

## 7. VDI-Fachtagung

# Verzahnungsmesstechnik 2021

27. und 28. Oktober 2021 in Nürnberg

Bildquelle: © FRENCO GmbH





# VDI-BERICHTE

Herausgeber:

VDI Wissensforum GmbH

### **Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek (German National Library)**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

### **© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2021**

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuskriptdruck.

Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder. Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092393-2

# Inhalt

## ► Normung & Richtlinien

<b>Normung in der Zahnradmesstechnik – Stand und aktuelle Entwicklungen . . . . .</b>	<b>1</b>
H. Röhr, Hexagon Metrology, Wetzlar	
<b>Aktuelle Arbeiten des FA 3.61 Verzahnungsmesstechnik, neue Richtlinien . . . . .</b>	<b>7</b>
A. Günther, Reishauer AG, Wallisellen, Schweiz	
<b>Die Hirth-Verzahnung – ein Klassiker etabliert sich als moderne Welle-Nabe-Verbindung . . . .</b>	<b>23</b>
K. Lübke, Hexagon Metrology GmbH, Wetzlar;	
W. Heise, Volkswagen Aktiengesellschaft, Wolfsburg	

## ► Berührungslose Messung

<b>Optische Verzahnungsmessung, schnell und hochgenau? – Hybride Verzahnungsmessung mit Klingelnberg . . . . .</b>	<b>35</b>
M. Finkeldey, Klingelnberg GmbH, Hückeswagen	
<b>Weniger Zähne knirschen – Vollständige und flächenhafte Auswertung von Verzahnungsgeometrien verschieden großer Werkstücke aus einer Hand . . . . .</b>	<b>47</b>
J. Weißer, Messtronik GmbH, Langenschiltach	
<b>Einsatz optischer Messtechnik für die Qualitätsprüfung von linearen Zahnstangen – Durchsatz, Genauigkeit und Flexibilität durch variable Inspektion . . . . .</b>	<b>55</b>
F. Balzer, T. Weigert, Hexagon Metrology GmbH, Wetzlar	

## ► Geräuschentwicklung & Ursachen

<b>Vom Geräusch zur Ursache: Entstehung von Welligkeiten auf Verzahnungen . . . . .</b>	<b>69</b>
T. Kahnenbley, G. Gravel, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW)	
<b>Verzahnungsgeräusche – Beispiele zu ursächlichen Geometrieabweichungen an Verzahnungen. . . . .</b>	<b>83</b>
B. Rank, ZF Friedrichshafen AG, Saarbrücken	

► **Digitalisierung & Software**

---

**GDE – Gear Data Exchange Format – Durchgängiger Datenaustausch in der Zahnrad-  
produktion . . . . .** 97  
G. Gravel, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW)

**Messtechnik und Digitalisierung in der Produktion – Möglichkeiten zur Effizienz-  
steigerung . . . . .** 109  
C. Gorgels, Klingelberg GmbH, Hückeswagen

**Flächenbezogene Modifikations- und Abweichungsparameter für flächenhaft erfasste  
Verzahnungs-Messdaten . . . . .** 115  
G. Goch, TriMetrik – Hamburg;  
A. Günther, Reishauer AG, Wallisellen, Schweiz;  
Y. Peng, University of North Carolina at Charlotte (UNCC), USA

► **Neues aus Forschung & Entwicklung**

---

**Rückführung von Rauheitskenngrößen auf evolventischen Zylinderradflanken . . . . .** 137  
F. Steinmeyer, M. Stein, D. Hüser, R. Meeß, K. Kniel, Physikalisch-Technische Bundesanstalt,  
Braunschweig

**Flächige Zahnflankenprüfung mittels digitaler Holographie – optisch, schnell, präzise . . . .** 155  
A. Schiller, M. Fratz, T. Seyler, A. Bertz, D. Carl, Fraunhofer-Institut für Physikalische  
Messtechnik IPM, Freiburg

## ► Projekte und Beispiele aus der Praxis

---

<b>IATF 16949: Rückführung, Kalibrierung und Abnahme von Zweiflankenwälzprüfgeräten . . . .</b>	<b>163</b>
A. Pommer, P. Jukl, M. Seifert, FRESCO GmbH, Altdorf bei Nürnberg	
<b>Einblick in die Welt der Kunststoffverzahnungen – Eine andere Welt ?!. . . . .</b>	<b>173</b>
A. Langheinrich, Horst Scholz GmbH & Co. KG, Kronach	
<b>Untersuchung von Einpresskräften bei Passverzahnungen . . . . .</b>	<b>189</b>
P. Jukl, FRESCO GmbH, Altdorf, C. Haverland, IFA Powertrain GmbH, Haldensleben, W. Heise, Volkswagen AG, Wolfsburg	
<b>Vergleich verschiedener Messmethoden in der Verzahnungsmesstechnik – Messen zwischen Spitzen als Hybridsystem neu gedacht . . . . .</b>	<b>205</b>
R. Groß, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen	



Ingenieure wollen immer alles ganz genau wissen. Wie wär's mit einem E-Paper- oder Zeitungs-Abo?



### Mehr Meinung. Mehr Orientierung. Mehr Wissen.

Wesentliche Informationen zu neuen Technologien und Märkten.

Das bietet VDI nachrichten, Deutschlands meinungsbildende Wochenzeitung zu Technik, Wirtschaft und Gesellschaft, den Ingenieuren. Sofort abonnieren und lesen.

Donnerstagabends als E-Paper oder freitags als Zeitung.

**Jetzt abonnieren: Leser-Service VDI nachrichten, 65341 Eltville**

**Telefon: +49 6123 9238-201, Telefax: +49 6123 9238-244, [vdi-nachrichten@vuservice.de](mailto:vdi-nachrichten@vuservice.de)**

[www.vdi-nachrichten.com/abo](http://www.vdi-nachrichten.com/abo)

100  
JAHRE

VDI nachrichten

TECHNIK IN  
SZENE GESETZT.





# Normung in der Zahnradmesstechnik

## Stand und aktuelle Entwicklungen

Dipl.-Math. **Heinz Röhr**, Hexagon Metrology, Wetzlar

### Kurzfassung

Bericht über den Inhalt der die Zahnradmesstechnik betreffenden zurückgezogenen DIN-Normen, die aktuellen DIN-Normen und die künftigen DIN-Normen basierend auf ISO-Normen.

### Abstract

Report about the content of the withdrawn DIN standards related to gear measurement, current DIN standards and future DIN standards based on ISO standards.

### 1. Einleitung

Wegen der allgemeinen internationalen Wirtschaftsbeziehungen besteht der Bedarf, weltweit die gleichen Normen zu Qualitätskontrolle verwenden zu können. Bei den Zylinderrädern betraf dies die Grundlagennorm DIN 3960 sowie die Toleranznormen DIN 3961, 3962 und 3963. Diese wurden inzwischen durch Übersetzungen von ISO-Normen ersetzt. Bei der Erstellung der betreffenden ISO-Normen war Deutschland in den ISO-Arbeitsgruppen WG2 „Accuracy of gears“ und WG4 „Terminology and notation of gears“ vertreten.

### 2. Inhalt der bereits zurückgezogenen DIN-Normen

Für viele Jahre waren die Basisnorm DIN 3960 und die Toleranznormen DIN 3961 bis 3963 neben die VDI-Richtlinien die Grundlage für die Zahnradmesstechnik. Während einer Überarbeitung von DIN 3960 durch den DIN-Ausschuss wurde bekannt, dass bei ISO eine ähnlich Grundlagennorm erstellt werden sollte. Daraufhin wurde der deutsche Entwurf ins Englische übersetzt und bildete die Grundlage für die neue ISO-Norm ISO 21771.

Inhalt der zurückgezogenen Normen:

### **DIN 3960**

- allgemeine Terminologie der grundlegenden Begriffe
- Definition der Abweichungsparameter bei Profil, Flankenlinie, Teilung, Rundlauf und Ein- und Zwei-Flankenwälzprüfung
- Definition und Bestimmung der Zahndickenparameter

### **DIN 3961**

- Grundlagen, Toleranzen für Stirnverzahnungen

### **DIN 3962, Teil 1**

- Toleranzen für Profilabweichungen ( $F\alpha$ ,  $ffa$ ,  $fH\alpha$ , ...), für Teilungsabweichungen ( $Fp$ ,  $fp$ ,  $f_u$ ,  $Fp_z/8$ , ...) und Rundlaufabweichungen  $Fr$

### **DIN 3962, Teil 2**

- Toleranzen für Flankenlinienabweichungen ( $F\beta$ ,  $ff\beta$ ,  $fH\beta$ )

### **DIN 3963**

- Toleranzen für Wälzabweichungen ( $F''i$ ,  $f''i$ ,  $F'i$ ,  $f'i$ )

## **3. Inhalt der aktuellen DIN-Normen**

Auf Basis von DIN 3960 wurde die Norm ISO 21771 erstellt und erschien als DIN ISO 21771. Bei der Übersetzung ins Deutsche als DIN ISO musste darauf geachtet werden, dass keine Änderungen zum Original vorgenommen werden durften. Nur ein nationales Vorwort war erlaubt. Andernfalls würde die internationale Gleichheit der Norm verloren gehen.

### **DIN ISO 21771**

- allgemeine Terminologie der grundlegenden Begriffe
- Definition und Bestimmung der Zahndickenparameter im Anhang A
- Keine Definition der Abweichungsparameter

### **DIN 21772**

Definition der Abweichungsparameter für Zylinderräder

### **DIN 21773**

Prüfmaße für die Zahndicke

#### 4. Gründe für die Entstehung von DIN 21772 und DIN 21773

**DIN 21772.** In der Grundlagennorm DIN ISO 21771 fehlt die Definition der Abweichungsparameter für Profil und Flankenlinie. Modifikationen von Profil- und Flankenlinie werden nicht behandelt, ebenso fehlt die Definition der Abweichungsparameter für Teilung, Rundlauf und Ein- und Zwei-Flankenwälzprüfung. Zur Behebung dieses Mangels wurde DIN 21772 gestellt.

**DIN 21773.** Wegen unterschiedlicher Auffassungen bei der Zahndickenbestimmung zwischen den USA und Deutschland wurden beide Strategien gemeinsam im Anhang A von ISO 21771 behandelt. Weil aber leider Parameter mit gleichem Namen aber unterschiedlicher Bedeutung parallel verwendet wurden, musste von der Verwendung von Anhang A abgeraten werden und es wurde als Ersatz die Norm DIN 21773 erstellt, die alle die deutsche Strategie betreffenden Teile aus Anhang A zusammenfasst.

#### 5. Inhalt der Toleranznorm DIN ISO 1328-1

Die neue ISO-Toleranznorm ISO 1328-1 wurde ebenfalls als deutsche Norm DIN ISO 1328-1 übernommen. Diese Norm enthält neben Toleranzen für Profil, Flankenlinie, Teilung, Rundlauf und die Ein-Flankenwälzabweichung auch die Definition und Art der Bestimmung der Abweichungsparameter.

In einem Kapitel wird die Auswertung der Modifikationen von Profil- und Flankenlinie behandelt. Dies sind beim Profil die Kopf- und Fußrücknahme, die Balligkeit, die Winkelmodifikation und die Verschränkung, bei der Flankenlinie die Endrücknahmen, die Balligkeit, die Winkelmodifikation und die Verschränkung.

Das Kapitel über die Auswertung von Modifikationen wurde auf Betreiben der deutschen Delegation in der ISO-Arbeitsgruppe aufgenommen. Hierbei konnte auf VDI 2612 zurückgegriffen werden. Den übrigen Teilnehmern war die Richtlinie nicht bekannt.

Wie schon bei früheren Ausgaben der ISO-Norm, die aber nicht als DIN ISO übernommen wurden, gibt es auch die Möglichkeit, statt der bereichsweisen Auswertung im Falle von Modifikationen die gesamte Abweichungskurve als Bezug für die Auswertung zu verwenden. Beim Profil ist dann nicht mehr die unveränderte Evolvente, sondern die gewollte Abweichungskurve mit allen Modifikationen der Bezug. Analog kann eine Soll-Flankenlinie

mit allen Modifikationen als Basis für die Auswertung verwendet werden, statt der unveränderten Flankenlinie. Damit ist auch die Verwendung beliebiger Sollkurven möglich.

Eine große Neuerung ist die Abkehr von gestuften Toleranzen bei Profil- und Flankenlinie. In die neuen Toleranzgleichungen werden jeweils die aktuellen Verzahnungsparameter eingesetzt. Damit ergeben sich glatte Toleranzkurven ohne Sprünge. Allerdings gibt es auch keine Toleranztabellen mehr. Die Toleranzen müssen immer direkt mit den Formeln bestimmt werden.

Da DIN ISO 21771 die Toleranzen samt Beschreibung enthält, wurde DIN 21772 zurückgezogen.

## **6. Inhalt der Toleranznorm DIN ISO 1328-2, Ausgabe September 2021**

ISO 1328-2 von 2020 ist mit Ausgabedatum September 2021 als DIN ISO 1328-2 erschienen. Die Norm enthält die Zwei-Flankenwölzabweichung und den Zwei-Flankenwölzsprung. Von der amerikanischen Zahnradindustrie kam die Forderung, die Stufung zwischen den Toleranzklassen vor allem bei schlechteren Qualitäten zu verringern. Dies bezog sich vor allem auf die Herstellung von Kunststoffzahnradern mit kleinem Modul, wie sie in großen Stückzahlen für die Automobilindustrie eingesetzt werden. Wegen des kleinen Moduls ist die Zwei-Flankenwölzprüfung eine einfache Methode zur Überwachung des Herstellprozesses. Zur Lösung des Problems wurde die Stufung von vorher  $\sqrt{2}$  ( $\approx 1.41$ ) auf  $\sqrt[3]{2}$  ( $\approx 1.19$ ) geändert. Dies bedeutet eine Verdoppelung der Anzahl der Qualitätsstufen. Um eine Überlappung mit den Qualitätsnummern aus ISO 1328-1 sicher zu vermeiden, wurde ein neuer Nummernbereich von 30 bis 50 gewählt. Eine Umrechnungsformel um von anderen Toleranzsystemen auf das neue System zu gelangen steht im Anhang D zur Verfügung. In Anhang E findet man dazu einige Beispielrechnungen.

## **7. In Entwicklung stehende künftige ISO-Normen**

Das in Abschnitt 4 beschriebene Dilemma mit dem Anhang A aus ISO 21771 wurde von den USA ebenfalls als problematisch angesehen. Dort erschien als Ersatz die Norm ANSI 2002. Diese war aber, anders als die deutsche Norm DIN 21773, so grundlegend und umfassend, dass beschlossen wurde, diese als Basis für eine neue ISO-Norm über die Zahndickenbestimmung zu verwenden.

Daher wurde festgelegt, ISO 21771 so zu überarbeiten, dass alle Teile zur Zahndicke entfernt werden sollten, insbesondere auch Anhang A. Diese Norm sollte dann als erster Teil

einer zweiteiligen Norm erscheinen. Im zweiten Teil der künftigen Norm sollte alles zur Zahndicke dargestellt werden. An beiden Teilen ISO 21771-1 und ISO 21771-2 wird bereits seit einiger Zeit gearbeitet.

ISO 21771-1 wurde um Kapitel für Zahnräder mit gekreuzten Achsen und über den Kontakt zweier gewölbter Flanken erweitert. In ISO 21771-2 findet man neben den üblichen Messstrategien wie Ein-Kugelmaß, Zwei-Kugelmaß und Spanne auch verschiedene Verfahren für drei Kugeln oder Rollen. Für alle Berechnungen der Berührpunkte und minimal und maximal möglichen Rollendurchmessern werden die Gleichungen explizit angegeben. Weiterhin wurde ein Kapitel über die Auslegung von Meisterrädern eingefügt, wie sie für die Zwei-Flankenwälzprüfung relevant sind.

Die Fertigstellung beider Normentwürfe durch die Arbeitsausschüsse ISO/WG2 und ISO/SC1/WG4 ist für Anfang 2022 geplant. Danach erfolgt die Prüfung durch das ISO-Zentralbüro mit eventuellen Änderungswünschen. Weiterhin werden sämtliche graphischen Darstellungen von ISO neu gezeichnet.

Sobald die finalen Versionen von ISO 21771-1 und ISO 21771-2 veröffentlicht sind, kann die Übersetzung ins Deutsche und die Veröffentlichung als DIN ISO Norm erfolgen. Dies wird sicher insgesamt einige Zeit benötigen. Danach werden die Normen DIN ISO 21771 und DIN 21773 zurückgezogen.



## Aktuelle Arbeiten des FA 3.61 Verzahnungsmesstechnik, neue Richtlinien

Dr.-Ing. **Anke Günther**, Reishauer AG, Wallisellen, Schweiz

### Kurzfassung

Dieser Beitrag beschreibt allgemein das Wirken des Fachausschusses 3.61 „Verzahnungsmesstechnik“ und im speziellen die Ergebnisse der letzten fünf Jahre. Das zukünftige Konzept der neuen Blattorganisation 2612 „Messen und Prüfen von Verzahnungen“ wird ebenfalls umrissen. Detailliert wird auf Neuerscheinung der VDI/VDE Richtlinien 2612-1 zur „Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil“ eingegangen, welche eine Zusammenfassung der ehemaligen Richtlinien 2607 und 2612 darstellt. Es wird vor allem herausgestellt, was sich geändert hat. Zusätzlich wird die Erstausgabe der VDI/VDE 2612-6 zur „Prüfung und Überwachung von Geräten zur Verzahnungsmessung“ beschrieben, welche aus einem Unterkapitel der ehemaligen Richtlinie 2612 hervorging.

### Abstract

This article is about the work of the expert committee 3.61 “Gear metrology” and its output of the last five years. Also, the future concept of new organisation of the guideline VDI/VE 2612 “Measurement and testing of gears” is introduced. There is a detailed description of the new guideline VDI/VDE 2612-1 for “Evaluation of profile and helix measurements on cylindrical gears with involute profile”, which is a merge of former guidelines 2607 and 2612. Additionally, the first issue of VDI/VDE 2612-6 for “Testing and monitoring of gear measurement instruments” is introduced, which arises from a section of the former guideline 2612.

### 1. Vorstellung des Fachausschusses VDI/VDE-GMA FA 3.61 Verzahnungsmesstechnik

Der Fachausschuss setzt sich aus Fachexperten im Bereich Verzahnungsmesstechnik zusammen. Die Mitarbeiter werden größtenteils von ihren Arbeitgebern unterstützt, jedoch erfolgt auch ein erheblicher Anteil der Arbeit auf ehrenamtlicher Basis. Der Ausschuss setzt sich zusammen aus Vertretern des Messgerätebaus, Anwendern, Hochschulen sowie der PTB.

Der Fachausschuss befasst sich mit Messungen an Zahnrädern und der Beurteilung der Qualität von Verzahnungen. Dazu wird das existierende, umfassende technische Regelwerk stets aktualisiert und erweitert. Zunehmend spielt dabei der Blick auf die internationalen

Normen auf diesem Gebiet eine große Rolle. Seit Beginn des Jahrtausends gehören auch die Erarbeitung und ständige Fortentwicklung eines Datenaustauschformates, mit der die Digitalisierung unterstützt wird, sowie der Wissenstransfer im Rahmen dieser wiederkehrenden Fachtagung „Verzahnungsmesstechnik“ dazu.

Die Nähe zur Praxis und die Anwendbarkeit in der Industrie, stehen bei allen Arbeiten des Ausschusses im Fokus. Die Richtlinien ergänzen daher und darüber hinaus an vielen Stellen aktuelle DIN- und ISO Normen. Ziel ist es, die Mess- und Auswertungsverfahren sowie den Datenaustausch zu vereinheitlichen. Zur Zielgruppe der Richtlinien gehören vor allem Hersteller und Anwender von Zahnrädern und Getrieben, Verzahnungsmaschinen, Messgeräten, Verzahnungswerkzeugen und Verzahnungssoftware. Die Qualitätssicherung, Kalibrierlabore und Labordienstleister gehören ebenfalls zu den Adressaten.

Der Fachausschuss führt in der Regel zwei Sitzungen pro Jahr durch. Die direkte Arbeit an den Richtlinien wird in kleineren Arbeitsgruppen mit unterschiedlich häufigen Arbeitstreffen ergänzt.

## **2. Aktueller Stand und neue Blattstruktur**

Der Fachausschuss betreute in den früheren Jahren die VDI/VDE-Richtlinien mit den Nummern 2606 bis 2615. Mit den Umstrukturierungsmaßnahmen des VDI im Jahr 2010 begann auch eine langfristig angelegte Umorganisation der Richtliniennummerierung in diesem Ausschuss. Seitdem werden neue und überarbeitete Richtlinien im Themenraum „Messen und Prüfen von Verzahnungen“ der VDI/VDE-Richtlinie 2612 mit fortlaufender Blattnummerierung zugeordnet (siehe Tabelle 1 und umsortiert in Tabelle 2).

Im Zuge dieser Umstrukturierung wurden wegen der inzwischen deutlich überwiegend rein elektronischen Messdatenverarbeitung die Richtlinien 2607 und 2612 zu 2612-Blatt 1 zusammengefasst. Jedoch entschied man sich auf Grund einer ausführlicher zu beschreibenden Definition von Messgerätklassen, der ursprünglich in 2612 Abschnitt 7 enthaltenen Klassifizierung, eine eigene Richtlinie zu erstellen (2612-Blatt 6). Dieser Sachverhalt sollte die zunehmende Bedeutung von Abnahmebedingungen von Messgeräten allgemein geltend klar herausstellen.

Die Richtlinie 2606 aus dem Jahre 2010, welche das Messen von Wälzfräsern beschreibt, wurde 2015 in der Überprüfung als gültig bestätigt. Die vorhandene Richtlinie beschreibt allerdings nur die Messung von eingängigen Wälzfräsern. Inzwischen gibt es jedoch sehr vielfältige Erscheinungsformen. Trotzdem entschied man sich für eine vorläufige Bestätigung und nicht für eine Überarbeitung. Hintergrund sind aktuelle Aktivitäten in ISO und DIN zu



diesem Thema. Erst nach absehbarem Erscheinen neuer Normen wird der Ausschuss eine Überarbeitung der 2606 in enger Anlehnung neuer Normung in Angriff nehmen.

Die Richtlinie 2609 zur Ermittlung von Tragbildern ist seit ihrem Erscheinen im Jahr 2000 nicht verändert worden. Der Ausschuss sieht bisher keine ausreichend neuen Erfordernisse in dieser Technik, um eine Überarbeitung zu starten.

In Tabelle 2 ist der aktuelle Stand mit Fokus auf die Sortierung der neuen Blattnummerierung aufgezeigt.

Die Richtlinien 2606 (Messen von Verzahnungswerkzeugen), 2610 zum GDE-Format und eine zukünftige Richtlinie zum Messen und Prüfen von Planverzahnungen (2614) stehen in ihre Nummerierung weiterhin außerhalb der neuen Nummerierung, da die Richtlinie 2612 alle erforderlichen Richtlinien zur Messung und Auswertung von Laufverzahnungen beinhalten soll.

### **3. VDI/VDE 2612 Blatt 1: Messen und Prüfen von Verzahnungen - Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil**

Die Richtlinie VDI/VDE 2612 Blatt 1 (2018) ersetzt die Richtlinien VDI/VDE 2607 (2000) und VDI/VDE 2612 (2000), siehe Tabelle 1. Mit der Zusammenfassung dieser beiden Richtlinien berücksichtigt der Fachausschuss „Messen an Zahnrädern und Getrieben“ die Entwicklung der Verzahnungsmesstechnik hin zu einer überwiegend rechnergestützten Auswertung. Weiterhin vollzog sich bei der Normung im Bereich der Laufverzahnung ein signifikanter Umbruch. DIN 3960 [1] wurde zurückgezogen und zunächst durch DIN ISO 21771 [2], DIN 21772 [3] und DIN 21773 [4] ersetzt. Die 2013 erschienene Toleranznorm ISO 1328-1 [5] ersetzte nach ihrer Übersetzung einige Jahre später die bisherigen Toleranznormen DIN 3961 [6], DIN 3962-1 [7] und DIN 3963[8]. Neben anderen Toleranzen enthält ISO 1328-1:2013-09 auch neue Begriffe und neue Auswerteregeln. Die Richtlinie VDI/VDE 2612 Blatt 1 berücksichtigt diese Neuerungen und ergänzt sie zum Teil. Sie beschreibt die Erfassung und Auswertung sowie Beurteilung von Messdaten auf Basis von Profil- und Flankenlinienmessungen an außen- und innenverzahnten Evolventenverzahnungen. Ziel ist die Beschreibung einheitlicher Methoden und die Vergleichbarkeit von Messergebnissen unterschiedlicher Messgerätehersteller.

Im Nachfolgenden sind die Unterschiede in der neuen Richtlinie zu ihren zwei Vorgängern thematisch zusammengestellt.

Tabelle 1: Übersicht zur historischen und zukünftigen Nummerierung der Richtlinien (Jahr der Rückziehung)

alte Nr.	Jahr	Titel	neue Nr.	Jahr	Titel	Status
<b>2606</b>	2010 Ü: '15	Messen von Verzahnungswerkzeugen - Messen von Wälzfräsern	2606-1 Keine Aktivitäten bis zum Neuentwurf von ISO und DIN zu DIN 8000 und ISO 4468			
<del>2607</del>	2000 <del>2018</del>	<del>Rechnerunterstützte Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil</del>	<del>2612-1</del>		<del>siehe unten</del>	
<b>2608</b>	2001	Einfanken- und Zweiflanken-Wälzprüfung an Zylinderrädern, Kegelrädern, Schnecken und Schneckenrädern	(2612-3)		Beginn einer Überarbeitung 2022	gültig
<b>2609</b>	2000	Ermittlung von Tragbildern an Verzahnungen	(2612-4)		Aktuell keine Tätigkeiten	gültig
<b>2610</b>	2014 Ber.: 2015	Format für den Austausch von Verzahnungsdaten - Gear-Data-Exchange-Format (GDE-Format) – Definition [V 2.0, dtd]	<b>2610</b>	2021 Ber.: 2021	Format für den Austausch von Verzahnungsdaten - Gear-Data-Exchange-Format (GDE-Format) – Definition [Version 3.0, xsd]	gültig
<del>2612</del>	2000 <del>2018</del>	<del>Profil- und Flankenlinienprüfung an Zylinderrädern mit Evolventenprofil</del>	<del>2612-1</del>	2018 Ber.: 2019	Messen und Prüfen von Verzahnungen - Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil	gültig
			<div>Abschnitt 1-6</div> <div>Abschnitt 7</div> <div>2612-6</div>	→ 2021	Messen und Prüfen von Verzahnungen - Prüfung und Überwachung von Geräten zur Verzahnungsmessung	Ende Einspruch: 12-2020
<b>2613</b>	2003	Teilungs- und Rundlaufprüfung an Verzahnungen - Zylinderräder, Schneckenräder, Kegelräder	(2612-2)		Beginn einer Überarbeitung 2022	gültig
<del>2614</del>	1985 <del>2003</del>	<del>Rundlaufprüfung an Verzahnungen: Stirnräder (Zylinderräder), Schneckenräder, Kegelräder</del>	<del>2614</del>	→ 2023	Messen und Prüfen von Planverzahnungen; Messung und Auswertung von Hirthverzahnungen	Neu
<del>2615</del>	2006 <del>2015</del>	<del>Rauheitsprüfung an Zylinder- und Kegelrädern mit Tauchschnittgeräten</del>	<del>2612-5</del>	2015	Messen und Prüfen von Verzahnungen - Rauheitsmessung an Zylinder- und Kegelrädern mit dem Tastschnittverfahren	gültig

Tabelle 2: Übersicht zur aktuellen und zukünftigen Nummerierung der Richtlinien

neues System	altes System	Jahr	Titel	Status
	<b>2606</b>	2010 Ü: 2015	Messen von Verzahnungswerkzeugen - Messen von Wälzfräsern	warten auf ISO
<div>Vortrag G. Gravel</div>	<div>2610</div>	2021	Format für den Austausch von Verzahnungsdaten - Gear-Data-Exchange-Format (GDE-Format) – Definition [V 3.0, xsd]	aktuell
<b>2612-1</b>	2607 2612 (Ab. 1-6)	2018 Ber. 2019	Messen und Prüfen von Verzahnungen - Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil	aktuell
<b>(2612-2)</b>	<b>2613</b>	2003	Teilungs- und Rundlaufprüfung an Verzahnungen - Zylinderräder, Schneckenräder, Kegelräder	Vorstellung
<b>(2612-3)</b>	<b>2608</b>	2001	Einflanken- und Zweiflanken-Wälzprüfung an Zylinderrädern, Kegelrädern, Schnecken und Schneckenrädern	Überarbeitung in Planung
<b>(2612-4)</b>	<b>2609</b>	2000	Ermittlung von Tragbildern an Verzahnungen	Überarbeitung in Planung
<b>2612-5</b>	2615	2015	Messen und Prüfen von Verzahnungen - Rauheitsmessung an Zylinder- und Kegelrädern mit dem Tastschnittverfahren	aktuell
<b>2612-6</b>	2612 (Ab. 7)	(2021)	Messen und Prüfen von Verzahnungen - Prüfung und Überwachung von Geräten zur Verzahnungsmessung	aktuell
<div>Vortrag K. Lübke</div>	<div>2614</div>	(2023)	(Messen und Prüfen von Planverzahnungen: Messung und Auswertung von Hirth-Verzahnungen)	Vorstellung
				zukünftig, Erstenwurf in Arbeit

Die aktuelle VDI/VDE 2612-1 (im weiteren Verlauf als die aktuelle Richtlinie bezeichnet) greift auf die durch die aktuelle DIN ISO 21771 [2] definierte **Nomenklatur** zurück. Dies zeigt sich bei den Formelzeichen hinsichtlich

- Indizes für Bezug- und Nichtbezugsseite (neu I und II, früher Bs und nBs)
- Eingriffswinkelmodifikation Sollwert (neu  $C_{H\alpha}$ , früher  $f_{H\alpha}$  Soll), Abweichung vom Sollwert (neu  $f_{H\alpha}$ , früher  $f_{H\alpha}$  Ist) und gemessene Eingriffswinkelabweichung von der Nominal-evolvente (neu  $f_{H\alpha C}$ , früher  $f_{H\alpha}$  gemessen)
- Die Rücknahmen (neu  $C_{\alpha a}$ ,  $C_{\alpha f}$ ,  $C_{\beta I}$ ,  $C_{\beta II}$ , früher  $C_a$ ,  $C_f$ ,  $C_{Bs}$ ,  $C_{nBs}$ )
- Wälzlängenabschnitte der Rücknahmen (neu  $L_{C\alpha a}$ ,  $L_{C\alpha f}$ ,  $L_{C\beta I}$ ,  $L_{C\beta II}$ , früher  $L_{Ca}$ ,  $L_{Cf}$ ,  $L_{CBs}$ ,  $L_{CnBs}$ )
- Bei der Kopfrücknahme der Extrapolationsbereich am Zahnkopf (neu  $h_k$  zwischen den Wälzpunkten A und a, früher  $L_{K,max}$  zwischen  $d_{Fa,min}$  und  $d_a$ )
- Die Formabweichungen der Profiltrücknahmen (neu  $f_{\alpha a}$  und  $f_{\alpha f}$ , früher  $f_{\alpha K}$  und  $f_{\alpha F}$ )
- Der Mittenbereich der Auswertung zwischen den Rücknahmen (neu  $L_{\alpha m}$ , früher  $L_{\alpha}$ , identisch zu ohne Rücknahmen)
- Wellenlängen von Welligkeitsauswertungen in Profil- und Flankenlinienrichtung (neu  $\lambda_{W\alpha}$ ,  $\lambda_{W\beta}$ , früher  $\lambda_{f\alpha}$ ,  $\lambda_{f\beta}$ )
- Amplituden von Welligkeitsauswertungen in Profil- und Flankenlinienrichtung (neu  $a_{W\alpha}$ ,  $a_{W\beta}$ , früher  $f_{W\alpha}$ ,  $f_{W\beta}$ )
- Verschränkung (neu  $S_{\beta f}$ , früher  $R_{fH\alpha}$  und  $R_{fH\beta}$  in Profil- und Flankenlinienrichtung)

In Anlehnung an die aktuelle ISO 21771 und für eine Vergleichbarkeit von Messergebnissen von unterschiedlichen Messgeräteherstellern wird auch die **Filterung** der Messpunkte jetzt genauer spezifiziert (früher wurde eine geeignete Filterung dem Messgerätehersteller überlassen). Auch die minimale Messpunktanzahl hat sich geändert:

- Grenzwellenlängen für Tiefpass:  $\lambda_{\alpha} = L_{AE}/30 \geq 0.25\text{mm}$ ,  $\lambda_{\beta} = b/30 \geq \lambda_{\alpha}$ , wobei diese Grenzwellenlänge auf einen Gauss-50%-Filter anzuwenden ist. ISO 1328-1 [5] verwendet hier  $L_{\alpha}$  anstatt  $L_{AE}$ .
- Mindestens 400 Messpunkte bzw. 5 Messpunkte/mm Messstrecke (der größere Wert gilt). Wenn sich durch diese Regelung auf der Flankenlinie deutlich mehr als 400 Messpunkte ergeben, ist es zulässig nach der Filterung die Messpunktanzahl auf 400 zu reduzieren. ISO 1328-1 [5] verwendet hier 150 Messpunkte im Profil und 300 Messpunkte in der Flankenlinie.

- Für die Welligkeitsanalyse werden hinsichtlich der Messpunktdichte neu mindestens 5 Messpunkte pro gesuchte Wellenlänge empfohlen.

Für die **Profilauswertung** ergeben sich folgende Neuerungen:

- Der Profilauswertebereich  $L_{AE}$  wurde bisher einschließlich dem Kopfbereich (aktive Länge) bis zum Punkt A am Kopf des Zahnes gesetzt. Neu wird bei der Definition zu  $L_{AE}$  der Punkt A am Kopfformkreis  $d_{Fa}$  eingesetzt, im Gegensatz zu einem zusätzlich definierten Punkt a am Nenn-Außendurchmesser  $d_a$ , außerhalb von  $L_{AE}$ .
- War bisher der Auswertebereich  $L_\alpha$  auf 92% von  $L_{AE}$  (beginnend bei  $E=d_{Nf}$ ) festgelegt, so gilt durch die neue ISO 1328-1 [5] neu 95% von  $L_{AE}$ .
- Die bisherige Unterscheidung von  $f_{H\alpha}$  (berechnet und bezogen auf  $L_\alpha$ ) und  $f_{H\alpha}'$  (berechnet auf  $L_\alpha$  und extrapoliert auf  $L_{EA}$ ) reduziert sich in der aktuellen Richtlinie zugunsten  $f_{H\alpha}$  mit einer Extrapolation auf den Nenn-Aussendurchmesser  $d_a$ .
- Die Berechnungen von Profilform- und -gesamtabweichung ( $f_{H\alpha}$  und  $F_\alpha$ ) ändern sich durch die zuvor beschriebene Erweiterung von  $L_\alpha$  und hinsichtlich der Extrapolation der nichtmaterialeseitigen Regressionselemente bis zum Nenn-Aussendurchmesser  $d_a$ .

Für **modifizierte Profilauswertungen** ergeben sich folgende Aspekte:

- Die Balligkeit wird nur noch als Parabel berechnet, das Formelement Kreis entfällt.
- Die Balligkeit war bisher der Abstand des Mittelpunktes der Parabel über ihrer Sehne innerhalb  $L_\alpha$ , neu ist es der Abstand des höchsten Punktes der über  $L_\alpha$  berechneten Parabel, welche auf den Nenn-Aussendurchmesser  $d_a$  extrapoliert wird, und deren Sehne.
- Die Eingriffswinkelabweichung  $f_{H\alpha}$  entsprach dem Steigungswert der Parabelsehne innerhalb  $L_\alpha$ , in der aktuellen Richtlinie existieren zwei davon abweichende  $f_{H\alpha}$  Werte.  $f_{H\alpha1}$  ist der Steigungswert der bis zum Punkt a extrapolierten Parabel. Für den zweiten Fall wird die Parabelsehne zwischen LAE gespannt. Der Steigungswert der sich aus dieser Sehne, bis zum Punkt a extrapoliert, ergibt. ist  $f_{H\alpha2}$ .

**Kopf- und Fußrücknahmen** in der Profillinie (segmentierte Auswertung):

- Beide Richtlinien sehen eine segmentierte Auswertung vor. Die Kopfrücknahme wurde berechnet als die Vertikalpositions Differenz zwischen dem Schnittpunkt beider Regressionselemente (in Mittenbereich und Kopfrücknahmebereich) und dem Schnittpunkt des Regressionselementes im Kopfrücknahmebereich mit dem Durchmesser des Wälzpunktes A. Diese Vorschrift entspricht der Variante 2 in der aktu-

ellen Richtlinie. Variante 1 richtet sich nach der Auswertung der ISO [5], was der Vertikalpositionsdivergenz zwischen dem Schnittpunkt des extrapolierten Regressionsselements im Mittenbereich mit dem Durchmesser des Wälzpunktes A und dem Schnittpunkt des Rücknahme-Regressionsselementes ebenfalls mit dem Durchmesser des Wälzpunktes A.

- Die Unterschiede in der Berechnung der Fußrücknahmen ist identisch zu denen der Kopfrücknahme mit dem Unterschied, dass in beiden Fällen der Fußnutzkreis ( $d_{Nr}$ ) als Endbezug gilt.
- Bei der Berechnung der Profilrücknahmen-Formabweichungen werden neu die nichtmaterialeseitig angelegten Regressionsselemente auch über den jeweils angrenzenden Übergangsbereich (zum Mittensegment) extrapoliert.
- Neu sind Rücknahmen, die auch als Parabeln ausgeführt sein können, sowie wahlweise mit und ohne tangentielle Übergänge zu den Mittenbereichen. Für den Fall, dass sich die beiden Regressionsselemente nicht schneiden (wenn mindestens eines der beiden Regressionsselemente parabelförmig ist), wird vorgeschlagen, den Schnittpunkt mit dem extrapolierten Sehnelement des parabelförmigen Regressionsselementes zu bilden. Auch werden neu Auswertungsvarianten ohne Übergangsbereiche definiert.
- Alternativ kann die segmentierte Auswertung auch als Designprofile-Auswertung nach ISO [5] vorgenommen werden.
- Bei Eingriffswinkelmodifikation wurde der Steigungswert des Messwertes bisher auf den Mittenbereich  $L_{\alpha m}$  bezogen oder für die ISO auf den gesamten  $L_{\alpha}$  hochgerechnet werden. Neu ist die generelle Hochrechnung auf  $L_{AE}$ .
- Bei balligen Mittenbereichen wurde Messwert bisher auf den Mittenbereich  $L_{\alpha m}$  bezogen. Neu sind 3 unterschiedliche Auswertungsmöglichkeiten, ohne Hochrechnung, Hochrechnung auf  $L_{AE}$  oder auf  $L_{\alpha E}$ .

Auch für die **Flankenlinienauswertung** ergeben sich Neuerungen.

- War bisher der Auswertebereich  $L_{\beta}$  formal auf Zahnbreite  $b$  abzüglich der Kantenbrüche und abzüglich 2\* dem kleineren Wert (5% von  $b$  oder 1\*Normalmodul) bzw. in der Praxis meist 80% von Zahnbreite  $b$  definiert, so gilt durch die neue ISO [5] neu die gleiche Formel nur ohne Berücksichtigung der Kantenbrüche, verbunden mit einem Auswertungsbereich von 80% der Zahnbreite  $b$ . Auch wird aktuell der V-Kreis als Messkreis bzw. -zylinder vorgeschlagen.

- Die bisherige Unterscheidung von  $f_{H\beta}$  (berechnet und bezogen auf  $L_{\beta}$ ) und  $f_{H\beta}'$  (berechnet auf  $L_{\beta}$  und extrapoliert auf  $b$ ) ändert sich in der aktuellen Richtlinie zugunsten einer generellen Extrapolation auf die Zahnbreite  $b$ . Dadurch vollzieht sich für  $f_{H\beta}$  ein direkter Bedeutungswechsel.
- Die Berechnungen von  $f_{H\beta}$  und  $F_{\beta}$  ändern sich nur durch die zuvor beschriebene Definitionsänderung von  $L_{\beta}$ .
- Für Geradverzahnungen wurden Flankenlinien-Winkelabweichungen je nach Neigungsrichtung mit dem Index  $l$  (mit Tendenz zur Linksschrägung) oder  $r$  (mit Tendenz zur Rechtsschrägung) gekennzeichnet. In der neuen Richtlinie wurde dies anhand des entsprechenden Vorzeichens des Schrägungswinkels  $\beta$  angeglichen.

Für **modifizierte Flankenlinienauswertung** ergeben sich folgende Aspekte:

- Die Balligkeit wird nur noch als Parabel berechnet, das Formelement Kreis entfällt.
- Die Balligkeit war bisher der Abstand des Mittelpunktes der Parabel über ihrer Sehne innerhalb  $L_{\beta}$ , neu ist es der Abstand des höchsten Punktes der über  $L_{\beta}$  berechneten Parabel, welche auf die Zahnbreite  $b$  extrapoliert wird, und deren Sehne.

**Endrücknahmen** in der Flankenlinieline (segmentierte Auswertung):

- Prinzipiell gelten alle Änderungen der segmentierten Auswertung der Profillinie auch sinngemäß für die segmentierte Flankenlinienauswertung.
- Die Kantenbruchbereiche unterscheiden sich nur darin, dass diese bei der Flankenlinie an beiden Profildenden auftreten und damit nicht zu den Regressionsbereichen zählen, aber als Extrapolationsgrenzen stets die Stirnschnitte, die die Zahnbreite  $b$  einschließenden, dienen.

## Verschränkungsauswertung

- Die Verschränkung war nur als Abweichung bzw. vorzeichenlose Differenz von Winkelabweichungen auf einer Flanke an den Enden der Auswertungsbereiche  $L_{\alpha}$  und  $L_{\beta}$  definiert (messbar über verteilte Profillinien und/oder Flankenlinien). Neu ist die Definition einer gezielten Verschränkung  $S_{\beta}$  (Sollmodifikation, aus Flankenlinien-winkelmodifikation an  $d_{Na}$  und  $d_{Nr}$ ) zusätzlich zur Verschränkungsabweichung  $S_{\beta f}$ , aus Flankenlinien-Winkelabweichungen an  $d_{Na}$  und  $d_{Nr}$ ) die durch die eindeutige Lage der Messdurchmesser vorzeichenbehaftet ist. Auf die Definition der Verschränkungsabweichung aus Profillinienmessungen, die nach ISO 21771 gleichwertig ist, wurde wegen der Spannungsabhängigkeit im Hinblick auf das rechnerische Vorzeichen der Verschränkungsabweichung bewusst verzichtet.

## Topographieauswertung

Neu bei der Topografiemessungen von Flanken ist:

- eine etwas abweichende Definition möglicher Bezugspunkte, aktuell mit Bezügen je Zahn, je Flanke oder mit Summenteilungsabweichung (gemeinsamer Bezug für alle Zähne),
- eine Beispiel zur farbcodierten Darstellung,
- die Darstellung der Abweichungen in Normal- oder Stirnschnitt und
- die Definition von Flankenflächen-Formabweichung  $f_{\Sigma}$  sowie Flanken-Gesamtabweichung  $F_{\Sigma}$ .

## K-Chart-Auswertung

- Für die K-Chart-Definition werden neu keine Absätze in den Schablonen mehr zugelassen.
- Die definierten Toleranzbereiche  $L_{T\alpha}$  und  $L_{T\beta}$  sind unabhängig von  $L_{AE}$  und  $b$ .

## Neu: Designprofile-Auswertung

- Wird erstmalig entsprechend den Vorgaben der ISO 1328-1 [5] erläutert.

Um in der Vielfalt der beschriebenen Auswertungsvarianten, welche durch historisch nationale Auswertungen und international abgestimmte Auswertungen entstanden, auch bei den zunehmenden digital übertragenen Auswertungen eindeutige Interpretationen liefern zu können, hat der Ausschuss das von ihm ebenfalls betreute Verzahnungsdatenformat **GDE** um entsprechende Kennzeichnungen erweitert. Die beschriebenen, alternativen Auswertungsverfahren wurden mit entsprechenden, eindeutigen Kennzeichnungen im Text ergänzt (z.B. [Evaluation\_VDI\_2612B1\_2018\_1A]). Diese können im **Gear-Data-Exchange Format** (VDI/VDE 2610) ab Version 2.6 eingesetzt werden.

Der Abschnitt 7 der Vorgängerrichtlinie VDI/VDE 2612 (Ausgabe 05-2000) beinhaltete zusätzlich Tabellen mit den Beschreibungen von messtechnischen Anforderungen für Profil- und Flankenlinien-Messgeräte. Die Beschreibungen zu diesen Tabellen erschienen dem Fachausschuss mit Blick auf die veränderte, internationale Normung nicht mehr ausreichend genug. Daher wurde dieser Teil aus der neuen Richtlinie 2612-Blatt 1 ausgegliedert und eine eigene Richtlinie zu diesem Thema verfasst (VDI/VDE 2612-Blatt 6). Die Inhalte zu dieser Richtlinie ist im folgenden Abschnitt beschrieben.



#### **4. VDI/VDE 2612 Blatt 6: Messen und Prüfen von Verzahnungen - Prüfung und Überwachung von Geräten zur Verzahnungsmessung**

Durch eine Neufassung der ISO 1328-1 [5], der DIN EN ISO 14253-1 und -2 [9] und des ISO/TR 10064-1 [10] sowie unter Einbeziehung der DIN ISO 18653 [11] wurde eine Überarbeitung der bis dahin empfohlenen Messgeräteklassen erforderlich. Durch die Weiterentwicklung der Verzahnungsmessgeräte sowie der zu verwendenden Kalibriernormale, wurde eine Neufassung und umfangreiche Erweiterung des Themas, vor allem unter praktischen Aspekten des VDI/VDE 2612-Blatt 6 vorgenommen.

Die messtechnischen Zusammenhänge und Einflussgrößen auf das Messergebnis und die normgerechte Bestimmung der Messunsicherheiten werden in dieser Richtlinie ebenfalls berücksichtigt und praxisgerecht beschrieben. Es werden explizit Methoden zur Bewertung von Verzahnungsmessgeräten beschrieben, sowie Verzahnungsnormale und Maßnahmen zur Durchführung der erforderlichen Prüfungen. Damit können diese Prüfungen sowohl als Annahmeprüfungen als auch zur laufenden Überprüfung der Messgeräte eingesetzt werden. Bild 1 zeigt die Gliederung der Inhalte.

Bild 1: Inhaltsangabe und Gliederung der Richtlinie

Inhalt	Seite
Vorbemerkung .....	2
Einleitung.....	2
<b>1 Anwendungsbereich.....</b>	<b>2</b>
<b>2 Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>2</b>
<b>3 Einflüsse und Auswirkungen auf das Messergebnis .....</b>	<b>4</b>
<b>4 Überwachungs- und Kalibriernormale.....</b>	<b>5</b>
4.1 Bauformen und Ausführungsformen von Verzahnungsnormalen.....	6
4.2 Verzahnungsnormale und deren Anwendungsbereich.....	7
4.3 Geometrienormale .....	15
<b>5 Maßnahmen zur Prüfung und Überwachung.....</b>	<b>18</b>
5.1 Überwachung der Aufstell- und Umgebungsbedingungen .....	18
5.2 Allgemeine Prüfung und Überwachung der Messgeräte.....	19
5.3 Prüfung und Überwachung mit Verzahnungsnormale .....	24
<b>6 Arten zur Prüfung und Überwachung .....</b>	<b>29</b>
6.1 Prüfmittelüberwachung .....	30
6.2 Zwischenprüfungen .....	30
<b>7 Berechnung der Messmittelfähigkeit .....</b>	<b>30</b>
7.1 Methode A (experimentelle Methode) .....	30
7.2 Methode B (aus Grenzwerten ( <i>MPE</i> )) .....	32
<b>8 Qualitätsanforderungen/Klassifizierung der Messgeräte.....</b>	<b>32</b>
Schrifttum .....	34

In Kapitel 4 wird das Konzept der Rückführbarkeit von Messergebnissen anhand des Einsatzes von Kalibriernormalen generell und eingehend für die geometrische Verzahnungsmesstechnik erläutert. Es wird ein sehr breites Spektrum von Verzahnungsnormalen und regulären Geometrienormalen mit ihren Einsatzgebieten vorgestellt. Auch die Durchführung der Prüfungen wird anhand von Beispielen und Bildern geschildert. Dem schließt sich die Berechnung des allgemeinen Messunsicherheitsbudgets für ein Messgerät an. Daraus ergibt sich eine Tabelle zum Einfluss der Messunsicherheit von Kalibriernormalen (Kalibrierunsicherheit) auf die Messung von Werkstücken (Zahnradern) hinsichtlich der zu prüfenden Toleranzklasse. Es ist ersichtlich, dass für die zuverlässige Messung kleiner Toleranzklassen sehr kleine Kalibrierunsicherheiten der Normale erforderlich sind und dass hier physische Grenzen existieren.

Für die einzelnen Messgrößen werden separate *MPE*-Werte (Grenzwerte) definiert, z.B.  $MPE(f_{1\alpha})$  für die Messung der Profilwinkel-Abweichung eines Normals mit kalibrierter Profilwinkel-Abweichung (Tabelle 3). Anschließend wird detailliert erläutert, wie die Messmittelfähigkeit methodisch abgeschätzt oder direkt ermittelt werden kann. Am Ende gilt, dass die

messaufgabenspezifische Messunsicherheit des Messgerätes möglichst kleiner sein muss als 30% der zu messenden Werkstücktoleranz.

Tabelle 3: Grenzwerte für Verzahnungsparameter

Profil	Flankenlinie	Teilung/Rundlauf
$MPE(f_{H\alpha})$	$MPE(f_{H\beta})$	$MPE(F_D)$
$MPE(f_{I\alpha})$	$MPE(f_{I\beta})$	$MPE(f_P)$
$MPE(f_\alpha)$	$MPE(F_\beta)$	$MPE(F_r)$

Abschließend wird eine neue Messgerätegruppierung vorgestellt (Tabelle 4). Diese Gruppierung ist bewusst neu als Buchstabensymbol A+, A, B, C und D klassiert, im Gegensatz zu den bisherigen Gruppen I, II und III in der Vorgängerrichtlinie. Die Messgerätegruppen spezifizieren über ein eigenes Formelwerk die zuvor erwähnten MPE-Grenzwerte je Messgröße. Das heißt, dass ein Messgerät hinsichtlich verschiedener Messgrößen unterschiedlichen Gruppen zugeordnet werden kann.

Tabelle 4: Einteilung der Messgerätegruppen

Messgerätegruppe	Toleranzklasse nach DIN ISO 1328-1
A+ <sup>a)</sup>	≤ 3
A	4
B	5 bis 6
C	7 bis 9
D	9 bis 11

<sup>a)</sup> Dabei ist zu erwähnen, dass für die Messgerätegruppe A+ nach aktuellem Stand der Technik und unter Betrachtung der Messunsicherheit keine Empfehlungen für Grenzwerte festgelegt werden können. Die Genauigkeit der der Toleranzklasse 3 (DIN ISO 1328-1) kann derzeit nicht durchgängig einer Messgerätegruppe zugeordnet werden.

## 5. Aktuelle Arbeitsthemen des Fachausschusses

Aktuelle Arbeitsgruppen befassen sich mit folgenden Themen:

- VDI/VDE 2610: Gear-Data-Exchange-Format. Diese Richtlinie ist 2003 erstmalig als dtd-Version 1.15 erschienen und wird seither hinsichtlich der darin enthaltenen Daten regelmäßig aktualisiert.
- VDI/VDE 2614: Messen und Prüfen von Plankerbverzahnungen – Hirth-Verzahnungen (Arbeitstitel). Diese Richtlinie ist ein Neuentwurf

## 6. Referenzen

- [1] DIN 3960: 1987 Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung; 2018 mit dem Erscheinen der DIN ISO 21771 zurückgezogen
- [2] ISO 21771: 2007 Gears – Cylindrical involute gears and gear pairs – Concepts and geometry  
DIN ISO 21771: 2014 Zahnräder – Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnung – Begriffe und Geometrie
- [3] DIN 21772: 2012 Zahnräder – Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnungen – Definition der Abweichungen
- [4] DIN 21773: 2014 Zahnräder – Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnung – Prüfmaße für die Zahndicke
- [5] ISO 1328-1: 2013 Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification – Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth  
DIN ISO 1328-1: 2018 Zylinderräder – ISO-Toleranzsystem – Teil 1: Definitionen und zulässige Werte für Abweichungen an Zahnflanken
- [6] DIN 3961: 1978 Toleranzen für die Stirnradverzahnungen – Grundlagen, zurückgezogen 2018
- [7] DIN 3962-1: 1978 Toleranzen für die Stirnradverzahnungen – Toleranzen für Abweichungen einzelner Bestimmungsgrößen, zurückgezogen 2018
- [8] DIN 3963: 1978 Toleranzen für die Stirnradverzahnungen – Toleranzen für Wälzabweichungen
- [9] DIN EN ISO 14253-1: 2018 Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen (ISO 14253-1:2017)  
DIN EN ISO 14253-2: 2018 Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 2: Anleitung zur Schätzung der Unsicherheit bei GPS-Messungen, bei der Kalibrierung von Messgeräten und bei der Produktprüfung (ISO 14253-2:2011)
- [10] ISO/TR 10064-1: 2019 Leitfaden zur Kontrollpraxis - Teil 1: Messung von Stirnräder-Zahnflanken
- [11] DIN ISO 18653: 2009 Zahnräder - Bewertung von Messgeräten für die Messung von Zahnradern (ISO 18653:2003)



# Die Hirth-Verzahnung – ein Klassiker etabliert sich als moderne Welle-Nabe-Verbindung

## Hirth serrations – a classic establishes as modern shaft-hub joint

Dr.-Ing. **Karsten Lübke**, Hexagon Metrology GmbH, Wetzlar;  
Dipl.-Ing. **Wolfgang Heise**, Volkswagen Aktiengesellschaft, Wolfsburg

### 1. Kurzfassung

Vor über 100 Jahren, Anfang des 20. Jahrhunderts erfand Albert Hirth eine axial wirksame, planseitige Verzahnung – die Hirth-Verzahnung. Es handelt sich um eine selbstzentrierende spielfreie Vielfach-Mitnehmerverbindung, deren ebene Flanken ein Drehmoment übertragen. Aufgrund der Flankenform wird sie auch Plan-Kerbverzahnung genannt. Die Selbstzentrierung erfolgt durch die radial und konisch angeordneten Zähne. Ihre Kraftübertragung ist durch die erforderliche axiale Verspannung begrenzt. Frühes Anwendungsbeispiel im Automobilbereich war die geteilte Kurbelwelle, heute werden beispielsweise Torsionsschwingungsdämpfer oder Kettenräder mit einer Hirth-Verzahnung mit Wellen verbunden.

Der Beitrag stellt die Historie der Hirth-Verzahnung vor und erklärt die Grundlagen der gefertigten Geometrie. Die bereits etablierte Serienfertigung bei verschiedenen Zulieferern der Volkswagen Aktiengesellschaft führt zu neuen Herausforderungen in der Mess- und Prüftechnik. Diesen soll mit der neuen VDI/VDE-Richtlinie 2614-1 begegnet werden.

### 2. Abstract

More than 100 years ago, at the beginning of the 20<sup>th</sup> century Albert Hirth invented the Hirth serration, a planar gearing effective in axial direction. It is a self-centering and free from backlash shaft-hub joint with several teeth. The flanks of the teeth are planes transferring the torque. The self-centering is based on radial and conical aligned teeth. The required axial force of the joint limits the torque transmission. Early examples in the automotive sector were divided crankshafts. Yet e.g. vibration dampers or sprockets are mounted on drive shafts.

This contribution introduces to the history of Hirth serrations and their typical design. Today,

Mass production at different suppliers of the Volkswagen Aktiengesellschaft lead to new challenges in the quality inspection. This will be covered by the new VDI/VDE guideline 2614-1.

### 3. Einleitung

Albert Hirth, geboren am 07.10.1858 in Meimsheim bei Brackenheim, war Erfinder, Konstrukteur und Unternehmer. Er starb im Alter von 77 Jahren am 12.10.1935 in Nonnenhorn am Bodensee. In seinem Leben meldete er über 350 Patente an [1,2]. Darunter befindet sich Anfang des 20. Jahrhunderts eine axial wirksame, planseitige Verzahnung. Diese Stirnverzahnung ist auch bekannt als Hirth-Verzahnung, siehe Bild 1a. Es handelt sich um eine selbstzentrierende spielfreie Vielfach-Mitnehmerverbindung, deren ebene Flanken ein Drehmoment übertragen. Aufgrund dieser Flankenform wird sie auch Plan-Kerbverzahnung genannt. Die Selbstzentrierung erfolgt durch die radial und konisch angeordneten Zähne. Aus dieser Grundform leitete Albert Hirth verschiedene Varianten, beispielsweise auch kegelige Hirth-Verzahnungen ab [3].

Ihre Kraftübertragung ist durch die Geometrie und die erforderliche axiale Verspannung begrenzt. Die axiale Verspannung kann durch eine zentrische Verschraubung oder durch eine Mehrfach-Verschraubung direkt durch die Verzahnung erfolgen [4,5]. Frühes Anwendungsbeispiel im Automobilbereich war die geteilte Kurbelwelle [6,7], heute werden beispielsweise Zahnräder oder Kettenräder mit einer Hirth-Verzahnung mit den Getriebewellen verbunden (Bild 1b und c). Weitere Anwendungsfälle sind einstellbare Drehtische beispielsweise patentiert in [8] oder Drehgelenke mit festen Winkelstellungen beispielsweise eingesetzt an Koordinaten-Messgeräten.

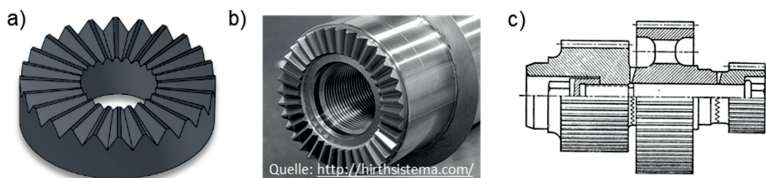


Bild 1: Hirth-Verzahnung: a) Prinzipbild, b) Welle mit Hirth-Verzahnung und zentrischer Verschraubung und c) Beispiel einer drehfesten Verbindung basierend auf Hirth-Verzahnungen mit zentrischer Verschraubung von Zylinderrädern nach [7]



Die Herstellung von diesen Plan-Kerbverzahnungen, den sogenannten Hirth-Verzahnungen, war früher auf Bereiche des Maschinenbaus beschränkt, in denen die Stückzahlen gering waren. Zudem wurden die Hirth-Verzahnungen zumeist paarweise hergestellt. Paarweise hergestellte Hirth-Verzahnungen sind einfach zu prüfen, beispielsweise durch tuschieren und/oder direkte Rundlauf- und Planlaufprüfungen mit Feinzeiger-Messgeräten. Dadurch sind beispielsweise eine ausreichende Flächenpressung, die Lage der Hirth-Verzahnung und ausreichend kleine Laufabweichungen in radialer und axialer Richtung gewährleistet. Mit dem Wandel der Herstellung zu Serienfertigungen mit hohen Stückzahlen ist dieses Vorgehen nicht mehr praktikabel. Bild 2 zeigt den Einsatz von Hirth-Verzahnungen für die Montage des Torsionsschwingungsdämpfers und des zugehörigen Kettenradsatzes an der Kurbelwelle des Motors EA888. Dieser wurde bereits mehr als 15 Millionen Mal gebaut.

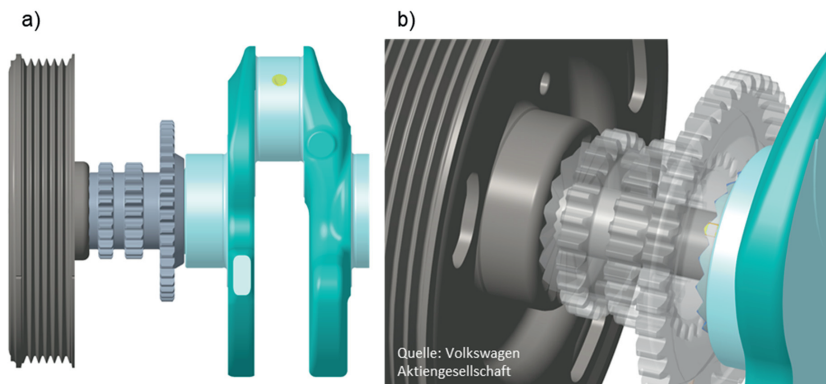


Bild 2: Motor EA888: a) Zusammenbau eines Torsionsschwingungsdämpfers mit einem Kettenradsatz an der Kurbelwelle und b) Detailansicht der eingesetzten Hirth-Verzahnungen

Der Volkswagen Konzern agiert global mit mehr als 100 Werken und einer Vielzahl von Zulieferern. Dadurch bedingt werden gleiche Fahrzeuge, Aggregate, usw. an verschiedenen Standorten hergestellt. Die erforderlichen Bauteile fragt die Beschaffung global an. Gleiche Teile kommen dann von unterschiedlichen Zulieferern. Ihre Herstellung erfolgt mit verschiedenen Fertigungsverfahren. So ist der Torsionsschwingungsdämpfer aus Bild 2 ein kaltumgeformtes Blechteil, der Kettenradsatz wird gesintert und die eingesetzte Kurbelwelle zerspannt.

Durch die zumeist räumlich getrennte Fertigung der unterschiedlichen Zulieferer ist eine lokale Messung/Prüfung vor Ort erforderlich. Die so ermittelten Kennwerte müssen

vergleichbar und so toleriert sein, dass die Funktion gewährleistet ist. Beispielsweise muss die Lage der Lücken durch eine Messung der Teilungsabweichung geprüft werden. Eine Aussage über die Flächenpressung ergibt sich aus dem Winkel mehrerer Lücken. Diese Qualitätsprüfung ist möglich mit flexibel einsetzbaren Koordinaten-Messgeräten (KMG) und/oder Hirth-Prüfvorrichtungen mit beispielweise Feinzeiger-Messgeräten. Eine Herausforderung dabei ist die bisher nur in Werksnormen beschriebene Qualitätsprüfung der Hirth-Verzahnungen. Dies gilt auch für die Volkswagen Aktiengesellschaft. Die neue VDI/VDE-Richtlinie 2614-1 soll diese Situation ändern.

#### **4. Geometrie der Hirth-Verzahnung**

Die hier beschriebene Geometrie der Hirth-Verzahnung basiert auf radial und konisch auf die Bezugsachse zulaufenden Zähnen. Sie wurde bisher in der Literatur nur selten umfassend beschrieben. Eine allgemein gehaltene Beschreibung findet sich in [9]. Bild 3 zeigt beispielhaft die beiden daraus resultierenden Zahnformen. Zahnform 1 dargestellt in Bild 3a definiert Zähne, deren Kopf- oder Fußkegel in der Stirnschnittebene rechtwinklig zur Bezugsachse der Hirth-verzahnung verläuft. Zahnform 2 dargestellt in Bild 3b definiert Zähne, deren Kopf- und Fußkegelwinkel ungleich  $0^\circ$  ist. Damit zwei Hirth-Verzahnungen technisch sinnvoll gepaart werden können, muss der Kopfkegelwinkel der ersten Verzahnung dem Fußkegelwinkel der zweiten Verzahnung entsprechen und umgekehrt. Bei beiden Zahnformen schneiden sich Kopf- und Fußkegel der theoretisch spitzen Zähne in einem Kreuzungspunkt auf der Achse der Verzahnung. Durch verschiedene Gründe, beispielweise Kerbwirkung im Zahngrund oder Klemmen bei der Montage, werden die Zähne/Lücken zumeist modifiziert konstruiert. Dabei kann es sich um Rundungen im Zahngrund oder verschiedene Arten von Kopfkürzungen handeln.

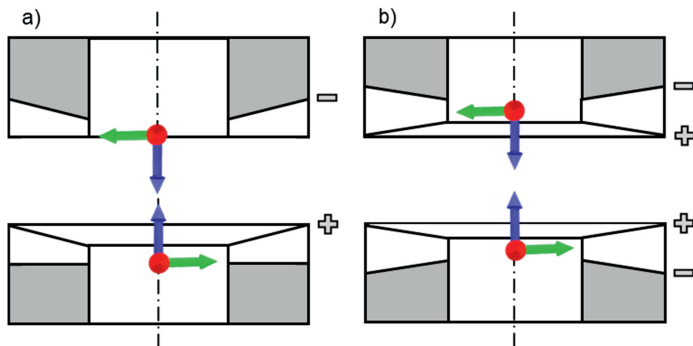


Bild 3: Passende Gegenstücke zweier unterschiedlicher Zahnformen: a) Zahnform 1 mit Kopf- oder Fußkegelwinkel rechtwinklig zur Achse der Hirth-Verzahnung und b) Zahnform 2 Kopf- und Fußkegelwinkel beide ungleich  $0^\circ$

Die hier vorgestellte Hirth-Verzahnungen zeichnet sich durch symmetrische Winkel der Zahnücke aus. Dieser kann sowohl im Vertikalschnitt, als auch im Normalschnitt zum Fußkegel definiert sein. Die Definition des Lückenwinkels beschreibt Bild 4, wobei der Lückenwinkel im Normalschnitt bei spanender Bearbeitung gleichzeitig dem Werkzeugwinkel entspricht. Beide Winkel können ineinander umgerechnet werden.

Demgegenüber existieren ebenfalls teilweise annähernd 100 Jahre später patentierte Ansprüche von definierten Nenn-Geometrien, deren Lücken definiert an der Wellenachse vorbeilaufen oder deren Lückenwinkel nicht symmetrisch ist [10].

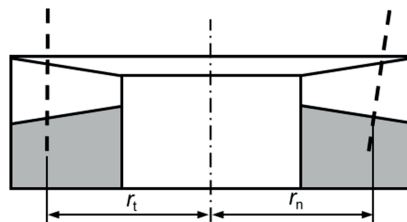


Bild 4: Definition des Lückenwinkels: links Vertikalschnitt und rechts Normalschnitt mit jeweiliger radialer Position  $r_t/r_n$  am theoretisch spitzen Zahngrund

Das zu erfassende Profil kann analog zu Bild 4 im Vertikal- oder im Normalschnitt zum Fußkegel definiert sein. Die Messung im Vertikalschnitt entspricht einer Betrachtung der Abweichungen in axialer Richtung, also der Fügerichtung, die Messung im Normalschnitt dagegen dem erzeugten Profil durch zerspanende Bearbeitung. Diese Sichtweise ist auf die

Flankenlinie nicht direkt übertragbar. Zunächst soll ein möglichst großer Teil der Flanke erfassbar sein. Außerdem erscheint es sinnvoll, dass Flankenlinien erfasst werden, die bei der Montage aufeinander liegen. Deshalb erfolgt die Messung auf der theoretischen Zahnmitte zwischen Kopf- und Fußkegel des theoretisch spitzen Zahns (Bild 5).

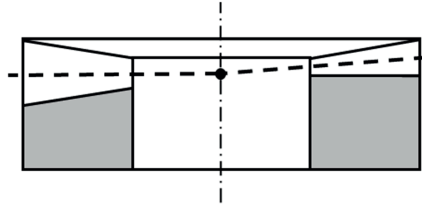


Bild 5: Lage der erfassten Flankenlinie auf der theoretischen Zahnmitte zwischen Kopf- und Fußkegel des theoretisch spitzen Zahns: links Zahnform 1 und rechts Zahnform 2

Die theoretische Zahnmitte ist definiert als Gerade auf halber Zahnhöhe des theoretisch spitzen Zahns. Sie verläuft durch den Achskreuzungspunkt. Die Auswertung der Profile und Flankenlinien ist aufgrund der Tatsache, dass die Flanken Ebenen entsprechen, durch eine Abstandsberechnung in Normalenrichtung der Ebenen einfach möglich.

Bei der Volkswagen Aktiengesellschaft wurde die Geometrie auf der Basis der Modellierung von Albert Hirth abgeleitet [9]: ihr liegt die theoretische spanende Fertigung mit dem zugehörigen Werkzeugprofil zugrunde. Dieses erzeugt direkt die jeweilige Lücke. Dadurch ist die Nenn-Geometrie eindeutig definiert. Auf ihr basiert die Generierung im CAD und die Konstruktionsbeschreibung als Vorgabe für alle Lieferanten. Dabei ist zu beachten, dass falsche Ansätze für die Modellierung in verschiedensten Medien existieren.

Abhängig vom gewählten Fertigungsverfahren müssen geometrische Randbedingungen berücksichtigt werden. Umformverfahren beispielsweise erfordern einen Radius im Fuß des Gesenks, der am gefertigten Bauteil einen Zahnkopfradius ergibt. Die Funktion der Hirth-Verzahnung erfordert ausschließlich einen Kontakt der Zahnflanken, weshalb bei der Auslegung Interferenzprüfungen erforderlich sind. Diese gewährleisten, dass beispielsweise Zahnköpfe nicht im Fußgrund des Gegenstücks anliegen.

## 5. Serienfertigung von Hirth-Verzahnungen

Im Automobilbereich bestehen Hirth-Verzahnungen zumeist aus metallischen Werkstoffen. Die Fertigung kann wie vor 100 Jahren auf der Zerspanung einzelner Lücken basieren, beispielsweise an Wellenenden. Wenn der Werkzeugwinkel stimmt, entstehen Lücken mit minimalen Abweichungen von der Nenn-Geometrie. Abweichungen der Lage oder des

Fußkegelwinkels sind zumeist durch eine Änderung der Zerspanungsparameter möglich. Die Hirth-Verzahnung an der Kurbelwelle des Motors EA888 rechts auf Bild 2c wird zerspanend hergestellt.

Hirth-Verzahnungen können auch durch Kaltumformung eines Blechteils mit einem Gesenk hergestellt werden. Dabei wird die Geometrie der Hirth-Verzahnung unter hohem Druck vom Gesenk abgeformt. Es ist zunächst davon auszugehen, dass eine hinreichende Qualität des Gesenks zu einer großen Anzahl qualitativ hochwertiger Hirth-Verzahnungen führt, bevor das Umformwerkzeug verschleißt. Auch elastische Effekte bei der Kaltumformung können bei ausreichender Prozesserfahrung durch eine veränderte Geometrie des Gesenks im Vorfeld korrigiert werden. Die Hirth-Verzahnung am Torsionsschwingungsdämpfer des Motors EA888 links auf Bild 2c wird umformend hergestellt.

Neben der zerspanenden und der umformenden Herstellung von Hirth-Verzahnung ist auch ein Urformen durch Sintern metallischer Werkstoffe möglich. Dieses Herstellungsverfahren wird für den Kettenradsatz in der Mitte auf Bild 2c eingesetzt. Es beschreibt das Mischen zumeist körniger/pulvriger Stoffe mit anschließender Erwärmung in einer Form, wobei die Stoffe verbunden und verdichtet werden.

Neben den metallischen Werkstoffen können Hirth-Verzahnungen auch aus Kunststoffen bestehen. Elastische Hirth-Verzahnungen werden beispielsweise beim Schleifen von Brillengläsern als Fixierung für das Rohglas eingesetzt (Bild 6a). Mit harten Kunststoffen sind zum Beispiel beliebig lange Bürsteneinsätze konfigurierbar (Bild 6b).

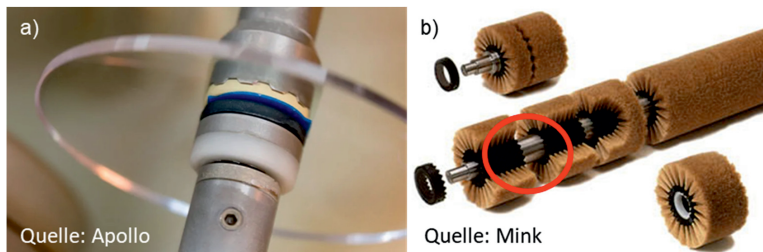


Bild 6: a) Aufgeklebte elastische Fixierung eines Rohglases und b) flexibel konfigurierbarer Bürsteneinsatz

## 6. Qualitätsprüfung der Hirth-Verzahnung

Durch die räumlich getrennte Serienfertigung bei verschiedenen Zulieferern ist eine Qualitätsprüfung festgelegter Stichproben lokal vor Ort erforderlich. Sie gewährleistet die Funktion im späteren Zusammenbau. Voraussetzung für die Konstruktion und Qualitätsprüfung ist eine vollständige Beschreibung der Nenn-Geometrie zusammen mit

definierten Auswertebereichen. Diese Definitionen basieren auf bekannten Normen beispielweise aus dem Bereich der Kegelrad- und Passverzahnungen. Die definierten Kennwerte der Qualitätsprüfung führen gemeinsam zu Bauteilen, deren Zusammenbau eine gleichbleibende Qualität gewährleistet. Die Tolerierung der einzelnen Kennwerte basiert auf abgeleiteten Toleranzen und Erfahrungen. Im Allgemeinen gewährleisten die tolerierten Kennwerte die Geometrie der Lücken/Zähne, ihre Position in axialer Richtung, die Teilungsabweichungen im Stirnschnitt, die Exzentrizität zur Bezugsachse und die Planlaufabweichung im Stirnschnitt.

Alle diese ausgewerteten Kennwerte und auch die erforderlichen Messungen bestehend aus selbstzentrierenden Antastung und gescannten Profilen sind im Entwurf der VDI/VDE-Richtlinie 2614-1 definiert. Der vollständige Titel lautet: Messen und Prüfen von Plankerbverzahnungen - Auswertung von Hirth-Verzahnungen mit zentrisch zulaufenden Lücken. Dies beinhaltet auch Definition wie den Drehsinn und was eine linke oder rechte Flanke ist. Unter der Annahme, dass die Laufachse positiv aus der Hirth-Verzahnung definiert ist, ist die Definition des Drehsinns in Uhrzeigersinn und Gegen-Uhrzeigersinn möglich. Bild 7 zeigt beide Definitionen. In Anlehnung an die Messung von evolventischen Zylinderrädern ergibt sich die Zählrichtung der Zahnlücken [11,12]. Standard ist in Anlehnung an [11,12] die Definition des Drehsinns im Uhrzeigersinn. Dementsprechend liegt der Zahn 1 zwischen Lücke 1 und 2. Die linken und rechten Flanken ergeben sich bei einer Draufsicht von oben und in radialer Richtung von außen auf die Laufachse zu. Die linken Flanken sind in Bild 7 mit einem senkrechten Muster, die rechten mit einem horizontalen Muster markiert.

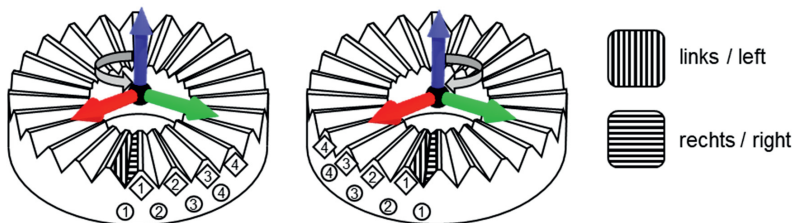


Bild 7: Definition des Drehsinns: links Gegen-Uhrzeigersinn und rechts Uhrzeigersinn mit Nummerierung der Zähne und Lücken und Markierung der linken und rechten Flanken

Neben der Definition des Drehsinns ist eine Markierung der Zahnücke 1, also der Bezugszahnücke, am Bauteil sinnvoll. Die Vergleichbarkeit von Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten oder an verschiedenen Standorten bedingt, dass für die

Ausrichtung die gleiche Lücke am Bauteil angetastet wird. Eine gute Zusammenfassung der in der zukünftigen VDI/VDE-Richtlinie 2614-1 beschriebenen Inhalte ist in [13] zusammengefasst.

## 7. Bezugsachse der Hirth-Verzahnung

Bei der Qualitätsprüfung von Hirth-Verzahnungen sind allgemein zwei Fälle zu unterscheiden. Die Fragestellung ist ähnlich wie bei evolventischen Passverzahnungen: In einem Fall existieren definierte Bezugsflächen zu denen die Hirth-Verzahnung laufen muss. Als Beispiel sei hier die Kurbelwelle aus Bild 2c rechts genannt. Im anderen Fall ist die Hirth-Verzahnung der Bezug selbst für das zugehörige Bauteil. Das Beispiel hierfür ist der Torsionsschwingungsdämpfer aus Bild 2c links.

Im Allgemeinen dienen Hirth-Verzahnungen dazu, eine Welle und ein weiteres Bauteil, beispielsweise eine Kurbelwelle und einen Torsionsschwingungsdämpfer, formschlüssig miteinander zu verbinden. Bei der Welle erfolgt die mechanische oder rechnerische Ausrichtung auf Basis der Messung der Bezugsflächen. Dies können beispielsweise zwei oder mehrere Lagerflächen sein. Sie definieren die Bezugsachse. In diesem Fall bezieht sich die Fragestellung darauf, wie die Hirth-Verzahnung zur Bezugsachse läuft. Das Bezugssystem ergibt sich für den vorgestellten Fall aus einer Zylinderachse der Lagerflächen und einem axialen Bezug, beispielsweise eine Planfläche.

Am Beispiel des Torsionsschwingungsdämpfers mit Hirth-Verzahnung als Bezug ist die Fragestellung dahingehend verändert, wie er zur Hirth-Verzahnung läuft. Diese stellt den Bezug für das Laufverhalten dar. Hierfür erfolgt auf einem KMG die Erfassung von zusätzlichen selbstzentrierenden Punkten auf mindestens zwei verschiedenen Durchmessern für eine Ausrichtung der Hirth-Verzahnung. Aus den Abweichungen der Lücken zur Achse des aktuellen Koordinatensystems ergibt sich die Exzentrizität der Hirth-Verzahnung. Die Richtung der Achse der Hirth-Verzahnung ergibt sich aus einer Gauß-Ebene durch die äußeren selbstzentrierenden Punkte. Daraus kann der Konstruktionspunkt der Hirth-Verzahnung bestimmt werden. Bei Angabe einer theoretischen Einbaudistanz ist die Festlegung einer axialen Referenz möglich.

## 8. Zusammenfassung

Vom Motor EA888 der Volkswagen Aktiengesellschaft wurden bereits mehr als 15 Millionen Stück gebaut. Zusätzlich sind in fast allen anderen Motoren ebenfalls Hirth-Verzahnungen als Verbindungselement für Torsionsschwingungsdämpfer integriert. Dies erfordert Mess- und Prüfverfahren die für eine Serienfertigung tauglich sind und wichtige Funktionsmaße

direkt an der Fertigungslinie erfassen können. Das ist ohne eine fundierte Grundlage mit internationalen Lieferanten nicht umsetzbar. Deshalb hat die Volkswagen Aktiengesellschaft im Jahr 2016 eine Prüfvorschrift für Hirth-Verzahnungen erarbeitet und intern als Konzernnorm veröffentlicht. Auf dieser Basis entstand eine Option für die Messung von Hirth-Verzahnungen in der Bedienersoftware Quindos [14]. Sie ermöglicht die automatische Messung von Hirth-Verzahnungen auf KMGs. Mit der Erweiterung der eingesetzten Fertigungsverfahren erfolgte die Integration neuer Kennwerte und Anpassung von Auswerteverfahren. In diesem Zusammenhang wurde die interne Prüfvorschrift kontinuierlich weiterentwickelt. Zusätzlich entstanden bei einem Dienstleister Messvorrichtungen, um Funktionsmaße schnell und direkt in der Fertigung prüfen zu können [15].

Hirth-Verzahnungen werden in vielfältiger Weise hergestellt und eingesetzt. Die Volkswagen Aktiengesellschaft muss den Bedingungen einer globalen Fertigung gerecht werden. Dies erforderte in Kooperation mit der Industrie Grundlagenarbeit, bei der auch neue Definitionen festgelegt wurden. Die zukünftige VDI-VDE-Richtlinie 2614-1 [16] definiert zum ersten Mal eine Grundlage für die hier beschriebenen Hirth-Verzahnungen, die bisher so national und international nicht existiert.



## 9. Literatur

- [1] Baldenhofer, J.: Schwäbische Tüftler und Erfinder. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 1986. ISBN 3871812323.
- [2] Behrsing, G.: Hirth, Albert. In: Neue Deutsche Biographie Band 9, Duncker und Humblot, Berlin, 1972. ISBN 3-428-00190-7, S. 236 f.
- [3] Hirth, A.: Crank shaft, Patent 1,690,296, United States Patent Office, 1928.
- [4] Bunge, T.: Tragfähigkeit von Plankerbverzahnungen. Technische Universität Dresden, Dissertation, 2005
- [5] Schemberger, G.: Untersuchung über die Spannungsverteilung, Drehsteifigkeit und Drehwechselfestigkeit der Hirth-Verzahnung. Universität Stuttgart, Dissertation, 1937.
- [6] Kurbelwellen: In Sass, F., Bouche, Ch., Leitner, A. (Hrsg.): Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau Band 1. 12. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1961.
- [7] Niemann, G.: Maschinenelemente Band 1, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1960, 4. berichtigter Neudruck.
- [8] Burkhardt, F, Staiger, H.: Rotary index table, Patent 4,274,773, United States Patent Documents, 1981.
- [9] N.N.: Verbindung von Wellen durch Zahnung. VDI-Zeitschrift Band 83, Nr. 31, 1939, S. 912-913.
- [10] Betzler, H., Lindenthal, H.: Machine element with Hirth-type serrations, Patent WO99/41513, PCT – Weltorganisation für geistiges Eigentum, 1999
- [11] VDI/VDE-Richtlinie 2612-1, 2018. Messen und Prüfen von Verzahnungen – Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil.
- [12] ISO1328-1, 2013. Cylindrical gears - ISO system of flank tolerance classification - Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth.
- [13] Lübke, K.; Röhr, H.: Die Hirth-Verzahnung als lösbare Welle-Nabe-Verbindung im Getriebebau: Fertigungstechnische Abweichungen und ihre Interpretation. In: 6. GETPRO Kongress – Die Zukunft der Getriebeproduktion 2017, Würzburg, Deutschland. 28. – 29.03.2017, Band 1, S. 209-221.
- [14] QUINDOS: <https://www.hexagonmi.com/de-DE/products/software/quindos>, Abruf am 24.08.2021.
- [15] FRENCO: [https://www.frenco.de/dateien/prospekte/frenco\\_planverzahnung.pdf](https://www.frenco.de/dateien/prospekte/frenco_planverzahnung.pdf), Abruf am 24.08.2021.

- [16] <https://www.vdi.de/en/home/vdi-standards/details/vdivde-2614-blatt-1-messen-und-pruefen-von-planverzahnungen-messung-und-auswertung-von-hirthverzahnungen>, Abruf am 24.08.2021.

# **Optische Verzahnungsmessung, schnell und hochgenau?**

## **Hybride Verzahnungsmessung mit KlingelInberg**

# **Optical Gear Metrology, fast and precise?**

## **Hybrid Gear Metrology with KlingelInberg**

**Markus Finkeldey, KlingelInberg GmbH, Hückeswagen**

### **Kurzfassung**

Die komplexe Geometrie von Zahnrädern, zusammen mit niedrigen Toleranzen, machen die Verzahnungsmesstechnik zu einer Herausforderung für neue und etablierte Messtechniken. Die wachsende Komplexität der Messaufgaben und gleichzeitig der Wunsch nach kürzeren Messzeiten bei gleichbleibend hoher Genauigkeit fordern eine kreative Herangehensweise in Kombination mit viel Erfahrung. Die KlingelInberg GmbH stellt sich diesen Herausforderungen und demonstriert Lösungen und Strategien für die Zukunft der Verzahnungsmesstechnik: Die hybride Messtechnik für schnelle und hochgenaue Verzahnungsmessung.

### **Abstract**

The complex geometry of gears combined with its low tolerances makes gear metrology a challenge for new and established measurement techniques. The growing complexity of measuring tasks and the simultaneous desire for shorter measuring times with consistently high accuracy demands a creative approach combined experience. KlingelInberg GmbH accepted these challenges and is demonstrating solutions and strategies for the future of gear measuring technology: The hybrid measuring technology for fast and highly accurate gear measurement.

### **1. Moderne Verzahnungsmessung im Wandel**

Die klassische Verzahnungsmessung basiert auf der Prämisse, dass aufgrund der ausreichenden Kenntnis der Produktionsprozesse bei der Fertigung von Verzahnungen, eine stichprobenartige Messung ausgewählter Kenngrößen an einigen Verzahnungen für die Qualitätssicherung der Produktion ausreichen. Aufwendigere Messungen werden hauptsächlich im Bereich der Forschung und Entwicklung benötigt. Die computergestützte und teilautomatisierte taktile Messtechnik ist in beiden Fällen die bislang bevorzugte Technologie. Die taktile Messtechnik liefert zuverlässig die nötige Genauigkeit und Flexibilität für alle anfallenden Aufgaben, sowohl im Labor als auch direkt in der Produktion.

Mit immer enger werdenden Toleranzen, dem Bedarf nach einer schnelleren Prüfung von Bauteilen bei gleichbleibender Genauigkeit und neuen sehr komplexen Messaufgaben wie der

Geräuschanalyse stößt die traditionelle, rein taktile, Messtechnik an die Grenzen der Wirtschaftlichkeit [noise1-3]. Bekannte Messaufgaben wie die Rauheitsmessung gewinnen zudem an Bedeutung und fordern weitere Messzeit am Bauteil. Durch die Optimierung von Messabläufen, die (Teil-)Automatisierung von Aufgaben wie der Bestückung der Messmaschine und der Parallelisierung von Messungen lässt sich Zeit sparen. Die dafür benötigten Investitionen sind mitunter groß und häufig nicht kosteneffizient. Eine Methode die Vorteile der bestehenden, etablierten Technologie zu erweitern ist daher nötig.

## 2. Messtechnik für Zahnräder – Das Präzisionsmesszentrum

Die taktile Messtechnik ist als mechanisches, tastendes Messsystem bekannt für seine hohe Genauigkeit, Robustheit und Flexibilität. Die Klingelberg GmbH hat als einer der führenden Anbieter im Bereich der Verzahnungsmesstechnik diese Technologie seit Jahrzehnten optimiert und den Ansprüchen der Industrie und Forschung angepasst. Moderne Präzisionsmesszentren (P-Serie, s. Abbildung 1) der Klingelberg GmbH bieten, je nach Ausstattungsvariante, neben der Verzahnungsmessung, Form- und Lagemessung, Rauheits- und Konturmessung sowie allgemeine Koordinatenmessung. Dies Alles mit Temperaturkompensation, optionaler Schwingungsisolierung und Bereit für den vernetzten Betrieb (Industrie 4.0) [Ind40].



Abbildung 1: Präzisionsmesszentrum vom Typ P 26 der Klingelberg GmbH

Die von der Klingelberg GmbH für die Verzahnungsmessung entwickelte optische Messtechnik, basierend auf einem etablierten optischen Messverfahren, reiht sich dabei in die Liste der Optionen und Fähigkeiten der Präzisionsmesszentren ein. Sie ergänzt die taktilen

Fähigkeiten der P-Serie um eine berührungslose und daher besonders schnelle Technik für zeitintensive Prüfungen an Verzahnungen. Dabei wurde besondere Aufmerksamkeit darauf gelegt diese Technik in die bestehenden Strukturen einzubetten.

### 3. Optisches Messen – Grundlagen und Übersicht

In der Koordinatenmesstechnik und teilweise in der Verzahnungsmesstechnik wurden unterschiedliche optische Technologien mit unterschiedlichen Ansätzen demonstriert und partiell auch umgesetzt. Neben der Lasertriangulation, sowohl als Punkt- als auch als Liniensensor, sind interferometrische Verfahren u. a. durch Holografie oder optische Kohärenztomografie, konfokale und/oder konfokal chromatische Messsysteme, Time-of-Flight Lasersensoren, Fokusvariation, Streifenlichtprojektion und Systeme die den optischen Frequenzkamm ausnutzen zu finden [Fischer, Schmidt, IPM]. Dabei werden diese Sensoren sowohl eigenständig als auch in direkter oder indirekter Kombination mit anderen Systemen, teilweise parallel oder durch das Einwechseln von Komponenten eingesetzt.

Optische Messsysteme bestehen dabei, i. d. R., aus einer Lichtquelle, einer Projektionseinheit (Objektiv), einem Detektor bzw. einer Auswerteelektronik, einer Software zur Filterung, Aufbereitung und Analyse der Rohdaten, sowie lichtführenden Komponenten und einer stabilen Basis zum Aufspannen und Verfahren des Messobjektes und/oder der Sensorik. Hierbei ist die Leistung des Systems häufig nicht durch die Wahl der besten Komponenten gegeben, sondern durch die Qualität der schlechtesten Komponenten begrenzt. Eine gründliche Auswahl aller Teilkomponenten und die sorgfältige Einbettung in das Gesamtmesssystem unter Einhaltung industrieller Standards sind für die Leistung im Feld letztendlich entscheidend.

Bei allen Methoden ist die berührungslose und damit näherungsweise wechselwirkungsfreie<sup>1</sup> Interaktion zwischen Licht und Messobjekt durch drei physikalische Prozesse beschreibbar. Das Licht wird von dem Messobjekt reflektiert<sup>2</sup>, absorbiert und/oder gestreut. Das Verhältnis dieser Prozesse ist vom Material selbst, seiner Farbe, der Oberflächenbeschaffenheit (Rauheit), dem Auftreffwinkel des Lichtes und der Wellenlänge bzw. dem Wellenlängenbereich des Lichtes abhängig. Die optischen Messmethoden unterscheiden sich anschließend dadurch, ob sie punkt-, linienweise oder flächig messen, sowie in der Art und Weise wie das Licht, welches zurück dem Detektor reflektiert und/oder gestreut wird, ausgewertet wird. Dies

---

<sup>1</sup> Bei den meisten optischen Messtechniken ist die Lichtintensität und Beleuchtungsdauer so gering das eine Erwärmung des Messobjektes vernachlässigt werden kann.

<sup>2</sup> Gelegentlich wird zwischen klassischer, gerichteter Reflexion und diffuser Reflexion unterschieden.

beeinflusst die laterale und axiale Auflösung des Systems, sowie den Arbeitsabstand und Messbereich (s. Abbildung 2). Auch die erreichbare Abtastrate wird durch die Wahl des Messprinzips und durch das Messobjekt selbst, bzw. seiner physikalischen Eigenschaften, definiert.

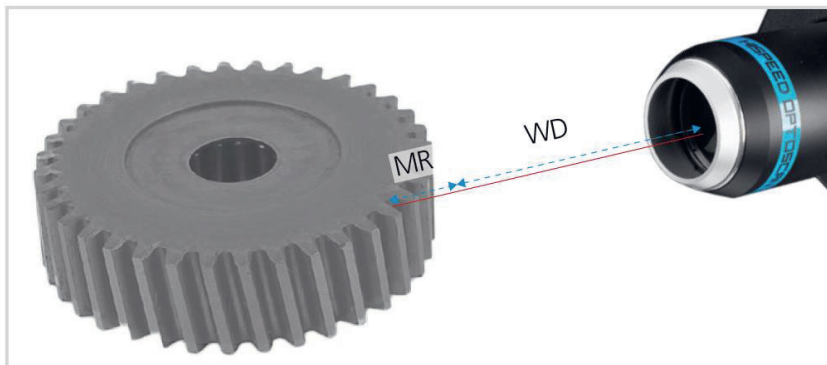


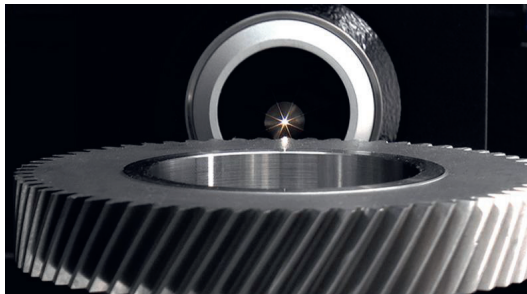
Abbildung 2: Der Arbeitsabstand (eng. Working Distance, WD) eines optischen Systems beschreibt die Entfernung von dem Sensor zum Anfang des Messbereichs (eng. Measurement Range, MR). Innerhalb des Messbereichs kann der optische Sensor Entfernungswerte liefern.

Zuletzt ist noch die Art und Weise der Datenaufbereitung, beispielsweise durch Filterung oder Mittelung, entscheidend für die Bestimmung einer Messgröße und ihrer absoluten und relativen Genauigkeit.

#### 4. Optisches Messen – Optimiert für die Verzahnung

Das vorherrschende Material für Verzahnungen ist Metall, gefolgt von diversen Kunststoffen. Die geometrische Form eines Zahnrades, kombiniert mit den häufig stark bearbeiteten und glatten Oberflächen sorgen für ungünstige Rahmenbedingungen für die optische Vermessung. Während die Absorption und die Eindringtiefe des Lichtes bei nicht oxidierten und sauberen Verzahnungen sehr gering ist, ist der reflektierte Anteil des Lichtes hoch. Aufgrund der ungünstigen Antastbedingungen bei Verzahnungen ist das direkt reflektierte Licht, selbst bei Objektiven mit großem Öffnungswinkel, in der Regel verloren da es nicht zurück in das Objektiv gelangen kann. Die optische Verzahnungsmessung ist daher auf den gestreuten Lichtanteil bzw. die diffuse Reflexion angewiesen. Für die Verzahnungsmessung geeignete optische

Sensoren sind daher bezüglich ihrer Transmission sehr effizient und ermöglichen die Nutzung von Objektiven mit einem möglichst großen Öffnungswinkel (s. Abbildung 3)<sup>3</sup>.



*Abbildung 3: Nur effiziente optische Sensorik mit hochwertiger Vergütung und großem Öffnungswinkel eignet sich für die Verzahnungsmessung in allen Qualitätsklassen.*

Die Klingenberg GmbH hat sich nach ausgiebiger Recherche und einigen Prototypen für eine Eigenentwicklung eines Punktsensors auf Basis einer Weißlichtquelle entschieden [Hybrid]. Diese Art der Sensorik ermöglicht die einfache Trennung von Lichtquelle und Detektion von der Beleuchtungseinrichtung. Ein solcher Aufbau erleichtert die Adaption des Sensors auf Messmaschinen mit unterschiedlichen Abmessungen und minimiert möglichen Crosstalk elektrischer und/oder thermischer Art zwischen verschiedenen Sensoren, mechanischen Achsen und anderen Komponenten. Die für die maximale Transmission und Effizienz verantwortlichen Komponenten wurden neu designt und nach strengen Vorgaben gefertigt. Anschließend wurde auf eine gute Integration in die bestehende Hardware und Software der Klingenberg Präzisionsmesszentren geachtet unter Berücksichtigung der hohen Ansprüche seitens der Industrie.

## 5. Grundlage – Messmittelfähigkeit für Verzahnungen

Die Fähigkeit eines Messsystems eine bestimmte Aufgabe, beispielsweise die Charakterisierung eines Bauteils bezüglich einer Kenngröße, zu erfüllen wird als Messmittelfähigkeit bezeichnet. Hierbei wird überprüft, ob das Messmittel robust und statistisch fähig für eine Messaufgabe ist. Es gilt, dass die Systemgenauigkeit des Messmittels

<sup>3</sup> In der optischen Messtechnik wird mit Öffnungswinkel (Numerische Apertur) der Winkel bezeichnet in dem das Objektiv bzw. die Linse Licht einsammeln kann.

signifikant besser sein muss als die zu messende Größe<sup>4</sup>. Dabei wird nach der Reproduzierbarkeit (Präzision oder auch Wiederholbarkeit) und dem rückgeführten, absoluten Messergebnis (Genauigkeit) unterschieden. Um die Fähigkeit zu überprüfen werden eine oder mehrere Studien an einem Produktionsteil und/oder einem zertifiziertem Messnormal gefahren. Mittels eines Produktionsteils lässt sich die zu erwartende Präzision charakterisieren und mittels des Messnormals die Genauigkeit. Je nach Art der Studie wird nur der Einfluss des Messsystems oder der kombinierte Einfluss von Messsystem und Bediener und/oder Bauteil geprüft.

Liegt kein systematischer Fehler bei der Studie vor erhält man eine (Standard-) Normalverteilung, auch als Gauß-Verteilung bezeichnet, der Messergebnisse. Beim Betrachten der als Graph dargestellten Studienergebnisse, wie in Abbildung 4 zu sehen, ist eine erste Abschätzung der Präzision und Genauigkeit möglich. Die Breite der (normalverteilten) Kurve gibt die Präzision an und der Abstand vom Schwerpunkt<sup>5</sup> der Verteilung zur Sollgröße die Genauigkeit. Ein typischer systematischer Fehler, welche zu einer Verformung der Kurve führt, ist ein Temperaturverlauf innerhalb der Studie.

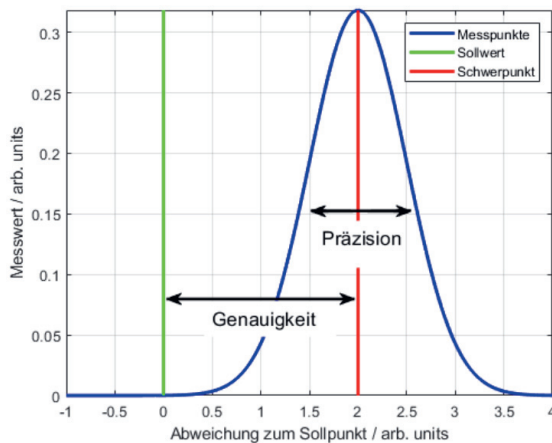


Abbildung 4: Normalverteilung einer Studie zur Demonstration von Genauigkeit und Präzision. Die Präzision ist durch die Breite der Verteilung (blau) gegeben, die Genauigkeit durch den Abstand des Schwerpunktes (rot) vom Erwartungswert (grün).

<sup>4</sup> Wieviel genauer das Messmittel sein muss ist mitunter kontrovers diskutiert. In der Welt der Verzahnungsmesstechnik gilt meistens so gut wie möglich bzw. wirtschaftlich vertretbar (nötig). I. d. R. ist damit das technisch gerade machbare erwünscht.

<sup>5</sup> In diesem Fall auch Mittelwert oder Erwartungswert.



Insbesondere für die Analyse der Präzision wird häufig die sogenannte Standardabweichung  $\sigma$  (Sigma) hinzugezogen [sigma].

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Hierbei ist  $n$  die Anzahl der Messungen,  $x_i$  der Messwerte an der Stelle  $i$  und  $\bar{x}$  der Mittelwert über alle  $n$  Messungen. Im Falle einer Normalverteilung der Messergebnisse lässt sich daraus eine zu erwartende, also statistische Abweichung von dem Erwartungswert ableiten. So liegen 68,2 % aller Erwartungswerte innerhalb eines  $\pm \sigma$  Intervalls, 95,4 % innerhalb eines  $\pm 2 \sigma$  Intervalls und 99,7 % innerhalb eines  $\pm 3 \sigma$  Intervalls.

Bei der Anzahl der Messungen einer Studie ist zu beachten, dass die (zeitliche) Länge der Studie in einer sinnvollen Größenordnung liegt. Soll beispielsweise die Messmittelfähigkeit für eine Acht-Stundenschicht erstellt werden, sollte die Studie entsprechend lange angelegt sein. Die Genauigkeit kann durch das Neu-Kalibrieren des Messsystems, auf Kosten der nutzbaren Messzeit innerhalb einer Schicht, zurückgesetzt werden. Je nach Aufstellort der Maschine ist ein zu erwartender Temperaturverlauf ebenfalls zu berücksichtigen.

## 6. Optisches Messen – Fähigkeitsanalyse

Um die Fähigkeit der optischen Sensorik innerhalb des hybriden Messansatzes zu bestimmen wurde zuerst die Maschinenmitte (Preset-Werte) über die Klingelnberg Stylus Manager Software bestimmt. Die Studie wurde dabei unter optimale Bedingungen in einem klimatisiertem Messraum und ohne Bedieneinfluss oder Wechsel der Sensorik mit einem Umfang von 100 Messungen durchgeführt. Genutzt wurde eine Kundenmaschine vom Typ P 26 mit Optik-Paket. Als Kalibrierkugel wurde die mitgelieferte Kalibrierlehre für die Optik genutzt. In Abbildung 5 ist sowohl die Abweichung zum Mittelwert aller Messungen (oben), als auch die Abweichung von einer Messung zur nächsten (unten) zu erkennen.

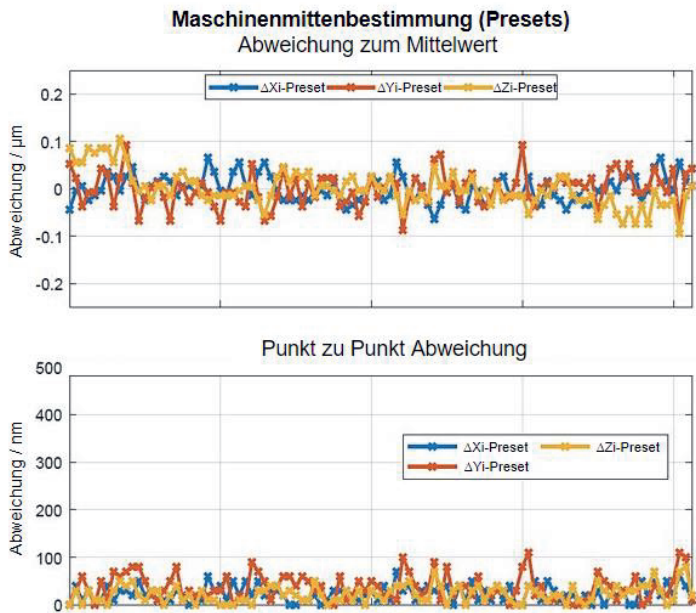


Abbildung 5: Maschinenmittenbestimmung an einer optischen Kalibrierlehre mittels Stylus Manager Software an einer Serien P-26. Oben: Abweichung zum Mittelwert. Unten: Abweichung Messung zur Messung. Auf der X-Achse des Graphen ist die Anzahl der Messungen ( $n = 100$ ) aufgetragen.

Die Gesamtmesszeit der Studie betrug 8 Stunden und 14 Minuten. Die Standardabweichung  $\sigma$  der Maschinenmittenbestimmung innerhalb dieser Studie liegt in X-Richtung bei 28 nm, in Y-Richtung bei 35 nm und in Z-Richtung bei 38 nm. Die Temperaturvariation innerhalb der Messreihe lag bei unter 0.5 °C. Erfahrungen aus der Praxis haben gezeigt, dass die Werte innerhalb eines Produktionsumfeldes schlechter sein können<sup>6</sup>. Durch die, in Präzisionsmesszentren der Klingelberg GmbH, integrierte Temperaturkompensation und die optionale Schwingungsisolierung kann der Einfluss minimiert werden.

Als Nächstes wurde eine Schrägverzahnung mit 63 Zähnen ( $m_n = 1,52 \text{ mm}$ ,  $\beta = 31.5^\circ$ ,  $\alpha = 17^\circ$ ,  $\text{Teilungsmesskreis} = 112,88 \text{ mm}$ ) in einer Studie mit dem Umfang von 100 Messungen hinsichtlich der Kenngrößen der Teilung  $fp_{Max}$ ,  $F_p$  und  $F_{pZ8}$  untersucht. In der Abbildung 6 sind sowohl die Mittelwerte, Minima und Maxima als auch die Standardabweichung  $\sigma$  (Std) und die

<sup>6</sup> Vibrationen durch Produktionsmaschinen, Lieferfahrzeuge und Änderungen in der Umgebungstemperatur sind typische Störgrößen.

häufig genutzten  $c_g$  und  $c_{gk}$  Werte dargestellt. Die  $c_g$  und  $c_{gk}$  Werte beziehen sich bei diesem Beispiel auf eine Verzahnungsqualität der Klasse Drei nach (DIN ISO 1328-1).

Parameter	fpMax_l	fpMax_r	Fp_l	Fp_r	Fpz8_l	Fpz8_r
Average [µm]	1.153	0.898	2.758	3.888	1.909	2.342
Min [µm]	0.990	0.780	2.510	3.730	1.540	2.200
Max [µm]	1.330	1.020	3.020	4.060	2.170	2.520
PTP [µm]	0.340	0.240	0.510	0.330	0.630	0.320
Std [µm]	0.071	0.052	0.112	0.080	0.127	0.075
cg	2.100	2.893	4.239	5.915	2.365	3.987
cgk	1.773	1.905	3.158	5.215	2.006	3.603
in Tol.	☺	☺	☺	☺	☺	☺

Abbildung 6: Typische Kenngrößen einer Teilungsmessung an einem Kundenbauteil mit 63 Zähnen und einem Normalmodul von  $m_n = 1,52$  mm, Studienumfang von 100 Messungen. Gemessen mit der optischen Messtechnik einer P-26 der Klingenberg GmbH.

## 7. Optisches Messen – Verkürzung der Messzeiten

Der aktuelle Vorteil der optischen Messtechnik ist die mögliche Verkürzung der Messzeit bei geeigneten Bauteilen. Je komplexer die Messaufgabe, desto potentiell höher kann die zeitliche Einsparung während der Messung sein. Aus diesem Grund bietet die Klingenberg GmbH als erste Schlüsselanwendung die optische Teilungsmessung an. Bei dieser Messung müssen immer alle Zähne vermessen werden, um den Abstand der Zahnflanken zueinander zu bestimmen. Eine mitunter sehr zeitaufwendige Messung. Empirische Studien haben ergeben, dass der typische Gewinn der Messzeit für die Teilungsmessung bei etwa 70 % liegt, jedoch ist zu beachten, dass die Gesamtmesszeit näherungsweise linear mit der Anzahl der Zähne skaliert. Je mehr Zähne ein Bauteil hat, desto größer der absolute Gewinn an Messzeit. Eine Übersicht möglicher Messzeitgewinne ist in der Abbildung 7 zu sehen.

Zähnezahl z	Normalmodul m [mm]	Messzeit taktill* [s]	Messzeit optisch* [s]	Messzeitein- sparung [%]
63	1,52	114	27,5	75,9
29	2,197	71	20	71,8
21	2,2	47	11,8	74,9
75	1,9189	133	37,3	72,0
36	4	74	28,2	61,8
95	1,4	164	45	72,6
67	1,529	126	37	70,6

Abbildung 7: \* Messzeiten ausschließlich für die Teilungsmessung, d.h. ohne Messung zur Bestimmung der Achslage oder ähnliches. Der mittlere relative Gewinn an Messzeit liegt bei 71 %.

## 8. Optisches Messen – Diskussion

Die Klingenberg GmbH bietet die Option des optischen Messens der für Präzisionsmesszentren der Serien P 26 bis P 100 als Option für Neugeräte und als

Nachrüstlösung für viele schon ausgelieferte Geräte der fünften<sup>7</sup> und sechsten Generation an. Unterstützt werden Verzahnungen im Modulbereich  $m_n$  von  $m_n = 0.9 \text{ mm}^8$  bis  $m_n = 6 \text{ mm}$ . Die im Haus entwickelte Weißlichtquelle stellt eine stabile und leistungsstarke Lösung dar, die nicht unter den Laserschutz fällt und daher als sichere und leicht zu wartende Lichtquelle anzusehen ist. Die Messzeiteinsparung von etwa 71 % bei der optischen Teilungsmessung kann insbesondere in voll ausgelastet Messräumen oder im Rahmen der Qualitätssicherung innerhalb von Produktionslinien einen wirtschaftlichen Vorteil bieten. Messreihen mit Kundenbauteilen haben ergeben das etwa 80 % bis 90 % der typischen Verzahnungen im Automobilbereich von der optischen Teilungsmessung profitieren können. Der hybride Ansatz stellt dabei die Messfähigkeit in 100 % der Anwendungsfälle sicher, dabei ist in beiden Fällen die Messung im Rahmen höchster Genauigkeitsanforderungen wie von einer Messmaschine der Klasse 1 (DIN ISO 1328-1 / VDI/VDE 2612) gefordert möglich. In enger Zusammenarbeit mit Partnern aus Industrie und Forschung arbeitet die Klingenberg GmbH sowohl daran die Anzahl der sinnvoll messbaren Verzahnungen zu erhöhen als auch die messbaren Features zu erweitern.

Die sich stetig wandelnden und steigenden Ansprüche an moderne Verzahnungen, beispielsweise bezüglich ihres Geräuschverhaltens, bietet reichlich potential für die optische Messtechnik. Eine Investition in Klingenberg Präzisionsmesszentren stellt daher weiterhin eine zukunftssichere Lösung für die Messung rotationssymmetrischer Bauteile dar. Optionen wie die Rauheitsmesstechnik und nun die optische Messtechnik festigen diesen Weg.

## 9. Hybrides Messen – Höchste Flexibilität, Genauigkeit und Geschwindigkeit

Der größte Vorteil der taktilen Messtechnik, neben der sehr hohen Genauigkeit, ist die hohe Flexibilität. Durch das automatische einwechseln von Taststiften mit unterschiedlichsten Geometrien und Tastkugeln mit verschiedenen Größen kann ein taktils Tastsystem auf die unterschiedlichsten Geometrien eines Messobjektes schnell und einfach angepasst werden. Diese Flexibilität und die relative Unabhängigkeit von dem Verschmutzungsgrad des Bauteils, machen es einem optischen System sehr schwer eine Alternative zu etablieren. Die Lösung für eine moderne Verzahnungsanalyse ist daher die hybride, also kombinierte taktile und optische Messung wie in Abbildung 8 zu sehen. Durch den schnellen Wechsel zwischen

---

<sup>7</sup> Bitte kontaktieren sie ihren Service Partner für genauere Informationen und Angebote.

<sup>8</sup> Für kleinere Module ist Rücksprache mit der Serviceabteilung und/oder der Anwendungstechnik zu halten.

beiden System erlaubt die Lösung der Präzisionsmesszentren die Nutzung beider Systeme für den jeweils idealen Anwendungsfall<sup>9</sup>.



Abbildung 8: Hybride Messtechnik kombiniert die Vorteile taktiler und optische Messtechnik. Flexibel, schnell und genau.

Für Verzahnungen und Aufgaben bei denen die optische Messtechnik eine höhere Geschwindigkeit bei vergleichbarer Genauigkeit erreicht, wird dieses System genutzt. Für die verbleibenden Fälle ist jederzeit das ausgereifte taktile System weiterhin nutzbar.

## 10. Fazit und Ausblick

Forschung, Entwicklung und kontinuierliche Kooperation mit Partner aus Industrie und Forschung ermöglichen die praxisnahe Einführung neuer Technologien. Die hybride Messtechnik der Klingelberg GmbH liefert modernste Technik mit etablierter Software, bekannten Messblättern und Auswertungen nach aktuellem Industrie-Standard. Die Hybride Messtechnik als Option für Präzisionsmesszentren von Klingelberg, für Neumaschinen und als Nachrüstung.

[noise1] G. Gravel, *Analysis of ripple on noisy gears*, AGMA Fall Technical Meeting 2012, USA

[noise2] D. Gauder, R. Wagner, J. Götz, B. Häfner, G. Lanza, *Funktionsorientierte Qualitätssicherung von Mikrozahnradern hinsichtlich des Geräuschverhaltens*, tm-Technisches messen, 2019, Band 86 Heft 9

[noise3] G. Gravel, *Analysis of gear measurement to solve noise problems in gear boxes*, Swedish Production Symposium, 2016

<sup>9</sup> Der Wechsel zwischen dem taktilen NANOSCAN und dem optischen OPTOSCAN erfolgt innerhalb von etwa 1,5 Sekunden, das optische System ist dann stabil und eingeschwenkt.

- [Fischer] M. Pillarz, A. v. Freyberg, D. Stöbener, A. Fischer, *Gear shape measurement potential of laser triangulation and confocal-chromatic distance sensors*, sensors 2021, Band 21
- [Schmidt] R. Christoph, Ingomar Schmidt, *Tactile and Non-contact Sensor for Coordinate Measuring Technology*, AMA Conferences 2015 – SENSOR 2015 and IRS<sup>2</sup> 2015
- [IPM] Alexander Bertz, *Hologear Optical Gear Measurement: Fast, precise, Comprehensive*, Fraunhofer IPM
- [Hybrid] G. Mies, *Neue Hybrid-Technologie für taktile und optische Messtechnik*, White Paper, KlingelInberg GmbH
- [Ind40] F. Seibicke, M. Schweizer, D. Meuris, *Industrie 4.0 für Zahnräder*, White Paper, KlingelInberg GmbH
- [sigma] Hans-Otto Georgii: *Stochastik. Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik*. 4. Auflage. Walter de Gruyter, Berlin 2009, [ISBN 978-3-11-021526-7](https://doi.org/10.1515/9783110215274), S. 108, [doi:10.1515/9783110215274](https://doi.org/10.1515/9783110215274).

## Weniger Zähne knirschen

### Vollständige und flächenhafte Auswertung von Verzahnungsgeometrien verschieden großer Werkstücke aus einer Hand

Jörg Weißer, Messtronik GmbH, Langenschiltach

#### Kurzfassung

Die konventionelle Messung von Zahnrädern, Schnecken und anderen Werkstücken mit Verzahnungsgeometrien beschränkt sich auf diskrete Punkte entlang der Profil- und Flankenlinien und ist in der Regel zeitaufwändig. Moderne Koordinatenmessgeräte mit chromatischen Abstandssensoren oder Röntgen-Computertomografie erfassen die gesamte Oberfläche des Werkstücks mikrometergenau und ermöglichen eine vollflächige Auswertung der Flächen auf geometrische Eigenschaften und das Laufverhalten.

#### Abstract (optional)

The conventional measurement of gears, worms and other workpieces with gear geometries is limited to discrete points along the profile and flank lines and is usually time-consuming. Modern coordinate measuring machines with chromatic distance sensors or X-ray computed tomography record the entire surface of the workpiece with micrometer precision and enable full-surface evaluation of the relevant surface areas for geometric and running properties.

#### 1. Anwendung

Die Verwendung von Elektromotoren hat in den letzten Jahren stetig zugenommen, sei es im Automobilbereich, in der Medizintechnik oder im stark wachsenden Bereich der Konsumgüter wie z. B. bei E-Bikes. Darüber hinaus haben sich die Anforderungen, die an moderne Motoren und Getriebe gestellt werden, deutlich erhöht. Der Messtechnik stellt sich somit die Aufgabe, sich mit immer kleineren Werkstückabmessungen, immer höheren Stückzahlen und mit immer engeren Toleranzen auseinander zu setzen. Zusätzlich steht die Laufruhe von Getrieben besonders bei hohen Drehzahlen vermehrt im Vordergrund. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, reichen die konventionellen Verzahnungsmessmethoden nicht mehr aus. Mit der Ein- bzw. Zwei-Flanken-Wälzprüfung ist man im Stande hohe Stückzahlen zu prüfen. Die Ergebnisse lassen jedoch keine hinreichend guten Rückschlüsse auf die einzelnen

Fehlerquellen zu, da es sich hier um eine Gut-Schlecht-Prüfung handelt. Zudem sind teure Masterzahnräder für jede zu prüfende Verzahnung notwendig.

Die taktile Messung der Verzahnung bietet die Möglichkeit, Laufeigenschaften und Formabweichungen der Profil- und Flankenlinien getrennt zu messen, um dadurch für die Produktion verwertbare Steuerungsparameter zu ermitteln. Auf diese Weise kann für jeden Zahn, genauso wie für das Zusammenspiel aller Zähne im Lauf, die Qualität der Verzahnung bestimmt werden. Die taktile Messung orientiert sich allerdings an der konventionellen Fertigung, wie beispielsweise dem Wälzfräsen. Fertigungsbedingt treten hier die Fehler periodisch auf, sodass in der Regel eine Messung in der Mitte des Zahnes an Profil- und Flankenlinie gleichverteilt an drei bis vier Zähnen am Umfang ausreicht, um die Qualität der Verzahnung zu bewerten.

Da kleine Zahnräder für Elektromotoren und kleine Getriebe im Kunststoffspritzgussverfahren hergestellt werden, können alle Zähne des Zahnrads unterschiedliche Fehler ausweisen. Eine Regelmäßigkeit tritt hier nicht auf. Dies macht es notwendig, alle Zähne des Rads oder den gesamten Zahnverlauf einer Schnecke zu prüfen. Gepaart mit der bei Kunststoffrädern häufigen hohen Anzahl von Zähnen entstehen lange Messzeiten für jedes Zahnrad.

Kleine Module und geringe Werkstückabmessungen von nur wenigen Millimetern erschweren zusätzlich die Handhabung sowie die Zugänglichkeit der Profile für konventionelle Tastsysteme. Bei der Verwendung sehr kleiner Tastelemente entsteht zusätzlich durch die geringe Antastfläche ein hoher Druck auf das Werkstück, der die Oberfläche verformen und die Messergebnisse somit negativ beeinflussen kann. Hier bietet lediglich der Werth Fasertaster® die Möglichkeit, Zahnräder mit Moduln bis 0,05 mm prozesssicher und hochgenau zu messen.

## 2. Verzahnungsmessung mit chromatischem Abstandssensor

Moderne chromatische Abstandssensoren wie der Chromatic Focus Line Sensor (CFL) ermöglichen eine schnelle Erfassung der gesamten Werkstückgeometrie. Mit unterschiedlichen Objektiven lassen sich Messunsicherheit und Messbereich an die jeweilige Anwendung anpassen. Durch einen großen axialen Messbereich ist oft kein geregeltes Nachführen zur Werkstückgeometrie notwendig, sodass durch Scanning ein schnelles und einfaches Erfassen großer Flächen möglich ist. Werkstücke mit stark variierender Höhe, wie



die Profilflächen von Zahnrädern und Schnecken, können mit einer 3D-Vorgabebahn gescannt werden, die der Topografie des Werkstücks annähernd folgt.

Der Chromatic Focus Line Sensor misst sowohl diffus reflektierende und spiegelnde als auch transparente Werkstücke sowie Oberflächen mit großen Neigungswinkeln. Er projiziert eine Reihe aus etwa 200 weißen Lichtpunkten auf die Werkstückoberfläche. Das von der Oberfläche reflektierte Licht wird spektral analysiert und hierdurch der Abstand zwischen Sensor und Oberfläche bestimmt. Mit dem neuen Liniensensor ist eine vollständige 3D-Erfassung des Werkstücks bei sowohl hoher Genauigkeit als auch hoher Geschwindigkeit möglich. Er misst etwa eine Million Messpunkte in drei Sekunden.

Um die Oberfläche optimal zum Sensor auszurichten, kommen häufig Koordinatenmessgeräte mit vier oder fünf Achsen zum Einsatz (Bild 1). Neben den drei translatorischen Achsen werden hierbei Rotationsachsen zum Drehen und ggf. Schwenken der Werkstücke verwendet. Für eine optimale Zugänglichkeit des Werkstücks können Koordinatenmessgeräte mit mehreren Pinolen eingesetzt werden, sodass jeder Sensor durch eine eigene Pinole geführt wird (Bild 2). Die Steuerung übernimmt die Synchronisation der Achsen, um das Werkstück relativ zum Sensor in einer kontinuierlichen Bewegung zu führen und dadurch die komplette Oberfläche in einem Scandurchgang zu erfassen.

Die ermittelten Oberflächenmesspunkte werden in der Messsoftware zu einer triangulierten Punktwolke zusammengefasst und können anschließend auf unterschiedliche Arten ausgewertet werden.

### 3. Verzahnungsmessung mit Computertomografie

Bei der Computertomografie (CT, Bild 3) wird das Werkstück zwischen der Röntgenquelle und dem zumeist flächigen Detektor angeordnet und mit Hilfe einer Drehachse (Drehtisch) gedreht. Dabei werden 2D-Durchstrahlungsbilder aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen. Die Röntgenstrahlen werden abhängig von der Art des Materials und der Durchstrahlungslängen beim Durchdringen des Werkstücks abgeschwächt. Mit Hilfe mathematischer Verfahren zur Bildrekonstruktion (gefilterten Rückprojektion) wird aus den 2D-Durchstrahlungsbildern ein Volumenmodell berechnet, das aus dreidimensionalen Voxeln (Volumen-Pixeln) besteht. Diese sind vergleichbar mit den Pixeln eines 2D-Bildes, enthalten aber Informationen über das Material (Dichte) und die Geometrie des gesamten Werkstücks. Die Volumendaten lassen sich direkt für eine Inspektion des Werkstücks nach zum Beispiel Lunkern oder Rissen verwenden (Bild 4).

Zur Ermittlung von Maßen müssen jedoch die exakten Positionen der Materialübergänge bestimmt werden. Durch ein für Werth patentiertes Verfahren zur lokalen Kantenortsdetektion

erfolgt dies besonders genau, mit Subvoxelauflösung und unabhängig von lokalen Störungen. Die so ermittelten Oberflächenpunkte werden meist vernetzt im STL-Format dargestellt und für den Vergleich mit dem CAD-Modell oder die Ermittlung beliebig geometrischer Eigenschaften genutzt.

Aus der Größe und dem Material des Messobjekts sowie aus der Messaufgabe ergeben sich die zu verwendenden CT-Komponenten wie Röntgenröhre, Detektor, Drehachse, Vorfilterung und die Messparameter: Abbildungsmaßstab, Messmethode, Röntgenspannung und -strom, Belichtungszeit und die Anzahl der Drehschritte.

Besonders die Auswahl der Röntgenröhre hat großen Einfluss auf das Messergebnis hinsichtlich Auflösung und Messgeschwindigkeit. Die Brennfleckgröße der Röhre, am Ort an dem die Röntgenstrahlung erzeugt wird, ist von entscheidender Bedeutung. Diese hängt von der Bauart des Röhrentargets ab und steigt zudem mit der verwendeten Strahlleistung (Röntgenspannung und -strom). Infolgedessen nimmt die Messauflösung ab.

Durch den Einsatz von Transmissionsröhren erreichen die Werth-Koordinatenmessgeräte mit Computertomografie eine um den Faktor fünf kürzere Messzeit im Vergleich zu konventionellen Reflexionsröhren bei gleichzeitig hoher Auflösung. Besonders interessant ist dies bei Zahnrädern aus dem Spritzgussbereich. So können hier durch eine schnelle Tomografie von vielen kleinen Zahnrädern Messzeiten pro Zahnrad von unter fünf Sekunden erreicht werden.

### 3. Auswertung von Messpunktewolken

Die Grundlage für die Auswertung einer Messung mit CFL- oder CT-Sensor bildet eine Messpunktewolke der Werkstückoberfläche mit einer sehr hohen Punktedichte (Bild 5). Üblicherweise liegen die Messpunkte als triangulierte Messpunktdatei im STL-Format vor, wodurch die Oberflächenrichtung in der Information enthalten ist.

Um eine optimale Vergleichbarkeit zur konventionellen Messung zu ermöglichen, kann über die Messsoftware WinWerth® eine Punktverteilung analog der Verteilung konventioneller taktiler Messpunkte generiert werden, die die Messpunkte über den Werth Messflecksensor virtuell abtastet. Da die Verfahrenswege des Gerätes bei dieser Messmethode entfallen, ist die Messgeschwindigkeit nahezu unabhängig von der Anzahl der gemessenen Zähne oder der angestrebten Punktedichte. Das Ergebnis liegt in der Regel in wenigen Sekunden vor und liefert die bekannten Spuren, die in einem normkonformen Protokoll beispielsweise analog der DIN 3962, DIN ISO 1328-1 oder ANSI AGMA 2000-A88 ausgewertet und dargestellt werden können (Bild 6).

Die Vielpunktmessung der Verzahnungswerkstücke bietet darüber hinaus die Möglichkeit, die Oberfläche als Ganzes gegen eine Soll- oder Ist-Vorgabe zu vergleichen. Diese kann als CAD-Modell oder als bereits gemessenes Meisterwerkstück vorliegen.

Als besonders hilfreich hat sich in der Erstmusterung die vollflächige farbcodierte Darstellung der Abweichungen erwiesen. Hierbei können die Abweichungen über das gesamte Modell hinweg gezeigt werden, um Unebenheiten, Grate oder durch den Schrumpfungsprozess des Werkstoffs hervorgerufene Einfälle aufzuzeigen und gezielt zu korrigieren.

Als weitere Möglichkeit, gerade bei der fertigungsbegleitenden Messung mit hohen Stückzahlen im sogenannten Inline- oder Atline-Betrieb, lässt sich die Auswertung auf diejenigen Bereiche ausdünnen, die außerhalb der gegebenen Toleranz liegen. In der Darstellung werden Modell oder Meisterteil und Messpunktewolke überlagert angezeigt. Bereiche, in denen die Messpunkte im Rahmen der Toleranz mit der Vorgabe übereinstimmen, werden transparent dargestellt, wohingegen die fehlerhaften Bereiche, mit Abweichungen über das Toleranzband hinaus, farbcodiert hervorgehoben werden. Durch diese Darstellung lässt sich die Information auf das Notwendige minimieren und beispielsweise Gratbildung oder Werkzeugverschleiß frühzeitig erkennen.

#### **4. Dienstleistungsmessung für Mikro- und Makroverzahnung aus einer Hand**

Die Messtronik GmbH führt als Dienstleister der ersten Stunde normkonforme Messungen von Werkstücken mit Verzahnungsgeometrien durch. Neben der fast 40-jährigen Erfahrung in der konventionellen taktilen Messung bietet Messtronik seit 15 Jahren Längenmesstechnik mit Computertomografie an und seit diesem Jahr auch Koordinatenmessgeräte mit chromatischen Abstandssensoren für die vollflächige Auswertung. Mit diesen verschiedenen Technologien können auch über die gängigen Verzahnungsnormen hinausgehende Dienstleistungen angeboten werden, sowohl für Mikro- als auch für Makroverzahnungen im Kunststoff- und Metallbereich.

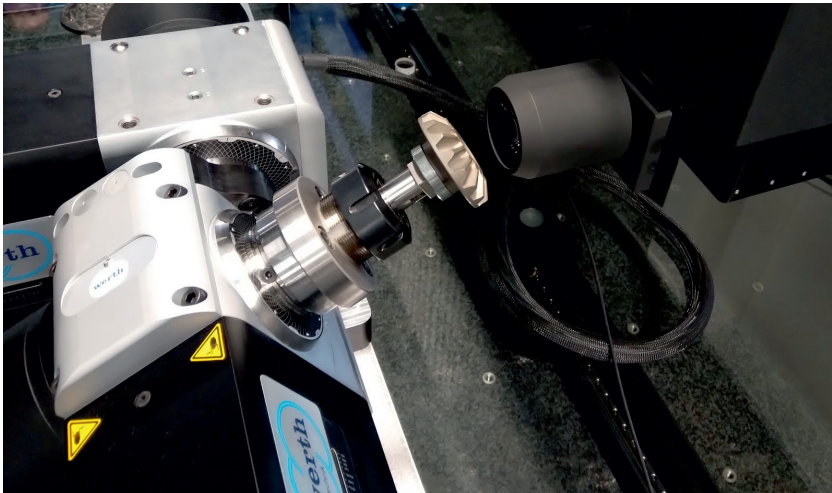


Bild 1: Kegelrad auf einer Dreh-Schwenk-Achse, gemessen mit CFL Sensor



Bild 2: Werth ScopeCheck® FB mit drei unabhängigen Sensorachsen für Multisensor-Messungen mit Bildverarbeitung und Werth Zoom (links), konventionellem Taster am Dreh-Schwenk-Gelenk (Mitte) und Chromatic Focus Line Sensor (rechts)



Bild 3: CT-Kompaktgerät TomoScope® XS Plus mit großem Messbereich bei kleinem Flächenbedarf

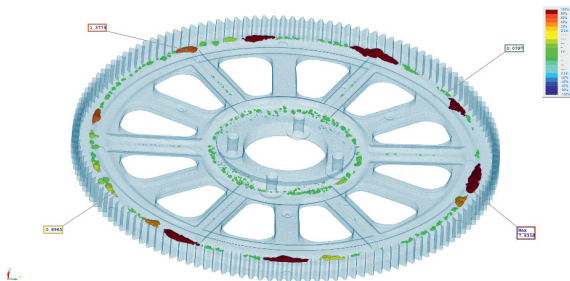


Bild 4: Automatische Lunkeranalyse eines Kunststoffzahnades aufgenommen mit Computertomografie



# Einsatz optischer Messtechnik für die Qualitätsprüfung von linearen Zahnstangen

## Durchsatz, Genauigkeit und Flexibilität durch variable Inspektion

Dr.-Ing. **Felix Balzer**, Dipl.-Ing. **Thomas Weigert**,  
Hexagon Metrology GmbH, Wetzlar

### Kurzfassung

Die taktile Messung von linearen Zahnstangen auf Koordinatenmessgeräten (KMGs) ist seit mehreren Jahren etabliert. In einigen Mess- und Auswertesoftwarepaketen für KMGs existieren hierfür umfassende Softwareoptionen, welche die parametrisierte Messung von linearen Zahnstangen einfach ermöglichen. Allerdings dauert die taktile Erfassung der Teilungsabweichungen mit Einzelpunktantastungen an jeder Zahnflanke für gebräuchliche Zahnstangen mehrere Minuten. Je nach Prüfumfang können weitere Merkmale taktil gemessen werden, wodurch sich die benötigte Messzeit erhöht.

In diesem Beitrag wird ein neuer Ansatz zur schnellen berührungslosen, optischen Erfassung der Teilungsabweichungen linearer Zahnstangen beschrieben. Hierfür wird ein von der Firma Hexagon MI entwickelter laserinterferometrischer Punktsensor (HP-O) eingesetzt. Dadurch reduziert sich die benötigte Zeit für die Erfassung der Teilungsabweichungen um mehr als 80%, abhängig vom Modul und dem Bearbeitungszustand der Zahnstangen. Die Zahnstangen werden mit Hilfe einer hybriden, optischen und taktilen Messung einer umfänglichen Qualitätsprüfung unterzogen. Zur weiteren Messzeitoptimierung wird die Methode der variablen Inspektionsrate angewandt, um jede Zahnstange ganzheitlich hinsichtlich ihrer Teilungsabweichungen zu charakterisieren. Jedoch werden nur bei auffälligen Zahnstangen zusätzliche Charakterisierungen der Profil- und Flankenlinienabweichungen vorgenommen.

Im letzten Abschnitt dieses Beitrags werden die Mehrwerte erläutert, die sich für die Endkunden ergeben. Hierzu zählen unter anderem Messprotokolle der Einzel- und Summenteilungsabweichungen aller Zähne einer Zahnstange sowie die per Lasergravur auf jede Zahnstange aufgebraachte Gesamteilungsabweichung.

### 1. Einleitung

In Werkzeug- und Bearbeitungsmaschinen werden häufig Zahnstange-Ritzel-Antriebe als Vorschubantriebssysteme eingesetzt. Diese werden gegenüber etablierten Gewindespindel-

Mutter-Antrieben und linearen Direktantrieben insbesondere dann bevorzugt, wenn große Verfahrswege, hohe Vorschubkräfte und eine konstante Steifigkeit über den gesamten Verfahrsweg gefordert sind. Aufgrund der stetig wachsenden Qualitäts- und Produktivitätsansprüche werden immer höhere Anforderungen an die Genauigkeit und Dynamik der in Werkzeugmaschinen eingesetzten Antriebe gestellt. Gleichzeitig spielt auch das Thema Effizienz eine entscheidende Rolle, was den erforderlichen Energiebedarf aber auch die mechanische Belastung betrifft, die mit dem Verschleiß und somit auch mit der Lebensdauer der Werkzeugmaschine zusammenhängt. Einen wichtigen Beitrag zur Genauigkeit und zum Verschleiß eines Zahnstange-Ritzel-Antriebs leistet das Umkehrspiel. Zu dessen Minimierung müssen die Zahnstangen geringe Teilungsabweichungen über die gesamte Verfahrsstrecke aufweisen, was eine ganzheitliche Charakterisierung unabdingbar macht. Darüber hinaus sind zahlreiche Verfahren bekannt, um das verbleibende Umkehrspiel mechanisch oder elektrisch zu minimieren, beispielsweise durch eine adaptive Verspannung von Zahnstange-Ritzel-Antrieben [1], [2], [3].

Seit vielen Jahren ist die taktile Messung von Zahnstangen etabliert. Hierfür werden von zahlreichen Anbietern geeignete Spezialmessgeräte angeboten. Die Messung auf KMGs ist nicht so weit verbreitet, aber ebenfalls seit mehreren Jahren etabliert. Mehrere KMG-Messsoftwarepakete bieten hierfür Softwareoptionen an, über die eine einfache parameterbasierte Eingabe der Zahnstangenparameter und eine anschließende Messung inklusive einer automatischen Generierung der Verfahrswege möglich ist. Auf KMGs hat sich die liegende Messung mit einem oder zwei horizontalen Tastern durchgesetzt. In den letzten Jahren ist darüber hinaus ein zunehmender Trend zur Multisensorik an Verzahnungsmessgeräten und KMGs zu verzeichnen. Viele Messgerätehersteller bieten die Integration zusätzlicher Sensoren für unterschiedliche Messgrößen an. Optische Punktsensoren (1-D), Liniensensoren (2-D) und Flächensensoren (2,5-D) sowie taktile Rauheitssensoren sind an einigen Messgeräten serienmäßig integriert und können optional beim Kauf miterworben werden. Darüber hinaus verfügen manche Messgeräte auch über manuelle oder automatische Messkopfwechselsysteme ([4], [5]), so dass in einem Messprogramm verschiedene Tastköpfe und Sensoren mit unterschiedlichen physikalischen Funktionsprinzipien ohne vorherige Rekalibrierung eingesetzt werden können.

Von der Firma Hexagon MI wurde ein laserinterferometrischer Punktsensor, genannt HP-O, entwickelt und 2016 auf den Markt gebracht [6], der sich gut für die optische, berührungslose Messung rotationssymmetrischer metallischer Werkstücke eignet [7]. Dieser Beitrag beschreibt den Einsatz des HP-O für die optische, berührungslose Messung von Zahnstangen. Es wird ein neuartiger, hybrider Ansatz mit Kombination von schneller optischer und



hochgenauer taktiler Messung zur umfänglichen Qualitätsprüfung vorgestellt. Durch die Umsetzung einer optionalen variablen, taktilen Inspektion – basierend auf den optisch erfassten Teilungsabweichungen – wird die mittlere Messzeit optimiert.

## 2. Herkömmliche taktile Messung

Der derzeitige Stand der Normung für die Qualitätsprüfung von Verzahnungen und Zahnstangen orientiert sich an taktilen Messverfahren. Die zu erfassenden Merkmale an Zahnstangen sind unter anderem Profil-, Flankenlinien- und Teilungsabweichungen [8]. In der Regel werden die Profil- und Flankenlinienabweichungen an 3 bis 4 gleichmäßig über die Länge verteilten Zähnen mit jeweils einem Profil und einer Flankenlinie gemessen (siehe Bild 1). Die Teilungsabweichungen werden an jedem Zahn gemessen. Die Berechnungen der Zahndicke und des Rollenmaßes können sich aus den Teilungspunkten ergeben. Bei manchen Zahnstangen sind zusätzliche Prüfmerkmale relevant, wie zum Beispiel die Gesamtlänge, die Höhe oder die Breite. Außerdem besitzen Zahnstangen in der Regel Durchgangsbohrungen oder Gewindebohrungen für die Befestigung auf, deren Positionen und Durchmesser ebenfalls eng toleriert sind.

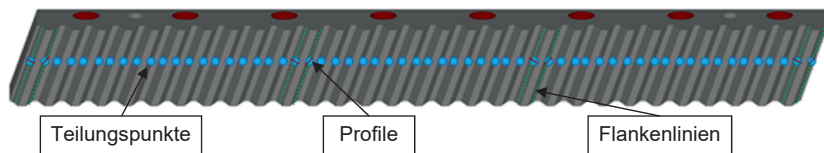


Bild 1: Zu erfassende Merkmale an Zahnstangen

Eine etablierte Möglichkeit zur Qualitätsprüfung ist das taktile Messen von Zahnstangen auf einem KMG. In den meisten Fällen werden die Zahnstangen horizontal aufgespannt, so dass die Verzahnungsachse näherungsweise parallel zur x- oder y-Achse des KMGs ist. Je nach Wahl der Aufspannung müssen die Durchbiegung aufgrund des Eigengewichts und eine mögliche Torsion der Zahnstange berücksichtigt werden. Dies kann beispielsweise in der Messsoftware QUINDOS durch das Erfassen mehrerer Scanlinien auf der Stirnfläche und der Seitenfläche erfolgen [9]. Anschließend werden aus diesen Scanlinien Korrekturfaktoren für die einzelnen Messpunkte an den Zahnflanken berechnet. Bei der taktilen Messung erfolgt zumeist der Einsatz von kugelförmigen Tastern. Die Tastkugeldurchmesser hängen vom Modul der Zahnstange ab und starten ab etwa 0,3 mm.

Profile und Flankenlinien werden im Allgemeinen einzeln scannend erfasst. Die Scangeschwindigkeit hängt dabei von zahlreichen Einflussfaktoren ab, z.B. dem Scanmodus, dem Tastkugeldurchmesser, der Dicke des Tasterschafts und der Oberflächenbeschaffenheit der Zahnstange. Nach dem Erfassen der Profile und Flankenlinien dienen Einzelpunktantastungen an jeder Zahnflanke in den Lücken der Zahnstange mit demselben Taster zur Bestimmung der Teilungsabweichungen. Alternativ kann auch ein Taster mit größerem Tastkugeldurchmesser eingewechselt und dann die Teilungsabweichungen mittels selbstzentrierenden Einzelpunktantastungen ermittelt werden. Dann muss nicht jede Zahnflanke angetastet werden, sondern es wird nur in jeder Lücke eine selbstzentrierende Antastung vorgenommen. Somit reduziert sich also die Zahl der Einzelpunkte um die Hälfte. Die Messzeit für die taktile Messung wird durch die maximalen Scangeschwindigkeiten und die Zeiten für die Einzelpunktantastungen limitiert. Bei der scannenden Erfassung der Profile und Flankenlinien beträgt die Geschwindigkeit in der Regel maximal  $v = 20 \text{ mm/s}$ . Die Einzelpunktantastungen erfolgen mit reduzierter Antastgeschwindigkeit von ca.  $v = 1 \text{ mm/s}$  bis  $v = 4 \text{ mm/s}$ , je nach Tastkopf und Ausstattung des KMGs.

### 3. Optische Sensoren zur Messung von Zahnstangen

Ein neuer Ansatz ist die optische, berührungslose Messung von Zahnstangen auf einem KMG. Hierfür wird ein optischer Sensor benötigt, der einen Arbeitsabstand von mehreren Millimetern besitzt und gleichzeitig kleine äußere Abmessungen aufweist. Dann ist eine gute Zugänglichkeit zu den Zahnflanken in den Lücken der Zahnstange gegeben. Eine weitere Anforderung ist eine hohe Auflösung in Strahlrichtung im Submikrometerbereich. Die laterale Auflösung, also der Durchmesser des Lichtflecks, muss kleiner als  $50 \mu\text{m}$  sein. Damit ist einerseits ein gutes Messsignal auf den Zahnflanken gewährleistet und andererseits kein zu großer Einfluss der Mikrogeometrie (Rauheit) gegeben. Darüber hinaus sollte der optische Sensor einen großen Akzeptanzwinkel besitzen, um den Sensor nicht in jeder Lücke der Zahnstange positionieren zu müssen und da bei kleinen Modulen nicht gewährleistet werden kann, dass die Strahlrichtung senkrecht zur Oberfläche ist.

Der von Hexagon MI entwickelte, 1-D laserinterferometrische Punktsensor namens HP-O erfüllt diese Anforderungen [6]. Das Gesamtsystem besteht aus einer Elektronikeinheit inklusive Laserlichtquelle, dem Optical Probe Controller (OPC), und einem optischen Sensor, der wie ein normaler taktile Taster vollautomatisch als Taster am Dreh-Schwenk-Gelenk in einem KMG eingewechselt und verwendet werden kann. Das Funktionsprinzip ist in Bild 2 dargestellt.

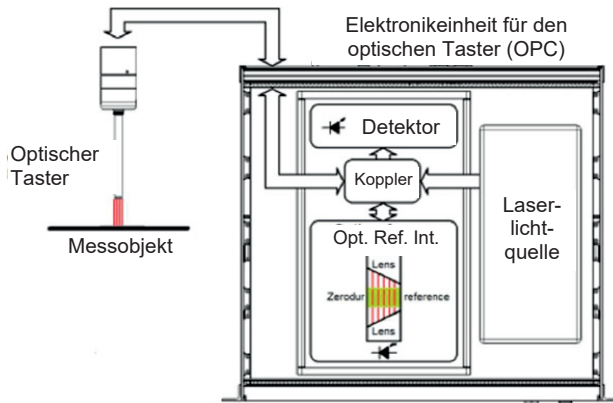


Bild 2: Funktionsprinzip des laserinterferometrischen Punktsensors HP-O (siehe [10])

Die Verbindung zum OPC erfolgt über einen beweglichen Lichtwellenleiter, der vom Dreh-Schwenk-Gelenk über die bewegliche Pinole zum Grundbett und von dort zum OPC verlegt wird. Der OPC steht in der Regel in der Nähe des Elektronikschrankes vom KMG. Das führt zu einer Minimierung thermischer Einflüsse auf den Messaufbau auf dem KMG. Der OPC wird dann an die KMG-Elektronikeinheit angeschlossen.

Das Funktionsprinzip des laserinterferometrischen Punktsensors HP-O basiert auf der Erzeugung eines frequenzmodulierten Laserstrahls mit der Wellenlänge  $\lambda \approx 1550 \text{ nm}$  und der Laserklasse 2. Das von der Laserlichtquelle im OPC ausgesandte Licht wird in den optischen Sensorkopf mittels Lichtwellenleiter eingekoppelt. Im Sensorkopf befindet sich ein kleines optisches System, das in Bild 3 gezeigt wird.

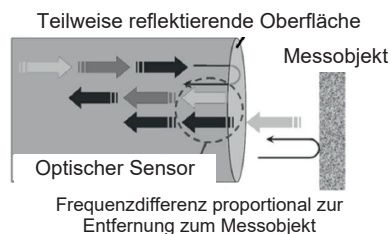


Bild 3: Prinzip der Interferenzzeugung (siehe [10])

Das Laserlicht tritt durch eine teilweise reflektierende Linse aus. An dieser Linse erfolgt die Aufspaltung in Mess- und Referenzstrahl. Ein Teil des Lichts wird an dieser Fläche reflektiert, der sogenannte Referenzstrahl. Der durch die Linse hindurchgehende Anteil wird in Richtung des Messobjekts fokussiert. Wenn sich das Messobjekt im Fokus befindet, wird ein Teil des Lichts vom Messobjekt reflektiert. Wenn das Messobjekt nicht zu stark verkippt ist, also der Akzeptanzwinkel des optischen Systems nicht überschritten ist, gelangt eine zweite Lichtwelle, der sogenannte Messstrahl, als Reflex von der Messobjektoberfläche über dasselbe optische System in den Sensorkopf zurück. Im Sensorkopf überlagern sich Mess- und Referenzstrahl. Aufgrund der unterschiedlichen Phasenlaufzeiten beider Wellen und der kontinuierlichen Frequenzmodulation der Lichtwellenlänge wird ein Interferogramm erzeugt, das zur Abstandsauswertung im OPC dient.

In Strahlrichtung weist der Sensor ein Auflösungsvermögen von 0,9 nm auf. Dies ist in den meisten Fällen genauer als das Auflösungsvermögen der Maßstäbe der KMGs. Die optischen Taster sind in vielen verschiedenen Ausführungsformen mit verschiedenen Arbeitsabständen und Strahlaustrittswinkeln erhältlich, um die Einsatzbedingungen für verschiedenste Applikationen zu erfüllen. Aufgrund der numerischen Apertur der Fokussierlinse variieren je nach Arbeitsabstand des Sensors der Durchmesser des Lichtflecks in der Fokusebene und der Akzeptanzwinkel. Auf rauen metallischen Oberflächen beträgt der Akzeptanzwinkel in der Regel  $\pm 30^\circ$ .

#### **4. Hybride, kombinierte taktile und optische Messung**

Die Eigenschaften des optischen Systems müssen bei Messungen von Zahnstangen auf einem KMG berücksichtigt werden. Mindestens eine Drehachse ist erforderlich, um den Sensor relativ zur Zahnstange mit einem Dreh-Schwenk-Gelenk auszurichten. Die kleinsten einstellbaren Winkelschritte sind durch die Indexierung der Mechanik vorgegeben. Das Dreh-Schwenk-Gelenk besitzt fest einstellbare Winkelstellungen mit Abstufungen von  $2,5^\circ$ . Auf diese Weise kann der optische Sensor vor Beginn der Messung zum Werkstück ausgerichtet werden. Bild 4 zeigt einen beispielhaften Messaufbau auf einem KMG.

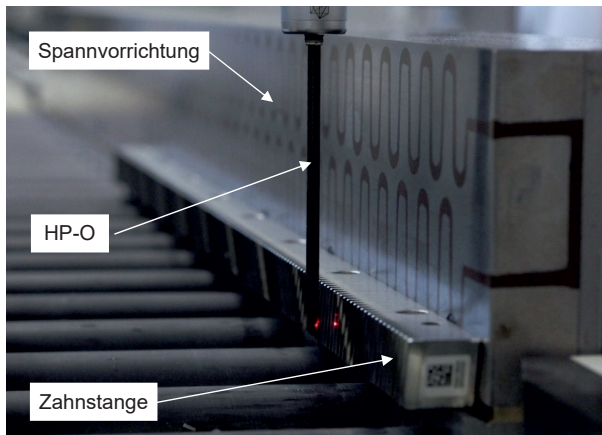


Bild 4: Optische Messung einer Zahnstange mittels HP-O

Ein wesentlicher Unterschied bei optischen Verzahnungsmessungen ist, dass optische Sensoren keine direkte Information über die 3-D-Richtung der Oberflächennormale im Antastpunkt ermöglichen. Der HP-O liefert als Messsignal lediglich eine Abstandsinformation im Rahmen seines Messbereichs. Demzufolge liegt in der Mess- und Auswertesoftware ein direkter Oberflächenpunkt vor. Es ist keine Radiuskorrektur erforderlich.

Als Sensor kommt für die Zahnstangenmessung ein sogenannter mid range Sensor mit  $90^\circ$  Strahlaustrittswinkel zum Einsatz, dessen Arbeitsabstand 9,3 mm beträgt und dessen Messbereich ca.  $\pm 1$  mm aufweist. Die Messstrategie ist in Bild 5 skizziert.

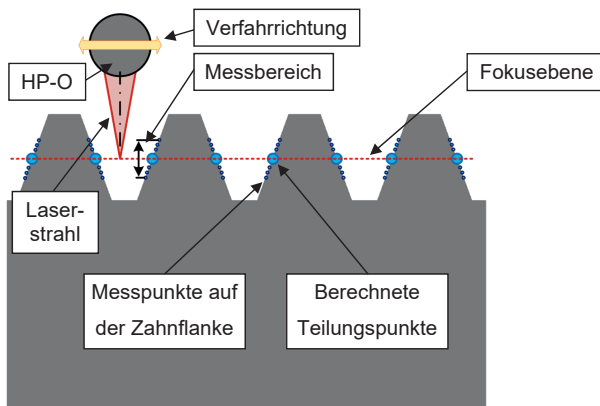


Bild 5: Messstrategie zur optischen Erfassung der Teilungsabweichungen an Zahnstangen

Die Messstrategie basiert darauf, dass der HP-O parallel zur Zahnstange verfahren wird und dabei die Fokusebene des optischen Sensors in der Teilkreisebene der Verzahnung liegt. Aufgrund des Messbereichs von ca.  $\pm 1$  mm entlang der Strahlrichtung werden von jeder Zahnflanke mehrere Messpunkte in der Nähe der Teilkreisebene erfasst. Die Punktzahl variiert je nach Modul, Schrägungswinkel, Oberflächenbeschaffenheit und Scangeschwindigkeit. Sie liegt üblicherweise zwischen 10 und 20 Punkten. In diese Punktwolke wird eine Ausgleichsgerade eingepasst. Störreflexe oder lokale Schmutzpartikel können zu einzelnen Ausreißern von dieser Geraden führen. Diese werden über eine Filterung entfernt. Anschließend erfolgt eine Berechnung des Schnittpunkts zwischen dieser Ausgleichsgeraden und der Teilkreisebene. Dieser Schnittpunkt wird dann als Teilungspunkt für die weitere Auswertung der Teilungsabweichungen verwendet.

Auf diese Weise können die Teilungsabweichungen von Zahnstangen bis zu einem Modul von ca. 8 in der Nähe der Teilkreisebene erfasst werden. Bei größeren Modulen reicht der Arbeitsabstand des HP-Os nicht aus, um eine Kollision des Sensors mit der Zahnstange zu vermeiden. Dementsprechend muss dann außerhalb der Teilkreisebene gemessen werden. Der Schnittpunkt der verlängerten Ausgleichsgeraden mit der Teilkreisebene ergibt dann den Teilungspunkt.

Mit diesem Verfahren können mit dem optischen Sensor HP-O die Teilungsabweichungen schnell und zeitsparend im Vergleich zur taktilen Erfassung mittels Einzelpunktantastungen an allen Zahnflanken ermittelt werden. Tabelle 1 zeigt einen Vergleich der mittleren Messzeiten zwischen taktiler und optischer Teilungsmessung an einigen ausgewählten, repräsentativen Zahnstangen.

Tabelle 1: Vergleich der mittleren Messzeiten für die Teilungsmessung an unterschiedlichen Zahnstangen

Zähnezahl z	Modul m	Messzeit taktil * in s	Scangeschwindigkeit optisch in mm/s	Messzeit optisch in s	Messzeit- einsparung in %
106	3	912	50	64	93,0
79	4	679	65	59	91,3
63	5	542	85	56	89,7
79	6	617	100	60	90,3
39	8	335	100	54	83,9

\* Parameter der Einzelpunktantastung: Vorhaltebereich 0,5 mm, Antastgeschwindigkeit 2 mm/s

Neben den Teilungsabweichungen sind weiterhin Profil- und Flankenlinienabweichungen wesentliche Qualitätsmerkmale der Zahnstangen. Diese müssen ebenfalls an mehreren gleichmäßig über die Länge verteilten Zähnen erfasst werden. Dies geschieht, in dem der optische Sensor oder der taktile Taster in jede zu messende Lücke positioniert wird und die Scanlinien nacheinander einzeln erfasst werden. Die Höhe der Zahnstange variiert je nach Modul der Verzahnung. Jedoch liegt sie im Mittel deutlich unter 100 mm. Da der optische Sensor genau wie ein taktile Taster jede Scanlinie einzeln erfassen muss und aufgrund der geringen Verfahrstrecke sich keine signifikanten Unterschiede bei der Scangeschwindigkeit zwischen den beiden Messverfahren ergeben, bietet die optische Erfassung der Profile und Flankenlinien keine nennenswerten Vorteile.

Die optische Erfassung stößt in Abhängigkeit vom Modul der Zahnstange an ihre Grenzen. Störreflexe der Gegenflanke, insbesondere im Fußbereich der Lücke, führen dazu, dass größere Abweichungen im Vergleich zur taktilen Messung auftreten können. Ebenso verschlechtert sich die Reproduzierbarkeit der berechneten Profil- und Flankenlinienabweichungen aufgrund der zufälligen Störeinflüsse.

Um diese Nachteile zu vermeiden, besteht ein Ansatz darin, die schnelle optische Erfassung der Teilungsabweichungen mit der bewährten, taktilen Erfassung der Profile und Flankenlinien an 4 gleichmäßig auf der Länge verteilten Zähnen in einem Messablauf zu kombinieren. Hierfür ist ein Sensorwechsel während einer Zahnstangenmessung erforderlich. Als Wechselschnittstelle am Dreh-Schwenk-System fungiert das TESASTAR Kinematic Joint (TKJ) [12]. Diese Schnittstelle weist 13 elektrische Kontakte und eine optische Schnittstelle auf, so dass eine Vielzahl von Sensortypen vollautomatisch eingewechselt werden können. Aufgrund einer reproduzierenden Kugel-V-Nut-Lagerung kann der TKJ-Sensorwechsel ohne Rekalibrierung erfolgen, so dass die Sensorwechselzeiten minimal sind und je nach Verfahrstrecke bis zur Tasterwechselbank im Mittel in der Größenordnung von maximal 30 s liegen.

## 5. Steigerung des Durchsatzes durch variable Inspektion

Der Nachteil dieser hybriden Messung ist, dass durch den Tasterwechsel und die darauffolgende taktilen Messung an 4 Zähnen der Zahnstange mehrere Minuten Messzeit pro Zahnstange die Messdauer negativ beeinflussen. Dies ist insbesondere deshalb von Nachteil, da die Zahnstangen aufgrund ihres Fertigungsprozesses in der Regel eine hohe Qualität haben und die Standzeiten der eingesetzten Werkzeuge vergleichsweise lang sind.

Zur weiteren Optimierung der Taktzeit besteht ein neuartiger Ansatz darin, die hybride Messung mit der Methode der variablen Inspektion zu kombinieren. Dieser Ansatz basiert auf der Erkenntnis, dass die Teilungsabweichungen gewisse regelmäßige Muster aufweisen, wenn der Fertigungsprozess erfolgreich durchlaufen ist und die hybride Qualitätsprüfung dann ein positives Gesamtergebnis ausgibt, also eine Zahnstange in Toleranz vorliegt. Hierfür wurden zahlreiche Vorversuche durchgeführt, auch um diese regelmäßigen Muster der Teilungsabweichungen zu ermitteln. Diese variable Inspektion sieht vor, dass bei jeder Zahnstange eine schnelle ganzheitliche, optische Erfassung der Teilungsabweichungen mittels HP-O erfolgt. Bei der Auswertung der Teilungsabweichungen werden verschiedene typische Muster analysiert und mit hinterlegten Vergleichsmustern – beaufschlagt um übliche Fertigungstoleranzen – verglichen. Nur wenn diese Fertigungstoleranzen der Vergleichsmuster überschritten oder wenn andere auffällige Muster detektiert werden, erfolgt ein Tasterwechsel auf den taktilen Taster und dann an 4 gleichmäßig verteilten Zähnen die Charakterisierung der Profil- und Flankenlinienabweichung.

In einem weiteren Optimierungsschritt wurde die taktile Erfassung der Profile und Flankenlinien noch dahingehend modifiziert, dass je nach Fehlerbild nicht nur 4 gleichmäßig verteilte Zähne, sondern auch mehrere aufeinanderfolgende Zähne im Bereich von Interesse automatisch gemessen werden können.

Durch diese variable taktile Messung erfolgt eine effiziente und taktzeitoptimierte Qualitätsprüfung, da nur auffällige Zahnstangen mittels variabler Inspektionsrate möglichst detailliert gemessen werden. Unauffällige Zahnstangen werden ausschließlich hinsichtlich ihrer Teilungsabweichungen charakterisiert.

Die hohe Prüfdichte der Zahnstangen, die Menge der ermittelten Messwerte und die Vielzahl der abgeleiteten Kenngrößen sind ein deutlicher Vorteil einer taktzeitoptimierten Qualitätsprüfung. Allerdings erschweren diese Punkte auch eine eindeutige Qualitätsentscheidung, die für jede einzelne Zahnstange getroffen werden muss, und das Erkennen von Einflüssen auf die Bearbeitungsmaschinen im vorgelagerten Fertigungsprozess. Daher wird dieser Ansatz der variablen, hybriden Inspektion von Zahnstangen mit Systemen zur rechnerunterstützten Qualitätssicherung (CAQ-Systeme) kombiniert, die einen besseren Überblick gewährleisten und Details hervorheben können. Ziel ist es, durch den Einsatz eines prozessorientierten Informationssystems und einer gezielten Visualisierung der Messergebnisse an verschiedenen Stellen im Prozess die Qualität ganzheitlich zu steigern [13]. Die berechneten Abweichungen einer Zahnstange – Teilungsabweichungen sowie in manchen Fällen die Profil- und Flankenlinienabweichungen – werden über eine Exportfunktion in die Software Q-Das geladen, in der ein Serverupload durchgeführt wird [14]. Für jede



Zahnstange werden beispielsweise Wertetabellen der Abweichungen aller Teilungspunkte an den Flanken transferiert. Auch berechnete Teilungspunkte für Valley-Valley oder Tooth-Tooth, Zahn- und Lückendicke und kumulierte Werte werden gesendet. Zudem ermöglicht das CAQ-System das Empfangen von Einzelwerten wie Maxima und Minima aus den Wertetabellen und berechneten Kenngrößen der Zahnstange wie die Gesamtlänge, die Breite oder die Kopfhöhe. Diese Werte werden vorrangig für die Qualitätsentscheidung verwendet, in dem sie dem Bediener des KMGs angezeigt werden. Durch die zusätzliche Visualisierung der Toleranzzonen ist es schnell möglich die Einzelwerte auf Toleranzhaltigkeit zu prüfen. Außerdem werden die Messwerte der letzten 15 Messungen des gleichen Bauteiltyps graphisch dargestellt (siehe Bild 6).

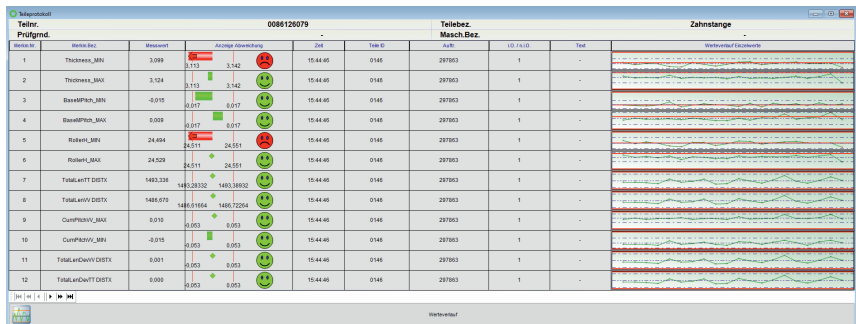


Bild 6: Anzeige der Teilungsabweichungen für den KMG-Bediener

Parallel zur reinen Qualitätskontrolle können auch Fertigungsmaschinen auf die Qualität ihrer Werkzeuge und die Einstellung der Parameter untersucht werden. Dafür können aus den CAQ-System beispielsweise die Wertetabellen an die Fertigungsarbeitsplätze zurück übertragen werden. Oft bestehen Kundenaufträge aus vielen Zahnstangen, die montagebedingt sogar Übermaße oder Untermaße aufweisen sollten. Somit wird über einen kompletten Auftrag versucht, die kumulierten Einzelteilungsfehler in einer Art Bogen verlaufen zu lassen. In Bild 7 sind die Teilungen linker und rechter Flanken im Vergleich zur Sollteilung (NomPitch) einer beispielhaften Zahnstange dargestellt.

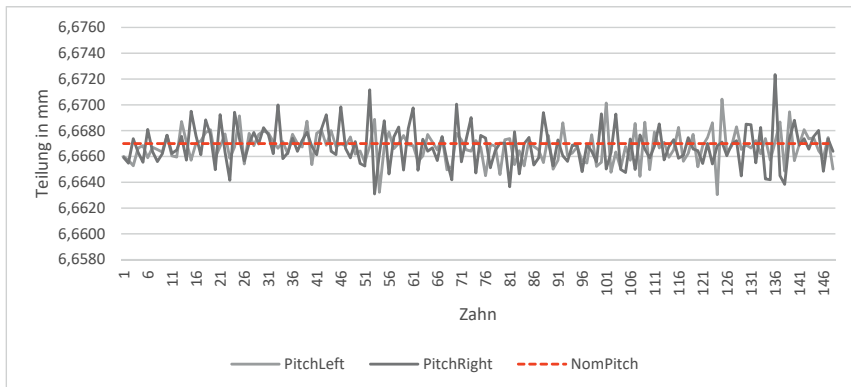


Bild 7: Graphische Darstellung der Teilung linker und rechter Flanken einer Zahnstange

Bild 8 zeigt die kumulierten Teilungsabweichungen, berechnet von Zahn-zu-Zahn (CumPitchTT) und Lücke-zu-Lücke (CumPitchVV).

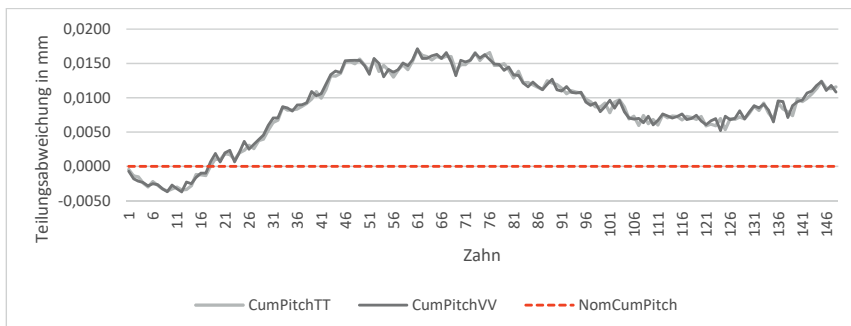


Bild 8: Kumulierte Teilungsabweichungen von Zahn-zu-Zahn (CumPitchTT) und Lücke-zu-Lücke (CumPitchVV)

Zusätzlich zur Qualitätskontrolle werden die individuellen, bauteilspezifischen Teilungsabweichungen der Zahnstange den Kunden zur Verfügung gestellt, z.B. durch Eingravieren der Gesamtlänge auf der Zahnstange oder durch Ausstellen eines Messprotokolls. Letzteres kann auch über den auf der Zahnstange eingravierten QR-Code online über den PC oder eine Handy-App eingesehen werden. Anwendungsfälle, wie die Montage mehrerer Zahnstangen in Reihe, können somit effektiv unterstützt werden. Oft wird

eine wechselnde Montage von Zahnstangen mit Untermaß und Übermaß (innerhalb der Toleranz) für eine gleichmäßiges Fahrverhalten von Bearbeitungsmaschinen etc. bevorzugt. Im Schadensfall muss durch diesen neuartigen Ansatz der hybriden Messung mit variabler Inspektionsrate dann nicht mehr die komplette Kombination der Zahnstangen entlang der Verfahrstrecke ausgetauscht werden, sondern es kann die individuelle Zahnstange mit ihrem individuellen Über- oder Untermaß ausgetauscht werden, da das Maß bekannt ist und dann eine Ersatzzahnstange mit ähnlichem Über- oder Untermaß nachbestellt werden kann.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die taktile Messung von linearen Zahnstangen auf Koordinatenmessgeräten (KMGs) ist seit mehreren Jahren etabliert. In einigen Mess- und Auswertesoftwarepaketen für KMGs existieren hierfür umfassende Softwareoptionen, welche die parametrisierte Messung von linearen Zahnstangen einfach ermöglichen. Allerdings dauert die ausschließlich taktile Erfassung der Teilungsabweichungen mit Einzelpunktantastungen an jeder Zahnflanke mehrere Minuten. Je nach Prüfumfang können weitere Merkmale taktil gemessen werden, wodurch sich die benötigte Zeit erhöht.

In diesem Beitrag wurde ein neuer hybrider Ansatz zur schnellen berührungslosen, optischen Erfassung der Teilungsabweichungen linearer Zahnstangen und im Bedarfsfall einer zusätzlichen taktilen Erfassung der Profile und Flankenlinien beschrieben. Letztere basiert auf variabler Inspektion unter Nutzung bekannter Muster typischer Teilungsabweichungen. Mit Hilfe von CAQ-Systemen werden die gewonnenen, umfangreichen Qualitätsinformationen zielgerichtet dargestellt und an verschiedenen Stellen im Gesamtprozess zur Qualitätssteigerung genutzt.

Folgt man dem Gedanken von Industrie 4.0, so ist durch diese zielgerichtete und effiziente Zahnstangenprüfung eine ganzheitliche Prozessoptimierung möglich. Durch das Feedback-Loop von Messdaten, die zurück an die Bearbeitungsmaschinen gespiegelt werden, ist eine zielgerichtete Optimierung der einzelnen Fertigungsschritte möglich. Toleranzen an den einzelnen Bearbeitungsstationen, die bisher mit vielen Sicherheitsfaktoren ausschließlich auf die Gesamtqualität der Zahnstange ausgerichtet waren, können nun weiter optimiert und ggf. an nachfolgenden Fertigungsstationen individuell zur Einstellung der Prozessparameter genutzt werden. Dies ist insbesondere im Hinblick auf Effizienzsteigerung und eine geringere Fehler- bzw. Ausschussquote von zentraler Bedeutung.

## 7. Literaturverzeichnis

- [1] Engelberth, T.: *Adaptive Verspannung von Zahnstange-Ritzel-Antrieben*. Dissertation, Universität Stuttgart, Juli 2019
- [2] Michos, G.: *Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Oktober 2005
- [3] Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme* 1. 9. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2018
- [4] ZEISS Industrielle Messtechnik: *ZEISS mass Technologie*, <https://www.zeiss.de/messtechnik/produkte/systeme/koordinatenmessgeraete/portalmessgeraete/mass.html>, Abruf im August 2021
- [5] Hexagon MI: *SENIMATION – Intelligente Sensor Automatisierung für Koordinatenmessgeräte*, <https://www.hexagonmi.com/de-de/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors/sensor-probe-and-styli-changers/senimation>, Abruf im August 2021
- [6] Hexagon MI: *Optische HP-O Sensoren*, <https://www.hexagonmi.com/de-de/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors/non-contact-sensors/hp-o-optical-sensors>, Abruf im August 2021
- [7] Balzer, F.; Steffens, N.; Stein, M.; Kniel, K.: *Traceable measurements of large gears with micrometer accuracy – An essential basis for reliable wind energy systems*. 59th Ilmenau Scientific Colloquium, 11.09 – 15.09.2017, Ilmenau
- [8] Norm DIN ISO 1328-1: *Zylinderräder – ISO-Toleranzsystem – Teil 1: Definitionen und zulässige Werte für Abweichungen an Zahnflanken*, März 2018
- [9] Hexagon MI: *QUINDOS*, <https://www.hexagonmi.com/products/software/quindos>, Abruf im August 2021
- [10] Schutzrecht EP 2 037 214 A1 (2009-03-18). Leica Geosystems AG. – Bezeichnung: *Verfahren und Messgerät zum Vermessen von Oberflächen*
- [11] Hausotte, T.; Percle, B.; Vorbringer-Dorozhovets, N.; Baitinger, H.; Balzer, F.; Gerhardt, U.; Manske, E.; Jäger, G.: *Interferometric Measuring Systems of Nanopositioning and Nanomeasuring Machines*. In: VDI-Berichte Nr. 2156, 2011, S. 343-349
- [12] Hexagon MI: *Probes and Sensors*. <https://www.hexagonmi.com/de-DE/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors>, Abruf im August 2021
- [13] Gerber, A.: *Konzeption eines unternehmensspezifischen Qualitätsinformationssystems*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Februar 2008
- [14] Hexagon MI: *Q-DAS PLV | Plant Viewer*, <https://www.q-das.com/de/produkte/q-das-plv-plantviewer-1>, Abruf im August 2021

# Vom Geräusch zur Ursache: Entstehung von Welligkeiten auf Verzahnungen

M.Sc. **T. Kahnenbley**, Prof. Dr.-Ing. **G. Gravel**,  
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW)

## Kurzfassung

Die Akustik eines Getriebes wird wesentlich von den Zahnrädern mitbestimmt. Häufig sind Welligkeiten mit kleinsten Amplituden auf der Zahnflanke die Ursache auffälliger Geräusche. Diese können heute messtechnisch sicher erfasst werden. Es fehlen allerdings geeignete Methoden, um aus der Welligkeitsmessung Rückschlüsse auf die Entstehung der Fertigungsabweichungen zu ziehen. Erschwerend wirkt sich die Vielzahl der Möglichkeiten der Welligkeitsentstehung aus. Neben prozessbedingten Abweichungen, können Abweichungen am Werkstück, aus dem Werkzeug oder aus der Werkzeugmaschine ursächlich sein. Auch die gewählten Prozessparameter können die Welligkeitsentstehung erheblich beeinflussen.

Dieser Beitrag soll aufzeigen, wie der Anwender anhand charakteristischer Welligkeitseigenschaften eine systematische Ursachensuche durchführen kann. Am Beispiel praktischer Messergebnisse werden diese Eigenschaften beschrieben und die Entstehung der Welligkeit diskutiert. Durch die Nutzung von Simulationswerkzeugen ist es möglich, die Wirkung vor einer praktischen Umsetzung von Änderungsmaßnahmen zu überprüfen. Ein besonderes Augenmerk wird auf die Identifizierung schwingungsbehafteter Bearbeitungsvorgänge und auf Lageabweichungen des Werkzeugs gelegt. Mit der Kenntnis weniger Prozessparameter kann der Anwender bereits wertvolle Zusammenhänge in der Ursachensuche herausarbeiten. Zusammenfassend stellt dieser Beitrag verschiedenste Ursachen und ihre Wirkung auf die Verzahnungsoberfläche dar.

## Abstract

This paper shows how the user can carry out a systematic search for causes of noisy gears using characteristic ripple properties. By using practical measurement results, the properties are shown and the origin of the ripple is discussed. The effect can be checked with simulation tools before the practical implementation of change measures. Special attention is paid to the identification of vibration-induced machining processes and positional deviations of the tool. With the knowledge of only a few process parameters, the user can already work out valuable

correlations in the search for causes. In summary, the article presents various causes and their effects on the gear surface.

## 1. Einleitung

Im PKW-Antriebsstrang erfüllen Zahnräder im konventionellen, Hybrid- und E-Antrieb die wichtige Funktion der Momentenübersetzung. Durch immer leiser werdende Antriebe ist die Geräuscentwicklung des Getriebes neben der Lebensdauer und dem Gewicht ein wichtiges Qualitätskriterium. Die Geräuschcharakteristik des Getriebes entsteht aus den einzelnen Getriebekomponenten, wie Lager, Wellen, Ölpumpen und Zahnrädern. Wenn ein Geräuschproblem in einem End-of-Line (EoL) Test einem Zahnrad zugeordnet werden kann, sind häufig Welligkeiten mit kleinsten Amplituden zwischen  $0,1\text{ }\mu\text{m}$  und  $1,0\text{ }\mu\text{m}$  aus dem Fertigungsprozess auf den Zahnflanken vorhanden. Diese können mit einem Verzahnungsmessgerät sehr genau gemessen werden und korrelieren regelmäßig gut mit der Geräuschordnung aus der Geräuschprüfung [1]. Es fehlen allerdings geeignete Methoden, um aus der Welligkeitsmessung Rückschlüsse auf die Entstehung der Fertigungsabweichungen zu ziehen, um einen effektiven Regelkreis zur Korrektur aufzubauen.

Dieser Regelkreis stellt sich heute, wie in Bild 1 dargestellt, noch anders dar. Durch Unkenntnis der Zusammenhänge in der Verzahnungsbearbeitung wird für die Ursachensuche und anschließende Beseitigung der Welligkeit oft auf eine Trial-and-Error-Methode zurückgegriffen, um die in Betracht kommenden Ursachen einzugrenzen. Erschwert wird die Bestimmung der Anregungsursachen durch die Vielzahl an Schwingungsmöglichkeiten und sonstige Maschinenstörungen [1], [2]. Die Ursachensuche stellt einen erheblichen Aufwand dar und kann mitunter durch die Vielzahl der Möglichkeiten sehr lange Zeit beanspruchen. Dabei werden Prozessparameter geändert, die vielleicht nur eine zufällige Besserung des Geräuschverhaltens herbeiführen oder in Wechselwirkung zueinander stehen. Auch werden Werkzeuge und Maschinenkomponenten deutlich vor Standzeitende getauscht oder sind gar nicht für das Geräuschproblem verantwortlich. Insgesamt ergibt sich oft eine unwirtschaftliche Fertigung, die Angst vor dem nächsten Geräuschausfall ist groß. Von einem wirksamen Regelkreis kann keine Rede sein.

Es ist daher das Ziel, charakteristische Eigenschaften der Welligkeiten aus dem Messergebnis abzuleiten und daraus auf die Ursache zu schließen. Im Folgenden soll die systematische Ursachensuche und die Entstehung von Welligkeiten bei einzelnen Abweichungsursachen erläutert werden. Alle dargestellten Fälle wurden mit Simulationen begleitet. Als Software wird hier ein Simulationstool genutzt, das es erlaubt die Wirkung von Abweichungen in der

abwälzenden Fertigung hochgenau zu simulieren [3]. Durch die sehr gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen aus der Praxis wird die Ursachensuche erheblich vereinfacht. Die Zusammenführung mit dem Modul Welligkeitsanalyse erlaubt eine einfache Welligkeitsbewertung der Simulationsergebnisse.

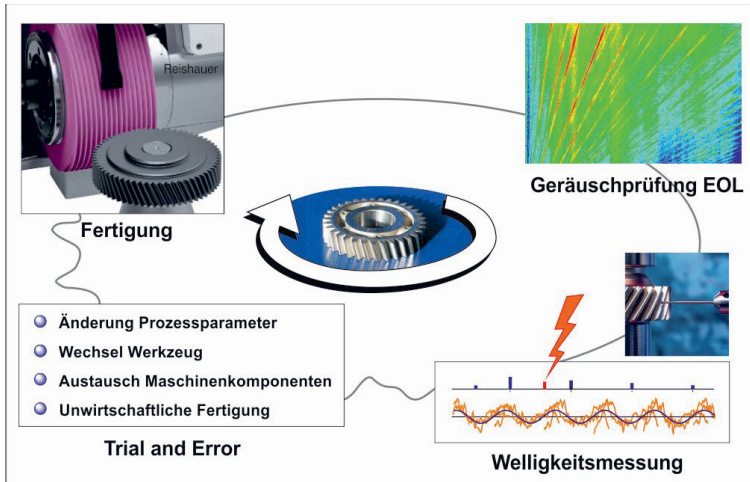


Bild 1: Aktueller, üblicher Qualitätsregelkreis Geräusch

## 2. Systematische Ursachensuche bei geräuschanregenden Welligkeiten

Die Grundlage für die systematische Ursachensuche bei geräuschanregenden Welligkeiten bildet die eindeutige Identifizierung der geräuschauffälligen Welligkeit des n.i.O.-Zahnrades. Diese korreliert regelmäßig mit der problematischen Geräuschordnung aus dem EoL Prüfstand. Für die Ursachensuche kann es sinnvoll sein, ein im zeitlichen Zusammenhang stehendes leises i.O.-Zahnrad mit dem lauten Zahnrad zu vergleichen. Die Messdateien sollten die Messung aller Zähne in Profil, Flankenlinie und Teilung beinhalten. Zusätzlich sollte die Topografie an einem Zahn mit 30 – 50 Schnitten im Profil gemessen werden. Wenn sich in der Analyse herausstellt, dass die gesuchte Welligkeitsordnung nur in der Flankenlinie vorhanden ist, ist es zweckmäßig, die Topografie auch mit Flankenlinienschnitten zu erfassen. Für die anschließende Analyse und eine mögliche Simulation sollten mindestens das Fertigungsverfahren, sowie bei wälzenden Verfahren die Gangzahl des Werkzeugs und der Axialvorschub  $f_a$  bekannt sein.

Das Vorgehen bei der systematischen Ursachensuche ist dem Bild 2 zu entnehmen. In der Analyse werden die Abweichungskurven und Welligkeiten des n.i.O.- und i.O.-Zahnades miteinander verglichen. Die Form der Abweichungskurven kann einen ersten Anhaltspunkt auf die Welligkeitsausprägung geben. Wenn die Geräuschordnung der Zahneingriffsordnung (ZE) oder einer Harmonischen von ZE entspricht, müssen sich wiederholende Abweichungen an jedem Zahn vorhanden sein. Stark streuende Abweichungskurven können ein Hinweis auf Geisterordnungen sein. In der Auswertung des Spektrums der Welligkeit des n.i.O.-Zahnades sollte die Geräuschordnung vorhanden sein. Weitere Unterschiede zwischen den Spektren des n.i.O.- und i.O.-Zahnades, wie z.B. Seitenbänder mit dem gleichen Abstand zur nächsten ZE, können zusätzliche Hinweise auf die Welligkeitsentstehung geben.

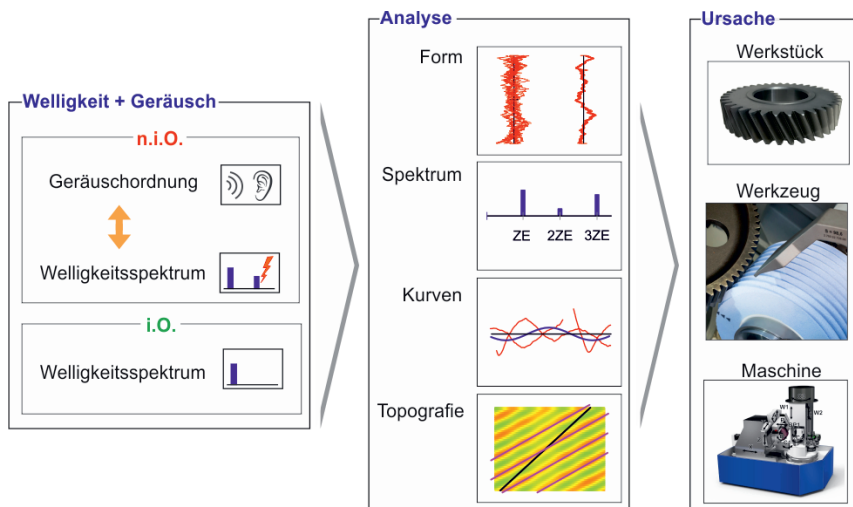


Bild 2: Vorgehen bei der systematischen Ursachensuche

Die Qualität der Abweichungskurven ist ein wichtiges Kriterium für die Aussagefähigkeit der Ergebnisse aus der Welligkeitsanalyse. Formabweichungen, die nicht einem idealen Ausgleichssinus entsprechen, verursachen zusätzliche Ordnungen im Spektrum. Je mehr die Formabweichungen von einer Sinuskurve abweichen, desto mehr Sinuskurven mit unterschiedlichen Phasenlagen werden für die Approximation benötigt. Diese lassen den Anwender möglicherweise auf Ursachen schließen, die nicht für die Geräuschordnung verantwortlich sind. Eine weitere Möglichkeit für eine schlechte Approximation der Abweichungskurven kann eine abweichende Phasenverschiebung der Kurven von Zahn zu



Zahn sein. Dadurch hat die Auswertung als gemeinsame Welligkeit aller Zähne eine geringere Amplitude als die eigentliche phasenrichtige Abweichungskurve bis hin zur Auslöschung.

Aus der Topografie, die sich aus vielen Schnitten an einem Zahn ergibt, kann der Schrägungswinkel der Welligkeit  $\beta_w$  bestimmt werden [4]. Mit Hilfe des Winkels  $\beta_w$  kann u.U. zwischen einem n.i.O.- und einem i.O.-Werkstück unterschieden werden, wenn die gleiche Geräuschordnung auf beiden Zahnrädern vorhanden ist. Besonders Welligkeiten mit einem Schrägungswinkel  $\beta_w$  ähnlich  $\beta_b$  können geräuschanregend sein, da sich dann beim Abwälzen mit dem Gegenrad die Kontaktlinie immer durch Berg und Tal bewegt [5]. Die Ergebnisse aus der Analyse können einzelnen Ursachen zugeordnet werden. Dies kann das Werkstück, das Werkzeug, die Werkzeugmaschine oder eine Kombination mehrerer Einflüsse sein. Die Zuordnung einiger möglicher Ursachen und Abhängigkeiten ist im Bild 3 dargestellt.



Bild 3: Ursachen und Abhängigkeiten

Die Ursache von Welligkeiten kann im Zusammenhang mit dem Werkstück stehen, wenn Welligkeiten aus dem Vorbearbeitungsprozess die Endbearbeitung anregen. Abweichungen aus dem Werkzeug, können z.B. Lageabweichungen einer Schleifschnecke sein. Diese bilden sich in Abhängigkeit der Shiftposition auf dem Zahnrad ab. Zusätzlich entsteht aus den Abweichungen meist ein Fehlermuster auf der Zahnflanke in axialer Richtung aus der Gangzahl des Werkzeugs und dem Axialvorschub. Abweichungen des Werkzeugs verursachen Muster aus dem Verhältnis der Zähnezahl von Werkstück und Werkzeug. Auch

die Werkzeugmaschine kann für die Entstehung von Welligkeiten verantwortlich sein. Schwingungen aus der Bearbeitung sind intern angeregt und bilden sich oft ganzzahlig pro Werkstückumdrehung (WU) auf das Zahnrad ab. Von außen angeregte Schwingungen können sich über das Drehzahlverhältnis unter Berücksichtigung der Differentialvorschübe auf das Zahnrad übertragen. Neben einer ganzzahligen Schwingungsanregung pro WU ist dann auch eine nicht-ganzzahlige Schwingungsanregung pro WU möglich. Aus der Überlagerung von zwei unabhängigen Schwingungsformen kann eine Wellkeitsstruktur entstehen, die geräuschkritisch ist. Einige der aufgezählten Beispiele sollen im Folgenden mit ihren charakteristischen Eigenschaften für eine systematische Ursachensuche vorgestellt werden.

### 3. Abweichung der Werkzeugmaschine als interne Schwingung

Die Messung eines PKW-Zahnrades mit 23 Zähnen in Profil, Flankenlinie und Teilung ergibt das Ordnungsspektrum der Welligkeit im Bild 4 links. Die Auswertung erfolgt nach hohen Ordnungen, bei der die Balligkeit und Abweichungen aus der Teilung eliminiert werden. Am EoL Prüfstand ist das Zahnrad in der Ordnung 51 ausgefallen. Die Geräuschordnung aus dem EoL korreliert mit der geometrischen Ausprägung der Welligkeit in der Ordnung 51 im Spektrum, die im Profil und der Flankenlinie auf beiden Zahnflanken deutlich sichtbar ist. Weitere Ordnungen sind als Zahneingriffsordnungen und deren Harmonischen sowie als vielfältige Geisterordnungen erkennbar.

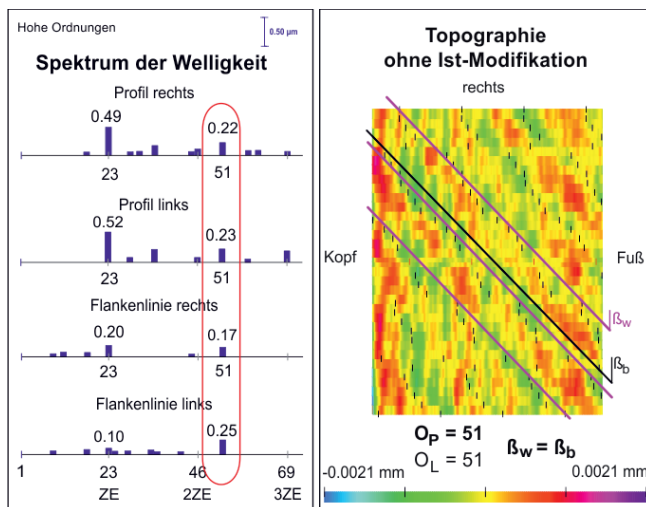


Bild 4: Ordnungsspektrum und Topografie einer internen Maschinenschwingung

Im Bild 4 rechts ist die Topografie an einer rechten Zahnflanke mit Profilschnitten dargestellt. Durch die vielen unterschiedlichen Welligkeiten ist die Topografie etwas unscharf. In der Topografie ist der Schrägungswinkel der Welligkeit  $\beta_w$  der Ordnung 51 in Magenta eingezeichnet. Aus dem Verlauf der Phasenlage der Welligkeit, die jeweils als kleiner schwarzer Strich an jedem Schnitt eingezeichnet ist, wird deutlich, dass der Winkel  $\beta_w$  dem schwarz eingezeichnetem Grundschrägungswinkel  $\beta_b$  folgt. Wenn eine Welligkeit im Profil und in der Flankenlinie die gleiche Ordnung aufweist, wie es in diesem Beispiel der Fall ist, entspricht der Winkel  $\beta_w$  dem Winkel  $\beta_b$  [4]. Dies ist eine charakteristische Eigenschaft einer internen Schwingung, die über den Werkstück-Drehtisch auf das Zahnrad übertragen wird. Dabei wird der konstanten Drehbewegung des Drehtisches eine sinusförmige Schwingung überlagert. Die Anzahl der Schwingungen (hier: 51 Schwingungen) pro Werkstückumdrehung entspricht dann der Ordnung. Über die Zahnbreite folgt die Schwingung dem Schrägungswinkel  $\beta_b$ , da die Schwingung dem sich über die Höhe verändernden Drehwinkel überlagert wird. Die Entstehung der Welligkeit ist **unabhängig** von der Anzahl der Werkzeuggänge und vom Axialvorschub  $f_a$ .

#### 4. Abweichung der Werkzeugmaschine als externe Schwingungsanregung

Um eine Systematik zu entwickeln, wie sich extern angeregte Schwingungen als Welligkeit über die Werkzeugmaschine auf ein Zahnrad übertragen, wurde in einem praktischen Versuch eine Verzahnungsschleifmaschine mit einem Modalshaker angeregt. Die Anregung erfolgte mit einer definierten Anregungsfrequenz am Gegenhalter des Werkstück-Drehtisches in y-Richtung. Für die Versuche wurden unterschiedliche, typische PKW-Stirnrädern genutzt. Von den vielen applizierten Anregungsfrequenzen soll exemplarisch ein Ergebnis mit der zugehörigen Welligkeitsauswertung vorgestellt werden.

Das genutzte Prüfrad hat 41 Zähne und ein Modul von 1,63 mm. Der Eingriffswinkel beträgt  $18^\circ$  und der Schrägungswinkel  $30^\circ$ . Das 18,50 mm breite Zahnrad wurde mit einer 1-gängigen Schleifschnecke bearbeitet. Die Anregungsfrequenz des Modalshakers von 144,80 Hz überträgt sich über das Zähnezahlenverhältnis und die Differentialvorschübe als Schwingungsordnung von 71,13 Schwingungen pro Werkstückumdrehung auf das Zahnrad.

Im Bild 5 links ist das Ordnungsspektrum für die linke Zahnflanke dargestellt, dass nach hohen Ordnungen ausgewertet wurde. Neben fertigungsbedingten Zahneingriffsordnungen und deren Harmonischen sind Geisterordnungen im Spektrum vorhanden. Dies sind im Profil eine Ordnung 30 und in der Flankenlinie eine Ordnung 153 mit Amplituden zwischen

0,12  $\mu\text{m}$  – 0,21  $\mu\text{m}$ . Die nicht dargestellte rechte Zahnflanke entspricht grundsätzlich der linken Zahnflanke. Im Bild 5 rechts ist die Topografie einer linken Zahnflanke abgebildet. Die Darstellung wurde mit 51 Flankenlinienschnitten aufgenommen. Es ist deutlich eine periodische Struktur erkennbar, die in Profil und Flankenlinie den beiden Geisterordnungen (Ordnung 30 und Ordnung 153) entspricht. Die Ausbreitungsrichtung der Welligkeit verläuft dadurch nicht unter dem Grundschrägungswinkel  $\beta_b$ , sondern unter dem Winkel  $\beta_w = -60,4^\circ$ .

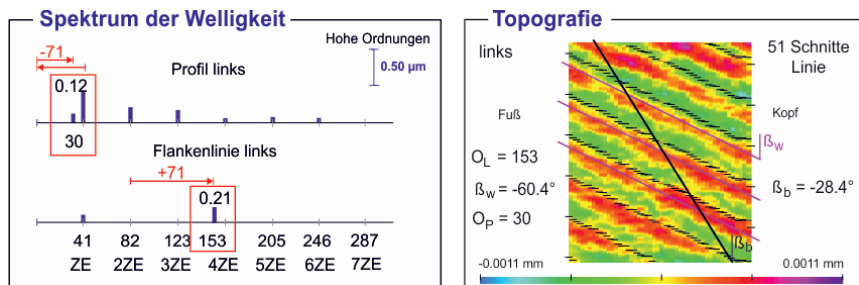


Bild 5: Ordnungsspektrum und Topografie einer Zahnflanke bei einem Beispiel einer von außen angeregten Maschinenschwingung

Den Zusammenhang zwischen Schwingungsordnung und Welligkeit ergibt sich wie folgt: Die Schwingungsordnung 71,13 weist einen ganzzahligen Anteil von 71 Schwingungen auf. Dieser ganzzahlige Anteil entspricht in der Flankenlinie dem Abstand der Ordnung 153 zur 2. ZE. Auch im Profil ist der Abstand 71 präsent, wenn er hier von der 1. ZE nach links abgetragen wird und sich am Ursprung spiegelt. Weitere Versuche bestätigen, dass es grundsätzlich möglich ist, die aus der nicht-ganzzahligen Anregung entstehenden Geisterordnungen mit (1) zu bestimmen. Welches Vielfache von ZE für die Bestimmung der Ordnung in der Flankenlinie zu wählen ist, hängt vom Axialvorschub  $f_a$  ab.

$$O_{P/L} = |X \cdot ZE \pm \text{int}(O_y)| \quad (1)$$

mit:

$O_{P/L}$  = Ordnung in Profil oder Flankenlinie

$X \cdot ZE$  = Vielfaches von der Zahneingriffsordnung

$\text{int}(O_y)$  = Ganzzahliger Anteil der Schwingungsordnung

## 5. Lageabweichung des Werkzeugs durch Taumel

Ein taumelnd aufgespanntes Werkzeug kann wie im Bild 6 dargestellt über eine sinusförmige, gegenphasige Rundlaufabweichung der äußeren Prüfbunde zur Aufspannung des Werkzeugs beschrieben werden. Die Rundlaufabweichung  $F_r$  ergibt sich aus der als doppelten Amplitude.

Die Shiftposition des Werkzeugs hat durch die gegenphasige Rundlaufabweichung einen Einfluss auf die Welligkeitsentstehung. In dem vorgestellten Beispiel ist die Shiftposition so gewählt, dass das Werkzeug mittig vor dem Werkstück steht. Damit entstehen auf beiden Zahnflanken die Abweichungskurven symmetrisch.

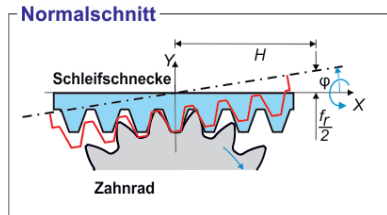


Bild 6: Normalschnitt durch ein taumelnd aufgespanntes Werkzeug

Der entscheidende Einflussfaktor in der Welligkeitsentstehung bei Lageabweichungen des Werkzeugs ist das Zähnezahlnverhältnis von Werkstück und Werkzeug. Bei teilbaren Zähnezahlnverhältnissen wird jeder Zahn vom gleichen Gang des Werkzeugs bearbeitet. In der Auswertung der Abweichungskurven entsteht dann im Profil eine Geisterordnung aus dem Zähnezahlnverhältnis. Bei nicht teilbaren Zähnezahlnverhältnissen wird jeder Zahn von mehreren Werkzeuggängen hergestellt. Wenn das Zähnezahlnverhältnis keinen gemeinsamen oder mehrere gemeinsame Teiler aufweist, entsteht ein axiales Fehlmuster aus der Gangzahl des Werkzeugs und dem Axialvorschub. Das Werkzeug ist erst nach mehreren Umdrehungen wieder am gleichen Punkt angelangt. Die Wellenlänge  $\lambda_L$  dieses axialen Fehlmusters berechnet sich nach (2). Die aus dem axialen Fehlmuster über dem Umfang entstehende Ordnung weist dann einen Abstand zur nächsten Zahneingriffsordnung auf, die dem Zähnezahlnverhältnis entspricht.

$$\lambda_L = z_0 \cdot f_a \quad (2)$$

mit:

- $\lambda_L$  = Wellenlänge axiales Fehlmuster
- $z_0$  = Gangzahl Werkzeug
- $f_a$  = Axialvorschub

Nicht teilbare Zähnezahlnverhältnisse, die aber einen gemeinsamen Teiler haben, weisen die Welligkeitsmerkmale des teilbaren und des nicht teilbaren Zähnezahlnverhältnisses auf.

Für die Simulation einer taumelnden Lageabweichung wird das in der Einleitung erwähnte Simulationswerkzeug genutzt. Bei diesem Beispiel soll anhand einer PKW-Verzahnung der Fall eines nicht teilbaren Zähnezahlnverhältnisses ohne einen gemeinsamen Teiler vorgestellt werden. Die wesentlichen Simulationsparameter sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Simulationsparameter

Taumel Schleifschnecke	$F_r$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,0
Zähnezahl	$z_2$ [ / ]	37
Gangzahl Werkzeug	$z_0$ [ / ]	4
Axialvorschub	$f_a$ [ mm/WU ]	0,20

In der Auswertung des Ordnungsspektrums der Welligkeit mit allen Ordnungen im Bild 6 oben links sind deutlich die Merkmale aus dem nicht teilbaren Zähnezahlnverhältnis erkennbar. Im Ordnungsspektrum der Flankenlinie ist das axiale Fehlermuster enthalten, dass sich aus der Gangzahl und dem Axialvorschub gebildet hat. Wenn das axiale Fehlermuster auf das gesamte Zahnrad bezogen wird, entspricht dies der Ordnung 564. Diese Ordnung hat einen Abstand zur 9. ZE in der Größe des Zähnezahlnverhältnisses (hier: Ordnung 9). Im Profil sind als Geisterordnungen die Ordnung 102 und die Ordnung 139 vorhanden. Beide Ordnungen weisen das Zähnezahlnverhältnis als Abstand zur nächsten ZE auf. Zusätzlich ist die 1. Zahneingriffsordnung im Spektrum enthalten.

Im Bild 6 oben rechts ist die Topografie mit 50 Profilschnitten an einer linken Zahnflanke abgebildet. Die Welligkeit des axialen Fehlermusters (Ordnung 564) verläuft unter einem Winkel  $\beta_w = -69,3^\circ$  und liegt damit fast senkrecht zum Grundschrägungswinkel  $\beta_b$ . Die Ordnung 564 in der Flankenlinie entspricht im Profil der Ordnung 102.

Im Bild 6 unten links sind die Abweichungskurven in einer gemeinsamen Darstellung des linken Profils unsortiert übereinandergelegt. Ein sich wiederholendes Muster kann in dieser Ansicht nicht festgestellt werden. Es wird nur deutlich, dass die Abweichungskurven veränderlich sind. Eine Sortierung der Abweichungskurven in 4 Gruppen, wie im Bild 6 unten rechts, zeigt auf, dass die unterschiedlichen Kurven in Gruppen nach der Gangzahl des Werkzeugs sortiert werden können [6]. Dabei hat jede Gruppe ein einheitliches Muster der Abweichungskurven. Dies ist eine weitere charakteristische Eigenschaft, wenn Abweichungen am Werkzeug

vorhanden sind. Der Anwender hat mit der Kenntnis der charakteristischen Eigenschaften der Welligkeit jetzt einfache und schnelle Überprüfungsmöglichkeiten.

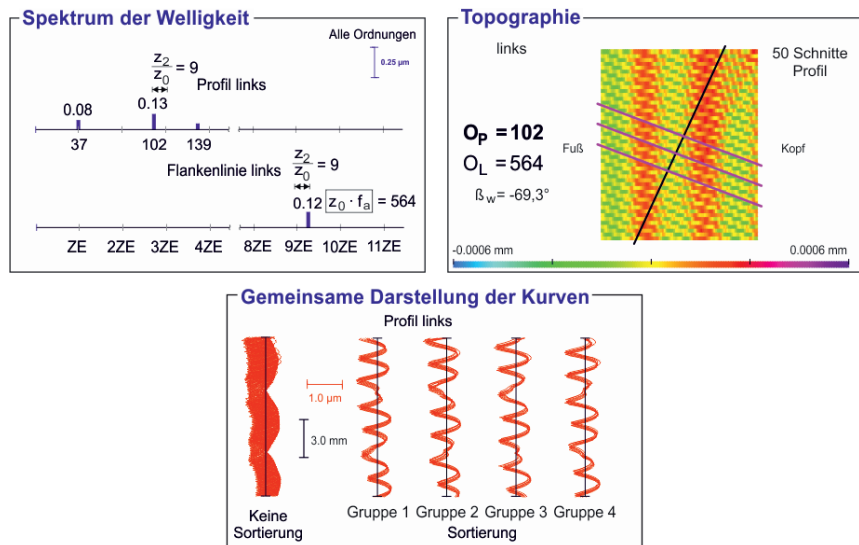


Bild 7: Charakteristische Welligkeit einer taumelnd aufgespannten Schleifscheibe mit nicht teilbarem Zähnezahlverhältnis

## 6. Überlagerung von Welligkeiten

Anhand eines Beispiels aus der Praxis mit der Unterstützung einer Welligkeitssimulation soll gezeigt werden, dass unter Umständen auch eine Welligkeit mit einem Schrägungswinkel  $\beta_w \neq \beta_b$  geräuschanregend sein kann. Das vorgestellte Beispiel ist im EoL in der 2. ZE ausgefallen und weist auch in der Welligkeitsauswertung lediglich Zahneingriffsordnungen und deren Harmonische auf. Geisterordnungen sind im Spektrum der Welligkeit nicht vorhanden. Die Topographie aus der Messung im Bild 7 links bestätigt die Welligkeitsauswertung. Da die periodische Struktur beim Bauteil von Formabweichungen überlagert wird, wird eine Welligkeitssimulation mit den gemessenen Ordnungen durchgeführt, deren Ergebnis im Bild 7 rechts dargestellt ist.

In der Welligkeitssimulation werden mehrere Welligkeiten mit unterschiedlichen Schrägungswinkeln simuliert. Zunächst wird die Flankenlinienwelligkeit, wie sie auf dem Werkstück vorhanden ist, unter einem Schrägungswinkel der Welligkeit  $\beta_{w1} = 90^\circ$  simuliert.

Die Flankenlinienwelligkeit, wie sie im Bild 7 ganz rechts als Linienschnitt in der Topografie dargestellt ist, hat einen konstanten Phasenwinkel und verläuft horizontal vom Fuß zum Kopf. Überlagert wird diese durch eine Profilwelligkeit, die ebenfalls auf dem Werkstück vorhanden ist. Diese Welligkeit hat einen Schrägungswinkel  $\beta_{w2} = 0^\circ$  mit einem ebenfalls konstanten Phasenwinkel. Die Profilwelligkeit, wie sie im Bild 8 rechts oben als Profilschnitt in der Topografie zu erkennen ist, verläuft jetzt aber vertikal über die Zahnbreite.

In der Kombination der beiden Welligkeiten entsteht ein linsenförmiges Muster, wie es im Bild 8 rechts deutlich zu erkennen ist. Wenn diese Struktur von einem Gegenrad unter dem Grundschrägungswinkel  $\beta_b$ , der im Bild als schwarze durchgezogene Linie eingezeichnet ist, überrollt wird, kann die Berührlinie durch Berg und Tal laufen. Damit ist ein wirksamer Schrägungswinkel  $\beta_{w3} = \beta_b$  aus der Kombination der beiden vorgestellten Welligkeiten möglich.

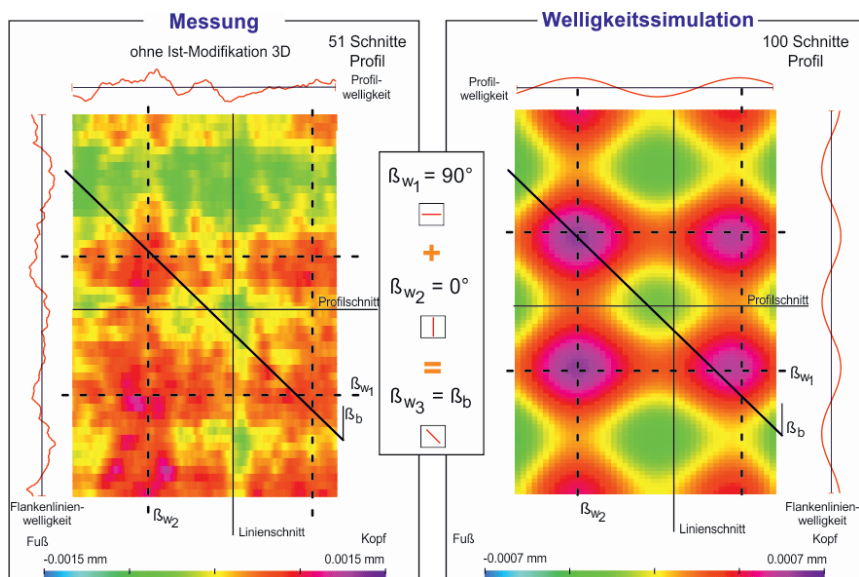


Bild 8: Überlagerung einer Flankenlinien- und einer Profilwelligkeit

Prinzipiell ist die linsenförmige Struktur auch links in der Messung der Topografie des Zahnrads erkennbar. Sie ist allerdings von Formabweichungen überlagert. Zur Verdeutlichung



der einzelnen Wellen sind in der Darstellung der Messung und der Simulation die Wellenlängen und deren Ausbreitungsrichtung mit einer schwarzen gestrichelten Linie gekennzeichnet. Anhand des vorgestellten Beispiels wird deutlich, dass unter bestimmten Voraussetzungen die Überlagerung mehrerer unabhängiger Welligkeiten zu einer Geräuschanregung unter einem wirksamen Winkel  $\beta_w = \beta_b$  führen kann.

## 7. Zusammenfassung

Im Ergebnis des von der FVA geförderten Vorhabens ist es einem Anwender erstmals möglich, anhand charakteristischer Welligkeitseigenschaften Rückschlüsse auf die Ursache der Welligkeitsentstehung zu ziehen. Anhand praktischer Beispiele aus der Serienfertigung, aus Versuchen und Simulationen wurde die Welligkeitsentstehung bei verschiedensten Abweichungsarten untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass Prozessparameter, wie die Gangzahl des Werkzeugs oder der Axialvorschub, einen wichtigen Einfluss auf die Welligkeitsentstehung haben. Diese Parameter können für die vorgestellte systematische Ursachensuche genutzt werden, um zielgerichtet von der Welligkeit auf eine Ursache schließen zu können. Der Beitrag liefert somit wichtige Methoden für die Schließung des Qualitätsregelkreises Geräusch.

## 8. Danksagung



Die Autoren danken der Forschungsgemeinschaft für Antriebstechnik e.V. (FVA) für die Förderung des Forschungsvorhabens FVA 733 II „Methodik zur Ursachensuche geräuschanregender Oberflächenwelligkeiten an Zahnrädern“.

## Literaturverzeichnis

- [1] Rank, B.; Strauß, M.: Akustische Analyse und Bewertung von ZF-Automatikgetrieben für PKW. 6. VDI-Fachtagung Verzahnungsmesstechnik. Leonberg. VDI-Berichte 2316. S.29-41. 2017.
- [2] Descher, F., Winter, W.: Welligkeitsmessung an Stirnradverzahnungen in der Serienfertigung. 5. Fachtagung Verzahnungsmesstechnik 2014. Nürtingen. VDI-Berichte 2236. S.81-92. 2014.
- [3] Gravel, G.: Simulation of Deviations in Hobbing and Generation Grinding. International Conference on Gears. München. VDI-Berichte 2199. S.367-378. 2013.

- [4] Gravel, G., Kahnenbley, T.: Neue Entwicklungen zur Welligkeitsanalyse akustisch auffälliger Verzahnungen. 6. VDI-Fachtagung Verzahnungsmesstechnik. Leonberg. VDI-Berichte 2316. S. 43-54. 2017.
- [5] Wengler, S.; Römhild, I.: Zahnflankenwelligkeit. Periodische Anteile der Flankenformabweichung. FVA-Bericht 376 III Heft 770. Frankfurt/Main. 2005.
- [6] Kahnenbley, T., Gravel, G.: Werkzeug- und Fertigungseinflüsse in der Verzahnungsmessung erkennen. 6. VDI-Fachtagung Verzahnungsmesstechnik. Leonberg. VDI-Berichte 2316. S. 147-158. 2017.

# **Verzahnungsgeräusche**

## **Beispiele zu ursächlichen Geometrieabweichungen an Verzahnungen**

### **Gearing noises**

#### **Examples of causal geometry deviations on gearings**

Dr.-Ing. **Bernhard Rank**, ZF Friedrichshafen AG, Saarbrücken

#### **Kurzfassung**

Die Geräuschanforderungen an die PKW-Automatikgetriebe hochwertiger Fahrzeuge sind anspruchsvoll – und steigen mit zunehmender Hybridisierung weiter an. Die umfassende Geräuschprüfung am Ende des Produktionsprozesses erfordert damit auch in der Zukunft erhöhte Anstrengungen in der Verzahnungsfertigung und -prüfung. Die Ursache für überhöhte Geräuschanregungen lassen sich meist an geometrischen Abweichungen bei Verzahnungen oder anderen Komponenten festmachen. Aufgezeigt werden praktische Erfahrungen aus der Großserienfertigung von PKW-Automatikgetrieben. Wichtig ist die maßgeblichen Bauteile mit den ursächlichen Geometrieabweichungen eindeutig zu identifizieren und Abstellmaßnahmen zu deren Vermeidung in der Serienproduktion aufzeigen zu können.

#### **Abstract**

The noise requirements for the automatic passenger car transmissions of high-quality vehicles are demanding - and continue to increase as hybridization increases. Comprehensive noise testing at the end of the production process therefore also requires increased efforts in gear manufacturing and inspection in the future. The cause of excessive noise excitation can usually be determined by geometric deviations in gearings or other components. Practical experience from volume production of automatic passenger car transmissions is demonstrated. It is important to clearly identify the relevant components with the causal geometry deviations and to be able to show remedial actions to prevent them in volume production.

## 1. Akustikanforderungen bei PKW-Automatikgetrieben

Die allgemein formulierte Akustikanforderung der Automobilhersteller lautet, dass das Getriebe keine störenden Geräusche im Fahrzeug (Fahrgastzelle) und im direkten Umfeld außerhalb des Fahrzeugs erzeugen darf. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu verstehen, dass die Getriebeakustik im Fahrzeug ein Systemthema ist, welches immer an die Wechselwirkung von Getriebe mit Fahrzeug bzw. das Übertragungsverhalten gekoppelt ist.

Üblicherweise gibt es zum Akustikverhalten der Getriebe in den Fahrzeugen Lastenheftanforderungen, die im Erzeugnis-Bewertungssystem meist eine ATZ-Note 8 zum Ziel haben, siehe [1]. Vereinzelt gibt es auch Vorgaben für zulässige Körperschall- oder Luftschallpegel an definierten Punkten am Getriebe bzw. im Nahfeld des Getriebes.

In den letzten Jahren haben sich die akustischen Randbedingungen in den Fahrzeugen zu Ungunsten der Getriebe verändert und so die Anforderungen an die Aggregate, hier am Beispiel eines 8HP-4.Gen PH (Plug-In-Hybridgetriebe, siehe Bild 1) aufgezeigt, weiter erhöht.

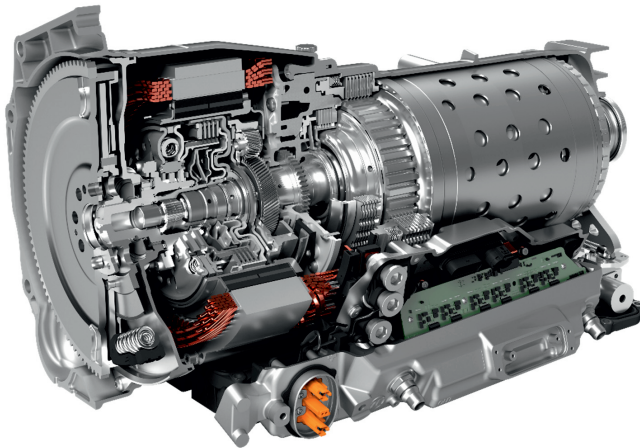


Bild 1: Schnittbild 8HP-4.Generation (Plug-in-Hybrid)

Als wesentliche Punkte sind zu benennen:

- Aus Gewichts- und Kostengründen wird versucht Dämmungsumfänge in den Fahrzeugen zu reduzieren.
- Trend zu weiter erhöhten Fahrzeugleistungen und damit steifere Anbindung der Getriebe für eine gute Fahrdynamik.
- Zunehmende Anteile von rein elektrischen Fahrzuständen finden ohne Maskierungsgeräuschen eines Verbrennungsmotors statt.
- Mit der zunehmenden Hybridisierung treten zusätzlich Rekuperationsphasen unter erhöhten Schublasten auf.
- Durch elektromotorische Antriebe werden in der Regel höhere Antriebsdrehzahlen realisiert. Beides – Drehmoment- sowie Drehzahlerhöhung bedeuten in der Regel höhere Geräuschanregungspegel für betroffene Radsätze.
- Neue Nebenantriebe sind auch bei Stillstand des Fahrzeuges in Betrieb – eine Herausforderung bei fehlender Maskierung durch Roll-, Wind- oder Verbrennungsmotorgeräusche.

Dies führt zu einer größeren Relevanz der Akustikeigenschaften schon bei der Konstruktion der Getriebe, insbesondere aber zu neuen Herausforderungen bei der Serienfertigung und Prüfung der Verzahnungen.

## **2. Verzahnungsspezifische Geräuschproblemstellungen**

Reduziert auf die Geometrie der Zahnräder bzw. Zahnflanken sind die wesentlichen Geräuschbeanstandungen bei der End-of-Line-Prüfung der Getriebe wie folgt einzuordnen:

- erhöhte Anregungspegel in der 1. Zahneingriffsordnung – der Klassiker
- erhöhte Anregungspegel in den Harmonischen der Zahneingriffsordnung
- beliebige Ausfallordnungen infolge Hüllkurvenüberschreitung – zunächst oft ein Mysterium, deswegen oft auch als Geisterordnungen bezeichnet
- Beschädigte Teile mit Plusstellen in den Zahnflanken – auch bekannt als Zahnklopfer
- Modulationen durch z.B. Unwucht oder taumelnde Teile

## **3. Geometrieabweichungen der Zahnflanken als Ursache von Geräuschen**

Bei höheren Lastniveaus erklären sich Zahneingriffspegel und deren Harmonische vorrangig aus einer parametererregten Anregung, z.B. Steifigkeitsschwankungen aufgrund wechselnder Zahnüberdeckungen im Wälzkontakt. Dieser Zusammenhang stellt insbesondere bei der Auslegung der Verzahnungsmakrogeometrie (Modul, Zähnezahl, Eingriffswinkel,

Schrägungswinkel, ...) einen wesentlichen Schwerpunkt der Akustikoptimierung dar. Oft zielt man im Zuge der Auslegung darauf ab, die Steifigkeitsschwankungen durch optimale Überdeckungsverhältnisse und gezielte Modifikationen (Kopfrücknahmen, Flankenlinienkorrekturen, ...) für einen bestimmten Betriebsbereich zu minimieren.

Im Niedrig- und Teillastbereich dominieren hingegen direkt die ausgeführten Verzahnungsqualitäten und die Einbausituation das Drehfehlerverhalten einer Radpaarung. Werden verformungsbedingte Abweichungen der Radkörper und der Zähne bei der weiteren Betrachtung ausgeklammert und man beschränkt sich ausschließlich auf die Verzahnungen, so sind die im Eingriffsfeld des Zahnkontaktes wirksamen Geometrieabweichungen für das Drehfehlerverhalten maßgebend. Dadurch induzierte Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte sind direkt für die Geräuschanregung bestimmend.

Grundsätzlich gilt dabei, je gleichmäßiger Abweichungen vorhanden sind und wirksam werden, umso höhere Anregungsamplituden werden aufgrund schmalerer Frequenzbänder erzeugt. Durchaus ein nachteiliger Umstand bei der mittlerweile weit verbreiteten Hartendbearbeitung von Verzahnungen, welche zwar kleine Geometrieabweichungen ermöglicht, die verbleibenden Abweichungen aber meist sehr regelmäßig auf die Verzahnung aufträgt. Dies ist im Übrigen der wesentliche Grund für die markante Geräuschanregung im Falle von Geisterordnungen – diese weisen meist nur sehr kleine Abweichungsamplituden auf, haben im Gegenzug aber ein sehr regelmäßiges Erscheinungsmuster.

#### **4. Fallbeispiele zu akustisch relevanten Geometrieabweichungen**

##### **4.1 Zahneingriff**

Geräuschanregungen in der ersten Zahneingriffsordnung (1.fz) sind in der Regel auf zu große Winkelabweichungen von Profil oder Flankenlinie und/oder Flankenballigkeiten bzw. Flankenformabweichungen zurückzuführen, siehe Beispiele 1 und 2. Konsequenz ist eine Erhöhung des Drehfehlers bei den Zahneingriffen und in der Folge ein höherer Geräuschpegel.

##### **4.2 Harmonische**

Harmonische können als Vielfache der Zähnezahle auftreten., zum einen bei heftigeren Eingriffsstößen in der Radpaarung (z.B. bei massiven Verzahnungsabweichungen oder sehr großen Achsfehlstellungen infolge Gehäuseabweichungen, Zentrier- oder Montagefehler, zu großer Lagerspiele), zum anderen als Folge einer parametererregten Schwingungsanregung bei kontinuierlich wälzender Verzahnungsbearbeitung.



Beispiel 3: EoL-Ausfälle in 3.fz im Zug (Harmonische), Verzahnungsmessung siehe Bild 4

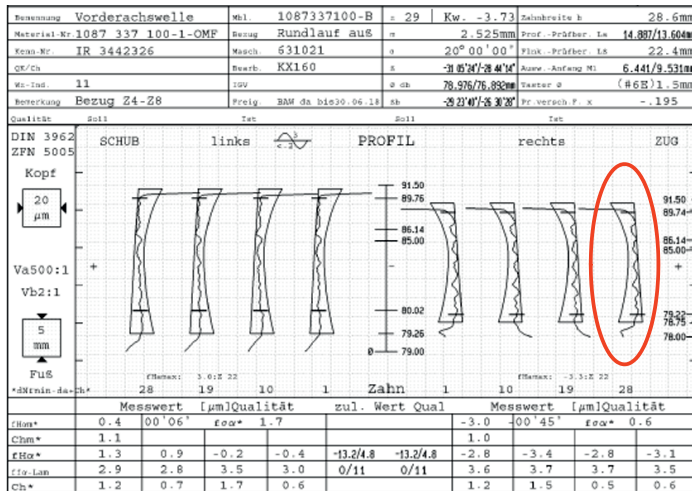


Bild 4: Ursache sind phasengleich wellige Zugflanken (aus wälzender Herstellung)

Dabei kann sich die strenge Periodizität der verbleibenden Abweichungen einer Hartendbearbeitung negativ auswirken, wenn zum Beispiel größere Formabweichungen phasengleich an den Zähnen auftreten, siehe beispielhaft Bild 4. In der Welligkeitsanalyse werden in diesen Fällen meist hohe Amplituden der eingepassten Ausgleichssinuskurven bei den Zahneingriffsharmonischen belegt, siehe auch [4].

Beeinflusst werden die akustischen Auswirkungen zudem von der Verfahrenskombination in der Radpaarung.

#### 4.3 Geisterordnung/Maschinenordnung

Neben der Zahneingriffsordnung und deren Harmonischen gibt es ein breites Feld an möglichen Störordnungen, welche entweder von anderen Komponenten verursacht werden (Wälzlager, E-Motor, Pumpe, ...) oder bei der Endbearbeitung der Verzahnungen erzeugt und als Abweichungsmuster auf die Oberflächen der Zahnflanken aufgeprägt werden können.

Zahlreiche Störfaktoren bei der Bearbeitung (Eigenschwingungen von Spannsystem und/oder der Werkzeugmaschine, Verhältnis Zähnezahlen Werkstück/Werkzeug, Abweichungen an Werkzeugen, regelungstechnische Schwingungen, Störungen von den Werkzeugmaschinenantrieben, verbauter Wälzlager Radsätzen oder Achsen, von Peripherie

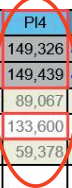


einwirkende Schwingungen) können sich auf die Werkstücke übertragen und zu akustischen Auffälligkeiten führen.

Negative Erfahrungen dieser Art wurden bereits beim Profil- und Wälzschleifen, Leistungs- und Finish-Honen sowie beim Stoßen, Fräsen und Drallräumen gesammelt, siehe auch [5]. Im Folgenden werden die Fallbeispiele 4 bis 6 zur Veranschaulichung vorgestellt:

#### Beispiel 4: Hüllschnittstruktur

Das hier angeführte Fallbeispiel zeigt die Befundung eines EoL-Ausfalls, bei dem RS4-Planetenräder ohne finale Honbearbeitung verbaut wurden. Auffällig wurde eine Geisterordnung #133,6 im 2. Gang Zug, die über rechnerische Zuordnung mittels AKUDAT-Software auf 149 Störungen am Umfang von RS4-Planetenrad zurückgerechnet werden kann (siehe Bild 5). Die durchgeführte Welligkeitsanalyse [2] zeigt den direkten Zusammenhang zur Hüllschnittstruktur aus der Vorarbeit Wälzfräsen auf, siehe Bilder 6 und 7. In diesem Fallbeispiel ein offensichtlicher und gut nachvollziehbarer Fehler, der jedoch analog bei wälzenden Endbearbeitungsverfahren (Wälzschleifen, Wälzschälen, Fertigfräsen, ...) regelmäßige Oberflächenstrukturen erzeugen kann. Meist stehen diese akustischen Problemstellungen in Abhängigkeit von der Werkzeugqualität und/oder dem gewählten Vorschub.



So4	So4_r-1	So4_r	So4_r+1	St4	PI4	Hr4_r-1	Hr4_r	Hr4_r+1	AZ
89,033	112,003	113,003	114,003	419,727	149,326	418,727	419,727	420,727	419,727
89,100	112,089	113,089	114,089	420,044	149,439	419,044	420,044	421,044	420,044
89,067	89,067	89,067	89,067	89,067	89,067	89,067	89,067	89,067	89,067
133,600	133,600	133,600	133,600	133,600	133,600	133,600	133,600	133,600	133,600
89,067	59,378	59,378	59,378	199,340	59,378	59,378	59,378	59,378	199,340
53,440				251,931					251,931
89,067	25,100	25,100	25,100	326,657	25,100	25,100	25,100	25,100	326,657
89,067				419,886					419,886
89,067	21,740	21,740	21,740	500,633	21,740	21,740	21,740	21,740	500,633
133,600				629,829					629,829
127,422	127,422	127,422	127,422	127,422	127,422	127,422	127,422	127,422	127,422

Bild 5: Ausschnitt AKUDAT-Software [3] zur Herstellung des Zusammenhangs EoL-Ausfallordnung zu geometrischer Ursache, PI4 mit 149 Störungen als eine Lösungsoption



Beispiel 5: Zähnezahlverhältnis

In diesem Fall sind zahlreiche Getriebe binnen 3 Tagen am EoL über eine Geisterordnung #14,2±0,1 im 2.Gang Zug am EoL ausgefallen. Ursache war eine neue Honringauslegung für die Endbearbeitung einer Sonnenverzahnung, die einen gemeinsamen Teiler „7“ in der Zähnezahl des Honrings  $z_{Hr} = 105$  und beim Werkstück mit  $z_{So} = 28$  aufweist:

$$z_{Hr\_Serie} = 127 \text{ (Primzahl – bisher unkritisch)} \Rightarrow z_{Hr\_neu} = 105 = 5 \cdot 3 \cdot 7$$

$$z_{So} = 28 = 2 \cdot 2 \cdot 7$$

Ein Kardinalfehler, der über eine einfache Primfaktorzerlegung der Zähnezahlen von Werkzeug und Werkstück vermeidbar gewesen wäre. Folge ist ein systematisches Muster von Geometrieabweichungen am Werkstück (siehe Teilungsmessung in Bild 8) infolge einer Bearbeitung der Werkstückzähne mit den immer gleichen Zähnen des Honrings, letztlich eine „Kopie“ von geometrischen Abweichungen am Abrichtwerkzeug.

Die Welligkeitsanalyse (siehe Bild 9) belegt hohe Amplituden für Störordnung #4 an der Sonnenverzahnung und zudem Oberwellen, welche als periodische Abweichung letztlich die Geisterordnung definiert und die EoL-Geräuschausfälle verursacht hat.

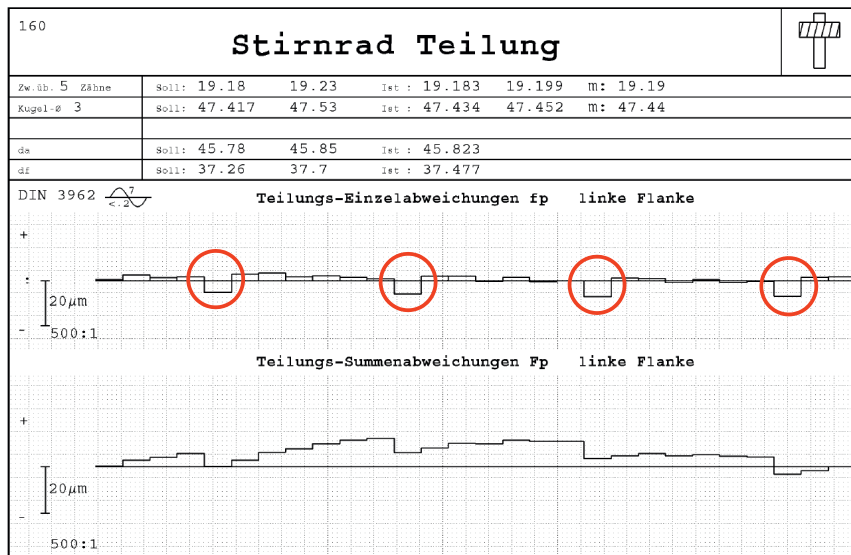


Bild 8: Regelmäßige Teilungsabweichungen alle 7 Zähne wiederholt

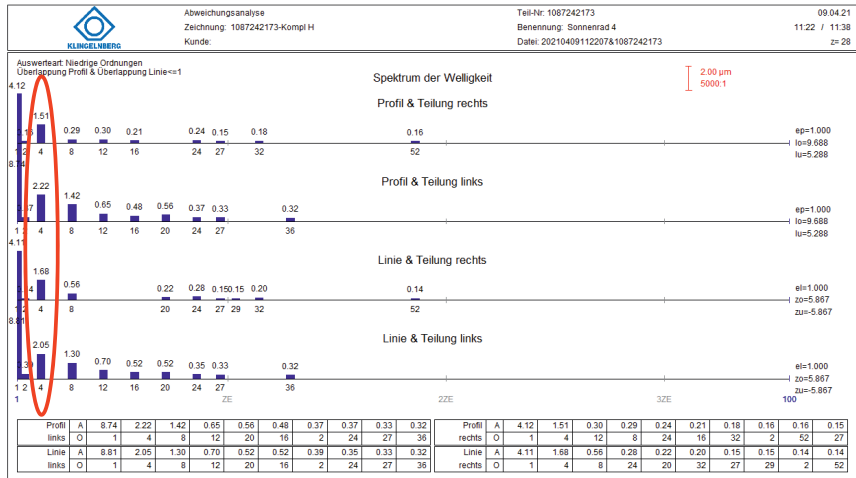


Bild 9: Amplitudenspektrum mit Störordnung #4 und deren Oberwellen

### Beispiel 6: Maschinenproblem

Bei diesen Geräuschausfällen in der Geisterordnung #106,9 fiel die Zuordnung lange schwer, da mit AKUDAT zwar das Abtriebsrad mit Störordnung #159 neben Vorderachsselle (VAW) und 2 Wälzlager als eine der möglichen Lösungen benannt wurde (siehe Bild 10), aber diese Störordnung bei der Welligkeitsanalyse nur mit sehr kleinen Amplituden von 0,01 bis 0,02 µm in den Flankenlinien und Profilen vorhanden waren (siehe Bild 11 und 12). Zuerst wurde diese Lösung daher als unwahrscheinlich angesehen, erst über Kreuztauschversuche, Versuche mit Werkzeugwechsel und einem weiter andauernden Problem mit den Abtriebsrädern von einer Schleifmaschine fügte sich der Fall zu einem schlüssigen Gesamtbild. Selbst Nacharbeit der Abtriebsräder auf dieser Maschine war nicht zielführend. Erst mit dem Austausch von Wälzlager an der Schleifspindel der Wälzschleifmaschine (Gegenlager B-Achse) wurde das Problem nachhaltig abgestellt, siehe Bild 13.

Nicht ganz verstanden ist bislang, wie diese sehr kleinen Amplituden eine derartige akustische Wirkung von 15 bis 20 dB höheren Anregungspegel am EoL-Prüfstand erzielen konnten. In Bild 12 ist bei sehr großer Vergrößerung (50.000:1) durchaus erkennbar, dass die Welligkeitsamplituden phasenweise etwas höher ausschlagen und offenbar über eine gewisse Unschärfe bei der rechnerischen Mittelung über den Umfang gedämpft werden. Ein weiterer Erklärungsansatz wird darin gesucht, die Ausrichtung der Welligkeit  $\beta_w$  zur Schrägungsrichtung mit zu betrachten – diese Analyse ist derzeit noch offen.

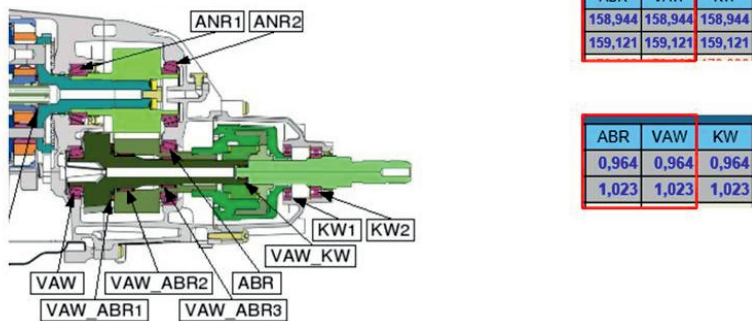


Bild 10: Mögliche Ursache ist Störordnung #159 auf dem Abtriebsrad (ABR) oder Vorderachswelle (VAW) sowie Überrollfrequenzen von Wälzlagern auf dieser Drehachse

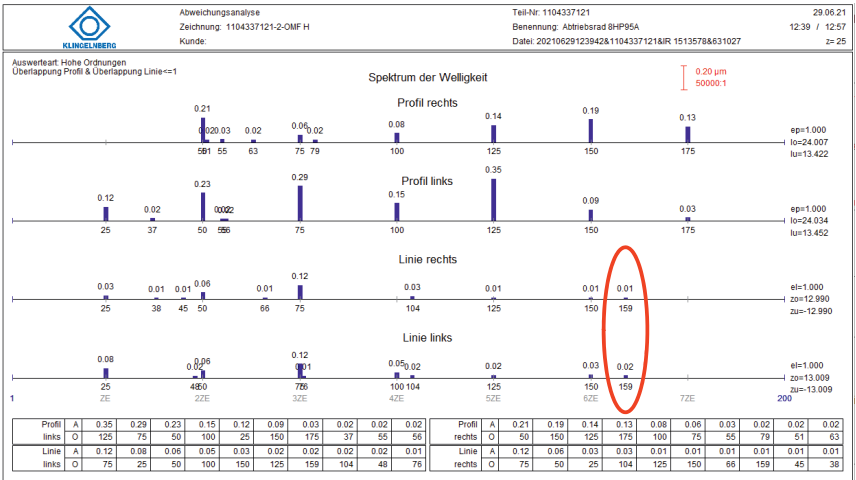


Bild 11: Amplitudenspektrum der Welligkeitsanalyse mit nur sehr geringen rechnerischen Welligkeitsamplituden bei #159

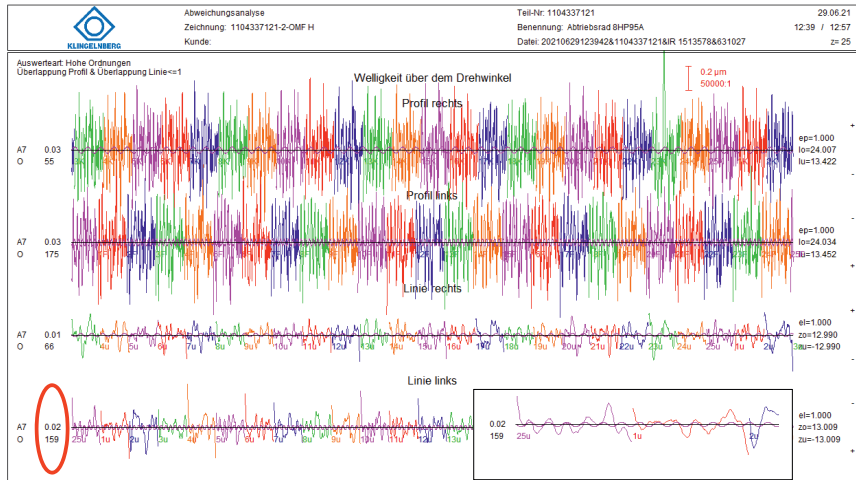


Bild 12: Welligkeitsdarstellung mit nur minimalen Amplituden bei Störordnung #159

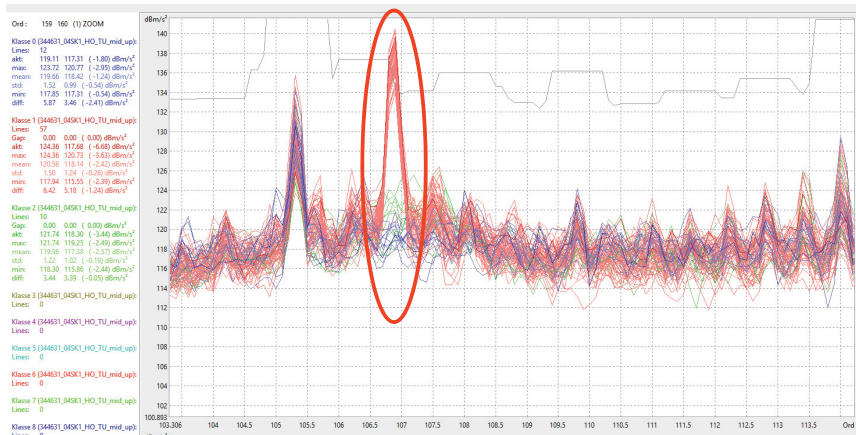


Bild 13: EoL-Anregungspegel bei Störordnung #106,9 vor (in Rot mit deutlichen Peaks) und nach Maschinenreparatur (in Grün im normalen Streuband)

#### 4.4 Zahnklopfer



Zahnklopfer sind auf Beschädigungen zurückzuführen (siehe Bild 14), die meist durch unsachgemäßes Handling, defekte Automationseinheiten, Transportschäden oder durch unsachgemäße Montagen verursacht werden. So erzeugte, einzeln auftretende Plusstellen in der Flanke können sehr gut im Zeitsignal erfasst und z.B. über den Geräuschkennwert „Cepstrum“ ausgewiesen werden (siehe [1]).

Bild 14: Beschädigung am Kopf eines Zahnes

### 5. Zusammenfassung

Insbesondere für den Niedrig-/Teillastbereich ist für eine geringe Geräuschanregung zwingend eine gute Verzahnungsqualität mit dem Fokus auf einen geringen Drehfehler in der Radpaarung zu realisieren.

Zur Erreichung einer robusten Serienfertigung ist in den letzten Jahren zunehmend ein Trend zur Hartendbearbeitung der Verzahnungen erfolgt. Hierbei erweisen sich insbesondere periodische Restfehler als oft maßgeblich für das Akustikverhalten der Radstufen, insbesondere gleichmäßig an den Zähnen vorhandene Abweichungen in Profil- und/oder Flankenrichtung sowie in der Teilung. Selbst kaum nachweisbare Welligkeitsformen auf den Zahnflanken können so schnell zu akustischen Problemfällen führen.

Bei zu vielen Geräuschbeanstandungen wird zumeist eine weiter eingeschränkte Toleranz in diversen Verzahnungsparametern eingeklagt, deren prozesssichere Umsetzbarkeit jedoch in Großserie oft nicht im erwarteten Maße gegeben ist.

### 6. Ausblick

Im Zuge der schnell ablaufenden Transformation hin zu elektrifizierten Fahrzeugantrieben erhöhen sich die Anforderungen an das Akustikverhalten der Aggregate weiter. Es müssen zusätzliche Anstrengungen für eine prozesssichere Herstellbarkeit enger Verzahnungstoleranzen (Closed-Loop-Ansatz) sowie für eine effektive und dennoch teilbezogene Prozessüberwachung der Produktionsmaschinen unternommen werden.

Übergangsweise setzen viele der Hersteller auf Absicherung mittels 100 %-Laufprüfung der Zahnräder vor der Montage. Zugleich versuchen nahezu alle Hersteller Geometriedaten

(Verzahnungen, Zahnräder, Gehäuseteile, Montagedaten, ...) für Korrelationsanalysen bzw. KI-Ansätze zu nutzen, letztlich mit dem Ziel nur iO-Aggregate zu produzieren sowie Produktions- und Prüfaufwände in einem vertretbaren Rahmen zu halten.

## 7. Literaturangaben

- [1] Strauß, M; Rank, B.: Akustische Analyse und Bewertung von ZF-Automatikgetrieben in PKW-Anwendungen. VDI-Berichte Nr. 2316, 2017, S. 29-41.
- [2] Gravel, G.: Bestimmung von Welligkeiten auf Zahnflanken. GETPRO Kongress zur Getriebeproduktion, Würzburg, 11./12.03.2009.
- [3] Bischof, Th.; Bein, C.; Dörrien, H.-J.: Lokalisation von akustisch auffälligen Getriebelagern am EOL-Prüfstand. VDI-Berichte Nr. 2147, 2011, S. 351-362.
- [4] Rank, B.: Einflussnahme der NVH-Anforderungen auf die Verzahnungsbearbeitung und -prüfung eines PKW-Automatikgetriebes. 2. VDI-Fachkonferenz „Getriebeproduktion in der Automobilindustrie“, Köln, 2013.
- [5] Rank, B.: Welligkeiten auf Zahnflanken – Ursachen und akustische Auswirkungen. VDI-Berichte Nr. 2236, 2014, S. 93-104.



# **GDE – Gear Data Exchange Format**

## **Durchgängiger Datenaustausch in der Zahnradproduktion**

Prof. Dr.-Ing. **Günther Gravel**,

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW)

### **Kurzfassung**

Industrie 4.0 und BigData sind Themen, die auch in der Zahnradproduktion aktuell sind und große Veränderungen bewirken. Grundlage ist dabei der Austausch und das Sammeln und Bewerten von Daten aus der Produktion. In diesem Beitrag soll das Gear Data Exchange Format GDE vorgestellt werden, das über einen langen Zeitraum entwickelt wurde. Es wird aktuell in vielen Firmen genutzt und ständig erweitert. Das GDE-Format ist in der Lage, alle wesentlichen Daten abzubilden, die bei der Herstellung eines Zahnrades entstehen. Basis des Formates ist die Sprache XML, die eine weite Verbreitung besitzt, hierarchische Strukturen ermöglicht und sich einfach erweitern lässt. Vorgestellt wird der grundlegende Aufbau einer GDE-Datei und beispielhafte Datenstrukturen. Gezeigt wird die Visualisierung in Windows und die Integration in einen Programmierablauf.

In der praktischen Umsetzung sind aber auch einige Regeln zu beachten, die in dem Beitrag diskutiert werden. So sind zum Beispiel die vielen Variablen überwiegend nur als optional definiert. Der Anwender muss also selbst prüfen, ob die Daten vollständig und sinnvoll sind. Abschließend werden einige Anwendungsmöglichkeiten des Austauschformates vorgestellt, wie sie heute schon existieren oder aktuell in der Entwicklung sind.

### **Abstract**

Industry 4.0 and BigData are topics that are also current in gear production and are causing major changes. The basis for this is the exchange and the collection and evaluation of data from production. This article will introduce the Gear Data Exchange Format GDE, which has been developed over a long period of time. It is currently used in many companies and is constantly being expanded. The GDE format is able to represent all the essential data that are generated during the production of a gearwheel. The format is based on the XML language, which is widely used, enables hierarchical structures and can be easily extended. The basic structure of a GDE file and exemplary data structures are presented. The visualization in Windows™ and the integration into a programming process will be shown.

In the practical implementation, however, also some rules are to be considered, which are discussed in the article. For example, many variables are mostly only defined as optional.

The user must therefore check himself whether the data is complete and meaningful. Finally, some application possibilities of the exchange format are presented, as they already exist today or are currently under development.

## 1. Einleitung

Auch wenn die Geometrie einer Evolvente mit sehr wenigen Kenngrößen beschreibbar ist, braucht es doch einige Daten, um die zunehmend komplexere Geometrie einer Verzahnung zu definieren. Werden dazu die Mess- und Fertigungsdaten ergänzt, die bei der Produktion eines Zahnrades anfallen, ist eine elektronische Datenverarbeitung unumgänglich. Dabei entstehen für die einzelnen Fertigungsbereiche und teilweise auch nur für einzelne Anwendungen große Datenbanken, die häufig redundante Informationen beinhalten und nicht miteinander verknüpft sind. Betrachtet man für einen Produktionsprozess die Datenströme, so ergibt sich die in Bild 1 dargestellte Situation. Vom Auftragseingang über die Auslegung und die Planung bis hin zur Endprüfung werden regelmäßig und wiederholt gleiche Daten von Hand eingegeben. Selbst wenn es eine unternehmensinterne Struktur mit Datenaustausch gibt, endet diese regelmäßig am Werkstor. Werkzeughersteller, Zulieferer und Kunden erhalten Daten per PDF oder Fax, weil sie ganz sicher andere Datenstrukturen verwenden.

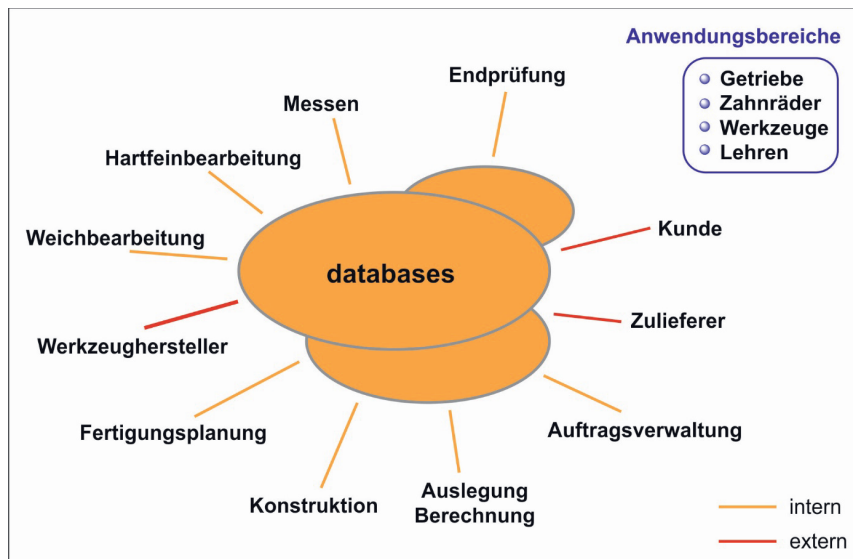


Bild 1: Datenverwendung in der Zahnradproduktion.

Um die Kosten und die Fehlerquote für Eingabe und Konvertierung zu senken und die Automatisierung der Abläufe zu verbessern, wird seit vielen Jahren im VDI-Fachausschuss ‚Messen an Zahnrädern und Getrieben‘ ein einheitliches Austauschformat für Verzahnungsdaten entwickelt und in der VDI-Richtlinie VDI/VDE 2610 [1], [3] definiert. Dieses **Gear Data Exchange (GDE)** Format gewinnt in den Aktivitäten zu Industrie 4.0 eine große Bedeutung. Es ist die Basis, auf der große Datenmengen global gesteuert und genutzt werden, um Prozesse zu automatisieren und mit eigener Intelligenz zu optimieren.

## 2. Struktur des GDE-Formates

Das GDE-Format basiert auf der Sprache XML, die für einen flexiblen Datenaustausch konzipiert wurde und einen weltweit großen Verbreitungsgrad erreicht hat. Ein besonderer Vorteil ist, dass die Sprache optimal aufwärts kompatibel ist, wenn die Struktur der Daten nicht geändert wird. Erreicht wird dies durch optionale Substrukturen und Attribute. Nach Erweiterung der Definition bleiben so alte Dateien valide und verarbeitbar. Durch die intensive Nutzung der XML-Sprache gibt es viele Werkzeuge, mit denen die Daten visualisiert und in Datenbanken integriert werden können. Nahezu alle Programmiersprachen unterstützen die Verarbeitung von XML-Dateien.

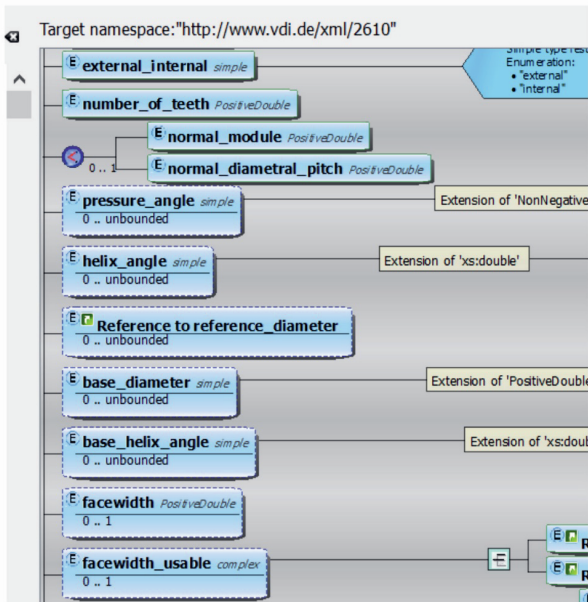
In Bild 2 ist der Aufbau einer GDE-Datei in der XML-Sprache dargestellt. Der gängige Windows Explorer™ erlaubt eine strukturierte Betrachtung, in der ganze Strukturblöcke detailliert oder reduziert dargestellt werden können. Im oberen Bereich des Bildes ist die Struktur einer GDE-Datei dargestellt, die hier die Blöcke ‚section\_identification‘, ‚section\_geometry‘ und ‚section\_inspection‘ enthält. Darunter ist die gleiche Datei mit geöffneter Substruktur ‚section\_geometry‘ gezeigt. Erkennbar sind die Wertzuweisungen an die Variablen. Die Variable ‚helix\_angle‘ besitzt ein Attribut ‚flank‘ mit dem aktuellen Wert ‚both‘ und ein Attribut ‚direction‘ mit dem aktuellen Wert ‚right‘. Der ‚Helix angle‘ hat den aktuellen Wert 25.33333°. Dadurch, dass Variablen mehrfach mit verschiedenen Attributen auftreten können, wird es möglich, Daten für die rechte und linke Flanke getrennt zu definieren. Im unteren Teil des Bildes ist dies für den Block ‚modification‘ dargestellt.



Bild 2: Eigenschaften und Vorteile der XML-Beschreibung.

Im Bild 3 sind Beispiele für die Handhabung von XML-Daten dargestellt. Es gibt viele Editoren, die eine Visualisierung, Änderung von Werten und Erweiterung von Blöcken ermöglichen. Am Beispiel des Editors QXmlEdit™ ist ein Ausschnitt aus dem Block ‚basic\_data‘ visualisiert. Viele Programmiersprachen erlauben die direkte Abbildung einer XML-Struktur in den Speicher und bieten umfangreiche Befehlssätze zur Bearbeitung an. Am Beispiel der Programmiersprache Delphi™ wird im unteren Teil des Bildes beschrieben, wie einfach das Vorgehen dabei sein kann. Die erste Zeile legt die Optionen für das Laden fest und definiert hier, dass die Datei beim Laden gegen die Definitionsdatei validiert werden muss.

### XML / XSD Dateien editieren am Beispiel QXmlEdit™



### Direktes Einbinden der Struktur am Beispiel Delphi™ (Pascal)

```
box_xml.document.parseOptions:=[poValidateOnParse];
box_xml.document.LoadFromXML(string_liste);
```

Übernahme der GDE-  
Datei in interne Speicher-  
struktur und Überprüfung  
der Inhalte

```
if node_basis1 <> nil then
begin
  node_basis1.delete('section_inspection');
  node_basis1.delete('tool_data');
end;
```

Löschen nicht benötigter  
Unterstrukturen

```
if element.nodeName='helix_angle' then
begin
  wert:=element.Attributes['direction'];
  if wert='left' then soll.r_steigung:=false else soll.r_steigung:=true;
end;
```

Übernahme Steigungs-  
richtung am Knoten des  
Schrägungswinkels

Bild 3: Verarbeitung von XML-Daten

Dann wird automatisch geprüft, ob die Struktur der XML-Datei der GDE-Definition entspricht oder Fehler beinhaltet. Mit dem zweiten Befehl werden die Struktur und die Variablen der XML-Datei in den Speicher übertragen. Innerhalb der Speicherstruktur können nun Knoten gesucht, Variablen und Attribute dort geändert oder auch Knoten gelöscht werden, wie im zweiten Bereich der Programmierung beschrieben. Umfangreiche Strukturen können so aus dem Speicher oder auch durch Speichern der reduzierten Struktur aus der Datei entfernt werden. Im unteren Teil des Bildes ist schließlich dargestellt, wie die Steigungsrichtung des Schrägungswinkels in die interne Variablenstruktur einer Anwendung übertragen werden kann. Zusammenfassend erlauben es moderne Programmierwerkzeuge XML-Dateien flexibel, einfach und sehr effektiv zu verarbeiten.

Die Definition des GDE-Formates wird ständig erweitert und angepasst, um die Wünsche der Anwender zu erfüllen. Die Definition und Beschreibung der Variablen erfolgt in einer Excel-Tabelle, die entsprechend der Version aktualisiert wird und einen englischsprachigen Anteil enthält. Ist eine Version durch den VDI-Fachausschuss verabschiedet, wird eine Schema-Datei XSD (bis Version 2.7 eine DTD-Datei) erstellt, in der alle Definitionen verbindlich abgebildet sind. Gegen diese Definitionsdatei kann jede aktuelle XML-Datei validiert werden, wie im Programmcode in Bild 3 unten beschreiben. Im Bild 3 oben ist ein Ausschnitt dieser XSD-Datei dargestellt. Zu den Variablen ist hier auch definiert, ob sie optional, einmal oder häufiger auftreten können. Eine Typdefinition (z.B. double oder integer) unterstützt eine leichte programmtechnische Umsetzung.

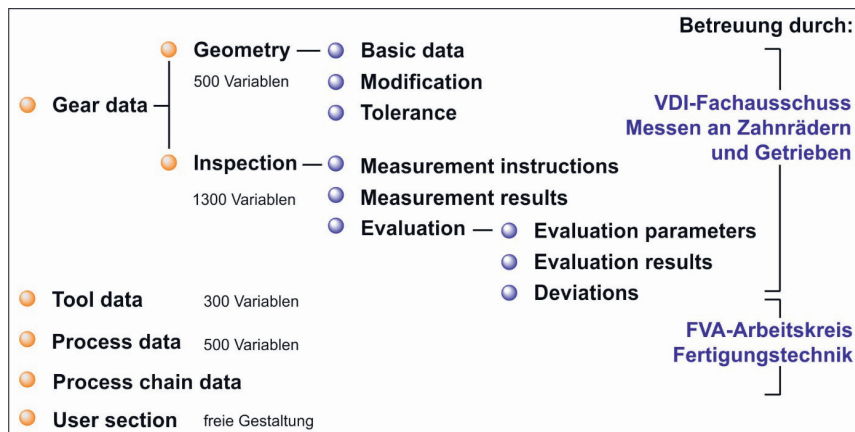


Bild 4: Struktur der GDE-Daten

Das GDE-Format beinhaltet heute ca. 2500 Variablen, die das Zahnrad, die Werkzeuge, die Prozessparameter und die Prozesskette beschreiben können. Im Geometriebereich sind umfangreiche Modifikationen und Toleranzen integriert. Im Bereich ‚Inspection‘ kann der gesamte Messablauf für eine automatische Programmierung eines Verzahnungsmessgerätes abgebildet werden. Weiterhin sind hier die Mess- und Auswerteergebnisse in vielfältiger Form als Koordinaten, Abweichungskurven und Kennwerte darstellbar. Alle Verzahnungsdaten werden im VDI-Fachausschuss ‚Messen an Zahnrädern und Getrieben‘ betreut, die fertigungstechnischen Aspekte vom Arbeitskreis ‚Fertigungstechnik‘ der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA).

<b>Verzahnungen</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Stirnrad</li> <li>● Passverzahnung</li> <li>● Beveloid</li> <li>● Zylinderschnecke</li> <li>● Hirthverzahnung</li> <li>● Kegelrad gerade</li> </ul>
<b>Messungen und Ergebnisse</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Profil, Flankenlinie</li> <li>● Zahndicke, Teilung</li> <li>● Topografie</li> <li>● Fusskreis, Kopfkreis</li> <li>● Rauheit</li> <li>● Welligkeit</li> </ul>
<b>Prozesse und Werkzeuge</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Wälzfräsen</li> <li>● Wälzstoßen</li> <li>● Profilfräsen</li> <li>● Wälzschleifen</li> <li>● Profilschleifen</li> <li>● Honen</li> <li>● Abrichten</li> </ul>

gungstechnischen Aspekte vom Arbeitskreis ‚Fertigungstechnik‘ der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA).

Ein wichtiger Bereich ist die ‚User\_section‘. Hier können Variablen schnell und frei nach Bedarf definiert werden. Damit ist es auch möglich, nach Absprache einen bilateralen Datenaustausch zu etablieren, der neben den allgemeinen Variablen auch spezielle Definitionen beinhalten kann. Wenn Definitionen von größerem Interesse sind, können sie auch später in die allgemeine Definition übernommen werden.

Die langjährige Arbeit an dem Austauschformat spiegelt sich in dem Umfang der heute abbildbaren Daten wider, wie Bild 5 zeigt.

Bild 5: Was wird in GDE 3.0 heute abgebildet?

Neben den normalen Lauf- und Passverzahnungen können auch Schnecken, Hirthverzahnungen und gerade Kegelräder beschrieben werden. Die üblichen gescannten Abweichungskurven in Profil und Flankenlinie und die definierten Einzelpunktantastungen für Di-

cke, Teilung, Fuss- und Kopfkreis werden ergänzt durch freie Topografiepunkte z.B. für optische Messverfahren. Die Rauheitsmessung an einer Verzahnung kann ebenso wie das Spektrum einer Welligkeitsauswertung über GDE transportiert werden. Fertigungstechnisch sind die in der Serienfertigung bei der Weich- und Hartfeinbearbeitung heute üblichen Verfahren enthalten. Dies umfasst die Prozessparameter und Korrekturen sowie die Beschreibung der eingesetzten Werkzeuge bis hin zum Abrichtvorgang von Schleif- und Honwerkzeugen.

### 3. Anwendung und Erweiterung

Im Laufe der Entwicklung haben sich einige Regeln herauskristallisiert, die in der Diskussion hilfreich sind und die dabei unterstützen, die grundlegende Intention der Entwicklung des GDE-Formates zu verstehen. Diese sind in Bild 6 aufgelistet und sollen hier nur kurz kommentiert werden. Die wichtigste Regel ist, dass alle Definitionen genutzt werden können, aber nur die wenigsten vorhanden sein müssen. Ein Programm zur Auftragsbestätigung benötigt z.B. keine Messdaten. Es werden nur Definitionen integriert die wirklich benötigt werden, bei denen also ein Datenaustausch in naher Zukunft auch erwartbar ist. Der Datenaustausch erfolgt zwischen Computern, die auch schlechtes Englisch und nicht optimale Definitionen verarbeiten können.

#### wesentliche Randbedingungen

- überwiegend optionale Strukturen - ‚Alles kann, nichts muss‘
- keine Sonderfälle - user section für Spezialitäten und bilaterale Definitionen
- nur das, was real gebraucht wird
- Datenaustausch zwischen Rechnern
- keine Redundanzen - maximal zur Überprüfung
- pragmatischer Aufbau / Kompatibilität hat hohe Priorität

#### was ist nicht definiert?

- keine Regeln für die Überprüfung und Verarbeitung der Daten
- keine Normung - Definitionen müssen in ISO, DIN oder VDI erfolgen
- einfache Bestellung ‚Schnittstelle GDE 3.0‘ geht nicht

Bild 6: Regeln für die Anwendung und Erweiterung



Viele Kennwerte können aus den Basisgrößen berechnet werden und werden nur in wenigen Ausnahmen zur Prüfung abgebildet. Schließlich ist das Austauschformat über einen sehr langen Zeitraum pragmatisch gewachsen und enthält sicher Fehler und auch weniger optimale Strukturen. Offensichtliche Fehler werden natürlich behoben, aber die Kompatibilität der Daten hat eine sehr hohe Priorität, um zu verhindern, dass Verarbeitungsprogramme mit jeder neuen Version angepasst werden müssen.

Wesentlich für das Austauschformat ist, dass es durch seine durchgehend optionale Struktur keine Regeln zur Überprüfung und zur Umsetzung enthält. Jeder Anwender muss also prüfen, ob die übertragenden Daten vollständig und sinnvoll sind. Die Beschreibung der Variablen erfolgt mit wenigen Worten in der zugeordneten Excel-Tabelle. Eine genauere Definition muss in den entsprechenden Normen und Richtlinien erfolgen. Einige Auswertemethoden werden in der neuen VDI/VDE 2612 Blatt 1 [2] direkt über Variablen referenziert (z.B. `Evaluation_VDI_2612B1_2018_7B`), die sich auch im GDE-Format finden. Schließlich ist es sicher nicht ohne detaillierte Absprache zwischen zwei Anwendern möglich, einen vollständigen Inhalt der Schnittstelle oder von Bereichen zu bestellen. Die Schnittstelle soll dazu dienen, in beiderseitigem Einverständnis Daten freiwillig auszutauschen. Sie soll nicht dazu dienen, Datenbereitstellung zu erzwingen oder Betriebsgeheimnisse offenzulegen. Ein solcher Missbrauch verhindert sicher die langfristige technische Entwicklung.

Zusammenfassend ist das GDE-Format ein Angebot, das bei Bedarf für Neuentwicklungen genutzt werden kann. Es soll den Aufwand einer eigenen Definition und von Sonderanwendungen vermeiden. Demgegenüber gibt es sicherlich auch Anwendungen, für die die XML-Sprache zu komplex ist oder die schon lange andere Schnittstellen erfolgreich nutzen.

#### **4. Konkrete Anwendungen und Visionen für das GDE-Format**

Als Anregung sollen im Folgenden einige vorhandene oder zukünftig denkbare Anwendungen kurz beschrieben werden. Bild 7 zeigt die Datenstrukturen, wie sie in der ZF Friedrichshafen AG heute umgesetzt sind oder zukünftig werden. Über das GDE-Format erfolgt der bilaterale Datenaustausch zwischen den zentralen Datenbanken und den Maschinen in den verschiedenen Bearbeitungsstufen bis hin zur Montage. Externe Zahnradhersteller erhalten und liefern ihre Daten im GDE-Format.

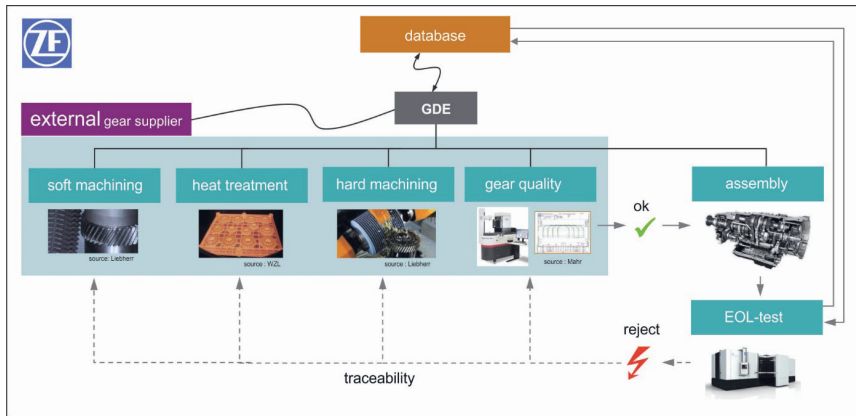


Bild 7: Smart System for I4.0 Application in Gear Production (Quelle: [4])

Ein weiteres Beispiel ist in Bild 8 oben beschrieben. Die Klingelberg AG bietet für die Fertigung von Verzahnungen einen Closed Loop als Verknüpfung von Fertigungsmaschinen mit Messgeräten an, um die Fertigungsabweichungen in der Produktion zu beherrschen und schnell und effektiv zu minimieren [5]. Eine neue GearEngine erfasst alle produktionsrelevanten Daten eines Maschinenparks und ermöglicht tiefergehende und intelligente Analysen und Optimierungen. Der Datenaustausch erfolgt im GDE-Format. An der HAW Hamburg werden seit Langem geräuschkritische Welligkeiten auf Verzahnungsoberflächen erfasst und auf ihre Ursache hin analysiert [6]. Ein wesentlicher Einfluss sind unter anderem die Prozessparameter wie der Axialvorschub, der aktuelle Abrichtzustand des Werkzeugs oder die verwendeten Abrichtparameter. Es wäre wünschenswert, diese Daten gemeinsam mit den Messdaten zu speichern, um über Korrelationsbetrachtungen und Simulationen kritische Zustände zu identifizieren, die laute Zahnräder erzeugen. Das GDE-Format bietet sich für die Verknüpfung aller dieser Informationen an.

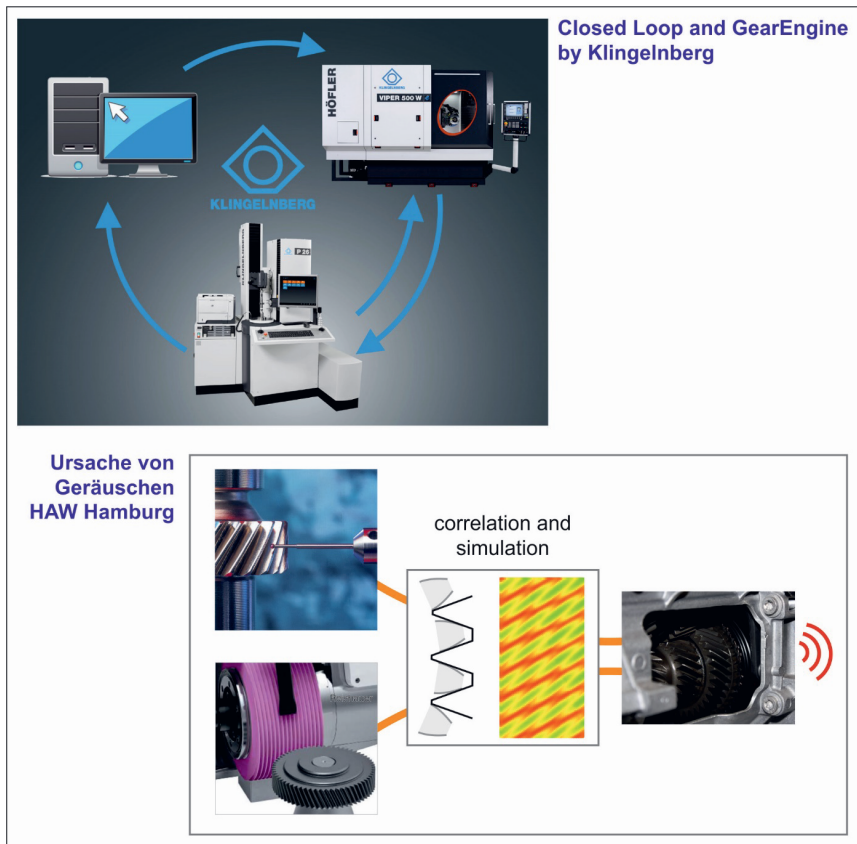


Bild 8: Anwendungen und Visionen

## 5. Zusammenfassung

Die Entwicklung eines Austauschformates GDE für Verzahnungsdaten stellt den ersten wichtigen Baustein auf dem Weg zu Industrie 4.0 dar. Auf dieser Basis können weltweite Automatisierungs- und Vernetzungsbestrebungen umgesetzt und intelligente Prozesse in der Produktion etabliert werden. Das Format nutzt eine moderne Datenbeschreibungssprache XML, ist flexibel erweiterbar und in dauerhafter Betreuung durch Fachausschüsse in VDI und FVA. Es kann damit relativ schnell an die Bedürfnisse der Anwender angepasst werden und ist so für zukünftige Anforderungen des Datenaustausches in der Produktion gut gerüstet.

## 6. Literatur

- [1] VDI/VDE 2610: Format für den Austausch von Verzahnungsdaten, Gear-Data-Exchange-Format (GDE-Format), Definition, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 05.2014
- [2] VDI/VDE 2612 – Blatt 1: Messen und Prüfen von Verzahnungen, Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 11.2018
- [3] Gravel, G., Günther, A., Härtig, F.: Austauschformat für Verzahnungsdaten, VDI-Fachtagung Verzahnungsmesstechnik, Mannheim, VDI-Berichte Nr. 1673, 2002
- [4] Yakaria, H.: International Conference on Gears, München, VDI-Berichte Nr. 2297-2, 2017
- [5] Meuris, D., Schweizer, M. Seibicke, F.: Industrie 4.0 for Gears, Gears Inline, KlingelInberg AG, 2017
- [6] Gravel, G.: Analysis of gear measurement to solve noise problems in gear boxes. 7. Swedish Production Symposium. Lund. 2016

# Messtechnik und Digitalisierung in der Produktion

## Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung

Dr.-Ing. **Christof Gorgels**, Klingelberg GmbH, Hückeswagen

### Kurzfassung

Die Suche nach Effizienzsteigerungspotenzial in der Produktion ist ein kontinuierlich voranschreitender Prozess. Dabei stehen klassisch die einzelnen Fertigungs- und Montageprozesse im Fokus, aber auch die Optimierungen entlang der Prozesskette. Die Digitalisierung schafft hier viele Möglichkeiten, Abläufe und Prozesse zu verbessern und damit Kosten zu senken. Daten helfen, Ineffizienzen aufzudecken, zu verstehen und abzustellen. Die Verknüpfung von Produktions- und Qualitätsdaten kann zusätzliche Potenziale aufzeigen und eine Vereinfachung und Beschleunigung von Abläufen ermöglichen. Zentrale Beispiele sind die statistische Auswertung von Prozess- und Qualitätsdaten, als auch Funktionalitäten wie der Closed Loop.

### 1. Einleitung

Jedes produzierende Unternehmen muss sich der Herausforderung stellen, alle Prozesse und Abläufe regelmäßig auf Effizienzsteigerungspotenziale hin zu untersuchen, diese zu identifizieren und umzusetzen. Nur so kann die Wettbewerbsfähigkeit der eigenen Produktion auf Dauer erhalten werden.

Klassisch schauen wir uns dabei Prozesse, Werkzeuge und viele andere Dinge in den einzelnen Maschinen an. Über die letzten Jahre nimmt die Menge der in Unternehmen produzierten Daten exponentiell zu. Diese Daten bergen das Potenzial, sowohl Einzelprozesse in Produktion und Qualitätssicherung als auch Abläufe übergreifend zu optimieren. Der Begriff Big Data ist in diesem Zusammenhang geläufig. Dieser Vortrag wird sich auf konkrete Beispiele fokussieren, wie digitale Informationen heute zur Effizienzsteigerung beitragen können.

### 2. Closed Loop in der Produktion

Der Begriff Closed Loop in der Produktion beschreibt einen Zustand, in dem Solldaten (Auslegung) und Istdaten (Messergebnisse) miteinander verglichen werden und daraus automatisiert eine Korrektur für die Fertigungsmaschine ermittelt wird. In der Fertigung von Kegelradverzahnungen ist das schon seit 20 Jahren Realität. Der Haupttreiber für diese Entwicklung sind die

Komplexität der Verzahnungsgeometrie und die Tatsache, dass Geometrie und Herstellbewegung schon in der Auslegung untrennbar miteinander verbunden sind. Der Konstrukteur muss sich überlegen, ob seine Verzahnungsmodifikationen herstellbar sind, wozu in der Regel eine Fertigungssimulation erforderlich ist. Hier greift dann der Closed Loop ein um zu berechnen, mit welchen Korrekturen der Maschinenbewegungen minimale Abweichungen zwischen Soll- und Istgeometrie erzeugt werden können.

Für eine Stirnradverzahnung hingegen wurde und wird häufig die Auslegung ohne Berücksichtigung des Fertigungsverfahrens und seiner Möglichkeiten durchgeführt. Das führt unweigerlich dazu, dass am Ende eine Verzahnung hergestellt wird, die nur in der Mitte der Zahnflanke sehr genau mit der Sollgeometrie übereinstimmt. Die Gesamtopographie weist Abweichungen auf, die üblicherweise als Verschränkungen bezeichnet werden. Je nach Genauigkeitsanforderungen an die Verzahnung ist das noch ausreichend und ermöglicht eine Korrektur basierend auf einfachen Kennwerten wie Winkelfehler ( $f_{H\alpha}$ ,  $f_{H\beta}$ ), Balligkeit ( $c_\alpha$ ,  $c_\beta$ ) und Zahndicke. Bei komplexeren Korrekturen und hohen Genauigkeitsanforderungen wird es schwierig, z. B. zwischen Balligkeit, Rücknahme und Winkelfehler zu unterscheiden. Um direkt im ersten Schritt ein gutes Korrekturergebnis zu erzielen, macht es Sinn die gemessenen Daten direkt mit der Werkzeugmaschine auszutauschen und Korrekturen automatisiert zu berechnen. Kommen noch topographische Modifikationen hinzu, geht am Einsatz eines Berechnungsalgorithmus kein Weg mehr vorbei. Das typische Closed Loop Netzwerk ist in Bild 1 dargestellt.

Ein weiteres Beispiel für den Closed Loop in der Fertigung ist die Schleifbearbeitung von Zykloidenverzahnungen. Hier kommt es wesentlich auf die Form der Zähne an, wobei damit nicht nur die Zahnflanken, sondern die gesamte Zahngeometrie von Kopf- bis Fuß gemeint ist. Für die Bearbeitung wird die Geometrie als Punktwolke im Stirnschnitt beschrieben. Die Klingelnberg Präzisionsmesszentren als auch z. B. die Klingelnberg Schleifmaschine vom Typ Viper 500 greifen auf denselben Datensatz zu. Damit kann die Messmaschine zu jedem Punkt der Sollgeometrie die Abweichungen liefern und die Bearbeitungsmaschine sowohl Kinematik als auch Schleifscheibengeometrie dementsprechend anpassen. Hierbei helfen konsistente Daten, in einem automatischen Korrekturschritt direkt zu einem guten Ergebnis zu kommen. Die Messung einer Zykloidenverzahnung auf einer Klingelnberg P-Maschine ist in Bild 2 zu sehen.



Bild 1: Closed Loop Netzwerk

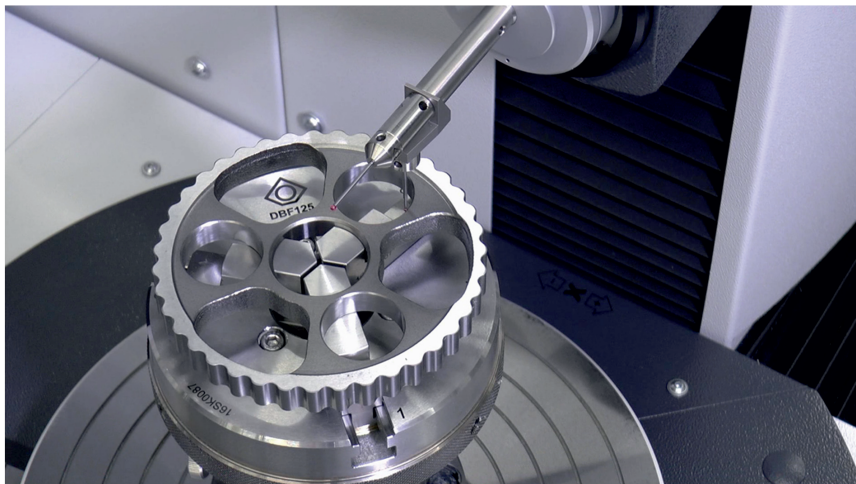


Bild 2: Messung einer Zykloidenverzahnung auf einem Klingenberg Präzisionsmesszentrum

### 3. Closed Loop in der Entwicklung

Die Durchgängigkeit von Daten ist nicht nur ein Thema in Produktion und Qualitätssicherung. Es können deutlich mehr Effizienzpotenziale gehoben werden, wenn mit der Entwicklung schon ganz vorne in der Prozesskette mit der Bereitstellung von Daten begonnen wird. Ein digitales Modell von Bauteilen und Systemen ist grundsätzlich nichts Neues. Jedoch eröffnet

eine konsistente Datenhaltung über die ganze Prozesskette Verbesserungspotenziale, mit deren Hilfe eine weitergehende Effizienzsteigerung möglich ist. Werden Daten in der Entwicklung so bereitgestellt, dass sowohl Produktions- als auch Messmaschinen auf diese zurückgreifen können, kann eine sogenannte „Single Source of Truth“ geschaffen werden. Damit können Prozesse zentral definiert, abgelegt und dann an jedem Ort der Welt repliziert werden. Gerade für Unternehmen die global Entwickeln und Produzieren ergeben sich hieraus neue Möglichkeiten.

In Bild 3 wird gezeigt, wie der Closed Loop in der Entwicklung und in der Produktion zusammenarbeiten. Auf der linken Seite ist die Auslegung eines Getriebes einschließlich der Verzahnung mit allen Zahnflankenmodifikationen dargestellt. Der Klingelberg Gear Designer ermöglicht dabei für Stirnräder die Simulation des Fertigungsprozesses. Das Ergebnis ist die Zahnflankentopographie, die mit dem gewählten Fertigungsverfahren erzielt wird. Diese Topographie kann ohne den Umweg über kostspielige Prototypen in die Getriebeauslegung zurückgespielt werden. Dies ermöglicht es, in der Auslegung umfassend zu untersuchen, ob das in der Produktion zu erwartende Ergebnis mit seinen prozessimmanenten Abweichungen (z. B. Verschränkung) weiterhin die Anforderungen aus der Auslegung erfüllt.



Bild 3: Closed Loop kooperieren in Entwicklung und Produktion

Gleichzeitig stellt der Gear Designer die Daten für die Fertigung zur Verfügung. Das bedeutet, dass sowohl die Bearbeitungs- als auch die Messmaschine auf denselben Datensatz zurückgreifen. Über den Klingelberg Gear Corrector wird dann die Maschinenkorrektur berechnet, um die Ist-Geometrie möglichst nah an die Soll-Geometrie heranzubringen. Wichtig ist hierbei,



dass für die Korrektur nicht eine theoretische Soll-Geometrie genommen wird, sondern die vom Gear Designer unter Berücksichtigung des Fertigungsprozesses vorgegebene. Damit beschränkt sich die Korrektur auf die Abweichungen aus dem Fertigungsprozess. Im Ergebnis kann so eine Topographie über die gesamte Zahnflanke erreicht werden, die nur noch im Rahmen der unvermeidbaren Streuung einer Produktionsmaschine von der vorgegebenen Soll-Geometrie abweicht.

### 3. Zusammenfassung

Im Rahmen des Vortrags auf der VDI-Tagung Verzahnungsmesstechnik werden konkrete Beispiele vorgestellt, wie mithilfe von Daten innerbetriebliche Prozesse effizienter gestaltet werden könne. Ein Beispiel hierfür ist der Closed Loop, der nicht nur auf die Verzahnungsfertigung beschränkt bleibt, sondern auch auf die Auslegung erweitert wird. Damit wird die Effizienz der Produktion und der gesamten Prozess- und Auslegungskette gesteigert. Ein Beispiel hierfür ist der digitale Zwilling in der Auslegung. In Kenntnis der prozessbedingten Abweichungen aus der Fertigung können durch Simulation teure Korrekturschleifen eingespart werden, die bisher nur durch die aufwändige und teure Fertigung von Prototypen möglich waren.



# Flächenbezogene Modifikations- und Abweichungsparameter für flächenhaft erfasste Verzahnungs-Messdaten

## Area-related modification and deviation parameters for gear data captured by areal measurements

Prof. Dr.-Ing. **Gert Goch**, TriMetrik – Hamburg;

Dr.-Ing. **Anke Günther**, Reishauer AG, Wallisellen, Schweiz;

**Yue Peng**, MSc, University of North Carolina at Charlotte (UNCC), USA

### Kurzfassung

Die heute verwendeten, linienförmigen Mess- und Auswerteverfahren für Zylinderräder und die genormten Modifikations- und Abweichungsparameter (z.B.  $C_{H\alpha}$ ,  $C_{\beta}$ ,  $f_{H\alpha}$ ,  $f_{\beta}$ ,  $F_{p1}$ ) sind nur bedingt geeignet, die zunehmend komplexer werdende Zahnflanken-Geometrie zu erfassen, Störungen im Fertigungsprozess mittels geeigneter Abweichungsparameter zu erkennen und über deren Rückkopplung zu korrigieren. Dieser Beitrag stellt eine Erweiterung des Spektrums bekannter Parameter auf flächenhafte Modifikations- und Abweichungsparameter vor. Er soll die Möglichkeiten einer flächenhaften Erfassung und effektiven Auswertung von Zylinderrad-Messdaten mit mehreren 10.000 Messpunkten pro Zahnflanke darlegen. Mathematische und softwaretechnische Probleme sollen nur „gestreift“ werden. Hierzu liegen Dissertationen und einige Artikel in Fachzeitschriften vor. Stattdessen sollen direkte Vergleichs-Messungen und -Auswertungen zwischen konventionell-linienhafter Prüfung und flächenhafter Prüfung an denselben Zahnrädern vorgestellt werden. Hierfür liegen Ergebnisse für ein kalibriertes Modifikationsnormal und eine Vielzahl anderer Zylinderräder vor. Anhand dieser Ergebnisse sollen die Vor- und Nachteile der vorgeschlagenen flächenhaften Parameter analysiert und ihre Eignung für eine Rückführung von Messergebnissen in industrielle Produktionsprozesse diskutiert werden.

### 1. Einleitung

Für Zylinderrad-Getriebe mit hohen und höchsten Spezifikationen, z.B. in der Automobiltechnik, sind geometrische Modifikationen der Zahnflanken wie Balligkeiten, Rücknahmen sowie Modifizierung von Eingriffs- und Schrägungswinkel schon seit Jahrzehnten unverzichtbar. Vielfalt und Komplexität dieser Modifikationen nehmen stetig zu, z.B. in Form von asymmetrischen Balligkeiten und Rücknahmen oder absichtsvoll eingebrachten, kleinen Welligkeiten. Mit dieser zunehmenden Komplexität der Zahnflankengeometrie verfolgen die

Getriebeentwickler u. a. das Ziel, die Geräuschemissionen und Schwingungen zu reduzieren und gleichzeitig die Lebensdauer der Getriebe zu erhöhen.

Die gestiegenen Anforderungen an die Zahnflanken-Geometrie haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass neben der konventionellen, linien-orientierten Zylinderrad-Prüfung (je eine Profil- und Flankenlinie auf beiden Flanken von 4 Zähnen) die Ist-Geometrie der Zahnflanken auch flächenhaft erfasst wird. Dies ist sowohl mit Koordinatenmessgeräten (Coordinate Measuring Machines, CMMs) oder Verzahnungsprüfgeräten (Gear Measuring Instruments, GMIs) als auch mit speziellen optischen oder taktilen Messsystemen (z.B. Wälzscanner) möglich. CMMs oder GMIs, die zusätzlich zum taktilen Tastsystem auch mit geeigneten optischen Sensoren ausgestattet sind, ermöglichen sowohl eine taktile als auch eine optische oder kombiniert taktil-optische Messpunkteerfassung. Mit allen genannten Antastverfahren lässt sich ein flächenhafter, qualitativer Soll-Ist-Vergleich der Flankengeometrie vergleichsweise einfach realisieren. Dagegen ist eine quantitative Beurteilung nur punktuell, oder eingeschränkt durch Farbcodierung oder mittels perspektivischer Darstellung möglich. Unterschiede bei den genannten Antastverfahren ergeben sich hauptsächlich bezüglich der erforderlichen Messzeit und z.T. in der erreichbaren Messunsicherheit.

## 2. Bedarf flächenhafte Zylinderrad-Abweichungsparameter

Aus Sicht der Messdaten-Auswertung ist die "Herkunft" der erfassten Messdaten von eher untergeordneter Bedeutung. Hier stellt sich das Problem, wie man die komplexen flächenhaften Modifikationen und Abweichungen der Zahnflanken-Geometrie mit wenigen Parametern charakterisieren und in den Fertigungsprozess zurückführen kann. Die heute verwendeten und genormten Modifikations- und Abweichungsparameter (z.B.  $C_{H\alpha}$ ,  $C_{\beta}$ ,  $f_{H\alpha}$ ,  $f_{H\beta}$ ,  $F_p$ ,) sind hierfür nur sehr bedingt geeignet, da sie sich auf einzelne Profil- und Flankenlinien bzw. auf einzelne Punkte (Teilung, Rundlauf) beziehen. Damit steht die Auswertung von Zylinderrad-Messdaten heute vor einem ähnlichen Problem wie die Rauheitsmesstechnik vor etwa 30 Jahren. Damals konnte mit taktilen und / oder optischen Messverfahren eine Werkstückoberfläche zwar flächenhaft erfasst werden. Für die Auswertung und quantitative Charakterisierung der Oberfläche standen aber nur die konventionellen  $R$ -,  $W$ - und  $P$ -Parameter zur Verfügung, welche nur Antastpunkte entlang einzelner Linien auswerten können. Die Lösung bestand in der Einführung von  $S$ -Parametern, vorgeschlagen von K. Stout et al. (1993) [1], welche die technisch-geometrische Bedeutung der entsprechenden  $R$ -Parameter weitgehend übernehmen, aber die Auswertung auf ein Flächenareal der Werkstückoberfläche statt auf eine einzelne Linie beziehen.

Für die Auswertung flächenhaft erfasster Zylinderrad-Messdaten schlägt dieser Beitrag eine ähnliche Vorgehensweise vor. Das Spektrum der heute verwendeten Modifikations- und Abweichungsparameter wird erweitert um flächenhafte Parameter (Vorschlag:  $C_{H\alpha}^A$ ,  $C_{H\beta}^A$ ,  $f_{H\alpha}^A$ ,  $f_{H\beta}^A$ ,  $F_p^A$ , wobei das hochgestellte "A" für "Aeral"="flächenhaft" steht). Der geometrische Informationsgehalt und die technische Interpretation der einzelnen Parameter soll so weit wie möglich beibehalten werden, was bis auf wenige Ausnahmen (z.B.  $f_{\alpha}$ ,  $f_{\beta}$ ) auch möglich ist. Die gleichbleibende technische Bedeutung kommt durch die gleichen Parameter-Formelzeichen zum Ausdruck.

Für die flächenhafte Auswertung der erfassten "Punktwolke" einer Zahnflanke bietet sich die Approximation durch zweidimensionale (2D-) Tschebyschow-Polynome an. Hierfür sprechen im Wesentlichen 3 Vorteile:

- a) Die ersten 6 Terme von 2-D-Tschebyschow Polynomen (üblicherweise mit  $C_0$  bis  $C_5$  bezeichnet) entsprechen genau der flächenhaften Modifikations- und Abweichungs-Geometrie von Zylinderrad-Flanken (Steigung, symmetrische Balligkeit und Verschränkung), wobei der  $C_0$ -Term eine konstante Abweichung über der ganzen Zahnflanke, d.h. die Teilungsabweichung charakterisiert.
- b) 2-D-Tschebyschow Polynome bilden ein orthogonales Funktionensystem. Das bedeutet, dass jeder Term genau einen Modifikations- und Abweichungsparameter aus der "Punktwolke" extrahiert und ein "Übersprechen" zwischen den einzelnen Parametern ausgeschlossen werden kann.
- c) Für die Approximation der "Messpunktwolken" sind keine Gleichungssysteme höherer Ordnung zu lösen, wodurch bekannte numerische Probleme vermieden werden können. Stattdessen können die einzelnen Terme der 2-D-Tschebyschow Polynome nacheinander mit Hilfe von Zweifachintegralen bestimmt werden.

### 3. Flächenhafte erfasste Zylinderrad-Messdaten

Wie bereits in früheren Veröffentlichungen dargelegt wurde, z.B. in [2-7], kann die konventionelle Verzahnungsmesstechnik entsprechend aktueller Normen und Richtlinien, z.B. [8-10], die o.g. erhöhte geometrische Komplexität moderner Verzahnungen nur eingeschränkt erfassen. Bild 1 illustriert dies am Beispiel einer rechten Zahnflanke mit Verschränkungs-Abweichung (Twist). Eine konventionelle Zylinderrad-Prüfung umfasst typischerweise nur jeweils eine Profil- und Flankenlinie auf beiden Flanken von 4 Zähnen (rot in Bild 1) sowie einen Punkt in der Mitte aller Zahnflanken (Teilung und Rundlauf). Um die Verschränkung zu erfassen wären zusätzlich mindestens zwei Profilmessungen je Flanke (z.B. P1 u P51, gelb in Bild 1)

oder zwei Flankenlinien-Messungen (z.B L1 und L21, blau) erforderlich. Diese Linien sind auch in den Bildern 8 und 9 markiert.

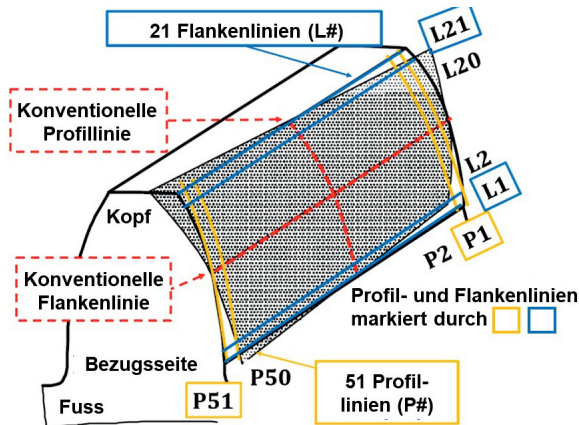


Bild 1: Zylinderradflanke mit Verschränkungs-Abweichung; Position der angetasteten Profile (gelb, P1 bis P51) und Flankenlinien (blau, L1 bis L21); siehe auch Bilder 8 und 9.

Die hier vorgeschlagenen Auswertungsverfahren und flächenhaften Abweichungsparameter wurden an einer Vielzahl verschiedener Zahnräder (> 20) getestet, darunter auch ein kalibriertes Zylinderrad-Normal (sog. „Modifikations-Normal“).

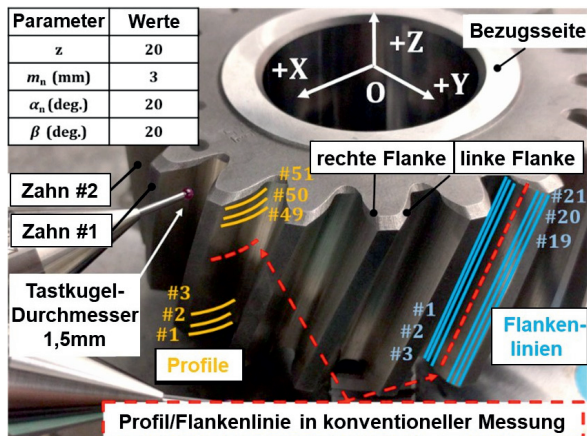


Bild 2: Zylinderrad, verwendet zur Untersuchung von flächenhaften Mess- und Auswerteverfahren; rot: konventionelle Prüfung, gelb: Profillinien 1 bis 51; blau: Flankenlinien 1 bis 21

Bei allen Zahnrädern wurden jeweils beide Flanken aller Zähne flächenhaft sowohl taktil mit einem hochgenauen CMM (Leitz PMM, jeweils 51 Profil- und 21 Flankenlinien-Messungen je Flanke, siehe Bild 2) als auch mit einem optisch messenden CMM, ausgerüstet mit einem Triangulations-Lichtschnitt Tastkopf (Nikon HNC 3030, Bild 3) erfasst. Letzteres Messgerät erfasst je nach Einstellung mehrere 10.000 bis mehrere 100.000 Messpunkte pro Flanke. Die meisten der untersuchten Zahnräder wurden zusätzlich mit einem oder mehreren GMIs konventionell (d.h. linienhaft) geprüft.

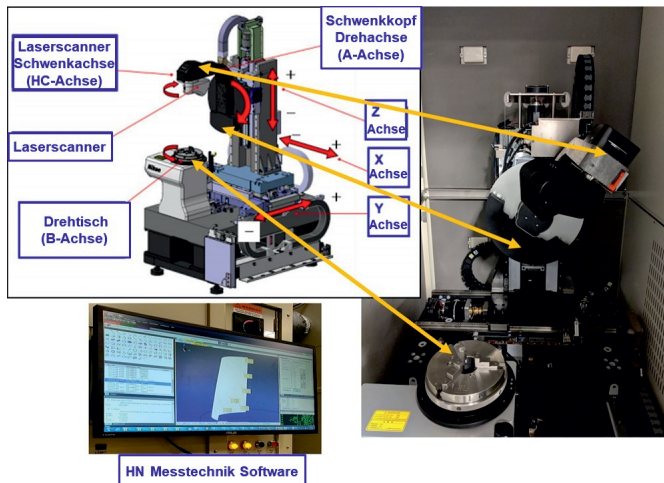


Bild 3: Gerätekonzept optisch messendes CMM mit 3 Linear- und 3 Rotationsachsen [15]

#### 4. Flächenhafte Auswertung von Zylinderrad- Messdaten

##### 4.1 Soll-Ist-Vergleich und flächenhafte Abstandsfunktion für Zylinderrad- Messdaten

Bei einigen optisch-flächenhaften Messverfahren ergibt sich gegenüber den taktilen Zylinderrad-Prüfungen (linienhaft oder flächenhaft) das Problem, dass die Position der einzelnen Messpunkte aus dem Antastvorgang nicht hinreichend genau abgeleitet werden kann. Dies gilt auch nach vorheriger Ausrichtung. Bei einer mathematischen 3-D-Beschreibung der Soll-Evolventenflanken, wie sie seit etwa 30 Jahren bekannt ist (z.B. [2-7]), stellt dies jedoch kein Problem dar.

Die folgenden Ausführungen gehen von einem ausgerichteten Zylinderrad aus. Für eine Schrägverzahnung (d.h.  $\beta_b \neq 0$ ) lässt sich die 3-D-Flankenengeometrie von den ebenen Evolventengleichungen (1) ableiten, indem der Ursprung einer ebenen Evolvente zusammen mit der Evolvente selbst in Z-Richtung auf dem Grundzylinder entlang  $\beta_b$  „durchgeschraubt“ wird (siehe Bild 4).

$$\begin{cases} x = r_b \cdot [\cos(\xi + \Lambda(Z)) + \xi \cdot \sin(\xi + \Lambda(Z))] \\ y = r_b \cdot [\sin(\xi + \Lambda(Z)) - \xi \cdot \cos(\xi + \Lambda(Z))] \\ Z = Z \end{cases} \quad (1)$$



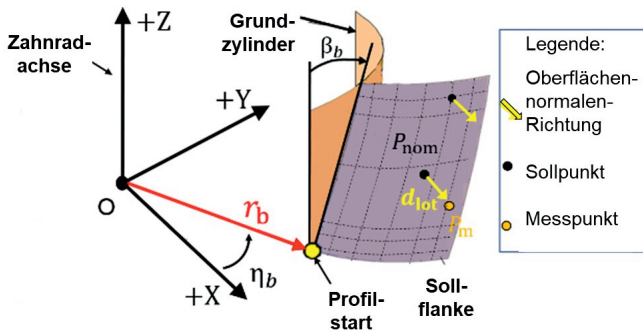


Bild 4: Erzeugung einer schrägverzahnten 3-D-Zylinderradflanke durch „Schrauben“ des Startpunktes einer ebenen Evolvente (gelber Punkt) entlang  $\beta_b$  auf dem Grundzylinder.

In Gleichung (1) beschreibt  $\xi$  den Wälzwinkel und

$$\Lambda(z) = \eta_b + Z \cdot \tan \beta_b / r_b \quad (2)$$

die Winkelposition des Ursprunges der „durchgeschraubten“ ebenen Evolvente in der jeweiligen Höhe  $Z$  (gelber Punkt in Bild 4).  $r_b$  ist der Radius des Grundkreises, und  $\eta_b$  ist der Lücken-Halbwinkel im Grundkreis.

Auf dieser Basis wurde in [11] eine Formel zur Berechnung des lotrechten Abstandes  $d_{lot}$  von irgendeinem Messpunkt (Index  $j$ ) auf Zahn Nr.  $i$  zum zugehörigen Fußpunkt dieser Abstandsgerade entwickelt (Bild 4).

$$d_{lot,nm,j,i} = \frac{r_b}{\sqrt{1 + (\tan \beta \cos \alpha_t)^2}} \left[ \sqrt{\frac{s_{j,i}^2}{r_b^2} - 1} - \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{s_{j,i}^2}{r_b^2} - 1} \right) - \gamma_{j,i} + \eta_b + Z_{j,i} \frac{\tan \beta_b}{r_b} \right] \quad (3)$$

Darin sind  $(s_{j,i}, \gamma_{j,i}, z_{j,i})$  die Zylinderkoordinaten von Messpunkt Nummer  $j$  auf Zahn Nummer  $i$  und  $\alpha_t$  der Eingriffswinkel. Der Index „nm“ bedeutet „nicht modifiziert“, d.h. dieser  $d_{lot}$ -Abstand kennzeichnet die Distanz zwischen Messpunkt  $(i,j)$  und der idealen Evolventenflanke  $i$ , senkrecht zur Zahnflanken-Oberfläche.

In Gleichung (3) gehen die Koordinaten des Fußpunktes von  $d_{lot}$  **nicht** ein. In anderen Worten: Die Kenntnis der angetasteten Sollpunkte ist für die flächenhafte Auswertung auf Basis der  $d_{lot}$ -Formel nicht erforderlich. Es werden nur die Istpunkte, die Basis-Geometrieparameter und die beabsichtigten Modifikationen des geprüften Rades verwendet.

Die Topographie-Darstellung aller  $d_{\text{lot}}$ -Abstände einer Flanke bildet eine vektorielle Abstandsfunktion  $\mathbf{d}_{\text{lot}}$ . Setzt man  $\mathbf{d}_{\text{lot}} = 0$ , so ist dies äquivalent zu einer Flächenfunktion  $F((s_{j,i}, \gamma_{j,i}, z_{j,i}); r_b, \alpha_i, \beta, z) = 0$  welche mathematisch die ideale Evolventenflanke beschreibt. Dies bedeutet, dass die Funktion  $\mathbf{d}_{\text{lot}} = F(s_{j,i}, \gamma_{j,i}, z_{j,i}) = a$  eine Äquidistanzfläche beschreibt, welche einen konstanten Abstand  $a$  zur idealen Evolventenflanke aufweist.

Diese Interpretation der  $d_{\text{lot}}$ -Formel bietet zwei Vorteile für die Verzahnungsmesstechnik:

- Wie für andere Geometrien, welche mit Hilfe der CMM-Technologie geprüft werden und deren Solloberfläche sich durch Funktionen des Typs  $F(x, y, z) = 0$  beschreiben lassen (z.B. Ebenen, Zylinder, Kugeln, Kreise usw.), sind auch für den Soll-Ist-Vergleich von Zylinderrad-Messdaten weder Sollpunkt-Koordinaten noch Oberflächen-Normalenrichtungen erforderlich.
- Deshalb ist auch die Vorgabe bestimmter Antastpositionen und -bahnen nicht notwendig. Messunsicherheits-Anteile, welche auf die Nicht-Einhaltung vorgegebener Antastwege zurückzuführen sind, können daher vernachlässigt werden.

Bild 5 stellt schematisch die  $d_{\text{lot}}$ -Abstände (Pfeile) zwischen den Messpunkten (rot) und den zugehörigen Sollpunkten (dunkelgrün) einer Zylinderradflanke dar. Abstrahiert man von der individuellen Geometrie des geprüften Zahnrades, so kann man die ideale Evolventenflanke (= Soll-Zahnflanke ohne Modifikationen) zusammen mit den erfassten  $d_{\text{lot}}$ -Abständen auf eine  $u$ - $v$ -Ebene abbilden. Wie in Bild 5b) skizziert, stehen die  $d_{\text{lot}}$ -Abständen auf dieser Ebene wieder senkrecht, sind aber jetzt parallel angeordnet. Diese Vorgehensweise ist konsistent mit der Messdaten-Auswertung in der konventionellen Verzahnungs-Messtechnik. Auch dort werden die Soll-Profilinie (Evolvente) und die Soll-Flankenlinie (Schraubenlinie) in den Abweichungsdiagrammen durch Geraden ersetzt. Die  $u$ - $v$ - $d$ -Koordinaten beschreiben die Lage der Messpunkte in Profilrichtung ( $u$ , skaliert in Wälzlängen) bzw. in Flankenlinien-Richtung ( $v$ , entsprechend Z-Koordinate des Rades). Folglich charakterisiert die  $d$ -Koordinate den  $d_{\text{lot}}$ -Abstand eines Messpunktes. Eine ideale Evolventenflanke ohne Modifikationen, in Bild 5a hellgrün dargestellt, entspricht der Grundebene ( $d = 0$ ) in Bild 5b).

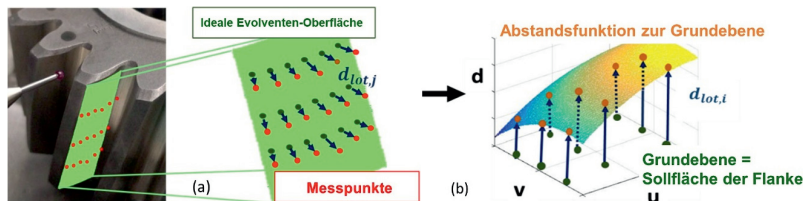


Bild 5: Flächenhafte Auswertung von Zylinderrad-Messdaten auf Basis der  $d_{tot}$ -Formel  
a) Vektoren der  $d_{tot}$ -Abstände zwischen Messpunkten (rot) und idealer Evolventenflanke (hellgrün) b)  $d_{tot}$ -Abstände und Abstandsfunction im  $u$ - $v$ - $d$ -Koordinatensystem

#### 4.2 Modifikationen und holistische Auswertung von Zylinderrad- Messdaten

Modifikationen von Zahnrädern, d.h. beabsichtigte Abweichungen der Zahnflanke von der idealen Evolventenfläche, sind seit vielen Jahrzehnten Stand der Technik. Auch in ISO 21771 [10] sind die verschiedenen Modifikationsformen bereits dreidimensional dargestellt (siehe auch Bild 6, jeweils linkes Teilbild), wenngleich die mathematischen Definitionen von Balligkeiten, Steigungen und Rücknahmen in [10,12] noch zweidimensional und linienförmig erfolgen. Alle Modifikationen verfolgen das Ziel, die gewünschten Paarungseigenschaften von Radsätzen zu erreichen und sicherzustellen und damit die wesentlichen Funktionseigenschaften und Spezifikationen von Getrieben zu erfüllen (Leistung, Geräuschemission, Lebensdauer, Masse, Volumen, Kosten).

Bei Zahnrädern mit Modifikationen ist die Soll- oder Bezugs-Flankenfläche nicht länger die Nullebene in Bild 5b), sondern die Überlagerung der beabsichtigten Modifikationen. Für eine praxiserichte, flächenhafte Auswertung sind daher auch dreidimensionale, mathematische Beschreibungen für die heute üblichen Modifikationen erforderlich. Diese mathematischen Beschreibungen sollten auch auf neuere Modifikationsarten (asymmetrische positionierte Balligkeiten, Dreieckförmige Rücknahmen, gezielt eingebrachte Welligkeiten) übertragbar sein.

Quantitativ lässt sich die lokale geometrische Ausprägung der einzelnen Modifikationsarten, ebenso wie die  $d_{tot}$ -Abstände, in Normalenrichtung zur Flankenoberfläche angeben. Dies hat drei Vorteile:

- Die Wirkungsrichtungen der lokal variierenden Modifikationen stimmen überein mit der Kraft-Übertragungsrichtung.
- Die additive Überlagerung mehrerer Modifikationen lässt die Normalenrichtungen der resultierenden Gesamt-Flankenoberfläche unverändert.

- Linearkombinationen verschiedener Modifikationsarten sind möglich, um die Flankenoberfläche gezielt gestalten zu können.

Dadurch können auch die verschiedenen Modifikationsarten als kontinuierliche, flächenhafte Funktionen im  $u$ - $v$ - $d$ -Koordinatensystem beschrieben werden, relativ zur Nullebene. Da sowohl (beabsichtigte) Modifikationen als auch (unbeabsichtigte) Abweichungen in Oberflächen-Normalenrichtung definiert sind, ergibt sich die tatsächliche (Ist-) Flankenoberfläche aus der linearen Addition dieser beiden Anteile. In anderen Worten, um die unbeabsichtigten Abweichungen eines Zylinderrades zu ermitteln, muss man von der erfassten, vektoriellen Abstandsfunktion  $d_{\text{Ist}}$  die beabsichtigten Modifikationsfunktionen subtrahieren.

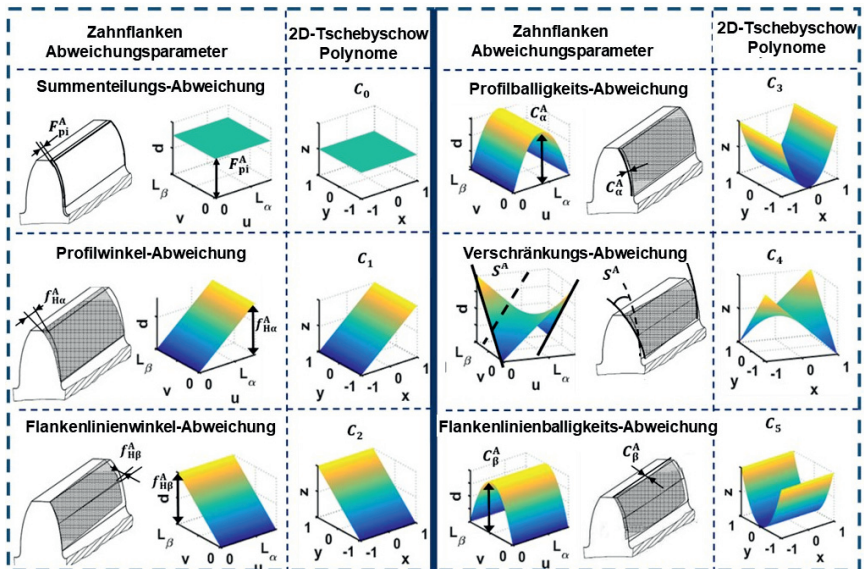


Bild 6: Vergleich von Tschebyschow-Polynomen mit flächenhaften Modifikationen und Abweichungen

Die (unbeabsichtigten) Abweichungen von Zahnrädern können von einer Vielzahl von Ursachen herrühren. Im Allgemeinen kann man zwei Abweichungs-Kategorien unterscheiden:

- Zu der ersten Kategorie zählen solche Abweichungen, die als gleichartige geometrische Muster an allen Zähnen eines Rades auftreten. Sie sind auf Ursachen im Fertigungsprozess zurückzuführen, die sich auf alle Zähne des jeweiligen Zahnrades in gleicher Weise auswirken. Hierzu zählen z.B. Abweichungen der Werkzeuggeometrie (falsche Wahl oder fehlerhaftes Werkzeug, Verschleiß), oder fehlerhafte Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück (Positionierungen, Zustellungen oder Vorschübe), die sich bei jedem Zahn wiederholen. Sie wirken sich auf die Abweichungsmuster aller Zähne in gleicher Weise aus.
- Die zweite Art von Abweichungen tritt zumeist nur an einzelnen Flanken auf. Sie können verursacht werden durch die Überlagerung verschiedener Umgebungsbedingungen mit dem Fertigungsprozess, z.B. Temperaturgradienten innerhalb der Werkzeugmaschine, des Werkzeugs oder des Werkstücks, Verschleiß, Schwingungen oder inhomogene Werkstoffeigenschaften.

Die folgenden Ausführungen schlagen daher ein holistisches Auswerteverfahren vor, mit dem die gleichbleibenden Abweichungsmuster, beobachtet an allen Zähnen, von den individuellen Abweichungstypen einzelner Zähne separiert und ermittelt werden können. Beide Abweichungskategorien sind erforderlich, um ein gefertigtes Rad zu beurteilen und den zugehörigen Fertigungsprozess zu beherrschen. Die wiederkehrenden Abweichungsmuster an allen Zähnen korrelieren mit systematischen Abweichungen im Fertigungsprozess, während die individuellen Abweichungen einzelner Zähne ein Maß für die Stabilität und Qualitätsfähigkeit des Prozesses sein können. Konsequenterweise ist für die Quantifizierung und Beurteilung beider Abweichungs-Kategorien eine Unterscheidung der jeweiligen Abweichungsparameter erforderlich. Die Parameter für gleichartige Abweichungsmuster, beobachtet an allen Zähnen, sollen durch den Index "g" für "global" oder "gesamt" oder "generell" gekennzeichnet werden, während Abweichungsmuster einzelner Zähne durch den Index "i" für individuell und / oder die jeweilige Zahnnummer unterschieden werden. Tabelle 1 fasst einige Modifikationsarten und die zugehörigen Abweichungsparameter zusammen.

Tabelle 1: Definition und Formelzeichen für einige Modifikationsarten und die jeweiligen Abweichungsparameter für die konventionelle-linienförmige Auswertung ("Line") und die flächenhafte Auswertung ("Areal"); "xx" = Zahnnummer)

Definition	Line	Areal	Areal global	Areal indiv.
Profilwinkel-Modifikation	$C_{Ha}$	$C_{Ha}^A$		
Profilwinkel-abweichung	$f_{Ha}$	$f_{Ha}^A$	$f_{Hag}^A$	$f_{Haixx}^A$
Profilballigkeit	$C_a$	$C_a^A$		
Profilballigkeits-Abweichung	$N.A.^{1)}$	$f_{Ca}^A$	$f_{Cag}^A$	$f_{Caixx}^A$
Profilform-Abweichung	$f_{f\alpha}$	$f_t^A^{2)}$	$f_{tg}^A$	$f_{tixx}^A$
Flankenlinienform-Abweichung	$f_{f\beta}$			
Profil-Gesamtabweichung	$F_a$	$F_t^A^{3)}$	$F_{tg}^A$	$F_{tixx}^A$
Flankenlinien-Gesamtabweichung	$F_\beta$			
Einzelteilungs-Abweichung	$f_{pi}$	$f_{pi}^A$		
Summenteilungs-Abweichung	$F_{pi}$	$F_{pi}^A$		

1) VDI/VDE 2612-1 definiert hier implizit die Differenz  $C_{a\text{ Ist}} - C_{a\text{ Soll}}$   
2) VDI/VDE 2612-1 definiert hier vergleichbar für die Topographieauswertung  $f_{zf}$   
3) VDI/VDE 2612-1 definiert hier vergleichbar für die Topographieauswertung  $F_z$

4.3 Flächenhafte Approximation von Zylinderrad-Messdaten durch 2-D-Tschebyschow Polynome

Die Auswertung von Messdaten mit Hilfe von zweidimensionalen, orthogonalen Polynomen kann bei bestimmten technischen Anwendungen erhebliche Vorteile aufweisen. Ein bekanntes Beispiel ist die Approximation der Messdaten kreisrunder optischer Komponenten, v.a. Linsen, durch Zernike Polynome. Der Vorteil besteht darin, dass aufgrund der Orthogonalität der Zernike-Polynome wesentliche optische Abbildungsfehler einer Linse (z.B. Koma, Astigmatismus) durch genau einen Term des Polynoms charakterisiert werden. Das bedeutet, dass durch die Zernike-Approximation einer gemessenen Linse "automatisch" die Vielzahl möglicher Abbildungsfehler in die einzelne Aberrationstypen zerlegt wird, ohne jedes "Übersprechen".

Da die Geometrie von Zylinderradflanken auf einem rechteckigen Gebiet definiert ist, wurden andere orthogonale Polynome untersucht, um eine ähnliche Zerlegung der Modifikationen und Abweichungen einer Zahnflanke in einzelne Polynomterme zu erreichen. Dabei soll jeder Polynomterm genau einen Modifikationstyp abbilden. Diese Anforderungen werden durch zweidimensionale (2-D-) Tschebyschow-Polynome sehr weitgehend erfüllt. Sie sind definiert auf einem quadratischen  $x$ - $y$ -Gebiet mit den Grenzen  $-1 \leq x, y \leq +1$ . Die einzelnen 2-D-Tschebyschow-Polynomterme  $C_n(x, y)$  sind definiert als Produkt von zwei eindimensionalen Tschebyschow-Polynomtermen

$$C_n(x, y) = T_p(x) \cdot T_q(y) \quad (4)$$

Hier bezeichnet  $n$  den Index des 2-D-Tschebyschow-Polynomterms und  $p$  und  $q$  die Ordnung in der jeweiligen Achsenrichtung. Die mathematische Vorgehensweise, der Nachweis der Orthogonalität der Tschebyschow-Polynomterme und die Berechnung von Normierungsfaktoren werden im Detail [5, 13, 14] erläutert. Die jeweils rechten Teilbilder in Bild 6 zeigen die ersten 6 Terme  $C_0(x, y)$  bis  $C_5(x, y)$  eines 2-D-Tschebyschow-Polynoms. Vergleicht man die einzelnen Terme mit den jeweiligen Modifikationsarten, so ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Polynomterme 1 und 2 mit den Steigungsmodifikationen sowie der Terme 3 und 5 mit den Balligkeitsmodifikationen. Der Term 0 stellt einen Offset oder Nullpunktverschiebung dar. Er lässt sich als Teilungsabweichung der gemessenen Zahnflanke interpretieren. Term 4 charakterisiert eine Verschränkung (Twist).

Gleichung (5) gibt den Ansatz wieder. Die gemessene Abstandsfunktion  $\mathbf{d}_{\text{lot}}(u, v)$  (siehe Kap. 4.3.1) wird durch  $\mathbf{d}_{\text{lot}}'(u, v)$  angenähert und durch eine Linearkombination von sechs (0 bis 5) zweidimensionalen Tschebyschow-Polynomtermen approximiert.

$$\mathbf{d}_{\text{lot}}(u, v) \approx \mathbf{d}_{\text{lot}}'(u', v') = \sum_{i=0}^5 A_i C_i(u', v') \quad (5)$$

Hierfür muss die Abstandsfunktion zunächst auf das o.g. quadratische Gebiet  $[-1, 1] \times [-1, 1]$  abgebildet werden, auf dem 2-D-Tschebyschow-Polynome definiert sind. Die zugehörige Transformation bildet die Fußpunkte der einzelnen gemessenen  $\mathbf{d}_{\text{lot}}(u, v)$ -Abstände auf das Definitionsgebiet  $-1 \leq u', v' \leq +1$  ab. Die Koeffizienten  $A_i$  in Gleichung (5) werden einzeln durch Doppelintegrale der Form

$$A_i = \frac{1}{K} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{D'(u', v') \cdot C_i(u', v') du' dv'}{\sqrt{1-u'^2} \cdot \sqrt{1-v'^2}} \quad (6)$$

mit  $K$  als Normalisierungsfaktor bestimmt. Die drei entscheidenden Vorteile einer Approximation von Zylinderrad-Messdaten durch 2-D-Tschebyschow-Polynome wurden bereits in Kap. 2

zusammengefasst. Mit Gleichung (6) kann auch der Betrag für jeweils genau einen flächenhaften Modifikations- und Abweichungsparameter nacheinander berechnet werden.

## 5. Experimentelle Überprüfung der flächenhaften Auswertung von Zylinderrad-Messdaten durch 2-D-Tschebyschow-Polynome

### 5.1 Messungen eines Modifikations-Normals

Die in Kap. 4 erläuterten mathematischen Ansätze und Approximationsverfahren wurden zunächst durch aufwendige Simulationen geprüft [5]. Um zunächst den Ansatz der flächenhaften Auswertung von Zylinderrad-Messdaten durch 2-D-Tschebyschow-Polynome zu verifizieren, wurde ein kalibriertes Zylinderrad-Normal als Messobjekt gewählt (Bild 7). Dieses Normal weist auf den 36 linken Flanken jeweils unterschiedliche Modifikations-Typen auf (Balligkeiten, Steigungen, Rücknahmen, Welligkeiten; sog. "Modifikations-Normal"). Dabei sind die meisten Modifikationen mit 3 oder 4 verschiedenen Amplituden und Vorzeichen auf den einzelnen Zahnradflanken vorhanden. Bild 7 zeigt dieses Normal mit den wesentlichen Bestimmungsgrößen und einer Auswahl von 4 verschiedenen Modifikationen (Profil-Winkelmodifikation, Flankenlinien-Winkelmodifikation, Profilballigkeit, Flankenlinien-Balligkeit) an den Zähnen Nr. #1, #19, #20 und #30.

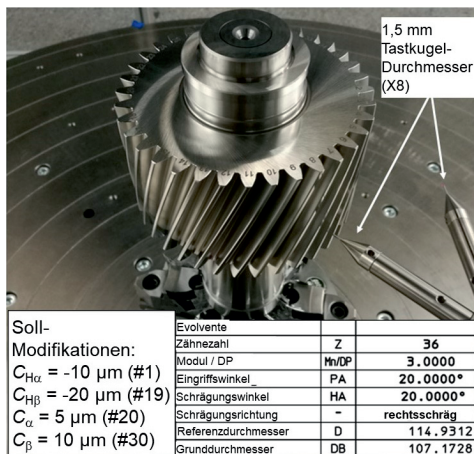


Bild 7: Kalibriertes Modifikationsnormal mit Bestimmungsgrößen und einer Auswahl von 4 Modifikationen, realisiert auf den linken Flanken der Zähne Nr. #1, #19, #20 und #30 (Quelle: FRENCO® Modifikationsnormal M)



Um die flächenhafte Auswertung mittels 2-D-Tschebyschow-Polynomen zu überprüfen, wurden beide Flanken aller Zähne dieses Normals sowohl taktil (99 Profillinien, CMM ohne Drehtisch) als auch optisch (CMM mit Lichtschnitt-Tastkopf nach dem Triangulationsprinzip, siehe Bild 3) gemessen. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse dieser Messung für die 4 in Bild 7 aufgeführten Zähne. Dabei zeigt Bild 7 die vom Hersteller des Normals angestrebten Beträge der einzelnen Modifikationen, während Tabelle 2 die realisierten Modifikationsbeträge gemäß Kalibrierschein enthält.

Die Ergebnisse von Tabelle 2 wie auch die Messungen und Auswertungen aller anderen Zähne des Normals haben ergeben, dass die ermittelten Modifikationsbeträge für die taktil-flächenhaften Messungen um weniger als  $\pm 2\mu\text{m}$  von den kalibrierten Werten abweichen. Dies ist umso bemerkenswerter, als die erfassten Messpunkte die Zahnflanken fast vollständig abdecken (statt 2 Linien pro Flanke) und die Anzahl der Messpunkte je Flanke um 2 bis 3 Größenordnungen höher ist. Die erweiterte Messunsicherheit für das verwendete Modifikationsnormal ist auf dem Kalibrierschein mit  $\pm 3\mu\text{m}$  spezifiziert, basierend auf Messungen mit linienförmigen Antast- und Auswertverfahren. Daraus lassen sich drei wesentliche Aussagen ableiten:

- Eine Auswertung mittels 2-D-Tschebyschow-Polynomen von flächenhaften Messdaten, erfasst über die gesamte Flankenoberfläche, führt zu Ergebnissen, die vergleichbar sind mit den Ergebnissen linienförmiger Mess- und Auswertverfahren. Sie liegen innerhalb der erweiterten Messunsicherheit für den konventionellen Messprozess, abgeschätzt durch Kalibrierschein-Angaben des Messobjektes (Modifikationsnormal).
- Die den einzelnen Polynomtermen zugeordneten, flächenhaften Modifikations- und Abweichungsparameter (zweite Spalte in Tabelle 1, hochgestelltes "A") können als flächenhafte Erweiterung der eingeführten linienförmigen (konventionellen) Modifikations- und Abweichungsparameter (erste Spalte in Tabelle 1) aufgefasst werden. Mit wenigen Ausnahmen (z.B. Profil- und Flankenlinien-Formabweichung) stimmt ihr geometrischer Informationsgehalt und ihre technische Interpretation mit den konventionellen und genormten Parametern überein.
- Da die ermittelten flächenhaften Modifikations- und Abweichungsparameter sowohl betragsmäßig als auch bezüglich ihres geometrisch-technischen Informationsgehalts weitgehend mit den konventionellen Parametern übereinstimmen, erscheinen sie auch in gleicher Weise für eine Rückkopplung von Messergebnissen in den Produktionsprozess geeignet.

Die zuvor getroffenen Aussagen gelten, mit Ausnahme der Profil- und Flankenlinien-Formabweichungen, auch für die Modifikationsbeträge, welche aus optisch-flächenhaften Messungen approximiert wurden. Allerdings weichen hier die ermittelten Beträge etwas mehr von den kalibrierten Werten ab ( $\pm 3\mu\text{m}$ ). Die Ausnahme bezüglich der Profil- und Flankenlinien-Formabweichungen hat fast ausschließlich physikalische Ursachen, die vom verwendeten Messprinzip (Laser-Triangulation mit Lichtschnitt-Sensor) herrühren.

Tabelle 2: Vergleich der flächenhaften Auswertungen von Messungen des Modifikationsnormals in Bild 7; Spalte 1: kalibrierte Modifikationsbeträge; Spalte 2: konventionelle Messungen mit linienförmiger Auswertung ("Line"); Spalte 3: taktile Messung mit CMM, 99 Profillinien; Spalte 4: optische Messung mit CMM, Triangulations-Lichtschnittsensor; Spalte 3 und 4: Flächenhafte Auswertung ("Areal") mittels 2-D-Tschebyschow-Polynomen (Zahlenwerte in  $\mu\text{m}$ ).

Modificationstyp	Kalibrier-schein	Line	Areal taktil	Areal optisch
Profilwinkel	-9,2	-9,3	-9,3	-7,3
Flankenlinien-Winkel	-17,6	-17,7	-17,8	-16,9
Profilballigkeit	5,7	5,5	5,1	6,8
Flankenlinien-Balligkeit	9,5	9,8	10,4	9,2

## 5.2 Messungen und Auswertungen weiterer Zylinderräder

Wie bereits in Kap. 3 erwähnt, wurden die hier vorgestellten Mess- und Auswertungsverfahren und die vorgeschlagenen flächenhaften Abweichungsparametern an mehr als 20 verschiedenen Zahnrädern getestet, zusätzlich zur Verifikation mit dem Modifikationsnormal. Alle vorhandenen Zahnräder wurden, genau wie das Normal in Kap. 5.1, taktil-linienförmig, taktil-flächenhaft und optisch-flächenhaft erfasst und mit den zugehörigen Verfahren ausgewertet. Kalibrierprotokolle lagen für keines dieser Räder vor, jedoch standen für einige Zahnräder Messprotokolle von GMLs zur Verfügung. Die Ergebnisse für die einzelnen Abweichungsparameter (flächenhaft oder linienförmig) wichen auch hier nur um maximal  $\pm 3\mu\text{m}$  voneinander ab, wiederum mit Ausnahme der Profil- und Flankenlinien-Formabweichungen bei optisch-flächenhafter Messung.

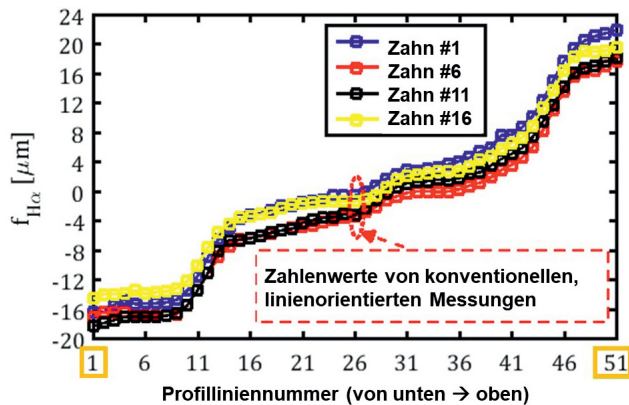


Bild 8: Profil-Winkelabweichungen von 51 Profilmessungen, erfasst an den rechten Flanken von 4 ausgewählten Zähnen des Zylinderrades, dargestellt in Bild 2

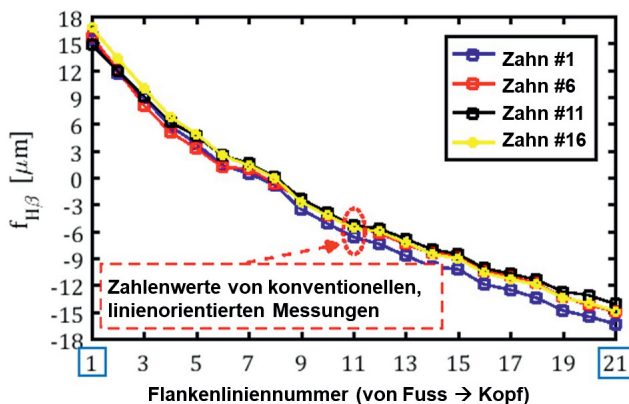


Bild 9: Flankenlinien-Winkelabweichungen von 21 Flankenlinien-Messungen, erfasst an den rechten Flanken von 4 ausgewählten Zähnen des Zylinderrades, dargestellt in Bild 2

Stellvertretend sollen hier Messungen an einem Zylinderrad entsprechend Bild 2 mit den gleichen Bestimmungsgrößen dargestellt werden. Dieses Zahnrad wurde durch kontinuierliches Wälzschleifen fertigbearbeitet und weist eine signifikante Verschränkungs-Abweichung auf. Wie in Kap. 3 sowie in den Bildern 1 und 2 erläutert, umfasste die taktil-flächenhafte Messung 51 Profillinien und 21 Flankenlinien. Die Bilder 8 und 9 zeigen die Ergebnisse der konventionellen Auswertung der einzelnen Profil- und Flankenlinien bezüglich der Winkelab-

weichungen  $f_{H\alpha}$  und  $f_{H\beta}$  an 4 ausgewählten Zähnen. Erwartungsgemäß zeigen diese beiden Bilder, dass eine konventionelle Messung mit jeweils einer Profil- und Flankenlinie pro Flanke (rote Markierung in der Mitte der Bilder 8 und 9, siehe auch Bilder 1 und 2) nicht geeignet ist, die hier vorliegende Verschränkungs-Abweichung zu detektieren.

### 5.3 Globale und individuelle flächenhafte Abweichungsparameter

Aus den Bildern 8 und 9 ist weiterhin erkennbar, dass die hier dargestellten, ausgewählten Zähne eine sehr ähnliches Abweichungsmuster aufweisen. Dies gilt auch für die in diesen Bildern nicht dargestellten Zähne. Die Ursache innerhalb des Produktionsprozesses ist aller Wahrscheinlichkeit nach systematischer Natur und auf das kontinuierliche Wälzschleifen als letztem Fertigungsschritt zurückzuführen. Es ist aber auch zu erkennen, dass sich die Abweichungsmuster von Zahn zu Zahn unterscheiden. Daher besteht das Ziel eines holistischen Auswertungsprozesses darin, zunächst diejenigen Abweichungsmuster zu identifizieren und mit den zugehörigen flächenhaften Abweichungsparametern zu quantifizieren, die für alle gleichgerichteten Flanken eines Zahnrades gleich sind. Diese wurden in Kap. 4.2 als globale Abweichungsparameter (Index "g") eingeführt (siehe Tabelle 1). Subtrahiert man diese globalen Abweichungen von allen Flanken eines Rades, so lassen sich die verbleibenden Abweichungsmuster aller Zähne weiter analysieren. Sie können weitere globale Abweichungen mit deutlich geringerer Amplitude als die zuvor ermittelten enthalten, jedoch meistens auch individuelle Abweichungsmuster, die sich von Zahn zu Zahn unterscheiden. Letztere wurden in Kap. 4.2 als individuelle Abweichungsparameter eingeführt (Index "i" und / oder jeweilige Zahnnummer; siehe Tabelle 1). Beide Arten von Abweichungsparametern sind für eine ganzheitliche Beurteilung von Zylinderrädern und den zugehörigen Produktionsprozess erforderlich. In der aktuellen industriellen Praxis weisen Zylinderrad-Messprotokolle hauptsächlich individuelle Abweichungsparameter auf. Den hier vorgeschlagenen globalen Abweichungsparametern kommen die in den meisten Messprotokollen aufgeführten Mittelwerte individueller Abweichungsparameter am nächsten. Sie basieren allerdings nur auf 4 konventionell erfassten und ausgewerteten Messlinien. Um die globalen Abweichungsparameter eines Zahnrades zu bestimmen, müssen zunächst die gemessenen Abstandsfunktionen  $d_{lot}(u, v)$  aller Flanken durch 2-D-Tschebyschow-Polynome approximiert werden. Von den Polynomtermen  $C_1$  bis  $C_5$  sind dann die zugehörigen (beabsichtigten) Modifikationsparameter zu subtrahieren. Für den Term  $C_0$ , der die flächenhaft ermittelte Teilungsabweichung der jeweiligen Flanke repräsentiert, ist der (beabsichtigte) Modifikationsparameter stets 0. Es ergeben sich die 6 flächenhaften Abweichungsparameter einer Flanke. Um aus den verbleibenden Abweichungsmustern aller Flanken ein

Abweichungsmuster zu separieren, das für alle Zähne gleich ist, müssen die Abstandsfunktionen der einzelnen Flanken zunächst um die Teilungsabweichung ( $C_0$ -Term) korrigiert werden. Das bedeutet, dass die Abweichungsfunktionen aller Flanken um den negativen Wert des jeweiligen  $C_0$ -Terms gedreht werden. Danach dreht man alle Abstandsfunktionen nacheinander um den negativen Soll-Teilungswinkel der jeweiligen Flanke und dividiert das Ergebnis durch die Zähnezahl. Es ergibt sich die gemittelte Abstandsfunktion aller gleichgerichteten Flanken an der Winkelposition der ersten Flanke. Wendet man auf diese überlagerte Abstandsfunktion erneut die 2-D-Tschebyschow-Polynomapproximation an, so erhält man aus den Polynomtermen  $C_1$  bis  $C_5$  die globalen Abweichungsparameter. Dieses Ergebnis lässt sich, je nach Betrag der einzelnen Abweichungsparameter, noch iterativ verbessern.

Subtrahiert man die globalen Abweichungsparameter von den Abweichungsfunktionen aller gleichgerichteten Flanken, so erhält man Abweichungsfunktionen, die betragsmäßig meistens deutlich kleiner sind und sich von Zahn zu Zahn unterscheiden. Approximiert man diese verbleibenden Abweichungsfunktionen Zahn für Zahn erneut durch 2-D-Tschebyschow-Polynome, so ergeben sich die individuellen Abweichungsparameter der einzelnen Zahnflanken.

## 6. Zusammenfassung

Dieser Beitrag schlägt eine Erweiterung der bekannten Modifikations- und Auswerteparameter vor, die auf flächenhaft erfasste Messdaten anwendbar sind und in der Lage sind, die gesamte Flankenoberfläche zu charakterisieren. Es konnte gezeigt werden, ihr geometrischer Informationsgehalt und ihre technische Interpretation mit den konventionellen und genormten Parametern übereinstimmen. Für eine verbesserte Rückkopplung von Zahnrad-Messdaten wird vorgeschlagen, zwischen globalen Abweichungsparametern (gleich für alle gleichgerichteten Flanken eines Rades) und individuellen Abweichungsparametern (verschieden für die einzelnen Flanken) zu unterscheiden. Für die flächenhafte Messwerterfassung sind sowohl taktile als auch optische Messverfahren geeignet, wobei eine optisch-flächenhafte Messung mit Laser-Lichtschnittsensor mit erheblich kürzeren Messzeiten verbunden ist (7 bis 20 Minuten statt mehrerer Stunden). Allerdings können nach heutigem Stand der Technik Profil- und Flankenlinien-Formabweichungen mit diesem Sensor nicht erfasst werden.

## 7. Danksagung

Die Autoren danken den Firmen Reishauer, Liebherr und Boston Gear sowie dem Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT) der Universität Bremen für die Bereitstellung von Zylinderrädern als Messobjekte, zum Teil mit Vergleichs-Messprotokollen. Besonderer Dank gilt dem Center for Precision Metrology (CPM) der University of North Carolina at Charlotte-USA (UNCC) und der Firma Nikon-Japan für großzügig gewährte Forschungsförderung und für die Überlassung mehrerer Messgeräte. Insbesondere danken die Autoren den Herren Sumito Nakano, Hiroo Tsumuraya und Akira Egawa (Japan) und Dr. Hideaki Okamoto (USA) für eine Vielzahl technischer Informationen und interessanter Detaildiskussionen.

## 8. Literatur

- [1] Stout, K. J. et al., 2013, The development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions. EUR 15178, ISN: 0704413132.
- [2] Lotze, W., Härtig, F. 2001, 3D Gear measurement by CMM, Fifth International Conference of Laser Metrology and Machine Performance (LAMAMAP), WIT Press, pp.333-344.
- [3] Goch, G., 2003, Gear metrology (Keynote paper). Annals of the CIRP 52/2:659-695.
- [4] Günther, A.; Peters, J.; Goch, G., 2001, Flächenhafte numerische Beschreibung, Ausrichtung und Auswertung von Zylinderrädern. tm – Technisches Messen 68/4:160-165.
- [5] Ni, K., Peng, Y., Goch, G., 2016, Characterization and evaluation of involute gear flank data using an areal model. In: Proceedings of the 31<sup>st</sup> ASPE Annual Meeting 2016, pp. 184-189.
- [6] Lotze, W., 2005, Zahnradmessung mit Koordinatenmessgeräten, Eigenverlag, Dresden, 2. Auflage, ISBN 3-00-015962-2
- [7] Goch, G.; Günther, A., 2006, Areal gear flank description as a requirement for optical gear metrology. In: Kimura, F.; Horio, K. (Eds.): Towards Synthesis of Micro-/Nano-Systems, The 11th International Conference on Precision Engineering (ICPE) August 16–18, 2006, Tokyo, Japan, pp. 47-52, Springer London.
- [8] VDI/VDE 2612-1, 2018, Messen und Prüfen von Verzahnungen - Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil.
- [9] ANSI/AGMA 2015-1-A01, 2008, Accuracy classification system – tangential measurements for cylindrical gears.
- [10] ISO 21771, 2007-09, Gears - Cylindrical involute gears and gear pairs - Concepts and geometry.
- [11] Günther, A., 1996, Flächenhafte Beschreibung und Ausrichtung von Zylinderrädern mit Evolventenprofil, Diploma Thesis, University of Ulm, Germany.
- [12] ISO 1328-1, 2013-09, Cylindrical gears - ISO system of flank tolerance classification – Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth.
- [13] Ni, K., 2017, Areal gear metrology with modified flanks, Dissertation, University of North Carolina at Charlotte, Charlotte-NC, USA, ProQuest Number: 10643291, Published by ProQuest LLC
- [14] Liu F., Robinson B., Reardon P., Geary J., 2011, Analyzing optics test data on rectangular apertures using 2-D Chebyshev polynomials, Optical Engineering 50/4:043609-043609-8.

- [15] Nikon HN-C3030, 2017, Non-contact sensor 3D measuring system, Product information. [http://www.nikonmetrology.com/en\\_US/Products/Coordinate-Measuring-Machines/Non-contact-3D-Metrology-System/HN-C3030](http://www.nikonmetrology.com/en_US/Products/Coordinate-Measuring-Machines/Non-contact-3D-Metrology-System/HN-C3030).



# Rückführung von Rauheitskenngrößen auf evolventischen Zylinderradflanken

**Felix Steinmeyer, Martin Stein, Dorothee Hüser, Rudolf Meeß, Karin Kniel**, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

## Kurzfassung

Obwohl die Rauheitsmessung auf Verzahnungen bereits industriell eingesetzt wird, fehlt bislang die rückgeführte Verbindung der klassischen Rauheitsmesstechnik auf ebenen Flächen mit der Verzahnungsmesstechnik, deren Fokus gekrümmte Flächen wie die Kreisevolvente sind. Ein solches Normal, mit dem kalibrierte Rauheitskennwerte auf einer evolventisch gekrümmten Kontur verkörpert sind, wird an der PTB entwickelt. Der modulare Aufbau mit einem Grundkörper und einem Zahnstück ermöglicht dabei die Messung sowohl auf Verzahnungsmessgeräten als auch auf klassischen Tastschnittgeräten.

## 1. Einleitung

Die Bedeutung der Oberflächengüte von Verzahnungen ist in den letzten zehn Jahren deutlich gestiegen. Die Beschaffenheit der Textur hat einen starken Einfluss auf den Wirkungsgrad von Getrieben, weshalb eine genauere Charakterisierung von Topographiemerkmalen erforderlich ist. Einzelne Vertikalrauheitsparameter, die keine Information über laterale Ausdehnung, Steigung und Krümmung von Asperitäten und Tälern enthalten, sind unzureichend. Außerdem werden die mechanische Leistungsdichte, das Laufverhalten und der Verschleiß durch glattere Zahnflanken positiv beeinflusst. In modernen Elektroantrieben verschieben sich die Anforderungen an Verzahnungen von großen Drehmomenten hin zu geringen Drehmomenten mit sehr hohen Drehzahlen. Um Geräusche, Reibung und damit Verlustleistung zu reduzieren, werden an Zahnflanken mittlerweile Oberflächen mit Rauheiten von  $R_z \leq 0,5 \mu\text{m}$  erreicht und in der Serie eingesetzt. Möglich wird dies durch moderne Fertigungsverfahren wie dem Gleit- und Polierschleifen [1].

Entsprechend dieser Entwicklung hat auch die Bedeutung der Rauheitsmessung an Verzahnungen deutlich zugenommen. Hersteller von Koordinaten- und Verzahnungsmessgeräten bieten eigens für die Rauheitsmessung an Verzahnungen entwickelte Sensoren an, die eine fertigungsbegleitende Messung in der Serie ermöglichen sollen [2], [3]. Allerdings fehlt es bisher an einer geeigneten Rückführungsstrategie für diese Messungen. Zwar sind für die klassische profilhafte Rauheitsmesstechnik Normale verfügbar, diese verkörpern die jeweiligen Rauheitskennwerte jedoch nur auf ebenen Flächen und spiegeln die Funktionalität der Flächen hinsichtlich ihrer tribologischen Eigenschaften keinesfalls wider. Die besondere Herausforderung bei der Rauheitsmessung an Verzahnungen ergibt sich in erster Linie durch die evolventisch gekrümmte Oberfläche [4]. Um diese Lücke zwischen der klassischen Rauheitsmessung auf ebenen Flächen und Verzahnungsmesstechnik auf der Kreisevolvente zu überbrücken, werden zum einen ein modular aufgebautes Rauheitsnormal und zum anderen passende Auswerteroutinen entwickelt. Ersteres ermöglicht die Messung von Rauheitsprofilen sowohl auf klassischen Tastschnittgeräten als auch auf Verzahnungsmessgeräten mit Rauheitstaster. Zweiteres ermöglicht den Formabzug der Evolvente von auf einem Tastschnittgerät gemessenen Rauheitsprofil und weiter die normgerechte Rauheitsauswertung bezüglich der Parameter  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $R_{pk}$ , der Firestone-Abbott-Kurven und der Materialanteilsgrößen  $Mr_1$  und  $Mr_2$  [5], [6].

Dieser Bericht gliedert sich wie folgt:

Zunächst wird das modulare Rauheitsnormal, bestehend aus einem Grundkörper und einem Zahnstück vorgestellt. Danach werden die verwendeten Auswertestrategien erläutert und insbesondere die konkreten Parameter der Auswertung beschrieben und anhand der gemessenen Profile veranschaulicht. Einer ausführlichen Ermittlung der Messunsicherheit und einzelnen Beiträge folgt schließlich die Diskussion mit Fazit und Ausblick auf weitere Fragestellungen und Aufgaben.

## 2. Das modulare Rauheitsnormal

Zentrale Anforderung an das Normal ist die Möglichkeit, die Rauheitsmessung sowohl auf klassischen Tastschnittgeräten als auch auf Verzahnungsmessgeräten durchzuführen. Rückgeführte Rauheitstastsysteme gibt es nur für planare

Oberflächen. Das Normal soll aber auch die Rauheitsmessung auf evolvmentischen Oberflächen, die mit Verzahnungsmessgeräten charakterisiert werden, absichern. Dafür wird das Normal als modulares Werkstück mit einem Grundkörper und einem damit lösbar verbundenen Zahnstück entwickelt.

Das kalibrierte Messobjekt ist dabei das Zahnstück. Es verkörpert die Linksflanke einer Geradverzahnung mit einem definierten Grundkreisradius  $r_b = 33,829 \text{ mm}$  in Form der entsprechenden Kreisevolvente. Das Zahnstück ist so ausgelegt, dass das Profil dieser Evolvente auf Tastschnittgeräten mit einem möglichen Hub von ca. 0,5 mm vollständig untersucht werden kann. Die Evolvente und damit das Rauheitsprofil wurde per funkenerosivem Drahterodieren mit einer *AGIE CUT1000 oiltech* beschichtetem Draht mit 0,1 mm Durchmesser und Öl als Dielektrikum gefertigt. Es wurden zwei ca. 5  $\mu\text{m}$  tiefe Markierungen auf die Oberfläche aufgebracht, um eine wiederholbare Positionierung der zu messenden Profillinien zu ermöglichen. Die Teilstrecke auf dem Profil, die für die kalibrierten Rauheitswerte ausgewertet wurde, ist mittels dieser Markierungen definiert und wird genauer in Abschnitt 3 dokumentiert.

Der Grundkörper ermöglicht die Messung des Normals wie ein Verzahnungswerkstück. Er ist mit zwei Prüfbunden versehen, um eine genaue Lage der Achse des Normals auf Verzahnungsmessgeräten bestimmen zu können. Vier radial angeordnete Öffnungen ermöglichen die Montage von vier Zahnstücken. Zahnstück und Grundkörper zusammen müssen zum verkörperten Grundkreisradius  $r_b$  auf der Evolvente passen. Die genaue und wiederholbare Positionierung eines Zahnstückes im Grundkörper erfolgt dabei mit einer raumdiagonal angeordneten Schraube, welche drehmomentfrei eine definierte Kraft erzeugt. Das Druckstück greift in eine entsprechende Bohrung im Zahnstück ein (siehe Bild 1 b), linke Bauteilhälfte) und presst es gegen drei Seitenwände des Grundkörpers. Diese Art der Befestigung stellt eine wiederholbare Positioniergenauigkeit im Bereich weniger Mikrometer sicher.

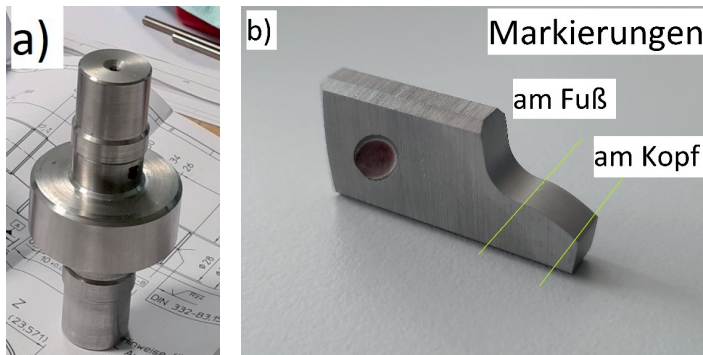


Bild 1: Grundkörper (a) und Zahnstück (b) des Normals: Grundkörper des Normals zum Ermöglichen jeweils beider Messmethoden, dem Tastschnittverfahren und der Verzahnungsmesstechnik; Evolvente des Zahnstücks verkörpert kalibrierte Rauheitsparameter; Markierungen zum Anfang und Ende der Evolvente als Orientierungshilfe auf dem Profil

### 3. Auswertung der Profile für Kalibrierung

Die Rauheitsauswertung erfolgt im Bezugssystem der Bogenlänge  $s$ , also der abgewickelten Kontur der Evolvente. Für diese Transformation wurde ein Algorithmus verwendet, der die kartesischen Messdaten eines Tastschnittgeräts auf eine ideale Evolvente mit passendem Grundkreisradius  $r_b$  einpasst und transformiert (siehe Bild 2). Aus diesem gefitteten Profil kann das Primärprofil mit Bezug auf die Bogenlänge  $s$  als  $x$ -Achse direkt extrahiert werden. Die dafür nötige Parametrisierung orientiert sich an [7].

Alternativ kann das direkte Anwenden eines Splinefilters für den Formabzug verwendet werden. Das so extrahierte Primärprofil stellt aber eine Projektion des originalen Profils auf eine Gerade dar, sodass es kürzer als über die Bogenlänge abgewickelt erscheint.

Um dies auszugleichen kann das Profil wiederum linear gestreckt werden, sodass die Gesamtlänge mit der auf der Bogenlänge abgewickelten Länge übereinstimmt. Diese Korrektur berücksichtigt nicht die Nichtlinearität der Transformation zwischen der

Position eines Messpunktes auf der abgewickelten Messposition und der Projektionsgeraden. Die daraus resultierenden Abweichungen sind aber als vernachlässigbar einzuschätzen.

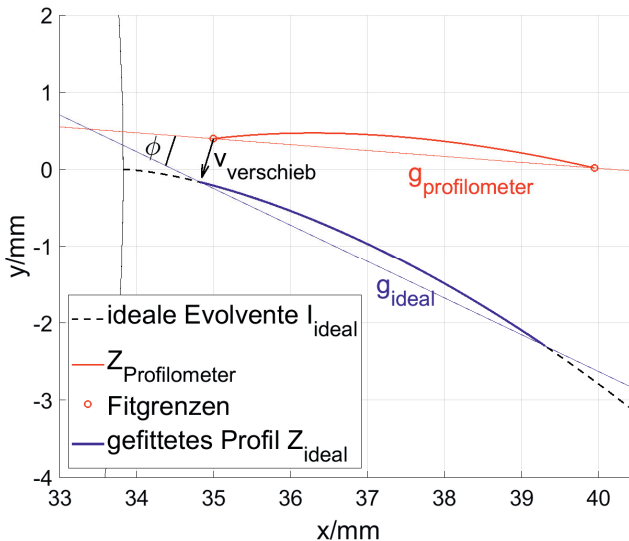


Bild 2: Prinzip des Formalgorithmus: auf dem Tastschnittgerät in einem kartesischen Koordinatensystem gemessenes Profil (rot) wird so auf die ideale Evolvente (gestrichelt) transformiert, dass die Summe der Abstandsquadrate minimal wird (blau); Freiheitsgrade sind der Winkel  $\phi$  und der zweidimensionale Vektor  $v_{\text{verschieb}}$ .

Als Welligkeitsfilter wird ein gauß'sches Filter nach ISO 16610-21 [8] mit einer Grenzwellenlänge von  $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$  verwendet.

Der Auswertebereich wird anhand der aufgetragenen Markierungen definiert:

Die *Mitte des Auswertebereichs*  $x_m$  ist als die Mitte zwischen den beiden Markierungen  $m_1$  und  $m_2$  plus eine Verschiebung um  $x_0 = 0,3 \text{ mm}$  in Kopfrichtung, also

(1)

$$x_m = \frac{m_1 + m_2}{2} + x_0$$

definiert.

Die Auswertelänge  $l$  ist in der Norm ISO 4288 [9] als das Fünffache der Grenzwellenlänge festgelegt, sodass hier

$$l = 5 \lambda_c = 4 \text{ mm}$$

gilt.

Die Definition des Auswertebereichs ist in Bild 3 veranschaulicht, welche das Primärprofil nach Formabzug durch Ausgleichsrechnung zeigt. Die Markierungen  $m_1$  am Anfang (Fuß) und  $m_2$  am Ende (Kopf) der Evolvente sind deutlich zu erkennen. Die Auswerteposition  $x_m$  wird gemäß Gl. (1) bestimmt. Der zu filternde Bereich wird möglichst groß gewählt, um spätere Variationen der Auswertestrecke zu ermöglichen. Die Riefen der Markierungen werden nicht in die zu filternde Strecke integriert, um Verzerrungen des Rauheitsprofils auszuschließen.

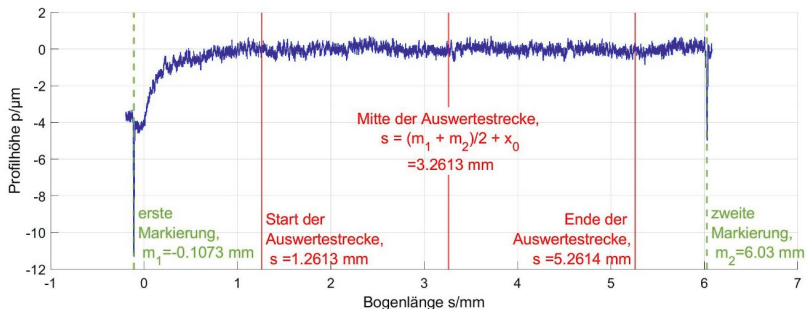


Bild 3: Primärprofil auf Zahnstück: Primärprofil (blau) durch den Formabzug per Ausgleichsrechnung, das die Abweichung des gemessenen Profils zur idealen Evolvente über die abgewinkelte Bogenlänge (x-Achse) zeigt; zwei Markierungen bei  $s = m_1 = -0.1073 \text{ mm}$  und  $s = m_2 = 6.03 \text{ mm}$ ; Mitte des Auswertebereichs bestimmbar anhand dieser Markierungen nach (1).

#### 4. Messungen und Ergebnisse der Rauheitsauswertung auf dem Zahnstück

Die Messungen wurden durchgeführt auf einem rückgeführten Tastschnittgerät in der PTB, welches auf der Positionsmessung eines freischwebenden Taststiftes mittels eines Interferometers basiert [10].

Das erste Ergebnis der Auswertung sind die Positionen der Markierungen und davon ausgehend die dazu relativen Positionen von Start, Mitte und Ende des Auswertebereichs. Durch den Verzahnungsbezug durch das Einpassen auf die Evolvente können diese Positionen eindeutig einer Position auf der abgewickelten Bogenlänge  $s$ , und damit auch einem Wälzweg oder -winkel  $\xi$ , zugeordnet werden. Die Unsicherheit für diese Parameter beruht in erster Linie auf der Zuverlässigkeit des Einpassens und auf der (händischen) Identifikation der Markierungen im Profil. Sie wird hier großzügig auf  $50\text{ }\mu\text{m}$  abgeschätzt. Die relevanten Positionen der Auswertestrecke sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Wälzwegposition von Markierung 1 liefert bei diesem Prototypen eine ungültige Lösung bei der Einpassung der Evolvente, weil bei der Aufbringung der Markierungen ein unbeabsichtigter Versatz von ca.  $40\text{ }\mu\text{m}$  erfolgte, also die Markierung innerhalb des Grundkreisradius' liegt. Das Werkstück folgt hier einer Geraden, die sich stetig an den Start der Evolvente anschließt. Wird die Parametrisierung in Bogenlänge entsprechend weitergeführt, so ergibt dies auch für die Position von Markierung 1 bezüglich der abgewickelten Bogenlänge eine reelle Zahl.

Das bedeutet weiter, dass die Messposition auch ausgehend von einer Markierung ( $m_1$ ,  $m_2$ ) bestimmt werden kann, sofern das Profil auf die korrekte Länge gestreckt wurde.

Tabelle 1: Position der Markierungen und des Auswertebereichs auf dem Profil:

	Markierung		Auswertestrecke		
	$m_1$	$m_2$	Start	Mitte $x_m$	Ende
Bogenlänge /mm	-0.11	6.03	1.26	3.26	5.26
Wälzweg / mm	--	20.20	9.24	14.85	18.67

Ein beispielhaftes Primärprofil ist in Bild 3 bereits abgebildet, das entsprechende Rauheitsprofil nach Anwenden des Filters ist in Bild 4 als Komplettansicht und als

vergrößerter Ausschnitt dargestellt. Deutlich zu erkennen ist das für das Drahterodieren typische, in der Profilhöhe weitestgehend normalverteilte Profil. Es ist auch keine erkennbare Periodizität vorhanden.

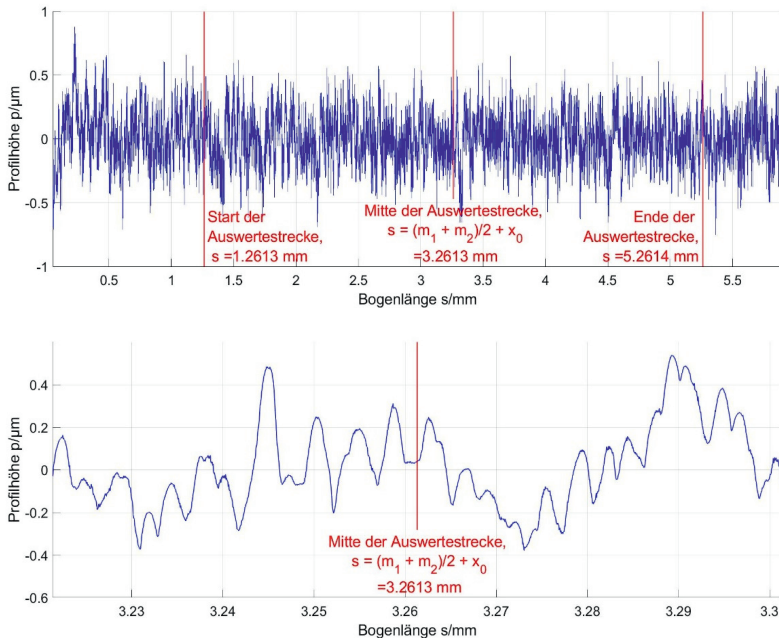


Bild 4: Rauheitsprofil auf Zahnstück (vergrößerter Ausschnitt unten): Rauheitsprofil gewonnen durch Anwenden des Welligkeitsfilters und anschließender Subtraktion des Welligkeitsprofils; kalibrierter Auswertebereich markiert; keine auffällige Tendenz zu besonders ausgeprägten Spitzen oder Riefen, sondern gaußverteilte Höhen, wie für drahterodierte Profile typisch

Ausgewertet werden nach [5], [6] die Parameter  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$ , und die Materialanteilsgrößen  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $R_{pk}$ ,  $Mr1$  und  $Mr2$ .

Die genauen Ergebnisse für die Parameter werden hier nicht angegeben, um weitere Ringvergleiche zu ermöglichen. Die Werte befinden sich in der in Tabelle 2 angegebenen Größenordnung.



Tabelle 2: Größenordnung der kalibrierten Rauheitskennwerte

	$R_a/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$	$R_q/\mu\text{m}$	$R_k/\mu\text{m}$	$R_{pk}/\mu\text{m}$	$R_{vk}/\mu\text{m}$	Mr1/%	Mr2/%
Größen- ordnung	> 0.1 < 0.15	> 1.0 < 1.5	> 0.15 < 0.25	> 0.3 < 0.6	> 0.15 < 0.25	> 0.15 < 0.25	> 5 < 15	> 85 < 95

## 5. Messunsicherheitsbeitrag durch Wahl des Bezugssystems

Die Wahl des Koordinatensystems, in das der gemessene Datensatz durch den Formoperator transformiert wird, hat einen Einfluss auf die statistischen Kenngrößen, die die Rauheit der Oberfläche charakterisieren. Der Formoperator setzt sich zusammen aus der Einpassung der makroskopischen Geometrie, welche in diesem Fall eine Evolvente ist, und dem Abzug dieser Geometrie. Für den Fall, dass kein Ausgleichsalgorithmus für Evolventen vorliegt, besteht auch die Möglichkeit alternativ ein glättendes, kubisches Splinefilter anzuwenden. Die verschiedenen Methoden des Formabzugs unterscheiden sich darin, dass die laterale Achse unterschiedlich skaliert. Die laterale Achse ist der abgewinkelte Bogen auf der Evolvente, d.h. auf den Wälzweg bezogen, wenn eine Evolvente eingepasst wird. Andernfalls stellt die laterale Achse eine von mehreren möglichen Sekanten dar, die kürzer sind als der Bogen. Wenn in jedem Fall dieselbe Auswertestrecke, beispielsweise 4 mm, selektiert wird, so ist die Anzahl der Höhenwerte jeweils desselben Messdatensatzes im Fall des Evolventenabzugs kleiner. Des Weiteren hat die Wahl des Koordinatenursprungs und damit die Lage des Auswerteintervalls einen Einfluss auf die Rauheitskenngrößen, der umso stärker ist, je inhomogener die Textur entlang des Zahns ist.

Zur Bestimmung der durch die Wahl des Koordinatensystems bedingten Unsicherheit werden folgende vier Freiheitsgrade variiert:

### 1. Die Position der Messung in Zahnbreitenrichtung:

Es wurden je drei Wiederholungsmessungen auf  $n_{\text{line}} = 11$  Messbahnen im Abstand von  $50\ \mu\text{m}$  in Zahnbreitenrichtung, also insgesamt 33 Profile, aufgenommen. Die Standardabweichung der Rauheitskennwerte, die aus diesen 33 Profilen ermittelt wird, beinhaltet dementsprechend Beiträge sowohl

des Messsystems als auch der Topographieunterschiede zwischen den verschiedenen Bahnen.

2. Die Position des ausgewerteten Teilprofils auf dem Primärprofil:

Variiert wurde die Auswerteposition in Profilrichtung in einem Bereich von  $\Delta x = \pm 100 \mu\text{m}$  um die nominelle Messposition  $x_m$  in  $n_{\text{pos}} = 11$  Schritten von  $20 \mu\text{m}$ .

3. Die Länge des ausgewerteten Teilprofils auf dem Primärprofil:

Variiert wurde die Auswertlänge in einem Bereich von  $\Delta l = \pm 30 \mu\text{m}$  um die nominelle Auswertlänge  $l$  in  $n_l = 7$  Schritten von  $10 \mu\text{m}$ .

4. Der Modus des Formabzug:

Der Formabzug wird zum einen durch die Einpassung der Evolvente nach der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt, aus der direkt das Profil in Bezug zur abgewickelten Bogenlänge gewonnen wird. Zum anderen werden die Primärprofile auch durch den Formabzug mittels eines Splinefilters erzeugt. Das Primärprofil wird wiederum gefiltert, um Welligkeit und Rauheit voneinander zu trennen, mit dem Gaußfilter nach ISO 16610-21 [8] mit Grenzwellenlänge  $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ . Aus den Rauheitsprofilen werden die Rauheitskennwerte ermittelt. Ein Rauheitsprofil wird zum einen direkt ausgewertet, zum anderen wird die laterale Achse des Primärprofils vor Anwenden des Filters gestreckt, um eine Angleichung an die Bogenlänge zu erzielen.

Die Variation der Länge der Auswertestrecke (grün), der Position der Auswertestrecke entlang der Evolvente (blau) und der aufgenommenen Profilinie (rot) bzw. Messposition in Flankenlinienrichtung sind in Abbildung 5 schematisch dargestellt.

Alle Freiheitsgrade werden variiert und zu jeder Kombination aller Werte der Freiheitsgrade und zu jedem Profil die Rauheitskennwerte berechnet, so dass zu jeder Kenngröße ein Satz von Werten vorliegt. Daraus wird zu jeder Kenngröße die Gesamtstandardabweichung bestimmt. Ferner wird untersucht, welcher Freiheitsgrad in welchem Maße zur Unsicherheit beiträgt.

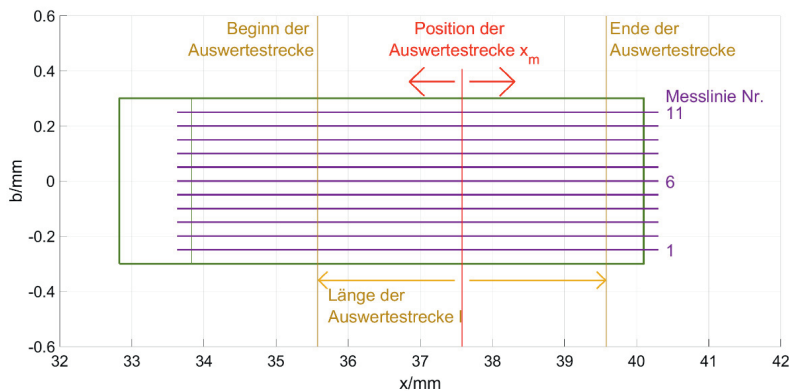
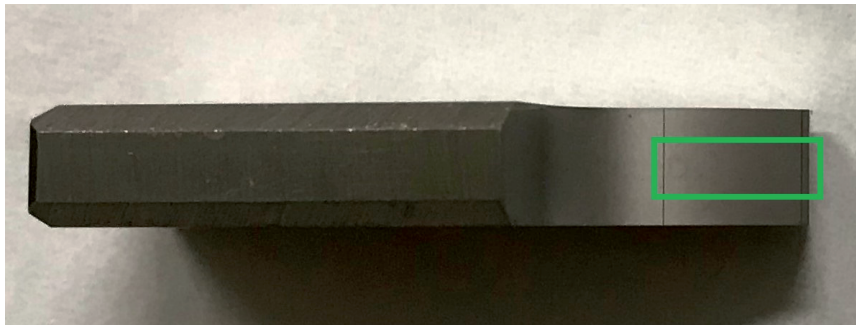


Bild 5: Draufsicht des Zahnstücks und schematische Darstellung der Profilauswertung mit drei Freiheitsgraden; Variation für die Bestimmung der Messunsicherheit: Position der Auswertestrecke (rot), die Länge der Auswertestrecke (gelb) und die Messlinie (violett)

Der Beitrag der Messunsicherheit des verwendeten Tastschnittsystems und der Inhomogenität der Textur auf dem Zahn gehen durch die Messung parallel zueinander versetzter Profilschnitte mit in die Standardabweichung und damit in die Messunsicherheit ein, auch wenn er im Verhältnis zu anderen Beiträgen als klein eingeschätzt werden kann. Ein Einfluss durch die Größe des Tastspitzenradius von 2  $\mu\text{m}$  wurde separat untersucht. Er liegt für die für diese Anwendung typischen Texturmerkmale, die Aspektverhältnisse der Merkmale, Steigungen und Krümmungen, unterhalb eines Nanometers bei den mittellenden Kenngrößen und im Bereich von 6 nm bei  $R_z$ .

Aus der Variation der Freiheitsgrade ergeben sich folgende Standardabweichungen:

Tabelle 3: Gesamt-Standardabweichung der jeweiligen Rauheitskennwerte, ermittelt durch Variation der Freiheitsgrade, sowie die daraus folgende erweiterte Messunsicherheit MU

	$R_a/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$	$R_q/\mu\text{m}$	$R_k/\mu\text{m}$	$R_{pk}/\mu\text{m}$	$R_{vk}/\mu\text{m}$	Mr1/%	Mr2/%
StAbw	0.00290	0.0475	0.00372	0.01345	0.01104	0.01405	0.583	0.539
MU	0.008	0.10	0.008	0.027	0.023	0.029	1.2	1.1

Es wird die erweiterte Messunsicherheit (MU) angegeben, die sich gemäß dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“ [11] aus der Standardmessunsicherheit, die hier gleich der Standardabweichung ist, durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$  ergibt. Dieser Wert für den Erweiterungsfaktor ist der gerundete Wert des Quantils für einen großen Stichprobenumfang für ein Vertrauensniveau von 95%. Dies bedeutet, dass der Wert der Kenngröße zu 95% Wahrscheinlichkeit im entsprechenden Überdeckungsintervall liegt.

Um den Einfluss der unterschiedlichen Freiheitsgrade auf die Unsicherheit zu ermitteln, werden *spezifische Standardabweichungen* ermittelt, welche sich aus der Variation nur jeweils genau *eines Freiheitsgrads* bei konstanter (optimaler) Konfiguration der restlichen Freiheitsgrade ergibt. Um beispielsweise den Beitrag der Auswerteposition in Profilrichtung  $x_m$  zu bestimmen, wurden über alle  $n_{\text{pos}} = 11$  Positionen der Auswertestrecke die spezifischen Rauheitsparameter und die jeweilige spezifische Standardabweichung berechnet.

Der Formabzug erfolgte durch den Evolventenformoperator und die Auswertung mit der Auswertelänge  $l = 4 \text{ mm}$  und über alle  $3n_{\text{line}} = 33$  Profile.

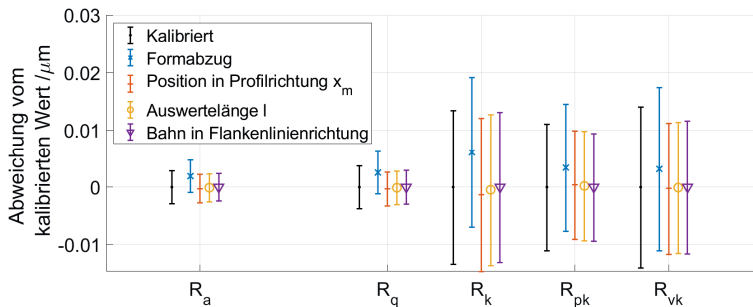


Bild 6: Abweichung zum Kalibrierwert durch Variation: Differenz der spezifischen Mittelwerte zum kalibrierten Messwert für 5 Rauheitsparameter; spezifische Standardabweichungen (blau, rot, gelb, violett) im Vergleich zur kalibrierten Standardmessunsicherheit (schwarz); Variation des Formabzugs verursacht die größte Abweichung zum Kalibrierwert

Bild 6 zeigt für fünf der acht ausgewerteten Rauheitsparameter die spezifischen Mittelwerte (als Differenz zum Kalibrierwert) und spezifischen Standardabweichungen. Zu beachten ist, dass für den Kalibrierwert (schwarz) nicht die erweiterte Messunsicherheit, sondern die einfache Standardabweichung dargestellt wird. Sie dient hier dem Vergleich mit den spezifischen Standardabweichungen der Variationen. Bei diesen zeigt sich, dass die Variation des Formabzugs die deutlich stärksten Abweichungen zum kalibrierten Messwert zeigen.

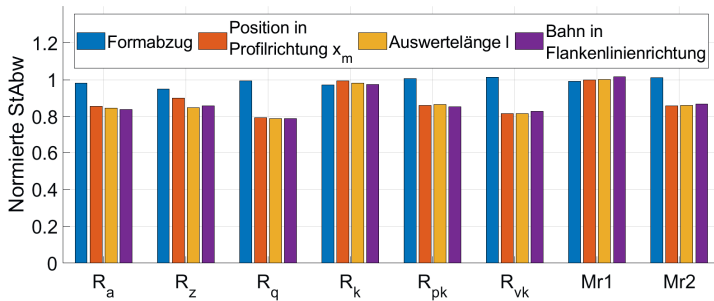


Bild 7: Normierte spezifische Standardabweichungen: spezifische Standardabweichungen für die vier Freiheitsgrade an der Gesamtstandardabweichung für bessere Vergleichbarkeit normiert; größte normierte Standardabweichung bei fast allen Rauheitskennwerten durch Variation des Formabzugs

Um weiter die spezifischen Standardabweichungen selbst bewerten zu können, wurden diese mit der Gesamtstandardmessunsicherheit (siehe Tabelle 3) normiert. So können sie untereinander verglichen werden, dargestellt in Bild 7. Hier zeigt sich, dass die Variation des Formabzugs auch die größte spezifische Standardabweichung zeigt. Zu beachten ist, dass die Gesamtstandardabweichung nicht die Summe der spezifischen Standardabweichungen ist, da diese nicht vollständig unabhängig voneinander sind. So beeinflusst der Modus des Formabzugs auch, welche Teile des Profils im definierten Auswertebereich liegen und beeinflusst damit die Auswertelänge bzw. -position.

Analog zu Bild 6 wurden die drei Formabzüge deshalb in Bild 8 aufgeschlüsselt. Es zeigt sich, dass der Formabzug mittels Splinefilter (rot), auch unter Anwendung der korrigierenden Streckung (gelb) deutliche Abweichungen zum kalibrierten Messwert zeigen. Unter Einbeziehung der erweiterten Messunsicherheit (schwarz, gestrichelt) erweisen sich diese Abweichungen aber als nicht signifikant.

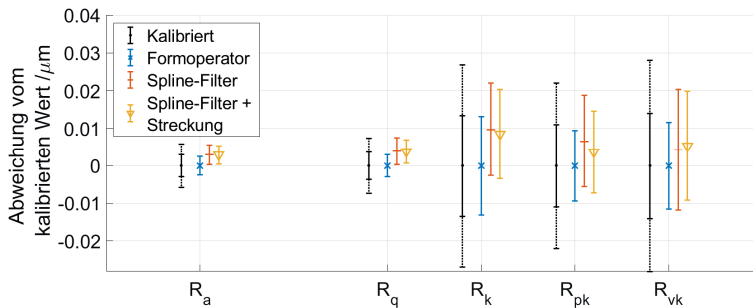


Bild 8: Abweichung zum Kalibrierwert nach Formabzug: Differenz der berechneten Rauheitskennwerte nach den unterschiedlichen Formabzügen unter ansonsten gleichen Auswerteparametern zum kalibrierten Messwert (schwarz) für fünf Rauheitsparameter, inklusive jeweiliger Standardabweichungen; kalibrierter Messwert mittels Formabzug durch den Formoperator ermittelt, sodass diese Werte per Definition gleich sind; Abweichungen aber zum Formabzug mittels Spline-Filter (rot), auch wenn entsprechendes Profil noch gestreckt wird (gelb)

Die jeweiligen Abweichungen zum Kalibrierwert und die spezifischen Abweichungen sind quantitativ in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Abweichungen zum Kalibrierwert  $\Delta M_w$  und spezifische Standardabweichungen  $StAb$  der verschiedenen Variationen

	Kali- brier- wert	Variation des Formabzugs		Variation der Position in Profilrichtung		Variation der Auswerte- länge		Variation der Bahn in Zahnbreiten- richtung	
	$StAb$	$\Delta M_w$	$StAb$	$\Delta M_w$	$StAb$	$\Delta M_w$	$StAb$	$\Delta M_w$	$StAb$
$R_a/nm$	2.9	1.9	2.8	-0.28	2.5	-0.10	2.4	0	2.4
$R_z/nm$	48	16.8	45	-2.3	43	-1.1	40	0	41
$R_q/nm$	3.7	2.6	3.7	-0.30	3.0	-0.11	2.9	0	2.9
$R_k/nm$	13	6.1	13	-0.13	13	-0.46	13	0	13
$R_{pk}/nm$	11	3.4	11	0.39	9.5	0.21	9.5	0	9.4
$R_{vk}/nm$	14	3.2	14	-0.21	11	-0.08	11	0	12
$Mr1/\%$	0.58	0.0198	0.578	0.0184	0.58	0.00061	0.58	0	0.59
$Mr2/\%$	0.54	0.0424	0.545	0.0093	0.46	-0.0052	0.46	0	0.47

## 6. Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

Das entwickelte Verzahnungsraunormal verkörpert erstmalig rückgeführt ermittelte Rauheitsparameter auf einer nicht-ebenen Kontur, der Kreisevolvente. Es ermöglicht Messungen sowohl auf Tastschnittgeräten als auch auf Verzahnungsmessgeräten mit Rauheitstaster. Der modulare Aufbau des Normals ermöglicht zudem die Erweiterung des Normals durch weitere Zahnstücke. Verkörpert sind die Parameter  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$ , und die Materialanteilsgrößen  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $R_{pk}$ ,  $Mr1$  und  $Mr2$ . Das Profil ist drahterodiert und unterscheidet sich demnach von in der Verzahnungstechnik typischen Profilen, die meist tiefere Riefen und abgeflachte Spitzen aufweisen. Insbesondere die Parameter  $R_a$  und  $R_z$  liegen aber in üblichen Größenordnungen der Verzahnungsmesstechnik. Des Weiteren ist das verwendete Profil nicht, wie bei Raunormalen üblich, periodisch. Deshalb ist die genaue und reproduzierbare Definition des Auswertebereichs besonders wichtig. Der für die kalibrierte Auswertung verwendete Bereich der gemessenen Profile wurde eindeutig festgelegt und ist anhand der physischen Markierungen auf dem Normal reproduzierbar.



Die entwickelte Auswerteroutine ermöglicht dabei einen direkten Bezug von auf Tastschnittgeräten gemessenen kartesischen Messkoordinaten auf die Verzahnungsparameter der Bogenlänge bzw. des Wälzwegs. Die Auswertung kann aber auch ohne dieses Einpassen der idealen Evolvente durchgeführt werden, ohne zwingend signifikante Abweichungen zum Kalibrierwert zu verursachen.

Die Messunsicherheit wurde durch Variation von vier Freiheitsgraden bestimmt. Dabei zeigte sich der Beitrag der unterschiedlichen Formabzüge als größer als der durch Variation bzw. Unsicherheit der Auswertelänge oder Auswerteposition in Profil- oder Zahnbreitenrichtung verursacht wird. Die relative Messunsicherheit für die Kalibrierwerte liegt zwischen 5% und 20%.

Ein Ringvergleich mit dem Normal ist geplant. Neben Vergleichswerten sollen hier Erfahrungen zur Praxistauglichkeit des Normals bzgl. Messung und Auswertung gewonnen werden.

Da das drahterodierte Profil wie oben beschrieben zum einen keine Periodizität aufweist und sich zum anderen in der Charakteristik von typischen Verzahnungsoberflächen unterscheidet, wird an einem neuen Profil auf einem weiteren Zahnstück gearbeitet. Dies wird in ultrapräziser Schleifbearbeitung mit Abträgen von unter 1  $\mu\text{m}$  möglich werden [12]. Eine Besonderheit dieses semideterministischen Profils wird die zielgerichtete (deterministische) Kombination von zufällig strukturierten Elementen, wie dem beim Schleifvorgang erzeugten Profil, sein.

- [1] G. Mies: Rauheitsmessungen an Verzahnungen, VDI-Berichte 2316, S. 55-64, 2017
- [2] Done-In-One: Messlösungen für rotationssymmetrische Werkstücke, Prospekt, Klingelberg AG, Hückeswagen 2021
- [3] Fully automatic roughness measurements on shafts with MarSurf XR 20 CNC, Mahr Metrology, 2021
- [4] VDI/VDE 2612 Blatt 5: 2015-02: Messen und Prüfen von Verzahnungen - Rauheitsmessung an Zylinder- und Kegelrädern mit dem Tastschnittverfahren
- [5] DIN EN ISO 4287:2010-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit
- [6] ISO 13565-2:1996: Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties — Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve
- [7] Härtig, F and Stein, M: 3D involute gear evaluation – Part I: Workpiece coordinates, Measurement, 2019.
- [8] ISO 16610-21:2011-06: Geometrical Product Specification – Filtration – Linear profile filters: Gaussian filters
- [9] DIN EN ISO 4288:1998-04: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit
- [10] Thomsen-Schmidt, P: Characterization of a traceable profiler instrument for areal roughness measurement, Measurement Science and Technology, 22, 2011
- [11] Evaluation of measurement data – An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents, JCGM, 2009
- [12] Zhang, Z, Yan, J, Kuriyagawa, T: Manufacturing technologies toward extreme precision, International Journal of Extreme Manufacturing, 2019

# Flächige Zahnflankenprüfung mittels digitaler Holographie

## optisch, schnell, präzise

Dr.-Ing. **Annelie Schiller**, Dr.-Ing. **Markus Fratz**,  
Dr.-Ing. **Tobias Seyler**, Dr. **Alexander Bertz**, Dr. **Daniel Carl**,  
Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg

### Kurzfassung

Die Suche nach neuen Verzahnungsmessverfahren führt unweigerlich zu optischen Methoden: Diese Verfahren liefern hochpräzise Daten in kürzester Zeit und das nicht nur punktweise sondern flächig. Bisher scheitern optische Messungen in der Verzahnungsmessung jedoch an steilen Flanken und Mehrfachreflexionen. Wir zeigen am Beispiel eines prototypischen Systems wie diese Aspekte überwunden werden können, um Präzision und Geschwindigkeit in der Verzahnungsmessung zu kombinieren. Dabei wird die digitale Mehrwellenlängen holographie eingesetzt. Basierend auf dieser Technologie erfasst unser Inspektionssystem eine vollständige Zahnflanke in einer einzigen Aufnahme mit Millionen von 3D-Punkten und einer Genauigkeit von unter einem Mikrometer.

### 1. Einleitung

Die digitale Mehrwellenlängen holographie ist eine berührungslose, hochpräzise und schnelle Messtechnik. Sie ist in der Lage, die komplette Topografie einer rauen Objektoberfläche mit interferometrischer Präzision zu erfassen [1]. Das Fraunhofer IPM konnte diese Technik in den letzten Jahren als vielseitiges Werkzeug für industrielle Anwendungen etablieren [2 bis 4]. Die erfolgreiche Integration des digital-holographischen HoloTop-Sensors in eine Fertigungslinie für Präzisionsdrehteile zeigt die Eignung für die 100 %-Qualitätskontrolle bei einem Produktionstakt von einem Prüfling pro Sekunde. Jüngste Arbeiten zeigen sogar die Fähigkeit, holographische Sensorsysteme in Werkzeugmaschinen zu integrieren [3, 5, 6]. Der Prototyp HoloGear überträgt diese Erfahrungen nun auf die Verzahnungsmesstechnik und zeigt damit das enorme Potential für die Qualitätssicherung durch flächige – nicht scannende – Messungen.

## 2. Mehrwellenlängenholographie

Die digitale Mehrwellenlängenholographie ist ein laserbasiertes, interferometrisches Verfahren zur präzisen Höhenmessung von optisch rauen Oberflächen. Im Vergleich zur Fotografie wird bei der Holographie nicht nur die Intensität des zurückgestreuten Lichts aufgenommen, sondern auch die Phase. Das heißt, es wird die volle Information der Lichtwelle erfasst.

Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau eines am Fraunhofer IPM entwickelten HoloTop-Sensors: Kohärentes Laserlicht beleuchtet die Probe koaxial. Auf einer Kamera interferiert das gestreute Objekt- mit dem ungestörten Referenzlicht. Aus den resultierenden Interferogrammen wird die komplette Wellenform des einfallenden Lichts rekonstruiert. Dadurch ist es sogar möglich, Objekte zu vermessen, die außerhalb der Schärfentiefe der abbildenden Optik liegen. Die Nachfokussierung kann numerisch nach der eigentlichen Messung erfolgen. Damit können in einer einzigen Messung gültige Daten eines Zahnrades vom Fuß- bis zum Kopfkreis erfasst werden. Um valide Messungen durchführen zu können, ist nur wenig rückgestreutes Licht von der Prüflingsoberfläche notwendig, was die Inspektion sehr steiler Flanken ermöglicht – viele ähnlich präzise messende optische Verfahren scheitern an diesem Punkt.

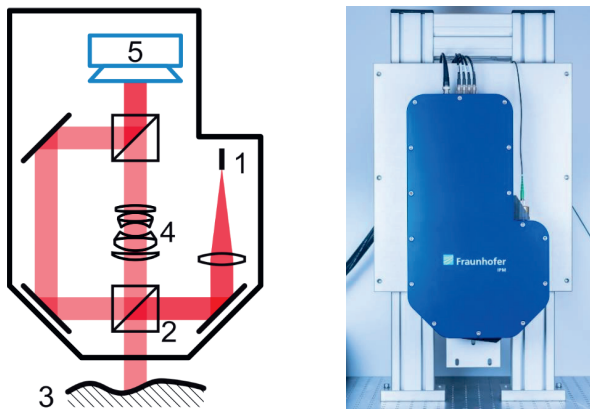


Abbildung 1: Links: Vereinfachte Skizze des digitalen Mehrwellenlängen-Holographiesensors: Das aus der Faser (1) kommende Licht wird durch den Strahlteiler (2) in Objekt- und Referenzstrahl aufgeteilt. Der Objektstrahl beleuchtet das Objekt (3) koaxial. Das gestreute Licht wird durch ein Objektiv (4) auf die Kamera (5) abgebildet und dort mit dem Referenzstrahl überlagert. Rechts: Foto eines holographischen HoloTop\_9M18-Sensors mit den Abmessungen 440 mm × 250 mm × 105 mm und einem Gewicht von 11,5 kg.

Durch Wahl der verwendeten Laserwellenlängen lassen sich Genauigkeit und Eindeutigkeit passend für die gewünschte Anwendung spezifisch einstellen. Als kamerabasiertes Verfahren wird das Messfeld des Sensors an Kamera und Objektiv individuell je nach Anforderung angepasst. Realisiert wurden bisher am Fraunhofer IPM Messfeldgrößen von mikroskopischen Abbildungen von rund  $3.5 \times 0.4 \text{ mm}^2$  mit  $0.5 \text{ }\mu\text{m}$  lateraler Abtastung bis hin zu Makroabbildungen mit  $200 \times 150 \text{ mm}^2$  mit  $25 \text{ }\mu\text{m}$  lateraler Abtastung [2, 7]. Messgenauigkeiten der Höhenwerte von  $<0.2 \text{ }\mu\text{m}$  ( $3\sigma$ ) wurden erreicht [3].

Um schnelle Messzyklen zu realisieren, werden u. a. CoaXPress-Kameras eingesetzt. Die eigentlichen Hologrammberechnungen und Nachbearbeitungsschritte werden auf der GPU, einer Consumer-Grafikkarte, durchgeführt. Damit lassen sich Messraten von über 100 Millionen 3D-Punkten pro Sekunde erreichen – ideal für die vollständige Vermessung aller Zahnflanken auch bei großen Zahnrädern.

### 3. Flankenmessung

#### Aufbau

Der Prototyp HoloGear ist für die Messung von Zahnrädern mit einem Außendurchmesser von 248 mm, 60 Zähnen, einem Modul von 4 und 15 mm Zahnbreite entwickelt worden. HoloGear verwendet zwei Holotop-Sensorköpfe, um die linke und rechte Flanke gleichzeitig zu messen (siehe Abbildung 2). Jeder Sensorkopf misst die Zahnflanken mit einem Sichtfeld von  $15 \times 15 \text{ mm}^2$  und erfasst dabei rund 10 Millionen 3D-Punkte pro Einzelmessung. Durch Drehen des Zahnrades können alle Flanken nacheinander gemessen werden.



*Abbildung 2: Digital-holographisches Messsystem HoloGear: Zwei Messköpfe, die mit derselben Laserquelle verbunden sind, messen gleichzeitig die linke und rechte Flanke eines Zahnradprüflings.*

Zur Unterdrückung von Mehrfachreflexionen zwischen zwei korrespondierenden Flanken wird eine 3D-gedruckte Vorrichtung verwendet (siehe Abbildung 3). Diese Vorrichtung greift passiv in das Zahnrad ein und folgt seiner Rotation, während sie selbst keinen Einfluss auf das Zahnrad hat. Sie kann leicht an die individuelle Form des zu prüfenden Zahnrades angepasst werden.

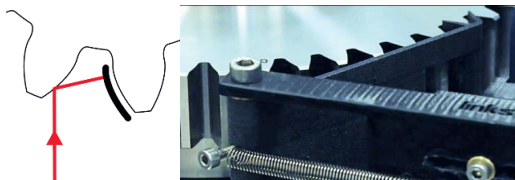


Abbildung 3: Eine 3D-gedruckte Vorrichtung unterdrückt Mehrfachreflexionen zwischen zwei Zähnen.

Die gesamte Messung einer Flanke dauert weniger als 200 ms und liefert insgesamt 3,6 Millionen 3D-Punkte (siehe Tabelle 1). Die Reproduzierbarkeit der Höhendaten in einem einzelnen Messpunkt liegt deutlich unter einem Mikrometer.

Tabelle 1: Beispielmessung des HoloGear-Prototyps, der für die Messung von Zahnrädern mit einem Außendurchmesser von 248 mm, 60 Zähnen, einem Modul von 4 und 15 mm Zahnbreite entwickelt wurde.

Messzeit für eine Flanke	<200 ms
Anzahl 3D-Messpunkte	~ 3,6 Mio. pro Flanke
Reproduzierbarkeit der Höhendaten im Einzelpunkt am realen Prüfling (Zahnflanke)	< 1 $\mu\text{m}$ (1 $\sigma$ )

## Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt exemplarisch eine Flankenmessung des Testzahnrad. Auf der rechten Seite ist eine 2D-Karte der Abweichung von der Best-Fit-Evolvente für jeden Punkt der Flanke zu sehen. Schnitte durch die Daten geben das Profil und die Flankenlinien beispielhaft für die Mittelposition der Flanke an, die links bzw. unten dargestellt sind. Die 2D-Karte enthält Hunderte von Flanken- und Profillinien – für jede Position auf der Flanke. Das stellt einen entscheidenden Vorteil gegenüber taktilen Messungen dar, die meist nur wenige Punkte entlang einer Flanken- bzw. Profillinie antasten.

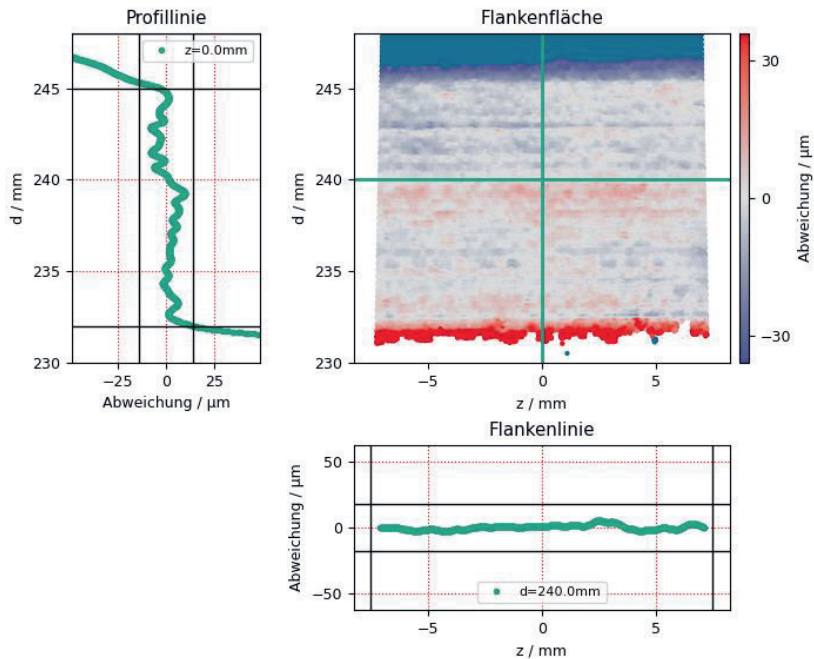


Abbildung 4: Holographische Messung an einer Flanke: Oben rechts: Farbcodierte Abweichung von der Best-Fit Evolvente. Links: Profillinie entlang der vertikalen grünen Linie in der 2D-Karte, Unten: Flankenlinie entlang der horizontalen grünen Linie in der 2D-Karte.

Abbildung 5 zeigt die Messung einer Flanke mit mehreren Fehlern, die eine Abweichung von der Soll-Form von 60  $\mu\text{m}$  überschreiten. Die flächige Messung der Flanke ermöglicht die Erkennung und die quantitative Bewertung von Defekten an jeder Stelle der Flanke, die bei der Messung von nur einer Flanken- und Profillinie nur zufällig detektiert würden. Es können sogar die genaue Form des Fehlers analysiert und mögliche Materialfehler oder Inhomogenitäten quantifiziert werden. Neben der Erkennung typischer Defekte wie Risse oder Einschlagstellen kann auch die Mikrostruktur der Oberfläche analysiert werden.

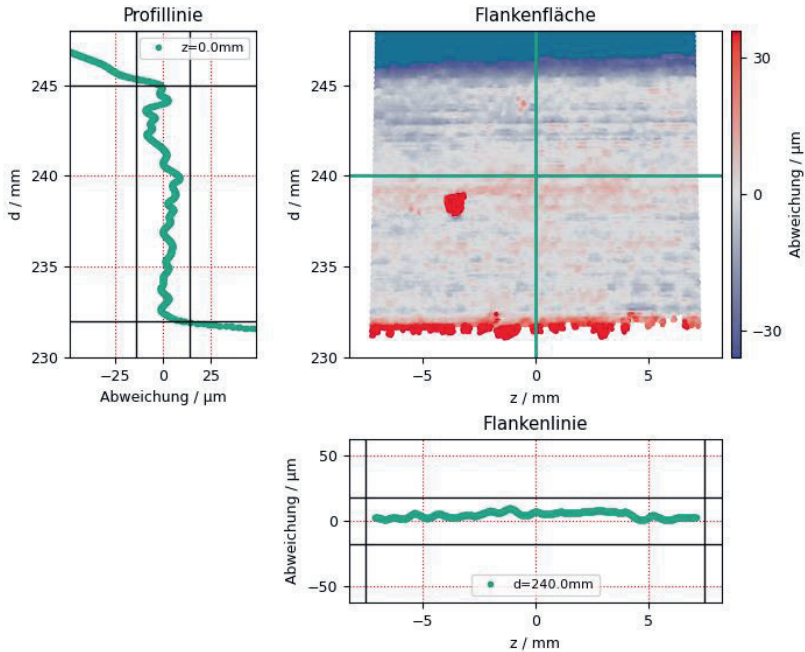


Abbildung 5: Holographische Messung an einer Flanke mit einem großen Defekt, der bei einer Standardmessung möglicherweise nicht erkannt werden würde.

#### 4. Perspektiven

Die flächige und schnelle Auswertung aller Flanken eines Zahnrads mit 3.6 Millionen 3D-Punkten an einer Zahnflanke in nur wenigen 100 Millisekunden ermöglicht z. B. das Erkennen periodischer Fehler, die normalerweise nur schwer zu detektieren sind. Auswertungen, welche die Topographie der gesamten Zahnoberfläche berücksichtigen, ermöglichen Geräuschanalysen und können zur Verifikation von Simulationen herangezogen werden. Zukünftig werden neue Anwendungen und gegenüber dem Stand der Technik deutlich erweiterte Auswerteverfahren auf Basis der hochgenauen und vollflächigen Flankendaten zu signifikantem Erkenntnisgewinn führen und sowohl Vorteile als auch Schwächen neu entwickelter Zahnräder, ihrer Herstellungsverfahren und ihrer funktionalen Oberflächen



quantifizierbar machen. Gerne stellen wir hierfür interessierten Partnern die entsprechenden Datensätze zur Verfügung und greifen neue Auswertestrategien auf.

Aktuelle Arbeiten zur Vermessung kontinuierlich bewegter Objekte werden den Messprozess an kontinuierlich rotierenden Zahnrädern weiter beschleunigen und den Messaufbau vereinfachen. Messungen an bewegten – und rotierenden – Objekten mit Geschwindigkeiten von mehreren mm/s wurden bereits durch Fraunhofer IPM demonstriert [8, 9].

Der Einsatz holographischer Sensoren in Bearbeitungszentren bietet ebenfalls neue Möglichkeiten zur Qualitätssicherung direkt in der Fertigung, z. B. beim Allzahn-Fräsen.

## **5. Zusammenfassung**

Die digitale Mehrwellenlängenholographie ist ein vielseitig anpassbares hochgenaues 3D-Messverfahren mit extrem hohen Messraten. Mit dem Prototyp HoloGear wurde die hochpräzise 3D-Zahnflankenmessung an realen Zahnrädern demonstriert. Dabei wurde eine Flanke in unter 200 ms aufgenommen und mit einer Reproduzierbarkeit der Höhendaten im einzelnen Messpunkt von deutlich unter 1 Mikrometer ausgewertet. Diese schnelle und flächige Messung bietet Zugang zu neuen Eigenschaften: Neben der Erkennung typischer Defekte wie Risse, Kratzer oder Schlagstellen ist auch die Auswertung der Mikrostruktur der Oberfläche möglich und dies in nur wenigen Sekunden. Dies eröffnet den messtechnischen Zugang zu neuartigen Geräusch- und Wirkungsgradanalysen.

## **Danksagung**

Die Zahnflankenprüfung wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts "HoloMotion" (FKZ: 13N14009) zusammen mit den Firmen Frencio GmbH und ZF Friedrichshafen AG vorangetrieben. Wir danken dem VDI Technologiezentrum für die fachliche Betreuung als Projektträger und dem BMBF für die finanzielle Unterstützung des Fördervorhabens.

## Literaturangaben

- [1] Wagner, C., Osten, W. u. Seebacher, S.: Direct shape measurement by digital wavefront reconstruction and multiwavelength contouring. *Optical Engineering* 39 (2000) 1, S. 79–85
- [2] Beckmann, T.: Schnelle optische Vermessung von Mikrostrukturen auf tellergroßen Flächen. *Journal für Oberflächentechnik* (2020) 12, S. 49–51
- [3] Fratz, M., Seyler, T., Bertz, A. u. Carl, D.: Digital holography in production: an overview. *Light: Advanced Manufacturing* 2 (2021) 2, S. 134–146
- [4] Fratz, M., Beckmann, T., Anders, J., Bertz, A., Bayer, M., Gießler, T., Nemeth, C. u. Carl, D.: Inline application of digital holography [Invited]. *Applied Optics* 58 (2019) 34, G120
- [5] Seyler, T., Engler, J., Fuchs, M., Beckmann, T., Fratz, M., Bertz, A., Carl, D., Grün, V., Börret, R., Ströer, F., Seewig, J., Börret, R. u. Seewig, J.: HoloPort – Submikrometergenau 3D-Messen in der Werkzeugmaschine. *Technisches Messen* 87 (2020) 3, S. 210–221
- [6] Stevanovic, J., Seyler, T., Aslan, J., Beckmann, T., Bertz, A. u. Carl, D.: Digital holographic measurement system for use on multi-axis systems. *Proceedings of SPIE. SPIE 2021*, S. 398–408
- [7] Schiller, A., Beckmann, T., Fratz, M., Bertz, A. u. Carl, D.: Microscopic height measurements on moving objects with digital holography. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XII. SPIE 2021 - 2021*, S. 61
- [8] Schiller, A., Beckmann, T., Fratz, M., Bertz, A., Carl, D. u. Buse, K.: Motion compensation for interferometric off-center measurements of rotating objects with varying radii. *APL Photonics* 4 (2019) 7, S. 71301
- [9] Schiller, A., Beckmann, T., Fratz, M., Bertz, A., Carl, D. u. Buse, K.: Multiwavelength holography: height measurements despite axial motion of several wavelengths during exposure. *Applied Optics* 58 (2019) 34, G48

# IATF 16949: Rückführung, Kalibrierung und Abnahme von Zweiflankenwälzprüfgeräten

Dipl.-Ing. **Andreas Pommer**, B.Eng. **Philip Jukl**,  
B. Eng. **Markus Seifert**, FRENCO GmbH, Altdorf bei Nürnberg

## Kurzfassung

Mit der Neufassung der IATF16949 rücken für Anbieter und für Bezieher von Mess- und Prüfmitteln sowie Kalibrierdienstleistungen die neuen Anforderungen an den zugehörigen Kalibrierschein in den Blick. Der Fokus wird vor allem auf das Führen des Zeichens der nationalen Akkreditierungsinstitute im Kalibrierschein gelegt. Dieser Text erläutert den Umgang der FRENCO GmbH mit der Norm IATF 16949 für Zweiflankenwälzprüfung und den dabei entstehenden Herausforderungen, welche sich durch die fehlende Darstellung dieser Messgrößen durch die zuständigen Institutionen ergeben.

## 1. Einleitung

Die Firma FRENCO produziert Geräte für die Zweiflankenwälzprüfung, die passenden Lehrzahnräder sowie die zur Auswertung benötigte Software. Für jedes Messgerät stellt die Rückführung und die regelmäßige Kalibrierung eine wichtige Eigenschaft dar. Eine Norm die dies fordert und beschreibt ist die IATF 16949. [1]

Diese IATF wird in letzter Zeit häufig zitiert und ist besonders für die Forderung nach einer Akkreditierung für ein Labor und dessen Dienstleistungen bekannt. Bei FRENCO ist aber auch der Eindruck entstanden, dass die weiteren Forderungen bzw. in dieser Norm beschriebenen Alternativen weniger angewendet werden.

An einem praktischen Beispiel – der Kalibrierung von Zweiflankenwälzprüfgeräten – soll der Umgang mit dieser Norm erläutert werden. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass die üblichen Merkmale der Wälzprüfung nicht direkt rückführbar sind. Die nationale Instanz, die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), bietet keine Kalibrierung für diese Merkmale an.

## 2. Was ist Kalibrierung?

Die Kalibrierung wird mit einer Maßverkörperung, einem sogenannten Normal, an einem Messgerät durchgeführt um die Abweichungen des Messgeräts zu bestimmen (Bild 1). Für

das verwendete Normal werden die Istwerte dokumentiert. Ein Sollwert ist zunächst nicht bekannt.

Grundsätzlich ist es sinnvoll Kalibrierungen regelmäßig zu wiederholen, da sich die Istwerte, zum Beispiel aufgrund des Verschleißes der Bauteile des Messgeräts, ändern können.

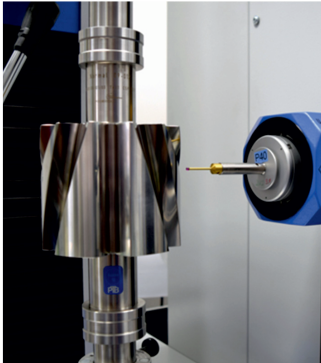


Bild 1: Kalibrierung eines Normal auf einem Verzahnungsmessgerät

### 3. Was ist Rückführung?

Um einen Sollwert (den Kalibrierwert) des Normal zu erhalten, ist eine höhere Instanz notwendig, die mit geringerer Messunsicherheit wiederum einen Istwert ermitteln kann. Es entsteht dabei die bekannte Pyramide, an deren Spitze in Deutschland die PTB steht (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).



Bild 2: Rückführungspyramide

Das Ziel ist die Rückführung des Messwertes auf eine SI-Einheit, in unserem Fall auf eine Länge. Die Kompetenz und die zugehörige Messunsicherheit werden durch eine Akkreditierung nachgewiesen. Im Fall von Kalibrierlaboratorien erfolgt die Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025. [2] Zu beachten ist, dass eine Akkreditierung nicht notwendigerweise aussagt, dass die Messunsicherheiten besonders klein sind. Sie sind lediglich gut dokumentiert.

Im Fall der Zweiflankenwälzprüfung hat die Pyramide keine Spitze. Eine direkte Rückführung ist nicht möglich und damit auch keine Akkreditierung.

#### 4. Was ist eine Abnahme?

Eine Abnahme beschreibt eine Prüfung auf vereinbarte Eigenschaften. Insbesondere die Messunsicherheiten sind dabei von Interesse. Die Abnahme erfolgt typischerweise vor Auslieferung des Messgerätes und kann die erste Kalibrierung beinhalten.

#### 5. Was ist die Zweiflankenwälzprüfung?

Bei der Zweiflankenwälzprüfung werden zwei Zahnräder spielfrei miteinander abgewälzt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Ein Rad ist der Prüfling, das zweite Rad ist ein Lehrzahnrad, das selbst mit möglichst geringen Abweichungen ausgeführt

ist. Die Prüfung kann mit einer Werkstückumdrehung abgeschlossen sein und erfasst so in sehr kurzer Zeit die Achsabstandsänderung zwischen Lehrzahnrad und Werkstück.

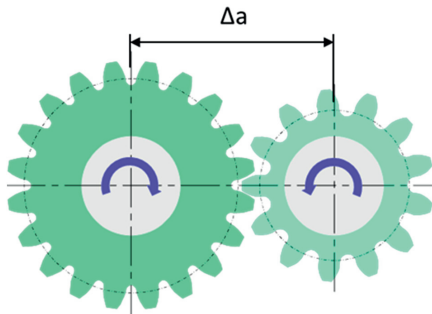


Bild 3: Prinzip der Zweiflankenwälzprüfung

Es handelt sich um eine Summenfehlerprüfung, da durch die Überdeckung potenziell die gesamte Werkstückoberfläche in Eingriff kommen kann. Das Verfahren ermöglicht eine schnelle Prüfung der Funktion. Die geringe Messzeit erklärt die große Beliebtheit dieser Methode.

Die Achsabstandsänderung wird in einem Diagramm aufgezeichnet (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Anschließend werden drei typische Kennwerte berechnet:

Die Wälzabweichung  $F_i''$  beschreibt die Abweichung der gesamten Messkurve. Der Wälzsprung  $f_i''$  steht für die größte Abweichung innerhalb eines Bereichs der Umdrehung, die einer Zahnteilung entspricht. Um die kleinen Welligkeiten des Zahneingriffs von den Lagefehlern zu trennen, wird durch Filterung eine geglättete Linie berechnet, die als Äquivalent zur Rundlaufabweichung angesehen wird. Dieser langwellige Anteil wird Wälzrundlauf  $F_r''$  genannt. [3]

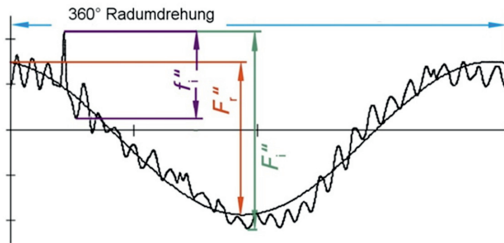


Bild 4: Wälzkurve einer Zweiflankenwälzprüfung mit Kennwerten

## 6. Was ist die IATF 16949?

Diese Norm stellt im Grunde eine Erweiterung der ISO 9001:2015 um die speziellen Anforderungen der Automobilindustrie dar. Im Folgenden wird deren Anwendung in der Praxis am Beispiel der Zweiflanken-Wälzprüfung erläutert.

## 7. Ausgangspunkt

Die Kernfrage lautet: „Wir möchten die Zweiflankenwälzprüfung verwenden – können die Forderungen der IATF 16949 erfüllt werden?“

Gemäß Abschnitt 7.1.5.3.2 „Externe Labore“ soll ein externes Labor, also ein Dienstleister, eine Kalibrierung durchführen. Dies ist akzeptabel, wenn dafür ein Kalibrierschein mit DAkkS-Akkreditierungszeichen vorhanden ist *oder* wenn das Labor den Kundenanforderungen genügt.

Derzeit gibt es keine Möglichkeit die Messgrößen Wälzabweichung  $F_1$ , Wälzsprung  $f_1$  und Wälzrundlauf  $F_r$  an nationale Normale anzubinden. Diese Messgrößen werden aktuell nicht von den zuständigen Institutionen dargestellt. Durch das Fehlen einer Maßverkörperung ist eine direkte Maßanbindung an nationale Normale im klassischen Sinne nicht gegeben. Auch eine abstrakte Betrachtung der Einzelfehler an rückgeführten Verzahnungsnormale ist nicht zielführend. Diese Einzelfehler werden nicht flächig betrachtet, was die kinematischen Beziehungen beim Abwälzen missachten würde. Die statische Betrachtung eines solchen Systems wäre prinzipiell möglich, gibt demnach aber keine Auskunft über den dynamischen Fall der eigentlichen Anwendung. Somit scheidet ein Kalibrierschein mit DAkkS-Akkreditierungszeichen aus. Auch ist die Verwendung des DAkkS-Siegels strengen Vorschriften unterworfen und wäre in diesem Fall nicht zulässig. [4]

Gemäß IATF kann der Nachweis der Eignung anderweitig erfolgen, zum Beispiel durch ein Audit. Im Jahr 2018 wurden bei FRENCO bereits zwei solcher Kundenaudits erfolgreich durchgeführt. Aus der Vielzahl der heutigen Lieferantenbeziehungen ergibt sich, dass nicht jeder jeden auditieren kann. Kann das Audit nicht selbst durchgeführt werden, ist es möglich ein bereits durchgeführtes Audit anzuerkennen.

Existiert keine Rückführung, kann die Kalibrierung laut IATF 16949 vom Hersteller des Messgeräts übernommen werden. Es wird dabei angenommen, dass der Hersteller auch ohne zusätzlichen Nachweis kompetent ist. Der Hersteller muss jedoch die Anforderungen an interne Labore nach Abschnitt 7.1.5.3.1 erfüllen.

## 8. Eigene Verfahren

Bei fehlender Rückführbarkeit fordert Abschnitt 7.1.5.3.1 das Einführen eigener Verfahren. FRENCO verwendet für die Kalibrierung von Zweiflankenwälzprüfgeräten interne Normale, also Zahnräder, die auf den Geräten gemessen werden.

Dieser sogenannte Grenzwertkalibriersatz besteht aus fünf Meistern: einem nahezu abweichungsfreien Lehrzahnrad und vier Meistern mit unterschiedlichen geometrischen Eigenschaften. Die vier Meister verkörpern die typischen Kenngrößen der Zweiflankenwälzprüfung (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).



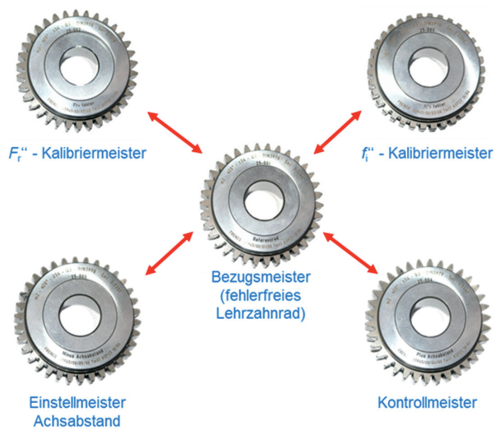


Bild 5: FRENCO-Grenzwertkalibriersatz

Ein Meister hat einen besonders großen Rundlauf, um die Fähigkeit diesen Rundlauf zu messen überprüfen zu können. Zwei weitere wichtige Kennwerte sind zum einen unterschiedliche Zahndicken bzw. Achsabstände, zum anderen erhöhte Wälzsprünge  $f_r''$  durch definierte Einzel-Teilungsfehler (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).



Bild 6: Beispiel - Ergebnis für Kalibriermeister mit definiertem  $f_i$ -Fehler

Die Meister werden als kompletter Satz gehandhabt und immer in gleicher Kombination verwendet. So ist eine hohe Reproduzierbarkeit sichergestellt. In der Praxis stehen bei FRENCO mehrere Sätze zur Verfügung, mit unterschiedlichen Modulen und Größen. Diese Sätze stehen auch dem Außendienst, z.B. in China, zur Verfügung.

Bei Abnahmen, Wartung und Service wird jeweils ein Werks-Kalibrierschein erstellt. Dies dient als Grundlage für Audits und Zertifizierungen.

Die Messungen selbst entsprechen dem Verfahren 1 nach [5] mit 25 Wiederholmessungen. Im ersten Schritt ergibt sich unmittelbar die Wiederholbarkeit.

Wird mit dem gleichen Kalibriermeistersatz Verfahren 1 auf einer Vielzahl von Geräten durchgeführt, entsteht eine Vielzahl von Istwerten. Aus den vorliegenden Istwerten wird der Mittelwert berechnet, der jetzt den Sollwert einer höheren Instanz in der Rückführungs-pyramide ersetzt. Das ähnelt einem sogenannten Ringvergleich, der u.a. dem Abgleich von systematischen Unsicherheiten dient. Diese Methode stellt eine Rückführung ohne oberste staatliche Institution dar und ist konform mit Abschnitt 6.5 aus ISO 17025:2018.

Mit dem neuen Sollwert kann eine Beurteilung der systematischen Abweichungen (Versatz, Bias) erfolgen. Die Messunsicherheit kann so komplett beschrieben werden. Diese Methode erfordert viel Sorgfalt, führt aber mit steigender Anzahl der Messungen zu einer immer sichereren Beurteilung von Zweiflankenwälzprüfgeräten.

Die Anforderungen der IATF 16949 werden auch ohne eine direkte Rückführung erfüllt. Das ist der Kern des Vorgehens bei FRENCO (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).



Bild 7: Vorgehen zur Erfüllung der IATF 16949 bei nicht rückführbaren Kennwerten

### 9. Weitere Überlegungen

Es sind Alternativen für eine direkte Rückführung denkbar. Die erste Option besteht in der Kalibrierung der Kennwerte durch die PTB. Dieser Schritt ist bislang jedoch nicht absehbar.

Die zweite Option besteht darin Zweiflankenwälzprüfgeräte vergleichsweise als Längenmessgeräte zu betrachten. Dies wäre mit kalibrierten Endmaßen recht einfach durchführbar. Allerdings ist solch eine statische Messung, verglichen mit der Kinematik einer Zweiflankenwälzprüfung, aus Sicht von FRENCO nicht repräsentativ genug.

Des Weiteren wäre eine Kalibrierung mit zwei glatten Scheiben definierten Durchmessers denkbar. Dabei findet eine Linienberührung zwischen den Scheiben statt, die erfahrungsgemäß aber relativ unempfindlich gegenüber Taumelfehlern zwischen den Ausrichtachsen ist. Zahnräder greifen dagegen in mehreren Lücken ineinander und reagieren sehr sensibel auf schiefe Achsen. Die Forderung nach möglichst gleichen Bedingungen (IC, Identical Condition) wäre auch dabei nicht erfüllt.

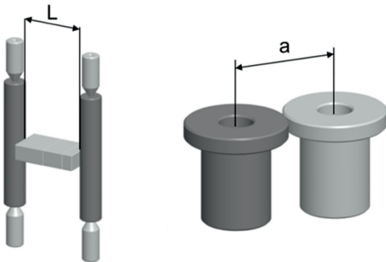


Bild 8: Möglichkeiten zur rückführbaren Kalibrierung eines Zweiflankenwälzprüfgerätes

## 10. Fazit

Mit dem FRESCO-Grenzwertkalibriersatz ist eine Kalibrierung von Zweiflankenwälzprüfgeräten möglich. Der Werks-Kalibrierschein dient zudem als Nachweis bei Abnahmen. Die Rückführung wird durch ein eigenes Verfahren, auf Basis von Mittelwerten einer großen Stichprobe gewährleistet. Somit ist die Konformität zur IATF 16949 gegeben.

- [1] IATF 16949: Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organisations, 2016
- [2] DIN EN ISO/IEC 17025: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017), 2018
- [3] VDI/VDE 2608: Einflanken- und Zweiflanken-Wälzprüfungen an Zylinderrädern, Kegelrädern, Schnecken und Schneckenrädern, 2001
- [4] Regeln für akkreditierte Konformitätsbewertungsstellen zur Verwendung der Akkreditierungsurkunde und des Akkreditierungssymbols der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH, 71 SD 0 011, Revision: 1.1, 2016
- [5] Dietrich/Schulze (2017): Eignungsnachweis von Prüfprozessen - Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld, 5. überarbeitete Auflage, München: Carl Hanser Verlag.

## Einblick in die Welt der Kunststoffverzahnungen

### Eine andere Welt ?!

Dr.-Ing. **Andreas Langheinrich**, Horst Scholz GmbH & Co. KG, Kronach

#### Kurzfassung

Höchstwahrscheinlich übertrifft die weltweite Anzahl von Kunststoffverzahnungen die Anzahl der Metallverzahnungen bei weitem. Das mag nicht einmal eine Überraschung sein, da Kunststoffverzahnungen einige Vorteile haben, welche sie im Vergleich zu Metallverzahnungen für eine Vielzahl von Anwendungen besser anwendbar machen:

- Prädestiniert für Leichtbau (nur 15% - 20% des Gewichts von Stahl)
- Preisgünstige Herstellung
- Schnelle Fertigung / Massenproduktion
- Im Regelfall keine Nacharbeit (z.B. Schleifen) notwendig
- Innere Dämpfung
- Betrieb im Trockenlauf möglich
- Inkorporierte Schmierung realisierbar

Trotzdem spielen Kunststoffverzahnungen in den Köpfen der Ingenieure eine kleinere Rolle als Verzahnungen aus Metall.

Ein Einflussfaktor könnte ein nachteiliger Ruf von Kunststoffverzahnungen im Maschinenbau hinsichtlich ihrer Genauigkeit sein. Allerdings hat sich die Herstellung von Kunststoffverzahnungen stetig weiterentwickelt z.B. in der Werkzeugherstellung, im Spritzgussprozess und in der Qualitätskontrolle. Betrachtet man die heutzutage realisierbaren Fertigungsgenauigkeiten, sollte der Ruf der Verzahnungsgenauigkeit von Kunststoffverzahnungen eindeutig überdacht werden, insbesondere vor dem Hintergrund der eher kleinen oder sogar sehr kleinen Zahngrößen von Kunststoffverzahnungen.

Ein weiterer Einflussfaktor scheint zu sein, dass abgesicherte Werkstoffkennwerte, wie sie für Stahlzahnräder schon seit längerer Zeit vorliegen, für Kunststoffzahnräder erst noch geschaffen werden müssen.

## Abstract

The worldwide number of plastic gears most likely exceeds the number of metal gears significantly. This might not even be a surprise as plastic gears have a number of advantages which make them more usable for various applications compared to metal gears:

- Predetermined for lightweight construction (only 15% - 20% the weight of steel)
- Low priced production
- Fast production / Mass production
- Reworking (e.g. grinding) is usually not necessary
- Internal damping
- Dry run operation possible
- Incorporated lubrication realizable

However, in engineer's minds plastic gears apparently play a smaller role than metal gears. One influencing factor might be a disadvantageous reputation of plastic gears in mechanical engineering concerning their accuracy. But manufacturing of plastic gears has been advanced constantly e.g. in tool-making, moulding and quality control. Regarding today's realizable manufacturing accuracies, the reputation of plastic gear accuracy should definitely be reviewed, especially against the background of the rather small or even very small teeth sizes of plastic gears.

Another influencing factor seems to be that verified material data, as they have already been available for metal gears for a fairly long time, still have to be created for plastic gears.

## 1. Vorteile von Kunststoffverzahnungen

Höchstwahrscheinlich übertrifft die weltweite Anzahl von Kunststoffverzahnungen die Anzahl der Metallverzahnungen bei weitem. Das mag nicht einmal eine Überraschung sein, da Kunststoffverzahnungen einige Vorteile haben, welche sie im Vergleich zu Metallverzahnungen für eine Vielzahl von Anwendungen besser anwendbar machen:

- Prädestiniert für Leichtbau (nur 15% - 20% des Gewichts von Stahl)
- Preisgünstige Herstellung
- Schnelle Fertigung / Massenproduktion
- Im Regelfall keine Nacharbeit (z.B. Schleifen) notwendig
- Innere Dämpfung
- Betrieb im Trockenlauf möglich
- Inkorporierte Schmierung realisierbar

## 2. Herausforderungen

In der deutschen Richtlinie VDI 2736 [5], sind Berechnungsmethoden für gerad- und schrägverzahnte Kunststoffzahnräder definiert. Die in VDI 2736 verwendeten Berechnungsmethoden sind von der deutschen Norm DIN 3990 [1] und der internationalen Norm ISO 6336 [3] abgeleitet. Beide Normen sind weitreichend bekannte, akzeptierte und angewandte Normen zur Berechnung der Tragfähigkeit von Metallzahnradern. Die Berechnung der Beanspruchungen nach VDI 2736 gleicht deswegen der Berechnung nach DIN 3990 bzw. ISO 6336. Momentan sind jedoch keine DIN - / EN - / ISO - Normen zur Berechnung der mechanischen und tribologischen Tragfähigkeit von Kunststoffzahnradern verfügbar. Aus diesem Grund wurde im Jahr 2021 eine Arbeitsgruppe im Deutschen Institut für Normung (DIN) gegründet, welche sich mit der Erstellung einer entsprechenden Norm befasst. In VDI 2736 sind 3 Prüfverzahnungen der Baugrößen  $m_n = 1.0 \text{ mm} / 2.0 \text{ mm} / 4.5 \text{ mm}$  definiert, mit welchen Kennwerte zur Beanspruchbarkeit ermittelt werden können. Da der Normalmodul ( $m_n$ ) der kleinsten Baugröße am besten zu den von SCHOLZ produzierten Kunststoffzahnradern passt, werden Prüfverzahnungen dieser Größe bei SCHOLZ gefertigt und getestet (**Bild 1**).



**Bild 1:** Prüfverzahnung nach VDI 2736 (Baugröße 1), hergestellt und getestet bei SCHOLZ

Bis zum heutigen Tag herrscht allerdings ein großer Mangel an abgesicherten Werkstoffkennwerten für Kunststoffzahnräder. Erschwerend kommt hinzu, dass mechanische und tribologische Werkstoffkennwerte von Kunststoffen aufgrund folgender Parameter vermutlich schwerer als bei Metallen zu ermitteln sind:

- Feuchtigkeit (Aufnahme durch den Kunststoff)
- Temperatur (signifikanter Einfluss auf Festigkeit und Verformung des Kunststoffs)
- Schmierstoff (mögliche Eigenschaftsveränderungen bei Eindringen in den Kunststoff)
- Lastfrequenz (aus Dämpfung resultierende Erwärmung des Kunststoffs)
- Kriechen (des Kunststoffs bei dauerhaft anliegender Last)
- Alterung

Eine typische Herausforderung bei der Herstellung durch Spritzguss ist die Berücksichtigung der radialen (siehe Doppelpfeil „1“ in **Bild 2**), tangentialen (2) und axialen (3) Bauteilschwindung. Die Schwindung führt dazu, dass die Innenkontur der Spritzgussform (graues Dünnwandmodell in **Bild 2**) größer ausfallen muss, als die Außenkontur des gefertigten Zahnrades (roter Körper in **Bild 2**).

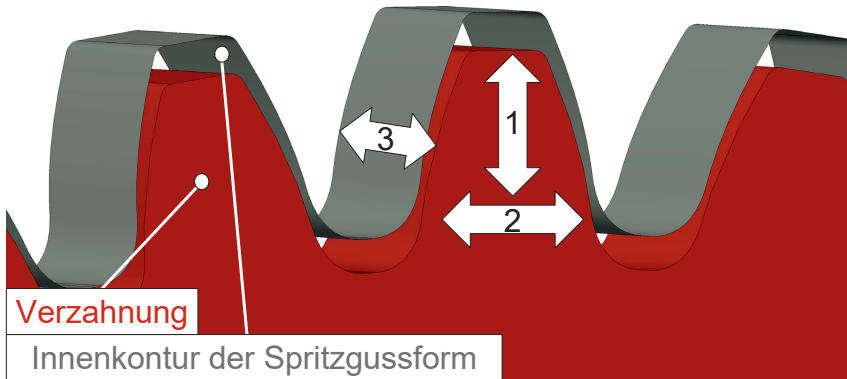


Bild 2: Schwindung des Zahnrades (rot) in der Spritzgussform (grau)

Aufgrund der Schwindung kann zudem Verzug am Zahnrad auftreten. Bei einem Stirnrad mit unsymmetrisch ausgespartem Stegradkörper (**Bild 3**; linkes Teilbild) kann dies den Kopfkreiszyylinder in Zahnbreitenrichtung zu einem Konus verformen. Die entsprechende Abweichung am Zahnkopf ist qualitativ in **Bild 3** (rechtes Teilbild) durch das magentafarbene Dreieck dargestellt.



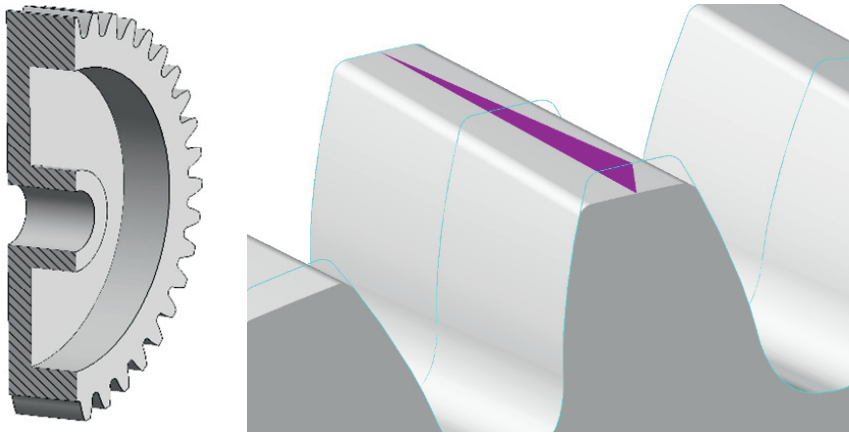


Bild 3: Verzug am Zahnrad aufgrund eines Stegradkörpers mit außermittigem Steg

Da die meisten Kunststoffzahnäder mit einer Bohrung ausgeführt sind, findet man sehr oft ein Angussystem mit punktsymmetrisch und in gleicher Winkelteilung um die Zahnradachse angeordneten Anspritzpunkten (**Bild 4**). An den Anspritzpunkten gelangt die Kunststoffschmelze vom Angussystem in die Spritzgussform. Am Zahnrad kann ein solches Angussystem - obwohl es aus spritzgusstechnischer Sicht als fachgerecht anzusehen ist - z.B. zu sinusförmig verlaufenden Abweichungen in der Zahnteilung führen (**Bild 5**).

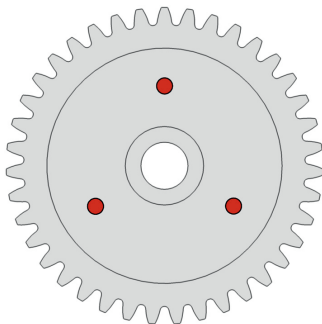


Bild 4: Anspritzpunkte (rot) am Zahnrad

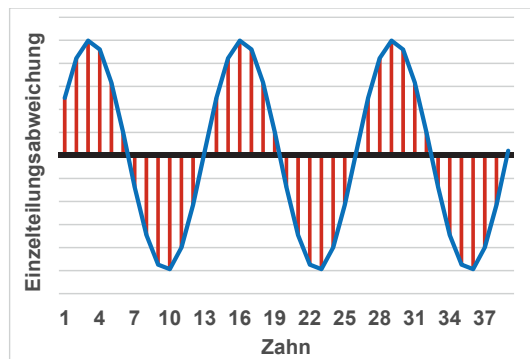


Bild 5: Sinusförmig verlaufende Einzelteilungsabweichung (qualitativ)

### 3. Dimensionen und Anwendungen

In DIN 58405 [2] (zurückgezogene deutsche Norm für die Feinwerktechnik) beginnt der Definitionsbereich für Verzahnungsqualitäten von 5 bis 8 bei einem Normalmodul von  $m_n > 0.16$  mm und für die Verzahnungsqualitäten 9 und 10 bei einem Normalmodul von  $m_n > 0.25$  mm. Die Verzahnungsqualitäten 9 und 10 können dabei als typische Verzahnungsqualitäten für Kunststoffverzahnungen angesehen werden. In VDI 2731 [4] (Deutsche Richtlinie zur Beschreibung der Grundlagen von Mikrogetrieben) wird die Grenze zwischen der Feinwerktechnik und der Mikrotechnik auf einen Normalmodul von  $m_n = 0.2$  mm gesetzt. Verzahnungen mit einem Normalmodul von  $m_n < 0.2$  mm werden als Mikroverzahnungen angesehen. Ein Blick auf die Verteilung der Normalmoduln der von SCHOLZ produzierten Verzahnungen (**Bild 6**) zeigt, dass 18% der Verzahnungen unterhalb ( $m_n \leq 0.25$  mm) des Definitionsbereichs nach DIN 58405 liegen, 5% der Verzahnungen sogar zu den Mikroverzahnungen zählen ( $m_n < 0.20$  mm) und 7% der Verzahnungen oberhalb des Normalmoduls von  $m_n = 1.5$  mm (Hälfte des Maximalwertes des Definitionsbereichs nach DIN 58405) liegen. Der Maximalwert nach DIN 58405 von  $m_n = 3$  mm kann bei Kunststoffverzahnungen schon fast dem „Schwermaschinenbau“ zugeordnet werden. Der Hauptanteil (75%) der von SCHOLZ produzierten Normalmoduln im Definitionsbereich der DIN 58405 ist im Bereich  $0.25 \text{ mm} < m_n \leq 1.5 \text{ mm}$  angesiedelt.

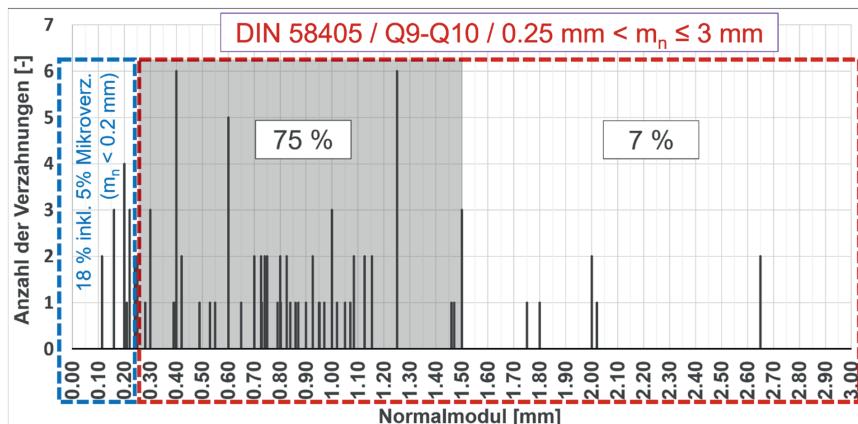


Bild 6: Verteilung der Normalmoduln der von SCHOLZ produzierten Verzahnungen

Im Allgemeinen liegen die Dimensionen von Kunststoffverzahnungen unterhalb der Dimensionen von Metallverzahnungen. Der kleinste Normalmodul ( $m_n$ ) eines bisher von SCHOLZ hergestellten Kunststoffzahnrades beträgt  $m_n = 0.114$  mm (**Bild 7**). Dieses Zahnrad ist so klein, dass es in einer Zylinderschraube der Größe M2.5x4.0 Platz findet (**Bild 7**).

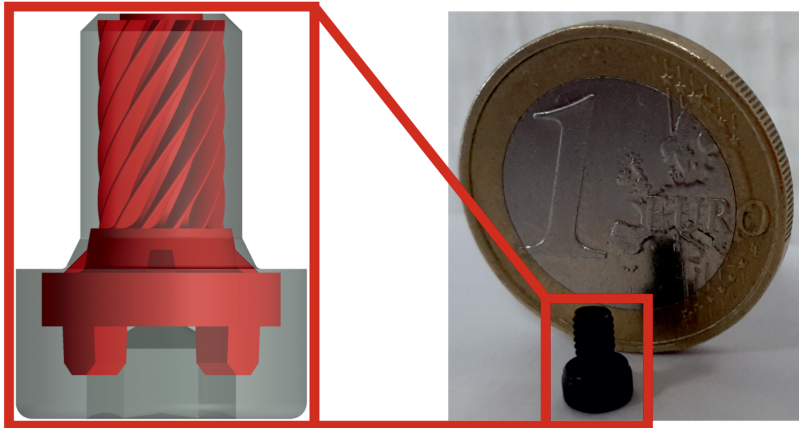


Bild 7: In eine Zylinderschraube (M2.5x4.0) eingepasstes Zahnrad

Dieses schrägverzahnte Zahnrad stellt die Schnecke in einem Schraubradgetriebe dar (**Bild 8**; durch blauen Kreis im rechten Teilbild gekennzeichnet). Dieses Schraubradgetriebe ist die zweite Getriebestufe von insgesamt 6 Getriebestufen in einem Getriebe, welches zur Bewegungsübertragung in einem Encoder eingesetzt wird (**Bild 8**).

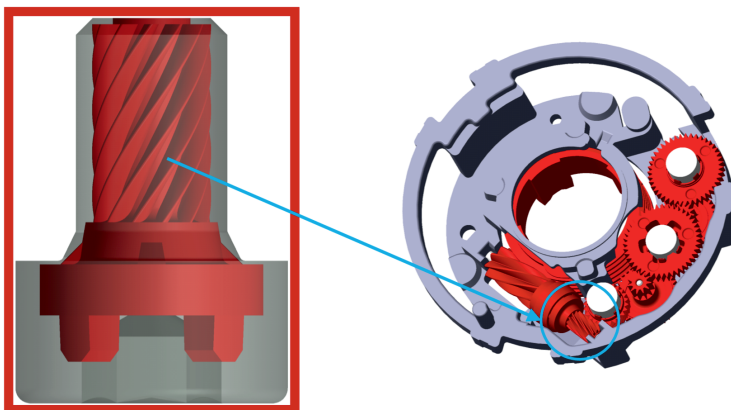


Bild 8: Mehrstufiges Getriebe zur Bewegungsübertragung in einem Encoder

In **Bild 9** sind mehrere Innenverzahnungen aus Kunststoff dargestellt, deren Zahnbreiten von der Anzahl der sich darin befindenden Getriebestufen abhängen. Innerhalb der Getriebestufen wird das von kleinen Elektromotoren am Getriebeeingang eingeleitete Drehmoment zum Getriebeausgang hin erhöht. Neben dem Planeten in der Innenverzahnung mit der kleinsten Zahnbreite ist die aus **Bild 7** bekannte Zylinderschraube (M2.5x4.0) grünfarbig abgebildet.

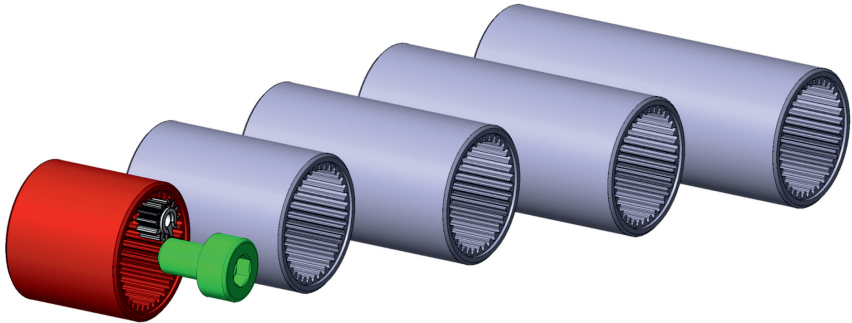


Bild 9: Innenverzahnungen mit unterschiedlichen Zahnbreiten zur Integration verschiedener Anzahlen von Getriebestufen

In **Bild 10** und in **Bild 11** ist die Zylinderschraube (M2.5x4.0) ebenfalls grünfarbig abgebildet. Vielleicht benötigt man einen Augenblick, um die Schraube zu finden, da die in diesen beiden Bildern enthaltenen Zahnräder deutlich größer sind. Das Kunststoffhohlrad in **Bild 10** wird in einer elektrisch angetriebenen Kettensäge eingesetzt, um eine Leistung von ca. 1 kW zu übertragen. Die Kunststoffzahnräder in **Bild 11** arbeiten in einem Fleischwolf zur Leistungsübertragung im hohen dreistelligen Wattbereich.

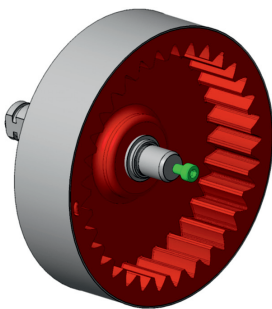


Bild 10: Hohlrad einer Elektrokettensäge

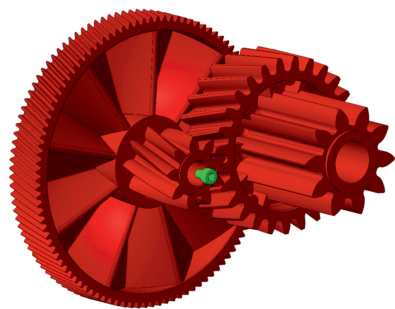
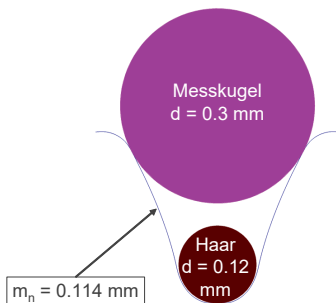
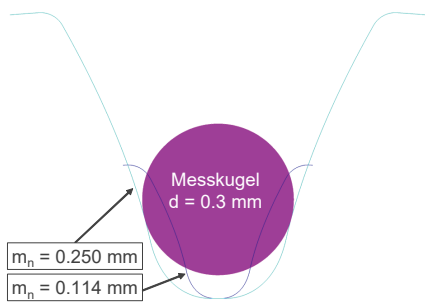


Bild 11: Zahnräder in einem Fleischwolf

Bei Betrachtung der Zahnücke des Kunststoffzahnades mit dem kleinsten bisher von SCHOLZ gefertigten Normalmodul ( $m_n = 0.114 \text{ mm}$ ; **Bild 12**) wird sehr schnell klar, dass taktile Messtechnik hier an Grenzen stößt. Bei der taktilen Messung mittels Koordinatenmessmaschine kann der Zahnfußbereich nicht einmal unter Verwendung einer Messkugel mit einem Durchmesser von  $0.3 \text{ mm}$  angetastet werden. Selbst für ein durchschnittliches Menschenhaar mit einem Durchmesser von  $0.12 \text{ mm}$  ist dieser Bereich noch relativ eng (**Bild 12**). Bei Verzahnungen an der Untergrenze des Definitionsbereichs nach DIN 58405 ( $m_n > 0.25 \text{ mm}$ ; bei den für Kunststoffverzahnungen typischen Qualitätsstufen 9 und 10), was in etwa der doppelten Größe des kleinsten bisher von SCHOLZ hergestellten Normalmoduls ( $m_n = 0.114 \text{ mm}$ ) entspricht, ist die taktile Messung im Zahnfußbereich immer noch schwer realisierbar (**Bild 13**). In **Bild 14** kommt zu den in **Bild 12** und **Bild 13** dargestellten Zahnücken noch die Zahnücke einer Verzahnung mit einem Normalmodul von  $m_n = 1.5 \text{ mm}$  (Hälfte des Maximalwertes des Definitionsbereichs nach DIN 58405) hinzu. Obwohl ein Normalmodul von  $m_n = 1.5 \text{ mm}$  für eine Metallverzahnung nicht groß erscheint, wirkt die zugehörige Zahnücke bereits riesig im Vergleich zu den in **Bild 12** und **Bild 13** dargestellten Zahnücken. Der größte Normalmodul ( $m_n = 2.65 \text{ mm}$ ; 88% des Maximalwertes des Definitionsbereichs nach DIN 58405) eines bisher von SCHOLZ produzierten Kunststoffzahnades (**Bild 15**) erscheint wie ein typischer Wert für ein KFZ-Getriebe. Man stelle sich vor, dass die Verzahnung mit dem kleinsten bisher von SCHOLZ produzierten Normalmodul ( $m_n = 0.114 \text{ mm}$ ) eine Verzahnung in einem KFZ-Getriebe wäre. Dann würde man die Verzahnung mit dem Normalmodul von  $m_n = 2.65 \text{ mm}$  - angesichts des Verhältnisses der beiden Normalmodul von  $23.25 (= 2.65 \text{ mm} / 0.114 \text{ mm})$  - wahrscheinlich in der ersten Getriebestufe einer Multi-Megawatt-Windkraftanlage finden. Aber selbst bei dieser "großen" Kunststoffverzahnung mit einem Normalmodul von  $m_n = 2.65 \text{ mm}$  ist die radiale Ausdehnung der Zahnücke nicht größer, als die Dimension M2.5x4.0 der aus **Bild 7** bekannten Zylinderschraube (**Bild 16**).

Bild 12: Zahnücke ;  $m_n = 0.114 \text{ mm}$ Bild 13: Zahnücken ;  $m_n = 0.114 / 0.25 \text{ mm}$

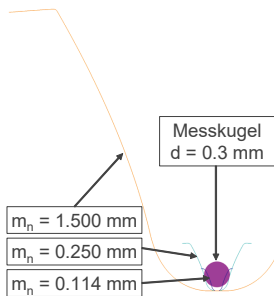


Bild 14: Zahnflanken ;  $m_n = 0.114 / 0.25 / 1.5$  mm

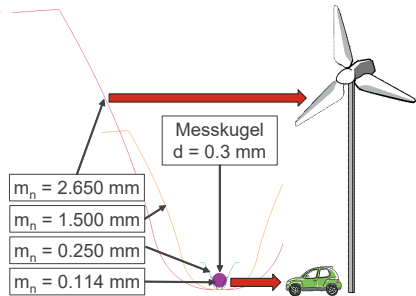


Bild 15: Zahnflanken ;  $m_n = 0.114 / 0.25 / 1.5 / 2.65$  mm

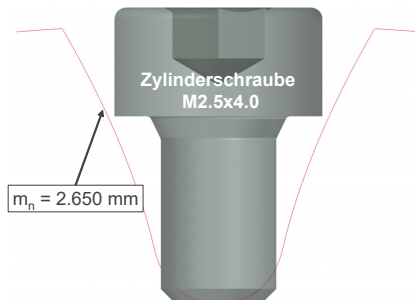


Bild 16: Zylinderschraube (M2.5x4.0) in der Zahnflanke einer Kunststoffverzahnung mit dem größten bisher von SCHOLZ produzierten Normalmodul ( $m_n = 2.65$  mm)

#### 4. Qualität und Qualitätssicherung

Zunächst würde man bei einer typischen Kunststoffverzahnungsqualität von 9 oder 10 nach DIN 58405 vielleicht nicht unbedingt ein präzises Zahnrad erwarten. Wirft man jedoch einen Blick auf typische Normalmoduln von Kunststoffverzahnungen (**Bild 6**) so erkennt man, dass die zulässigen Toleranzwerte für die zugehörigen Zahnweiten ( $W_k$ ) im Bereich weniger hundertstel Millimeter liegen. Bei Kunststoffverzahnungen mit typischen Normalmoduln ( $m_n$ ) im Bereich  $0.25 \text{ mm} < m_n \leq 1.50 \text{ mm}$  und typischen Teilkreisdurchmessern ( $d$ ) im Bereich  $3 \text{ mm} \leq d \leq 100 \text{ mm}$  bewegen sich die Zahnweitentoleranzen - in Abhängigkeit von Normalmodul und Teilkreisdurchmesser - für die Qualitätsstufe 9 im Bereich von 0.023 mm bis 0.042 mm

und für die Qualitätsstufe 10 im Bereich von 0.034 mm bis 0.059 mm. Um die Qualität von Kunststoffverzahnungen sicherzustellen, verwendet man üblicherweise - genau wie bei Metallverzahnungen - taktile Messmethoden (**Bild 17** / **Bild 18**). Allerdings ist bei Kunststoffverzahnungen auch die berührungslose Messung mittels optischer Verfahren und Computertomographie (**Bild 19**) gängige Praxis.

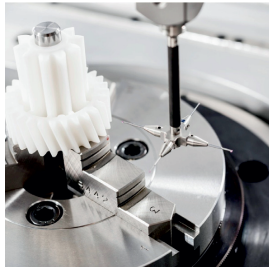


Bild 17: Koordinatenmessmaschine bei SCHOLZ

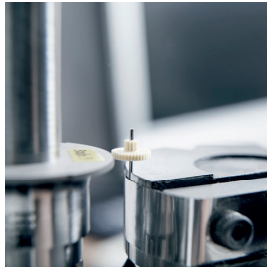


Bild 18: Zweiflanken-Wälzprüfung bei SCHOLZ



Bild 19: Computertomograph bei SCHOLZ

Zu den typischen Bestimmungsgrößen bei der Qualitätssicherung von Kunststoffverzahnungen während der Serienproduktion zählen (vgl. **Bild 20**):

- Zahnbreite ( $b$ )
- Zahndicke ( $s_n$ ) mittels Zahnweite ( $W_k$ ) / diametralem Zweikugelmaß ( $M_{dk}$ ) / diametralem Zweirollenmaß ( $M_{dR}$ )
- Kopfkreisdurchmesser ( $d_a$ )
- Fußkreisdurchmesser ( $d_f$ )
- Zweiflanken-Wälzsprung ( $f_i''$ )
- Zweiflanken-Wälzabweichung ( $F_i''$ )
- Wälz-Rundlaufabweichung ( $F_r''$ )

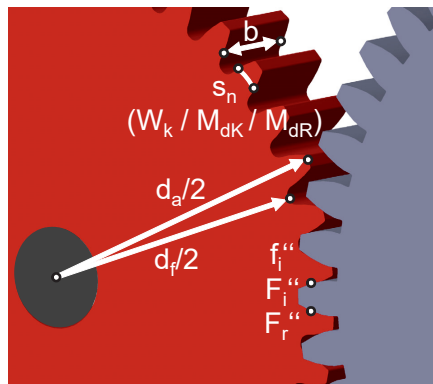


Bild 20: Typische Bestimmungsgrößen bei Kunststoffzahnradern während der Serienproduktion

Darüber hinaus können - auf Basis der Messwerte einer Koordinatenmessmaschine bzw. eines Computertomographen (CT) - auch Messschriebe erstellt werden, welche u.a. die folgenden, zusätzlichen Bestimmungsgrößen beinhalten:

- Profil-Gesamtabweichung ( $F_\alpha$ ), -Formabweichung ( $f_{fa}$ ), -Winkelabweichung ( $f_{Ha}$ )
- Flankenlinien-Gesamtabweichung ( $F_\beta$ ), -Formabweichung ( $f_{f\beta}$ ), -Winkelabweichung ( $f_{H\beta}$ )
- Teilungs-Gesamtabweichung ( $F_p$ ), -Einzelabweichung ( $f_{pt}$ )
- Rundlaufabweichung ( $F_r$ ), Exzentrizität ( $f_e$ )

Vor der Serienfertigung liegt immer die Bemusterungsphase des Spritzgusswerkzeugs, in welcher Form- und Lageabweichungen am Zahnrad durch entsprechende Korrekturen an der Spritzgussform bzw. im Spritzgusswerkzeug in die vorgegebenen Toleranzbereiche gebracht werden. Um Form- und Lageabweichungen - u.a. aufgrund der Schwindung und des hiermit verbundenen Verzugs - am Zahnrad umfassend zu erkennen, werden alle am Zahnrad vorhandenen Zähne bei den Messungen berücksichtigt. Die Messergebnisse dienen als Grundlage für die Korrektur der Form- und Lageabweichungen. Die taktile Messung des Kopf- und des Fußkreisdurchmessers wird dabei nicht nur in Zahnbreitenmitte, sondern auch im Bereich der beiden Stirnseiten durchgeführt (**Bild 21**), um z.B. durch Verzug entstandene Konizität (vgl. **Bild 3**) zu erkennen. Die Profilinie (grün) wird in Zahnbreitenmitte und die Flankenlinie (gelb) bei etwa halber Zahnhöhe gemessen. Die ebenfalls bei etwa halber Zahnhöhe durchgeführte Teilungsmessung wird nicht nur in Zahnbreitenmitte, sondern auch im Bereich der beiden Stirnseiten durchgeführt (**Bild 21**). Durch die Messung der Teilungen im Bereich der beiden Stirnseiten kann ein evtl. vorliegender Taumel erkannt und korrigiert werden.

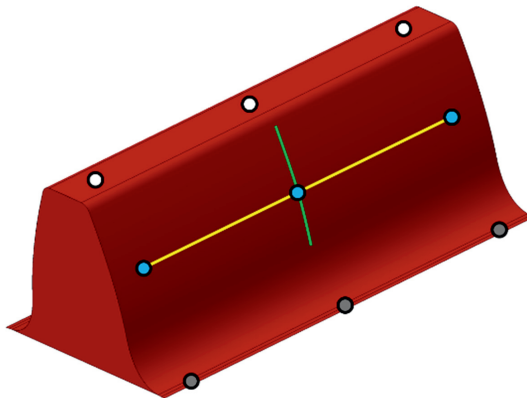


Bild 21: Messpunkte (Zahnkopf, Zahnfuß, Teilung) und Messlinien (Profil, Flanke) bei taktilem Vermessung mittels Koordinatenmessgerät



## 5. Fertigung im Grenzbereich

Typische Verfahren für die Herstellung von Spritzgussformen zur Fertigung von Kunststoffverzahnungen sind das Drahterodieren und das Senkerodieren. Das Drahterodieren hat sich darüber hinaus auch für die Herstellung geradverzahnter Lehrzahnräder mit sehr kleinen Normalmoduln bewährt. Um Lehrzahnräder mit einem Normalmodul von  $m_n = 0.16$  mm herzustellen, wurden firmenintern Drähte mit Drahtdurchmessern bis hinab zu 0.03 mm verwendet (**Bild 22**). In **Bild 22** ist zudem das Größenverhältnis eines solchen Drahtdurchmessers (0.03 mm) zum Durchmesser eines durchschnittlichen Menschenhaars (0.12 mm) erkennbar.

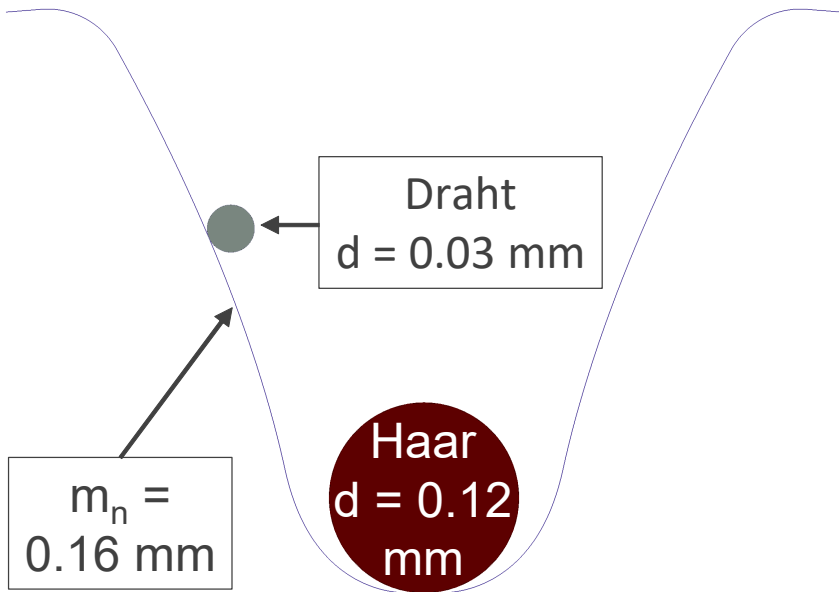


Bild 22: Draht für Drahterodieren und ein durchschnittliches Menschenhaar in der Zahnflanke eines Lehrzahnrades mit einem Normalmodul von  $m_n = 0.16$  mm

Beim Kunststoffzahnrad mit dem kleinsten bisher von SCHOLZ gefertigten Normalmodul von  $m_n = 0.114$  mm handelt es sich um eine Schrägverzahnung mit einem Schrägungswinkel von ca. 30°. Um das hiermit einhergehende, in Zahnbreitenrichtung schraubenförmig um die Drehachse des Zahnrades verlaufende Zahnprofil zu realisieren, muss dessen Spritzgussform durch Senkerodieren hergestellt werden. Für den Prozess des Senkerodierens muss eine Elektrode mit derselben Gestalt und nahezu derselben Größe des Kunststoffzahnrades

gefertigt werden (siehe linkes Teilbild von **Bild 23**). Die kleine Differenz in der Größe resultiert aus der Berücksichtigung der Schwindung des Kunststoffzahnrades aufgrund des Spritzgussprozesses (siehe **Bild 2**) und einer kleinen Lücke zwischen der Elektrode und der Spritzgussform, welche durch den Senkerodierprozess bedingt ist. Da diese Elektrode durch Fräsen (5-Achs-Fräsen) hergestellt wird, wird ein sehr kleiner Fräser mit einem Durchmesser von ungefähr 0,1 mm benötigt. Um ein Gefühl für die Größe dieses Fräasers zu bekommen empfiehlt es sich, die 3 in **Bild 23** enthaltenen Teilbilder von links nach rechts zu betrachten. In **Bild 23** ist der verzahnte Teil der Elektrode im linken Teilbild durch den größeren Kreis (rot) und im mittleren Teilbild durch den kleineren Kreis (rot) gekennzeichnet. Der Fräserkopf ist im linken Teilbild durch den kleineren Kreis (gelb) gekennzeichnet. Die Elektrode und der zur Verbindung der Elektrode mit der Senkerodiermaschine eingesetzte Adapter sind im größeren Kreis (blau) des mittleren Teilbildes sowie im Kreis auf dem rechten Teilbild dargestellt.

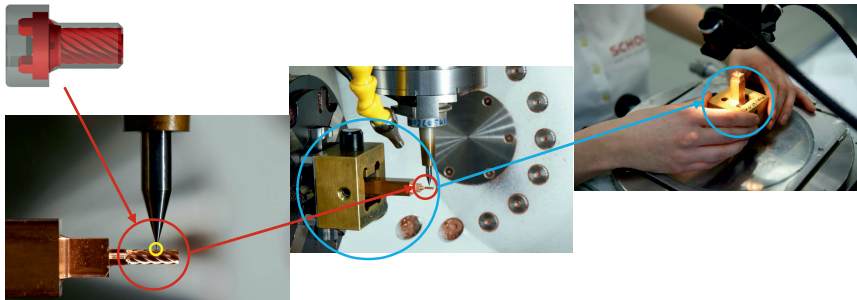


Bild 23: 5-Achs-Fräsen der Elektrode für den Senkerodierprozess zur Fertigung der Spritzgussform des von SCHOLZ produzierten Zahnrades mit Normalmodul  $m_n = 0.114 \text{ mm}$

## 6. Zukunftsperspektiven

Um das Potenzial von Kunststoffzahnradern in Zukunft voll ausschöpfen zu können, benötigt man abgesicherte Werkstoffkennwerte unter Einbindung charakteristischer Parameter (z.B. Feuchtigkeitsaufnahme, Temperatur, ...), um aussagekräftige Berechnungsergebnisse zur mechanischen und tribologischen Tragfähigkeit von Kunststoffzahnradern erhalten zu können. Aufbauend hierauf kann die Substitution von Metallen durch Kunststoffe bei antriebs-technischen Anwendungen beschleunigt werden. Zudem muss auch noch der Wandel in der

Sichtweise von Kunststoffverzahnungen vom „Plastikteil“ hin zum „Maschinenelement“ vollzogen werden.

Um fertigungsbedingte Form- und Lageabweichungen aufgrund des teilweise komplexen Schwindungs- und Verzugsverhaltens spritzgegossener Kunststoffverzahnungen in Zukunft noch exakter zu ermitteln und während der Bemusterungsphase korrigieren zu können, stellt die vollflächige Vermessung der Zahnflanke - aber auch des Zahnfußes - eine denkbare Möglichkeit dar. Bei Anwendung taktiler Messtechnik wäre ein Messgitter durch Erhöhung der pro Zahn gemessenen Profil- und Flankenlinien als Annäherung an eine vollflächige Vermessung denkbar. Der hierdurch erhöhte Zeitaufwand ist einerseits nicht zu vernachlässigen, andererseits vermutlich akzeptabel, da er während der Bemusterungsphase auftritt. Für eine vollflächige Betrachtung bieten sich u.a. Systeme zur berührungslosen Messung (Kamerasysteme oder Computertomographen) an. Obwohl die Auflösengenauigkeiten solcher Systeme bereits beachtlich hoch sind, genügen sie teilweise noch nicht den Anforderungen einer Verzahnungsmessung. Insofern es hier weitere Verbesserungen gibt, steht einer Zunahme der vollflächigen Vermessungen von Verzahnungen nicht mehr viel im Wege, zumal entsprechende Software zur Auswertung vollflächig an Verzahnungen ermittelter Messdaten bereits existiert und weiterentwickelt wird.

## 7. Literatur

- [1] DIN 3990: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern, 1987
- [2] DIN 58405: Stirnradgetriebe der Feinwerktechnik, 1972
- [3] ISO 6336: Calculation of load capacity of spur and helical gears, 2006
- [4] VDI 2731 Blatt 1: Mikrogetriebe – Grundlagen, 2009
- [5] VDI 2736 Blatt 2: Thermoplastische Zahnräder – Stirnradgetriebe – Tragfähigkeitsberechnung, 2014



# Untersuchung von Einpresskräften bei Passverzahnungen

**Philip Jukl**, FRESCO GmbH, Altdorf,  
**Christoph Haverland**, IFA Powertrain GmbH, Haldensleben,  
**Wolfgang Heise**, Volkswagen AG, Wolfsburg

## Kurzfassung

Viele Passverzahnungsverbindungen im Automobilbereich werden als Übermaßpassungen ausgeführt. Die Fertigungsmaße werden aus einer Korrelation des Übermaßes (Verrechnung von Zahndicke und Lückenweite) und den zugehörigen Einpresskräften abgeleitet. Die Einhaltung von Toleranzvorgaben für die Einpresskräfte stellt für die Fertigung der Einzelteile und deren Montage eine große Herausforderung dar.

Dieser Beitrag stellt typische Probleme von Pressverbindungen bei der Serienanwendung vor und erklärt die Grundlagen eines Versuchs zur Ursachenforschung. Die Ergebnisse führen zu neuen Herausforderungen in der theoretischen Betrachtung (Konstruktion, Simulation) und der Messtechnik.

## Abstract

Many spline joints in the automotive sector are interference fits by design. To obtain production dimensions, oversize (from taking tooth thickness and gap width into account) and insertion force are put into correlation. Meeting dimensional tolerance specifications for acceptable insertion forces is a major challenge for the production of the single components and their assembly.

This presentation focuses on typical problems of spline connections in serial production and explains the basics of an effort to find the root cause. The results lead to new challenges in the theoretical approach (design, simulation) and metrology.

## 1. Bedeutung von Einpresskräften bei Passverzahnungen

Passverzahnungen sind Maschinenelemente aus der Gruppe der Welle-Nabe-Verbindungen und ermöglichen es, hohe Drehmomente innerhalb einer Achse zu übertragen. Sie werden sowohl nach den unterschiedlichen Flankenformen, als auch nach der Art der Überdeckung zwischen den Verzahnungspartnern unterschieden. Neben den, nach der Montage

trennbaren, Steck- oder Schiebeverbindungen verwendet man auch Pressverbindungen. Letztere sind nur unter Aufwendung einer axialen Kraft füg- oder demontierbar. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass zwischen den paarungsrelevanten Merkmalen Zahndicke und Lückenweite ein konstruiertes Übermaß besteht, welches während der Auslegung der einzelnen Verzahnungspartner bestimmt wird. Seine Dimension richtet sich nach funktionalen Kriterien der Verbindung und soll in der Regel einen, über die Lebensdauer, festen Sitz gewährleisten. Eine sichere Aufnahme von Kippmomenten oder das Abstützen von Axialkräften aus Laufverzahnungen sind ebenso, wie das Unterbinden von axialen Verschiebungen oder Verdrehspielen, sowie Erscheinungen, die damit einhergehen (bspw. Passungsrost und Taumeln) Hauptanforderungen an die Konstruktion.

Um diese Anforderungen in der Serienproduktion einzuhalten bzw. zu überwachen, verwendet man neben der geometrischen Messung der Passverzahnungen, die Kraft-Weg-Überwachung der Fügekräfte während des Einpressvorgangs. In Bild 1 wird eine beispielhafte Darstellung der Fügekraftüberwachung gezeigt.

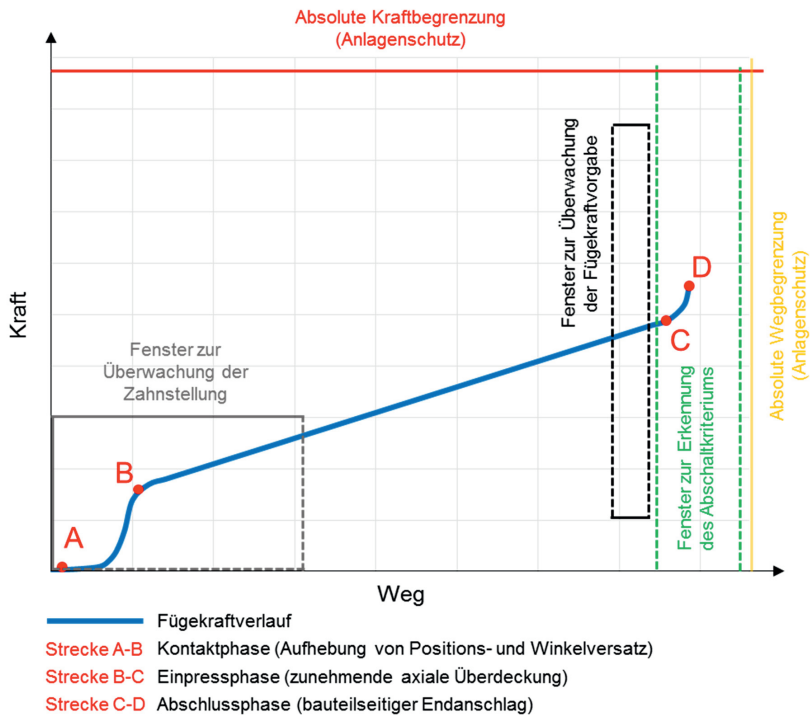


Bild 1: Schematische Darstellung einer Auswertemethode zur Fügekraftüberwachung [1]

Die Fügekraftvorgaben richten sich dabei oft nach Erfahrungswerten aus Konstruktion und Serienproduktion und sollen zur Sicherstellung der oben genannten funktionalen Kriterien der Verbindung dienen. In Bild 2 sind die wichtigsten Messgrößen für Passverzahnungen schematisch dargestellt.

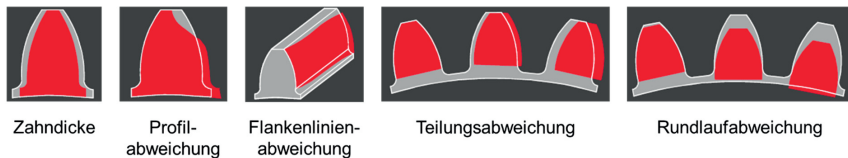


Bild 2: Schematische Darstellung einer Auswahl an Messgrößen von Passverzahnungen – Messgrößen gelten analog für Innenverzahnungen, nach [2]

Die Tolerierung dieser Größen im Hinblick auf die Einhaltung von Fügekraftvorgaben basiert in der Regel auf jahrelanger Erfahrung des Konstrukteurs und kann nicht der Normenliteratur entnommen werden. Fügekrafttoleranzen von bspw. 1 – 20 kN wirken hoch, sind aber in vielen Fällen in der Serienfertigung, unter Einbeziehung aller Prozesseinflüsse, nur schwer zu realisieren.

Die Fertigung der verzahnungsrelevanten Merkmale innerhalb der statistisch abgesicherten Prozessgrenzen ist oft nicht ausreichend. Selbst Fügeausschuss im Bereich von 0,1% kann massive Kostenauswirkungen haben. Da es beim Einpressvorgang zur plastischen Deformation kommt, ist eine Wiederverwendung der n.i.O. gefügten Baugruppen nicht möglich und eine Verschrottung ist die Folge. In Bild 3 wird am Beispiel einer Gelenkwelle dargestellt, welche Prozessschritte bis zum Fügevorgang der Passverzahnungen bereits erfolgt sind.

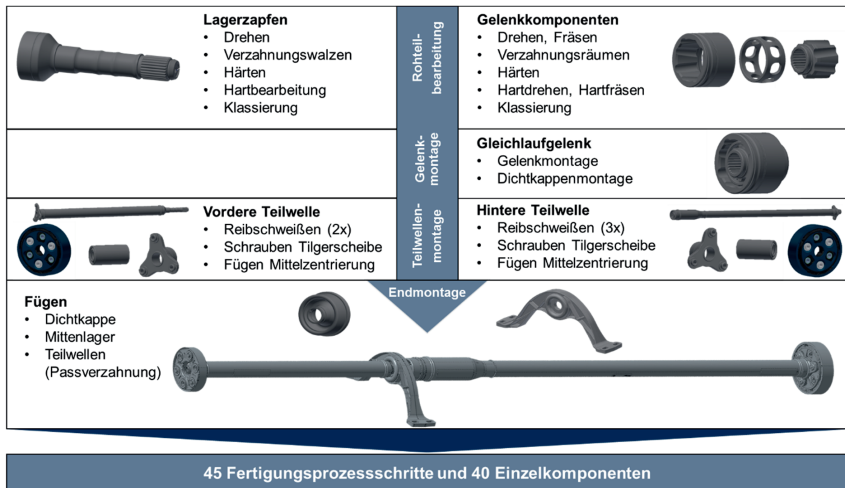


Bild 3: Beispielhafte Prozesskette zur Herstellung einer zweiteiligen Gelenkwelle [1]

Der Fügevorgang von vorderer und hinterer Teilwelle bildet dabei, vor dem Wuchten und Lackieren, den letzten Prozessschritt im Fertigungsablauf ab. Der Großteil der Wertschöpfung, welcher sich durch die Produktion und den Zukauf von 40 Einzelteilen und 45 vorangegangenen Bearbeitungsschritten kennzeichnet, ist bereits erfolgt. Somit entstehen hohe Verluste, wenn eine gefügte Welle aufgrund von n.i.O. Fügekräften verschrottet werden muss. Folgendes Beispiel soll dies anhand einer pauschalen Kostenrechnung darstellen:



Geht man davon aus, dass die Produktionskosten bis zum Prozessschritt Fügen (Einpressen der Passverzahnung) bei ca. 100 €/Welle lägen und sich die jährliche Produktionsleistung auf ca. 1.000.000 Wellen beläuft, würde eine durchschnittliche Ausschussrate von 0,5% zu 500.000 €/Jahr Verlustkosten führen.

Dadurch steht der Prozessschritt Fügen schnell im Fokus von Programmen zur Ausschusskostenminimierung und erfordert nahezu permanente technologische Betreuung. Die Folgen sind zusätzliche Maßnahmen, wie bspw. die fertigungslosweise Steuerung oder gar die 100% Messung der verzahnten Komponenten mit dem Hintergrund, Übermaßbereiche gezielt anzusteuern und somit die Fügekraftschwankungen zu minimieren.

Trotz dieser Maßnahmen kommt es auch bei vermeintlich unveränderten Produktionsbedingungen immer wieder zu Qualitätsproblemen, welchen in den meisten Fällen nur mit detaillierten und zeitaufwändigen Analysemethoden (bspw. Allzahnmessung und Auswertung mit REANY®) begegnet werden kann.

Neben den dimensional erfassbaren Messgrößen gibt es noch eine Reihe weiterer Einflussfaktoren auf die Einpresskraft, welche im Folgenden aufgelistet werden:

- Einbaustellung beider, formabweichungsbehafteter Verzahnungspartner
- Unterschiedlicher Reibungszustand im Zahnkontakt (Bsp.: Verschmutzungen, gezielte Einbringung von Fett, ...)
- Unterschiedliche Materialeigenschaften
- Unterschiedliche Wärmebehandlungszustände (Bsp.: Kombinationen gehärtet – ungehärtet, gehärtet – ungehärtet, ungehärtet – ungehärtet)
- Ungewollte mechanische Arbeit durch das Entstehen von Spänen
- ...

## **2. Arbeitskreis Passverzahnungen - Frencio GmbH, IFA Powertrain GmbH, Volkswagen AG**

Die in Abschnitt 1 dargestellten Herausforderungen zeigen, dass sich stets ein Spannungsfeld zwischen der Konstruktion, der Fertigung und der Qualitätssicherung von Passverzahnungen ergibt. Um den daraus entstehenden Problemstellungen zu begegnen, entwickelt jede Firma ihre eigene Strategie, mit den unterschiedlichsten Herangehensweisen an die Kombination von serienbegleitender Verzahnungsmesstechnik und weiteren Maßnahmen zur Steuerung und Homogenisierung von Einpresskräften.

Der hier vorgestellte Arbeitskreis Passverzahnungen stellt einen Zusammenschluss der Firmen Frencio GmbH, IFA Powertrain GmbH und Volkswagen AG dar. Sein Ziel ist es, die

Erfahrungen der Teilnehmer zusammenzuführen, neue Erkenntnisse abzuleiten und praxistaugliche Prozesse in der Kombination von Mess- und Produktionstechnik zu entwickeln. Weitere selbstformulierte Ziele sind im Folgenden aufgelistet:

- Theoretische und empirische Analyse der Haupteinflussfaktoren auf die Einpresskraft
- Ermittlung von Möglichkeiten zur gezielten Beeinflussung von Einpresskräften
- Entwicklung von (groß-) serientauglicher Messtechnik und Auswertemethoden zur abgestimmten Steuerung von Verzahnungsherstellung und Fügeprozess
- Vorausbestimmung von Einpresskräften mittels FEM-Simulation

In den folgenden Abschnitten werden ausgewählte Problemstellungen anhand von Beispielen, sowie aktuelle Untersuchungsansätze beschrieben.

### 3. Beispiel: Unterschiedliche Einpresskräfte bei Passverzahnungen im Getriebe

Bei VW gibt es zwei Doppelkupplungsgetriebe mit unterschiedlichen Drehmomentkapazitäten, die vom Grundaufbau aber gleich sind. Die Passverzahnungsverbindungen sind identisch, werden aber auf unterschiedlichen Fertigungslinien mit baugleichen Maschinen und Werkzeugen hergestellt. Trotz vergleichbarer Messergebnisse ergeben sich in der Montage erheblich unterschiedliche Einpresskräfte bei der Paarung Antriebswelle / Festrad 7. Gang, die so aus anderen Verbindungen nicht bekannt sind. Bild 4 zeigt eine solche Verbindung.

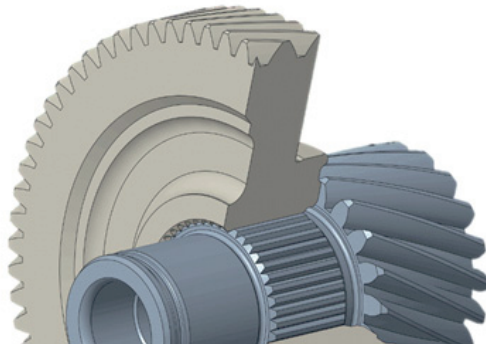


Bild 4: Passverzahnungsverbindung Antriebswelle / Festrad [3]

### 3.1 Passverzahnung und Fertigung

Die Kombination der Verbindung ist eine sogenannte „Mischverzahnung“, d.h.

- Außenpassverzahnung evolventisch, Eingriffswinkel  $\alpha = 37^\circ 30'$
- Innenpassverzahnung geradflankig, Lückenwinkel  $\gamma = 69^\circ$

Diese Verbindungsart wird bei allen Übermaßpassungen verwendet, um die Streuung der Einpresskräfte zu minimieren. Die Abweichungen der beiden Profile entspricht aber eher einer Höhenballigkeit und bewegen sich innerhalb von zulässigen Profilabweichungen. In diesem Beispiel beträgt an den Kopfkreisdurchmessern der theoretische Abstand des geradflankigen Innenprofils ca. 10  $\mu\text{m}$  zum evolventischen Außenprofil. Weitere Grunddaten der Passverzahnung:

$z = 44$  ;  $m_n = 0,79375 \text{ mm}$  (DP32),  $d_{a1} = 35,15 \text{ mm}$ ,  $d_{a2} = 33,85 \text{ mm}$

Die Fertigungsverfahren für die Passverzahnungen sehen wie folgt aus und sind Standard bei allen Übermaßpassungen:

- Die Außenpassverzahnung der Antriebswelle wird durch Kaltwalzen hergestellt, in diesem Fall mit Rundwalzwerkzeugen
- Die Innenpassverzahnung des Festrads 7. Gang wird durch Harträumen hergestellt
- Maschinen und Werkzeuge sind bei beiden Passverzahnungen vom selben Lieferanten

### 3.2 Grundlagen der Versuchsreihe, Einpressversuche

In die Höhe der Einpresskräfte selbst gehen eine Vielzahl von Faktoren ein, ebenso in die Streuung

- Verzahnungsgeometrie
- Oberfläche durch Herstellverfahren
- Temperatur
- Beschichtungen, Schmierung, Waschprozesse

In der Großserie sind die Herstellverfahren festgelegt, ebenso die Wärmebehandlung und alle weiteren Fertigungsprozesse. Hartgeräumte Innenpassverzahnungen haben fast Lehrenqualität, die Abweichungen beim Kaltwalzen liegen immer in derselben Größenordnung. D.h. diese Faktoren ergeben keine nennenswerten Streuungen und werden als Konstante gesetzt. Damit bleibt zur Steuerung der Einpresskräfte nur noch die Abstimmung der Zahndicke / -lücke übrig, d.h. die Fertigung wird nach den Zweikugelmäßen ( $M_{dk}$ ) gesteuert.

Für die Einpressversuche wurden identische Festräder (DQ381) verwendet, um die Einflussfaktoren noch weiter zu reduzieren und möglichst wenig Varianz zu bekommen. Es wird in der Mitte der Innenpassverzahnung gemessen und das Min- und Max-Maß aus dem Messprotokoll verwendet. Die Ergebnisse der  $M_{dK}$ -Messungen sind in der Bild 5 dargestellt:

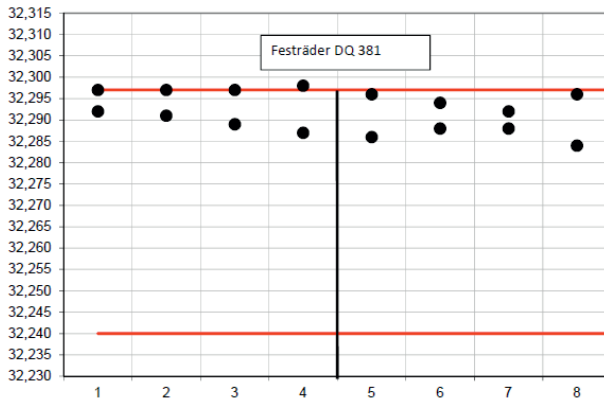


Bild 5:  $M_{dK}$ -Messungen der Innenpassverzahnungen [3]

Die Antriebswellen kommen aus unterschiedlichen Fertigungslinien, die Ergebnisse der Messprotokolle ließen keine nennenswerten Unterschiede erkennen. Die Einzelabweichungen ( $F_\alpha$ ,  $F_\beta$ ,  $F_p$ ) sind praktisch identisch, die Ergebnisse der  $M_{dK}$ -Messungen sind in der Bild 6 dargestellt:

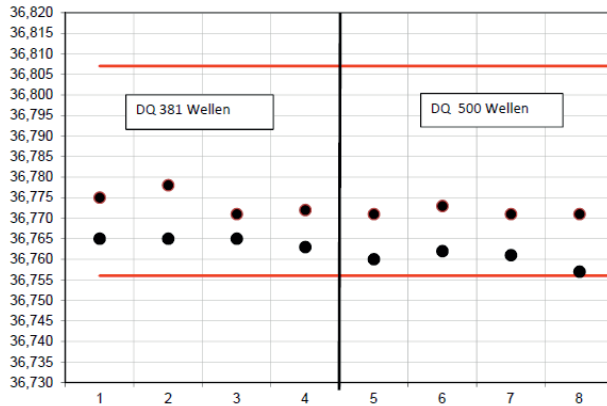


Bild 6:  $M_{dK}$ -Messungen der Außenpassverzahnungen [3]

Tendenziell liegen die Maße der DQ500 Außenpassverzahnungen etwas unter denen der DQ381 Wellen. Die Erwartungen hieraus waren, dass die Einpresskräfte ungefähr gleich sind, aber die der DQ500 Paarungen leicht unterhalb denen der DQ381 liegen.

Die Einpressversuche wurden im Vorserien Technologie Center im Werk Kassel durchgeführt. Der Versuchsaufbau entsprach der Einpressstation der Serie, d.h. die Wellen wurden im Aufnahmezylinder vertikal positioniert und für den Fügevorgang wurde kein Schmiermittel o.ä. verwendet. In der Serie wird das Festrad automatisiert aufgelegt, in diesem Versuch von Hand.

### 3.3 Ergebnisse der Einpressversuche

Die Ergebnisse der Einpressversuche korrelieren nicht zu den Erwartungen der Messprotokolle, es gibt keine Erklärung für die hohen Einpresskräfte mit den DQ500-Antriebswellen.

Tabelle 1: Ergebnisse der Einpresskräfte

Paarung	Einpresskraft	Antriebswelle aus Getriebe
01	19,10 kN	DQ381
02	40,60 kN	DQ381
03	31,80 kN	DQ381
04	31,75 kN	DQ381
05	44,22 kN	DQ500
06	72,90 kN	DQ500
07	62,20 kN	DQ500
08	58,50 kN	DQ500

Die Ursache für die höheren Einpresskräfte konnte nicht ermittelt werden, das Problem besteht bis heute. Um weiter produzieren zu können wurden die Fertigungsmaße weiter eingeschränkt und die Festräder werden vor dem Fügen erwärmt.

### 3.4 Maßnahmen

Die Einpresskräfte nach den  $M_{dk}$ -Maßen zu steuern funktioniert in der Großserie. Es gibt Verbindungen ohne Auffälligkeiten, aber auch wie in diesem Beispiel Phänomene, die durch die „normalen“ Messungen nicht zu erklären sind. Es muss also weitere Einflussfaktoren geben, die eine genauere Analyse erfordern. Um für die Zukunft eine Lösung für die Fertigung und Montage erarbeiten zu können, wurde das Vorentwicklungsprojekt / die Arbeitsgruppe „Simulation von Einpresskräften“ ins Leben gerufen.

## 4. Messung, Auswertung und Simulation von Einpresskräften

Zum Durchführen einer FEM-Simulation mit realen, d.h. abweichungsbehafteten Werkstückdaten, ist zunächst eine möglichst vollständige Erfassung der Zahnflankenoberflächen nötig. Dazu wird auf einer Verzahnungsmessmaschine pro Zahnflanke ein Messgitter aus mehreren Profil- und/oder Flankenlinien gemessen. Mit der REANY©-Software von Frenco können mit Hilfe solcher Messungen die Zahnflankenflächen rekonstruiert werden, so dass am Ende eine Abweichungskarte aller Zahnflanken der Wellen und Naben vorliegt [4]. Ähnlich wie bei der Auswertung der 2D-Linien gemäß VDI [5], liegt der Berechnung ein Soll-Ist-Vergleich der Wälzwege zugrunde (Abwicklung zum Grundkreis). Dadurch ist die ideale evolventische Zahnflanke eine ebene Fläche (im Farbmaßstab weiß).

Abweichungen ins Materialplus werden blau und Abweichungen ins Materialminus rot dargestellt.

Diese Daten können als STL-Datei exportiert werden und für eine FEM-Simulation verwendet werden, um virtuelle Einpresskräfte zu berechnen. Die Simulationen wurden von Experten der IFA Powertrain GmbH und der Volkswagen AG durchgeführt.

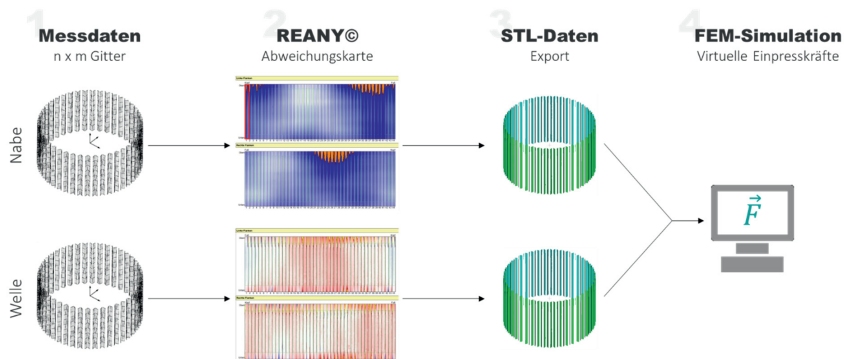


Bild 7: Allzahnmesung und Auswertung mit REANY® [2]

Selbstverständlich ist es fertigungsbegleitend nicht möglich Messungen in diesem Umfang, geschweige denn eine FEM-Simulation durchzuführen. Dies dient lediglich dem Erkenntnisgewinn. Das Ziel ist am Ende, die Erkenntnisse auf bereits in der Fertigung vorhandene Messmethoden anzuwenden, z.B. bei längsdynamischen Zweikugelmessgeräten. Diese erfassen das Zweikugelmaß in drei am Umfang verteilten Positionen über die gesamte Zahnbreite. Aus diesem Grund wurde parallel zur FEM-Simulation bewusst ein rein geometrischer Ansatz – ohne Berücksichtigung von Materialeigenschaften oder Deformationen – gewählt.

Dazu wurde ein Optimierungsalgorithmus entwickelt, der eine virtuelle Paarung auf Basis der Abweichungskarten von Welle und Nabe ermöglicht. Als Ergebnis dieser rein geometrischen Betrachtung erhält man pro Paarung erneut eine Karte aller Zahnflanken, die nun die Über- und Untermaße der Paarung darstellt. Übermaße werden rot, Untermaße grün dargestellt. Aus dieser Abweichungskarte werden Histogramme erstellt, so dass die Verteilung der Über- und Untermaße sichtbar wird. Aus dem Quotienten aus Anzahl der Punkte mit Übermaß und der Gesamtpunktzahl lässt sich auch der theoretische prozentuale Traganteil der jeweiligen Paarungen berechnen.

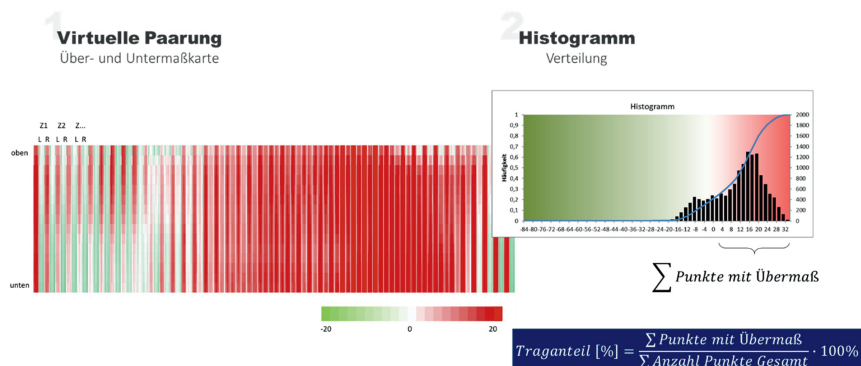


Bild 8: Über- und Untermaße einer Paarung und Histogramm [2]

Zur Veranschaulichung soll folgendes Beispiel dienen, das vor der Versuchsreihe im Arbeitskreis bearbeitet wurde. Auch hier wiesen die üblichen geometrischen Messungen kaum Unterschiede auf – auch nicht im Maß. Die Welle der Paarung 1 zeigt eine etwas größere Teilungsabweichung. Die Einpresskraft der Paarung 2 war jedoch doppelt so hoch, wie bei Paarung 1. Allzahnmessung und virtuelle Paarung führten schließlich zu den Histogrammen aus Bild 9.

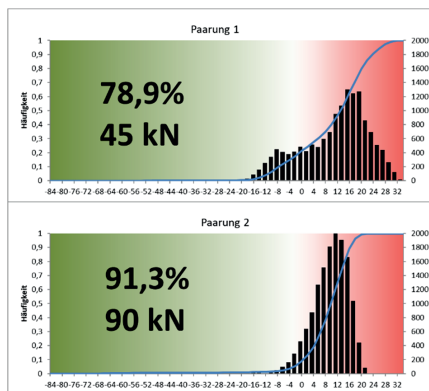


Bild 9: Vergleich der Histogramme – doppelte Einpresskraft [2]



Im Vergleich zeigt sich, dass die Verteilung der Übermaße bei Paarung 2 wesentlich kompakter ist. Paarung 1 weist eine breitere Verteilung auf. Zudem ist die errechnete Überdeckung von Paarung 2 mit 91,3% deutlich größer als die von Paarung 1 (78,9%). Das deckt sich insofern mit der Erwartung, als dass durch eine Teilungsabweichung die Kontaktflächen und somit die Überdeckung reduziert werden. Dieser mutmaßliche Zusammenhang zwischen Geometrie und Einpresskraft sollte anschließend mit einer umfangreicheren Messreihe verifiziert werden.

## 5. Ergebnisse der gesamten Versuchsreihe

An den acht Naben und acht Wellen der Volkswagen AG wurde je eine Allzahnmessung durchgeführt. Dabei erhielten die Werkstücke eine laufende Paarungsnummer und die Positionen der jeweils ersten gemessenen Lücke bzw. des ersten gemessenen Zahnes wurden gekennzeichnet. Anschließend wurden die Paarungen gemäß ihrer Nummerierung gefügt und die Einpresskraft wurde gemessen. Eine zusammenfassende Gegenüberstellung zeigt Bild 10.

Die Überdeckung alleine liefert offensichtlich keine hinreichende Korrelation zur Einpresskraft. Zur numerischen Beschreibung der Verteilung sollten deshalb weitere Kennwerte aus dem Histogramm bestimmt werden. Die kumulierte Häufigkeit erinnert an die aus der Rauheitsmessung bzw. -auswertung bekannte Materialanteilskurve (Abbott-Firestone-Kurve). Deshalb lag es nahe, Kennwerte nach [6] zu berechnen. Am Ende wurden über 20 Kennwerte berechnet.

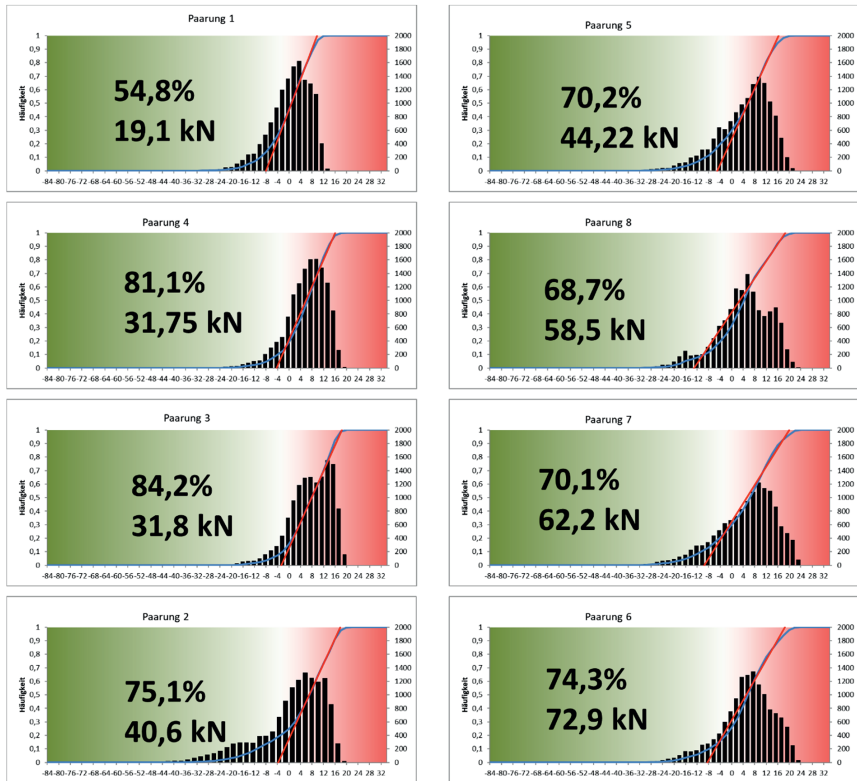


Bild 10: Vergleich von gemessener Einpresskraft und Traganteilscurve [2]

Zum besseren Vergleich wurde die Korrelation der einzelnen Kennwerte mit der Einpresskraft rechnerisch bestimmt. Tabelle zeigt die fünf Vielversprechendsten. Lediglich vier erreichen mehr als 70%. Die Steigung, der nach [6] berechneten Ausgleichsgeraden, zeigt mit 86% die beste Korrelation. Entgegen der Erwartung erreicht die Überdeckung alleine lediglich eine 12%ige Übereinstimmung.

Die mit der FEM-Simulation errechneten Einpresskräfte weisen eine Korrelation von 56% zu den gemessenen auf. Dabei ist zu bedenken, dass dieser Berechnung dieselben Daten zugrunde liegen, wie der rein geometrischen Betrachtung. Die beiden Berechnungs- bzw. Simulationen erreichen eine Übereinstimmung von bis zu 92%. Insofern konnte zumindest nachgewiesen werden, dass der entwickelte Optimierungsalgorithmus auf rein geometrischer Basis in etwa die gleiche Aussagefähigkeit besitzt wie die FEM-Simulation.

Tabelle 2: Rechnerische Korrelationen der Kennwerte mit der Einpresskraft

Merkmal (Auswahl)	Paarung								Korrelation
	1	4	3	2	5	8	7	6	
Einpresskraft	19,1	31,75	31,8	40,6	44,2	58,5	62,2	72,9	100%
Steigung Ausgleichsgerade	17,8	20,4	21,1	21,6	21,2	31,8	29,6	27,0	86%
Klasse Ende 40%-Bereich	6	16	12	16	14	18	20	16	76%
Range der Klassen	36	38	38	50	48	48	52	46	74%
Ende Ausgleichsgerade	9,7	16,0	18,3	17,8	16,2	18,6	20,0	18,4	73%
Start Ausgleichsgerade	-8,1	-4,4	-2,7	-3,7	-5,0	-13,1	-9,5	-8,5	-55%

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend fallen die Ergebnisse nicht so eindeutig aus wie ursprünglich erhofft.

Folgende Gründe können dafür ursächlich sein:

- Bei der Messreihe an den je acht Wellen und Naben wurden pro Zahnflanke 15 Flankenlinien und keine Profile gemessen. Aufgrund der geringen Zahnhöhe bei Passverzahnungen ergibt sich dadurch zwar eine gute Gesamtabdeckung der Flanken, möglicherweise wurde aber die Profilform nicht hinreichend genau erfasst. Aus diesem Grund sind weitere Allzahnmessungen mit einem Gitter, bestehend aus Flankenlinien und Profilen geplant.
- Die Ermittlung von Kennwerten nach [6] stellen nur einen möglichen Ansatz zur Auswertung des Histogramms dar. Weitere Möglichkeiten zur numerischen Beschreibung sollen im Rahmen des Arbeitskreises getestet werden.
- Die rein geometrische Betrachtung vernachlässigt Materialeigenschaften und Verformung. Insbesondere unterschiedliche Werkstoffe und Härten der Werkstücke haben großen Einfluss auf die Einpresskräfte.

Aus dem letzten Punkt ergibt sich ein anderer Ansatz, der aufwendige Messungen obsolet macht und direkt auf die vorhandenen Messgeräte in der Serienfertigung angewendet werden kann. Dabei handelt es sich um einen Machine-Learning-Ansatz (supervised). Für diese moderne Art der statistischen Auswertung sind große Datenmengen nötig, um zuverlässige Ergebnisse zu erzielen. Diese werden fertigungsbegleitend aber ohnehin gesammelt. Im ersten Schritt werden von IFA Powertrain GmbH, Haldensleben 150 Versuchsteile bereitgestellt, auf deren Basis ein neuronales Netz aufgebaut wird. Ergibt sich daraus ein vielversprechendes Ergebnis, kann zukünftig nach einer mehrwöchigen Anlernphase eine

Fertigungssteuerung - unabhängig von den üblichen geometrischen Toleranzen – aufgebaut und getestet werden.

- [1] IFA Powertrain GmbH, Haldensleben
- [2] Frengo GmbH, Altdorf
- [3] Volkswagen AG, Wolfsburg
- [4] Jukl, P.: Messpunktewolken bei Verzahnungen, VDI-Bericht 2236, 2014
- [5] VDI/VDE 2612-Blatt 1: Messen und Prüfen von Verzahnungen, Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil, 2018
- [6] EN ISO 13565-2: GPS, Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren, Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilskurve, 1998

# Vergleich verschiedener Messmethoden in der Verzahnungsmesstechnik

## Messen zwischen Spitzen als Hybridsystem neu gedacht

Dipl.-Ing. (FH) **Roman Groß**, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen

### Kurzfassung

Die Anforderungen an die Fertigungsmesstechnik hinsichtlich „schnellerer, genauerer, flexiblerer“ Messergebnisse und Lösungen gelten in gleichem Maße auch für die Verzahnungsmesstechnik [1]. Speziell die gleichzeitigen Anforderungen „genau und flexibel“ stellen eine besondere Herausforderung an Messgerätehersteller dar. Weiterhin stellt die Erfüllung dieser Anforderungen nicht nur besondere Herausforderungen an ein Messsystem dar, sondern bedingt auch einer geeigneten Aufspannung der Werkstücke, welche innerhalb der Fertigungsmesstechnik, bzw. der Qualitätssicherung, qualifiziert werden sollen.

Die Einflussgrößen, welche das Messergebnis maßgeblich beeinflussen, sind zahlreich. Der Richtlinienentwurf VDI/VDE 2612 Blatt 6:2020-10 - Entwurf, Abschnitt 3 – Einflüsse und Auswirkungen auf das Messergebnis, fasst diese wie in **Bild 1** dargestellt zusammen.

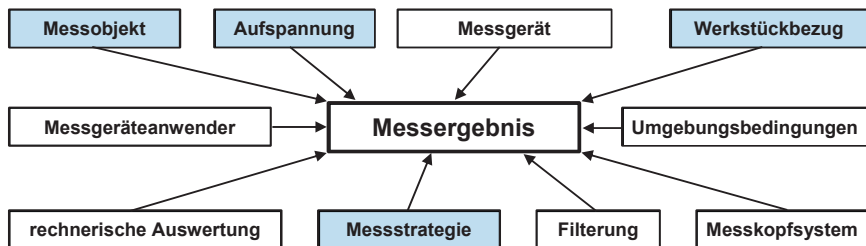


Bild 1: Einflussgrößen auf das Messergebnis [2]

In diesem Bericht werden speziell die Themen **Messobjekt**, **Aufspannung**, **Werkstückbezug** sowie **Messstrategie** (dazu gehört auch die **Messmethode**) an verschiedenen Werkstücken beleuchtet. Die Ausführungen konzentrieren sich dabei auf wellenartige Messobjekte wie Zahnräder und verzahnungsähnliche Werkstücke, welche auf Koordinatenmessgeräten gemessen werden.

## Abstract

The requirements for production metrology regarding “faster, more accurate, more flexible” measurement results and solutions also apply to the same extent to gear metrology [1]. Especially the simultaneous requirements “accurate and flexible” represent a special challenge for measuring instrument manufacturers. Furthermore, the fulfillment of these requirements not only represents special challenges for a measuring system, but also requires a suitable clamping of the workpieces, which are to be qualified within the production metrology or quality assurance.

The influencing variables that significantly influence the measurement result are numerous. The draft guideline VDI/VDE 2612 part 6:2020-10 – draft, section 3 – influences and effects on the measurement result, summarizes these as shown in **figure 1**.

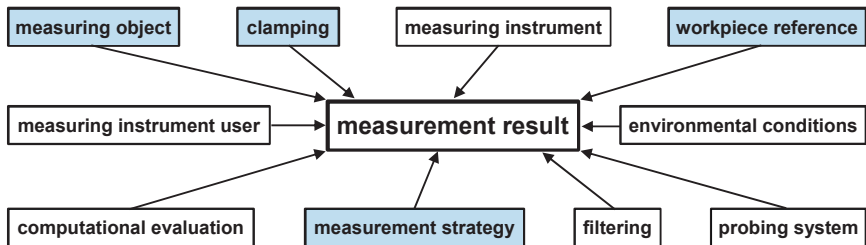


Fig. 1: influencing variables on the measurement result [2]

In this report, the topics of **measuring object**, **clamping**, **workpiece reference** and **measurement strategy** (including the **measuring method**) on various workpieces will be examined in particular. The explanations focus on shaft-like measuring objects such as gears and gear-like workpieces, which are measured on coordinate measuring machines.

## 1. Einführung Vergleich verschiedener Messmethoden

### 1.1 Messgeräte

In der Verzahnungsmesstechnik haben sich CNC-gesteuerte Messgeräte bewährt. Man unterscheidet diese in zwei „Hauptkategorien“: (spezialisiertes) **Verzahnungsmessgerät** (VZMG, Bild 2) und (universelles) **Koordinatenmessgerät** (KMG, Bild 3). Weiterhin kann man die Verzahnungsmessung auf einem Koordinatenmessgerät noch unterteilen in die Messung mit und ohne Drehtisch [3].

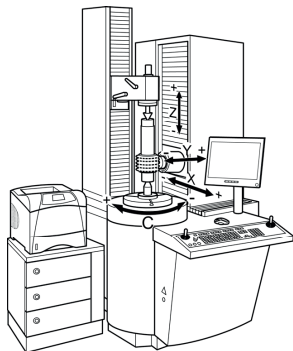


Bild 2: Verzahnungsmessgerät [4]

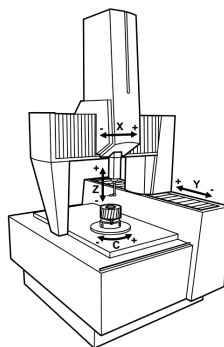


Bild 3: Koordinatenmessgerät mit Drehtisch [4]

### 1.2 Messmethoden

Neben der eigentlichen Messstrategie (z.B. Anzahl der Messpunkte, Wahl der Messebene am Prüfling, Scanninggeschwindigkeit) [3], ist die Wahl einer geeigneten Messmethode für ein Messobjekt von entscheidender Bedeutung für die Qualität des Messergebnisses.

Bei Verzahnungsmessgeräten (Bild 2) ist die **Messmethode mit Drehtisch** durch das Messgerät selbst schon festgelegt. Es gibt noch eine Unterscheidung bei der Aufspannmethode, entweder wird das Werkstück zwischen Spitzen gespannt (Bild 4) oder es kommt die fliegende Aufspannung (z.B. im Backenfutter) (Bild 5) zum Einsatz.

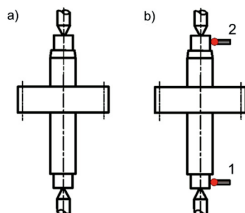


Bild 4: Aufspannung zwischen Spitzen [4]

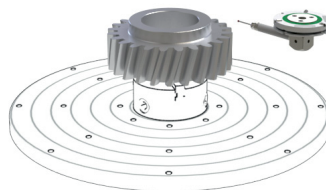


Bild 5: Fliegende Aufspannung [5]

Des Weiteren unterscheidet man bei der Aufspannung zwischen Spitzen noch die Bestimmung der Bezugsachse, einerseits durch die mechanische Ausrichtung zwischen Spitzen (**Bild 4 a**) sowie andererseits durch Messen von Bezugselementen (**Bild 4 b**) [3].

Die Fliegende Aufspannung (**Bild 5**) wird auch auf Koordinatenmessgeräten mit Drehtisch (**Bild 3**) angewendet.

Eine weitere Methode, welche bei Koordinatenmessgeräten eingesetzt wird, ist die **Messmethode ohne Drehtisch**. Hierbei unterscheidet man zwischen der Messung mittels Tastersystem mit Einzeltaster (**Bild 6**) und Sterntastersystem (**Bild 7**).

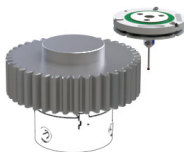


Bild 6: Tastersystem mit Einzeltaster [5]

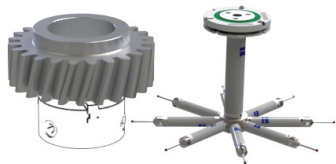


Bild 7: Sterntastersystem mit 8 Tastern [5]

Die Verwendung von Tastersystemen mit Einzeltaster (**Bild 6**) ist besonders für geradzahnige Zahnräder mit kleiner Zahnbreite anwendbar. Bei Schrägverzahnungen ist eine kollisionsfreie Antastung ohne Schaftkontakt des Tasters mit dem Werkstück – speziell bei der Flankenlinienmessung – nicht möglich.

In **Bild 7** ist ein Sterntastersystem mit 8 Tastern dargestellt. Diese Anordnung ist besonders für die Messung von schrägverzahnenden Zahnrädern oder Wellen notwendig, da andernfalls die Erfassung aller Antastpunkte an allen rechten und linken Flanken nicht möglich ist.

Um genau messen zu können, müssen bei solchen Sterntastersystemen die einzelnen Taster präzise zueinander eingemessen sein. Dies stellt einen wesentlichen Unterschied zur Messmethode mit Drehtisch dar, da dort die Verwendung von einfacheren Tastersystemen – meist nur Einzeltaster – möglich ist. Dies soll nicht bedeuten, dass die Messmethode mit Drehtisch generell gegenüber der Messmethode ohne Drehtisch zu bevorzugen ist. Es gilt jedoch, dass speziell bei Schrägverzahnungen und Wellenmessungen, die Messmethode mit Drehtisch einen Vorteil hinsichtlich der geringeren Komplexität der Tastersysteme bietet. Aus diesem Grund wird in diesem Bericht die Messmethode ohne Drehtisch nicht tiefergehend dargestellt. Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf die Messmethode mit Drehtisch und die verschiedenen Aufspannmöglichkeiten bei dieser Messmethode.



### 1.3 Aufspannung und Werkstückbezug

Generell gilt, dass Messobjekte sich während der Messung weder deformieren noch verändern dürfen. Das Spannen von Werkstücken in Vorrichtungen darf keine Veränderung der Formgestalt des Werkstücks verursachen [2].

Werden Werkstücke bei der Messmethode mit Drehtisch zwischen Spitzen gespannt, sind zusätzlich mehrere Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Es ist darauf zu achten, dass das Werkstück bei der Drehung an der Drehtischseite mitgeführt wird. Es muss dort ausreichend Reibung vorhanden sein, evtl. unter Verwendung einer diamantbeschichteten Spitze, so dass kein Schlupf zwischen Aufnahme und Werkstück möglich ist. Gegebenenfalls ist eine formschlüssige Verbindung durch einen Mitnehmer herzustellen. Gleichzeitig darf an der Gegenhalterseite keine Reibung entstehen, die das Werkstück während des Messvorgangs beeinflusst. Reibung an der Gegenhalterspitze kann u.a. entstehen, wenn die Spitzen nicht ausreichend genau zueinander justiert sind. Eine zusätzliche Reibungsreduktion kann man bei Verwendung einer mitlaufenden Spitze erzielen, diese muss jedoch ausreichend präzise Rundlaufeigenschaften haben.

Der Richtlinienentwurf VDI/VDE 2612 Blatt 6:2020-10 - Entwurf, Abschnitt 3 – Einflüsse und Auswirkungen auf das Messergebnis – Werkstückbezug, empfiehlt: „Das Bezugssystem wird entweder durch die mechanische Aufspannvorrichtung des Werkstücks oder durch die Messung von Bezugselementen am Werkstück gebildet.

Idealerweise ist bei der Prüfung immer ein Bezugssystem durch Messung an qualitativ hochwertigen und funktionsrelevanten Elementen zu bilden (siehe VDI/VDE 2612 Blatt 1). Dadurch haben Abweichungen der mechanischen Ausrichtung des Prüflings und gegebenenfalls Fluchtungsfehler der Gegenhalterspitze keinen Einfluss auf das Messergebnis.“ [2]

## 2. Darstellung der Messobjekte und der damit verbundenen Herausforderungen bei der fliegenden Aufspannung von Wellen

Bei Koordinatenmessgeräten mit Drehtisch hat sich die schnelle und flexible fliegende Aufspannung, speziell im Backenfutter, etabliert. Backenfutter gibt es nicht nur an Werkzeugmaschinen zur Drehbearbeitung, sondern auch speziell angepasst auf die Bedarfe der Messtechnik. Beispielsweise gibt es kurze axiale Bauweisen, um möglichst wenig Messvolumen in axialer Richtung zu verlieren (**Bild 8**) oder Bauarten mit momentfreier radialer Spannmöglichkeit mittels Umschaltknarre (**Bild 9**), um bei der Spannung von Werkstücken kein Drehmoment zu erzeugen, welches zu einer Beschädigung des Drehtisches führen kann.



Bild 8: ZEISS OmniFix Kranzspannfutter [6]



Bild 9: ZEISS OmniFix Drehfutter [6]

Speziell die Anforderungen „stabil und deformationsfrei“ sowie „unerwünschte Verlagerung während der Messung vermeiden“ können nicht zwangsläufig an allen Messobjekten mit einer fliegenden Aufspannung erfüllt werden. An folgenden Werkstücken werden verschiedene Herausforderungen bei der fliegenden Aufspannung genauer verdeutlicht. Die Bilder im Folgenden zeigen die Werkstücke teilweise schon in der für dieses Messobjekt zu bevorzugenden Aufspannung zwischen Spitzen.

## 2.1 Dimensionen lang und schwer

In **Bild 10** ist ein Schraubenverdichterpaar, bestehend aus Hauptrotor („male“) und Nebenrotor („female“) der Firma Aerzener Maschinenfabrik GmbH dargestellt.

- Daten Hauptrotor („male“): Länge: 710 mm, Durchmesser: 165 mm, Masse: 30 kg
- Daten Nebenrotor („female“): Länge: 625 mm, Durchmesser: 140 mm, Masse: 16 kg



Bild 10: Schraubenverdichterpaar –  
links: „male“, rechts: „female“



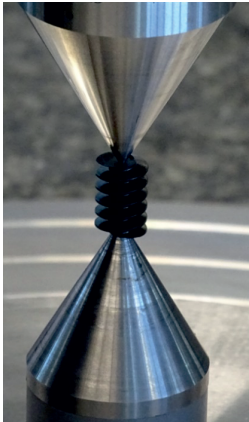
Bild 11: Muster-Zahnradwelle

**Bild 11** zeigt eine Muster-Zahnradwelle mit zwei Schrägverzahnungen der Firma KAPP NILES GmbH & Co. KG.

- Daten Muster-Zahnradwelle: Länge: 540 mm, Durchmesser: 95 mm, Masse: 15 kg

Speziell an solch langen und schweren Werkstücken kann es bei der fliegenden Aufspannung im Backenfutter aufgrund der Massenverteilung und des ungünstigen Hebelverhältnisses zum Wegdrücken des Werkstücks während der Messung kommen. Ebenso können die kurze Spannbasis und die zur Verfügung stehende Spannkraft der Backen das Werkstück gegebenenfalls nicht stabil genug spannen. Zusätzlich können daraus resultierend dynamische Effekte bei der Rotation das Messergebnis negativ beeinflussen.

## 2.2 Dimensionen kurz und filigran



Als direkter Kontrast zu den Werkstücken in Kapitel 2.1 sind besonders kurze und filigrane Wellen, wie die in **Bild 12** dargestellte Schneckenwelle der Firma Horst Scholz GmbH & Co. KG, zu nennen.

- Daten Schneckenwelle:

Länge: 14 mm, Durchmesser: 9 mm, Masse: 0,001 kg

Neben der Verformung aufgrund der Werkstückeigenschaften von Kunststoff, stellen an diesem Werkstück besonders die kleinen Abmaße, sowie das Nichtvorhandensein von Lagerstellen an den Wellenenden, an denen man im Backenfutter spannen könnte, eine besondere Herausforderung an eine fliegende Aufspannung dar.

Bild 12: Schneckenwelle

## 2.3 Störkontur an den Wellenenden

Die in **Bild 13** gezeigte Zahnradwelle A der Firma GKN Driveline International GmbH hat an beiden Wellenenden eine Störkontur, die ein Spannen im Backenfutter unsicher und instabil macht. Zum einen befindet sich am oberen Wellenende eine Passverzahnung, zum anderen ist der Bezugszylinder am unteren Wellenende nicht lang genug, um das Werkstück einerseits sicher in einem Backenfutter spannen und andererseits beide Elemente komplett messen zu können. Man erkennt in **Bild 13 links**, dass zusätzliche Passstifte als Spannverlängerungen im Backenfutter eingebracht sind, um überhaupt eine fliegende Aufspannung realisieren zu können.

- Daten Zahnradwelle A: Länge: 110 mm, Durchmesser: 40 mm, Masse: 0,6 kg

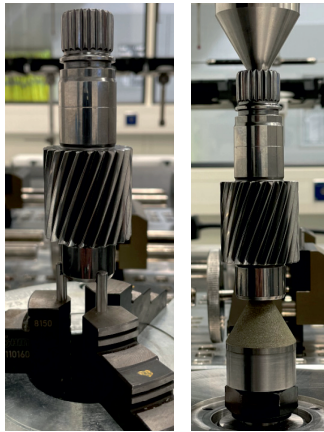


Bild 13: Zahnradwelle A – links: fliegend, rechts: zwischen Spitzen gespannt

**Bild 14** zeigt Zahnradwelle B, ebenfalls von GKN Driveline International GmbH. Die Spannsituation stellt dabei dieselbe Herausforderung dar. Zusätzlich kann die ungünstige Massenverteilung gegebenenfalls noch die Effekte wie bei großen und schweren Werkstücken, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, verursachen.

- Daten Zahnradwelle B: Länge: 185 mm, Durchmesser: 150 mm, Masse: 4 kg

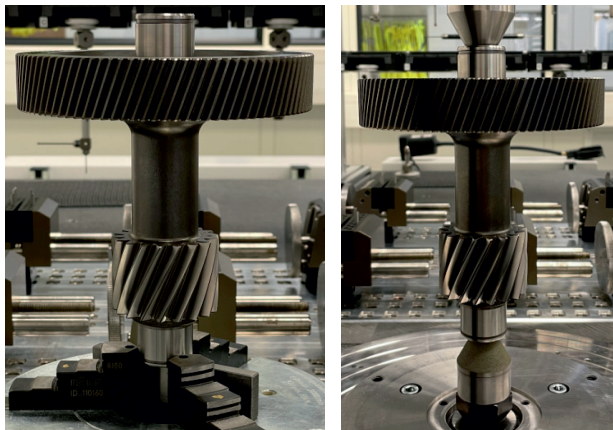


Bild 14: Zahnradwelle B – links: fliegend, rechts: zwischen Spitzen gespannt

Ein weiteres Beispiel für Störkonturen an Werkstücken ist die kegelförmige Außenkontur der Lagerstellen des gezeigten Wälzfräasers in **Bild 15**. Weder an der oberen noch an der unteren Lagerstelle kann der Wälzfräser im Backenfutter gespannt werden. An der oberen Seite befindet sich zusätzlich noch eine abgeflachte Zylindermantelfläche, die nicht ohne Spezialvorrichtungen fliegend gespannt werden kann.

- Daten Wälzfräser: Länge: 320 mm, Durchmesser: 90 mm, Masse: 12 kg

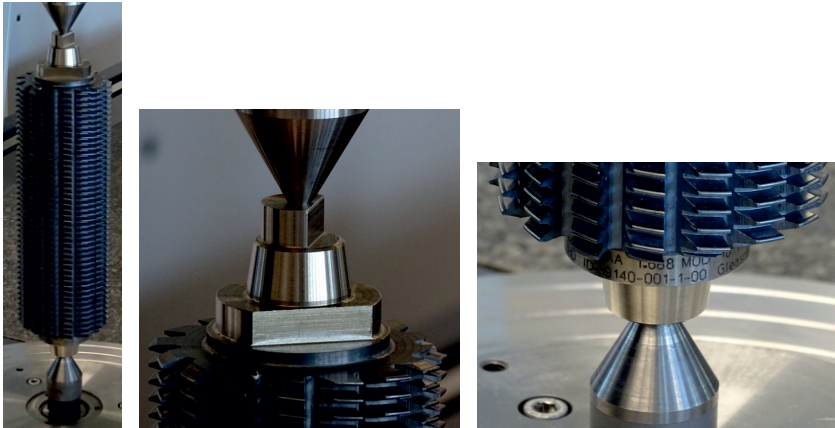


Bild 15: Wälzfräser

## 2.4 Ungünstige Proportionen

**Bild 16** zeigt eine Zahnradwelle mit fünf gleichartigen Passverzahnungen. Sie findet typischerweise Anwendung bei Nockenwellen zur Aufnahme der Nockenstücke.

- Daten Zahnradwelle: Länge: 480 mm, Durchmesser: 25 mm, Masse: 1,5 kg
- Daten Passverzahnungen: Normalmodul  $m_n$ : 0,85 mm, Zahnbreite  $b$ : 18 mm

Die Herausforderung ungünstige Proportionen und deren Auswirkung auf die Messergebnisse einer Verzahnungsmessung wird im nächsten Kapitel detailliert beschrieben.

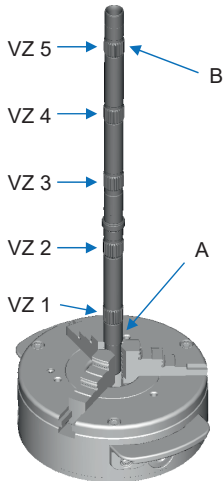


Bild 16: Zahnradwelle

### 3. Auswirkung fliegender Aufspannung einer Zahnradwelle mit ungünstigen Proportionen auf die Messergebnisse

Die in Kapitel 2.4 dargestellte Zahnradwelle zur Aufnahme von Nockenstücken einer Nockenwelle wird im Folgenden genauer hinsichtlich der Aufspannsituation betrachtet. Es wird an dieser Zahnradwelle exemplarisch eine der vielen möglichen Aufspannproblematiken beim

fliegenden Spannen von Wellen beschrieben.



Wie in **Bild 17** dargestellt, ist das Verhältnis von Durchmesser zu Länge an solchen Zahnradwellen sehr ungünstig. Eine Verformung der Welle muss einerseits an der Einspannstelle im Backenfutter (**Bild 17 Markierung A**) vermieden werden, da dies zu einer Beeinflussung der Lagerstelle und damit sowohl zu einer Verfälschung der Messergebnisse dort, als auch der Verzahnungskenngrößen der Passverzahnungen, führen würde. Andererseits muss das Werkstück fest genug im Backenfutter gespannt sein, so dass die Welle sich bei der Messung weder bewegt noch weggedrückt wird.

Bild 17: Zahnradwelle im Backenfutter gespannt

In **Bild 18** ist exemplarisch die oberste Zahnradstufe VZ 5 (**Bild 17 Markierung B**) als Ausschnitt vergrößert dargestellt. Ebenfalls ist das verwendete Tastersystem mit einem filigranen seitlichen Taster (Tastkugeldurchmesser  $d_k = 0,3 \text{ mm}$ ) abgebildet, sowie die wechselnde Antastrichtung bei der Teilungsmessung in Einflankenanlage skizziert.

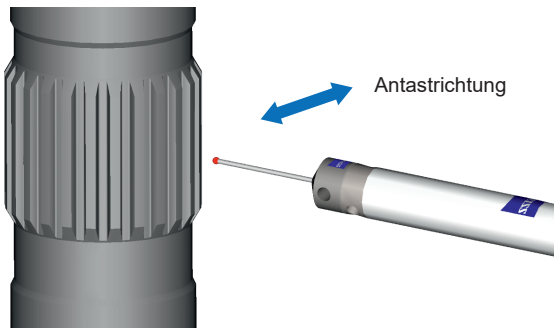


Bild 18: Ausschnitt Zahnradwelle mit Tastersystem

Besonderes Augenmerk ist auf die Auswirkung und den Einfluss der Antastkraft des Tastersystems auf die Kenngrößen der Passverzahnung zu legen. Die lange Welle liegt an den Backen des Backenfutters lediglich an einer sehr kurzen Spannbasis an. Das entstehende Hebelverhältnis sorgt trotz Reduktion der Messkraft auf 50 mN dafür, dass der Taster die Welle während der Teilungsmessung seitlich wegdrückt und dadurch einen Messfehler bei der Punktaufnahme verursacht. Der Effekt verstärkt sich dabei von unterster Verzahnung VZ 1 an der Einspannstelle (**Bild 17 Markierung A**) hin zu der am anderen Wellenende befindlichen Verzahnung VZ 5 (**Bild 17 Markierung B**). Dieser Messfehler lässt sich jedoch nicht in Lageabweichungskenngrößen wie zum Beispiel dem aus den Antastpunkten berechneten Rundlauf  $F_r$  erkennen (**Bild 19 oben**). Das Messergebnis unterscheidet sich lediglich um  $1\text{ }\mu\text{m}$ .

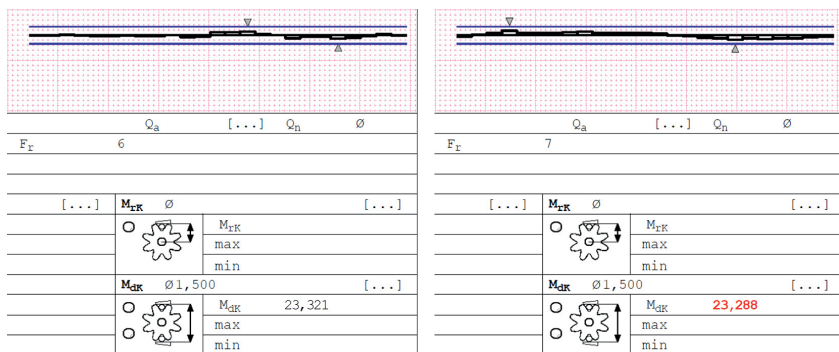


Bild 19: Rundlauf  $F_r$  und Zweikugelmaß  $M_{dK}$  – links unterste VZ 1, rechts oberste VZ 5 – fliegende Aufspannung im Backenfutter

Sehr deutlich erkennen kann man den Einfluss allerdings bei Maßabweichungskenngrößen wie zum Beispiel der Zahndicke  $S_s$ , bzw. den Zahndicken-Ersatzmerkmalen wie zum Beispiel dem Zweikugelmaß  $M_{dK}$  (**Bild 19 unten** und **Tabelle 1**). Man erkennt in **Tabelle 1**, dass sich der berechnete Wert  $M_{dK}$  von unterster VZ 1 zu oberster VZ 5 Passverzahnungsstufe kontinuierlich verkleinert und eine Differenz von  $33\text{ }\mu\text{m}$  aufweist. Diese Auswirkung ist damit zu erklären, dass während der Messung das Werkstück jeweils bei der Antastung der Teilungspunkte gegenläufig nach außen gedrückt wird. Die berechnete Lücke wird damit entsprechend größer berechnet als sie real vorhanden ist, respektive wird das Zweikugelmaß  $M_{dK}$  kleiner. Der Anwender hat die Problematik u.a. bei der Gegenmessung auf einem Längenmessgerät (ZEISS ULM 600) festgestellt. Die Werte der manuellen Messung sind ebenfalls in **Tabelle 1** enthalten.

Tabelle 1: Zweikugelmaß  $M_{dk}$  – Vergleich fliegende Aufspannung  
und manuelle Messung mit Längenmessgerät ZEISS ULM 600

Zweikugelmaß $M_{dk}$ [mm]	Fliegende Aufspannung	Manuelle Messung ZEISS ULM 600
VZ 1 (Bild 17 A unten)	23,321 mm	23,320 mm
VZ 2	23,312 mm	23,322 mm
VZ 3	23,303 mm	23,325 mm
VZ 4	23,294 mm	23,319 mm
VZ 5 (Bild 17 B oben)	23,288 mm	23,325 mm
Differenz VZ 1 – VZ 5	0,033 mm	0,005 mm

#### 4. Flexibler Gegenhalter für Koordinatenmessgeräte als Lösung für Wellen

Eine mögliche Lösung der in Kapitel 2 und 3 dargestellten Herausforderungen ist das Spannen der Werkstücke zwischen Spitzen. Damit reduziert sich im Fall einer Zahnradwelle mit ungünstigen Proportionen der Einfluss der Messkraft, da die Hebelwirkung am freien Wellenende (**Bild 17 Markierung B**) durch die Gegenlagerung nicht mehr gegeben ist. Typischerweise ist, bzw. war, das Messen zwischen Spitzen jedoch meist klassischen Verzahnungsmessgeräten vorbehalten. Der sogenannte Gegenhalter ist bei solchen Systemen bereits Bestandteil des Maschinenkonzepts und feste Komponente des Verzahnungsmessgeräts (siehe **Bild 2**). In der Vergangenheit haben allerdings auch Hersteller von universellen Koordinatenmessgeräten für das Thema Messen zwischen Spitzen Lösungen angeboten. Auf **Bild 20** und **Bild 21** erkennt man ZEISS Koordinatenmessgeräte aus den Jahren 1982 und 1986, die bereits mit einem Gegenhalter ausgerüstet waren.



Bild 20: ZEISS ZMC 550 aus 1982

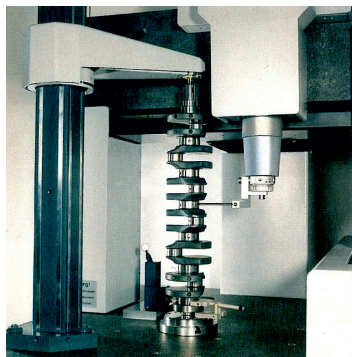


Bild 21: ZEISS ZMC 550 aus 1986



Der Nachteil dieser Lösungen war stets der Verlust von **Flexibilität**, die als wesentlicher Vorteil von Koordinatenmessgeräten zu bezeichnen ist. Der Gegenhalter benötigte eine zeitaufwändige Justageprozedur. Unter Zuhilfenahme von externen Messeinrichtungen mussten die Komponenten des Gegenhalters justiert werden. Ein einfacher und schneller Ab- und Wiederaufbau war dem Anwender des Koordinatenmessgeräts im Prinzip nicht möglich.

Der neue ZEISS Gegenhalter (**Bild 22**) setzt auf eine Wechselschnittstelle zwischen der Gegenhalter-Basiseinheit (**Bild 23 Markierung B**) und dem eigentlichen Gegenhalter. Das Konzept sieht vor, dass die Komponenten Gegenhalter-Basiseinheit und Gegenhalter-Bedieneinheit (**Bild 23 Markierung A**) im Messvolumen des Koordinatenmessgeräts permanent aufgebaut bleiben. Damit wird erreicht, dass bei Nichtgebrauch des Messens zwischen Spitzen der Gegenhalter einfach aus dem Messvolumen entfernt werden kann. Der wesentliche Vorteil besteht darin, dass der Wiederaufbau des Gegenhalters innerhalb weniger Minuten durchgeführt werden kann, um erneut Werkstücke zwischen Spitzen messen zu können. Auf **Bild 22** und **Bild 23** sind die Betriebszustände „Gegenhalter in Messposition“ und „Gegenhalter entfernt“ dargestellt.

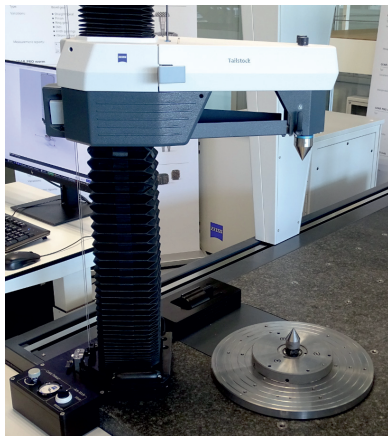


Bild 22: Gegenhalter in Messposition

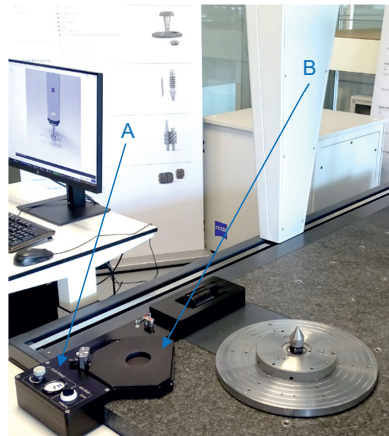


Bild 23: Gegenhalter entfernt

Um die Flexibilität weiterhin zu steigern, wurde ein Wechselbetrieb „Messen zwischen Spitzen“ und der „fliegenden Aufspannung im Backenfutter“ realisiert. Auf **Bild 24 links** erkennt man die sogenannte Drehtischspitzeneinheit mit entnommener Drehtischspitze. Diese kann per Abdrückmutter einfach und schnell entfernt werden. Aufgrund der universellen Morsekegel-Schnittstelle kann diese ebenso schnell und genau wieder eingesetzt werden. Nach Entnahme der Drehtischspitze kann ein Backenfutter auf die Drehtischspitzeneinheit montiert werden (**Bild 24 rechts**). Der Vorteil besteht darin, dass die konzentrisch zur Drehachse justierte Drehtischspitzeneinheit nicht entfernt und beim nächsten Messbetrieb zwischen Spitzen nicht wieder ausgerichtet werden muss. Ebenso erlaubt diese Lösung auch die Verwendung von kundenspezifischen Spitzen wie z.B. diamantbeschichteten Spitzen.



Bild 24: Drehtischspitzeneinheit – links: Wechselspitzen, rechts: Backenfutter

Eines der Kernstücke des neuen Gegenhalters ist die Symbiose aus Software und Hardware. Zur Justage des Gegenhalters wird das Koordinatenmessgerät selbst verwendet. Mittels des speziellen Tastersystem „Tailstock Stylus System“ (**Bild 25**) und der Software „TargetTool“ (**Bild 26**), welches Bestandteil der ZEISS Standard-KMG-Software CALYPSO ist, wird der Anwender gezielt durch die einzelnen Justageschritte geführt. Dies bedeutet, dass der Anwender per Bild und Text zu einer Aktion aufgefordert wird. Die Software überprüft die Ausführung und führt den nächsten Schritt erst nach erfolgreicher Abarbeitung des vorherigen Schrittes aus.

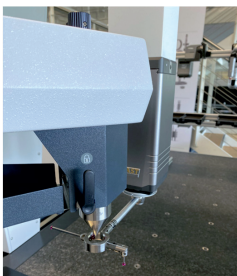


Bild 25: Tailstock Stylus System

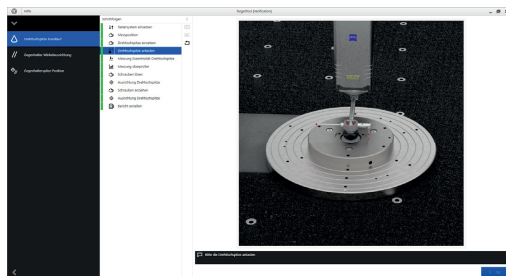


Bild 26: Software TargetTool

Wie im Richtlinienentwurf VDI/VDE 2612 Blatt 6: 2020-10 - Entwurf, Kapitel 5.3.2 – Besonderheiten bei Verwendung eines Drehtischs sowie Drehtisch und Gegenhalter [2], dargestellt, kommt dem Gegenhalter beim Spannen zwischen Spitzen eine besondere Bedeutung zu. Es wird empfohlen die Außermittigkeit der oberen Spitze (=Gegenhalterspitze) regelmäßig zu überprüfen und gegebenenfalls nachjustieren, da dies sonst unter Umständen einzelne Kennwerte der Verzahnungsmessung verfälschen kann. Die Überprüfung kann zum Beispiel mittels Feinzeiger mit hoher Auflösung erfolgen [2].

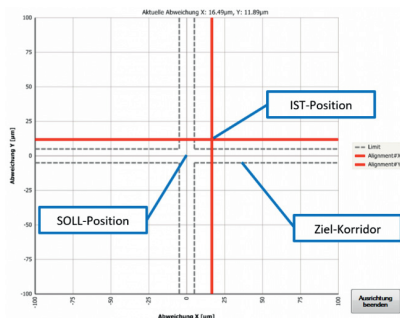


Bild 27: Software TargetTool Live-Anzeige

Die Überprüfung und Justage beim ZEISS Gegenhalter kann ebenfalls mit der Software „TargetTool“ (Bild 26) und dem Tastersystem „Tailstock Stylus System“ (Bild 25) erfolgen. In angetastetem Zustand visualisiert eine Live Anzeige (Bild 27) dabei online die IST-Position und führt den Anwender gezielt zur SOLL-Position.

Eine weitere Möglichkeit die Genauigkeit des Gesamtsystems Koordinatenmessgerät und Gegenhalter zu überprüfen, ist die Verwendung eines geeigneten kalibrierten Verzahnungsnormals. In Bild 28 ist ein durch die Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB, Braunschweig) kalibriertes werkstückähnliches Verzahnungsnorm (IC-Normal, Franco GmbH, Altdorf) auf einem Koordinatenmessgerät ZEISS PRISMO mit Gegenhalter gespannt zwischen Spitzen abgebildet.

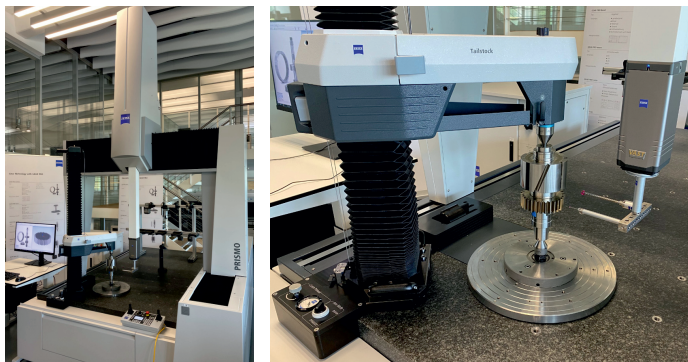
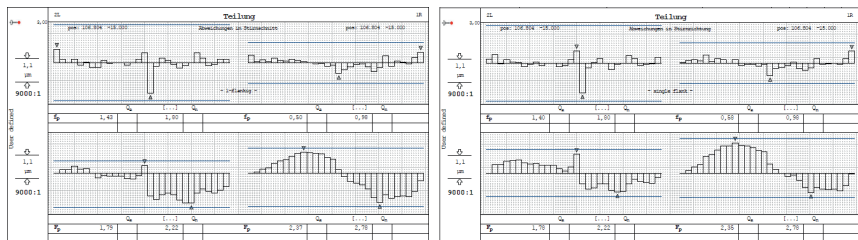


Bild 28: Verzahnungsnorm auf ZEISS PRISMO mit Gegenhalter, gespannt zwischen Spitzen

Die Genauigkeit des Systems kann u.a. dadurch verifiziert werden, dass sich die Aufspannung zwischen Spitzen nicht negativ auf die Verzahnungskenngrößen auswirken darf. Exemplarisch sind in **Bild 29** die Teilungsmessschriebe in 9000-facher Überhöhung dargestellt.



**Bild 29:** Teilungsmessschriebe IC-Normal – links: gemessen (wie kalibriert) in fliegender Aufspannung im Backenfutter, rechts: gespannt zwischen Spitzen

In **Tabelle 2** sind entsprechend die kalibrierten Teilungskenngrößen einschließlich der Angabe der Kalibrierunsicherheit, sowie die Messergebnisse der fliegenden Aufspannung und der Spannung zwischen Spitzen, dargestellt. Man erkennt, dass mit beiden Spannmethoden Messergebnisse innerhalb der Kalibrierunsicherheit erzielt wurden, welche sich lediglich im 1/100- $\mu\text{m}$ -Bereich, bzw. 1/10- $\mu\text{m}$ -Bereich unterscheiden.

**Tabelle 2:** Teilungskenngrößen IC-Normal

Kenngröße	Kalibrierter Wert	Istwert fliegende Aufspannung	Istwert zwischen Spitzen gespannt
Teilungs-Einzelabweichung $f_p - R$	$0,43 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$	$0,50 \mu\text{m}$	$0,58 \mu\text{m}$
Teilungs-Einzelabweichung $f_p - L$	$1,33 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$	$1,43 \mu\text{m}$	$1,40 \mu\text{m}$
Teilungs-Gesamtabweichung $F_p - R$	$2,26 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$	$2,37 \mu\text{m}$	$2,35 \mu\text{m}$
Teilungs-Gesamtabweichung $F_p - L$	$1,69 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$	$1,79 \mu\text{m}$	$1,78 \mu\text{m}$
Rundlauf $F_r$	$2,05 \mu\text{m} \pm 0,9 \mu\text{m}$	$1,81 \mu\text{m}$	$1,68 \mu\text{m}$

## 5. Auswirkung flexibler Gegenhalter auf Zahnradwelle mit ungünstigen Proportionen

Die Verwendung der in Kapitel 4 beschriebenen Lösungsmöglichkeit eines ZEISS Gegenhalters hat sich auf die in Kapitel 3 beschriebene Aufspannproblematik an der ungünstig proportionierten Zahnradwelle dahingehend positiv ausgewirkt, dass es nicht mehr zu

Messfehlern durch Aufspanneinflüsse kommt. Das Zweikugelmaß  $M_{dk}$  von VZ 1 und VZ 5 der zwischen Spitzen gespannten Zahnradwelle unterscheidet sich lediglich um 1  $\mu\text{m}$  und ist in **Bild 30** ersichtlich. In **Tabelle 3** sind die Messergebnisse aller Passverzahnungen entsprechend als Vergleich zur fliegenden Aufspannung im Backenfutter dargestellt.

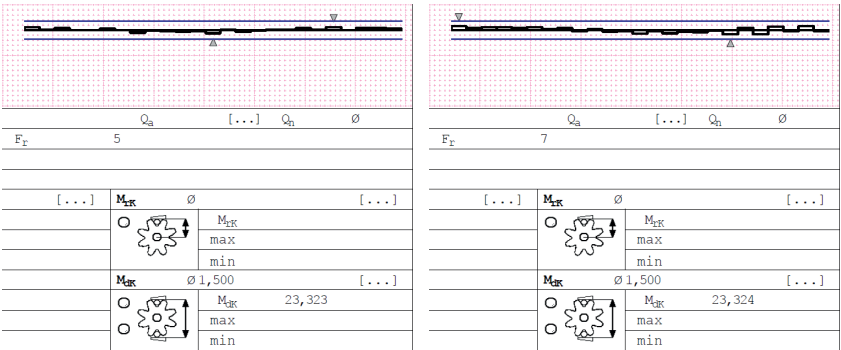


Bild 30: Rundlauf  $F_r$  und Zweikugelmaß  $M_{dk}$  – links unterste VZ 1, rechts oberste VZ 5 – zwischen Spitzen gespannt

Tabelle 3: Zweikugelmaß  $M_{dk}$  – Vergleich fliegende Aufspannung und zwischen Spitzen gespannt

Zweikugelmaß $M_{dk}$ [mm]	Fliegende Aufspannung	Zwischen Spitzen gespannt
VZ 1 (Bild 17 A unten)	23,321 mm	23,323 mm
VZ 2	23,312 mm	23,320 mm
VZ 3	23,303 mm	23,322 mm
VZ 4	23,294 mm	23,324 mm
VZ 5 (Bild 17 B oben)	23,288 mm	23,324 mm
Differenz VZ 1 – VZ 5	0,033 mm	0,001 mm

6. Zusammenfassung und Fazit

Sowohl die Messmethode ohne Drehtisch (Tastersystem mit Einzeltaster und Sterntastersystem) als auch die Messmethode mit Drehtisch (fliegende Aufspannung und spannen zwischen Spitzen) sind in der Verzahnungsmesstechnik etabliert.

Jede Messmethode hat dabei spezifische Vorteile (und Nachteile) gegenüber der anderen Messmethode. Beide Messmethoden finden praktischen Einsatz innerhalb der Fertigungsmesstechnik, idealerweise wird die jeweilige Methode dort eingesetzt, wo sie ihre Stärken zur Geltung bringen kann.

Die Aufspannmöglichkeit zwischen Spitzen unter Verwendung eines Gegenhalters bietet eine flexible und genaue Erweiterungsmöglichkeit auch für universelle Koordinatenmessgeräte. Speziell im Anwendungsfall von wellenartigen Werkstücken wie z.B. Zahnradwellen, Schneckenwellen, Schraubenverdichtern, Nockenwellen, Kurbelwellen usw., wertet es die Einsatzmöglichkeiten von Koordinatenmessgeräten auf.

Die beschriebenen Herausforderungen bei der fliegenden Aufspannung solcher Werkstücke können damit einfach und schnell gelöst werden. Der wesentliche Kundennutzen besteht damit in der flexiblen Anwendung des ZEISS Gegenhalters. Im Bedarfsfall kann dieser mit kurzer Rüstzeit und schneller Nachjustage eingesetzt werden. Der Gegenhalter an sich ist keine grundsätzliche Neuheit im Bereich der Koordinatenmesstechnik, das Thema „Messen zwischen Spitzen“ wurde als „Hybridsystem neu gedacht“, da es die Vorteile von Verzahnungsmessgeräten und Koordinatenmessgeräten vereint.

## Danksagung

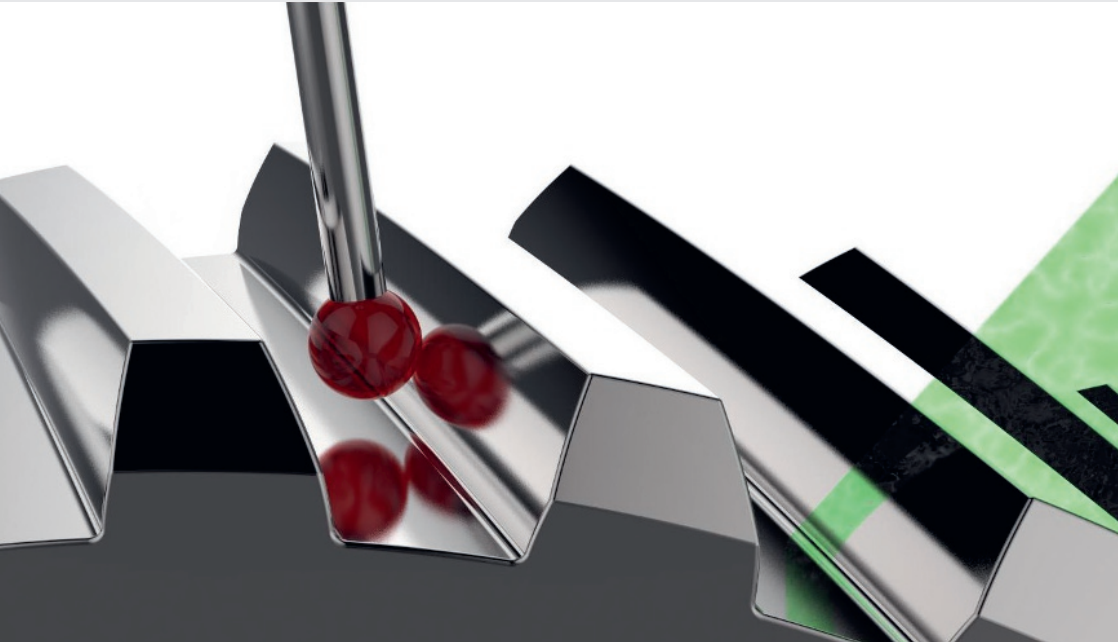
Ein besonderer Dank gilt den folgenden Firmen für die Bereitstellung ihrer Werkstücke sowie die Genehmigung diese abbilden zu dürfen:

Schraubenverdichterpaar: Aerzener Maschinenfabrik GmbH, Reherweg 28, 31855 Aerzen  
Muster-Zahnradwelle: KAPP NILES GmbH & Co. KG, Callenberger Str. 52, 96450 Coburg  
Schneckenwelle: Horst Scholz GmbH & Co. KG, Nalser Str. 39, 96317 Kronach  
Zahnradwelle A und B: GKN Driveline International GmbH, Hauptstr. 130, 53797 Lohmar

## Literatur

- [1] Imkamp, D., et al.: „Herausforderungen und Trends in der Fertigungsmesstechnik – Industrie 4.0“ *tm - Technisches Messen*, vol. 83, no. 7-8, 2016, pp. 417–429, De Gruyter Oldenbourg Wissenschaftsverlag, <https://doi.org/10.1515/teme-2015-0081>
- [2] VDI/VDE 2612 Blatt 6:2020-10 - Entwurf (Weißdruck für 2021 erwartet)
- [3] VDI/VDE 2612 Blatt 1:2018-11
- [4] Bilder 2, 3, 4 aus VDI/VDE 2612 Blatt 1:2018-11 wiedergegeben mit Erlaubnis des Verein Deutscher Ingenieure e. V.
- [5] ZEISS Zahnradmesstechnik Spezifikationen
- [6] ZEISS Webshop <https://shop.metrology.zeiss.de>





ISBN 978-3-18-092393-2

Bildquelle: © FRENCO GmbH