.

4.1.1 Sensorprinzipien

Messprinzip der Laser-Triangulation

Laser-Triangulationssensoren messen Abstände und nutzen dafür das Prinzip der Triangulation (vgl. Bild 4.1) [Trä2015]. Ausgehend von einer Lichtquelle in Form einer Laserdiode wird ein erzeugtes Laserlicht auf die Oberfläche eines zu messenden Objekts gerichtet. Der vom Messobjekt diffus reflektierte Anteil des Laserlichts wird dann über eine Linsenoptik mit einem entsprechenden Triangulationswinkel auf einem hochempfindlichen Zeilensensor, wie zum Beispiel einem CCD- beziehungsweise CMOS-Sensor, abgebildet [Mik2006]. Ändert sich der Abstand der Lichtquelle zum Messobjekt, so ändert sich auch die Position des abgebildeten Lichtflecks auf dem Zeilensensor. Eine Schwerpunktberechnung ermittelt nachfolgend die Position des abgebildeten Lichtflecks auf dem Zeilensensor mit Subpixel-Genauigkeit [Löf2020]. Die Lichtquelle in Form der Laserdiode, der Messfleck auf der Oberfläche des Messobjekts und der reflektierte Messfleck auf der Detektionsebene des Zeilensensors spannen durch den Strahlengang des Laserlichts ein Dreieck auf. Mit der geometrischen Beziehung des Dreiecks kann jeder Position des Lichtflecks auf dem Zeilensensor ein Abstand zugeordnet werden [Trä2015]. Damit das diffus reflektierte Licht im gesamten Messbereich scharf auf dem Zeilensensor abgebildet wird, sind die Lichtquelle, die Linsenoptik der Detektoreinheit und der Zeilensensor nach der Scheimpflugbedingung angeordnet [Löf2020].

Laser-Triangulationssensoren zeichnen sich durch technisch realisierbare Arbeitsabstände von unter anderem > 50 mm und Messbereiche von > 50 mm aus, sodass auch in optisch schwer zugänglichen Zahnluken von beispielsweise Großverzahnungen mit Normalmodulen ≥ 10 mm gemessen werden kann. Triangulationssensoren funktionieren nach dem Prinzip der Triangulation und erfassen diffus gestreutes Licht. Aus diesem Grund sind Triangulationssensoren dazu in der Regel für große Akzeptanzwinkel von unter anderem $> 30^\circ$ ausgelegt. Außerdem sind Messraten > 5 kHz möglich, was schnelle scannende Verzahnungsmessungen ermöglicht.

Konfokal-chromatisches Messprinzip

Das konfokal-chromatische Messprinzip basiert auf der Dispersion polychromatischen Lichts in die einzelnen Wellenlängen [Sch2017] und ist in Bild 4.2 veranschaulicht. Weißes

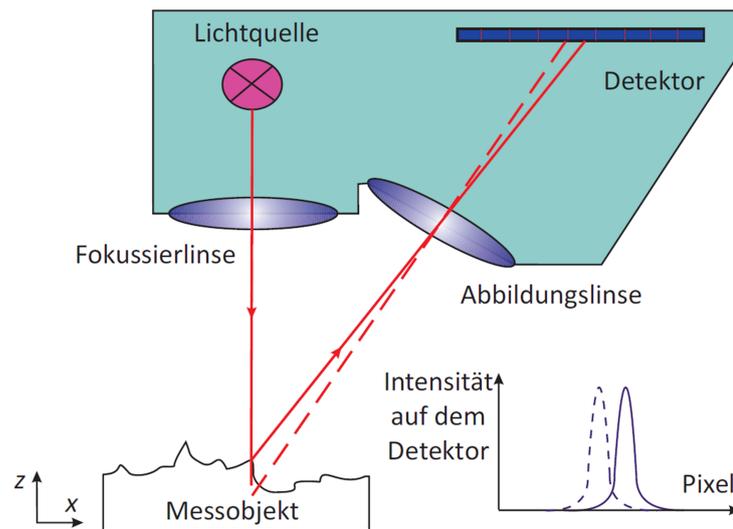


Bild 4.1: Allgemeines Messprinzip von Laser-Triangulationssensoren [Sch2017].

Licht einer Punktlichtquelle mit breitem Farbspektrum wird über einen Strahlteiler auf die Oberfläche eines Messobjekts gerichtet [Rah2009]. Eine dazwischen geschaltete Optik mit chromatischer Abberation zerlegt das weiße Licht daraufhin in die monochromatischen Spektralfarben beziehungsweise Wellenlängen mit ungleichen Brennweiten und spannt so eine frequenzabhängige Fokusebene auf. Abhängig von der Entfernung zum Sensor wird eine bestimmte Spektralfarbe auf der Oberfläche des Messobjekts fokussiert und mit hoher Intensität reflektiert. Mittels eines Spektrometers wird das von der Messoberfläche reflektierte Licht erfasst, in die einzelnen Spektralfarben aufgeteilt und anschließend der Intensitätsverlauf über die Wellenlängen betrachtet [Sch2017]. Um den reflektierten Spektralbereich einzugrenzen, blendet eine Lochblende vor dem Detektor die nicht fokussierten Spektralfarben weitestgehend aus. Der gemessenen Spektralfarbe mit dem Intensitätsmaximum wird darauf folgend ein Abstand zugeordnet. Verschiebt sich das Intensitätsmaximum im Spektrum, entspricht diese Verschiebung einer Änderung des gemessenen Abstands in der Fokusebene [Rah2009].

Auch konfokal-chromatische Sensoren sind mit großen Arbeitsabständen von $> 100\text{ mm}$ und gleichzeitig Messbereichen von bis zu 30 mm kommerziell erhältlich, sodass Großverzahnungen optisch zugänglich sind. Je größer jedoch der Arbeitsabstand konfokal-chromatischer Sensoren ist, desto geringer ist in der Regel die numerische Apertur beziehungsweise der Akzeptanzwinkel eines Sensors. Konfokal-chromatische Sensoren eignen sich daher überwiegend für Sensoranordnungen senkrecht zur Oberfläche der Zahnflanken. Ein weiterer Vorteil konfokal-chromatischer Sensoren ist die geringe erreichbare laterale Auflösung $< 20\text{ }\mu\text{m}$, die zudem über den gesamten Messbereich nahezu konstant ist. Darüber hinaus ermöglichen konfokal-chromatische Sensoren mit entsprechender Auswerteeinheit Messraten $> 10\text{ kHz}$, sodass insbesondere auch bei dynamischen Verzahnungsmessungen eine hohe Messpunktedichte erreichbar ist [Mic2022].

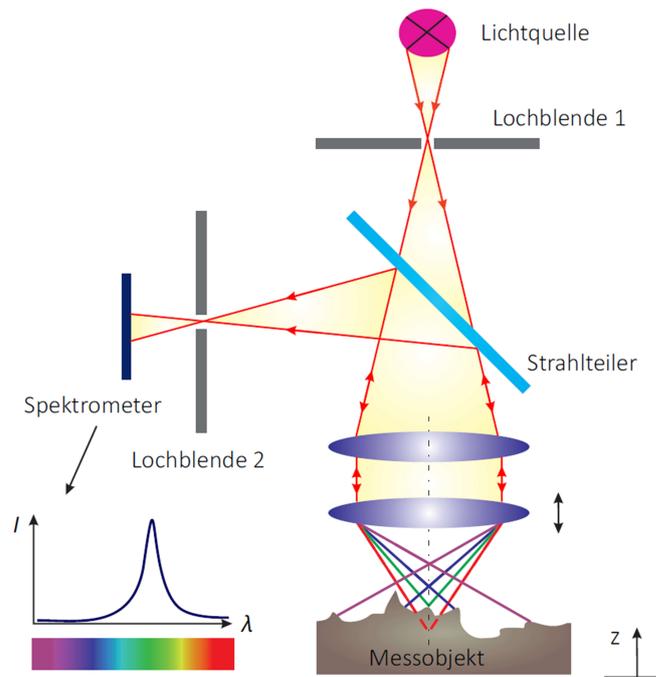


Bild 4.2: Allgemeines Messprinzip konfokal-chromatischer Sensoren [Sch2017].

4.1.2 Sensoreigenschaften

Im Rahmen der Arbeit wird ein Laser-Triangulationssensor mit der Bezeichnung ILD1750-50 und ein konfokal-chromatischer Sensor mit der Bezeichnung IFS2405-10 von der Firma Micro-Epsilon für Verzahnungsmessungen geprüft. Die wichtigsten Spezifikationen der zwei zu untersuchenden optischen Abstandssensoren sind aus den jeweiligen Datenblättern abgeleitet und in der nachfolgenden Tabelle 4.1 zusammengefasst [Mic2021, Mic2022]. Die mit einem Sternchen versehenen Werte sind nicht in den Datenblättern der Sensoren angegeben und wurden daher experimentell bestimmt.

Tabelle 4.1: Spezifikationen des Laser-Triangulationssensors und des konfokal-chromatischen Sensors nach [Mic2021, Mic2022]. Die Reproduzierbarkeit des konfokal-chromatischen Abstandssensors wurde experimentell ermittelt, da im Datenblatt kein Wert für die Reproduzierbarkeit angegeben ist. Die Sensorunsicherheit wurde aus einer Unsicherheitsfortpflanzung aus der Linearitätsabweichung und der Reproduzierbarkeit abgeschätzt.

	Laser-Triangulationssensor	Konfokal-chromatischer Sensor
Bezeichnung	ILD1750-50	IFS2405-10
Messart	punktförmig	punktförmig
Messbereich	50 mm	10 mm
Arbeitsabstand	45 mm	50 mm
Akzeptanzwinkel	$\pm 30^\circ$	$\pm 17^\circ$
laterale Auflösung	55-570 μm	16 μm
Linearitätsabweichung	$\pm 30 \mu\text{m}$	$\pm 2,5 \mu\text{m}$
Reproduzierbarkeit	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 0,3 \mu\text{m}^*$
abgeschätzte Sensorunsicherheit ($k = 1$)	30,1 μm	2,5 μm

Der punktförmige Laser-Triangulationssensor ILD1750-50 ist für eine weiße, diffus reflektierende keramische Oberfläche spezifiziert. Der Messbereich beträgt 50 mm und beginnt bei einem Arbeitsabstand von 45 mm. Ein zulässiger Akzeptanzwinkel von $\pm 30^\circ$ kann aus dem Datenblatt abgeleitet werden, wobei das Winkelverhalten des Laser-Triangulationssensors prinzipiell auch von den Oberflächeneigenschaften des Messobjekts abhängt. Die laterale Auflösung des punktförmigen Laser-Triangulationssensors wird durch den Durchmesser des Lichtflecks vorgegeben und variiert über den Messbereich. In der Messbereichsmittle beträgt die laterale Auflösung $55 \mu\text{m}$ und steigt zu den Randbereichen bis auf $570 \mu\text{m}$ an. Die Linearitätsabweichung beschreibt die maximalen Abweichungen von einer linearen idealen Sensorkennlinie für eine definierte Oberfläche und beträgt für den Laser-Triangulationssensor über den gesamten Messbereich $\pm 30 \mu\text{m}$. Die exakte Kennlinie der Linearitätsabweichung in Abhängigkeit von dem gemessenen Abstand ist für den Triangulationssensor nicht gegeben. Die spezifizierete Reproduzierbarkeit gibt die zufällige Abweichung von unabhängigen, unter gleichen Messbedingungen erfassten Messwerte an und ergibt sich zu $\pm 2 \mu\text{m}$. Auf Basis der Linearitätsabweichung und Reproduzierbarkeit addiert sich die geschätzte gesamte Sensorunsicherheit quadratisch zu $30,1 \mu\text{m}$ ($k = 1$).

Der punktförmige konfokal-chromatische Sensor mit der Bezeichnung IFS2405-10 ist anhand einer ebenen, reflektierenden Glasoberfläche charakterisiert. Der Messbereich des Sensors beträgt 10 mm und beginnt ab einem Arbeitsabstand von 50 mm. Der maximal zulässige Akzeptanzwinkel ist mit $\pm 17^\circ$ angegeben. Die laterale Auflösung beträgt $16 \mu\text{m}$ und ist über den gesamten Messbereich nahezu konstant. Der konfokal-chromatische Sensor zeichnet sich durch eine Linearitätsabweichung von $\pm 2,5 \mu\text{m}$ aus, wobei eine genaue Kennlinie der Linearitätsabweichung in Abhängigkeit von der gemessenen Distanz nicht bekannt ist. Ein Wert für die Reproduzierbarkeit ist nicht im Datenblatt angegeben. Aus diesem Grund wurde die Reproduzierbarkeit experimentell an einer spiegelnden metallischen Oberfläche untersucht und auf $\pm 0,3 \mu\text{m}$ bestimmt. Daraufhin lässt sich aus der Linearitätsabweichung und Reproduzierbarkeit die gesamte Messunsicherheit des konfokal-chromatischen Sensors zu $2,5 \mu\text{m}$ ($k = 1$) ableiten.

4.2 Experimenteller Aufbau zur Sensorcharakterisierung

Um die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit und die Eignung der kommerziell erhältlichen optischen Abstandssensoren für die optische Verzahnungsmessung experimentell zu validieren, werden optische Multi-Distanzmessungen an einem freistehenden Zahnflankennormal, an einem Rauheitsnormal sowie an einer kleinen Geradverzahnung durchgeführt. Die Auswahl der Messobjekte basiert auf die jeweilig zu untersuchende Einflussgröße und wird in den Abschnitten 4.3, 4.4 und 4.5 näher erläutert. Dieser Abschnitt beschreibt zunächst den allgemeinen experimentellen Aufbau, der die Grundlage für die experimentellen Untersuchungen der Einflussgrößen und damit zur Charakterisierung der optischen Sensoren darstellt.

Als Multi-Distanz-Messansatz wird der in Abschnitt 2.4.2 vorgestellte lateral-scannende Messansatz realisiert. Im Vergleich zum statischen Multi-Sensor-Messansatz und dynami-

schen rotatorisch-scannenden Messansatz erfordert der lateral-scannende Ansatz einen vergleichbaren Akzeptanzwinkel, aber einen erheblich kleineren Messbereich, um beispielsweise das Profil einer Zahnflanke vollständig zu erfassen. Für die Zahnformmessung eines Zahnrades mit einem Kopfkreisdurchmesser von 234,1189 mm, einem großen Normalmodul von 10,6418 mm und 20 Zähnen beträgt der erforderliche Akzeptanzwinkel noch circa $\pm 30^\circ$, während der erforderliche Messbereich nur 4 mm beträgt. Der kleinere erforderliche Messbereich beim lateral-scannenden Messansatz ermöglicht daher die Verwendung und Untersuchung optischer Abstandssensoren zur Verzahnungsmessung mit kleinen Messbereichen, wie beispielsweise dem punktförmigen konfokal-chromatischen Sensor IFS2405-10.

Den Aufbau des realisierten lateral-scannenden Multi-Distanz-Messansatzes zur Charakterisierung der optischen Sensoren für Verzahnungsmessungen zeigt Bild 4.3. Als Beispiel ist der experimentelle Aufbau für die Zahnformmessung an dem Zahnflankennormal mit dem konfokal-chromatischen Sensor dargestellt. Als punktförmige Sensoren werden der konfokal-chromatische Sensor IFS2405-10 und der Laser-Triangulationssensor ILD1750-50 eingesetzt. Im Vergleich zu Unterabschnitt 2.4.2 wird hier jedoch nicht der Sensor lateral verschoben, sondern das Messobjekt.

Die optischen Sensoren werden jeweils an einem vertikalen Aluminiumprofil montiert. Ein Positioniersystem justiert die Sensorposition in y - und z -Richtung sowie die Sensorausrichtung um die x -Achse in Bezug zum Messobjekt. Die Positionierung von Sensor und Messobjekt erfolgt mit der Zielsetzung, stets die höchste laterale Auflösung zu erreichen. Diese Randbedingung betrifft vor allem den auf dem Triangulationsprinzip basierenden Sensor, da die spezifizierte laterale Auflösung jeweils in Abhängigkeit vom Messbereich variiert. Beim punktförmigen Laser-Triangulationssensor werden die Messobjekte daher in der Messbereichsmitte positioniert. Der konfokal-chromatische Sensor zeichnet sich aufgrund seiner nahezu konstanten lateralen Auflösung über den gesamten Messbereich aus. Als Messabstand wird im Rahmen dieser Untersuchungen eine Positionierung in der Mitte des Messbereichs angestrebt. Das zu untersuchende Messobjekt ist auf einem manuellen Drehtisch befestigt und zusammen mit dem Positioniersystem des Sensors erfolgt eine senkrechte Ausrichtung in der x - z -Ebene zwischen Sensor und Messobjekt.

Zur lateral-scannenden Multi-Distanzmessung ist das Messobjekt zusammen mit dem manuellen Drehtisch auf einem motorisierten X-Achsen-Lineartisch montiert, der die laterale Scanbewegung ausübt. Die Verfahrachse des Lineartisches steht dabei senkrecht zum Sensor. Unabhängig vom Messobjekt werden nach der Justage der Messanordnung lateral-scannende Linienmessung auf den Oberflächen der Messobjekte ausgeführt und die Messdaten anschließend modellbasiert hinsichtlich der erreichbaren anwendungsbezogenen Sensorunsicherheit untersucht.

Zudem werden alle Messungen in einem klimatisierten Messlabor durchgeführt, um Einflüsse auf die Messungen durch Temperaturschwankungen zu vermeiden. Die Temperaturänderungen betragen weniger als $< 0,4\text{K}$ pro Stunde.

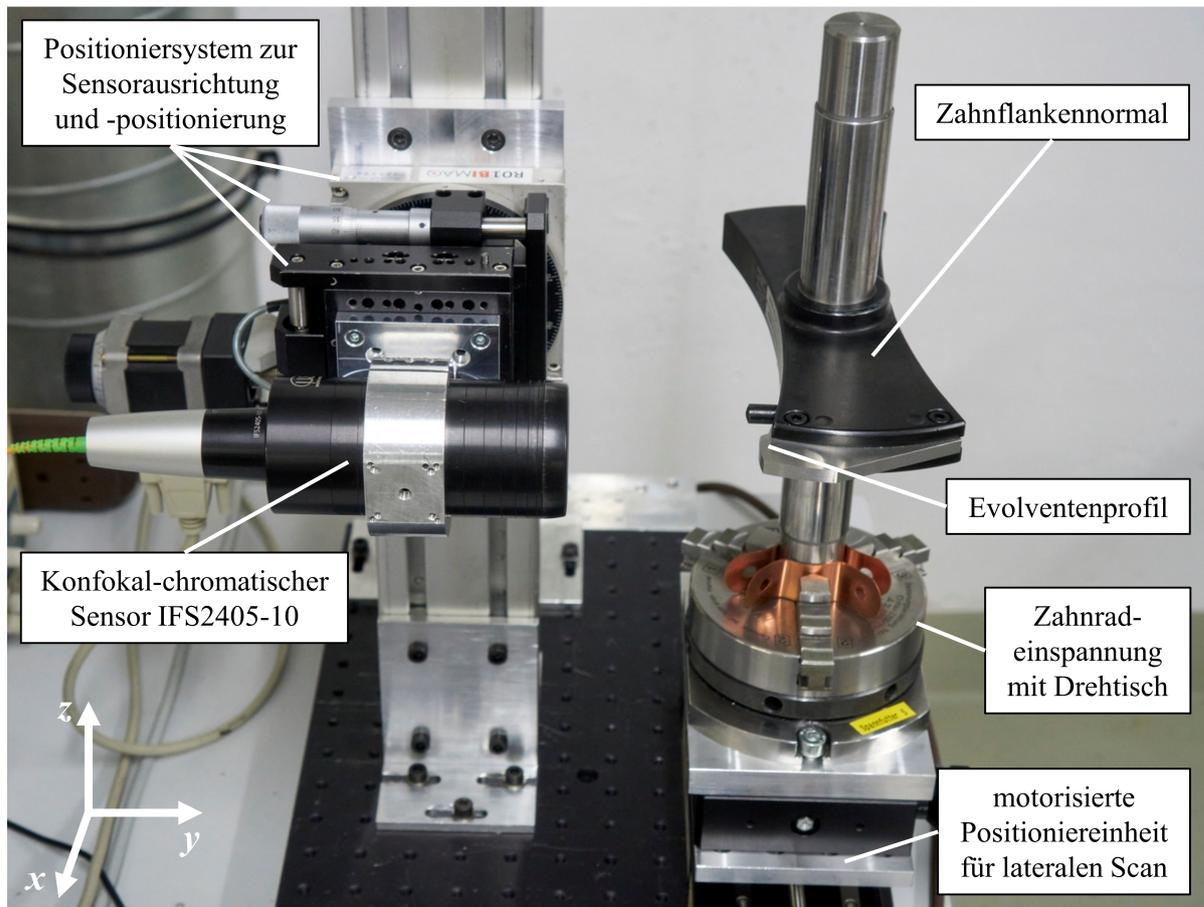


Bild 4.3: Experimenteller Messaufbau des lateral-scannenden Messansatzes zur optischen Zahnformmessung am Beispiel des konfokal-chromatischen Sensors und des Zahnflankennormals. Ein Positioniersystem ermöglicht die Feinjustage der Sensorposition in y - und z -Richtung sowie der Ausrichtung des Sensor um die x -Achse. Der Sensor ist senkrecht auf die Zahnflanke ausgerichtet. Das Zahnflankennormal ist zusätzlich zur Ausrichtung auf einen Drehtisch (Drehung um die z -Achse) eingespannt und wird mit einer motorisierten Positioniereinheit senkrecht zur Sensorachse in x -Richtung bewegt. Der Messaufbau ist in einem klimatisierten Messlabor installiert, wobei die Temperaturänderungen $< 0,4\text{K}$ pro Stunde betragen.

4.3 Einfluss der Zahnflankengeometrie - Neigung

Die optische Messung komplexer Geometrien, wie zum Beispiel Verzahnungen, ist für optische Sensoren herausfordernd. Benachbarte Zähne schränken die optische Zugänglichkeit ein und erfordern eine zur Oberfläche geeignete Sensorausrichtung, um die gesamte Zahnflanke zu erfassen. Zusammen mit der gekrümmten Geometrie einer Zahnflanke entsteht dann ein lokal variierender Neigungswinkel zwischen der Oberflächennormalen und Sensorachse. Typischerweise sind handelsübliche Abstandssensoren für eine definierte, meist senkrechte Messanordnung zum Messobjekt ausgelegt und kalibriert. Die bei der Zahnformmessung auftretenden Neigungswinkel können daher die optische Abstandsmessung und die dabei erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit beeinflussen.

Dieser Abschnitt untersucht daher den Einfluss der gekrümmten Zahnflankenoberfläche und dem daraus resultierenden Neigungswinkel zwischen der Oberflächennormalen und der Sensorachse auf die an Verzahnungen erreichbare Sensorunsicherheit. Zunächst erfolgt

in Unterabschnitt 4.3.1 eine Vorabbetrachtung des zu erwartenden Einflusses durch die variierende Neigung. Anschließend erläutert Unterabschnitt 4.3.2 das methodische Vorgehen zur Charakterisierung des Einflusses der Neigung und stellt dazu das zu untersuchende Messobjekt und die Datenauswertung vor. Unterabschnitt 4.3.3 diskutiert daraufhin experimentelle Messungen an einer Zahnflanke und bestimmt die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit resultierend aus dem Einfluss der Oberflächenneigung.

4.3.1 Vorabbetrachtung

In diesem Unterabschnitt wird der zu erwartende Einfluss der Oberflächenneigung auf die Zahnformmessung vorab betrachtet und auf Basis aktueller Forschungsarbeiten und Vorversuchen diskutiert. Der zu erwartende Einfluss wird in der Reihenfolge Laser-Triangulationssensor und konfokal-chromatischer Sensor erörtert.

Die Oberflächenneigung führt bei der Laser-Triangulation zu einer verzerrten, ungleichmäßigen Verteilung der Lichtenergie auf dem Zeilensensor, was eine Verschiebung des berechneten Schwerpunkts und damit eine systematische Abweichung gegenüber der senkrechten Sensoranordnung verursacht [Li2016, Din2020]. Die Größenordnung der systematischen Messabweichung ist neben dem Neigungswinkel zusätzlich vom Messabstand abhängig, da die laterale Auflösung von Triangulationssensoren über den Messbereich variiert. Mit zu den Messbereichsrändern steigender lateraler Auflösung nimmt der Einfluss der Oberflächenneigung zu, während der Einfluss in der Messbereichsmitte gegen Null strebt [Ma2020]. Auch das Datenblatt des Laser-Triangulationssensors ILD1750-50 quantifiziert im Betrag eine maximale systematische Abweichung von bis zu $250\ \mu\text{m}$ bei $\pm 30^\circ$ Neigung, die an den Randbereichen des Messbereichs auftreten können. Zusammenfassend ist bei der optischen Zahnformmessung mittels Laser-Triangulation mit systematischen Messabweichungen zu rechnen, die zur Reduzierung der erreichbaren anwendungsbezogenen Sensorunsicherheit korrigiert werden müssen.

Zur Korrektur der Messabweichungen, stellen Liu et al. ein nichtlineares Modell vor, das in Abhängigkeit vom Neigungswinkel, dem Messabstand und der Sensorgeometrie die zu erwartenden systematischen Abweichungen abschätzt. Die Korrektur wird dabei an einer Messung an einem Eisenbahnrad demonstriert [Liu2021]. Die Sensorgeometrie des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Sensors ILD1750-50 ist jedoch nicht bekannt, weshalb eine Korrektur der Messdaten der Zahnformmessung mittels des Modells von Liu et al. nicht möglich ist. Um die systematischen Messabweichungen alternativ zu reduzieren, empfiehlt sich eine Messung in der Messbereichsmitte, wo der Einfluss der Oberflächenneigung gegen Null strebt.

Darüber hinaus besteht die Annahme, dass eine Verkippung der Oberfläche zusätzlich zu einem Anstieg der zufälligen Messabweichungen führt, insbesondere wenn der Neigungswinkel den Randbereich des Akzeptanzwinkels erreicht. Infolge der Verkippung sinkt das Signal-zu-Rausch-Verhältnis und die zufälligen Messabweichungen steigen. Ein symmetrischer Anstieg der Streuung mit betragsmäßig steigendem Neigungswinkel wird erwartet. Der konkrete Einfluss auf die erreichbare Sensorunsicherheit bei der Zahnformmessung ist im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchen.

Die konfokal-chromatische Abstandsmessung wird gemäß [Cla2020, Sat2022, Sep2018] ebenfalls systematisch durch eine gekrümmte beziehungsweise geneigte Oberfläche beeinflusst. Claus et al. zeigen, dass sich das Intensitätsmaximum in Richtung kürzerer Wellenlängen verschiebt, wenn auf einer geneigten Oberfläche gemessen wird. Infolgedessen verringert sich der gemessene Abstand und es entsteht eine negative systematische Messabweichung [Cla2020]. Das Datenblatt des konfokal-chromatischen Sensors IFS2405-10 berichtet ebenfalls von möglichen Messabweichungen an geneigten Oberflächen, quantifiziert diese jedoch nicht.

Für eine quantitative Abschätzung eines möglichen systematischen Einflusses und zur anschließenden Korrektur wurden aus diesem Grund Vorversuche an einem metallischen, glänzenden Zylindernormal durchgeführt. Der Sensor wurde zunächst möglichst senkrecht zur Zylinderachse ausgerichtet und anschließend wurde die Zylinderoberfläche quer zur Zylinderachse lateral gescannt. Mittels einer Kreisapproximation wurden die Messdaten an die Nenngeometrie des Zylinders eingepasst, die lokalen Messabweichungen entlang der Sensorachse bestimmt und die zu den Messpunkten zugehörigen Neigungswinkel zwischen den Oberflächennormalen und der Sensorachse abgeschätzt. Die Vorversuche bestätigen nahezu symmetrische winkelabhängige negative systematische Messabweichungen von bis zu $-20\ \mu\text{m}$ für Neigungswinkel im Bereich von $\pm 17^\circ$, wobei zusätzliche Einflüsse durch beispielsweise eine nicht ideal senkrechte Sensorausrichtung nicht komplett ausgeschlossen werden können. Basierend auf diesen Messergebnissen können Verzahnungsmessungen mittels des konfokal-chromatischen Sensors korrigiert und die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit bestimmt werden.

Zusätzlich ist bei der konfokal-chromatischen Abstandsmessung ein zufälliger Einfluss durch eine Oberflächenneigung zu erwarten. Nouria et al. berichten, dass mit steigendem Neigungswinkel zwischen der Oberflächennormalen und der Sensorachse die Intensität des zurück reflektierten Lichts sinkt, womit auch das Signal-zu-Rausch-Verhältnis abnimmt [Nou2014]. Wie auch beim Triangulationssensor wird ein symmetrischer Einfluss bei betragsmäßig steigenden Neigungswinkeln erwartet. Ein konkreter Beitrag zur erreichbaren Sensorunsicherheit für den IFS2405-10 ist jedoch nicht bekannt und soll in dieser Arbeit experimentell untersucht werden.

4.3.2 Messobjekt und Messdatenauswertung

Der Einfluss der gekrümmten Zahnflankengeometrie und dem daraus resultierenden variierenden Neigungswinkel zwischen der Oberflächennormalen und der Sensorachse wird im Rahmen dieser Arbeit an einem bekannten Zahnflankennormal untersucht. Das Zahnflankennormal stellt eine einzelne freistehende Zahnflanke eines nicht modifizierten Evolventenzahnrads mit geschliffener metallischer Oberfläche dar (vgl. Bild 4.4). Die wesentlichen (Geometrie-)Parameter des Zahnflankennormals sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Aufgrund des großen Normalmoduls von $10,6418\ \text{mm}$ kann das Zahnflankennormal als Großverzahnung angesehen werden. Zusätzlich zu den Geometrieparametern ist die experimentell bestimmte Rauheit angegeben.

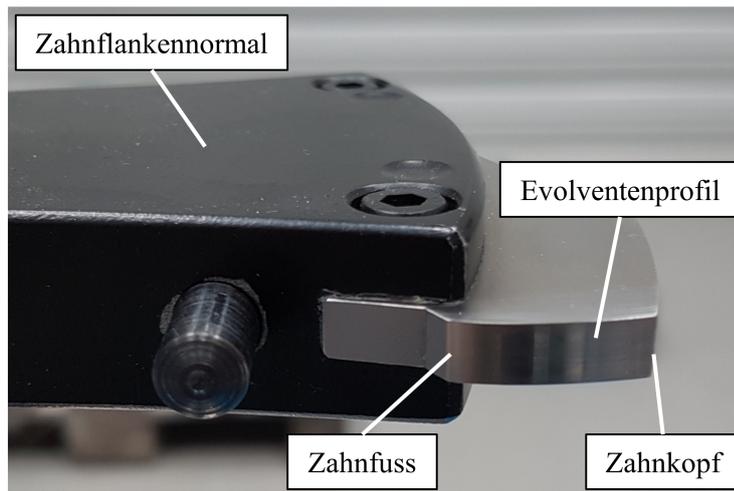


Bild 4.4: Freistehendes Zahnflankennormal mit einer Nenngeometrie mit einem Kopfkreisdurchmesser von 234,1189 mm, einem Normalmodul von 10,6418 mm, 20 Zähnen. Am Zahnflankennormal wird die Eignung des Laser-Triangulationssensors und des konfokal-chromatischen Sensors für Zahnradformmessungen experimentell überprüft und der Einfluss der Oberflächenneigung auf die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit untersucht.

Tabelle 4.2: (Geometrie-)Parameter eines freistehenden Zahnflankennormals mit Evolventenprofil.

	Zahnflankennormal
Kopfkreisdurchmesser d_a in mm	234,1189
Normalmodul m_n in mm	10,6418
Zähnezahl z	20
Mittenrauwert R_a in μm	0,077

Das freistehende Zahnflankennormal ist besonders geeignet, um den Einfluss der Oberflächenneigung auf die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit zu untersuchen, da keine Nachbarzähne die optische Zugänglichkeit der Sensoren einschränken. Die freie Zugänglichkeit ermöglicht eine Messanordnung, mit denen die gesamte Profilgeometrie der Zahnflanke innerhalb eines Messbereichs von $< 2\text{ mm}$ messbar ist und dabei am Zahnfuß und -kopf im Betrag Neigungswinkel von $< 17^\circ$ erreicht. Diese realisierbare Messanordnung ist vor allem für die Triangulationsmessung vorteilhaft, um den systematischen Einfluss durch die variierende Oberflächenneigung zu reduzieren. Nach dem Modell von [Liu2021] und einer geschätzten Sensorgeometrie des ILD1750-50 ergibt sich die zu erwartende systematische Messabweichung im Betrag zu $< 3\mu\text{m}$, wenn in einem Bereich von $\pm 1\text{ mm}$ um die Messbereichsmittle und bei $\pm 17^\circ$ Neigung gemessen wird. Gegenüber der spezifizierten Sensorunsicherheit des Triangulationssensors von $30,1\mu\text{m}$ sind die zu erwartenden systematischen Messabweichungen vernachlässigbar. Auch ist mit dem konfokal-chromatischen Sensor IFS2405-10 die gesamte Profilgeometrie messbar, da die realisierbaren betragsmäßigen Neigungswinkel von $< 17^\circ$ innerhalb des Akzeptanzbereichs des Sensors liegen. Zudem treten keine Mehrfachreflexionen durch Nachbarzähne auf, die die Zahnformmessungen zusätzlich beeinflussen. Darüber hinaus ist die Rauheit der Zahnflanke bekannt, sodass der Einfluss der Oberflächenneigung zunächst für eine definierte,

gleichbleibende Rauheit charakterisiert werden kann.

Um anschließend die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit u_s der zu untersuchenden Abstandssensoren bei der Zahnformmessung zu quantifizieren, wird folgende Messdatenauswertung präsentiert. Die Berechnung der bei der Zahnformmessung erreichbaren Sensorunsicherheit erfolgt durch einen Vergleich der gemessenen Zahnflanken-geometrie mit Referenzdaten auf Basis der in Abschnitt 2.3 vorgestellten modellbasierten Auswertung.

Als Maß für die anwendungsbezogene Sensorunsicherheit der Zahnformmessung werden die Lotabstände $d_{\text{lot},i}$ zwischen der gemessenen Geometrie und der idealen Referenzgeometrie betrachtet. Zur Berechnung der Lotabstände zwischen den Mess- und Referenzdaten der Zahnflanke, müssen die gemessene Zahnflanken- und Referenzgeometrie in ein gemeinsames Koordinatensystem übertragen werden. Als gemeinsames Koordinatensystem wird das Werkstückkoordinatensystem gewählt. Die Transformation der Messdaten $P_{a,i}$ in das Werkstückkoordinatensystem erfordert jedoch die Kenntnis der relativen Position und Ausrichtung des optischen Sensors zum Werkstückkoordinatensystem. Da die Messanordnung nicht geometrisch justiert beziehungsweise kalibriert ist, ist die exakte Transformation (Translation: (x_t, y_t) , Rotation: ϕ_0) zwischen den Koordinatensystemen nicht bekannt. Daher werden die Messdaten unter der Annahme, dass sich der Mittelpunkt des Zahnrads idealerweise in der Mitte des Werkstückkoordinatensystems befindet, an die Referenzgeometrie approximiert.

Die Berechnung der Lotabstände basiert dabei auf der Lösung des inversen Problems von Gleichung (2.6). Das inverse Problem ergibt sich zu

$$d_{\text{lot},i} = h(P_{a,i}, \zeta_i, \theta_Z, \psi_b, x_t, y_t, \phi_0, r_b), \quad (4.1)$$

wobei in diesem Fall der Grundkreisradius r_b zusätzlich bekannt ist. Der Parameter ζ_i beschreibt den Wälzwinkel, θ_Z den Winkel zur Mittelachse des Zahnes Z und ψ_b den Zahndickenhalbwinkel. Mittels Gleichung (2.8) und Gleichung (2.9) werden dann die Transformationsparameter (x_t, y_t, ϕ_0) und Lotabstände $d_{\text{lot},i}$ bestimmt.

Die Lotabstände stellen die lokalen Messabweichungen dar und werden durch systematische und zufällige Effekte beeinflusst. Systematische Messabweichungen werden typischerweise auf Basis von einer Kalibrierung korrigiert, sofern die Ursache der systematischen Abweichung bekannt ist. Verbleibende unbekannt systematische Abweichungen werden gemäß GUM als zufällige Messabweichungen behandelt [JCG2008]. Die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit bei der Zahnformmessung wird also primär durch zufällige Messabweichungen beeinflusst. Daher wird in dieser Arbeit die Standardabweichung der zufälligen lokalen Abweichungen als Maß für die Sensorunsicherheit der Zahnformmessung bewertet. Die Auswertung der Sensorunsicherheit der Zahnformmessung ist in Bild 4.5 noch einmal zusammengefasst.

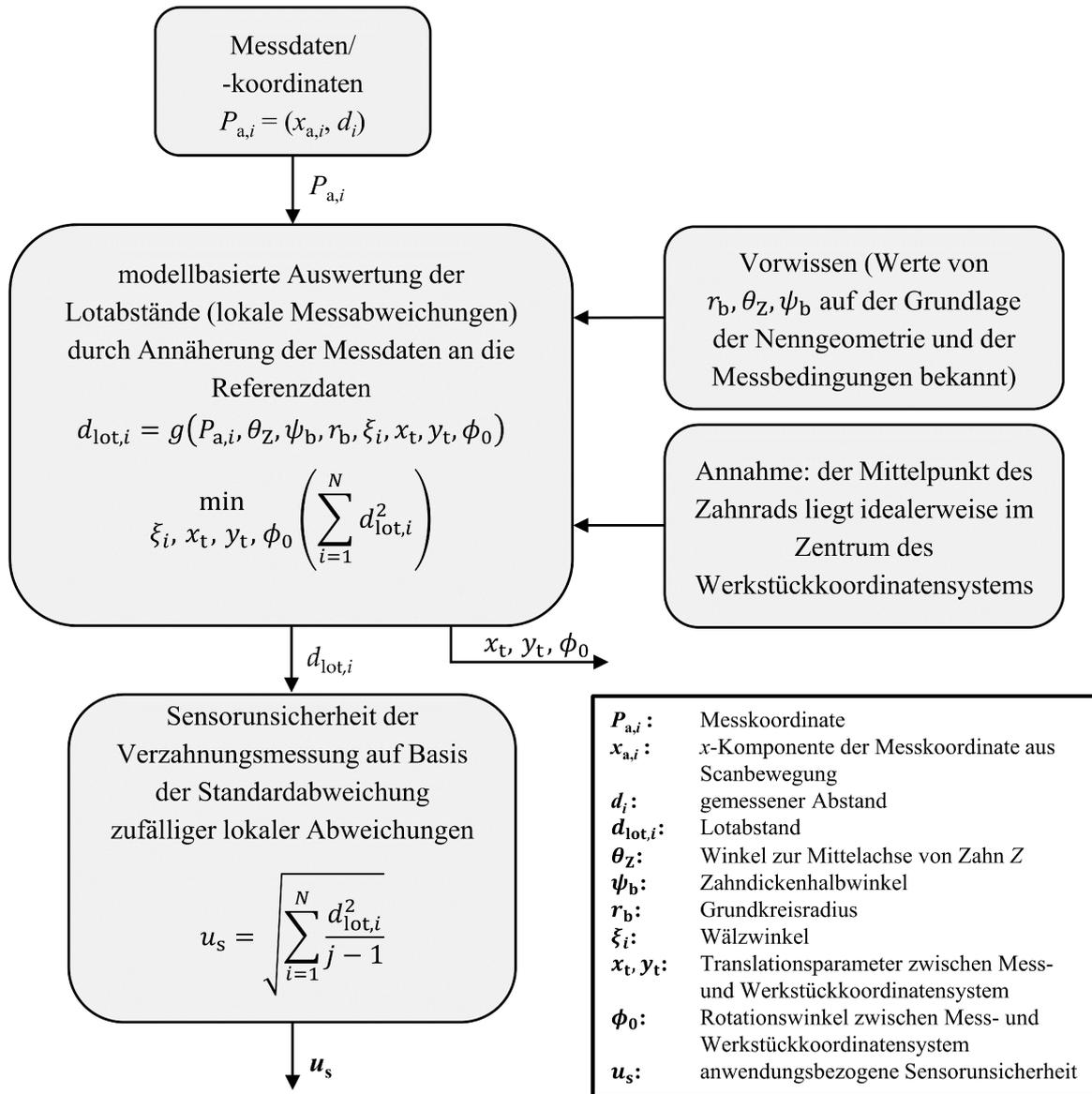


Bild 4.5: Verfahren zur Berechnung und Bewertung der erreichbaren anwendungsbezogenen Sensorunsicherheit u_s optischer Sensoren zur Zahnformmessung.

4.3.3 Experimentelle Ergebnisse

Dieser Abschnitt untersucht die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit der beiden optischen Sensoren an einem Zahnflankennormal hinsichtlich der Einflussgröße Oberflächenneigung. Die Ausrichtung der Zahnflanke zu den Sensoren erfolgt mit dem Ziel, den maximalen Zahnflankenbereich zu erfassen. Dazu wird das Zahnflankennormal in Richtung des jeweiligen Sensors gedreht, bis die Neigungswinkel zwischen der Oberflächennormalen und der Sensorachse sowohl am Zahnfuß als auch am Zahnkopf im Betrag etwa gleich groß sind und $< 17^\circ$ betragen. Die Zahnflanke wird in der Messbereichsmittle der Sensoren positioniert, um systematische Einflüsse insbesondere bei der Laser-Triangulationsmessung aufgrund der Oberflächenneigung zu reduzieren. Die Profilgeometrie der Zahnflanke wird lateral schrittweise mit einer Auflösung von 0,175 mm in vier verschiedenen Ebenen gescannt, wobei lediglich die Messposition in der Höhe

variiert. Infolgedessen kann die zufällige Streuung der lokalen Messabweichungen der Wiederholungsmessungen in Abhängigkeit von annähernd vergleichbaren Neigungswinkeln betrachtet werden. Pro Messposition werden 100 Abstandsmessungen durchgeführt und insgesamt 96 Messpositionen pro Ebene sowohl mit dem Triangulationssensor ILD1750 als auch mit dem konfokal-chromatischen Sensor IFS2405-10 erfasst. Nach der Zahnformmessung werden die Messdaten des konfokal-chromatischen Sensors auf Basis der Vorversuche am Zylindernormal (vgl. Unterabschnitt 4.3.1) vor der Auswertung der erreichbaren anwendungsbezogenen Sensorunsicherheit mathematisch korrigiert. Zur Korrektur werden zunächst die systematisch abweichenden Messdaten an die Referenzgeometrie approximiert, die auftretenden Neigungswinkel geschätzt und die neigungswinkelabhängigen gemessenen Abstände korrigiert. Aufgrund der realisierten Messanordnung und der Korrektur der systematischen Messabweichung durch die Oberflächenneigung sind keine dominanten systematischen Einflüsse auf die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit zu erwarten.

Bild 4.6 veranschaulicht zunächst die an die Referenzgeometrie approximierten Messdaten im Werkstückkoordinatensystem am Beispiel einer Messreihe für (a) den Laser-Triangulationssensor und (b) den konfokal-chromatischen Sensor. Die blauen Punkte stellen jeweils die Messpunkte und die schwarze Linie die ideale Referenzzahnflanke dar. Die Ergebnisse zeigen, dass beide Sensoren die gesamte Profilgeometrie der Zahnflanke erfassen können. Die Messdaten folgen dem Trend der Referenzgeometrie und entsprechend den Erwartungen, sind gemäß der gewählten Messanordnung und Korrektur keine dominanten systematischen Messabweichungen zu erkennen.

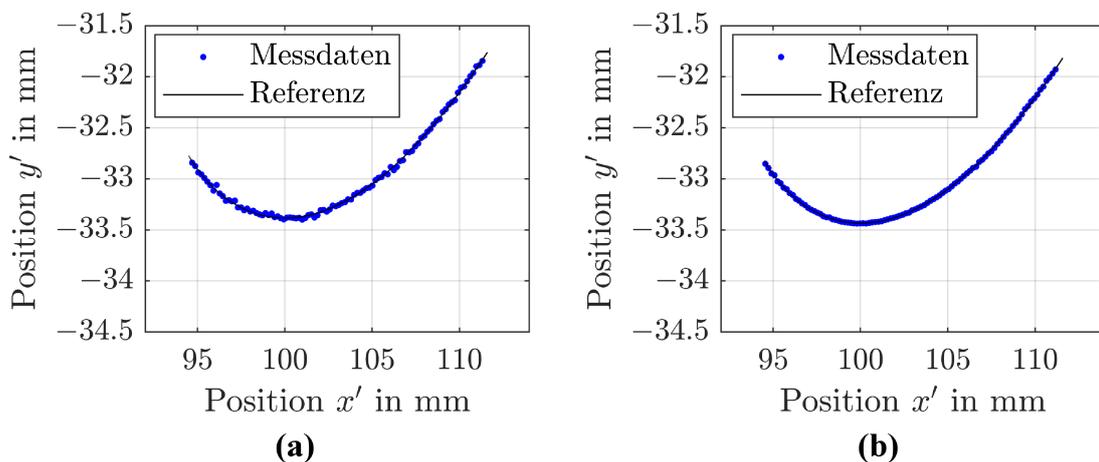


Bild 4.6: Messergebnisse der Zahnflankennormalmessung mit (a) dem laser-Triangulationssensor ILD1750-50 und (b) dem konfokal-chromatischen Sensor IFS2405-10. Die blauen Punkte symbolisieren die transformierte optisch erfasste Zahnflankenform im Vergleich zur schwarz eingezeichneten Referenzgeometrie im Werkstückkoordinatensystem.

Auch im Rahmen der Wiederholungsmessungen sind keine wesentlichen systematischen Messabweichungen sichtbar, weder bei den Triangulationsmessungen noch bei den konfokal-chromatischen Messungen. Bild 4.7 zeigt dazu die berechneten lokalen Mess-

abweichungen zwischen der Ist- und Referenzgeometrie in Form der Lotabstände d_{lot} in Abhängigkeit von der x' -Komponente der Messposition für (a) den Triangulationssensor und (b) den konfokal-chromatischen Sensor. Um die Abhängigkeit der lokalen Messabweichungen von der Oberflächenneigung zu bewerten, ist zusätzlich eine zweite Abszisse mit den abgeschätzten auftretenden Neigungswinkeln τ dargestellt. Die Neigungswinkel werden dabei auf der Grundlage der approximierten Messdaten bestimmt, wobei eine nahezu senkrechte Ausrichtung des Sensors zur Achse der lateralen Scanrichtung angenommen wird. Die berechneten Neigungswinkel sind also eine mathematische Schätzung, die geometrisch plausibel erscheint.

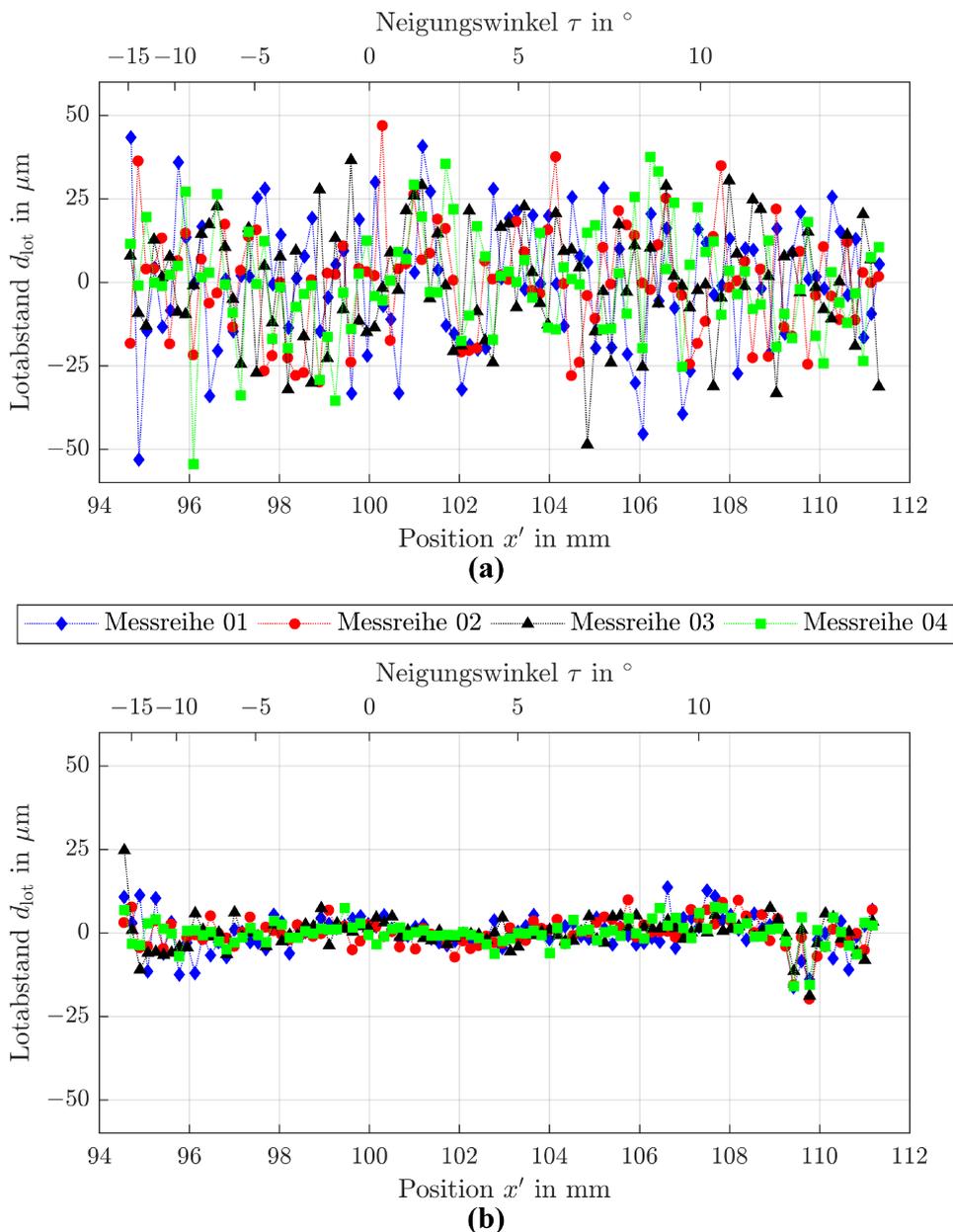


Bild 4.7: Ermittelte Lotabstände d_{lot} zwischen der gemessenen Geometrie und der Referenzgeometrie des Zahnflankennormals abhängig von der x' -Komponente des Messpunktes und geschätzten Neigungswinkels τ für (a) den Triangulationssensor ILD1750-50 und (b) den konfokal-chromatischen Sensor IFS2405-10. Gezeigt sind die Ergebnisse für vier Vergleichsmessungen in verschiedenen Ebenen.

Der Verlauf der Streuung in Abhängigkeit von der gemessenen x' -Position beziehungsweise den abgeschätzten Neigungswinkeln τ beider Sensoren unterscheidet sich in den vier Vergleichsmessungen überwiegend zufällig. Daher ist davon auszugehen, dass die realisierte Messanordnung bei der Triangulationsmessung sowie die Korrektur der konfokal-chromatischen Messung systematische Messabweichungen durch die Oberflächenneigung weitestgehend reduzieren und die verbleibenden lokalen Messabweichungen primär zufällig beeinflusst werden. Auf Basis der empirischen Standardabweichung der Lotabstände lässt sich daraufhin die erreichbare Sensorunsicherheit der Zahnformmessung bestimmen (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Die erreichte anwendungsbezogene Sensorunsicherheit der Triangulationsmessungen beträgt $17,3 \mu\text{m}$ für $k = 1$, wobei maximale lokale Abweichungen von circa $\pm 50 \mu\text{m}$ sichtbar sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die spezifizierte Messabweichung (Linearitätsabweichung) des Laser-Triangulationssensors von $\pm 30 \mu\text{m}$ für die Zahnradformmessung am Zahnflankennormal nicht eingehalten werden kann. Bei der konfokal-chromatischen Messung beträgt die auf Basis der empirischen Standardabweichung abgeschätzte, erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit $4,7 \mu\text{m}$ ($k = 1$). Es treten insbesondere am Rand des Akzeptanzbereichs maximale lokale zufällige Abweichungen von bis zu $25 \mu\text{m}$ auf, sodass auch hier die Sensorspezifikation der Linearitätsabweichung nicht eingehalten wird.

Es wird angenommen, dass sich die verbleibenden zufälligen Messabweichungen der Sensoren aus dem Einfluss der Neigung und aus der Wechselwirkung mit der zufällig verteilten Oberflächentopografie überlagern. Mit steigendem Neigungswinkel in Richtung des Akzeptanzwinkels der Sensoren sinkt das Signal-zu-Rausch-Verhältnis und die Streuung der Messung nimmt zu.

Um einen potenziellen Einfluss der Oberflächenneigung auf die erreichbare Sensorunsicherheit bei der Zahnformmessung zu validieren, zeigt Bild 4.8 die Streuung der Lotabstände $\sigma_{d_{\text{lot}}}$ der vier Wiederholungsmessungen in Abhängigkeit vom geschätzten Neigungswinkel τ für (a) die Triangulationsmessungen und (b) die konfokal-chromatischen Messungen. Aufgrund der unterschiedlichen Größenordnungen der ermittelten Streuungen $\sigma_{d_{\text{lot}}}$ des Laser-Triangulationssensors und konfokal-chromatischen Sensors sind die Ordinaten verschieden skaliert. Die ermittelten Lotabstandstreuungen $\sigma_{d_{\text{lot}}}$ der Triangulationsmessungen verdeutlichen keine eindeutige Abhängigkeit vom Neigungswinkel. Ein Anstieg der Streuung ist zwar in Richtung des Zahnfußes (negative Neigungswinkel) zu beobachten, in Richtung des Zahnkopfes (positive Neigungswinkel) ist bei betragsmäßig vergleichbaren Winkeln jedoch keine Zunahme der Streuung zu sehen. Die Ergebnisse entsprechen damit nicht der erwarteten symmetrischen Zunahme der zufälligen Messabweichungen bei einer steigenden Oberflächenneigung. Eine Ursache wird darin vermutet, dass die auftretenden Neigungswinkel von $\pm 15^\circ$ das Signal-zu-Rausch-Verhältnis des Sensors noch nicht maßgeblich beeinflussen. Triangulationssensoren messen diffus reflektiertes Licht, sodass gegebenenfalls erst zum Rand des spezifizierten Akzeptanzbereichs von $\pm 30^\circ$ des ILD1750-50 dominante zufällige Neigungswinkeleinflüsse auftreten.

Zusammenfassend ist kein dominanter zufälliger Einfluss durch eine Oberflächenneigung von $\pm 15^\circ$ auf die erreichbare Sensorunsicherheit bei der Zahnformmessung mit dem Laser-Triangulationssensor ILD1750-50 zu beobachten. Es wird vermutet, dass die

berechneten lokalen Messabweichungen maßgeblich aus Wechselwirkungen mit der Oberflächenbeschaffenheit resultieren.

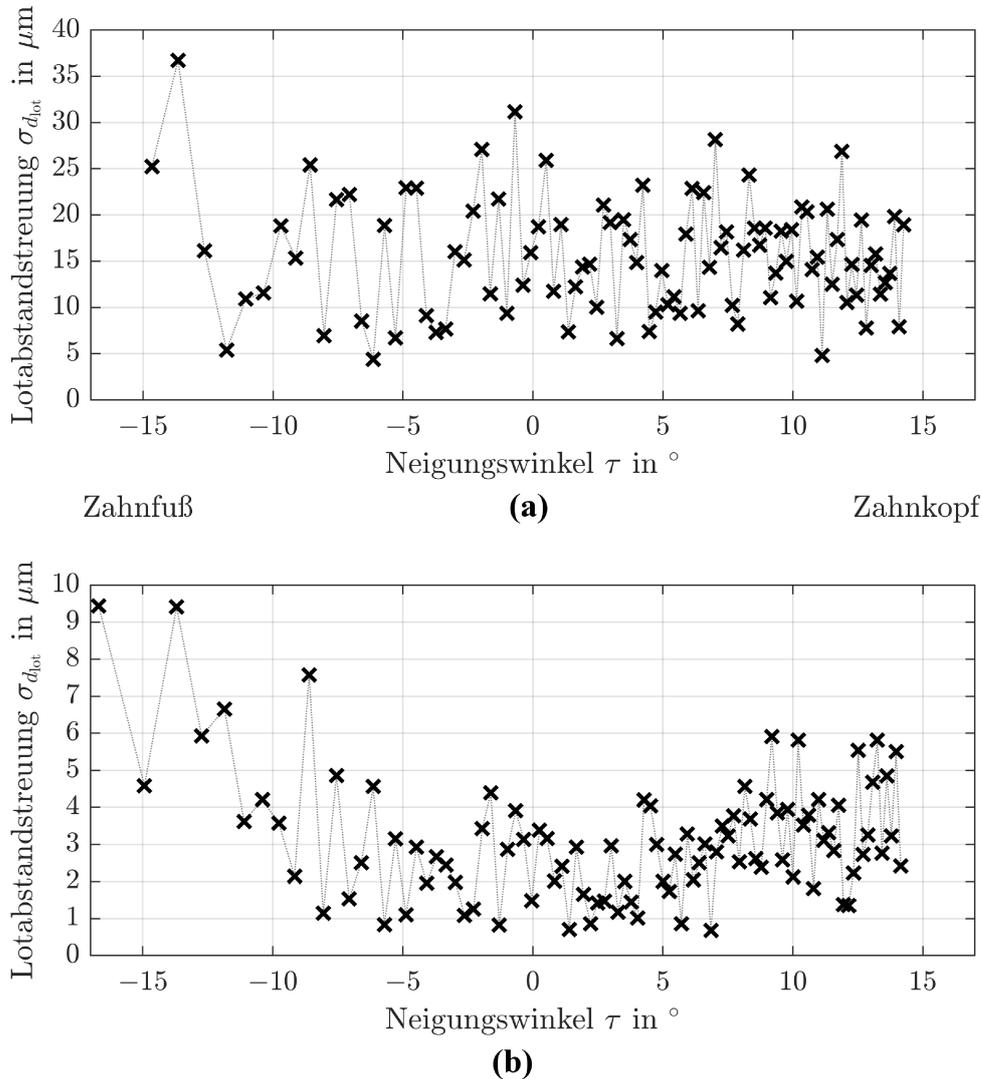


Bild 4.8: Berechnete Streuung der Lotabstände $\sigma_{d_{\text{lot}}}$ in Abhängigkeit vom Neigungswinkel τ für vier Vergleichsmessungen am Zahnflankennormal in verschiedenen Ebenen, aber annähernd gleichen Neigungswinkeln. (a) zeigt die Ergebnisse für die Laser-Triangulationsmessung und (b) die Ergebnisse der konfokal-chromatischen Zahnformmessung. Die y -Achsen sind zur Veranschaulichung der sensorspezifischen Einflüsse unterschiedlich skaliert.

Die Streuung der Lotabstände $\sigma_{d_{\text{lot}}}$ der konfokal-chromatischen Zahnformmessung deutet auf einen Einfluss der Oberflächenneigung auf die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit hin. Wie erwartet, nimmt die Streuung mit betragsmäßig steigenden Neigungswinkeln annähernd symmetrisch zu. Insbesondere ab Neigungswinkeln von $\pm 8^\circ$ ist ein Anstieg der zufälligen Messabweichungen zu beobachten.

Basierend auf den Ergebnissen von Bild 4.8 (b) ist davon auszugehen, dass der Einfluss der Neigung bei der Zahnformmessung mit dem IFS2405-10 erst ab Neigungswinkeln von $\pm 8^\circ$ auftritt. Es wird vermutet, dass innerhalb des Neigungswinkelbereichs von $-8^\circ < \tau < 8^\circ$ dann ein Einfluss durch die Oberflächenbeschaffenheit dominiert. Aus den ermittelten Lotabständen aus Bild 4.7 (b) ergibt sich für $-8^\circ < \tau < 8^\circ$ die anwendungs-

bezogene Sensorunsicherheit zu $2,8\mu\text{m}$ ($k = 1$). Die Sensorunsicherheit des reduzierten Neigungswinkelbereichs ist damit um fast $2\mu\text{m}$ kleiner, als die errechnete Sensorunsicherheit von $4,7\mu\text{m}$ ($k = 1$) über die gesamte Profilgeometrie, wo geschätzte Neigungswinkel von etwa $\pm 15^\circ$ auftreten.

Der Unsicherheitsbeitrag durch die Oberflächenneigung kann daraufhin unter folgenden Annahmen abgeschätzt werden. Die Sensorunsicherheit über die gesamte Profilgeometrie resultiert maßgeblich aus dem Einfluss der Oberflächenbeschaffenheiten und dem Einfluss der Neigung, wobei sich die jeweiligen Unsicherheitsbeiträge quadratisch addieren. Die Kovarianz der Unsicherheitsbeiträge der Oberflächenbeschaffenheiten und der Oberflächenneigung wird zunächst vernachlässigt. Basierend auf einer Fortpflanzungsrechnung ergibt sich der Unsicherheitsbeitrag durch die Oberflächenneigung zu $\leq 3,7\mu\text{m}$ ($k = 1$), er dominiert damit die Zahnformmessung bei geneigter Sensorausrichtung.

Im Ergebnis beeinflusst die Oberflächenneigung die Zahnformmessung mit dem konfokal-chromatischen Sensor IFS2405-10, wenn der Sensor mit einem betragsmäßigen Neigungswinkel $> 8^\circ$ auf die Zahnflanke ausgerichtet ist. Um die Sensorunsicherheit an Verzahnungen zu reduzieren, sind eine möglichst senkrechte Sensorausrichtung und entsprechende Messstrategie, wie beispielsweise die rotatorisch-scannende Messstrategie (vgl. Unterabschnitt 2.4.3) anzustreben.

4.4 Einfluss der Zahnflankenoberfläche - Rauheit und Reflexionsvermögen

Dieser Abschnitt befasst sich mit dem Einfluss der Oberflächeneigenschaften der Zahnflanke auf die optische Zahnformmessung. Typischerweise ist die spezifizierte Sensorunsicherheit der jeweiligen optischen Sensoren für eine Referenzoberfläche mit definierter Rauheit und definiertem Reflexionsvermögen charakterisiert. Die Oberflächeneigenschaften der Zahnflanken unterscheiden sich jedoch von denen der verwendeten Referenzobjekte und es kann nicht davon ausgegangen werden, dass die spezifizierte Sensorunsicherheit auch für die Zahnformmessung gilt.

In Unterabschnitt 4.4.1 wird zunächst der zu erwartende Einfluss der Oberflächeneigenschaften auf die optische Abstandsmessung bei der Zahnformmessung diskutiert. Unterabschnitt 4.4.2 beschreibt daraufhin das methodische Vorgehen zur Charakterisierung des Einflusses der Oberflächeneigenschaften auf die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit der jeweiligen Sensoren. Die Quantifizierung der anwendungsbezogenen Sensorunsicherheit und ein Abgleich mit den Erwartungen erfolgt anschließend in Unterabschnitt 4.4.3 auf Basis experimenteller Untersuchungen.

4.4.1 Vorabbetrachtung

In diesem Abschnitt wird der zu erwartende Einfluss der Oberflächeneigenschaften auf die Laser-Triangulationsmessung und konfokal-chromatische Messung diskutiert, insbe-

sondere der Einfluss der Rauheit. Der zu erwartende Effekt wird in der Reihenfolge Laser-Triangulationssensor und konfokal-chromatischer Sensor erläutert.

Die Oberflächenbeschaffenheiten eines Messobjekts beeinflussen die Abstandsmessung mittels Laser-Triangulation, wie beispielsweise die Rauheit und das damit einhergehende Reflexionsvermögen [Buz1992, Mur2012, Lu2020]. Abhängig von der Rauheit der Oberfläche ändert sich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis, was zufällige Messabweichungen bewirkt. Triangulationssensoren werten primär den diffus reflektierten Anteil des Laserlichts zur Abstandsmessung aus und sind daher nur eingeschränkt für die Messung an glänzenden, direkt reflektierende Oberflächen geeignet [Ges2009, Din2020]. An direkt reflektierenden Oberflächen mit Rauheiten von beispielsweise $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ erfasst der in einem zur Lichtquelle definierten Winkel angeordnete Detektor weniger diffus gestreutes Licht und zusätzlich führen Spiegelreflexionen zu Störsignalen auf dem Zeilensensor. Nimmt die Rauheit zu, steigt zunächst der Anteil diffuser Reflexionen und damit auch das Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Bei einer Zunahme der Rauheit ist jedoch auch die Bildung von Speckeln zu berücksichtigen [Dor1994, Cur1995]. Die rauen Oberflächenstrukturen reflektieren das kohärente Laserlicht und führen gleichzeitig zu einer Verschiebung der Lichtphasen, wodurch sich Interferenzen beziehungsweise sichtbare Speckle ausbilden. Das Speckle-Rauschen wiederum bewirkt eine Positionsverschiebung des Schwerpunkts des Lichtflecks auf der Sensorzeile, was eine zusätzliche Messabweichung erwarten lässt. Es wird erwartet, dass die erreichbare Sensorunsicherheit bei der Zahnformmessung mittels Laser-Triangulation maßgeblich mit dem zufälligen Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit zusammenhängt und mit steigender Rauheit zunächst abnimmt.

Auch das konfokal-chromatische Sensorprinzip wird durch die Rauheit zufällig beeinflusst [Sep2018, Sat2022]. Ebenfalls ist dieser Effekt auf das von der Oberflächenrauheit abhängige Signal-zu-Rausch-Verhältnis des Sensors zurückzuführen. Konfokal-chromatische Sensoren in der Bauweise des IFS2405-10, das heißt die Lichtquelle und der Detektor teilen sich großteils einen Strahlengang, werten insbesondere direkt reflektierendes Licht, aber anteilig auch diffus gestreutes Licht aus. Konfokal-chromatische Sensoren eignen sich daher für die Messung an glänzenden, metallischen Oberflächen und erreichen ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Infolge des hohen Signal-zu-Rausch-Verhältnis sinkt der Beitrag zufälliger Messabweichungen. Nimmt die Rauheit der Oberfläche zu, steigt der Anteil des diffus gestreuten Lichts, und aufgrund des begrenzten Akzeptanzwinkels des Sensors sinkt hingegen das Signal-Rausch-Verhältnis. Zusammenfassend ist anzunehmen, dass die Oberflächenrauheit auch bei der konfokal-chromatischen Zahnformmessung die erreichbare Sensorunsicherheit beeinflusst und mit steigender Rauheit zunimmt.

4.4.2 Messobjekt und Messdatenauswertung

Um den Einfluss der Zahnflankenoberfläche hinsichtlich der Rauheit und dem damit verbundenen Reflexionsvermögens auf die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit bei der Zahnformmessung zu bestimmen, sind möglichst anwendungsnahe Messszenarien zu wählen. Idealerweise würden mehrere freistehende Zahnflanken mit vergleichbarer Geometrie, aber unterschiedlicher Rauheit benötigt, um den Einfluss unabhängig von wei-

teren Effekten wie beispielsweise Mehrfachreflexionen untersuchen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit waren jedoch keine geometrisch vergleichbaren freistehenden Zahnflanken verfügbar. Aus diesem Grund werden zur Charakterisierung des Einflusses der Rauheit mit den Sensoren linienförmige Vergleichsmessungen an zwei ebenen metallischen Rauheitsnormalen mit den Rauheitsklassen N0 bis N6 betrachtet. Pro Rauheitsklasse werden fünf Messstrecken erfasst. Bild 4.9 zeigt beispielhaft eines der verwendeten Rauheitsnormale mit den Rauheitsklassen N0 bis N4. An einem weiteren Rauheitsnormal werden die Flächen der Rauheitsklassen N5 und N6 gemessen. Die Mittenrauwerte der Rauheitsklassen betragen dabei $Ra_{N0} = 0,0125 \mu\text{m}$, $Ra_{N1} = 0,025 \mu\text{m}$, $Ra_{N2} = 0,05 \mu\text{m}$, $Ra_{N3} = 0,1 \mu\text{m}$, $Ra_{N4} = 0,2 \mu\text{m}$, $Ra_{N5} = 0,4 \mu\text{m}$ und $Ra_{N6} = 0,8 \mu\text{m}$.

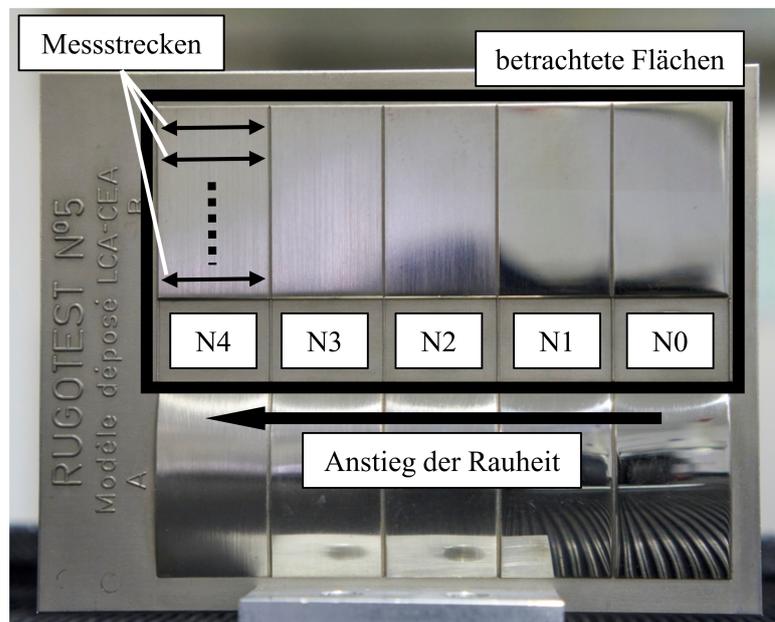


Bild 4.9: Beispiel eines der zwei verwendeten metallischen Rauheitsnormale zur Abschätzung des Einflusses der Rauheit auf die erreichbare Sensorunsicherheit der optischen Abstandsmessungen. Gemessen werden fünf Messstrecken pro Rauheit für die Rauheitsklassen N0 bis N6. An dem dargestellten Rauheitsnormal werden die ebenen Flächen von N0 bis N4 betrachtet. An einem weiteren Rauheitsnormal die Rauheiten für N5 und N6.

Die Messung am metallischen Rauheitsnormal entspricht nicht unmittelbar einem anwendungsnahem Szenario am Zahnrad. Es lässt sich jedoch der grundsätzliche Einfluss der Rauheit bei vergleichbaren metallischen Materialeigenschaften auf die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit der zu untersuchenden Sensoren quantifizieren. Darüber hinaus ist anschließend ein Abgleich der Messergebnisse mit den Zahnflankenmessungen aus Abschnitt 4.3.3 möglich, um den Einfluss von der Rauheit und der Neigung gegenüberzustellen.

Es wird erwartet, dass die Rauheit der Oberfläche einen zufälligen Einfluss auf die optische Abstandsmessung bewirkt. Zur Berechnung der von der Oberfläche abhängigen erreichbaren Sensorunsicherheit u_s wird zunächst ein ideales Ausgleichselement in die Messdaten approximiert. Typischerweise wird entsprechend der ebenen Oberfläche des Rauheitsnormals eine Gerade als Ausgleichselement gewählt. Anschließend werden die Re-

siduen für jede Messposition entlang der Sensorachse als lokale Messabweichung bestimmt. Als Maß für die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit wird dann die empirische Standardabweichung der lokalen Messabweichungen bestimmt. Einige Flächen der Rauheitsnormale weisen jedoch über die gesamte Fläche globale Deformationen in der Größenordnung von $\leq 20\ \mu\text{m}$ auf, wie beispielsweise Wölbungen. Diese Deformationen führen in der Auswertung mit einer Geraden als Ausgleichselement zu systematischen Messabweichungen und beeinflussen zusätzlich die erreichbare Sensorunsicherheit. Zur Kompensation der lokalen systematischen Messabweichungen erfolgt dann die Approximation mit einem Polynom zweiten beziehungsweise dritten Grades. Daraufhin wird davon ausgegangen, dass die ermittelte anwendungsbezogene Sensorunsicherheit primär aus den Wechselwirkungen mit der Oberfläche resultieren.

4.4.3 Experimentelle Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Rauheit auf die optische Abstandsmessung mit dem Laser-Triangulationssensor ILD1750-50 und konfokal-chromatischen Sensor IFS2405-10 untersucht. Ziel ist es, die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit in Abhängigkeit von der Rauheit zu quantifizieren und mit den Ergebnissen der Messung am Zahnflankennormal aus Unterabschnitt 4.3.3 zu vergleichen.

Zur Quantifizierung des Einflusses der Rauheit auf die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit werden im Rahmen dieser Arbeit Messungen an Rauheitsnormalen mit den Rauheitsklassen N0 bis N6 durchgeführt. Die verschiedenen Oberflächen werden dazu schrittweise lateral mit einer Auflösung von 0,25 mm abgetastet. Pro Oberfläche werden fünf Vergleichsmessungen in verschiedenen Ebenen durchgeführt, sodass pro Oberfläche eine gesamte Messpunktezahl von 325 vorliegt. Analog zu den Zahnflankenmessungen wird pro Messposition der Abstand 100 mal wiederholend erfasst. Im Anschluss zur Messung werden die Residuen entlang der Sensorachse zur nominellen Referenzgeometrie mittels einer Ausgleichsrechnung berechnet und die empirische Standardabweichung als Maß für die Sensorunsicherheit bestimmt (vgl. Unterabschnitt 4.4.2).

Bild 4.10 zeigt die berechneten anwendungsbezogenen Sensorunsicherheiten u_s der Laser-Triangulationsmessungen in Abhängigkeit von dem Mittenrauwert R_a als graue Kreuze. Zusätzlich stellt eine schwarze gestrichelte Linie einen heuristisch geschätzten funktionellen Zusammenhang zwischen der Sensorunsicherheit und Rauheit durch eine Potenzfunktion dar. Um die an den Rauheitsnormalen erzielten Ergebnisse auf die Zahnformmessung zu übertragen, ist zum Abgleich die am Zahnflankennormal berechnete Sensorunsicherheit der Triangulationsmessung als blaue Raute eingezeichnet

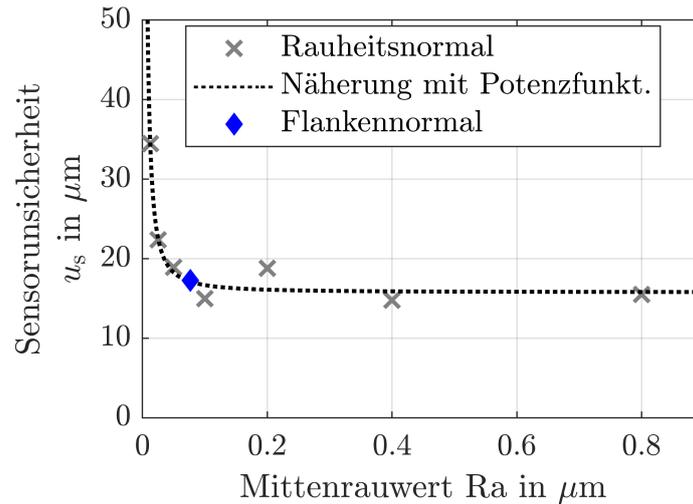


Bild 4.10: Erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit u_s des Laser-Triangulationssensors in Abhängigkeit vom Mittenrauwert R_a . Im Vergleich zu den Messungen an dem ebenen Rauheitsnormal ist als blaue Raute die erreichbare Sensorunsicherheit der Zahnformmessung am Zahnflankennormal dargestellt. Eine gestrichelte Linie zeigt dazu eine heuristisch angenommene Näherung durch eine Potenzfunktion.

Wie bereits in Unterabschnitt 4.4.1 vorab diskutiert, sinkt die erreichbare Sensorunsicherheit des Laser-Triangulationssensors erwartungsgemäß mit steigender Rauheit. Insbesondere bei Rauheiten bis $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ ist eine starke Empfindlichkeit der Sensorunsicherheit in Bezug auf eine Änderung des Mittenrauwerths der Oberfläche sichtbar. Während die Sensorunsicherheit bei einer Rauheit von $0,0125 \mu\text{m}$ circa $34,5 \mu\text{m}$ ($k = 1$) beträgt, reduziert sich die Unsicherheit bei einem Mittenrauwert von $0,1 \mu\text{m}$ auf $18,9 \mu\text{m}$ ($k = 1$). Laser-Triangulationssensoren messen den diffusen Anteil des reflektierten ausgestrahlten Lichts. Je geringer die Rauheit beziehungsweise glatter die Oberfläche ist, desto geringer ist der Anteil diffus gestreuten Lichts. Die Intensität des Messsignals fällt und das Signal-zu-Rausch Verhältnis sinkt beziehungsweise die Streuung der Messdaten steigt. Sobald der Mittenrauwert im betrachteten Bereich $> 0,2 \mu\text{m}$ ist, ist nahezu keine Abhängigkeit der erreichbaren Sensorunsicherheit von der Rauheit der Oberfläche sichtbar. Die erreichbare Sensorunsicherheit nähert sich dann einem Grenzwert von circa $15,8 \mu\text{m}$ ($k = 1$) und hält dann die spezifizizierte Sensorunsicherheit von $30,01 \mu\text{m}$ ($k = 1$) ein.

Darüber hinaus fällt auf, dass der an den Rauheitsnormalen ermittelte funktionelle Zusammenhang zwischen Rauheit und Sensorunsicherheit auch mit der quantifizierten Sensorunsicherheit von $17,3 \mu\text{m}$ ($k = 1$) am Zahnflankennormal mit einem Mittenrauwert $R_a = 0,077 \mu\text{m}$ übereinstimmt. Der Abgleich der Messergebnisse manifestiert die Beobachtungen aus Unterabschnitt 4.3.3, dass die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit des Triangulationssensors bei der Zahnformmessung mit Neigungswinkeln $< 15^\circ$ maßgeblich von den Oberflächenbeschaffenheiten dominiert und begrenzt wird.

Im Ergebnis bestätigen die Messungen an den Rauheitsnormalen den erwarteten zufälligen Einfluss der Rauheit auf die Sensorunsicherheit des Triangulationssensors. Basierend auf dem Vergleich mit den Zahnflankenmessungen begrenzt primär die Oberflächenbe-

schaffenheit der Zahnflanke die erreichbare Sensorunsicherheit bei der Zahnformmessung mittels des Laser-Triangulationssensors ILD1750-50, wenn der Neigungswinkel $< 15^\circ$ ist.

In Bild 4.11 sind daraufhin die berechneten anwendungsbezogenen Sensorunsicherheiten u_s der konfokal-chromatischen Abstandsmessungen in Abhängigkeit von dem Mittenrauwert R_a als graue Kreuze dargestellt. Ebenso ist ein heuristisch geschätzter funktioneller Zusammenhang zwischen der Sensorunsicherheit und Rauheit durch eine Potenzfunktion als schwarz gestrichelte Linie angegeben. Auch hier ist zum Abgleich der Ergebnisse mit Verzahnungsmessungen, die berechnete Sensorunsicherheit der konfokal-chromatischen Zahnformmessung dargestellt. Als blaue Raute ist die ermittelte Sensorunsicherheit über die gesamte gemessene Profilgeometrie des Zahnflankennormals angegeben. Der rote Punkt symbolisiert die am Zahnflankennormal bestimmte Sensorunsicherheit für einen Neigungswinkelbereich $-8^\circ < \tau < 8^\circ$ und soll zusätzlich die Abhängigkeit der erreichbaren anwendungsbezogenen Sensorunsicherheit von der Oberflächenneigung aufzeigen.

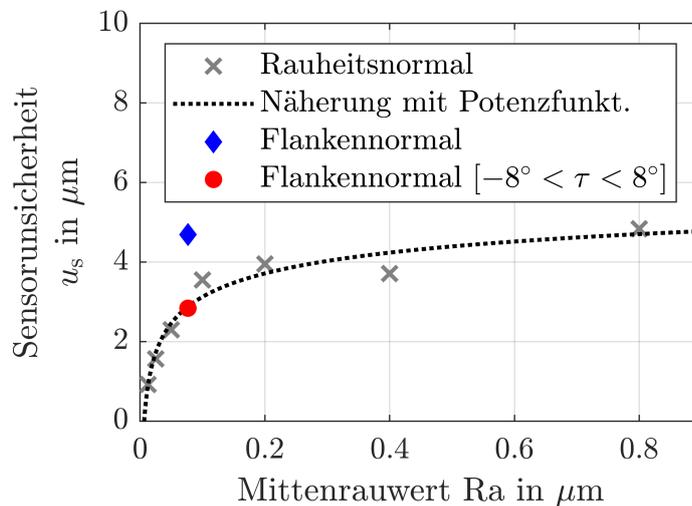


Bild 4.11: Erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit u_s des konfokal-chromatischen Sensors in Abhängigkeit vom Mittenrauwert R_a als Maß für das Reflexionsvermögen einer Oberfläche. Im Vergleich zu den Messungen an dem ebenen Rauheitsnormal sind die Sensorunsicherheit der Zahnformmessung des gesamten Zahnflankennormals (blaue Raute) und die Sensorunsicherheit der Zahnformmessung des für einen eingeschränkten Neigungswinkelbereich des Zahnflankennormals (roter Punkt) angegeben.

Erwartungsgemäß steigt die anwendungsbezogene Sensorunsicherheit der konfokal-chromatischen Messungen monoton mit größer werdenden Rauheiten an. Während bei Rauheiten $< 0,0125 \mu\text{m}$ theoretisch Sensorunsicherheiten $< 1 \mu\text{m}$ ($k = 1$) erreicht werden, beträgt die Sensorunsicherheit bei $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ bereits $4 \mu\text{m}$ ($k = 1$) und steigt bis $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ auf knapp $4,5 \mu\text{m}$ ($k = 1$). Daraufhin nähert sich die erreichbare Sensorunsicherheit im betrachteten Bereich der Rauheit einem Grenzwert von etwa $5 \mu\text{m}$ ($k = 1$). Die spezifizierte Sensorunsicherheit von $2,5 \mu\text{m}$ ($k = 1$) gilt demnach für glatte, glänzende Oberflächen mit $R_a \leq 0,05 \mu\text{m}$.

Der Abgleich mit den Messungen am Zahnflankennormal (vgl. Unterabschnitt 4.3.3) validiert die Vermutung, dass die Einflussfaktoren Oberflächenneigung und -beschaffenheit maßgeblich die erreichbare Sensorunsicherheit bei der Zahnflankennormalmessung domi-

nieren. Die ermittelte Sensorunsicherheit über die gesamte Profilgeometrie (blaue Raute) ist um fast $2\ \mu\text{m}$ größer, als die Sensorunsicherheit an einer ebenen senkrecht zum Sensor stehenden Fläche mit vergleichbarer Rauheit. Die Differenz der Sensorunsicherheiten ist auf eine Beeinflussung durch weitere Effekte, insbesondere den Einfluss der Oberflächenneigung bei der Messung mit dem konfokal-chromatischen Sensor IFS2405-10 zurückzuführen. Zudem stimmen die anwendungsbezogene Sensorunsicherheit für den reduzierten Neigungswinkelbereich von $-8^\circ < \tau < 8^\circ$ (roter Punkt) und der ermittelte funktionelle Zusammenhang zwischen Sensorunsicherheit und Rauheit an der ebenen Fläche überein. Wird die Oberflächenneigung zwischen der Oberflächennormalen und der Sensorachse reduziert, dominiert der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit die erreichbare Sensorunsicherheit.

Zusammenfassend validieren die Ergebnisse den erwarteten zufälligen Einfluss der Rauheit auf die konfokal-chromatische Messung. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Zahnformmessung am Zahnflankennormal bestätigt darüber hinaus, dass die erreichbare Sensorunsicherheit bei der Zahnformmessung primär durch die Oberflächenbeschaffenheiten der Zahnflanken begrenzt werden, wenn der Sensor möglichst senkrecht zur Oberfläche ausgerichtet ist. Ist eine senkrechte Sensorausrichtung nicht möglich, ist der Einfluss der Oberflächenneigung zusätzlich zu beachten, der sich mit dem Einfluss der Neigung überlagert.

4.5 Einfluss der Zahnradgeometrie - Mehrfachreflexionen

Die komplexe Zahnradgeometrie, gepaart mit den metallischen glänzenden Oberflächen ist für die optische Verzahnungsmessung herausfordernd, insbesondere weil Mehrfachreflexionen die optischen Messungen beeinflussen können [Aue2019]. In diesem Abschnitt wird daher der potenzielle Einfluss von Mehrfachreflexionen auf die optische Zahnformmessung mittels des Laser-Triangulationssensors und des konfokal-chromatischen Sensors untersucht.

Der zu erwartende Einfluss der Mehrfachreflexionen auf die optische Zahnformmessung wird zunächst vorab in Unterabschnitt 4.5.1 erörtert. In Unterabschnitt 4.5.2 erfolgt daraufhin die Beschreibung des zu untersuchenden Messobjekts und des Auswerteansatzes, um den potenziellen Einfluss zu quantifizieren. Unterabschnitt 4.5.3 diskutiert daraufhin die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit der Sensoren hinsichtlich des Einflusses durch Mehrfachreflexionen am Beispiel experimenteller Untersuchungen.

4.5.1 Vorabbetrachtung

Dieser Abschnitt diskutiert vorab den zu erwartenden Einfluss von Mehrfachreflexionen auf die optische Zahnformmessung mittels Laser-Triangulation und einem konfokal-chromatischen Sensor.

In [Aue2019, Hos2020] berichten Auerswald et al. und Hosseinpour et al. von systematischen Messabweichungen durch Mehrfachreflexionen bei der Verzahnungsmessung mit Laser-Triangulationssensoren. Die Mehrfachreflexionen erzeugen zusätzliche sekundäre

Peaks in der Intensitätskurve des reflektierten Laserlichts [Mur2012], die je nach werksseitiger Auswertung zu einer systematischen Messabweichung in Form von Messartefakten führen können. Es wird angenommen, dass die Mehrfachreflexionen im Bereich des Zahnfußes bei der Zahnformmessung auftreten, insbesondere wenn die Sensoren in Richtung des Zahnfußes geneigt sind, um die gesamte Zahnflanke zu messen. Bei einer senkrechten Sensorausrichtung gelangt der Sensor nicht vollständig in den Zahnfußbereich, sodass dann keine Einflüsse durch Mehrfachreflexionen zu erwarten sind. Die exakte Größenordnung der lokalen am Zahnfuß erwarteten Messartefakte ist nicht bekannt und hängt von der Verzahnungsgeometrie ab.

Auch bei der konfokal-chromatischen Messung wird davon ausgegangen, dass Mehrfachreflexionen zu einer Änderung der Intensitätsverteilung des erfassten Spektralprofils und damit zu einer systemischen Messabweichungen führen. Die Größenordnung der daraus resultierenden systematischen Abweichungen ist zunächst nicht bekannt und soll im Rahmen experimenteller Untersuchungen an Verzahnungen charakterisiert werden.

4.5.2 Messobjekt und Messdatenauswertung

Die Bewertung des Einflusses von Mehrfachreflexionen durch benachbarte Zähne und der metallischen, glänzenden Oberfläche auf die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit erfolgt an einer mittelgroßen evolventischen Geradverzahnung (vgl. Bild 4.12 (a)). Die wesentlichen Geometrieparameter und die mittlere Oberflächenrauheit der Verzahnung sind in der Tabelle 4.3 zusammengefasst.

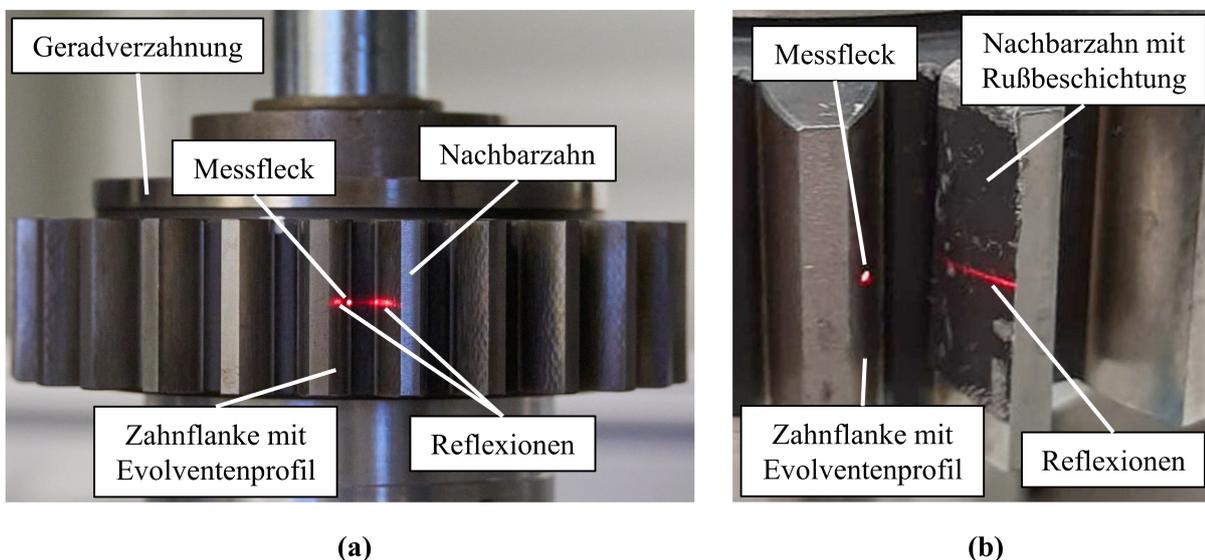


Bild 4.12: Geradverzahnung mit evolventischem Profil und einer Nenngeometrie mit einem Kopfkreisdurchmesser von 105 mm, einem Normalmodul von 3,75 mm, 26 Zähnen zur Untersuchung des Einflusses von Mehrfachreflexionen auf die Zahnformmessung. (a) zeigt die betrachtete Zahnflanke der Geradverzahnung bei einer Laser-Triangulationsmessung. Zu sehen sind der Messfleck und Reflexionen auf der zu messenden und benachbarten Zahnflanke bei lateral-scannender Messung. (b) veranschaulicht die Laser-Triangulationsmessung, wobei die benachbarte Zahnflanke mit einer Rußbeschichtung abgedeckt ist. Die Reflexionen sind erheblich reduziert.

Tabelle 4.3: (Geometrie-)Parameter einer mittelgroßen Geradverzahnung mit Evolventenprofil.

	Geradverzahnung
Kopfkreisdurchmesser d_a in mm	105
Normalmodul m_n in mm	3,75
Zähnezahl z	26
Grundkreisradius $r_{b,n}$ in mm	45,8100
Mittenrauwert R_a in μm	0,45

Zur Quantifizierung des Einflusses von Mehrfachreflexionen wurden Vergleichsmessungen an einem definierten Zahn mit und ohne Rußbeschichtung der Nachbarzahnflanke zur Reduzierung von Reflexionen durchgeführt. Die benachbarte Zahnflanke wurde mit Ruß beschichtet, da Ruß typischerweise mehr als 90 % des einfallenden sichtbaren Lichts absorbiert [Lia2020] und somit sekundäre Reflexionen durch die spiegelnde Oberfläche der Nachbarzahnflanke reduziert. Es werden innerhalb der Vergleichsmessungen die gleichen Oberflächenpunkte gemessen, um die Einflüsse der Oberflächeneigenschaften und Neigung von dem Einfluss der Mehrfachreflexionen zu separieren. Infolgedessen weisen die zwei Vergleichsmessungen zwei systematisch voneinander unterschiedliche, erfasste Profilgeometrien auf, wenn Mehrfachreflexionen auftreten und die optischen Sensoren beeinflussen.

Bei der optischen Multi-Distanzmessung der Zahnflankenform der Geradverzahnung beschränken die benachbarten Zähne die Ausrichtung der Sensoren auf die Zahnflanke. Während abhängig vom Messansatz ein Messbereich von $< 5\text{ mm}$ zur Erfassung einer vollständigen Profillinie auf der Zahnflanke ausreicht, ist der erforderliche Akzeptanzwinkel zur Messung der gesamten Zahnflanke $> 30^\circ$. Durch die großen auftretenden Neigungswinkel $> 30^\circ$ sind bei der Laser-Triangulationsmessung nach dem Modell von Liu et al. [Liu2021] und einer geschätzten Sensorgeometrie betragsmäßige systematische Messabweichungen in der Größenordnung von $10\ \mu\text{m}$ bis $15\ \mu\text{m}$ zu erwarten, selbst wenn im Bereich der Mitte des Messbereichs gemessen wird. Im Vergleich zur Messung am freistehenden Zahnflankennormal sind die systematischen Messabweichungen nicht mehr vernachlässigbar gegenüber der spezifizierten Sensorunsicherheit des ILD1750-50. Da jedoch der systematische Einfluss der Oberflächenneigung sowohl bei der Messung ohne als auch mit Rußbeschichtung gleich ist, kann der relative Einfluss durch möglicherweise auftretende Mehrfachreflexionen untersucht werden. Bei der konfokal-chromatischen Messung ist zu berücksichtigen, dass mit dem konfokal-chromatischen Sensor und dem lateral-scannenden Messansatz aufgrund des limitierten Akzeptanzwinkels von $\pm 17^\circ$ nicht die gesamte Zahnflanke erfasst werden kann.

Die Berechnung der lokalen Messabweichungen zwischen der gemessenen Zahnflanken-geometrie und der Referenzgeometrie sowie der anwendungsbezogenen Sensorunsicherheit erfolgen nach dem in Unterabschnitt 4.3.2 erarbeiteten Lösungsansatz. Es ist davon auszugehen, dass der Approximationsalgorithmus die neigungswinkelabhängigen systematischen Messabweichungen der Triangulationsmessung teilweise kaschiert. Weisen die Messdaten

beispielsweise geringe systematische Messabweichungen von circa $\pm 10 \mu\text{m}$ auf, die zu einer veränderten Krümmung der Zahnflanke führen, kann die Approximation einen Bereich der Evolvente finden, der zu den systematisch abweichenden Messdaten passt, aber von den tatsächlichen Messpositionen auf der Evolvente abweicht. Die berechneten Lotabstände weisen daraufhin keine systematische Abweichung durch die Oberflächenneigung auf. Treten dazu bei der Messung ohne benachbarten rußbeschichteten Zahn am Zahnfuß systematische Messabweichungen in Form von Messartefakten durch Mehrfachreflexionen auf, sollten diese dennoch von der Messung mit Rußbeschichtung unterschieden werden können. Die konfokal-chromatischen Messdaten werden wieder entsprechend der Vorversuche am Zylindernormal winkelabhängig korrigiert, sodass die systematische Messabweichung durch die variierende Oberflächenneigung vernachlässigbar ist.

4.5.3 Experimentelle Ergebnisse

Der Einfluss von Mehrfachreflexionen auf die Zahnformmessung und damit auf die erreichbare Sensorunsicherheit wird mit Vergleichsmessungen an einer Geradverzahnung mit und ohne Abdeckung der angrenzenden Zahnflanke mit einer schwarzen Rußschicht untersucht. Die Zahnflanke wird mit einer lateralen Auflösung von $0,025 \text{ mm}$ optisch erfasst, so dass sich insgesamt bis zu 267 Messpunkte ergeben. Pro Messpunkt werden 100 Abstandsmessungen durchgeführt. Die Messbedingungen werden innerhalb der Vergleichsmessungen bis auf die zusätzliche Rußbeschichtung nicht verändert. Bei den Vergleichsmessungen wird angestrebt, die gleichen Messpunkte auf der Zahnflanke zu erfassen, um den Einfluss von Mehrfachreflexionen unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit und vom auftretenden Neigungswinkel zu untersuchen.

Die Ergebnisse der Lotabstände der Vergleichsmessungen mit dem Triangulationssensor ILD1750-50 sind in Bild 4.13 veranschaulicht. Die Lotabstände d_{lot} sind dazu in Abhängigkeit von der x' -Position im Werkstückkoordinatensystem abgebildet. Die Messungen ohne Rußbeschichtung symbolisieren die blauen Rauten, die Messungen mit rußbeschichteter Nachbarzahnflanke symbolisieren die roten Punkte.

Die zwei Vergleichsmessungen mit dem Laser-Triangulationssensor weisen keine systematisch voneinander abweichenden erfassten Profilgeometrien auf. Der erwartete systematische Einfluss durch Mehrfachreflexionen kann nicht bestätigt werden, obwohl Mehrfachreflexionen während der Messung deutlich sichtbar sind (vgl. Bild 4.12). Es wird angenommen, dass die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit des ILD1750-50 nicht durch Mehrfachreflexionen beeinflusst wird, zumindest wenn die Profilgeometrie der Zahnflanke lateral gescannt wird. Die Messergebnisse der berechneten Lotabstände deuten zwar einen systematischen abweichenden Trend von der idealen Referenzgeometrie auf, dieser ist jedoch in beiden Vergleichsmessungen nahezu identisch und auf den Einfluss der Oberflächenneigung zurückzuführen.

Beide Messungen streuen in der gleichen Größenordnung im zweistelligen Mikrometerbereich. Die erreichbare Sensorunsicherheit der Zahnformmessung mit einem mit Ruß beschichteten Nachbarzahn ist dabei um $0,1 \mu\text{m}$ kleiner, als die anwendungsbezogene Sensorunsicherheit ohne den beschichteten Nachbarzahn. Diese Differenz ist jedoch im

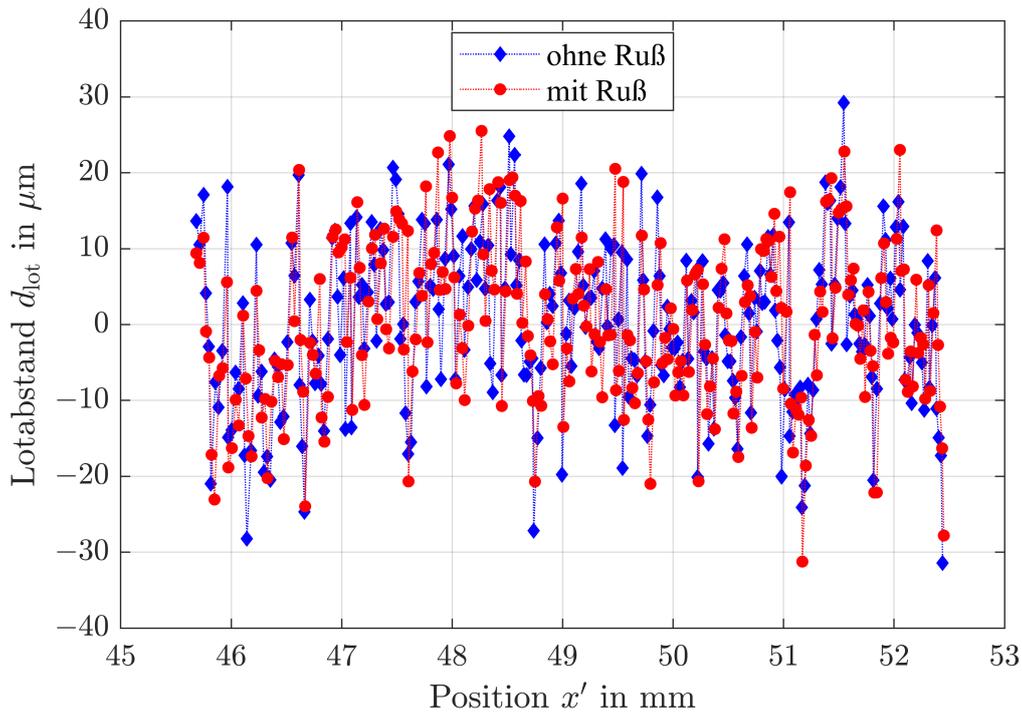


Bild 4.13: Berechnete Lotabstände d_{lot} der Vergleichsmessungen der Zahnform mit dem Laser-Triangulationssensor an einer Geradzahnung in Abhängigkeit von der x' -Position der Messpunkte zur Abschätzung des Einflusses von Mehrfachreflexionen auf die Messabweichungen. Die blauen Rauten zeigen die Messung ohne den beschichteten Nachbarzahn. Die roten Punkte sind die Ergebnisse der Messung mit dem mit Ruß beschichteten Nachbarzahn. Ruß absorbiert in der Regel $> 90\%$ des einfallenden sichtbaren Lichts [Lia2020].

Rahmen der spezifizierten Reproduzierbarkeit von $2\ \mu\text{m}$ des Laser-Triangulationssensors vernachlässigbar. Lediglich die berechneten Lotabstände variieren lokal, obwohl in beiden Vergleichsmessungen die Messung der gleichen Punkte angestrebt wurde. Eine Ursache für die lokalen Abweichungen könnte das invasive Aufbringen der Rußbeschichtung auf den Nachbarzahn sein. Die gemessenen Punkte auf der Zahnflanke könnten daher in beiden Vergleichsmessungen voneinander leicht abweichen.

Die berechneten Lotabstände d_{lot} der Vergleichsmessungen mit dem konfokal-chromatischen Abstandssensor sind in Bild 4.14 in Abhängigkeit von der x' -Komponente der Messpositionen dargestellt. Auch hier symbolisieren die blauen Rauten die Messungen ohne und die roten Punkte die Messungen mit Rußbeschichtung der Nachbarzahnflanke. Eine zweite Abszisse veranschaulicht zudem die Abhängigkeit der Messabweichungen von der Oberflächenneigung.

Auch in den konfokal-chromatischen Vergleichsmessungen an der Zahnflanke des mittelgroßen Evolventenzahnrads ist der erwartete systematische Einfluss durch Mehrfachreflexionen nicht zu beobachten. Die Form der ermittelten Lotabstände ist vergleichbar, sie streuen jeweils mit einer anwendungsbezogenen Sensorunsicherheit von $6,1\ \mu\text{m}$ ($k = 1$) für den erfassten Zahnflankenbereich für $-17^\circ < \tau < 6^\circ$.

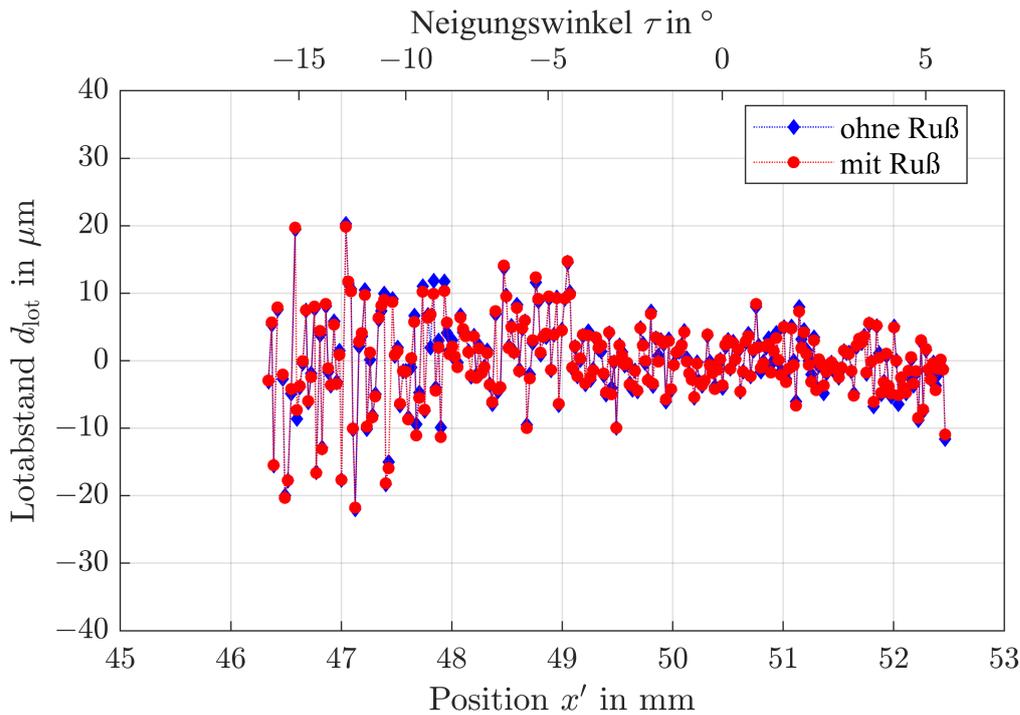


Bild 4.14: Lotabstände d_{lot} der Geradverzahnungsmessungen mit dem konfokal-chromatischen Sensor in Abhängigkeit von der x' -Position der Messpunkte zur Untersuchung des Einflusses von Mehrfachreflexionen auf die Messabweichungen bei der Zahnformmessung. Die blauen Rauten stellen die Messung ohne den beschichteten Nachbarzahn dar. Die roten Punkte zeigen die Messung mit dem mit Ruß beschichteten Nachbarzahn. Ruß absorbiert $> 90\%$ des einfallenden sichtbaren Lichts [Lia2020].

Die Ergebnisse der konfokal-chromatischen Messungen an der geraden Verzahnung geben darüber hinaus Aufschluss über einen weiteren Faktor, der die Sensorunsicherheit beeinflusst, nämlich die Abschattung des Lichtkegels des Sensors durch Nachbarzähne. Im Vergleich zu den Messungen am Zahnflankennormal ist hier bereits ab einem Neigungswinkel von -5° eine sichtbare Zunahme der Lotabstände zu beobachten und nicht erst ab einem Winkel von -8° . Daher besteht die Annahme, dass sich an der Zahnflanke der Geradverzahnung der zufällige Einfluss der Oberflächenneigung mit einem zufälligen Einfluss durch eine Abschattung des Lichtkegels in Richtung des Zahnfuß überlagert. Durch die Abschattung wird ein Teil des reflektierten Lichts blockiert und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis des konfokal-chromatischen Sensors sinkt zusätzlich. Infolgedessen ist davon auszugehen, dass selbst bei einer senkrechten Sensorausrichtung auf ein klassisches Zahnrad die erreichbare Sensorunsicherheit der Zahnformmessung größer ist als diejenige, die sich allein aus dem Einfluss der Oberflächenrauheit ergibt (vgl. Unterabschnitt 4.4.3). Der Einfluss der Abschattung auf die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit kann jedoch auf Basis der Messungen nicht von dem Einfluss der Neigung separiert werden. In zukünftigen Arbeiten gilt es zu klären, inwieweit die Abschattung die erreichbare Unsicherheit dominiert und gegebenenfalls dem Einfluss der Neigung überwiegt.

Die Messungen an der Geradverzahnung ohne und mit Rußbeschichtung belegen entgegen den Erwartungen, dass bei der lateral-scannenden Multi-Distanzmessung der Zahn-

form kein wesentlicher Einfluss durch Mehrfachreflexionen auf die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit auftritt. Weder die lokalen zufälligen Messabweichungen des Laser-Triangulationssensors noch des konfokal-chromatische Sensors werden zusätzlich durch Mehrfachreflexionen beeinflusst, was die Eignung der untersuchten Sensoren für die Verzahnungsmessung hervorhebt. Folglich wird davon ausgegangen, dass auch beim statisch multisensorischen Ansatz und dem rotatorisch-scannenden Ansatz keine Beeinflussung durch Mehrfachreflexionen auftritt. Soll die gesamte Zahnflanke gemessen werden, ist eine vergleichbare Sensorausrichtung wie beim lateral-scannenden Messansatz zu realisieren. Die konfokal-chromatischen Messungen an der Geradverzahnung zeigen darüber hinaus eine zusätzliche Beeinflussung der Sensorunsicherheit durch die Abschattung des Sensors durch Nachbarzähne, die potenziell einen maßgeblichen Einfluss auf die konfokal-chromatische Verzahnungsmessung hat.

4.6 Fazit - Eignung der Sensoren zur Zahnformmessung

Ziel dieses Kapitels ist die Bewertung der Eignung der beiden betrachteten optischen Sensoren ILD1750-50 und IFS2405-10 für Multi-Distanzmessungen an Verzahnungen. Dazu untersuchten Experimente an Zahnflanken und Rauheitsnormalen die jeweilige erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit hinsichtlich der Einflussgrößen:

1. Zahnflankengeometrie - Neigung
2. Zahnflankenoberfläche - Rauheit und Reflexionsvermögen
3. Zahnradgeometrie - Mehrfachreflexionen.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die Neigung zwischen der Oberflächennormalen und der Sensorachse insbesondere die erreichbare Sensorunsicherheit des konfokal-chromatischen Sensors IFS2405-10 zusätzlich zufällig beeinflussen, wenn betragsmäßige Neigungswinkel $> 8^\circ$ auftreten. Bei dem Laser-Triangulationssensor ILD1750-50 sind dagegen keine zusätzlichen zufälligen Messabweichungen durch eine Oberflächenverkipfung sichtbar. Ein Einfluss durch Mehrfachreflexionen konnte unabhängig vom Sensortyp nicht bestätigt werden. Bei senkrechter Sensorausrichtung beschränkt demnach unabhängig vom Sensortyp maßgeblich die Rauheit der zu messenden Oberfläche die theoretisch erreichbare Sensorunsicherheit bei der Zahnformmessung. Die Experimente haben darüber hinaus eine weitere potenzielle Einflussgröße bei der Zahnformmessung aufgezeigt, die Sensorabschattung durch Nachbarzähne. Es ist davon auszugehen, dass die Sensorabschattung auch bei einer senkrechten Sensorausrichtung die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit zufällig beeinflusst. Der konkrete Einfluss der Sensorabschattung ist jedoch noch nicht final quantifiziert und bedarf noch weiterer Untersuchungen.

Zur Bewertung der Sensoreignung wird in einem weiteren Schritt zunächst der von der Rauheit abhängige Beitrag $u_{r,b,s}$ der Sensorunsicherheit zur Unsicherheit des mittleren

Grundkreisradius betrachtet. Die Abschätzung des Beitrags zur Unsicherheit des Grundkreisradius erfolgt mittels des erarbeiteten Simulationsmodells aus Abschnitt 3.2, wobei die experimentell bestimmte anwendungsbezogene Sensorunsicherheit u_s als Abstandsunsicherheit eingesetzt wird. In Monte-Carlo-Simulationen wird daraufhin der Beitrag der Unsicherheit der Abstandsmessung anhand der Standardunsicherheit berechnet. Die theoretische Unsicherheitsabschätzung erfolgt für eine ideale Messanordnung mit senkrechter Sensoranordnung, sodass Einflüsse durch eine Oberflächenverkipfung nicht berücksichtigt werden müssen. Der potenzielle, in zukünftigen Arbeiten noch zu untersuchende Einfluss der Abschätzung des Sensorabschätzung durch Nachbarzähne wird vorerst vernachlässigt. Weiterhin werden die Ergebnisse für $N = 1000$ Messpunkte pro Zahn abgeschätzt.

Bild 4.15 stellt den theoretischen abgeschätzten Unsicherheitsbeitrag $u_{r_b,s}$ aus der anwendungsbezogenen Sensorunsicherheit u_s zum Grundkreisradius in Abhängigkeit vom Mittenrauwert R_a dar. In (a) sind die simulativ abgeschätzten Ergebnisse für den Laser-Triangulationssensor und in (b) für den konfokal-chromatischen Sensor abgebildet.

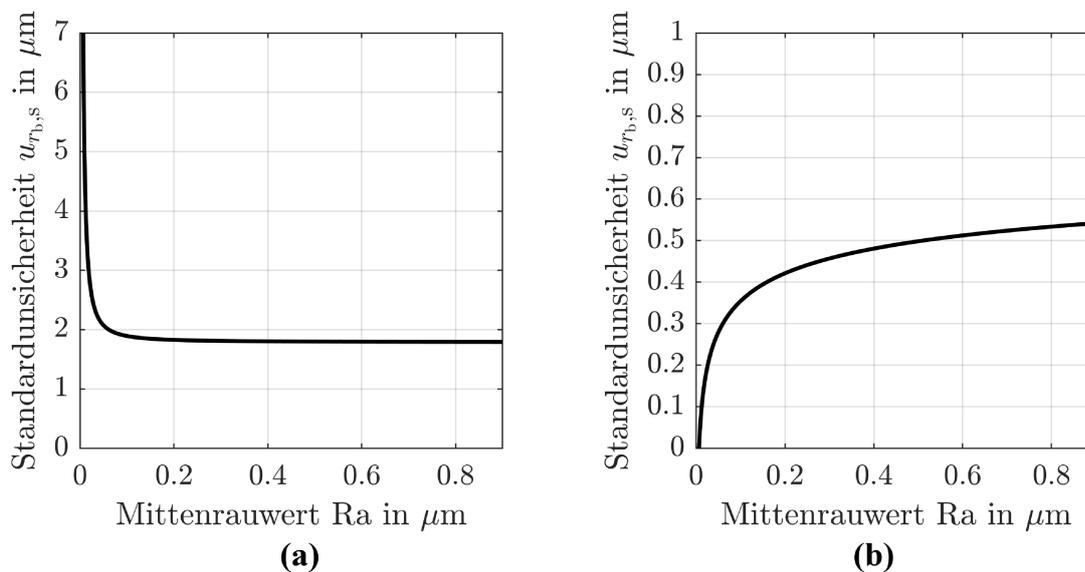


Bild 4.15: Abgeschätzte Unsicherheitsbeiträge $u_{r_b,s}$ bei der Bestimmung des mittleren Grundkreisradius resultierend aus der experimentell ermittelten Sensorunsicherheit u_s in Abhängigkeit vom Mittenrauwert R_a . (a) zeigt den abgeschätzten Unsicherheitsbeitrag für den untersuchten Laser-Triangulationssensor und (b) für den konfokal-chromatischen Sensor.

Der abgeschätzte Unsicherheitsbeitrag $u_{r_b,s}$ aus der Laser-Triangulationsmessung überschreitet zwar für direkt reflektierende Oberflächen ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$) die Unsicherheitsanforderungen von $6,1 \mu\text{m}$ ($k = 2$) für Verzahnungsqualität 6, mit steigendem Mittenrauwert sinkt der Beitrag jedoch auf circa $2 \mu\text{m}$ ($k = 1$). Der Laser-Triangulationssensor ist daher erwartungsgemäß vorwiegend für die Verzahnungsmessung von diffus streuenden Zahnflanken geeignet. Grundlegend kann die Anforderung einer erweiterten Unsicherheit $< 30\%$ der Fertigungstoleranz für Verzahnungsqualität 6 eingehalten werden, insofern weitere Beiträge wie beispielsweise durch die Kalibrierung minimiert werden. Durch den großen erreichbaren Akzeptanzwinkel $\geq 30^\circ$ des Laser-Triangulationssensors sind sowohl senkrechte als auch geneigte Messanordnungen in Bezug auf die Zahnflanke möglich. Der Triangulations-

sensor ILD1750-50 eignet sich daher als Sensor für den statischen Multi-Sensor-Ansatz, den lateral-scannenden und rotatorisch-scannenden Messansatz (vgl. Kapitel 2). In Kombination mit dem großen Messbereich von 50 mm ist der Laser-Triangulationssensor insbesondere auch für die Multi-Distanz-Messung von Großverzahnungen geeignet.

Aktuelle Trends in der Verzahnungstechnologie schränken jedoch die Anwendbarkeit von Laser-Triangulationssensoren für die Verzahnungsmessung ein. Aus den technologischen Fortschritten in der Windenergie [Rag2010], Luft- und Raumfahrt [Lar2011] und Elektromobilität [Bre2017] ergeben sich Anforderungen an Verzahnungen, die über die in DIN ISO 1328-1 definierten Merkmale und Toleranzen hinausgehen und insbesondere die Oberflächentopografie betreffen [Bal2015, Gup2017]. Die Oberflächenbeschaffenheit der Zahnflanken beeinflussen die Laufeigenschaften der Zahnräder, unter anderem die Effizienz beziehungsweise das Verschleißverhalten beim Zahneingriff [Mül2019] oder auch das Geräuschverhalten [Kou2017]. Um die Laufeigenschaften zu optimieren, werden beispielsweise Zahnräder mit einer gemittelten Rautiefe $R_z = 0,5 \mu\text{m}$, was Mittenrauwerten von $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ entspricht, gefertigt und eingesetzt [Ste2021]. Die direkt reflektierenden Oberflächen führen dann gegebenenfalls zu Messunsicherheitsbeiträgen aus der Laser-Triangulationsmessung, die die Unsicherheitsanforderungen für den Grundkreisradius für Verzahnungsqualität 6 überschreiten.

Der Beitrag zur Grundkreisradiusunsicherheit aus der konfokal-chromatischen Abstandsmessung wird unabhängig von der Rauheit der Zahnflankenoberfläche zu $< 0,6 \mu\text{m}$ ($k = 1$) abgeschätzt. Die Zielsetzung, die Unsicherheitsanforderungen für den Grundkreisradius für Verzahnungsqualität 6 einzuhalten, ist damit grundlegend erreichbar. Aufgrund des Sensorprinzips konfokal-chromatischer Sensoren (vgl. Abschnitt 4.1.1) zeichnen sich diese insbesondere für die Messung glatter, direkt reflektierender Oberflächen aus. Hinsichtlich der zunehmenden Bedeutung der Oberflächenbeschaffenheit in der Verzahnungstechnologie, sind konfokal-chromatische Sensoren für die optische Verzahnungsmessung vielversprechende Sensoren.

Das Anwendungspotenzial des konfokal-chromatischen Sensors wird jedoch durch den begrenzten Akzeptanzwinkelbereich von $\pm 17^\circ$ limitiert, weshalb er vorrangig senkrecht auf die Zahnflanken ausgerichtet werden sollte. Bei der Multi-Distanzmessung von Verzahnungen eignet er sich daher primär für den statischen Multi-Sensor-Ansatz oder rotatorisch-scannenden Messansatz, bei denen senkrechte Sensorausrichtungen möglich sind. Außerdem ist der konfokal-chromatische Abstandssensor IFS2405-10 aufgrund des Messbereichs von 10 mm nur eingeschränkt für Großverzahnungsmessungen mit den vorgestellten Multi-Sensor-Messansätzen geeignet. Für die Erfassung der Geometrie von Großverzahnungen muss der Messbereich des konfokal-chromatischen Sensors auf mindestens 30 mm erweitert werden.

Die Vergrößerung des Messbereichs des konfokal-chromatischen Sensors kann dabei mittels eines zugeschalteten optischen Systems, beispielsweise eines Linsenrevolvers oder einer durchstimmbaren Linse erzielt werden. Weiterhin ist die Kombination des Sensors mit einer zusätzlichen Positioniereinheit möglich, wodurch der Sensor durch gezielte Relativbewegungen kontinuierlich der Rotation des Zahnrads beim rotatorisch-scannenden Ansatz nachgeführt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Vorversuche durchgeführt,

den Messbereich des konfokal-chromatischen Sensors IFS2405-10 mit einer geeigneten Optik auf mindestens 30 mm zu erweitern. Mittels eines Linsenrevolvers wurden drei verschiedene Zerstreuungslinsen vor dem konfokal-chromatischen Sensor positioniert. Durch die Linsenerweiterung konnte der Messbereich des konfokal-chromatischen Sensors mit einfachen Mitteln auf circa 27 mm (gekrümmte Fläche) und auf circa 38 mm vergrößert werden. Gleichzeitig ist jedoch die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit auf bis zu 20 μm angestiegen. Das erweiterte Messsystem wurde noch nicht an Verzahnungen erprobt.

Insgesamt belegen die theoretischen Abschätzungen auf Basis der experimentell ermittelten anwendungsbezogenen Sensorunsicherheiten großes Anwendungspotenzial für den Laser-Triangulationssensor ILD1750-50 und den konfokal-chromatischen Sensor IFS2405-10 für die Multi-Distanz-Verzahnungsmessung.

5 Validierung

Dieses Kapitel befasst sich mit der Validierung des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes an einer mittelgroßen Verzahnung sowie mit der Validierung der Skalierbarkeit, demonstriert am Beispiel einer Großverzahnung. Zur Validierung des Multi-Distanz-Messansatzes wird der rotatorisch-scannende Messansatz gemäß Unterabschnitt 2.4.3 realisiert. Im Rahmen experimenteller Untersuchungen wird die erreichbare Messunsicherheit bei der Multi-Distanzmessung des Grundkreisradius r_b verschieden großer Zahnräder bestimmt. Dabei wird die Forschungsfrage beantwortet, ob trotz einer Skalierung der Verzahnungsgeometrie die Unsicherheitsanforderungen nach DIN ISO 18653 für Verzahnungsqualität 6 nach DIN ISO 1328-1 eingehalten werden können. Mittels eines taktilen Koordinatenmessgeräts sollen die Multi-Distanzmessungen darüber hinaus referenziert werden. Zusätzlich wird die Messdauer der Multi-Distanzmessung zur Erfassung der Profilgeometrie aller Zahnflanken ermittelt und mit dem Stand der Technik abgeglichen.

In Abschnitt 5.1 wird der Ansatz der taktilen Referenzmessung mittels des Koordinatenmessgeräts vorgestellt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 5.2 die Beschreibung des experimentellen Messaufbaus für die Multi-Distanzmessungen an der mittelgroßen Verzahnung und Großverzahnung. Dazu werden in verschiedenen Unterabschnitten jeweils die verwendeten Messobjekte, Sensoren, die realisierte Messanordnung und eine Kalibrierstrategie zur Korrektur systematischer Messabweichungen aus einer unbekanntem Messanordnung vorgestellt. Im Anschluss werden in Abschnitt 5.3 die experimentellen Messergebnisse der Multi-Distanzmessungen an einer mittelgroßen Verzahnung und an einer Großverzahnung beschrieben und hinsichtlich der Messunsicherheit diskutiert. Ein Fazit fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Validierung des Multi-Distanz-Messansatzes zusammen und bewertet die Messergebnisse unter Berücksichtigung des erzielten dynamischen Bereichs (vgl. Abschnitt 5.4).

5.1 Taktile Referenzmessungen

Die Anwendbarkeit des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes mit rotatorisch-scannender Messstrategie für skalierbare Verzahnungsmessungen sowie die erreichbare Messunsicherheit bei der Erfassung des Grundkreisradius werden mittels taktiler Referenzmessungen validiert. Als Referenzmessgerät wird hierzu ein Portal-Koordinatenmessgerät des Typs Leitz PMM-F 30.20.7 verwendet. Die Leitz PMM-F 30.20.7 ist mit einem Drehtisch zur Positionierung der Messobjekte ausgestattet und besitzt darüber hinaus ein Messvolumen von $3,0 \times 2,0 \times 0,7 \text{ m}^3$. Die spezifizierte Längenmessabweichung MPE_E ist mit $(1,3 + L/400) \text{ }\mu\text{m}$ angegeben, wobei L der gemessenen Länge in mm entspricht. Die höchstzulässige Antastabweichung eines einzelnen Punktes ergibt sich demnach zu

$MPE_P = 1,3 \mu\text{m}$. Die Kombination des großen Messbereichs und der geringen Messabweichungen ermöglichen grundsätzlich einen hohen dynamischen Bereich bei der Verzahnungsmessung.

In Standard-Verzahnungsmessungen wird die Profilgeometrie aller Zähne auf Höhe der jeweiligen optischen Multi-Distanzmessung erfasst. Die Messpunktedichte beträgt dabei unabhängig von der Größe der Verzahnung 100 Messpunkte pro Millimeter Wälzweg. Anschließend wird die klassische Abweichungskenngröße Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$ pro Zahn ermittelt. Basierend aus dem linearen Zusammenhang zwischen Grundkreisradius und Profil-Winkelabweichung werden nach Gleichung (2.1) daraufhin Referenzwerte für den mittleren als auch für die zahnindividuellen Grundkreisradien bestimmt.

Die Berechnung der Messunsicherheit u_{r_b} der Referenzgrundkreisradien erfolgt dann mit Hilfe einer Fortpflanzungsrechnung

$$u_{r_b} = \sqrt{\left(\frac{\partial r_b}{\partial \bar{f}_{H\alpha}} \cdot u_{\bar{f}_{H\alpha}}\right)^2} = \frac{r_{b,n}}{L_\alpha} \cdot u_{\bar{f}_{H\alpha}} \quad \text{mit} \quad u_{\bar{f}_{H\alpha}} = \frac{u_{f_{H\alpha}}}{\sqrt{z}} \quad (5.1)$$

gemäß GUM [JCG2008] und Gleichung (2.1), wobei für die taktil erfassten zahnindividuellen Profil-Winkelabweichungen eine Messunsicherheit von $u_{f_{H\alpha}} = 1 \mu\text{m}$ ($k = 1$) angenommen wird. Der Parameter $r_{b,n}$ beschreibt den Nenngrundkreisradius, L_α die Wälzweglänge entsprechend des Auswertebereichs auf der Zahnflanke und z ist die Anzahl der Zähne.

Die Messdauer der taktilen Referenzmessungen ist abhängig von der Größe der zu messenden Verzahnung. Im Rahmen dieser Arbeit betragen die Messdauern der Referenzmessungen zwischen 7 Minuten und 15 Minuten.

Alle Referenzmessungen werden zudem in einem klimatisierten Messraum durchgeführt. Temperaturänderungen über die Zeit betragen weniger als $0,4 \text{ K}$ pro Stunde. Um eine möglichst stationäre Temperaturverteilung während der Messungen zu erhalten, wird die jeweilige Messanordnung mehrere Stunden vor der Messung eingerichtet.

5.2 Experimenteller Messaufbau

Der Multi-Distanz-Messansatz zur Messung der Geometrie von Verzahnungen wird in dieser Arbeit anhand des rotatorisch-scannenden Messansatzes (vgl. Abschnitt 2.4.3) validiert. Die grundsätzliche Validierung des Multi-Distanz-Messansatzes erfolgt an einer kleinen evolventischen Geradverzahnung. Die Skalierbarkeit wird am Beispiel einer Großverzahnung ebenfalls mit Evolventenprofil demonstriert. Zur modellbasierten Auswertung des Grundkreisradius bedarf es der Kenntnis der Sensorposition im Messkoordinatensystem, weshalb die Messanordnung des Messansatzes zuerst kalibriert werden muss.

In diesem Abschnitt wird daher der experimentelle Aufbau des rotatorisch-scannenden Multi-Distanz-Messansatzes dargelegt. Unterabschnitt 5.2.1 präsentiert die zur Validierung verwendeten Verzahnungen. Darauf folgend beschreibt Unterabschnitt 5.2.2 die realisierte Messanordnung und Unterabschnitt 5.2.3 erläutert die Kalibrierung der Messanordnung.

5.2.1 Messobjekte

Dieser Unterabschnitt beschreibt die verwendeten Verzahnungen zur Validierung des Multi-Distanz-Messansatzes und dessen Skalierbarkeit. Es werden Geometrieparameter sowie Oberflächeneigenschaften der Messobjekte dargelegt.

Der modellbasierte Multi-Distanz-Messansatz für die optische Erfassung der Verzahnungsgeometrie wird im Rahmen dieser Arbeit an einer nicht modifizierten Geradverzahnung mit Evolventenprofil mittlerer Größe validiert. Die Verzahnung ist bereits in Bild 4.12 einzusehen und wurde auch für die Charakterisierung der optischen Sensoren eingesetzt. Das Zahnrad hat einen nominellen Kopfkreisdurchmesser von 105 mm, besitzt 26 Zähne und der Normalmodul beträgt 3,75 mm. Die entsprechende Fertigungstoleranz für den Grundkreisradius kann mittels der DIN ISO 1328-1 [DIN2018a] und Gleichung (2.1) abgeschätzt werden und beträgt 20,4 μm für Verzahnungsqualität 6. Nach DIN ISO 18653 ist dann eine Messunsicherheit von 6,1 μm ($k = 2$) für den Grundkreisradius erforderlich [DIN2009]. In Standard-Verzahnungsmessungen mittels des taktilen Koordinatenmessgeräts und ebenfalls auf Basis von Gleichung (2.1) und Gleichung (5.1) wird der mittlere Referenzgrundkreisradius zu 45,8182 mm \pm 0,001 mm ($k = 2$) für die linken Zahnflanken bestimmt. Die Validierung des Multi-Distanz-Messansatzes wird zunächst nur für eine Zahnflankenseite demonstriert. Die geringe Messunsicherheit für den mittleren Grundkreisradius resultiert dabei aus der Mittelung über alle Zähne. Analog dazu werden die zahnindividuellen Grundkreisradien der linken Zahnflanken bestimmt. Die Messunsicherheit der zahnindividuellen Referenzgrundkreisradien beträgt 5,2 μm ($k = 2$) nach Gleichung (5.1) und einer geschätzten Unsicherheit von 1 μm ($k = 1$) für die Erfassung der Profil-Winkelabweichungen. Die Verzahnung ist zudem aus klassischem Werkzeugstahl gefertigt und der Mittenrauwert R_a der Zahnflankenoberfläche beträgt im Mittel 0,45 μm .

Die Skalierbarkeit des modellbasierten optischen Multi-Distanz-Messansatzes wird an einer geradverzahnten, nicht modifizierten Großverzahnung mit Evolventenprofil demonstriert (vgl. Bild 5.1). Die Verzahnung hat einen Kopfkreisdurchmesser von 480 mm und besitzt 38 Zähne. Mit einem Normalmodul von 12 mm, zählt die Verzahnung zu den Großverzahnungen und eignet sich daher insbesondere zur Demonstration der Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes. Basierend auf der DIN ISO 1328-1 [DIN2018a] und der Gleichung (2.1) berechnet sich die Fertigungstoleranz für den Grundkreisradius zu 37,5 μm für die Verzahnungsqualität 6. Um den Formparameter Grundkreisradius bestimmen zu können, ist gemäß DIN ISO 18653 eine Messunsicherheit von 11,2 μm ($k = 2$) zu erzielen [DIN2009]. Referenzwerte für den mittleren Grundkreisradius, als auch für zahnindividuelle Grundkreisradien werden ebenfalls mittels Standard-Verzahnungsmessungen und anschließend auf Basis von Gleichung (2.1) sowie Gleichung (5.1) bestimmt. Der mittlere Grundkreisradius für die linken Zahnflanken berechnet sich zu 214,2496 mm \pm 0,002 mm ($k = 2$). Die Großverzahnung ist aus klassischem Werkzeugstahl gefertigt. Die mittlere Oberflächenrauheit der Zahnflanken ist nicht bekannt.

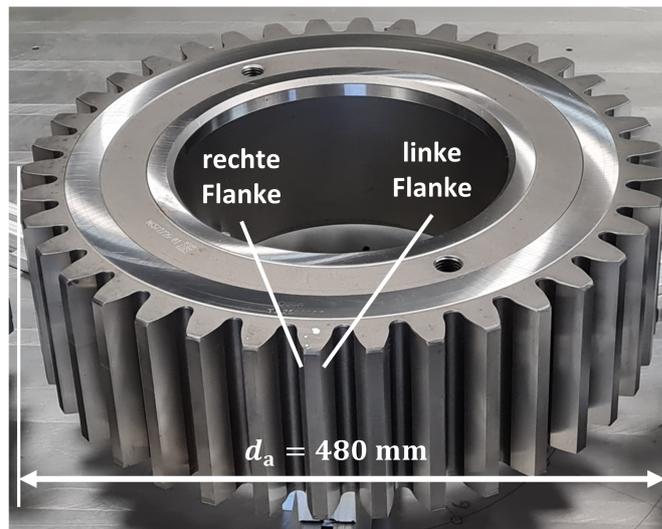


Bild 5.1: Großverzahnung zur Demonstration der Skalierbarkeit des optischen Multi-Distanz-Messansatzes. Die Großverzahnung hat einen Kopfkreisdurchmesser von 480 mm, 38 Zähne und einen großen Normalmodul von 12 mm.

5.2.2 Messanordnung

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Validierung des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes zur optischen Messung der Verzahnungsgeometrie anhand des rotatorisch-scannenden Messansatzes (vgl. Abschnitt 2.4.3). Der rotatorisch-scannende Ansatz bietet die Vorteile, mit nur einem Sensor in Kombination mit einem Drehtisch, die Profilgeometrie aller Zähne mit hoher Messpunktedichte innerhalb einer Umdrehung zu erfassen. Zudem ermöglicht der rotatorisch-scannende Messansatz eine senkrechte Sensorausrichtung auf die Zahnflanken, wodurch potenzielle systematische Effekte durch die Oberflächenneigung zwischen Sensorachse und Zahnflankennormale reduziert werden.

Der realisierte Versuchsaufbau des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes ist in Bild 5.2 dargestellt. Während Bild 5.2 (a) die Messanordnung zur allgemeinen Validierung des Messansatzes an einer mittelgroßen Verzahnung zeigt, ist in Bild 5.2 (b) die Messanordnung zur Demonstration der Skalierbarkeit dargestellt.

Die Bewegungseinheit des rotatorisch-scannenden Multi-Distanz-Messansatzes stellt jeweils der Drehtisch des Portal-Koordinatenmessgeräts Leitz PMM-F 30.20.7 dar, auf dem die Verzahnungen durch eine spezielle Spanneinheit möglichst konzentrisch im Drehpunkt positioniert werden. Die Rotationsgeschwindigkeit des Drehtisches beträgt circa $1,1 \text{ min}^{-1}$ und ist so gewählt, dass eine nahezu gleichmäßige Rotation und eine schnelle, scannende Messung gewährleistet wird. Der realisierte rotatorisch-scannende Messansatz erfasst unabhängig von der Größe der Verzahnung die Profilgeometrie aller Zahnflanken innerhalb einer Minute, womit das Ziel der Messung der Geometrie aller Zahnflanken innerhalb 5 Minuten erfüllt ist. Im Vergleich zu taktilen Referenzmessungen kann damit eine Reduzierung der Messdauer von bis zu einem Faktor von 15 erzielt werden.

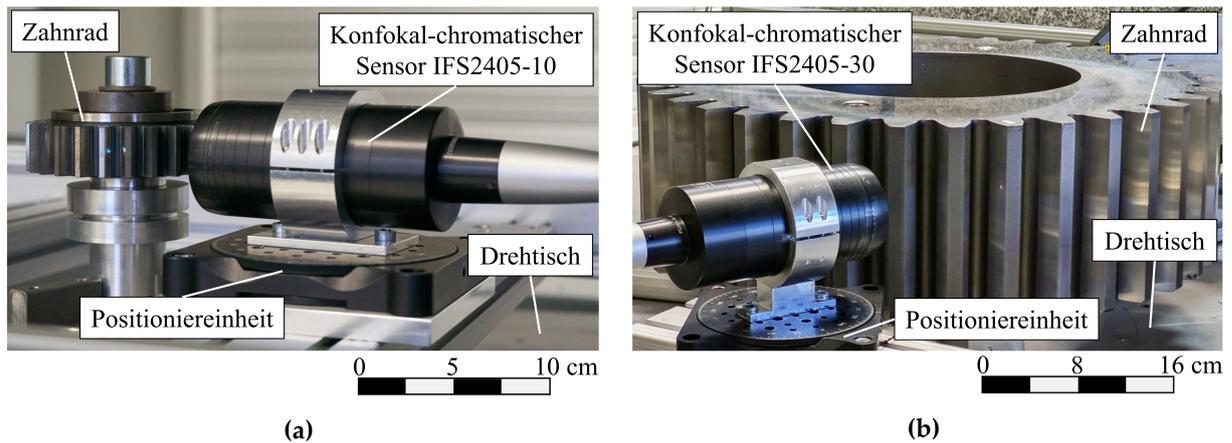


Bild 5.2: Messaufbau zur rotatorisch-scannenden Multi-Distanzmessung der Geometrie von Verzahnungen, bestehend aus einem optischen Sensor und einem Drehtisch. (a) zeigt die Messanordnung zur grundsätzlichen Validierung des Messansatzes an einer mittelgroßen Verzahnung mit einem Kopfkreisdurchmesser von 105 mm, einem Normalmodul 3,75 mm und 26 Zähnen unter Verwendung eines konfokal-chromatischen Sensors mit einem Messbereich von 10 mm. (b) veranschaulicht die Messanordnung zur Demonstration der Skalierbarkeit an einer Großverzahnung mit einem Kopfkreisdurchmesser von 480 mm, 38 Zähnen und einem großen Normalmodul von 12 mm und einem konfokal-chromatischen Sensor mit einem Messbereich von 30 mm. Eine Positioniereinheit ermöglicht die Ausrichtung der jeweiligen Sensoren senkrecht zu den Zahnflanken.

Zur Validierung des Multi-Distanz-Messansatzes werden kommerziell erhältliche konfokal-chromatische Abstandssensoren für die Messung der Profilgeometrie der Zahnflanken verwendet. Konfokal-chromatische Sensoren sind derzeit noch nicht zur Verzahnungsmessung erprobt, experimentelle Untersuchungen zur Zahnformmessung an einem Zahnflankenormal sowie an einer mittelgroßen Geradverzahnung (vgl. Kapitel 4) belegen jedoch das vielversprechende Anwendungspotenzial.

Die allgemeine Validierung des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes erfolgt mit dem in Kapitel 4 charakterisierten konfokal-chromatische Sensor IFS2405-10 der Firma MicroEpsilon. Der Sensor ist für einen Messbereich von 10 mm spezifiziert und die an Verzahnungen experimentell ermittelte anwendungsbezogene Sensorunsicherheit beträgt je nach Ausrichtung und Sensorabschattung durch benachbarte Zähne $\leq 6,1 \mu\text{m}$ für $k = 1$. Die Erfassung der Geometrie der zu untersuchenden Großverzahnung erfordert hingegen Abstandssensoren mit einem Messbereich von mindestens 28 mm. Der konfokal-chromatische Sensor IFS2405-10 ist damit nicht für Großverzahnungsmessungen anwendbar. Daher wird die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes mit einem weiteren kommerziell erhältlichen konfokal-chromatischen Sensor des Typs IFS2405-30 der Firma MicroEpsilon untersucht. Der IFS2405-30 ist für einen Messbereich von 30 mm bei einem Arbeitsabstand von 100 mm spezifiziert, so dass auch die Geometrie von Verzahnungen mit Normalmodulen $\geq 10 \text{ mm}$ gemessen werden kann. Der Messbereich ist damit dreimal größer, als beim IFS2405-10. Eine anwendungsbezogene Sensorunsicherheit für die Verzahnungsmessung wurde für den IFS2405-30 in dieser Arbeit nicht explizit charakterisiert. Die vom Hersteller spezifizierte Abstandsunsicherheit des Sensors beträgt $7,5 \mu\text{m}$ ($k = 1$) und ist damit wie auch der Messbereich um den Faktor 3 größer, als die spezifizierte Abstandsunsicherheit des konfokal-chromatischen Sensor IFS2405-10. Aus diesem Grund wird zunächst die An-

nahme getroffen, dass die erreichbare Sensorunsicherheit bei der Verzahnungsmessungen ebenfalls dreimal größer ist. Die anwendungsbezogene Sensorunsicherheit wird damit zu $\leq 18 \mu\text{m}$ abgeschätzt. Der Akzeptanzwinkel des Sensors beträgt $\pm 9^\circ$, weshalb bei der Messanordnung insbesondere auf eine senkrechte Ausrichtung zur Zahnflankenoberfläche geachtet werden muss.

Die Sensorpositionen werden so gewählt, dass zur Erfassung der Profilgeometrie der Zahnflanken jeweils der gesamte Messbereich verwendet wird. Im Rahmen der Verzahnungsmessungen werden die Sensoren möglichst senkrecht auf die Zahnflankenoberfläche und in einer Ebene mit einer manuellen Dreheinheiten angeordnet. Aufgrund eines Taumels, durch eine exzentrische und möglicherweise leicht schräge Einspannung der Verzahnungen auf dem Drehtisch, weicht die reale Sensorausrichtung jedoch von der idealen senkrechten Ausrichtung periodisch bei der Drehbewegung ab.

Die grundsätzliche Validierung und Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes wird jeweils an einer Zahnflankenseite untersucht. Am kleinen Zahnrad wird primär die linke Zahnflanke und an der Großverzahnung die rechte Zahnflanke betrachtet. Wiederholungsmessungen werden daraufhin immer am gleichen Zahn und auf der jeweiligen Flankenseite gestartet. Je nach verwendeter Steuereinheit von MicroEpsilon erreichen die Sensoren Messraten von über 10 kHz. Für die Validierung des Multi-Distanz-Messansatzes messen die konfokal-chromatischen Sensoren die Abstände zur Zahnflankenoberfläche zunächst mit einer Messrate von 1 kHz, während das Zahnrad rotiert. Es gilt zu beachten, dass zum derzeitigen Zeitpunkt keine Synchronisation des Drehtisches mit dem Messsignal der konfokal-chromatischen Sensoren möglich ist. Die Drehwinkel werden daher nicht zeitsynchron mit den entsprechenden Abstandsinformationen erfasst. Zur Validierung des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes wird eine konstante Winkelgeschwindigkeit über den gesamten Umfang angenommen, um die gemessenen Abstände und Drehwinkel miteinander zu korrelieren. Es ist zu erwarten, dass die Annahme einer konstanten Winkelgeschwindigkeit zu zusätzlichen zufälligen Abweichungen bei der Messdatenaufnahme und damit auch bei der Auswertung des Grundkreisradius führt. Bei der rotatorisch-scannenden Messung mit senkrecht zur Zahnflanke ausgerichteten Sensoren führen Nachbarzähne abhängig vom Drehwinkel zu einer Abschattung des Sensorsignals. Die Evolventen werden somit nicht vollständig erfasst. Pro Zahn ergeben sich abhängig von der optischen Zugänglichkeit für das mittelgroße Zahnrad im Mittel 1393 Messpunkte und für die Großverzahnung 1029 Messpunkte. Für die modellbasierte Auswertung des Grundkreisradius müssen die in Abhängigkeit vom Drehwinkel gemessenen Abstände zur Zahnflankenoberfläche anschließend in Messpunkte des Messkoordinatensystems transformiert werden. Diese Messdatentransformation bedarf jedoch der Kenntnis der Transformationsvorschrift zwischen Messkoordinatensystem und Werkstückkoordinatensystem, ansonsten können dominante Messabweichungen bei der Grundkreisradiusapproximation auftreten. Um die systematischen Abweichung zu reduzieren, muss die Messanordnung des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes kalibriert und justiert werden.

5.2.3 Kalibrierung am Beispiel einer Offset-Korrektion

Dieser Abschnitt beschreibt die Kalibrierung des realisierten rotatorisch-scannenden Multi-Distanz-Messansatzes. Im Vergleich zu den Monte-Carlo-Simulationen in Kapitel 3 wird die Messanordnung nicht geometrisch eingemessen. Eine exakte Transformationsvorschrift zwischen Messkoordinatensystem und Werkstückkoordinatensystem ist daher nicht bekannt. Als Kalibrierstrategie wird in den experimentellen Untersuchungen hingegen der Ansatz einer Offset-Korrektion angewendet. Die Kalibrierung der Messanordnung erfolgt dabei an einem Kalibrierzahnrad mit bekannter Geometrie, wobei die Geometrie zuvor auf Basis einer Standard-Verzahnungsmessung mit einem Koordinatenmessgerät und Gleichung (2.1) bestimmt wurde.

Vor der eigentlichen Verzahnungsmessung wird in einem ersten Schritt das jeweilige Kalibrierzahnrad möglichst konzentrisch auf dem Drehtisch positioniert. Wiederholungsmessungen erfassen daraufhin die Profilgeometrie der Zähne des Kalibrierzahnrad. Die Transformationsvorschrift zu der entsprechenden Messanordnung zur Umrechnung der Messdaten in Koordinaten wird hierbei zunächst geschätzt. Im Anschluss wird der gesuchte Grundkreisradius modellbasiert bestimmt. Die dabei entstehenden systematischen abweichenden Grundkreisradien werden dann mit den Referenzwerten des Kalibrierzahnrad verglichen. Auf Basis des Vergleichs werden Korrekturwerte für die Offset-Korrektion für die nachfolgenden Verzahnungsmessungen berechnet. Ist der mittlere Grundkreisradius gesucht, wird ein mittlerer Korrekturwert über alle Zähne ermittelt. Bei der Auswertung der zahnindividuellen Grundkreisradien erfolgt die Offset-Korrektion für jeden einzelnen Zahn.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Offset-Korrektion für eine bestimmte Messanordnung gilt. Ändert sich die Messanordnung, so muss eine neue Kalibrierung des Multi-Distanz-Messsystems erfolgen. Eine Herausforderung für den Messaufbau ist daher eine reproduzierbare Einspannung des Zahnrad auf dem Drehtisch. Weichen die Positionen des Kalibrierzahnrad und der später zu messenden Zahnrad deutlich voneinander ab, verbleibt trotz Offset-Korrektion eine systematische Abweichung.

Gemäß DIN EN ISO 15530 muss das Kalibrierzahnrad für eine Offset-Korrektion Ähnlichkeitsbedingungen hinsichtlich der Geometrie des zu messenden Zahnrad erfüllen [DIN2018b]. Infolgedessen wird der Ansatz verfolgt, ein Kalibrierzahnrad mit gleicher nomineller Geometrie zu verwenden. Für die allgemeine Validierung des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes wird daher ein mittelgroßes, nicht modifiziertes Kalibrierzahnrad mit einem Kopfkreisdurchmesser von 105 mm, 26 Zähnen und einem Normalmodul von 3,75 mm herangezogen. Der gemessene mittlere Referenzgrundkreisradius wurde zu $45,8184 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ($k = 2$) bestimmt. Bild 5.3 stellt dazu die taktil gemessenen zahnindividuellen Grundkreisradien $r_{b,Z}$ des Kalibrierzahnrad im Vergleich zum Messzahnrad dar, um die Einhaltung der Ähnlichkeitsbedingungen nachzuweisen.

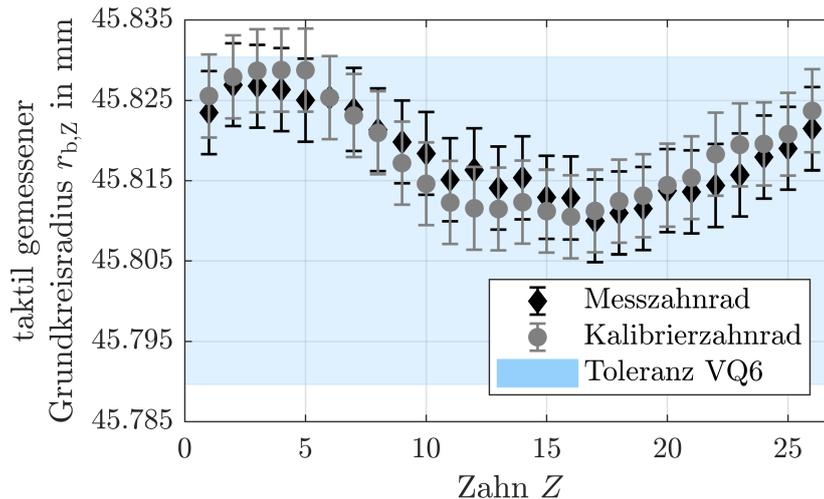


Bild 5.3: Taktill gemessene zahnindividuelle Grundkreisradien $r_{b,Z}$ des mittelgroßen Messzahnrad und eines weiteren Kalibrierzahnrad mit nominell vergleichbarer Geometrie mit erweiterter Messunsicherheit für $k = 2$. Im Rahmen der Toleranzen für Verzahnungsqualität 6 (VQ 6), blau eingezeichnet, erfüllen die Zahnräder die Ähnlichkeitsbedingungen gemäß DIN EN ISO 15530 für eine Offset-Korrektion.

In beiden Referenzmessungen ist eine vergleichbare annähernd sinusförmige Verteilung der zahnindividuellen Grundkreisradien zu erkennen. Die sinusförmige Verteilung resultiert dabei hauptsächlich durch eine systematische Abweichung in der jeweiligen Erfassung des Werkstückkoordinatensystems und ist den eigentlichen fertigungsbedingten Abweichungen überlagert. Im Rahmen der Fertigungstoleranzen für die Verzahnungsqualität 6 erfüllen das Kalibrierzahnrad und das zu messende Zahnrad die Ähnlichkeitsbedingungen.

Für die Kalibrierung der Messanordnung zur Validierung der Skalierbarkeit war im Rahmen dieser Arbeit keine weitere Verzahnung mit vergleichbarer Geometrie verfügbar. Als Alternative wird eine Umschlagmessung als Kalibrierung angewandt. Die rechte Zahnflanke der Großverzahnung dient als Kalibrierzahnflanke und wird vor der Messung mit dem Multi-Distanz-Messansatz erfasst. Daraufhin wird das Zahnrad um 180° gestürzt und die eigentliche Messung an der linken Zahnflanke durchgeführt. Der Referenzwert für den mittleren Grundkreisradius über alle rechten Zahnflanken beträgt dabei $214,2414 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ ($k = 2$). Die taktill ermittelten zahnindividuellen Grundkreisradien $r_{b,Z}$ der rechten Zahnflanken sind in Bild 5.4 im Vergleich zu den Referenzwerten der linken Zahnflanken veranschaulicht. Die Ergebnisse zeigen eine Übereinstimmung der Formparameter innerhalb der tolerierten Abweichung und die Ähnlichkeitsbedingungen gelten als erfüllt.

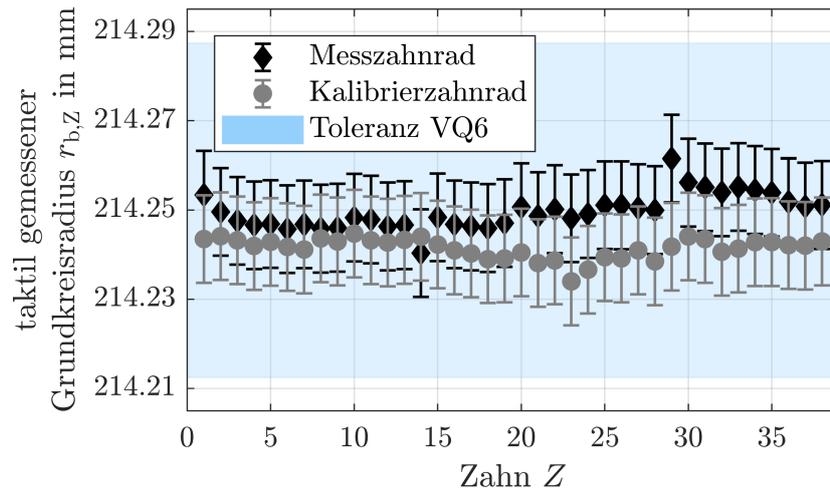


Bild 5.4: Taktill gemessene zahnindividuelle Grundkreisradien $r_{b,Z}$ der Großverzahnung mit erweiterter Messunsicherheit für $k = 2$. Die taktillen Referenzmessungen stimmen im Rahmen der Toleranzen für Verzahnungsqualität 6 (VQ 6), blau eingezeichnet, überein und erfüllen somit die Ähnlichkeitsbedingungen gemäß DIN EN ISO 15530 für eine Offset-Korrektur.

5.3 Ergebnisse der Multi-Distanzmessungen und Messunsicherheitsdiskussion

Dieser Abschnitt befasst sich mit den optischen Multi-Distanzmessungen an Verzahnungen zur Validierung des Multi-Distanz-Messansatzes und dessen Skalierbarkeit. An einer mittelgroßen Verzahnung soll zunächst in Unterabschnitt 5.3.1 die allgemeine Validierung des Messansatzes erfolgen und die erreichbare Messunsicherheit sowohl für den mittleren als auch zahnindividuellen Grundkreisradius werden ermittelt. Die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes wird nachfolgend am Beispiel einer Multi-Distanzmessung an einer Großverzahnung in Unterabschnitt 5.3.2 demonstriert und hinsichtlich der erzielten Messunsicherheit für den mittleren und zahnindividuellen Grundkreisradius diskutiert. Abschließend wird in Unterabschnitt 5.3.3 der dynamische Bereich des realisierten Multi-Distanz-Messansatzes diskutiert.

5.3.1 Validierung des Multi-Distanz-Messansatzes an einer mittelgroßen Verzahnung

Zur allgemeinen Validierung des Multi-Distanz-Messansatzes für Verzahnungsmessungen und zur Abschätzung der erreichbaren Messunsicherheit werden die linken Zahnflanken eines mittelgroßen Zahnrads mit einem nominellen Kopfkreisdurchmesser von 105 mm gemessen. In einem ersten Schritt wird dann der mittlere Grundkreisradius r_b auf Basis der Messdaten aller Zähne ausgewertet und die erreichbare Messunsicherheit bestimmt. Anschließend folgt in einer zweistufigen Approximation die Berechnung zahnindividueller Grundkreisradien $r_{b,Z}$. Um systematische Messabweichungen durch eine unbekannte Messanordnung bei der Auswertung des Grundkreisradius zu reduzieren, wurde der realisierte

Multi-Distanz-Messansatz zuvor gemäß Unterabschnitt 5.2.3 mit einem bekannten Kalibrierzahnrad kalibriert. In 22 Wiederholungsmessungen mit gleichen Randbedingungen hinsichtlich der Messanordnung werden ein mittlerer Korrekturwert für den mittleren Grundkreisradius mit einer Unsicherheit von $0,52\ \mu\text{m}$ ($k = 1$) als auch für die zahnindividuellen Grundkreisradien mit einer Unsicherheit von $2,6\ \mu\text{m}$ ($k = 1$) bestimmt.

Die zu messende Verzahnung wird für die Multi-Distanzmessungen entsprechend der Kalibriermessung möglichst konzentrisch auf dem Drehtisch positioniert und eingespannt. Trotz der speziellen Spannvorrichtung muss davon ausgegangen werden, dass sich die Position des zu messenden Zahnrad und des Kalibrierzahnrad voneinander unterscheiden. Trotz Offset-Korrektur würde dann eine systematische Messabweichung verbleiben. Darauf folgend wird in 22 Wiederholungsmessungen unter konstanten Randbedingungen die Profilgeometrie aller linken Zahnflanken mittels des Multi-Distanz-Messansatzes gemessen. Im Anschluss erfolgen die modellbasierte Auswertung des Grundkreisradius mit Offset-Korrektur und eine Messunsicherheitsabschätzung.

Bild 5.5 zeigt die Messergebnisse der aus den 22 Multi-Distanzmessungen approximierten mittleren Grundkreisradien r_b im Vergleich zu dem taktil erfassten mittleren Referenzgrundkreisradius. Die roten Kreuze symbolisieren den jeweilig mit dem Multi-Distanz-Messansatz erfassten mittleren Grundkreisradius. Zusätzlich ist der Mittelwert über die 22 Multi-Distanzmessungen als rote Linie dargestellt. Vergleichend dazu ist die taktile Referenzmessung als schwarze Linie mit erweiterter Unsicherheit für $k = 2$ angegeben.

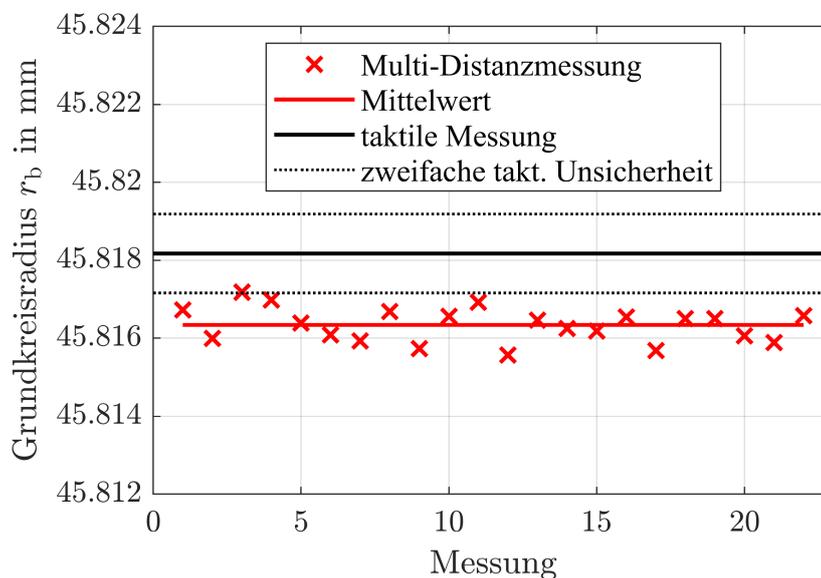


Bild 5.5: Ergebnisse der Multi-Distanzmessungen des mittleren Grundkreisradius r_b (rote Kreuze) im Vergleich zum taktil gemessenen Referenzgrundkreisradius (schwarze Linie) mit zweifach erweiterter taktiler Messunsicherheit ($k = 2$) für ein mittelgroßes Zahnrad.

Im Ergebnis wird eine gesamte Messunsicherheit von $3,9\ \mu\text{m}$ für $k = 2$ erreicht, die sich aus der Unsicherheit der Kalibrierung der Messanordnung, aus der Streuung der optischen Multi-Distanzmessungen und einer verbleibenden unbekannt systematischen Abweichung quadratisch zusammensetzt. Die erreichte Unsicherheit für den mittleren Grundkreisradius entspricht 19 % der geforderten Fertigungstoleranz für Verzahnungs-

qualität 6, womit die Zielsetzung einer Messunsicherheit $< 30\%$ der Toleranzen erfüllt ist.

Der Unsicherheitsbeitrag der optischen Multi-Distanzmessungen mit dem konfokal-chromatischen Sensor IFS2405-10 ergibt sich aus der Streuung der Wiederholungsmessungen zu $0,44\ \mu\text{m}$ ($k = 1$). Es wird angenommen, dass diese Streuung maßgeblich aus der in Kapitel 4 charakterisierten anwendungsbezogenen Sensorunsicherheit der Zahnformmessung des konfokal-chromatischen Sensors IFS2405-10 von circa $6,1\ \mu\text{m}$ für $k = 1$ resultiert. Ein Abgleich mit dem Simulationsmodell aus Unterabschnitt 3.2.1 bestärkt die Annahme, da der erwartete theoretisch abgeschätzte Beitrag zur Grundkreisradiusunsicherheit gemäß der experimentellen Randbedingungen in sehr guter Näherung im Submikrometerbereich mit den Messergebnissen übereinstimmt. Der experimentelle ermittelte Beitrag der optischen Abstandsmessungen zur Messunsicherheit des mittleren Grundkreisradius entspricht damit den Erwartungen und das vereinfachte Simulationsmodell erscheint als geeignete Methode zur Abschätzung des Unsicherheitsbeitrags aus der optischen Abstandsmessung.

Im Mittel weichen die Multi-Distanzmessungen um $-1,83\ \mu\text{m}$ von der taktilen Referenzmessung ab. Eine konkrete Abweichungsquelle für die systematische Abweichung konnte im Rahmen der Arbeit noch nicht final identifiziert beziehungsweise quantifiziert werden, weshalb sie zunächst als zufälliger Beitrag zur Messunsicherheit gewertet wird. Es wird vermutet, dass die systematische Abweichung vielmehr aus einer Überlagerung mehrerer Effekte resultiert, die mit der Offset-Korrektur des Messansatzes einhergehen. Die Offset-Korrektur des Multi-Distanz-Messansatzes fordert Ähnlichkeitsbedingungen hinsichtlich der Positionierung und Geometrie des Kalibrierzahnrad und zu messenden Zahnrad. Weicht die Zahnradposition des zu messenden Zahnrad von der Position des Kalibrierzahnrad auf dem Drehtisch ab oder sind die Verzahnungen unterschiedlich verkippt auf dem Drehtisch eingespannt, kann dies beispielsweise zu einer fehlerhaften Offset-Korrektur des approximierten Grundkreisradius führen. Auch zahnindividuelle Geometrieabweichungen zwischen Kalibrier- und Messzahnrad können einen Beitrag zur systematischen Abweichung bei der Grundkreisradiusapproximation mit Offset-Korrektur verursachen. Der Beitrag zur systematischen Abweichung durch die Geometrieabweichungen wird in dieser experimentellen Untersuchung jedoch als gering eingestuft, da die Abweichungen der taktil gemessenen Referenzgrundkreisradien zwischen Kalibrier- und Messzahnrad im Mittel kleiner als ein Mikrometer sind. Ein Nachweis steht noch aus und in zukünftigen Arbeiten gilt es die Anforderungen an die Ähnlichkeit hinsichtlich Positionierung und Geometrie bei der Offset-Korrektur zu konkretisieren. Trotz der festgestellten, derzeit noch unbekannt systematischen Messabweichung erfüllen die Multi-Distanzmessungen die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6. Zusammengefasst validieren die Messergebnisse die Eignung des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes zur Bewertung des mittleren Grundkreisradius.

Auf Basis der Messergebnisse der mittleren Grundkreisradiusapproximation werden in einer zweiten Approximationsstufe die zahnindividuellen Grundkreisradien $r_{b,z}$ berechnet (vgl. Abschnitt 2.3). Bild 5.6 veranschaulicht dazu die Messergebnisse der approximierten zahnindividuellen Grundkreisradien $r_{b,z}$. Die roten Kreuze stellen die mit

dem Multi-Distanz-Messansatz bestimmten gemittelten Grundkreisradien pro Zahn für 22 Wiederholungsmessungen dar. Die schwarzen Kreise zeigen vergleichend die zahnindividuellen Referenzgrundkreisradien. Zusätzliche ist die erweiterte Messunsicherheit für $k = 2$ bezogen auf eine Einzelmessung angegeben.

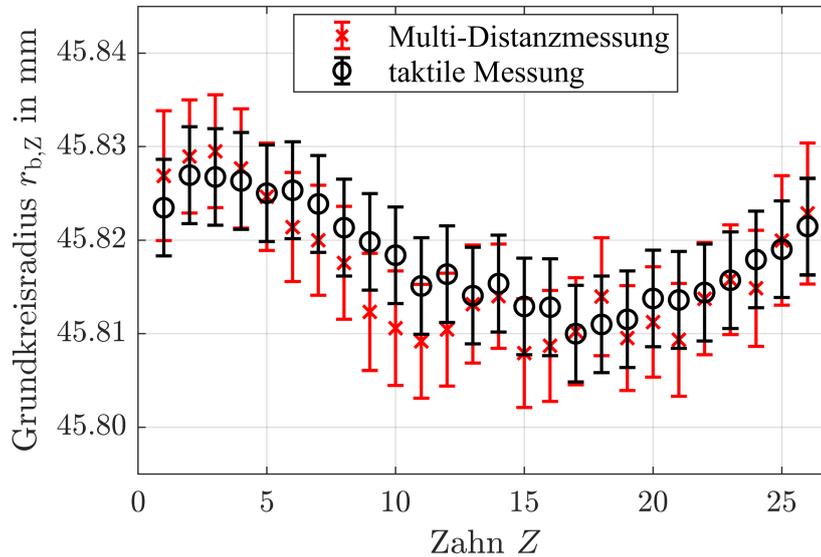


Bild 5.6: Ergebnisse der Multi-Distanzmessungen der zahnindividuellen Grundkreisradien $r_{b,z}$ pro Zahn für 22 Wiederholungsmessungen (rote Kreuze) im Vergleich zu den taktil gemessenen Referenzgrundkreisradien (schwarze Kreise) für ein mittelgroßes Zahnrad. Zusätzlich ist die mit $k = 2$ erweiterte Messunsicherheit für die jeweiligen bestimmten Grundkreisradien bezogen auf eine Einzelmessung angegeben.

Im Rahmen der erweiterten, auf den Mittelwert bezogenen Messunsicherheit stimmen die Multi-Distanzmessungen weitestgehend mit den taktilen Referenzmessungen überein. Dominante systematische Messabweichungen sind mit einer hohen statistischen Wahrscheinlichkeit nicht sichtbar. Im Mittel beträgt die erreichbare Messunsicherheit für den zahnindividuellen Grundkreisradius $6,1 \mu\text{m}$ ($k = 2$) und ist damit fast auf dem Niveau der Messunsicherheit der taktilen Referenzmessung von $5,2 \mu\text{m}$ ($k = 2$). Die Anforderung einer Messunsicherheit $< 30 \%$ der Toleranzen für Verzahnungsqualität 6 ist erfüllt.

Primär wird die erreichbare Messunsicherheit der zahnindividuellen Grundkreisradien von dem Unsicherheitsbeitrag aus der Kalibrierung der Messanordnung von $2,6 \mu\text{m}$ ($k = 1$) dominiert. Der Beitrag zur Unsicherheit des Grundkreisradius der optischen Multi-Distanzmessungen ergibt sich aus der Standardabweichung der 22 Wiederholungsmessungen zu $1,6 \mu\text{m}$. Es besteht die Annahme, dass dieser Unsicherheitsbeitrag der optischen Multi-Distanzmessungen maßgeblich aus der anwendungsbezogenen Sensorunsicherheit bei der Zahnformmessung mit dem Abstandssensor resultiert. Im Abgleich mit dem Simulationsmodell aus Unterabschnitt 3.2.1) ist der experimentell ermittelte Unsicherheitsbeitrag um den Faktor 3 größer als der erwartete theoretisch abgeschätzte Beitrag zur Grundkreisradiusunsicherheit. Das Simulationsmodell ist ein vereinfachtes Modell zur Abschätzung der Messunsicherheit und berücksichtigt nur den Beitrag der zufälligen Messabweichungen der Abstandsmessung. Erwartungsgemäß treten im Experiment weitere Effekte auf, die

die Messunsicherheit bei der Grundkreisradiusapproximation beeinflussen. Ein möglicher Einfluss sind Schwingungen, die bei der rotatorisch-scannenden Multi-Distanzmessung durch die Scanbewegung verursacht werden. Die gemessenen Abstandsinformationen würden durch die Schwingungen mit einer zusätzlichen zufälligen Abweichung behaftet sein, was die Auswertung des Grundkreisradius zusätzlich zufällig beeinflusst. Auch wird ein weiterer zufälliger Einfluss in der Steuerung des Drehtisches vermutet. Zum Zeitpunkt der scannenden Messungen war es nicht möglich, die Drehwinkel des Drehtisches zeit-synchron mit dem Messsignal des konfokal-chromatischen Sensors zu erfassen. Um den gemessenen Abständen daraufhin Drehwinkel zuzuordnen, wird eine konstante Winkelgeschwindigkeit über den gesamten Umfang der Verzahnung angenommen. Durch die Steuerung des Drehtisches ist jedoch von einer um einen Mittelwert streuenden Winkelgeschwindigkeit auszugehen. Gemessene Abstände werden dann verzerrt in Messpunkte des Messkoordinatensystems transformiert, was zu lokalen zufälligen Messabweichungen der gemessenen Zahnflankengeometrien führt und die Grundkreisradiusapproximation zusätzlich zufällig beeinflusst. Weitere potenzielle Abweichungen in der Drehbewegung des Drehtisches verursachen einen vergleichbaren Effekt und sind im Simulationsmodell bisher nicht berücksichtigt. Diese weiteren zufälligen Effekte fallen insbesondere bei der Auswertung der zahnindividuellen Grundkreisradien ins Gewicht, da der zahnindividuelle Grundkreisradius hier nur aus den Messpunkten einer Zahnflanke ermittelt wird, während der mittlere Grundkreisradius aus den Messpunkten aller Zähne bestimmt wird. Die hohe Messpunktedichte bei der Approximation des mittleren Grundkreisradius reduziert die Beiträge zufälliger Effekte. Im Ergebnis validieren die Messergebnisse den modellbasierten Multi-Distanz-Messansatz zur Erfassung zahnindividueller Formparameter. Die Zielsetzung einer Messunsicherheit für den zahnindividuellen Grundkreisradius $< 30\%$ der Toleranzen für Verzahnungsqualität 6 ist erfüllt.

Die klassische Verzahnungsmesstechnik wertet in der Regel zur Qualitätsprüfung von Verzahnungen definierte Abweichungskenngrößen mit definierten Anforderungen an die Messtechnik aus, wie beispielsweise die Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$ [DIN2018a, DIN2009]. Wie Abschnitt 2.1 zeigt, sind die Profil-Winkelabweichung und der Grundkreisradius linear ineinander umrechenbar (vgl. Gleichung (2.1)), sodass die Profil-Winkelabweichungen mit Messunsicherheit aus den mit dem Multi-Distanz-Messansatz erfassten zahnindividuellen Grundkreisradien abgeschätzt werden können. Da im Rahmen dieser Arbeit die Unsicherheitsanforderungen für den Grundkreisradius aus den Anforderungen für die Profil-Winkelabweichung abgeleitet werden und die Multi-Distanzmessungen diese Anforderungen für den Grundkreisradius erreichen, erfüllen die berechneten Profil-Winkelabweichungen ebenfalls die Anforderung einer Messunsicherheit $< 30\%$ der Toleranzen für Verzahnungsqualität 6. Die entsprechenden Messergebnisse für die berechneten Profil-Winkelabweichungen $f_{H\alpha}$ sind in Bild 5.7 dargestellt. Im Rahmen der Messunsicherheit sind keine dominanten systematischen Messabweichungen sichtbar und die erreichbare Messunsicherheit beträgt im Mittel $2,4\ \mu\text{m}$ ($k = 2$).

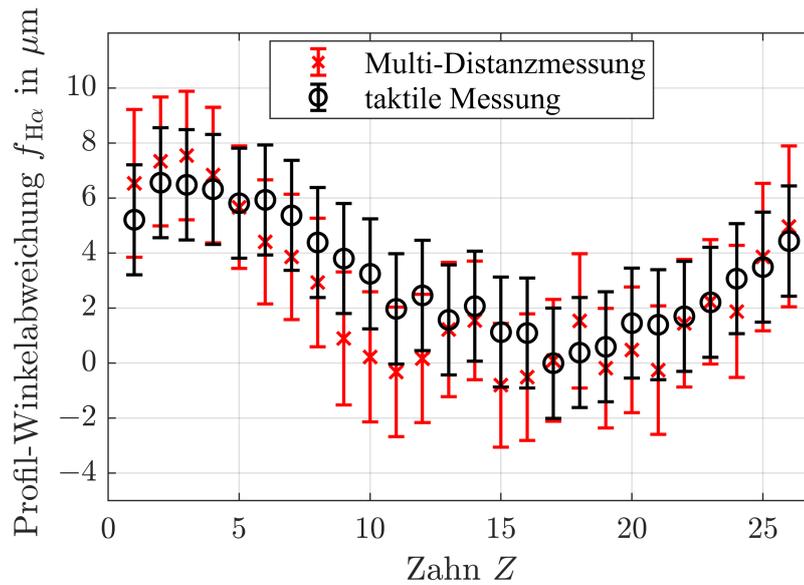


Bild 5.7: Messergebnisse der zahnindividuellen Profil-Winkelabweichungen $f_{H\alpha}$ für 22 Wiederholungsmessungen im Vergleich zu den taktil gemessenen Profil-Winkelabweichungen jeweils mit erweiterter Messunsicherheit $k = 2$ für ein mittelgroßes Zahnrad. Die Profil-Winkelabweichungen sind auf Basis der mit dem modellbasierten Multi-Distanz-Messansatz ermittelten zahnindividuellen Grundkreisradien und Gleichung (2.1) bestimmt.

Im Ergebnis validieren die Messergebnisse den modellbasierten Multi-Distanz-Messansatz zur Erfassung zahnindividueller Formparameter, wie beispielsweise den Grundkreisradius oder die Profil-Winkelabweichung. Der Multi-Distanz-Messansatz erreicht dabei fast eine Unsicherheit auf dem Niveau einer taktilen Referenzmessung. Gepaart mit der höheren Messgeschwindigkeit gegenüber taktilen Messsystemen, ist der Multi-Distanz-Messansatz eine erfolversprechende Alternative zur Qualitätsprüfung von Verzahnungen.

5.3.2 Demonstration der Skalierbarkeit am Beispiel einer Großverzahnung

Die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes ist für die Qualitätsprüfung von Verzahnungen verschiedener Größe, insbesondere von Großverzahnungen, von Interesse. Großverzahnungen stellen aufgrund der hohen Anforderungen an den erforderlichen dynamischen Bereich eine Herausforderung in der geometrischen Messtechnik dar.

Die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes wird im Rahmen dieser Arbeit an einer Großverzahnung mit einem nominellen Kopfkreisdurchmesser von 480 mm, 38 Zähnen und einem Normalmodul von 12 mm demonstriert (vgl. Bild 5.1). Zur Validierung der Skalierbarkeit werden wie in Abschnitt 5.3.1 zunächst der mittlere Grundkreisradius und die erreichbare Messunsicherheit betrachtet.

Analog zur Messung an der mittelgroßen Verzahnung muss die Messanordnung des Multi-Distanz-Messansatzes in einem ersten Schritt kalibriert werden. Unter konstanten Messbedingungen hinsichtlich der Messanordnung wird hierzu in 16 Wiederholungsmessungen die Profilgeometrie der rechten Zahnflanken erfasst und ein mittlerer Korrekturwert für den Grundkreisradius bestimmt. Darauf folgend kann die eigentliche Verzahnungsmes-

sung mit Offset-Korrektion erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit ist jedoch keine nominell vergleichbare Großverzahnung verfügbar, sodass die Demonstration der Skalierbarkeit an den linken Zahnflanken derselben Großverzahnung untersucht wird. Dazu wird das Zahnrad um 180° gestürzt und erneut möglichst konzentrisch auf dem Drehtisch positioniert. Auf diese Weise sind die eigentlichen linken und nun rechts angeordneten Zahnflanken für den konfokal-chromatischen Abstandssensor optisch zugänglich. Bei der Auswertung des Grundkreisradius werden die Messdaten der eigentlichen linken Zahnflanken daher als rechte Zahnflanken betrachtet.

Zur Validierung der Skalierbarkeit und zur Abschätzung der erreichbaren Messunsicherheit wird die Profilgeometrie des gestürzten Zahnrads ebenfalls wiederholend gemessen. Die Anzahl der Wiederholungsmessungen beträgt dabei 16. Die Ergebnisse der Messungen des mittleren Grundkreisradius r_b sind in Bild 5.8 dargestellt. Die roten Kreuze repräsentieren wieder die Multi-Distanzmessungen. Ergänzend ist der Mittelwert über die 16 Wiederholungsmessungen veranschaulicht. Im Vergleich zu den Multi-Distanzmessungen sind der taktil gemessene Referenzwert für den mittleren Grundkreisradius und die erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) angegeben. Die Multi-Distanzmessungen weichen im Mittel systematisch von dem Referenzgrundkreisradius um $21,8 \mu\text{m}$ ab und dominieren die gesamte erreichbare Messunsicherheit, sodass die Anforderung einer Messunsicherheit $< 30 \%$ der Toleranzen für Verzahnungsqualität 6 nicht erfüllt werden. Im Folgenden sollen daher die Beiträge der identifizierten möglichen Abweichungsquellen quantitativ abgeschätzt werden.

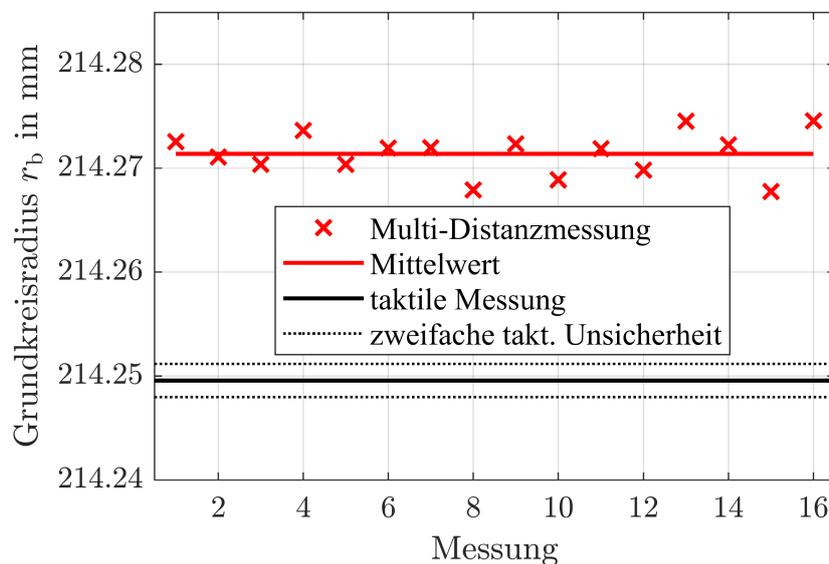


Bild 5.8: Messergebnisse der Multi-Distanzmessungen des mittleren Grundkreisradius r_b (rote Kreuze) im Vergleich zum taktil erfassten mittleren Referenzgrundkreisradius (schwarze Linie) mit zweifach erweiterter taktile Messunsicherheit ($k = 2$) für eine Großverzahnung. Eine dominante systematische Abweichung ist trotz Offset-Korrektion sichtbar.

Es wird vermutet, dass die systematische Abweichung aus einer Überlagerung mehrerer Abweichungsquellen resultiert. Eine Positionsänderung der Zahnräder zwischen der Kalibrierung und der eigentlichen Messung auf dem Drehtisch führt möglicherweise zu einer

verbleibenden systematischen Abweichung nach der Offset-Korrektur. Zusätzlich zu der Positionsänderung ist eine mögliche unterschiedliche Verkippung der Zahnräder bei der Einspannung zu beachten, die eine weitere erwartbare Abweichungsquelle darstellt. Gerade bei Großverzahnungen ist eine reproduzierbare Einspannung aufgrund der hohen Massen ($> 200\text{ kg}$) herausfordernd und eine gezielte Anpassung der Position und Ausrichtung kaum möglich. Darüber hinaus sind Geometrieabweichungen zwischen dem Kalibrierzahnrad und dem zu messenden Zahnrad eine weitere mögliche Abweichungsquelle. Taktile Referenzmessungen haben ergeben, dass die Grundkreisradien der rechten und linken Zahnflanken im Mittel um circa $8\ \mu\text{m}$ voneinander abweichen.

Der Beitrag zur Messabweichung der Positionsänderung zwischen dem Kalibrierzahnrad und dem zu messenden Zahnrad durch eine nicht reproduzierbare Zahnrad-Einspannung soll mittels zusätzlichen Messungen am Kalibrierzahnrad abgeschätzt werden. Nach der eigentlichen Kalibrierung wird das Kalibrierzahnrad dazu auf dem Drehtisch neu positioniert. Wünschenswert wäre eine vergleichbare Positionsänderung wie in der eigentlichen Validierungsmessung der Skalierbarkeit am Beispiel des mittleren Grundkreisradius, um den Beitrag der systematischen Abweichung konkret zu bestimmen. Mit dem realisierten Messaufbau ist es jedoch nicht möglich, die Zahnradposition der 250 kg schweren Großverzahnung gezielt anzupassen. Aus diesem Grund wird die Großverzahnung fünfmal willkürlich neu auf dem Drehtisch positioniert, sodass der Einfluss statistisch abgeschätzt werden kann. Die dabei realisierten Positionsabweichungen in x -Richtung sind im Mittel betragsmäßig um den Faktor $2,5$ und in y -Richtung um den Faktor $5,5$ kleiner, als die bei der Validierungsmessung der Skalierbarkeit realisierte Positionsabweichung. Die Positionsabweichung in der Validierungsmessung der Skalierbarkeit beträgt in x -Richtung $71\ \mu\text{m}$ und in y -Richtung $-91\ \mu\text{m}$. In 8 Wiederholungsmessungen mit konstanten Messbedingungen wird daraufhin die Profilgeometrie der rechten Zahnflanken der Großverzahnung für jede Verschiebung erneut gemessen, der mittlere Grundkreisradius r_b bestimmt und das Offset korrigiert.

Bild 5.9 zeigt die bestimmten mittleren Grundkreisradien r_b mit dem Multi-Distanz-Messansatz (rote Kreuze) für die fünf verschiedenen Zahnradpositionen im Vergleich zum taktile gemessenen Referenzgrundkreisradius (schwarze Linie). Zusätzlich ist jeweils die mit $k = 2$ erweiterte Messunsicherheit des Mittelwerts angegeben. Unter Berücksichtigung der erweiterten mittleren Messunsicherheit der optischen Multi-Distanzmessung und der taktilen Referenzmessung stimmen die erfassten mittleren Grundkreisradien nicht überein. Die Messungen bestätigen die Annahme, dass eine veränderte Zahnradposition zu systematischen Abweichungen in der Grundkreisradiusapproximation nach der Offset-Korrektur führt. Mit voranschreitender Neupositionierung der Verzahnung steigt die systematische Abweichung zwischen den optisch und taktile gemessenen Grundkreisradien. Die Neupositionierung der Großverzahnung auf dem Drehtisch erfolgte jedoch willkürlich und ein Zusammenhang zwischen den Positionsabweichungen und den Grundkreisradiusabweichungen ist im Rahmen der Messungen nicht identifizierbar. Bereits bei Positionsabweichungen von circa $\pm 30\ \mu\text{m}$ in x -Richtung und $\pm 17\ \mu\text{m}$ in y -Richtung zwischen Kalibrierung und anschließender Messung treten systematische Messabweichungen von bis zu $5\ \mu\text{m}$ auf. Im Hinblick auf die bis zu fünfmal größeren Positionsabweichungen

der Verzahnungen in der Validierungsmessung der Skalierbarkeit, ist ein dominanter systematischer Beitrag zur systematischen Messabweichung durch die Neupositionierung zu vermuten. Zusammenfassend validieren die Ergebnisse einen systematischen Einfluss durch die Positionsänderung zwischen dem Kalibrierzahnrad und dem zu messenden Zahnrad bei der Grundkreisapproximation mit Offset-Korrektion.

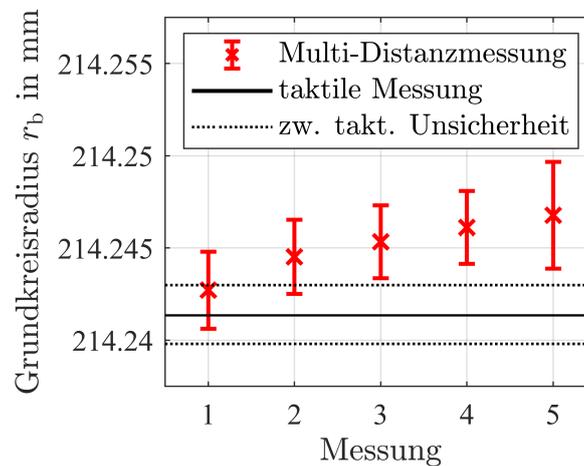


Bild 5.9: Untersuchung des Einflusses der Positionsänderung der Großverzahnung im Vergleich zur kalibrierten Messanordnung auf die Grundkreisradiusapproximation. Nach der Kalibrierung des Multi-Distanz-Messansatzes wird das Kalibrierzahnrad fünfmal auf dem Drehtisch neu positioniert und der mittlere Grundkreisradius r_b modellbasiert und mit Anwendung der Offset-Korrektion ausgewertet. Angegeben sind die für 8 Wiederholungsmessungen gemittelten mittleren Grundkreisradien (rote Kreuze) mit erweiterter Messunsicherheit für $k = 2$ und der taktil gemessene Referenzgrundkreisradius (schwarze Linie) ebenfalls mit zweifach erweiterter taktile Messunsicherheit.

Der mögliche systematische Einfluss durch eine verkippte Zahnradeinspannung auf dem Drehtisch auf die Grundkreisapproximation mit Offset-Korrektion wird zunächst auf Basis von auf Messdaten gestützten Simulationen theoretisch bestimmt. Die Simulationen erfolgen gemäß des vorgestellten Simulationskonzepts in Abschnitt 3.2, wobei die Sensoranordnung annähernd an die experimentelle Messanordnung angepasst ist. Zur Abschätzung des erwarteten systematischen Einflusses einer verkippten Zahnradeinspannung auf die Grundkreisapproximation mit Offset-Korrektion wird ein ideales Zahnrad mit der nominalen Geometrie der Großverzahnung für verschiedene verkippte Zahnradeinspannungen um die x' -Achse des Werkstückkoordinatensystems simuliert. Wie im Experiment wird bei der Grundkreisradiusapproximation von einer unbekanntem Sensoranordnung ausgegangen. Der Korrekturwert zur Offset-Korrektion der systematischen Abweichungen aus der Sensoranordnung wird im Rahmen dieser Simulationen für eine ideale, nicht verkippte Zahnradeinspannung bestimmt. Das simulierte verkippte Zahnrad wird daraufhin schrittweise gedreht und ein simulierter idealer Abstandssensor misst den Abstand zu den rechten Zahnflanken der Verzahnung. Anschließend folgen die Approximation des mittleren Grundkreisradius r_b mit der geschätzten abweichenden Sensoranordnung und die Offset-Korrektion für die ideale Zahnradeinspannung. Die daraufhin verbleibenden Abweichungen Δr_b zeigen den Einfluss einer verkippten Zahnradeinspannung auf die

Grundkreisapproximation mit Offset-Korrektion. Im Anschluss an die theoretische Betrachtung erfolgt auf Basis der Simulationen die Abschätzung des Beitrag zur systematischen Messabweichung für die realisierte Messanordnung der Großverzahnungsmessung. Vor der jeweiligen Multi-Distanzmessung wurde aus diesem Grund die Zahnradverkippung zusätzlich taktil erfasst.

Bild 5.10 zeigt die Simulationsergebnisse der Grundkreisapproximation für verkippte Zahnradeinspannungen für Kippwinkel von $[-1^\circ, 1^\circ]$ um die x' -Achse des Werkstückkoordinatensystems. Als graue Kreuze sind die Grundkreisradiusabweichungen Δr_b zu einer idealen Zahnradeinspannung für einen Kippwinkel von 0° dargestellt. Die Ergebnisse veranschaulichen einen quadratischen Zusammenhang der Grundkreisabweichung und des Kippwinkels des eingespannten Zahnrads, welcher als schwarze gestrichelte Linie eingezeichnet ist. Mit betragsmäßig steigender Zahnradverkippung nimmt die Empfindlichkeit der Grundkreisradiusabweichung gegenüber der Verkippung erheblich zu. Bereits ab Kippwinkeln von beispielsweise $\pm 0,5^\circ$ sind Messabweichungen von circa $6\ \mu\text{m}$ sichtbar und beeinflussen damit die Grundkreisradiusapproximation mit Offset-Korrektion maßgeblich. Aus diesem Grund ist bei der Multi-Distanzmessung mit Offset-Korrektion auf eine nahezu taumelfreie Zahnradeinspannung zu achten.

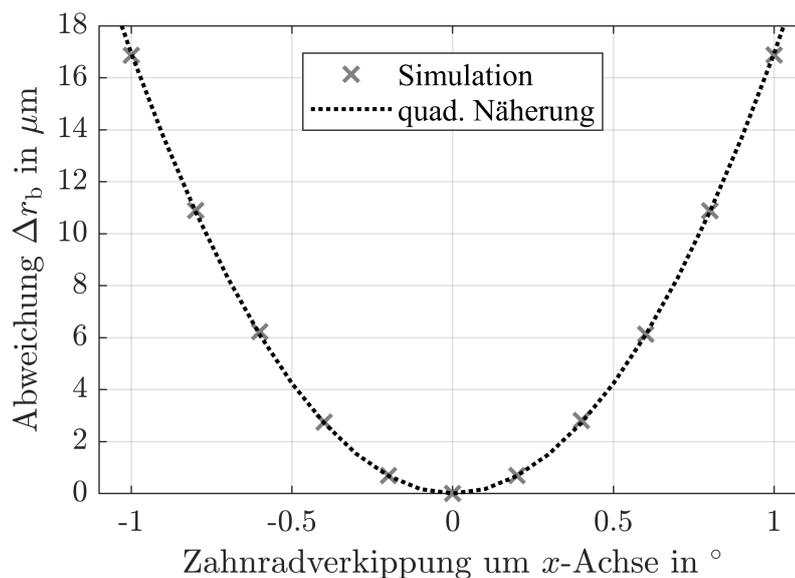


Bild 5.10: Theoretisch abgeschätzte Abweichung Δr_b bei der Approximation des mittleren Grundkreisradius (graue Kreuze) in Abhängigkeit von einer verkippten Zahnradeinspannung auf dem Drehtisch. Die Zahnradverkippung ist um die x' -Achse des Werkstückkoordinatensystems simuliert. Eine quadratische Näherung (schwarz gestrichelte Linie) veranschaulicht den funktionellen Zusammenhang zwischen Grundkreisradiusabweichung und Zahnradverkippung.

Zur Abschätzung des konkreten Beitrags zur systematischen Messabweichung durch die Zahnradverkippung in der Validierungsmessung der Skalierbarkeit, werden die taktil erfassten Verkippungen mit den Simulationsergebnissen abgeglichen. Die realisierten Zahnradverkippungen sind gemäß der taktilen Messung $< 0,1^\circ$, wodurch eine daraus resultierende systematische Messabweichung $< 0,5\ \mu\text{m}$ zu erwarten ist. Hinsichtlich der

experimentell bestimmten systematischen Abweichung des mittleren Grundkreisradius zur Referenzmessung von $21,8\ \mu\text{m}$ resultiert aus der Zahnradverkipfung kein dominierender Beitrag.

Der Einfluss von Geometrieabweichungen zwischen dem Kalibrierzahnrad und zu messendem Zahnrad auf die Multi-Distanzmessung mit Offset-Korrektur wird analog mittels einer auf Messdaten gestützten Simulation untersucht. Als Grundlage der Simulation dient auch hier das Simulationskonzept nach Abschnitt 3.2. Es wird eine ideale Abstandsmessung und konzentrische, nicht verkippte Zahnradpositionierung angenommen. Die Sensorausrichtung ist an die experimentelle Messanordnung angepasst. In einem ersten Schritt wird die Multi-Distanzmessung eines Zahnrads mit der taktil erfassten Geometrie des Kalibrierzahnrads simuliert und die Offset-Korrektur für die abgeschätzte Sensoranordnung berechnet. Darauf folgend wird die Multi-Distanzmessung eines simulierten Zahnrads mit der Geometrie des Messzahnrads betrachtet, die Offset-Korrektur angewendet und die verbleibenden Abweichungen bestimmt. Aus der Messdaten-gestützten Simulation ergibt sich eine verbleibende Grundkreisradiusabweichung von circa $0,5\ \mu\text{m}$, sodass kein dominanter Beitrag zur Messabweichung durch die unterschiedliche Geometrie der Verzahnungen besteht.

Zusammengefasst dominiert derzeit eine unbekannt systematische Messabweichung die erreichbare Messunsicherheit des mittleren Grundkreisradius bei der Multi-Distanzmessung. Als maßgebliche systematische Abweichungsquelle wird die Zahnradpositionsänderung zwischen der Kalibrierung und der eigentlichen Messung vermutet. Ein konkreter Beitrag zur systematischen Messabweichung konnte jedoch im Rahmen der Arbeit noch nicht final quantifiziert werden, was somit Gegenstand weiterführender Arbeiten ist.

Im Vergleich zu der berechneten systematischen Abweichung belegen die zufälligen Messabweichungen grundsätzlich die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes für Großverzahnungsmessungen. Unter Berücksichtigung der zufälligen Abweichungen aus der Kalibrierung und der optischen Multi-Distanzmessung ist eine Messunsicherheit von $4,52\ \mu\text{m}$ ($k = 2$) erreichbar, sofern die systematischen Abweichungen in Zukunft identifiziert und korrigiert werden. Die theoretisch erreichbare Messunsicherheit für den mittleren Grundkreisradius entspricht damit 12 % von der geforderten Fertigungstoleranz für Verzahnungsqualität 6. Damit ist die Zielsetzung einer Messunsicherheit $< 30\%$ der Grundkreisradiustoleranz für Verzahnungsqualität 6 grundsätzlich erreichbar.

Die Messunsicherheit berechnet sich dabei aus dem Unsicherheitsbeitrag von $0,88\ \mu\text{m}$ ($k = 1$) aus der Kalibrierung und der einfachen Standardabweichung der optischen Multi-Distanzmessungen von $2,08\ \mu\text{m}$. Es besteht weiterhin die Annahme, dass die Streuung der optischen Messungen des mittleren Grundkreisradius maßgeblich durch die anwendungsbezogene Sensorunsicherheit des konfokal-chromatischen Sensors IFS2405-30 bei der Abstandsmessung zu den Zahnflanken beeinflusst wird. Die anwendungsbezogene Sensorunsicherheit des Sensors wurde jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht und zunächst auf Basis der experimentellen Untersuchungen des kleineren vergleichbaren Sensors IFS2405-10 grob zu $18\ \mu\text{m}$ ($k = 1$) geschätzt. Gemäß der Annahme, dass die anwendungsbezogene Sensorunsicherheit der primäre Einflussfaktor auf die Streuung der optischen Multi-Distanzmessungen ist, wäre nach dem Simulationsmodell aus Unterab-

schnitt 3.2.1 und der geschätzten Sensorunsicherheit von $18\ \mu\text{m}$ ($k = 1$) ein Unsicherheitsbeitrag von $2,6\ \mu\text{m}$ für $k = 1$ zu erwarten. Die anwendungsbezogene Sensorunsicherheit des konfokal-chromatischen Sensors IFS2405-30 wurde somit zunächst zu groß geschätzt. Im Umkehrschluss ergibt sich aus der Streuung der optischen Multi-Distanzmessung und dem vereinfachten Simulationsmodell die anwendungsbezogene Sensorunsicherheit des konfokal-chromatischen Sensors IFS2405-30 für Verzahnungsmessungen zu $14,63\ \mu\text{m}$ ($k = 1$).

Auch wenn in den experimentellen Untersuchungen eine noch unbekannt systematische Messabweichung die erreichte Messunsicherheit bei der Multi-Distanzmessung des mittleren Grundkreisradius der Großverzahnung dominiert, belegen die zufälligen Messabweichungen zusammenfassend die Skalierbarkeit des Messansatzes für die Erfassung des mittleren Grundkreisradius.

Im Folgenden soll die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes auch am Beispiel des zahnindividuellen Grundkreisradius demonstriert werden. Zur Charakterisierung der theoretisch erreichbaren Messunsicherheit wird der potenzielle systematische Einfluss durch die Neupositionierung der Verzahnungen eliminiert, indem lediglich die rechten Zahnflanken betrachtet werden. Die Kalibrierung der Messanordnung erfolgt dabei an allen ungeraden Zähnen und die eigentliche Messung an allen geraden Zahnflanken. Zwischen den Messungen wird das Zahnrad nicht neu auf dem Drehtisch positioniert.

Die experimentellen Ergebnisse der zahnindividuellen Grundkreisapproximation sind in Bild 5.11 dargestellt. Die roten Kreuze symbolisieren die gemittelten zahnindividuellen Grundkreisradien $r_{b,Z}$ der geraden Zähne für die 16 Wiederholungsmessungen, die mit dem modellbasierten Multi-Distanz-Messansatz bestimmt wurden. Die entsprechenden taktil gemessenen zahnindividuellen Referenzgrundkreisradien sind als schwarze Kreise dargestellt. Zusätzlich ist die erweiterte Messunsicherheit für $k = 2$ sowohl für die optisch gemessenen Grundkreisradien als auch für die taktil gemessenen Referenzgrundkreisradien angegeben.

Die Messergebnisse bestätigen, dass die modellbasierten Multi-Distanzmessungen nach der Offset-Korrektur mit den taktilen Referenzmessungen innerhalb der erweiterten Messunsicherheit bezogen auf den Mittelwert übereinstimmen. Eine systematische Messabweichung ist nicht sichtbar und manifestiert die Annahme, dass die Neupositionierung der Verzahnungen zur Offset-Korrektur eine maßgebliche Ursache für die systematische Messabweichung bei der Grundkreisradiusapproximation mit Offset-Korrektur ist.

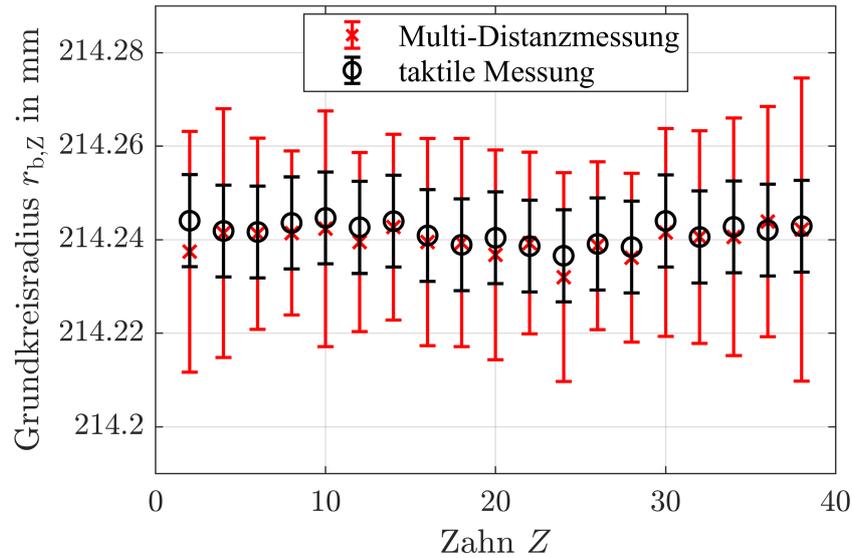


Bild 5.11: Ergebnisse der gemittelten zahnindividuellen Grundkreisradien $r_{b,Z}$ für alle geraden Zähne für 16 Multi-Distanzmessungen (rote Kreuze) und der taktile gemessenen zahnindividuellen Referenzgrundkreisradien (schwarze Kreise). Zusätzlich ist für die ermittelten Grundkreisradien die erweiterte Messunsicherheit für $k = 2$ bezogen auf die Einzelmessung angegeben.

Die im Mittel erreichte erweiterte Messunsicherheit des zahnindividuellen Grundkreisradius ergibt sich dann aus dem Unsicherheitsbeitrag von $5,47 \mu\text{m}$ ($k = 1$) aus der Kalibrierung und aus der Streuung von $9,75 \mu\text{m}$ ($k = 1$) der optischen Multi-Distanzmessungen zu $22,44 \mu\text{m}$ ($k = 2$). Die Zielsetzung einer Unsicherheit $< 30 \%$ der Toleranzen für Verzahnungsqualität 6 wird damit verfehlt. Im Abgleich mit dem vereinfachten Simulationsmodell aus Unterabschnitt 3.2.1) ist der experimentell ermittelte Unsicherheitsbeitrag aus der Abstandsmessung der Multi-Distanzmessungen um den Faktor 4 größer, als der entsprechende erwartete theoretisch abgeschätzte Beitrag zur Messunsicherheit des Grundkreisradius. Wie in Unterabschnitt 5.3.1 dargelegt, beeinflussen weitere zufällige Effekte, zum Beispiel Schwingungen durch die scannende Bewegung und die nicht zeitsynchrone Datenerfassung gepaart mit der ungleichmäßigen Steuerung des Drehtisches, zusätzlich die Multi-Distanzmessung. Dominante zufällige Einflüsse sind insbesondere bei der Multi-Distanzmessung zahnindividueller Grundkreisradien zu erwarten, da die Messpunktzahl im Vergleich zur Erfassung des mittleren Grundkreisradius erheblich geringer ist. Dazu besteht die Hypothese, dass der konfokal-chromatische Sensor IFS2405-30 im Vergleich zum kleineren Sensor IFS2405-10 empfindlicher gegenüber Schwingungen während der Zahnradrotation der 250 kg schweren Großverzahnung ist. Durch den größeren Arbeitsabstand und Messbereich des IFS2405-30 bewirken Winkelabweichungen durch die Schwingungen im Vergleich zum IFS2405-10 größer Messabweichungen.

Um die potenziellen Einflüsse durch Schwingungen und die nicht zeitsynchrone Datenerfassung bei der Multi-Distanzmessung der Großverzahnung zu eliminieren, werden weitere Großverzahnungsmessungen betrachtet, wobei der Ansatz einer schrittweisen scannenden Messung verfolgt wird. Der Drehtisch wird dabei in definierten Winkelschritten rotiert und bei jeder Einstellung wird der Abstand zur Zahnflanke gemessen. Die Kalibrierung

des Multi-Distanz-Messsystems erfolgt weiterhin auf Basis von Wiederholungsmessungen mit identischen Randbedingungen bezüglich der Sensor- und Messobjektanordnung an den ungeraden Zähnen der rechten Zahnflanken. Die erreichbare Messunsicherheit bei der zahnindividuellen Grundkreisradiusapproximation wird dann an allen geraden Zähnen der rechten Zahnflanken der gleichen Großverzahnung quantifiziert. Die Großverzahnung wird auch hier im Vergleich zur Kalibrierung nicht neu positioniert. Insgesamt werden vier Wiederholungsmessungen mit im Mittel 209 Messpunkten pro Zahnflanke zur Abschätzung der erreichbaren Unsicherheit bei der Messung von zahnindividuellen Grundkreisradien von Großverzahnungen durchgeführt.

Bild 5.12 zeigt die zahnindividuellen Grundkreisradien $r_{b,Z}$, die mit dem synchronisierten Multi-Distanz-Messansatz ermittelt wurden. Die roten Kreuze stellen weiterhin die gemittelten zahnindividuellen Grundkreisradien über alle vier Wiederholungsmessungen dar. Die jeweiligen taktil gemessenen Referenzgrundkreisradien sind als schwarze Kreise gekennzeichnet. Auch ist die erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) für die Einzelmessung sowohl für die optisch gemessenen Grundkreisradien als auch für die taktil gemessenen Referenzgrundkreisradien angegeben.

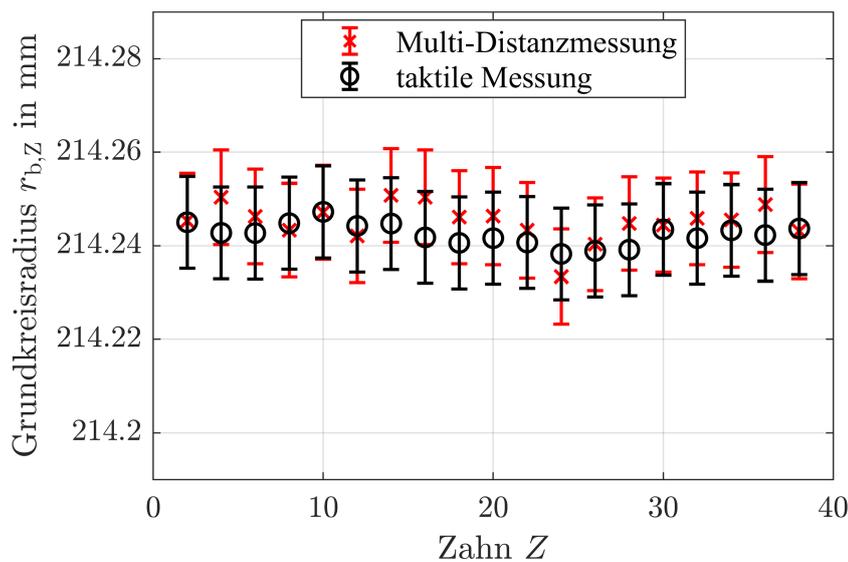


Bild 5.12: Ergebnisse der synchronisierten Multi-Distanzmessungen der zahnindividuellen Grundkreisradien $r_{b,Z}$ für alle geraden Zähne (rote Kreuze) und der taktil gemessenen zahnindividuellen Referenzgrundkreisradien (schwarze Kreise). Darüber hinaus ist für die ermittelten Grundkreisradien die erweiterte Messunsicherheit für $k = 2$ bezogen auf die Einzelmessung veranschaulicht.

Die Messergebnisse der Multi-Distanzmessungen stimmen innerhalb der ermittelten erweiterten Messunsicherheit bezogen auf den Mittelwert mit den taktilen Referenzmessungen überein. Nach der Kalibrierung sind keine verbleibenden systematischen Messabweichungen zu erkennen. Auch hier manifestiert sich die Annahme, dass die Neupositionierung der Verzahnungen zwischen Kalibrierung und eigentlicher Messung eine dominante Abweichungsquelle für eine systematische Abweichung bei der Großverzahnungsmessung mit Offset-Korrektion ist.

Die erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) für den zahnindividuellen Grundkreisradius der Multi-Distanz-Messungen beträgt im Mittel $10,1 \mu\text{m}$, was $26,9 \%$ der geforderten Toleranz entspricht. Die Messunsicherheit der synchronisierten Messung ist um 55% kleiner, als die ermittelte Messunsicherheit der nicht synchronisierten Messung und das, obwohl die Messpunkteanzahl pro Zahn bei der synchronisierten Messung nur $1/5$ der Messpunkte pro Zahn der nicht synchronisierten Messung beträgt. Die Messergebnisse verdeutlichen damit den erwarteten Einfluss durch Schwingungen und der nicht zeitsynchronen Datenerfassung auf die Messunsicherheit. Zukünftig ist somit auf eine schwingungsarme scannende Messung und synchrone Datenerfassung von Drehwinkel und Abstand zu achten. Die gesamte Messunsicherheit setzt sich dabei aus einem Unsicherheitsbeitrag von $4,9 \mu\text{m}$ ($k = 1$) aus der Kalibrierung und der einfachen Standardabweichung der optischen Multi-Distanzmessungen von $1 \mu\text{m}$ zusammen. Der experimentell ermittelte Unsicherheitsbeitrag der optischen Multi-Distanzmessung, der sich aus der geschätzten anwendungsbezogenen Sensorunsicherheit des konfokalen-chromatischen Sensors IFS2405-30 ergibt, ist im Abgleich mit dem Simulationsmodell aus Unterabschnitt 3.2.1 fast zweimal kleiner als erwartet. Eine Ursache wird darin gesehen, dass bei der zeitsynchronen Messung definierte Messpunkte auf der Zahnflanke angefahren und erfasst werden. Wie sich in Kapitel 4 gezeigt hat, ist die Sensorunsicherheit bei der Zahnformmessung konfokal-chromatischer Sensoren von den zufälligen Oberflächenbeschaffenheiten des Messobjekts abhängig. Üblicherweise beeinflussen die lokal verteilten Oberflächenbeschaffenheiten die Zahnformmessung zufällig. Werden jedoch, wie bei den zeitsynchronen Multi-Distanz-Messungen, annähernd die gleichen Messpunkte wiederholt erfasst, tritt der sonst zufällige Einfluss der Oberfläche lokal systematisch auf. Infolgedessen sinkt dann die Streuung der wiederholenden Multi-Distanzmessungen.

Die gesamte Messunsicherheit der zahnindividuellen Grundkreisradien wird im Ergebnis maßgeblich von der Unsicherheit aus der Kalibrierung der Messanordnung dominiert. Um die Messunsicherheit bei der zahnindividuellen Grundkreisradiusapproximation weiter zu verringern, ist eine Reduktion der Kalibrierunsicherheit durch präzisere Referenztechnik oder durch eine Anpassung der Kalibrierstrategie anzustreben. Zusammenfassend validieren die Messergebnisse den modellbasierten Multi-Distanz-Messansatz zur Erfassung zahnindividueller Formparameter von Großverzahnungen mit einer Messunsicherheit $< 30 \%$ der Toleranz für Verzahnungsqualität 6.

5.3.3 Dynamischer Bereich des Multi-Distanz-Messansatzes

Auf Basis der erzielten Messunsicherheiten für den Grundkreisradius kann der erreichbare dynamische Bereich des Multi-Distanz-Messansatzes bestimmt und mit dem Stand der Technik verglichen werden. Der dynamische Bereich berechnet sich aus dem Verhältnis von Kopfkreisdurchmesser d_a des Messobjekts zur Messunsicherheit des mittleren beziehungsweise zahnindividuellen Grundkreisradius. Zur Beurteilung der Geometrie des mittelgroßen Zahnrads ist entsprechend der Verzahnungsqualität 6 ein dynamischer Bereich von 17168 erforderlich und für die Großverzahnung ein dynamischer Bereich von 42694. Tabelle 5.1 fasst die ermittelten dynamischen Bereiche des Multi-Distanz-Messansatzes

und des taktilen Koordinatenmessgeräts, das in dieser Arbeit als Referenzmesssystem verwendet wurde, zusammen. Der dynamische Bereich $d_a/u_{r_{b,Z}}$ wird am Beispiel der Messergebnisse des zahnindividuellen Grundkreisradius veranschaulicht.

Tabelle 5.1: Berechneter dynamischer Bereich $d_a/u_{r_{b,Z}}$ am Beispiel des zahnindividuellen Grundkreisradius für den Multi-Distanz-Messansatz im Vergleich zu taktilen Referenzmessungen mittels Koordinatenmessgerät. Der dynamische Bereich wird jeweils für die Messungen an der mittelgroßen Verzahnung und Großverzahnung angegeben. Gemäß Verzahnungsqualität 6 wird für die Bewertung der Fertigungsqualität des mittelgroßen Zahnrads ein dynamischer Bereich von 17168 und für die Großverzahnung ein dynamischer Bereich von 42694 gefordert.

	Multi-Distanz-Messansatz, Koordinatenmessgerät,	
	optisch	taktil
dynamischer Bereich $d_a/u_{r_{b,Z}}$, mittelgroße Verzahnung	17213	20192
dynamischer Bereich $d_a/u_{r_{b,Z}}$, Großverzahnung	47572	48880

Im Ergebnis erfüllt der berechnete dynamische Bereich des optischen Multi-Distanz-Messansatzes die Anforderungen zur Bewertung der Geometrie für Verzahnungsqualität 6 für verschieden große Verzahnungen. Bei der Messung des zahnindividuellen Grundkreisradius erreicht der Multi-Distanz-Messansatz zudem dynamische Bereiche fast auf dem Niveau taktiler Referenzmessungen. Der dynamische Bereich des Multi-Distanz-Messansatzes an der mittelgroßen Verzahnung beträgt 85 % des dynamischen Bereichs des Koordinatenmessgeräts und an der Großverzahnung sogar 97 % des dynamischen Bereichs des Koordinatenmessgeräts. Im Vergleich zur taktilen Referenzmessung ist die Verzahnungsprüfung aller Zahnflanken mittels des optischen Multi-Distanz-Messansatzes allerdings erheblich schneller. Die Multi-Distanzmessung der Profilageometrie aller Zahnflanken der Großverzahnung mit einem rotatorisch-scannenden Messansatz ist circa 15-mal schneller, als eine konventionelle taktile Standard-Verzahnungsprüfung.

5.4 Fazit

Zur Validierung des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes zur optischen Messung der Verzahnungsgeometrie wurde der in Abschnitt 2.4.3 vorgestellte rotatorisch-scannende Messansatz durch die Kombination eines optischen konfokal-chromatischen Abstandssensors mit einem Drehtisch umgesetzt. Mit dem realisierten rotatorisch-scannende Messansatz lassen sich unabhängig von der Zahnradgröße die Profilageometrien aller Zähne innerhalb einer einminütigen Rotation aufnehmen und modellbasiert auswerten. Das Ziel, die Verzahnungsgeometrie aller Zähne innerhalb von 5 Minuten zu messen, ist damit erreicht. Im Vergleich zu taktilen Messsystemen reduziert sich die Messzeit um einen Faktor von bis zu 15.

Anhand eines bekannten Kalibrierzahnrad wird der Multi-Distanz-Messansatz vor der eigentlichen Verzahnungsmessung kalibriert, um systematische Abweichungen durch eine

unbekannten Messanordnung bei der Grundkreisradiusapproximation zu korrigieren. Für diese Offset-Korrektur sind Ähnlichkeitsbedingungen hinsichtlich der Geometrie und Positionierung des Kalibrierzahnrad und des Messzahnrad einzuhalten.

Messungen an einem mittelgroßen Zahnrad mit einem Kopfkreisdurchmesser von 105 mm validieren, dass sowohl für den mittleren als auch zahnindividuellen Grundkreisradius und damit auch für die Profil-Winkelabweichung die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 erfüllt werden. Im Mittel wird für die zahnindividuellen Grundkreisradien eine Messunsicherheit $\leq 30\%$ der Toleranzen erreicht. Die Messunsicherheit des mittleren Grundkreisradius ist aufgrund der höheren Messpunktezahl $< 20\%$ der geforderten Toleranz.

Messungen an einer Großverzahnung mit einem Kopfkreisdurchmesser von 480 mm und einem großen Normalmodul von 12 mm demonstrieren die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes. Derzeit dominieren noch unbekannt systematische Messabweichungen die erreichbare Messunsicherheit des Grundkreisradius. Als maßgebliche Abweichungsquelle wird die Positionsänderung des zu messenden Zahnrad im Vergleich zum Kalibrierzahnrad für die Offset-Korrektur vermutet. Unter der Annahme, dass systematische Messabweichung weitestgehend kompensiert sind, erreicht der Multi-Distanz-Messansatz für den mittleren Grundkreisradius Messunsicherheiten $< 15\%$ der geforderten Toleranzen für Verzahnungsqualität 6, was die grundsätzliche Skalierbarkeit des Messansatzes belegt. Zur Demonstration der Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes am Beispiel des zahnindividuellen Grundkreisradius wird der potenzielle systematische Einfluss durch die Neupositionierung der Verzahnungen eliminiert, indem lediglich die rechten Zahnflanken gemessen werden. Die Kalibrierung erfolgt an allen ungeraden Zähnen und die Multi-Distanzmessung an allen geraden Zähnen, ohne dass die Verzahnung neu positioniert wird. Die optisch gemessenen und Offset korrigierten zahnindividuellen Grundkreisradien stimmen mit den taktilen Referenzgrundkreisradien überein. Im Rahmen einer schrittweise rotatorisch-scannenden Messung wird im Mittel eine Messunsicherheit der zahnindividuellen Grundkreisradien $\leq 26,9\%$ der geforderten Toleranzen für die Verzahnungsqualität 6 erreicht.

Der dynamische Bereich des Multi-Distanz-Messansatzes für die Erfassung des zahnindividuellen Grundkreisradius erreicht fast das Niveau taktiler Referenzmessungen. Die Ergebnisse bestätigen das Anwendungspotenzial des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes zur optischen Messung der Verzahnungsgeometrie verschieden großer Verzahnungen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Qualitätsprüfung von Verzahnungen sind schnelle Messsysteme mit skalierbarem Messvolumen erforderlich, die die Geometrie aller Zahnflanken verschieden großer Zahnräder mit einstelliger Mikrometerunsicherheit messen. Ein solches Messsystem für die Qualitätsprüfung von Verzahnungen gibt es derzeit jedoch noch nicht.

Als Referenz in der Verzahnungsmesstechnik weisen taktile Koordinatenmessgeräte beziehungsweise Verzahnungsmessgeräte Messunsicherheiten im einstelligen Mikrometerbereich auf, sind aber angesichts des fest vorgegebenen Messvolumens und aufgrund der seriellen Datenerfassung hinsichtlich der Messgeschwindigkeit limitiert. Im Vergleich zur klassischen taktile Verzahnungsmesstechnik erreichen aktuelle optische Messansätze zur Qualitätsprüfung von Verzahnungen derweil vergleichbare Messunsicherheiten und bieten gleichzeitig deutlich höhere Messgeschwindigkeiten. Grundlegend belegt der aktuelle Stand der Forschung das Potenzial optischer Verzahnungsmessansätze, jedoch steht die Anwendung für die Qualitätsprüfung aller Zähne insbesondere von Großverzahnungen noch aus.

Aus diesem Grund befasste sich die vorliegende Arbeit mit der Verzahnungsprüfung mittels eines skalierbaren optischen Multi-Distanz-Messansatzes mit modellbasierter Auswertung der Verzahnungsgeometrie aller Zähne am Beispiel des Formparameters Grundkreisradius. Das Ziel war es den Grundkreisradius für alle beziehungsweise aller Zähne unabhängig von der Zahnradgröße mit einer Messunsicherheit entsprechend der Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 innerhalb von 5 Minuten zu erfassen.

6.1 Ausgangslage der Arbeit

Grundlegend sind Ansätze zur schnellen optischen Messung der Verzahnungsgeometrie bekannt. Häufig werden optische Sensoren zur schnellen Messung der Zahnflankengeometrie aller Zähne mit einem Drehtisch für eine scannende Verzahnungsmessung kombiniert. Die Anwendung der optischen Verzahnungsmessansätze zur Messung der Geometrie aller Zahnflanken sowie die erreichbaren Messunsicherheiten wurden allerdings überwiegend an kleinen beziehungsweise mittelgroßen Verzahnungen validiert. Optische Messansätze zur Qualitätsprüfung von Großverzahnungen wurden bisher nur an einzelnen Zahnflanken erprobt und sind derzeit nicht für die Qualitätsprüfung aller Zähne von Großverzahnungen ausgelegt. Aus diesem Grund verbleiben hinsichtlich der Anwendung optischer Verzahnungsmessansätze für die Großverzahnungsmessung offene Fragestellungen.

Es galt zu klären, ob mittels eines optischen Verzahnungsmessansatzes eine skalierbare Messung, das heißt die Qualitätsprüfung aller Zahnflanken sowohl von kleinen Verzahnungen als auch Großverzahnungen möglich ist. Zwar belegt der Stand der Forschung zur

optischen Verzahnungsmessung an mittelgroßen Verzahnungen Messunsicherheiten auf dem Niveau taktiler Standard-Verzahnungsmessungen, doch erfordern Großverzahnungsmessungen Messsysteme mit hohem dynamischen Bereich und die erreichbare Messunsicherheit bei einer Zahnradskalierung wurde bisher nicht quantifiziert. Ziel war es daher, die erreichbare Messunsicherheit bei der optischen Multi-Distanzmessung von verschiedenen großen Verzahnungen und den damit einhergehenden erreichbaren dynamischen Bereich zu bestimmen. Es galt zu prüfen, ob Unsicherheitsanforderungen zur Bewertung der Verzahnungsgeometrie für Verzahnungsqualität ≤ 6 erfüllt werden. Auch die erforderliche Messzeit zur Messung der Profilgeometrie aller Zahnflanken galt es unter Berücksichtigung der Einhaltung der Unsicherheitsanforderungen zu bestimmen. Weiterhin zeigt der aktuelle Stand der Forschung die Anwendbarkeit optischer Messprinzipien wie beispielsweise der Laser-Triangulation und Interferometrie für die Verzahnungsmessung. Das konfokalchromatische Messprinzip ist aufgrund der Anwendbarkeit an spiegelnden metallischen Oberflächen ein vielversprechendes Messprinzip für die optische Verzahnungsmessung, wurde jedoch bislang an Verzahnungen nicht erprobt. Darüber hinaus bestand die Fragestellung, ob skalierbare Verzahnungsmessungen mit kommerziell erhältlichen optischen Abstandssensoren möglich sind. Die Auswertung der Verzahnungsgeometrie erfolgt üblicherweise durch einen Vergleich der Ist- mit der Nenngeometrie, wobei die Nenngeometrie nach der Methode der kleinsten Quadrate an die Istgeometrie in einem Bezugskoordinatensystem approximiert wird. Das Bezugskoordinatensystem muss vor der eigentlichen Verzahnungsmessung separat eingemessen werden. Eine direkte Auswertung der Verzahnungsgeometrie aus den Messdaten, ohne zusätzliches Bezugskoordinatensystem ist derzeit nicht bekannt.

6.2 Wissenschaftlicher Fortschritt

Die vorliegende Arbeit hat sich mit der skalierbaren optischen Multi-Distanzmessung von Verzahnungen mit anschließender modellbasierter Auswertung der Verzahnungsgeometrie auf Basis aller Zähne befasst. Ein schnelles, skalierbares Messsystem bestehend aus einem optischen Abstandssensor in Kombination mit einem Drehtisch wurde zur Verzahnungsmessung realisiert. Am Beispiel des Formparameters Grundkreisradius erfolgte die Validierung der erreichbaren Messunsicherheit sowohl für ein mittelgroßes Zahnrad als auch für eine Großverzahnung. Der Grundkreisradius korreliert mit der klassischen Abweichungskenngröße Profil-Winkelabweichung, die üblicherweise in Standard-Verzahnungsmessungen als ein Qualitätsmerkmal der Verzahnungsgeometrie herangezogen wird.

Zunächst wurde ein Geometriemodell für Evolventenverzahnungen vorgestellt und das inverse Problem zur Berechnung des Grundkreisradius hergeleitet. Zur Lösung des inversen Problems muss die tatsächliche Profilgeometrie der Zahnflanken gemessen werden. Ein erarbeiteter Auswerteansatz approximiert nach der Methode der kleinsten Quadrate eine ideale Evolvente direkt in die Messdaten und bestimmt daraufhin den Grundkreisradius

ohne vorher ein separates Bezugskordinatenmesssystem in Bezug zum Zahnradsitz der Verzahnung einzumessen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der modellbasierte Ansatz zu diesem Zeitpunkt noch keine funktionsorientierte Bewertung zulässt, da das approximierende Werkstückkoordinatensystem nicht unbedingt der Lage und Ausrichtung der Bezugsachse des Zahnradsitzes entspricht. Der tatsächliche Grundkreisradius wird also zunächst für eine aus der Verzahnung abgeleitete Bezugsachse bestimmt. Der modellbasierte Auswerteansatz ermöglicht sowohl die Berechnung des mittleren Grundkreisradius auf Basis der Geometrie aller Zahnflanken als auch die Berechnung zahnindividueller Grundkreisradien.

Weiterhin wurden der Multi-Distanz-Messansatz und drei Messstrategien für die schnelle, skalierbare Multi-Distanzmessung der Geometrie aller Zähne vorgestellt, ein statischer Multi-Sensor-Ansatz, ein lateral-scannender Messansatz und ein rotatorisch-scannender Messansatz. Optische Abstandssensoren erfassen im Rahmen einer Multi-Distanzmessung berührungslos die Profilgeometrie der Zahnflanken in Form von Abstandsinformationen. Um im Anschluss den Grundkreisradius auswerten zu können, bedarf es einer Messdatentransformation der gemessenen Abstände in Koordinaten, die im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls erarbeitet wurde.

Für die Verifikation der Lösbarkeit des inversen Problems wurden Messpunkte eines mittelgroßen Zahnrads mit idealer evolventischer Geometrie simuliert und modellbasiert ausgewertet. Die Simulationsergebnisse verifizieren, dass der mittlere und zahnindividuelle Grundkreisradius mittels der ein- beziehungsweise zweistufigen Approximation mit numerischen Abweichungen $\leq 0,1 \mu\text{m}$ berechnet werden können. Hinsichtlich der Unsicherheitsanforderungen für die Verzahnungsqualität 6 sind die numerischen Abweichungen nicht dominant.

Die Verifikation des Multi-Distanz-Messansatzes erfolgte anschließend in Monte-Carlo-Simulationen am Beispiel rotatorisch-scannender Multi-Distanzmessungen an einer mittelgroßen Verzahnung. Als Multi-Distanz-Messansatz wurden ein optischer Sensor und ein Drehtisch simuliert. Dabei wurde die Annahme einer geometrisch kalibrierten Messanordnung getroffen, das heißt die Sensorposition und Sensorausrichtung im Messkoordinatensystem waren bekannt. Ziel der Simulationen war es dann die Unsicherheitsbeiträge aus der kalibrierten Messanordnung und der Abstandsmessung zu quantifizieren und anschließend die theoretisch erreichbare Messunsicherheit bei der Grundkreisradiusapproximation abzuschätzen. In den Monte-Carlo-Simulationen wurden daher Multi-Distanzmessungen mit einer verrauschten Sensorausrichtung und Sensorposition betrachtet und zusätzlich eine Abhängigkeit von der Messpunktezahlszahl pro Zahn untersucht. Aus den Simulationen geht hervor, dass der Beitrag zur Grundkreisradiusunsicherheit mit einer Steigerung der Messpunkteanzahl N pro Zahn mit $1/\sqrt{N}$ abnimmt. Unabhängig vom gesuchten Formparameter beträgt der Unsicherheitsbeitrag durch zufällige Messabweichungen in der Sensoranordnung bei beispielsweise 1000 Messpunkten pro Zahn weniger als $1 \mu\text{m}$ ($k = 1$). Als weiterer zufälliger Einfluss auf die Grundkreisradiusunsicherheit wurde die unsicherheitsbehaftete Abstandsmessung identifiziert. Der Beitrag zur Grundkreisradiusunsicherheit wurde ebenfalls mittels Monte-Carlo-Simulationen bestimmt, wobei die Sensorunsicherheit schrittweise bis $5 \mu\text{m}$ erhöht und gleichzeitig die Messpunktezahlszahl variiert wurde. Die Simu-

lationsergebnisse belegen, dass die Grundkreisradiusunsicherheit linear mit zunehmender Sensorunsicherheit ansteigt. Abhängig von der Messpunktezahl beträgt der Unsicherheitsbeitrag bei einer Sensorunsicherheit von beispielsweise $5 \mu\text{m} < 1 \mu\text{m}$ ($k = 1$). Die Einflüsse aus der Messanordnung und der Abstandsmessung überlagern sich typischerweise bei der Multi-Distanzmessung. Aus diesem Grund wurde zur Verifikation des optischen Messansatzes die kombinierte Messunsicherheit bei der Grundkreisradiusabweichung betrachtet. Die Simulationsergebnisse zur kombinierten Messunsicherheit veranschaulichen, dass mit einer hohen Messpunktezahl pro Zahn unabhängig vom gesuchten Formparameter die Anforderung einer Messunsicherheit $< 30\%$ der Toleranzen für Verzahnungsqualität 6 eingehalten werden. Der Multi-Distanz-Messansatz für Verzahnungsmessungen gilt damit als verifiziert.

An weiteren simulierten Großverzahnungen konnte daraufhin die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes verifiziert werden. Unabhängig von der untersuchten Zahnradgröße konnten die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 eingehalten werden. Mit zunehmender Zahnradgröße steigt zwar die absolute Messunsicherheit, doch das Verhältnis von Messunsicherheit zu Toleranz sinkt. Damit einhergehend steigt der dynamische Bereich mit zunehmender Zahnradgröße erheblich an und hebt damit in der Theorie die Eignung des Multi-Distanz-Messansatzes insbesondere für die Messung von Großverzahnungen hervor.

Die Sensorunsicherheit der optischen Multi-Distanzmessung beeinflusst die erreichbare Messunsicherheit bei der Approximation des Grundkreisradius. Üblicherweise werden kommerziell erhältliche optische Abstandssensoren für eine senkrechte Sensorausrichtung auf einer ebenen Oberfläche mit definierter Rauheit spezifiziert. Die Verzahnungsmessung ist jedoch aufgrund der komplexen Zahnradgeometrie mit gekrümmten Zahnflanken und metallisch glänzenden Oberflächen für die optische Messtechnik eine Herausforderung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Eignung eines kommerziell erhältlichen Laser-Triangulationssensors und die eines konfokal-chromatischen Sensors für die optische Multi-Distanzmessung untersucht. Als Maß für die Eignung der Sensoren wurde die erreichbare Sensorunsicherheit bei der Zahnformmessung unter Berücksichtigung der Einflüsse Oberflächenneigung, Oberflächeneigenschaften (Rauheit) und Mehrfachreflexionen aus der Standardabweichung der Lotabstände zwischen der gemessenen Geometrie und der Referenzgeometrie bestimmt. Erwartete systematische Messabweichungen aufgrund der Oberflächenneigung wurden beim Triangulationssensor durch eine Messanordnung in der Messbereichsmittle minimiert und beim konfokal-chromatischen Sensor auf Basis einer Kalibrierung korrigiert. Es galt zu klären, inwieweit die Sensorspezifikationen auch für die Messung der Zahnflankenform zutreffen und ob die erreichbare anwendungsbezogene Sensorunsicherheit für Multi-Distanzmessungen ausreicht.

Messungen an einem Zahnflankennormal zeigten, dass die Streuung des Laser-Triangulationssensors entgegen der Erwartungen nicht mit steigenden Neigungswinkel zunehmen. Die erreichbare Sensorunsicherheit wird dementsprechend nicht zusätzlich durch die Oberflächenneigung zufällig beeinflusst. Der Laser-Triangulationssensor ist daher grundsätzlich sowohl für eine Multi-Distanzmessung mit geneigter oder senkrechter Messanordnung

geeignet. Die konfokal-chromatischen Zahnformmessungen veranschaulichten dagegen, dass mit zunehmendem Neigungswinkel ab $\pm 8^\circ$ die gemessene Zahnform stärker streut. Als Grund wird die abfallende Intensität des erfassten reflektierten Lichts vermutet, da konfokal-chromatische Sensoren primär direkt reflektiertes Licht auswerten. Die ermittelte Sensorunsicherheit bei der Zahnflankenmessung mittels des konfokal-chromatischen Sensors beträgt $4,7 \mu\text{m}$ für $k = 1$, wobei der Einfluss der Neigung auf $\leq 3,7 \mu\text{m}$ abgeschätzt wurde. Bei der Multi-Distanzmessung mit einem konfokal-chromatischen Sensor an Verzahnungen ist daher eine senkrechte Messanordnung zu bevorzugen, um die Einflüsse der Neigung zu eliminieren.

Experimente an ebenen metallischen Rauheitsnormalen bestätigten im Vergleich zu den Messungen am Zahnflankennormal, dass die Oberflächenrauheit die erreichbare Sensorunsicherheit der Zahnformmessung beider Sensoren begrenzt, wenn andere Einflussfaktoren wie die Oberflächenneigung eliminiert werden. Erwartungsgemäß nimmt die anwendungsbezogene Sensorunsicherheit des Laser-Triangulationssensors mit steigender Rauheit ab und strebt bis zu einem Mittenrauwert von $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ gegen einen Grenzwert von $15 \mu\text{m}$ ($k = 1$). Direkt reflektierende Oberflächen mit Mittenrauwerten $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ führen hingegen zu Sensorunsicherheiten von $> 30 \mu\text{m}$ ($k = 1$). Aufgrund aktueller Trends in der Verzahnungstechnologie, die zur Verbesserung der Laufeigenschaften von Verzahnungen Oberflächen mit Mittenrauwerten $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ fordern, sind Laser-Triangulationssensoren zukünftig eingeschränkt für die Verzahnungsmessung geeignet. Die konfokal-chromatischen Messungen an den Rauheitsnormalen validierten einen umgekehrten Zusammenhang zwischen Rauheit und Sensorunsicherheit. Bei Mittenrauwerten von $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ ist die anwendungsbezogene Sensorunsicherheit $< 2,5 \mu\text{m}$ ($k = 1$). Mit zunehmender Rauheit steigt die anwendungsbezogene Sensorunsicherheit der konfokal-chromatischen Messung bis zu einem Grenzwert von circa $4,8 \mu\text{m}$ ($k = 1$). Angesichts der wachsenden Bedeutung der Oberflächenbeschaffenheit von Verzahnungen sind konfokal-chromatische Sensoren vielversprechende Sensoren für die optische Verzahnungsmessung.

Experimentelle Untersuchungen an einer Geradverzahnung mit und ohne Ruß beschichteter Nachbarzahnflanke zeigten dazu, dass weder der Laser-Triangulationssensor noch der konfokal-chromatische Abstandssensor durch Mehrfachreflexionen bei der Zahnformmessung beeinflusst wird. Im Ergebnis erfüllen beide Sensoren je nach Oberflächenbeschaffenheit und Sensorausrichtung die Sensorspezifikationen auch für Verzahnungsmessungen.

Basierend auf den experimentellen Untersuchungen und dem erarbeiteten Simulationsmodell zum Multi-Distanz-Messansatz konnte der von der Rauheit der Messoberfläche abhängige Beitrag zur Grundkreisradiusunsicherheit bestimmt werden. Aus der theoretischen Abschätzung geht hervor, dass beide optischen Sensoren grundsätzlich für die Verzahnungsmessung geeignet sind. Mit einer entsprechenden Kalibrierung der Messanordnung kann mit beiden Sensoren die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 erfüllt werden.

Die allgemeine Validierung des Multi-Distanz-Messansatzes erfolgte in dieser Arbeit zunächst an einer mittelgroßen Verzahnung. Am Beispiel einer weiteren Großverzahnung wurde daraufhin die Skalierbarkeit des modellbasierten Messansatzes demonstriert

und der erreichbare Dynamikbereich bestimmt. Im Rahmen der Validierungsmessungen wurde der modellbasierte Multi-Distanz-Messansatz zur optischen Messung der Verzahnungsgeometrie als rotatorisch-scannender Messansatz, bestehend aus einem optischen konfokal-chromatischen Abstandssensor und einem Drehtisch, realisiert. Unabhängig von der Zahnradgröße konnten mittels des ausgeführten rotatorisch-scannenden Multi-Distanz-Messansatz die Profilgeometrien aller Zahnflanken innerhalb einer einminütigen Messung erfasst werden, womit das Ziel einer Verzahnungsmessung innerhalb 5 Minuten erfüllt ist. Gegenüber taktilen Messverfahren konnte die Messzeit damit um einen Faktor von bis zu 15 reduziert werden. Wird der rotatorisch-scannende Messansatz um weitere optische Punkt-Sensoren oder sogar Linien-Sensoren erweitert, kann die Messgeschwindigkeit zukünftig noch weiter beschleunigt werden.

Da die Sensoranordnung des realisierten Multi-Distanz-Messansatzes nicht exakt bekannt ist und zunächst nur geschätzt wurde, erfolgte eine Kalibrierung der Messanordnung. Andernfalls würden dominante systematische Messabweichungen bei der Grundkreisradiusapproximation auftreten. Im Rahmen der Validierung wurde der rotatorisch-scannende Multi-Distanz-Messansatz vor der eigentlichen Verzahnungsmessung durch eine Offset-Korrektur mit einem bekannten Kalibrierzahnrad kalibriert und nicht wie in den Simulationen durch eine geometrische Kalibrierung. Bei der Offset-Korrektur ist zu beachten, dass nach DIN EN ISO 15530 Ähnlichkeitsbedingungen hinsichtlich der Verzahnungsgeometrie und der Positionierung der Verzahnungen auf dem Drehtisch gelten müssen. Als Referenzverfahren wurden vergleichend Standard-Verzahnungsmessungen mittels eines taktilen Koordinatenmessgeräts durchgeführt. Bei den Standard-Verzahnungsmessungen wurde nicht direkt der Grundkreisradius, sondern die klassische Abweichungskenngröße Profil-Winkelabweichung bestimmt, die in den Grundkreisradius umgerechnet werden kann.

Die Multi-Distanzmessungen an dem mittelgroßen Zahnrad validierten daraufhin den Multi-Distanz-Messansatz zur Erfassung der Geometrie von Verzahnungen. Sowohl für den mittleren als auch zahnindividuellen Grundkreisradius wurden Unsicherheiten $\leq 30\%$ der geforderten Grundkreisradiustoleranzen für Verzahnungsqualität 6 erreicht. Die berechnete Messunsicherheit des mittleren Grundkreisradius ist dabei sogar $< 20\%$ der geforderten Toleranz. Die Messunsicherheit des mittleren Grundkreisradius wurde dabei maßgeblich von einer unbekannt systematischen Messabweichung dominiert. Eine konkrete Abweichungsquelle konnte im Rahmen der Arbeit nicht final quantifiziert werden. Als maßgebliche Abweichungsquelle wird die Positionsabweichung zwischen Kalibrier- und Messzahnrad nach der Offset-Korrektur vermutet. Bei der Messung der zahnindividuellen Grundkreisradien wurden die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 soeben erfüllt. Die berechnete Messunsicherheit beträgt in etwa 30% der Toleranzen für den Grundkreisradius und ist damit fast auf dem Niveau der taktilen Referenzmessung, die eine Unsicherheit von $25,4\%$ erreicht. Die erreichte Messunsicherheit bei der Multi-Distanzmessung wurde dabei überwiegend durch die Kalibrierunsicherheit dominiert. Mit geeigneter Kalibrierung der Messanordnung könnte die gesamte Messunsicherheit bei der zahnindividuellen Grundkreisradiusapproximation zukünftig weiter reduziert werden.

Auf Basis des mathematischen Zusammenhangs zwischen Grundkreisradius und Profil-Winkelabweichung konnte zudem auch die klassische Abweichungskenngröße Profil-Winkelabweichung mit dem Multi-Distanz-Messansatz bestimmt werden. Die mittels Unsicherheitsfortpflanzung berechnete Messunsicherheit erfüllt ebenfalls die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6.

Die Skalierbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes wurde anknüpfend am Beispiel einer Großverzahnung mit einem Kopfkreisdurchmesser von 480 mm und einem großen Normalmodul von 12 mm demonstriert. Im Rahmen dieser Arbeit war keine vergleichbare Großverzahnung zur Kalibrierung der Messanordnung verfügbar, weshalb die Kalibrierung zunächst an den rechten Zahnflanken der Großverzahnung erfolgte. Anschließend wurde das Zahnrad um 180° gestürzt und die eigentliche Messung an den linken Zahnflanken durchgeführt.

Bei der Multi-Distanzmessung des mittleren Grundkreisradius verblieben trotz der Offset-Korrektur dominante systematische Messabweichungen und die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 konnten nicht eingehalten werden. Als maßgebliche Abweichungsquelle wurde im Rahmen der Arbeit die Positionsabweichung zwischen dem zu messenden Zahnrad (linke Zahnflanke) und dem Kalibrierzahnrad (rechte Zahnflanke) identifiziert. Ein konkreter Messunsicherheitsbeitrag konnte jedoch nicht final quantifiziert werden. Die zufälligen Messabweichungen belegen hingegen weiterhin, dass ein grundsätzliches Potenzial des Multi-Distanz-Messansatzes für Großverzahnungsmessungen existiert. Die erreichbare Messunsicherheit des mittleren Grundkreisradius aus den zufälligen Messabweichungen ist $< 25\%$ und erfüllt die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6. Für die Validierung der Skalierbarkeit am Beispiel der zahnindividuellen Grundkreisradien wurde eine alternative Kalibrierung der Messanordnung vorgenommen, wobei der potenzielle systematische Einfluss durch die Neupositionierung der Verzahnungen eliminiert wurde. Die Kalibrierung der Messanordnung erfolgte an allen ungeraden Zähnen und die eigentliche Messung an allen geraden Zähnen der rechten Zahnflankenseite. Die Messergebnisse der anschließenden Multi-Distanzmessungen zur Erfassung der zahnindividuellen Grundkreisradius stimmten mit den taktilen Referenzmessungen überein. Die bestimmte Messunsicherheit mittels des optischen Multi-Distanz-Messansatzes beträgt im Mittel $26,9\%$ und erreicht damit fast die Messunsicherheit von $26,2\%$ der taktilen Verzahnungsmessung. Die Unsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 sind somit ebenfalls erfüllt. Außerdem stärken die Messergebnisse der Multi-Distanzmessungen die Annahme, dass die Neupositionierung der Verzahnungen eine maßgebliche Abweichungsquelle für eine dominante systematische Abweichung bei der Großverzahnungsmessung mit Offset-Korrektur ist. Auf Basis der ermittelten Grundkreisradiusunsicherheiten wurde daraufhin der dynamische Bereich des Multi-Distanz-Messansatzes bestimmt und mit dem Dynamikbereich taktiler Referenzmessungen verglichen. Die Ergebnisse manifestierten das Anwendungspotenzial des Multi-Distanz-Messansatzes. Für den zahnindividuellen Grundkreisradius konnten Dynamikbereiche fast auf dem Niveau taktiler Referenzsysteme erzielt werden.

Im Ergebnis veranschaulichen die Untersuchungen die Anwendbarkeit des Multi-Distanz-Messansatzes für skalierbare Verzahnungsmessungen. Unabhängig von der Größe der Verzahnungen sind für den Grundkreisradius grundlegend Messunsicherheiten $< 30\%$ der geforderten Toleranzen für Verzahnungsqualität 6 erreichbar. Auch konnte im Rahmen dieser Arbeit erstmals das konfokal-chromatische Sensorprinzip an Verzahnungen erfolgreich erprobt werden. Durch den rotatorisch-scannenden Messansatz in Kombination mit den hohen Messraten optischer Sensoren konnte zudem die Messzeit der Messung aller Zahnflanken gegenüber taktilen Messsystemen erheblich reduziert werden. Der optische modellbasierte Multi-Distanz-Messansatz mit skalierbarem Messvolumen stellt daher eine erfolversprechende Alternative zur Messung der Verzahnungsgeometrie dar.

6.3 Weiterführender Forschungsbedarf

Diese Arbeit stellt einen modellbasierten Multi-Distanz-Messansatz mit skalierbarem Messvolumen zur optischen Messung der Geometrie von Verzahnungen vor. Obwohl Messungen an verschiedenen großen Zahnrädern die grundsätzliche Anwendbarkeit des modellbasierten Multi-Distanz-Messansatzes auf Basis der ermittelten zufälligen Messabweichungen validieren, besteht weiterer Forschungsbedarf.

Großverzahnungsmessungen zeigten, dass die mit dem konfokal-chromatischen Sensor IFS2405-30 erreichbare Unsicherheit bei der Grundkreisradiusapproximation maßgeblich von der Synchronisation der Drehtischsteuerung mit der Abstandsmessung und von Schwingungen bei der kontinuierlichen Rotation beeinflusst wird. Im Rahmen der Validierung der Skalierbarkeit wurde daher zunächst auf eine schnelle scannende Messung verzichtet und die Zahnflankenoberfläche schrittweise in definierten Winkeln abgescannt, um die Messunsicherheitsanforderungen für Verzahnungsqualität 6 zu erfüllen. Weiterführende Arbeiten müssen vorrangig an einer Synchronisation der Drehtischsteuerung mit der Abstandsmessung arbeiten, um Messabweichungen bei der Drehwinkelzuordnung zu den Messabständen zu reduzieren. Außerdem gilt es zu quantifizieren, wie empfindlich die erreichbare Messunsicherheit der konfokal-chromatischen Verzahnungsmessung gegenüber Schwingungen bei schnellen Drehtischbewegungen ist. Stellen Schwingungen eine erhebliche Einflussgröße bei der konfokal-chromatischen Messung dar, muss das optische Sensorsystem vom Drehtisch entkoppelt werden.

Darüber hinaus besteht noch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Umsetzung des aktuellen rotatorisch-scannenden Multi-Distanz-Messansatz. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Multi-Distanz-Messansatz am Beispiel nur eines einzelnen punktförmigen Sensors in Kombination mit einem Drehtisch experimentell validiert. Die Bewertung der tatsächlichen Zahnradgeometrie erfolgte dabei zunächst für eine aus der Verzahnung abgeleiteten Bezugsachse. Eine Erweiterung des Multi-Distanz-Messansatzes zu einem Multisensorsystem ist zukünftig zielführend, um auch die Bezugsachse des Zahnradsitzes einzumessen. Eine parallele Datenerfassung durch den Einsatz mehrerer punktförmiger Sensoren oder Linien-sensoren reduziert zudem die Messunsicherheit durch eine Erhöhung der Messpunktzahl oder verkürzt die Messzeit. Auch eine Kombination verschiedener optischer Sensoren ist

denkbar. Bei einer multisensorischen Erweiterung des Multi-Distanz-Messansatzes für Verzahnungsmessungen müssen die Messdaten der Sensoren zusammengeführt werden. Für eine solche Datenfusion könnten entweder konkurrierende oder kooperierenden Verfahren angewendet werden [Fra2016].

Hinsichtlich einer multisensorischen Erweiterung und der damit einhergehenden erforderlichen Datenfusion muss eine geeignete Kalibrierstrategie entworfen werden, um die Verzahnungsgeometrie mit allen Sensoren in einem gemeinsamen Messkoordinatensystem zu erfassen. Die in der Arbeit vorgestellte Offset-Korrektion an einer bekannten Verzahnung ist zwar grundsätzlich ein valider Kalibrieransatz für Multi-Distanzverzahnungsmessungen, jedoch werden die Sensoren dabei nicht im Messkoordinatensystem zusammengeführt. Auch verblieb bei der Anwendung der Offset-Korrektion an Großverzahnungen noch eine dominante unbekannt systematische Abweichung. Die Identifikation und Quantifizierung einer Ursache für diese systematische Messabweichung ist noch nicht final abgeschlossen. Die Anwendbarkeit der Offset-Korrektion für einen Multisensoransatz gilt es in weiteren Arbeiten zu prüfen. Alternativ ist die geometrische Einmessung der Sensorpositionen und Ausrichtung zielführend, wofür in weiteren Arbeiten geeignete Kalibrierobjekte und Messstrategien untersucht werden müssen.

In der klassischen Verzahnungsmessung werden definierte Abweichungskenngrößen zur Bewertung der Geometrie betrachtet. Der in dieser Arbeit modellbasiert ausgewertete Grundkreisradius korreliert beispielsweise mit der klassischen Abweichungskenngröße Profil-Winkelabweichung. In Zukunft muss die Messbarkeit weiterer Zahnradformparameter mit dem Multi-Distanz-Messansatz untersucht werden, um eine umfassende Beurteilung der Zahnradqualität zu erreichen. Hierzu sind geeignete Parameter zu identifizieren, die beispielsweise mit den klassischen Abweichungskenngrößen korrelieren, und der modellbasierte Auswertansatz entsprechend zu erweitern. Ebenfalls sind Ansätze denkbar, klassische Abweichungskenngrößen direkt aus den Messdaten zu ermitteln. Eine infrage kommende Kenngröße wäre die Zahnteilung, die unter anderem direkt aus den Drehwinkeln der Abstandsmessungen abgeleitet werden könnte.

Das aktuelle Geometriemodell zur Auswertung des Grundkreisradius ist bisher für Geradverzahnungen mit evolventischen Profil ausgelegt. Üblicherweise sind Schrägverzahnungen mit evolventischem Profil die meistgenutzte Zahnradgeometrie in der Industrie. Für die Qualitätsprüfung von schrägverzahnten Zahnradern muss das Geometriemodell mit zusätzlichen Freiheitsgraden beziehungsweise Parametern erweitert werden. Der Schrägungswinkel der Verzahnungen bedingt darüber hinaus die Überführung der zweidimensionalen Verzahnungsmessung in eine dreidimensionale Messung. Auch für eine Berücksichtigung von Flankenmodifikationen, die insbesondere bei stark belasteten Verzahnungen zur Anpassung des Tragbildes angewendet werden, bedarf es zukünftig einer Modellerweiterung. Grundsätzlich ist der modellbasierte Multi-Distanz-Messansatz mit skalierbarem Messvolumen nicht auf die Messung von Verzahnungen beschränkt. Mit einem geeigneten Geometriemodell lassen sich perspektivisch auch weitere Messobjekte beziehungsweise Bauelemente erfassen und auswerten.

Literaturverzeichnis

- [Aue2019] Auerswald, M. M.; von Freyberg, A.; Fischer, A.: Laser line triangulation for fast 3D measurements on large gears. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 100 (2019), Feb, Nr. 9, S. 2423–2433. – ISSN 1433-3015
- [Bal2015] Balzer, F.; Schäfer, M.; Lindner, I.; Günther, A.; Stöbener, D.; Westerkamp, J.: Recent advances in optical gear measurements - A new approach for fast measurements of large gears. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): *VDI-Berichte* Bd. 2255, 2015, S. 655–666
- [Bal2017] Balzer, F.; Steffens, N.; Stein, M.; Kniel, K.: Traceable measurement of large gears with micron accuracy: a mandatory basis for reliable wind energy systems. In: *Engineering for a Changing World: Proceedings; 59th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium* Bd. 59. Technische Universität Ilmenau, September 2017
- [Ber1968] Berndt, G.; Hultsch, E.; Weinhold, H.: Funktionstoleranz und Meßunsicherheit. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 17 (1968), Nr. 2, S. 465–471
- [Bre2017] Brecher, C.; Löpenhaus, C.; Ahmad, M.: Getriebeakustik von Elektrofahrzeugen - Auswirkungen von Taumel-, Rundlauf- und Teilungsfehlern auf das Anregungsverhalten. In: *wt Werkstattstechnik online* 107 (2017), Nr. 5, S. 334–339. – ISSN 1436-4980
- [Buz1992] Buzinski, M.; Levine, A.; Stevenson, W.: Performance characteristics of range sensors utilizing optical triangulation. In: *Proceedings of the IEEE 1992 National Aerospace and Electronics Conference@ m_NAECON 1992* IEEE (Veranst.), 1992, S. 1230–1236
- [Che2019] Chen, Y.-C.; Chen, J.-Y.: Optical Inspection System for Gear Tooth Surfaces Using a Projection Moiré Method. In: *Sensors* 19 (2019), Nr. 6, S. 1450
- [Cla2020] Claus, D.; Nizami, M. R.: Influence of aberrations and roughness on the chromatic confocal signal based on experiments and wave-optical modeling. In: *Surface Topography: Metrology and Properties* 8 (2020), Nr. 2, S. 025031
- [Cro2011] Crowther, A.; Ramakrishnan, V.; Zaidi, N.; Halse, C.: Sources of time-varying contact stress and misalignments in wind turbine planetary sets. In: *Wind Energy* 14 (2011), Nr. 5, S. 637–651
- [Cur1995] Curless, B.; Levoy, M.: Better optical triangulation through spacetime analysis. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision* IEEE (Veranst.), 1995, S. 987–994

- [DIN1976] DIN 868: *Allgemeine Begriffe und Bestimmungsgrößen für Zahnräder, Zahnradpaare und Zahnradgetriebe*. Dezember 1976
- [DIN2009] DIN ISO 18653: *Zahnräder – Bewertung von Messgeräten für die Messung von Zahnrädern (ISO 18653:2003)*. Dezember 2009
- [DIN2018a] DIN ISO 1328-1: *Zylinderräder – ISO-Toleranzsystem – Teil 1: Definitionen und zulässige Werte für Abweichungen an Zahnflanken ISO 1328-1:2013*. März 2018
- [DIN2018b] DIN EN ISO 15530-3: *Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) - Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) - Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen (ISO 15530-3:2011)*. September 2018
- [Din2020] Ding, D.; Zhao, Z.; Zhang, X.; Fu, Y.; Xu, J.: Evaluation and compensation of laser-based on-machine measurement for inclined and curved profiles. In: *Measurement* 151 (2020), S. 107236
- [Dor1994] Dorsch, R. G.; Häusler, G.; Herrmann, J. M.: Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement. In: *Applied optics* 33 (1994), Nr. 7, S. 1306–1314
- [Dus2010] Dussling, J.: *Innovation SPEZIAL Messtechnik - Messen im großen Maßstab*. Dezember 2010
- [Fan2011] Fang, S.-P.; Wang, L.-J.; Komori, M.; Kubo, A.: Design of laser interferometric system for measurement of gear tooth flank. In: *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 122 (2011), Nr. 14, S. 1301–1304
- [Fan2014] Fang, S.; Zhu, X.; Yang, P.; Cai, Q.; Komori, M. M.; Kubo, A.: Analysis and compensation method for installation error in measuring gear tooth flank with laser interferometry. In: *Optical Engineering* 53 (2014), Nr. 8, S. 084111
- [Fra2011] Franceschini, F.; Galetto, M.; Maisano, D.; Mastrogiacomo, L.; Pralio, B.: *Distributed large-scale dimensional metrology: new insights*. Springer Science & Business Media, 2011
- [Fra2016] Franceschini, F.; Galetto, M.; Maisano, D.; Mastrogiacomo, L.: Combining multiple Large Volume Metrology systems: Competitive versus cooperative data fusion. In: *Precision Engineering* 43 (2016), S. 514–524
- [Fri2016] Fritz Klocke, C. B.: *Zahnrad- und Getriebetechnik*. Hanser Fachbuchverlag, 2016. – URL https://www.ebook.de/de/product/18112460/fritz_klocke_christian_brecher_zahnrad_und_getriebetechnik.html. – ISBN 3446430687
- [Ges2009] Gestel, N. V.; Cuypers, S.; Bleys, P.; Kruth, J.-P.: A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs. In: *Optics and Lasers in Engineering* 47 (2009), Nr. 3, S. 336 – 342. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816608001292>. – Optical Measurements. – ISSN 0143-8166

- [Goc2003] Goch, G.: Gear Metrology. In: *CIRP Annals* 52 (2003), Nr. 2, S. 659 – 695
- [Goc2012] Goch, G.; Knapp, W.; Härtig, F.: Precision engineering for wind energy systems. In: *CIRP Annals* 61 (2012), Nr. 2, S. 611 – 634. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612002107>. – ISSN 0007-8506
- [Goc2017] Goch, G.; Ni, K.; Peng, Y.; Guenther, A.: Future gear metrology based on areal measurements and improved holistic evaluations. In: *CIRP Annals* 66 (2017), Nr. 1, S. 469–474
- [Gün2001] Günther, A.; Peters, J.; Goch, G.: Flächenhafte numerische Beschreibung, Ausrichtung und Auswertung von Zylinderrädern (3D-Surface-like Numerical Description, Alignment, and Evaluation of Involute Cylindrical Gears). In: *tm - Technisches Messen Plattform für Methoden, Systeme und Anwendungen der Messtechnik* 68 (2001), Nr. 4/2001, S. 160
- [Guo2020] Guo, X.; Shi, Z.; Yu, B.; Zhao, B.; Li, K.; Sun, Y.: 3D measurement of gears based on a line structured light sensor. In: *Precision Engineering* 61 (2020), S. 160 – 169
- [Gup2017] Gupta, K.; Jain, N. K.; Laubscher, R.: *Advanced gear manufacturing and finishing: classical and modern processes*. Academic Press, 2017
- [Her1992] Hernla, M.: Abschätzung der Messunsicherheit bei Koordinatenmessungen unter den Bedingungen der industriellen Fertigung. In: *VDI-Fortschrittberichte Bd. 2*, VDI-Verlag Düsseldorf, 1992
- [Hos2020] Hosseinpour, A.; Peng, Y.; Koch, G.; Ni, K.; Guenther, A.: Optical gear inspection using a triangulation sensor and an areal evaluation. In: *35th American Society for Precision Engineering Annual Meeting (ASPE 2020)* ETH Zurich, Institute of Machine Tools and Manufacturing (Veranst.), 2020
- [JCG2008] JCGM 100: *Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. 2008. – URL <https://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>
- [Kou2017] Koulin, Gorge and Zhang, Jishan and Frazer, RC and Wilson, Stephen J and Shaw, Brian A: Improving applied roughness measurement of involute helical gears. In: *Measurement Science and Technology* 28 (2017), Nr. 12, S. 124006
- [Lar2011] Larsson, L.; Groönstedt, T.; Kyprianidis, K. G.: Conceptual design and mission analysis for a geared turbofan and an open rotor configuration. In: *ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition* American Society of Mechanical Engineers (Veranst.), 2011, S. 359–370
- [Li2016] Li, S.; Yang, Y.; Jia, X.; Chen, M.: The impact and compensation of tilt factors upon the surface measurement error. In: *Optik* 127 (2016), Nr. 18, S. 7367–7373

- [Lia2020] Liao, Q.; Zhang, P.; Yao, H.; Cheng, H.; Li, C.; Qu, L.: Reduced Graphene Oxide-Based Spectrally Selective Absorber with an Extremely Low Thermal Emissance and High Solar Absorptance. In: *Advanced Science* 7 (2020), Nr. 8, S. 1903125
- [Lin2016] Linke, H.; Börner, J.; Heß, R.: 8 - Ensuring the Accuracy of Cylindrical Gears. In: Linke, H.; Börner, J.; Heß, R. (Hrsg.): *Cylindrical Gears*. Hanser, 2016, S. 554 – 589. – ISBN 978-1-56990-489-3
- [Liu2021] Liu, F.; Liang, L.; Hou, C.; Xu, G.; Liu, D.; Zhang, B.; Wang, L.; Chen, X.; Du, H.: On-Machine Measurement of Wheel Tread Profile With the 1-D Laser Sensor. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 70 (2021), S. 1–11
- [Löf2020] Löffler-Mang, M.; Naumann, H.; Schröder, G.: *Handbuch Bauelemente der Optik: Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2020
- [Lu2020] Lu, J.; Cai, Z.; Yao, B.; Cai, S.; Ma, X.; Liu, W.: Error compensation and accuracy analysis of laser measurement system based on laser-beam calibration. In: *Optik* 200 (2020), S. 163272
- [Ma2020] Ma, X.; Cai, Z.; Yao, B.; Cai, S.; Lu, J.: Analysis of factors affecting measurement accuracy and establishment of an optimal measurement strategy of a laser displacement sensor. In: *Applied Optics* 59 (2020), Nr. 33, S. 10626–10637
- [Mee2006] Meeß, K.; Kästner, M.; Seewig, J.: Verringerung und Abschätzung der Messunsicherheit bei der optischen Verzahnungsmessung mit Streifenprojektion. In: *tm - Technisches Messen* 73 (2006), Nr. 11, S. 603–610
- [Mic2021] Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG: *optoNCDT - Laser-Wegsensoren (Triangulation)*. Y9760188-M022051GKE, September 2021. – URL www.micro-epsilon.de
- [Mic2022] Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG: *confocalDT - Konfokal-chromatisches Sensorsystem*. Y9760149-R012062GKE, Juni 2022. – URL www.micro-epsilon.de
- [Mik2006] Mikhlyaev, S.: Influence of a tilt of mirror surface on the measurement accuracy of laser triangulation rangefinder. In: *Journal of Physics: Conference Series* Bd. 48 IOP Publishing (Veranst.), 2006, S. 140
- [Mül2019] Müller, A. M.; Hausotte, T.: About the need for optical gear measurements using a beam diversion mechanism in order to obtain truthful surface texture parameters/ Beurteilung der Notwendigkeit einer Strahlumlenkung für optische Zahnradmessungen zur Bestimmung korrekter Oberflächentexturkennwerte. In: *tm-Technisches Messen* 86 (2019), Nr. s1, S. 87–91
- [Mur2012] Muralikrishnan, B.; Ren, W.; Everett, D.; Stanfield, E.; Doiron, T.: Performance evaluation experiments on a laser spot triangulation probe. In: *Measurement* 45 (2012), Nr. 3, S. 333–343

- [Ni2016] Ni, K.; Peng, Y.; Goch, G.: Characterization and evaluation of involute gear flank data using an areal model. In: *Proceedings of the 31st ASPE Annual Meeting*, 2016, S. 184–189
- [Nik2016] Nikon Metrology: *High accuracy non-contact sensor 3D metrology system HN-C3030*, 2016
- [Nou2014] Noura, H.; El-Hayek, N.; Yuan, X.; Anwer, N.: Characterization of the main error sources of chromatic confocal probes for dimensional measurement. In: *Measurement Science and Technology* 25 (2014), Nr. 4, S. 044011
- [Peg2009] Peggs, G. N.; Maropoulos, P. G.; Hughes, E. B.; Forbes, A. B.; Robson, S.; Ziebart, M.; Muralikrishnan, B.: Recent developments in large-scale dimensional metrology. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 223 (2009), Nr. 6, S. 571–595
- [Pet2000] Peters, J.; Goch, G.; Günther, A.: Helical gear measurement using structured light. In: *Proceedings of the XVI IMEKO World Congress, Wien, 2000*, S. 227–230
- [Pil2020] Pillarz, M.; von Freyberg, A.; Fischer, A.: Gear Shape Parameter Measurement Using a Model-Based Scanning Multi-Distance Measurement Approach. In: *Sensors* 20 (2020), Nr. 14, S. 3910 (16 pp.)
- [Pil2021] Pillarz, M.; von Freyberg, A.; Stöbener, D.; Fischer, A.: Gear Shape Measurement Potential of Laser Triangulation and Confocal-Chromatic Distance Sensors. In: *Sensors* 21 (2021), Nr. 3, S. 937(22 pp.)
- [Pil2022] Pillarz, M.; von Freyberg, A.; Fischer, A.: Scalable multi-distance measurement approach for the optical assessment of tooth-individual shape parameters of large gearings. In: *tm - Technisches Messen* 89 (2022), 06
- [Rag2010] Ragheb, A.; Ragheb, M.: Wind turbine gearbox technologies. In: *1st International Nuclear Renewable Energy Conference (INREC)*, March 2010, S. 1–8
- [Rah2009] Rahlves, M.; Seewig, J.; others: *Optisches Messen technischer Oberflächen: Messprinzipien und Begriffe*. Beuth Verlag, 2009
- [Sat2022] Sato, R.; Shimizu, Y.; Matsukuma, H.; Gao, W.: Influence of Surface Tilt Angle on a Chromatic Confocal Probe with a Femtosecond Laser. In: *Applied Sciences* 12 (2022), Nr. 9, S. 4736
- [Sch2016] Schmitt, R.; Peterek, M.; Morse, E.; Knapp, W.; Galetto, M.; Härtig, F.; Goch, G.; Hughes, B.; Forbes, A.; Estler, W.: Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends. In: *CIRP Annals* 65 (2016), Nr. 2, S. 643 – 665. – ISSN 0007-8506
- [Sch2017] Schuth, M.; Buerakov, W.: *Handbuch Optische Messtechnik: Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017

- [Sci2005] Sciammarella, C. A.; Lamberti, L.; Sciammarella, F. M.: High-accuracy contouring using projection moiré. In: *Optical Engineering* 44 (2005), Nr. 9, S. 093605
- [Sci2011] Sciammarella, C.; Lamberti, L.; Boccaccio, A.; Sciammarella, F.: High precision contouring with moiré and related methods: a review. In: *Strain* 47 (2011), S. 43–64
- [Sep2018] Seppä, J.; Niemelä, K.; Lassila, A.: Metrological characterization methods for confocal chromatic line sensors and optical topography sensors. In: *Measurement Science and Technology* 29 (2018), Nr. 5, S. 054008
- [Ste2021] Steinmeyer, Felix and Hüser, Dorothee and Meeß, Rudolf and Stein, Martin: A Novel Measurement Standard for Surface Roughness on Involute Gears. In: *Applied Sciences* 11 (2021), Nr. 21. – URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/21/10303>. – ISSN 2076-3417
- [Stö2011] Stöbener, D.; Freyberg, A. v.; Fuhrmann, M.; Goch, G.: Characterisation of gear distortions with areal parameters. In: *3rd International Conference on Distortion Engineering*. Bremen, Germany, September 2011, S. 147–154
- [Stö2012] Stöbener, D.; von Freyberg, A.; Fuhrmann, M.; Goch, G.: Areal parameters for the characterisation of gear distortions. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 43 (2012), Nr. 1-2, S. 120–124
- [Tak2007] Takeoka, F.; Komori, M.; Kubo, A.; Fujio, H.; Taniyama, S.; Ito, T.; Takatsuji, T.; Osawa, S.: Laser Interferometric Measurement of Involute Profile by Rolling of Artifact. In: *Towards Synthesis of Micro-/Nano-systems*. Springer, 2007, S. 89–93
- [Tak2008] Takeoka, F.; Komori, M.; Kubo, A.; Fujio, H.; Taniyama, S.; Ito, T.; Takatsuji, T.; Osawa, S.; Sato, O.: Design of Laser Interferometric Measuring Device of Involute Profile. In: *Journal of Mechanical Design* 130 (2008), 03, Nr. 5. – URL <https://doi.org/10.1115/1.2890114>. – 052602. – ISSN 1050-0472
- [Tia2019] Tian, H.; Wu, F.; Gong, Y.: Gear tooth profile reconstruction via geometrically compensated laser triangulation measurements. In: *Sensors* 19 (2019), Nr. 7, S. 1589
- [Trä2015] Tränkler, H.-R.; Reindl, L. M.: *Sensortechnik: Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Springer-Verlag, 2015
- [Urb2021] Urbas, U.; Zorko, D.; Černe, B.; Tavčar, J.; Vukašinić, N.: A method for enhanced polymer spur gear inspection based on 3D optical metrology. In: *Measurement* 169 (2021), S. 108584. – URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224120311052>. – ISSN 0263-2241
- [VDI2018] VDI/VDE 2612-1: *Messen und Prüfen von Verzahnungen - Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil*. November 2018
- [You2005a] Younes, M.; Khalil, A. M.; Damir, M.: Automatic measurement of spur-gear dimensions using laser light. Part 1: measurement of tooth thickness and pitch. In: *Optical Engineering* 44 (2005), Nr. 8, S. 087201

- [You2005b] Younes, M.; Khalil, A. M.; Damir, M.: Automatic measurement of spur gear dimensions using laser light. Part 2: measurement of flank profile. In: *Optical Engineering* 44 (2005), Nr. 10, S. 103603

Eigene Veröffentlichungen

Zeitschriften (mit Peer-Review)

- M. Pillarz, A. von Freyberg, A. Fischer:** Determination of the mean base circle radius of gears by optical multi-distance measurements. *Journal of Sensors and Sensor Systems* 9:273–282, 2020.
- M. Pillarz, A. von Freyberg, A. Fischer:** Gear shape parameter measurement using a model-based scanning multi-distance measurement approach. *Sensors* 20(14):3910 (16 S.), 2020.
- M. Pillarz, A. von Freyberg, D. Stöbener, A. Fischer:** Gear Shape Measurement Potential of Laser Triangulation and Confocal-Chromatic Distance Sensors. *Sensors* 21(3):937 (22 S.), 2021.
- M. Pillarz, A. von Freyberg, A. Fischer:** Scalable multi-distance measurement approach for the optical assessment of tooth-individual shape parameters of large gearings. *tm - Technisches Messen* 89(7-8):544-553, 2022.

Konferenzbeiträge

- M. Pillarz, A. von Freyberg, A. Fischer:** Multisensory measurement of the base circle radius as a fundamental shape parameter of large gears. International Conference on Gears, München, 18.-20.09.2019, pp. 1207–1214
- M. Pillarz, A. von Freyberg, A. Fischer:** Optical multi-distance measurements of spur gears. SMSI 2020 - Sensors and Instrumentation, 2020, No. C6.4, pp. 193-194.
- M. Pillarz, A. von Freyberg, D. Stöbener, A. Fischer:** Optische Messung zahnindividueller Formparameter am Beispiel von Geradverzahnungen. XXXV. Messtechnisches Symposium des AHMT, Kassel, 22.-23.9.2021. *tm - Technisches Messen* 88(S1):S53-S58.

Betreute studentische Arbeiten

In der vorliegenden Arbeit sind Ergebnisse enthalten, die im Rahmen der Betreuung und Begutachtung folgender studentischer Arbeiten entstanden sind:

- Thomanek, P.:
Untersuchung optischer Abstandssensoren zur Formmessung von Verzahnungen.
Bachelorarbeit, Universität Bremen (2020)
- Phung, K.:
Vergrößerung des dynamischen Bereichs eines konfokal-chromatischen Sensors.
Bachelorarbeit, Universität Bremen (2020)

Darüber hinaus wurden folgende studentische Arbeiten während der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Universität Bremen betreut:

- Blanke, J.:
Untersuchung statisch belasteter Verzahnungen anhand geometrischer Merkmale.
Masterarbeit, Universität Bremen (2022)
- Buhr, S.:
Charakterisierung eines Inside-Sensorsystems für Leichtbauzahnräder zur Erfassung von dynamischen Verformungen und Lastspitzen.
Masterarbeit, Universität Bremen (2022)