

## 6. Fachtagung

# Verzahnungsmess- technik 2017



# VDI-Berichte 2316

# VDI-BERICHTE

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH



6. Fachtagung

# Verzahnungsmess- technik 2017

Leonberg, 17. und 18. Oktober 2017



# VDI-Berichte 2316

**Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.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 <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

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 978-3-18-092316-1

## Inhalt

	Seite	
Vorwort	1	
<b>Normen und Gear-Data-Exchange-Format (GDE-Format)</b>		
H. Röhr	Aktuelle Entwicklung in der Zahnradnormung bei DIN und ISO	3
<b>Gemeinschaftsvortrag zur GDE-Schnittstelle</b>		
H. Yakaria, K. Simolka, R. Groß	Gear Data Exchange (GDE) – Digitalisierung in der Verzahnungstechnik	13
<b>Geräusch, Welligkeit und Rauheit</b>		
M. Strauß, B. Rank	Akustische Analyse und Bewertung von ZF-Automatikgetrieben in PKW-Anwendungen	29
G. Gravel, T. Kahnhenbley	Neue Entwicklungen zur Welligkeitsanalyse akustisch auffälliger Verzahnungen	43
G. Mies	Rauheitsmessung an Verzahnungen – Optimierte System für die vollautomatische Messung	55
<b>Auswertesoftware in der Verzahnungsmesstechnik</b>		
F. Keller, M. Stein, K. Kniel	Ein verkürztes Rosettenverfahren zur Kalibrierung von Teilungsabweichungen	65
K. Lübke, A. Groh	Rechnerische 2D- und 3D-Lehrung von Pass- und Steckverzahnungen – Null-Fehler-Montage von Wellenverbindungen	77
P. Jukl	Konzept zur Auswertung vollständig gemessener Verzahnungen	89

## Multisensormesstechnik – taktile und optische Messverfahren

<i>M. Stolz, F. Breutner, A. Haberkern, M. Landenberger, L. Schüller</i>	Einsatz optischer Sensoren in der Verzahnungsmesstechnik – Systematische Qualifizierung an Rauheitsverkörperungen	101
<i>F. Balzer, K. Lübke</i>	Laserinterferometrische Verzahnungsmessung auf einem Koordinatenmessgerät – Ein Ansatz zur vollständigen Verzahnungsmessung?	113
<i>R. Groß, D. Imkamp</i>	Vergleich verschiedener Messsysteme in der Verzahnungsmesstechnik – Kunststoffzahnräder auf Koordinatenmessgeräten und berührungslosen Messsystemen	131

## Fertigungsintegrierte Messtechnik

<i>T. Kahnhenbley, G. Gravel</i>	Werkzeug- und Fertigungseinflüsse in der Verzahnungsmessung erkennen	147
<i>C. Gorgels</i>	Closed Loop – Jetzt auch für Stirnräder – Durchgängiger Datenfluss in der Produktion	159

## Werkzeugmessung und Großverzahnungen

<i>D. Ernst</i>	Messen von Verzahnungswerkzeugen – Fertigungsorientierte Lösungen und Prozessintegration	167
<i>H. Röhr</i>	Verzahnungswerkzeug: Messen von Räumbuchsen auf einem Koordinatenmessgerät	179
<i>J. Börner</i>	Schrägungswinkelmodifikationen exakt umsetzen	193
<i>A.-K. Wiemann, M. Stein, K. Kniel</i>	Rückführung von Verzahnungsmessungen für Großgetriebe	205

## Vorwort

Nun findet schon die 6. Fachtagung Verzahnungsmesstechnik statt. Diese Tagung beschäftigt sich wieder mit Fragen rund um die Verzahnungsmesstechnik. Die Schwerpunkte der Tagung spiegeln die Anforderungen an diese Messtechnik wider.

So stellt die Digitalisierung unter dem Schlagwort „Industrie 4.0“ Anforderungen an die Software, Datenübertragung und natürlich an die Messtechniker. Ein Schwerpunkt ist deshalb wieder das „Gear Data Exchange Format“ (GDE). Anhand von Live-Demonstrationen zur Übertragung von Verzahnungsdaten in das CAD und in die Messmaschine wird der Nutzen dieses Formats in einem umfangreichen Gemeinschaftsvortrag dargestellt.

Bisher spielte die taktile Messtechnik die Hauptrolle in der Einzelformprüfung von Zahnrädern. Heute werden wir immer wieder mit optischen Sensoren konfrontiert, deren Performance in der Verzahnungsmesstechnik noch nicht ausreichend erschlossen ist. Deshalb widmet sich eine ganze Session diesem Thema. Hier erwarte ich interessante Aussagen zu Vergleichen der taktilen und optischen Messtechnik.

Neue Sensoren führen wiederum zu größeren Datenmengen, erhöhter Messpunktanzahl und umfangreicher Auswertungen. Kann hier die Software Schritt halten? Auch dazu gibt es eine Reihe von Vorträgen, die einen Einblick in den Stand der Entwicklung geben.

Nicht zuletzt wird die Forcierung der E-Mobilität zu bedeutenden Umbrüchen in der Wertschöpfung der Getriebehersteller für Automobile führen. Da sind zum einen die steigenden Anforderungen an Geräusch, Drehzahl und Drehmoment und zum anderen die wohl sinkende Anzahl an Zahnrädern, da sich die Gangzahl der Getriebe im Elektroauto verringern wird. Sicher ein Punkt der unter den Teilnehmern heiß diskutiert und der auch Thema des Plenarvortrages sein wird.

Ich freue mich auf spannende Vorträge und Gespräche und vor allem darauf, Sie als Teilnehmer der Tagung in Leonberg begrüßen zu dürfen.

Ihr

**Dipl.-Ing. (FH) Thomas Peter**

FRENCO GmbH, Altdorf  
Tagungsleiter



# Aktuelle Entwicklung in der Zahnradnormung bei DIN und ISO

## Actual development of the gearing standards of DIN and ISO

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

### Kurzfassung

Durch die zunehmende internationale Verflechtung der Industrie entstand das Bedürfnis, auch die Normung entsprechend international auszurichten. In diesem Bestreben wurde die Norm ISO 21771:2007 als Grundlagennorm zur Terminologie der Zylinderverzahnungen geschaffen (DIN ISO 21771). Für die Verzahnungstoleranzen entstand ISO 1328-1:2013. Die Übertragung ins Deutsche ist in der Endphase. Die Veröffentlichung wird vermutlich Anfang 2018 erfolgen und die bisherigen DIN-Toleranzen ersetzen. Der zweite Teil von ISO 1328 wird zurzeit überarbeitet.

### Abstract

Because of the growing tendency to more international production the need arose to change from national to international standards. The first result was the basic standard about terminology of cylindrical gearings ISO 21771:2007. For the tolerances ISO 1328-1:2013 was developed. The translation is nearly finished. The publication is expected early 2018. This standard will replace the actual DIN tolerances. The second part of ISO 1328 is under work.

### 1. Einleitung

Durch die zunehmende internationale Verflechtung der Industrie entstand das Bedürfnis, auch die Normung entsprechend international auszurichten. Dies ergibt die Notwendigkeit, in den entsprechenden DIN- und ISO-Gremien mitzuarbeiten, um die Anforderungen der deutschen Industrie an die Normen einzubringen. So entstand aus dem ersten Teil der Grundlagennorm DIN 3960 die internationale Norm ISO 21771:2007, die nach der Übersetzung als DIN ISO 21771:2014 erschien und zusammen mit DIN 21772 und DIN 21773 die bisherige Norm DIN 3960 ersetzte. Für die Verzahnungstoleranzen entstand aus Normen und Richtlinien von ISO, AGMA, DIN und VDI die Norm ISO 1328-1:2013. Die Übertragung ins Deutsche ist in der Endphase. Die Veröffentlichung wird vermutlich Anfang 2018 erfolgen und die

DIN-Toleranzen ersetzen. Der zweite Teil von ISO 1328 mit Toleranzen für die Zwei-Flankenwälzprüfung wird zurzeit überarbeitet.

## 2. Umstellungsaufwand durch die neuen Normen

Die Grundlagennorm für Zylinderräder DIN 3960:1987 wurde 2014 zurückgezogen und durch die drei Normen DIN ISO 21771:2014, DIN 21772:2012 und DIN 21773:2014 ersetzt. DIN ISO 21771 basiert auf einer Überarbeitung von DIN 3960. Für die deutsche Zahnrad-Industrie entstand daher aus der neuen Norm kein Umstellungsaufwand. Die Beschreibung der Verzahnungsabweichungen ist aber in der neuen Norm nicht enthalten. Daher wurde eine weitere Norm DIN 21772 mit diesem Inhalt erstellt. Sie basiert auf DIN 3960:1987, berücksichtigt aber auch schon den damaligen Stand der Überarbeitung von ISO 1328-1. Wegen der später erfolgten großen Änderungen in dieser Norm entspricht DIN 21772 aber leider nur noch zum Teil dem endgültigen Stand von ISO 1328-1:2013. Daher wird DIN 21772 mit Erscheinen von DIN ISO 1328-1:2018 zurückgezogen werden, da die neue Norm neben den Toleranzen auch die Definitionen der Parameter enthält.

Wegen der unbefriedigenden Behandlung der Berechnungen mit Bezug zur Zahndicke im Anhang A von ISO 21771 wurde eine weitere Norm DIN 21773 erstellt, die diesen Bereich abdeckt. Nach Veröffentlichung der drei Ersatznormen wurde DIN 3960:1987 im Jahre 2014 zurückgezogen.

Für die Verzahnungstoleranzen entstand in der Arbeitsgruppe ISO TC 60/WG 2 „Accuracy of Gears“ unter Berücksichtigung der Normen und Richtlinien von ISO, AGMA, DIN und VDI die Norm ISO 1328-1:2013. Die Übertragung ins Deutsche ist in der Endphase. Die Veröffentlichung wird vermutlich Anfang 2018 erfolgen und die bisherigen DIN-Toleranzen aus DIN 3961, DIN 3962 und DIN 3963 ersetzen. Die neue Norm bedeutet eine Umstellung für die Zahnradindustrie, da sich alle Toleranzgleichungen und zum Teil auch die Definitionen geändert haben.

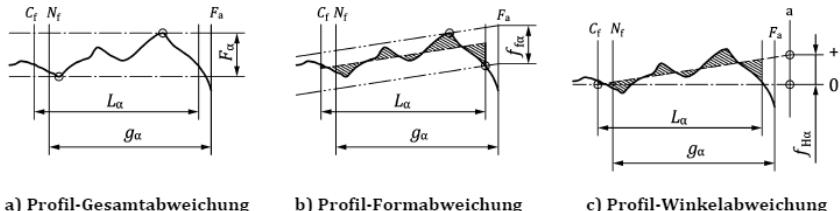
## 3. Profil-Auswertestrategien von DIN ISO 1328-1:2018

Neben der aus DIN 3960 bekannten Auswertestrategie für die Profilabweichungen wurden zwei weitere Strategien eingeführt. Dies sind die Auswertung nach Soll-Profil und die segmentierte Auswertung, wie sie aus VDI/VDE 2607 bekannt ist. Die Strategien werden nachfolgend dargestellt.

Anmerkung: In den Profischrieben entspricht  $C_f$  stets dem Fuß-Nutzkreisdurchmesser  $N_f$ .

### 3.1 Profilabweichungen Typ I: ohne Modifikation

Die Bestimmung der Abweichungsparameter erfolgt ganz analog wie bei DIN 3960. Allerdings wird  $f_{Ha}$  immer bis zum Kopfdurchmesser hochgerechnet.



a) Profil-Gesamtabweichung

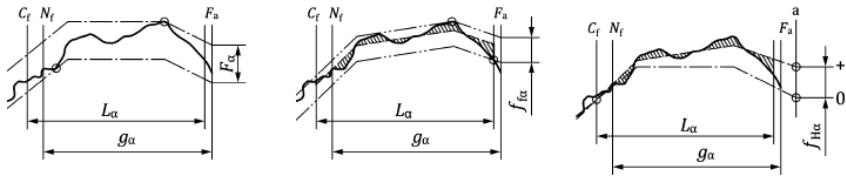
b) Profil-Formabweichung

c) Profil-Winkelabweichung

Bild 1: Profilauswertung ohne Modifikation

### 3.2 Profilabweichungen Typ II: mit Modifikation

Das gesamte Profil mit allen Modifikationen wird als Sollprofil bezeichnet und für die Bestimmung der Profil-Formabweichung und der Profil-Winkelabweichung mit einer Geraden-gleichung überlagert. Die Profil-Winkelabweichung  $f_{Ha}$  wird bis zum Kopfdurchmesser hochgerechnet.



a) Profil-Gesamtabweichung

b) Profil-Formabweichung

c) Profil-Winkelabweichung

Bild 2: Soll-Profilauswertung mit Modifikation

### 3.3 Profilabweichungen Typ III: mit Modifikation

Die einzelnen Bereiche werden unabhängig voneinander ausgewertet.

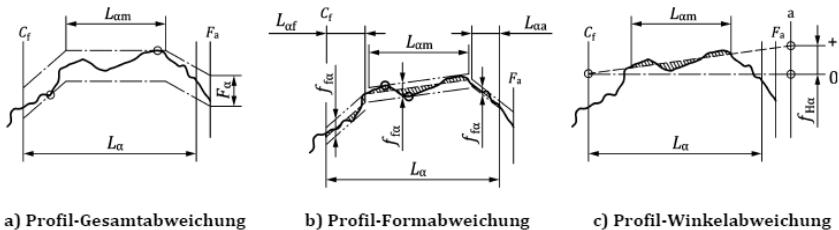


Bild 3: Segmentierte Profilauswertung

### 4. Flankenlinien-Auswertestrategien von DIN ISO 1328-1:2018

Neben der aus DIN 3960 bekannten Auswertestrategie für die Flankenlinienabweichungen werden zwei weitere Strategien eingeführt. Dies sind die Auswertung nach Soll-Flankenlinie und die segmentierte Auswertung, wie sie aus VDI/VDE 2607 bekannt ist. Die Strategien werden nachfolgend dargestellt.

#### 4.1 Flankenlinien-Abweichungen Typ I: ohne Modifikation

Die Bestimmung der Abweichungsparameter erfolgt analog wie bei DIN 3960. Allerdings wird  $f_{H\beta}$  immer auf die ganze Zahnbreite  $b$  hochgerechnet.

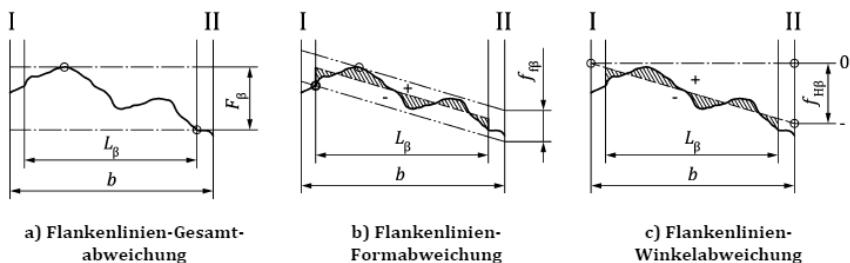


Bild 4: Flankenauswertung ohne Modifikation

#### 4.2 Flankenlinienabweichungen Typ II: mit Modifikation

Das gesamte Flankenlinie mit allen Modifikationen wird als Soll-Flankenlinie bezeichnet und für die Bestimmung der Flankenlinien-Formabweichung und der Flankenlinien-

Winkelabweichung mit einer Geradengleichung überlagert. Die Flankenlinien-Winkelabweichung  $f_{HB}$  wird auf die ganze Zahnbreite  $b$  hochgerechnet.

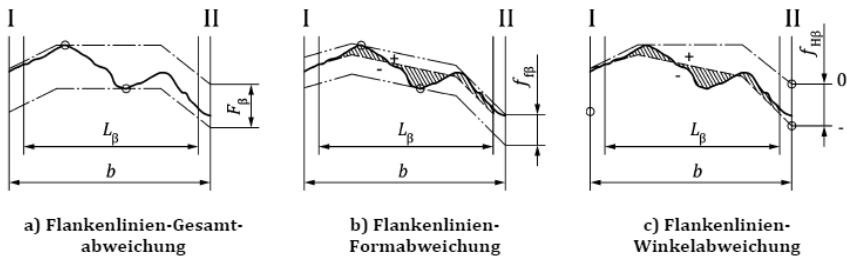


Bild 5: Soll-Flankenlinienauswertung mit Modifikation

#### 4.3 Flankenlinienabweichungen Typ III: mit Modifikation

Die einzelnen Bereiche werden unabhängig voneinander ausgewertet. Die Flankenlinien-Winkelabweichung  $f_{HB}$  wird aus den Punkten im mittleren Bereich berechnet und auf die ganze Zahnbreite  $b$  hochgerechnet.

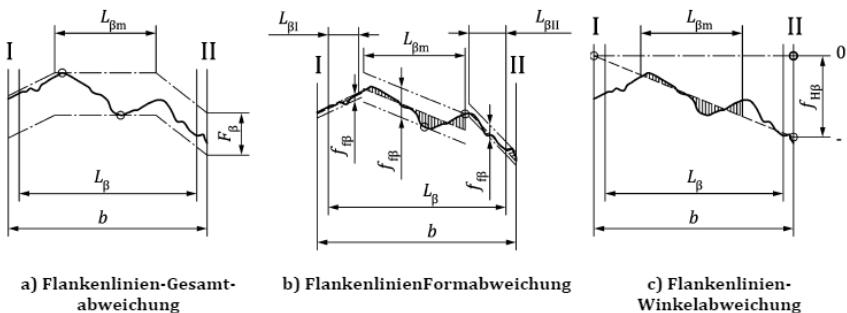


Bild 6: Segmentierte Flankenlinienauswertung

#### 5. Filterung und Punktdichte

Vor der Auswertung der Profi- und Flankenlinien sind die Abweichungen mit einem Gauß 50 %-Filter zu glätten. Dadurch wird der Effekt von Unregelmäßigkeiten mit Wellenlängen

kürzer als die Grenzwellenlänge minimiert. Als Grenzwellenlänge sind die folgenden Werte festgelegt.

$$\lambda_{\alpha} = \frac{L_{\alpha}}{30}$$

, aber nicht weniger als 0,25 mm

$$\lambda_{\beta} = \frac{b}{30}$$

, aber nicht kleiner als  $\lambda_{\alpha}$

$\lambda_{\alpha}$  ist als Wälzstreckenintervall anzugeben,  $\lambda_{\beta}$  als Länge in Zahnbreitenrichtung. Die Anzahl der Messpunkte bei Profi- und Flankenlinie soll jeweils mindestens 150 betragen.

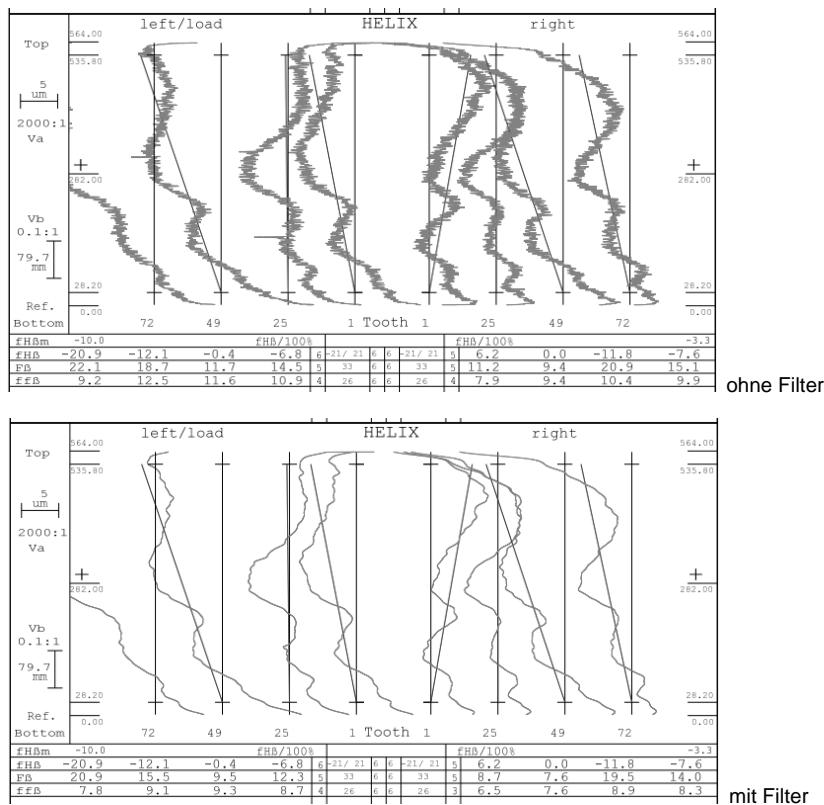


Bild 7: Auswertung mit und ohne Filter ( $m_n = 24$ ,  $b = 540$  mm,  $da = 2300$  mm)

## 6. Gültigkeitsbereich

Die in DIN ISO 1328-1:2018 angegebenen Toleranzgleichungen sind für die in Tabelle 1 angegebenen Bereiche gültig. Die behandelten Parameter sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 1: Geltungsbereich

Parameter	Geltungsbereich
Zähnezahl	5 ... 1000
Durchmesser	5 ... 15000 mm
Modul	0,5 ... 70 mm
Breite	4 ... 1200 mm
Schrägungswinkel	< 45°

Tabelle 2: Begriffe

Symbol	Begriff
$F_p$	Teilungs-Gesamtabweichung
$f_p$	Teilungs-Einzelabweichung
$F_\alpha$	Profil-Gesamtabweichung
$ff_\alpha$	Profil-Formabweichung
$f_{H\alpha}$	Profil-Winkelabweichung
$F_\beta$	Flankenlinien-Gesamtabweichung
$f_{B\beta}$	Flankenlinien-Formabweichung
$f_{H\beta}$	Flankenlinien-Winkelabweichung
$F_r$	Rundlaufabweichung
$F_{pk}$	Teilungs-Summenabweichung
$f_u$	Teilungssprung
$F_{is}$	Einflanken-Wälzabweichung
$f_{is}$	Einflanken-Wälzsprung

## 7. Toleranzgleichungen

In die Toleranzformeln werden die aktuellen Werte für  $d$ ,  $m_n$  und  $b$  eingesetzt. Die Toleranz ergibt sich nach festgelegten Rundungsregeln. Es gibt keine Toleranztabellen mehr.

### Teilungstoleranzen

$$f_{pT} = (0,001d + 0,4m_n + 5) \left(\sqrt{2}\right)^{(A-5)}$$

$$F_{pT} = (0,002d + 0,55\sqrt{d} + 0,7m_n + 12) \left(\sqrt{2}\right)^{(A-5)}$$

$$f_{uT} = \sqrt{2} f_{pT}$$

Rundlauftoleranz

$$F_{rT} = 0,9 F_{pT} = (0,9) (0,002d + 0,55\sqrt{d} + 0,7m_n + 12) (\sqrt{2})^{(A-5)}$$

Profiltoleranzen

$$f_{H\alpha T} = (0,4m_n + 0,001d + 4) (\sqrt{2})^{(A-5)}$$

$$f_{f\alpha T} = (0,55m_n + 5) (\sqrt{2})^{(A-5)}$$

$$F_{\alpha T} = \sqrt{f_{H\alpha T}^2 + f_{f\alpha T}^2}$$

Flankenlinientoleranzen

$$f_{H\beta T} = (0,05\sqrt{d} + 0,35\sqrt{b} + 4) (\sqrt{2})^{(A-5)}$$

$$f_{f\beta T} = (0,07\sqrt{d} + 0,45\sqrt{b} + 4) (\sqrt{2})^{(A-5)}$$

$$F_{\beta T} = \sqrt{f_{H\beta T}^2 + f_{f\beta T}^2}$$

Einflanken-Wälztoleranzen (informativ)

$$f_{isT,max} = f_{is(design)} + (0,375 m_n + 5,0) (\sqrt{2})^{(A-5)}$$

$$F_{isT} = F_{pT} + f_{isT,max}$$

Der Wert für  $f_{isT,min}$  ist der größere der beiden folgenden Werte:

$$f_{isT,min} = f_{is(design)} - (0,375 m_n + 5,0) (\sqrt{2})^{(A-5)}, \text{ oder}$$

$$f_{isT,min} = 0$$

## 6. Unterschiede zwischen DIN ISO 1328-1:2018 und DIN 3961, DIN 3962 und DIN 3963

Um die Unterschiede der künftigen Verzahnungsnorm zu den bisherigen DIN-Toleranzen zu verdeutlichen, sollen hier die Hauptunterschiede angegeben werden. Eine solche Liste findet man auch im nationalen Vorwort von DIN ISO 1328-1:2018.

- Anwendungsbereich wurde erweitert
- neue Toleranzgleichungen mit Rundungsregeln wurden eingeführt
- die Stufensprünge für Modul und Durchmesser wurden beseitigt

- Gauß 50 %-Filter bei Profil- und Flankenlinie ist nun vorgeschrieben,
- die Mindestpunktdichte auf Messlinien wurde festgelegt
- Auswertung aufgeteilt:
  - a) unmodifiziert
  - b) Auswertung als Soll-Profil bzw. Soll-Flankenlinie
  - c) Bereichsweise Auswertung (Kopf-, Fuß-, Endrücknahmen)
- Balligkeit mit Parabel-Einpassung
- Hochrechnung von  $f_{Hs}$  auf volle Zahnbreite
- Hochrechnung von  $f_{Ha}$  bis zum Kopfkreisdurchmesser
- Einflankenwälzprüfung in DIN ISO 1328-1 nur informativ
- Zweiflankenwälzprüfung nur in ISO 1328-2 beschrieben
- Toleranzen für Teilungs-Sektorabweichung  $F_{pz/k}$  nur informativ
- Toleranzen für Teilungs-Sprung  $f_u$  nur informativ
- Parameter  $R_s$  fehlt

## 8. Literaturangaben

- [1] DIN 3960, 1987, Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung
- [2] DIN 3961, DIN 3962, DIN 3963, Toleranzen für Stirnradverzahnungen
- [3] 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
- [4] ISO 1328-2, Cylindrical Gears – ISO System of Accuracy – Part 2: Definitions and Allowable Values of Deviations Relevant to Radial Composite Deviations and Runout Information, 2000
- [5] ISO 21771:2007, „Gears – Cylindrical involute gears and gear pairs – Concepts and geometry“
- [6] DIN ISO 21771:2014-08 „Zahnräder – Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnung – Begriffe und Geometrie“
- [7] Entwurf DIN 21772, „Zahnräder – Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnung – Definition der Abweichungen“
- [8] Entwurf DIN 21773:2014-08, „Zahnräder – Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnung – Prüfmaße für die Zahndicke“



# Gear Data Exchange (GDE) – Digitalisierung in der Verzahnungstechnik

**Dr.-Ing. Herman Yakaria**, ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen;  
**M.ENG. Kristoph Simolka**, FRENCO GmbH, Altdorf;  
**Dipl.-Ing. (FH) Roman Groß**, Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen

## Kurzfassung

In den letzten Jahren nimmt das Datenaustauschformat "Gear Data Exchange" (GDE, VDI 2610) für die Applikationen der Industrie 4.0 und für die Digitalisierung in der Verzahnungstechnik an Bedeutung zu. GDE ermöglicht eine Standardschnittstelle, um verzahnungsrelevante und administrative Daten zwischen Getriebeherstellern und ihren Werkzeug-, Maschinen- und Teilelieferanten universell austauschen zu können. Im Beitrag werden der aktuelle Stand der Schnittstelle und praktische Anwendungen in der Verzahnungsmesstechnik aufgezeigt.

## Abstract

For the last several years, the data exchange format "Gear Data Exchange" (GDE, VDI 2610) has become increasingly important regarding to the applications of I4.0 and digitalization in the gear technology. GDE allows a standard interface, which can universally transfer gear related data between transmission manufacturers and their tool, machine and part suppliers.

In this paper, the role of GDE as a common interface connecting of processes within the production chain will be shown. Furthermore the basic structure and the application of the GDE format for the gear metrology and manufacturing in the serial production will be presented.

## 1. Einleitung

Einer der Hauptkomponenten in der Kommunikation ist die Sprache. In der Geschichte von Babel (1. Mose 11, 1-9) wird die Bedeutung einer Standardsprache deutlich dargestellt. Zu dieser Zeit hatte die ganze Welt eine einheitliche Sprache, d.h. eine gemeinsame Sprache für alle Menschen (**Bild 1**). Um sich selbst einen Namen zu machen und zu verhindern, dass die Menschen verstreut werden, hatten sie begonnen eine Stadt und einen Turm zu bauen,

dessen Spitze bis an den „Himmel“ reichen sollte. Weil Gott wusste, dass ihre Pläne sie nur von ihm wegführen würden, verwirrte er ihre Sprache und ließ sie viele verschiedene Sprachen sprechen, so dass sie sich nicht mehr verstehen konnten. Aus diesem Grund haben sie aufgehört den Turm zu bauen und wurden über die ganze Erde verstreut.

Wie eine einheitliche Sprache Menschen zur Vollbringung unglaublicher Meisterwerke verbinden kann, ist eine einheitliche Datenschnittstelle erforderlich, um die Produktionsprozesse miteinander zu verbinden und zu vernetzen. Ohne Vernetzung von Fertigungsprozessen wird es keine Digitalisierung innerhalb der Produktion geben. Eine standardisierte Datenschnittstelle ist der Schlüssel zur Vernetzung und somit zur Digitalisierung.

In der Verzahnungstechnik bietet das Datenaustauschformat GDE eine Standardschnittstelle für die Übertragung verzahnungsrelevanter Daten an, das universell - firmenunabhängig - von verschiedenen Werkzeug-, Maschinenherstellern und Anwendern genutzt werden kann. GDE wird durch den VDI/VDE-Fachausschuss „Messen an Zahnrädern und Getrieben“ entwickelt [1], [2]. Neben dem Austausch von Verzahnungsgrund- und Modifikationsdaten, erlaubt GDE auch den Austausch von Werkzeug-, Bearbeitungs- und Messdaten. Auf diese Weise kann die Vernetzung zwischen der Entwicklung, der Prozessplanung, der Produktion und dem Aftermarket etabliert werden.

In diesem Beitrag wird die Rolle des GDE-Standards bei der Digitalisierung in der Zahnräderproduktion beschrieben. Besonders wird die praktische Umsetzung von GDE in der Verzahnungsmesstechnik vorgestellt.

#### Babel/confusing

*Come, let us go down and confuse their language  
so they will not understand each other.  
... and they stopped building the city.*

*Genesis 11,7-8*



source: Peter Bruegel d. Ä.; 1563



source: the whole story; SCHF e. V.

Bild 1: Verwirrte Sprache lähmt die Vernetzung

## 2. Vernetzung und Digitalisierung durch standardisiertes Datenaustauschformat

Digitalisierung in der Zahnradproduktion erfordert die Vernetzung jedes einzelnen Produktionsprozesses. Die meisten Produktionsabläufe laufen bereits digital. Die Eingabe-, Prozess- und Ausgabedaten liegen in digitaler Form vor. Die Umsetzung der analogen zur digitalen Form ist bereits seit Jahrzehnten in den meisten Produktionsabläufen abgeschlossen. Aber die Digitalisierung steht noch am Anfang.

Die Digitalisierung ermöglicht die Vernetzung unterschiedlicher Prozesse innerhalb einer Produktionskette oder darüber hinaus innerhalb eines ganzen Produktlebenszyklus. Wenn die digitalen Daten jedes Produktes durch Digitalisierung verbunden und durchgängig genutzt werden können, entsteht ein digitales Leben. Die Digitalisierung ist der Kern der Projektindustrie 4.0, die eine digitale Vernetzung von Prozessen in verschiedenen Bereichen fokussiert [3].

**Bild 2** zeigt die Vernetzung einer üblichen Fertigungskette von Zahnrädern, welche die Weichbearbeitung, Wärmebehandlung, Abrichtprozess, Hartbearbeitung und die Qualitätsprüfung mittels Verzahnungsmessung umfasst. Diese einzelnen Prozesse können vernetzt werden, wenn sie eine einheitliche Datenschnittstelle verwenden, genau wie eine einheitliche Sprache in der menschlichen Kommunikation.

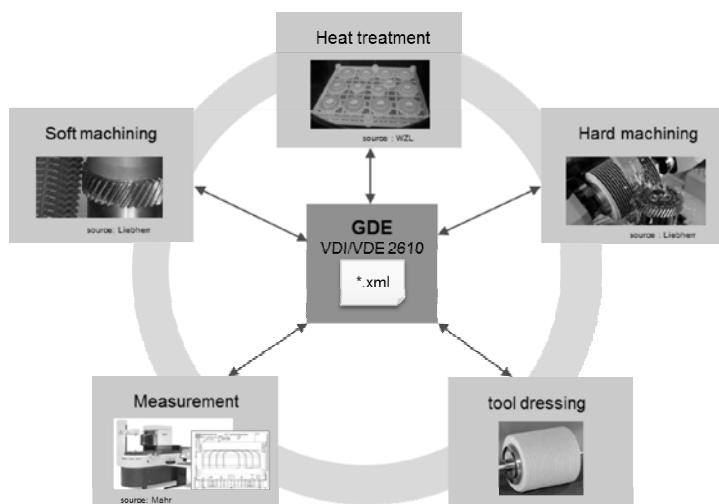


Bild 2: Vernetzung und Digitalisierung durch standardisiertes Datenaustauschformat

Aus diesem Grund wurde die firmenunabhängige Schnittstelle „Gear Data Exchange“ (GDE) durch den VDI entwickelt, welches die Basis für eine Nutzung der digital verfügbaren Daten und die Vernetzung in der Verzahnungstechnik darstellt. Die Definition des Formats ist in der VDI/VDE Richtlinie 2610 [2] beschrieben. GDE basiert auf dem flexiblen, erweiterbaren, strukturierten XML-Format (**eXtended Markup Language**), das für Webanwendungen und Datenaustausch entwickelt wurde [4][5]. Ein XML-Dokument besteht dabei aus menschenlesbaren Textzeichen und kann somit einfach mit einem Standard-Texteditor erzeugt, angezeigt und bearbeitet werden.

### 3. Struktur der Schnittstelle Gear Data Exchange - GDE

Die Hauptaufgabe von GDE ist der Austausch von Daten, nicht das Abspeichern von Daten als Datenbank. Daher muss die Struktur einer firmenspezifischen Datenbank nicht analog zur GDE-Struktur sein. Es ist nicht sinnvoll, GDE-Datensätze als firmenspezifische Datenspeicherung zu verwenden.

In **Bild 3** sind die Hauptelemente von GDE dargestellt. Im Element Verzahnung können die Grunddaten mit den Modifikationen und Toleranzen übertragen werden. Zusätzlich können Mess- und Auswertungsdaten eines Bearbeitungszustandes berücksichtigt werden.

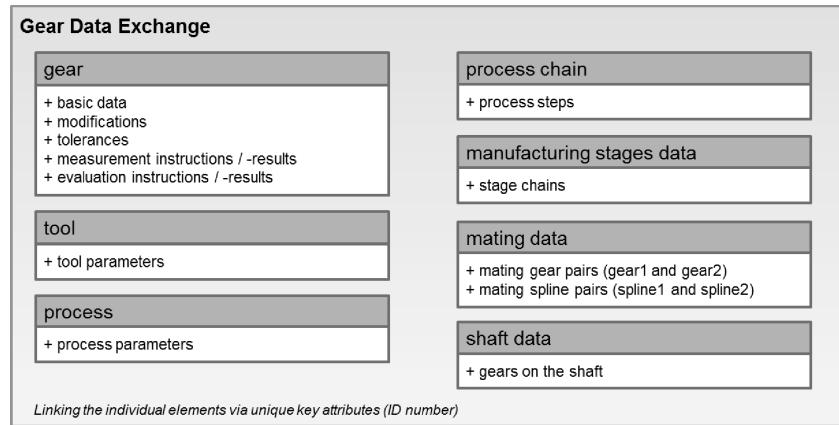


Bild 3: Grundelemente des GDE

Für die Übertragung von Fertigungsdaten bietet GDE die Elemente Werkzeug, Prozess, Prozesskette und Fertigungsstufen an. Die Verknüpfung dieser Daten mit den Verzahnungsdaten erfolgt durch die eindeutigen Schlüsselattribute (ID-Nummer), die nur innerhalb der GDE-Datei gültig sind.

**Bild 4** zeigt ein Beispiel, wie die Fertigungskette einer wälzgefrästen und geschliffenen Verzahnung mit den Elementen Verzahnung, Werkzeug, Prozess und Prozesskette definiert wird. Die benötigten Daten zur Beschreibung eines Fertigungsprozesses (Verzahnungs- und Werkzeugdaten) sind mit jedem Prozesselement verknüpft. Die Reihenfolge der Fertigungsprozesse ist im Prozesskettenelement definiert.

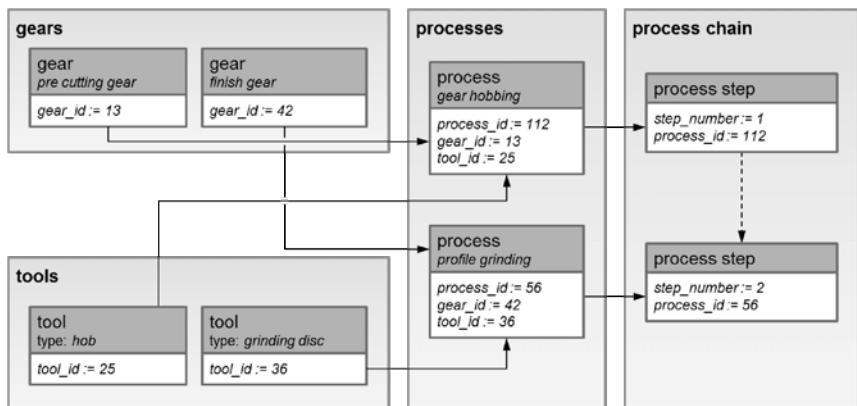


Bild 4: Werkzeug – Verzahnung – Prozess – Prozesskette

GDE ermöglicht auch die Übertragung von Daten für unterschiedliche Fertigungszustände einer Verzahnung, ohne die entsprechenden Prozessparameter definieren zu müssen. Zum Beispiel können die Verzahnungsmessergebnisse eines gleichen Verzahnungsbauteils nach dem Wälzfräsen, der Wärmebehandlung und der Hartbearbeitung übertragen werden (**Bild 5**).

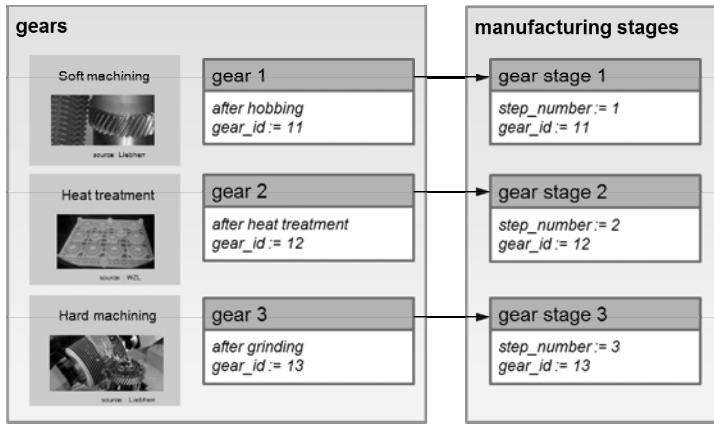


Bild 5: Verbindungen der Elemente in GDE:

Fertigungszustände (ohne Beschreibung der genauen Prozessparameter)

Häufig besitzt eine Welle mehrere Verzahnungen. In vielen Fällen ist es sinnvoll, solche Wellen in einer GDE-Datei zu beschreiben. Mit dem Element "Welle" kann diese Option realisiert werden. Durch die Verknüpfung der ID-Nummer der Verzahnungen mit dem Element "Welle" kann jede Verzahnung auf der Welle spezifiziert werden (**Bild 6**).

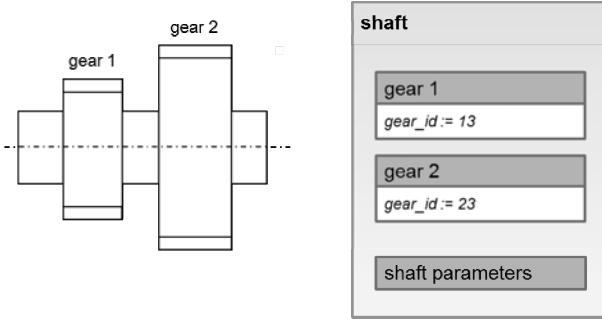


Bild 6: Verbindungen der Elemente in GDE: Welle mit zwei Verzahnungen

In der Getriebeentwicklung kann bei Bedarf ein ausgelegtes Radpaar mit einer anderen Berechnungsmethode wie FEA-basierten Methoden validiert werden. Die Datenübertragung des Zahnradpaares kann mit dem GDE-Element "Radpaar" erfolgen (**Bild 7**). Die Verzahnungsdaten des Ritzels und des Gegenrades werden im Element Verzahnung beschrieben.

Beide Verzahnungen sind in der GDE-Datei mit ihrer ID-Nummer gepaart. Die Radpaardaten wie Achsabstand oder Antriebsmoment können in den Radpaarparametern angegeben werden. Mit derselben Vorgehensweise kann auch das Radpaar von Mitnahmeverzahnungen oder Beveloids beschrieben werden.

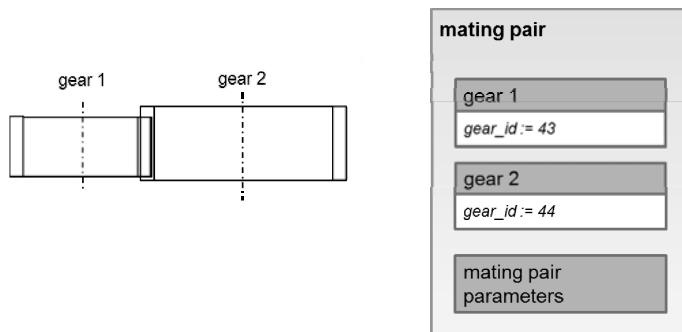


Bild 7: Verbindungen der Elemente in GDE: Radpaar

Um den zukünftigen Anforderungen der Anwender gerecht zu werden, wird die Struktur der GDE-Schnittstelle jährlich aktualisiert. Innerhalb der VDI-Arbeitsgruppe für GDE werden Erweiterungsanfragen diskutiert und abgestimmt. **Bild 8** zeigt einige der Firmenmitglieder, die an der Arbeitsgruppe beteiligt sind.



Bild 8: Partner in der Arbeitsgruppe GDE

#### 4. GDE is alive! – Praktische Anwendungsbeispiele

##### 4.1 gear4ZF – Vollintegriertes Verzahnungsqualitätssystem (ZF)

Im Zuge der Digitalisierung in der Zahnradproduktion hat ZF ein vollintegriertes Verzahnungsqualitätssystem "gear4ZF" entwickelt, das GDE als standardisiertes Verzahnungsdatenaustauschformat nutzt (**Bild 9**). Der Hauptteil des Systems ist die Datenbank, die alle strukturierten Daten von der Entwicklung über die Fertigung bis zum Aftermarket-Bereich enthält. Die Daten beinhalten Verzahnungsgrund-, Werkzeug-, Prozess- und Messdaten. Die Module von gear4ZF ermöglichen es, die verschiedenen Prozesse in der Entwicklung und Fertigung zu vernetzen.

In der Verzahnungsmesstechnik verbindet gear4ZF weltweit die installierten Messmaschinen der ZF-Gruppe mit der Datenbank. Da ZF mit verschiedenen Lieferanten von Messmaschinen arbeitet, ist die Verwendung von GDE als standardisierte Schnittstelle zur Erstellung der Messprogramme und zur Speicherung der Messergebnisse unverzichtbar.

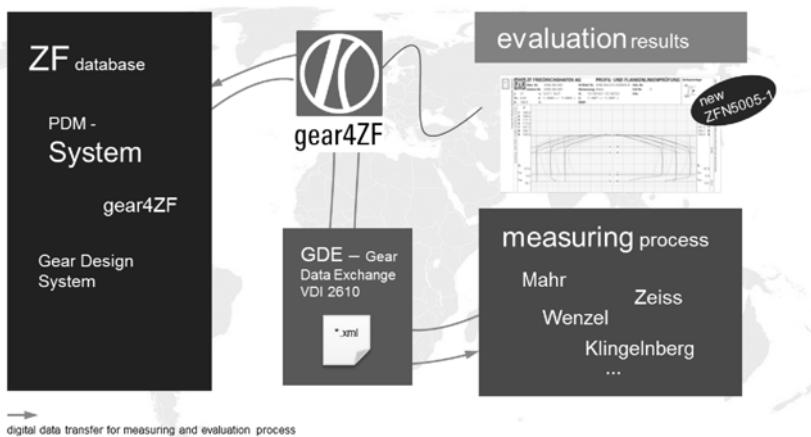


Bild 9: gear4ZF – Vollintegriertes Verzahnungsqualitätssystem

Durch die steigenden Qualitätsanforderungen im Getriebebereich wurden die neuen Auswertungsmethoden der Verzahnungsqualität entwickelt und in einer internen Norm fixiert. gear4ZF unterstützt ZF-weit die Qualitätssicherung mit dem Auswertetool auf Basis der neu entwickelten Norm.

#### 4.2 Einbindung von GDE in die Auftragsbearbeitung (FRENCO)

Um einen schnellen und reibungslosen Austausch von Verzahnungsdaten in ein CAD-System sicherzustellen ist eine Standardisierung und Teilautomatisierung von Nöten. Für ein Unternehmen welches täglich über 30 unterschiedliche Verzahnungen generieren muss ist eine solche Automatisierung geschäftsfördernd.

Nachdem nun eine Umstellung des CAD-Systems von CoCreate (damals ME10) auf PTCs Pro/Engineer Wildfire 4 anstand, wollte man die Gelegenheit nutzen und eine möglichst automatisierten Datenaustausch zwischen Berechnungsprogramm und CAD-System generieren. Im Zuge dessen sollte das GDE-Format als Medium zwischen den beiden Programmen fungieren.

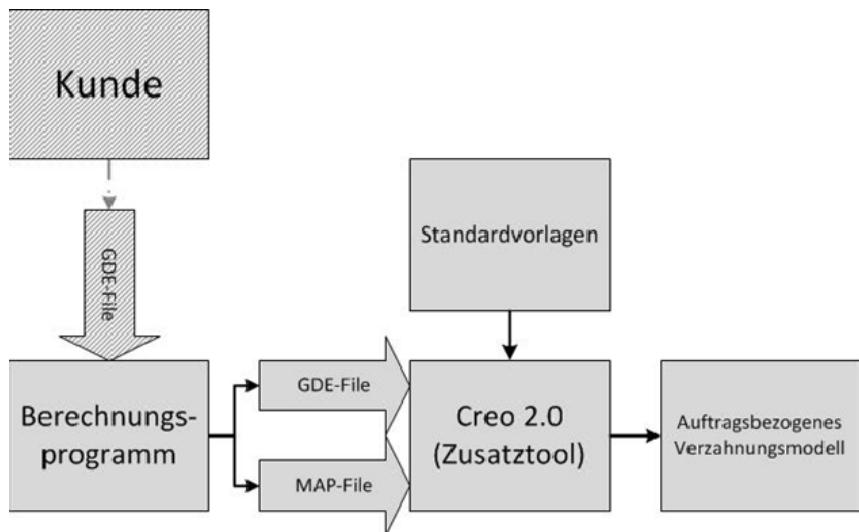


Bild 10: Schematische Darstellung des Arbeitsablaufes mit GDE

(Zukunftsansicht schraffiert)

Um nachträglich noch flexibel in der Übertragung der Daten zu bleiben, wurde eine zweite Datei zum Definieren der Anzahl, des Pfades und des Parameters in Pro/Engineer eingeführt. Eine sogenannte Mapping-Datei.



```

1 <?xml version="1.0" encoding="utf-8" standalone="no" ?>
2 <gear_data exchange_type="text" version="2.0">
3   <gear_data type="gear">
4     <section_identification>
5       <customer>GKN OFFENBACH</customer>
6       <order_number>20171589</order_number>
7       <drawing_number>694949</drawing_number>
8       <modification_date>2017-06-28</modification_date>
9       <modification_index></modification_index>
10      <client_number>13300154</client_number>
11      <client_number>13300154</client_number>
12      <ident_number></ident_number>
13      <ident_number></ident_number>
14      <ident_number></ident_number>
15      <ident_number></ident_number>
16      <manufacturers>FRENO</manufacturers>
17      <processing_status>finished</processing_status>
18      <número_of_gear>00</número_of_gear>
19      <part_name>Getriebezahn ANSI B 92.1 ähnlich- z28<br/>DP24/64)<part_name>
20      <serial_number>80.7571</serial_number>
21      <comment></comment>
22    </section_identification>
23    <section_geometry>
24      <basic_data>
25        <kind_of_gear>page_00</kind_of_gear>
26        <external_internal><external><internal>
27          <número_of_teeth>28</número_of_teeth>
28          <normal_module>1.058333</normal_module>
29          <pressure_angle flank="both">80.75714</
30          <pressure_angle>
31          <helix_angle direction="straight" flank="both">0</
32          <helix_angles>
33            <reference_diameter>29.6133</reference_diameter>
34            <base_diameter>---</base_diameter>
35            <facewidth>20</facewidth>
36            <tooth_thickness_normal_pitch_dia>
37            <tooth_normal_pitch_dia>
38            <space_width_normal_pitch_dia>
39            <space_width_normal_pitch_dia>
40          </helix_angles>
41        </internal></external>
42      </basic_data>
43    </section_geometry>
44  </gear_data>
45  <solid>
46    ZAHNEZAHL                                = //gear_data/section_geometry/basic_data/number_of_teeth/text()
47    MODUL                                     = //gear_data/section_geometry/basic_data/normal_module/text()
48    TEILKREIS                                 = //gear_data/section_geometry/basic_data/reference_diameter/text()
49    LUETKENWAHNINKEL_AUSSEN                  = //gear_data/section_geometry/basic_data/external_form_angle/text()
50    LUETKENWAHNINKEL_INNEN                   = //gear_data/section_geometry/basic_data/internal_form_angle/text()
51    SCHRAEGUNGSWINKEL_1                      = //gear_data/section_geometry/basic_data/helix_angle/text()
52    SCHRAEGUNGSWINKEL_2                      = //gear_data/section_geometry/basic_data/helix_angle/text()
53    E_SCHRAEGUNGSRICHTUNG                   = //gear_data/section_geometry/basic_data/helix_angle/@direction
54    KOPFKRISOURCEMSER                       = //gear_data/section_geometry/basic_data/tolerance/text()
55    FUSSKRISOURCEMSER                        = //gear_data/section_geometry/basic_data/root_diameter/text()
56    MASS_UEBER_ROLLEN_NIU                     = //gear_data/section_geometry/basic_data/size_over_pins/text()
57    MASS_UEBER_ROLLEN_ABGENUTZT               = //gear_data/section_geometry/tolerance/size_tolerances/
58    SPLINE_TOLERANCES_WORN_SIZE_OVER_PINS    = spline_tolerances.worn.size_over_pins.worn/to_l.upper{text()}
59    MASS_UEBER_ROLLEN_TO_L                    = //gear_data/section_geometry/basic_data/tolerance/text()
60    ZAHNDICKE                                 = //gear_data/section_geometry/basic_data/tooth_thicknes
61    TOOLD_THICKNESS_MAX_EFF/text()           = //gear_data/section_geometry/spline_geometry/
62    ZAHNDICKE_ABGENUTZT                      = //gear_data/section_geometry/tolerance/size_tolerances/
63    SPLINE_TOLERANCES_WORN_TOOTH_THICKNESS_WORN_TO_L_UPPER/text()
64    ZAHNDICKE_NEU_TOL                         = //gear_data/section_geometry/basic_data/tooth_thicknes
65    MESSROLLEN_DURCHM                         = //gear_data/section_geometry/basic_data/diameter/text()
66  </solid>

```

Bild 11: GDE und Mapping-Datei zum Definieren der Werte in entsprechenden Parametern

Durch den XML-Charakter des GDEs kann durch einfache XPath-Befehle ein bestimmter Wert ausgelesen werden und durch abgleichen der Parameternamen in Pro/Engineer dieser Wert eingetragen werden.

Durch diese Automatisierung können Übertragungsfehler im Grunde ausgeschlossen werden. Ein zusätzlich dafür angepasstes Verzahnungsmodell, welches sich dynamisch auf die Parameterwerte einstellt, vereinfacht darüber hinaus die komplette Konstruktion von verzahnten Lehren enorm.



Bild 12: Umwandlung von Standardverzahnung zu einer auftragsbezogenen Verzahnung

Durch Nutzen der User-Sektion können auch weitere Werte, abseits von Verzahnungsdaten, übertragen werden. Auch wenn von der Nutzung dieses Bereiches abgeraten wird, aufgrund von Kompatibilität, wird dieser ausschließlich in internen GDE-Files genutzt um auftragsbezogene Daten, wie Kunde, Auftragsnummer oder Beschriftung ans CAD-System weiter zu reichen.

Zukünftig könnte das GDE-Format weiter in die Auftragsbearbeitung integriert werden und Prozesse vereinfachen. So ließe sich, durch die standardisierte Produktpalette und dem GDE, eine papierlose Fertigung bei einer Einzelfertigung realisieren.

Mittels RFID-Chips könnten alle relevanten Daten im GDE-Format abgespeichert und über ein Lesegerät nur die für die Station wichtigen Angaben angezeigt werden.

Weiterhin können auch Messergebnisse oder Kommentare zu diesem Produkt nachträglich noch abgespeichert werden.

Eine weitere Möglichkeit, GDE vermehrt zu verwenden, wäre der Austausch der Werkstückdaten von Seiten der Kunden. Insofern alle für uns relevanten Daten innerhalb der Kunden-GDE stecken, wäre ein Import der Daten und daraus folgende Ableitung der Lehren um ein Vielfaches schneller und sicherer. Durch den Standard wäre auch keine weitere Absprache zwischen Kunden und FRENCO von Nöten. Hierdurch könnte sowohl FRENCO Zeit und Geld sparen, als auch umgelegt auf den Kunden.

#### **4.3 Nutzung von GDE in der Qualitätssicherung (ZEISS)**

Ein wesentlicher Bestandteil der Qualitätssicherungskette innerhalb einer Verzahnungsfertigung ist das Messen der gefertigten Zahnräder mit entsprechenden Zahnradmesssystemen. Dabei werden die Bauteile, neben der Ermittlung von Maß-, Form- und Lageabweichungen (GPS – Geometrische Produkt Spezifikation), z.B. Rundheit oder Ebenheit, auch auf die Einhaltung der Toleranzen von zahnradspezifischen Merkmalen analog nationaler und internationaler Normen wie z.B. ISO 1328-1:2013-09 bewertet.

Ein Messprogramm für die Ermittlung zahnradspezifischer Merkmale startet üblicherweise mit der Definition der Nominalgeometrie der Verzahnung in entsprechenden Eingabemasken der Zahnradmesssoftware. Die Eingabe der Nominalgeometrie stellt dabei keine wesentlichen Herausforderungen für den Bediener der Messsoftware dar. Die Eingabemasken sind intuitiv und praxisorientiert gestaltet.

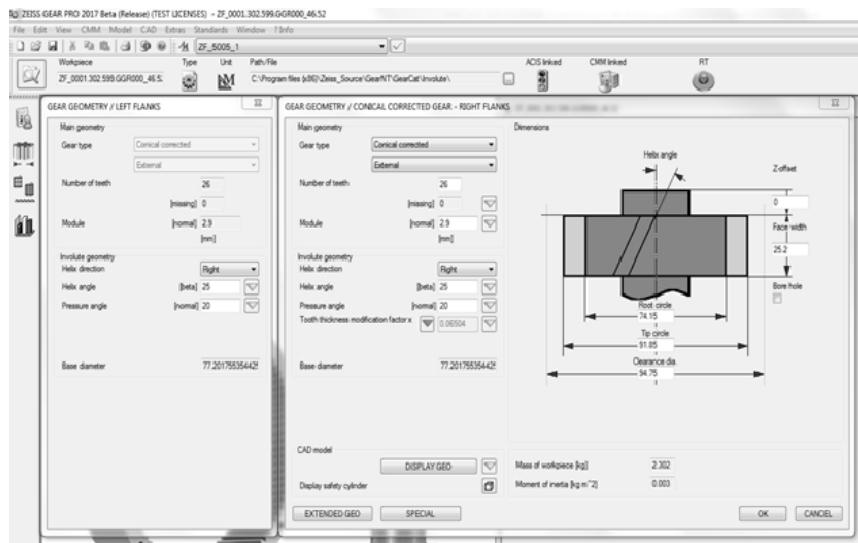
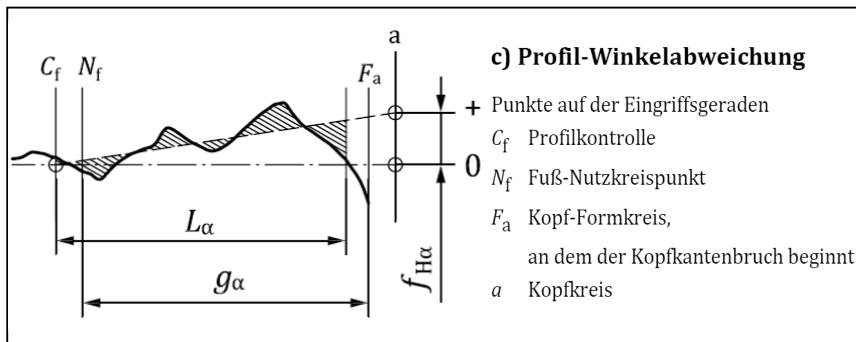


Bild 13: ZEISS GEAR PRO involute - Eingabemaske Nominalgeometrie Zylinderrad – ZF GDE-Beispieldatensatz „Prüfrad“ [5]

Eine durchaus größere Herausforderung stellt die Definition von Mess- und Auswertebereichen sowie ggf. spezifische Auswerteeinstellungen von Werksnormen dar. Um dabei ein konkretes Beispiel zu nennen, sei die Berechnung der Profil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  genannt. Es existieren dabei unterschiedliche Vorgehensweisen, wobei drei die gängige Praxis darstellen. Einerseits die Berechnung innerhalb der Auswertelänge des Profils  $L_\alpha$  selbst, andererseits die Extrapolation/Hochrechnung bis zum Kopf-Formkreisdurchmesser  $F_a$  sowie alternativ die Extrapolation/Hochrechnung bis zum theoretischen Kopfkreis-durchmesser  $a$ . Diese Varianten müssen entsprechend der gewünschten Vorgaben vom Bediener in der Software ausgewählt werden. Da diese Festlegung oft auf der Zeichnung des Werkstücks fehlt, erleichtert und vereinheitlicht das GDE-Format die Messprogramm-erstellung diesbezüglich.

Bild 14: Auswertung Profil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  [6]

Viele Werksvorschriften fordern neben der Auswertung von zahnradspezifischen Standardmerkmalen, wie z.B.  $F_a$ ,  $f_{\alpha}$  und  $f_{H\alpha}$ , auch die Bewertung von nicht-normativen Merkmalen, wie z.B. die Auswertung eines K-Diagramms (Toleranzband). Ein K-Diagramm beinhaltet typischerweise zwei Toleranzbandlinien, die durch mehrere Punkte entlang der Eingriffsstrecke für das Profil und/oder entlang der Zahnbreite für die Flankenlinie definiert sind.

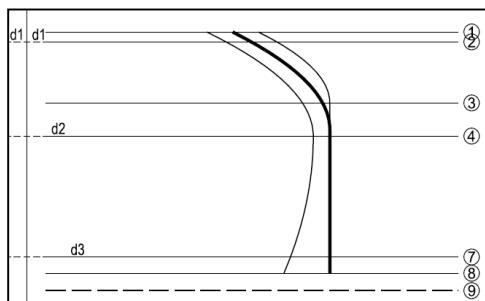


Bild 15: K-Diagramm Profil rechte Flanke - ZF GDE-Beispieldatensatz „Prüfrad“ [5]

Bei einem Werkstück, das innerhalb der Toleranzen gefertigt wurde, liegt demzufolge das gemessene Profil innerhalb der beiden Toleranzbandlinien des K-Diagramms. Die beiden Toleranzbandlinien im genannten Beispiel sind mit jeweils 37 Punkten durch die Konstruktion/Verzahnungsauslegung des Kunden definiert worden. Bild 16 zeigt beispielhaft die Eingabe eines K-Diagramms in die Zahnradmesssoftware ZEISS GEAR PRO involute.

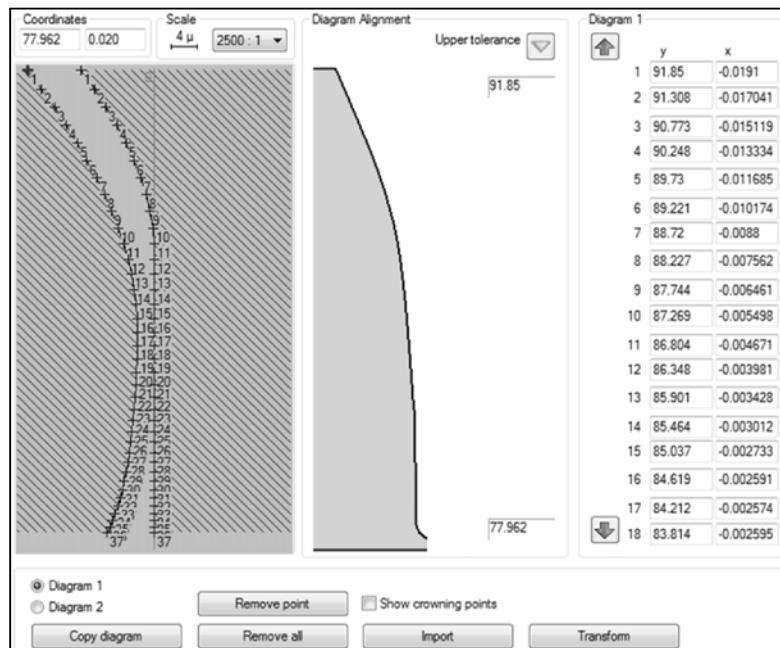


Bild 16: ZEISS GEAR PRO involute - K-Diagramm Eingabemaske für Profil

Die manuelle Eingabe der 2 x 37 Punkte für das K-Diagramm in eine Zahnradmesssoftware kann durch den Bedienereinfluss leicht zu Übertragungsfehlern führen. An dieser Stelle zeigt sich die Stärke des GDE-Formats, denn durch die digitale Übertragung, d.h. über den Export eines Datensatzes von der Konstruktion/Verzahnungsauslegung bis hin zum Import in die Messsoftware, ist die Fehlerquelle der manuellen Eingabe von Werten ausgeschlossen. Liegt bei einer Verzahnung die Definition von K-Diagrammen für Profil und Flankenlinie vor, verstärkt sich dieser positive Effekt des digitalen GDE-Datenformats entsprechend.

Die Herausforderung für Messgeräte- und Messsoftwarehersteller besteht nun darin, die komplexe Struktur des GDE-Formats in der Struktur der Software zu implementieren. Gelingt dieser Schritt, stellt die GDE-Schnittstelle eine überaus interessante, digitale Variante innerhalb des Messprozesses dar.

Als Vorteile des digitalen Dateiformats aus Sicht der Verzahnungsmesstechnik sind zu nennen:

- Effizienzsteigerung durch einfache Handhabung für den Messgerätebediener
- Vermeidung von Übertragungsfehlern bei der manuellen Eingabe von Mess- und Auswerteeinstellungen
- Reduktion des Bedienereinflusses, der Komplexität und der Programmierzeit bei der Messprogrammerstellung
- Bessere Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Messsystemen auf Grund eines einheitlichen Datenformates
- Einheitliches Format für die Weiterverarbeitung und Archivierung von Messergebnissen

## 5. GDE und Digitalisierung in der Verzahnungstechnik

Die weiteren Schritte zur Digitalisierung in der Verzahnungsfertigung sind die konsequente Nutzung der gesammelten Datenbank in allen Prozessen innerhalb und außerhalb der Fertigung, wie z.B. der Prüfstand des Getriebes. **Bild 17** zeigt das enorme Potenzial der Datenbank, das mit strukturierten Daten über die gesamte Produktionskette gefüllt wird.

In der Verzahnungstechnologie gibt es zum Beispiel die Daten aus der Weichbearbeitung, Wärmebehandlung, Hartbearbeitung, Qualitätssicherung sowie der Montage. GDE ermöglicht die bidirektionale Kommunikation zwischen der Datenbank und den Prozessen. Eine Anwendung der Datenbank wäre die Prozessüberwachung der Produktionskette, die Rückverfolgbarkeit der gefertigten Zahnräder im Getriebe als Produkt.

Ein weiterer Aspekt ist, dass die Kapazitätsauslastung in der Produktion einfacher übertragen werden kann. Die benötigten Daten zur Fertigung einer bestimmten Verzahnung sind bereits in der Datenbank gespeichert. Basierend auf GDE als gemeinsame Schnittstelle, kann der Zahnradlieferant verstehen, was und wie die Verzahnung hergestellt wird. Verwirrungen werden vermieden oder sogar eliminiert.

Das GDE-Datenformat wird sich kontinuierlich weiterentwickeln und der praktische Nutzen liegt auf der Hand. Aus der Sicht eines Messgerätebedieners ist das GDE-Format äußerst begrüßenswert, da es nun möglich ist, ohne Rückfragen an die Konstruktion/ Verzahnungsauslegung bzw. Rücksprache mit einem Zulieferer/Kunden, eine Messung nach den gewünschten Vorgaben/Auswertungen durchzuführen. Diskussionen auf Grund nicht vorhandener, schlecht lesbarer oder unvollständiger Zeichnungen können mit GDE ebenfalls vermieden werden.

Alles in allem eröffnet der Standard GDE im heutigen Informationszeitalter jede Menge Türen um Abläufe zu vereinfachen, Kommunikation zu erleichtern und Prozesse schneller und sicherer abschließen zu können. Daher erfreut es auch feststellen zu können, dass dieser Standard immer mehr Anwendung und Akzeptanz findet.

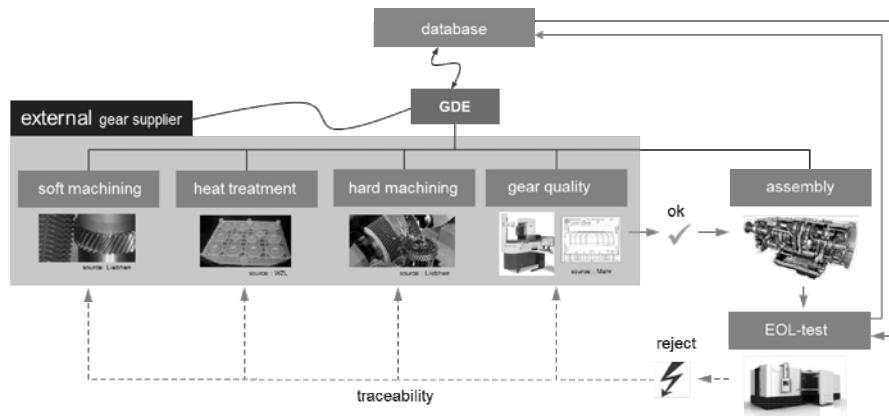


Bild 17: GDE und Digitalisierung in der Verzahnungstechnik

## Literatur

- [1] VDI/VDE-Richtlinie 2610: Austauschformat für Verzahnungsdaten – Gear Data Exchange Format (GDE)
- [2] G. Gravel, F. Härtig, A. Günther: Austauschformat für Verzahnungsdaten, VDI Fachtagung Verzahnungsmesstechnik in Mannheim, Juni 2002, VDI Berichte Nr. 1673, 2002
- [3] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Industrie 4.0 - Informationstechnologie für die vierte industrielle Revolution, Bonn, 2014
- [4] St.Laurent, S., Fitzgerald, M.: XML Pocket Reference. Sebastopol: O'Reilly Media 2005
- [5] GDE-Datensatz, Quelle: ZF Friedrichshafen AG
- [6] ISO 1328-1:2013-09

# Akustische Analyse und Bewertung von ZF-Automatikgetrieben in PKW-Anwendungen

## NVH analysis and evaluation of ZF-automatic transmissions for passenger cars

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

### Kurzfassung

Das Geräuschverhalten von Fahrzeugen ist ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung des Qualitätsniveaus. In einem qualitativ hochwertigen Personenkarfreiwagen wird auch ein akustisch unauffälliges Getriebe erwartet, d.h. das Getriebe soll im Fahrzeug subjektiv nicht störend hörbar sein. Getriebegeräusche haben sowohl Komfort- als auch Informationscharakter. Das Geräuschverhalten ermöglicht einen Einblick in den inneren mechanischen Zustand sowie das Zusammenwirken aller geräuschverursachenden Prozesse. Im Rahmen der Getriebediagnose sind so fundierte Aussagen über die Qualität, die Montage und die Fertigung seiner Komponenten möglich [3]. Die allgemeine Anforderung "im Fahrzeug subjektiv nicht störend hörbar" muss am End-of-Line-Prüfstand mit geeigneter Mess- und Prüftechnik sowie mit speziellen Auswerteverfahren (Merkmalsbildung, Klassifikation und Fehlerursache) sichergestellt werden. Anhand ausgesuchter Beispiele werden im Vortrag Hörproben vorgestellt, visualisiert und spezifische Merkmale gezeigt, die im Rahmen der Geräuschdiagnose verwendet werden.

### Abstract

The noise behavior of vehicles is an important criterion for the assessment of their quality level. A high-quality passenger car is also expected to have an acoustically unobtrusive transmission, i.e. the transmission should not be subjectively audible in the vehicle.

Transmission noise has both comfort and information characteristics. The noise behavior allows an insight into the internal mechanical state as well as the interaction of all noise-causing processes. Within the scope of gearbox diagnostics, it is thus possible to make statements about the quality, assembly and production of its components.

The general requirement "not to be noisy in the vehicle" must be implemented at the end-of-line test bench with suitable measuring and test technology and supplemented with special evaluation procedures (feature formation, classification and root cause).

On the base of selected examples, transmission noises are presented, visualized and specific characteristics are shown which are used in the diagnosis.

## 1. Einleitung

Das Unternehmen ZF Friedrichshafen AG produziert am Standort Saarbrücken PKW-Stufen-Automatikgetriebe für namhafte Automobilhersteller. Die aktuelle Produktpalette umfasst 8-Gang-Getriebe der 1., 2. und 3. Generation für Heck- und Allradanwendungen ohne bzw. mit integrierter Hybridisierung (Bild 1). Die Produktvarianz innerhalb des 8HP-Getriebes ist aufgrund der Anforderungen an unterschiedliche OEMs, Fahrzeugmodelle und Anwendungen entsprechend groß.

Zur Sicherstellung der Qualität des Getriebes erfolgt eine 100%-Endprüfung. Am EOL-Prüfstand werden alle Getriebe einer Funktions- und Geräuschprüfung unterzogen. Zusätzlich werden hier die notwendigen Randbedingungen für den späteren Betrieb (elektrische Programmierung der Getriebemechatronik, Lebensdaueröl-Befüllung) eingestellt.

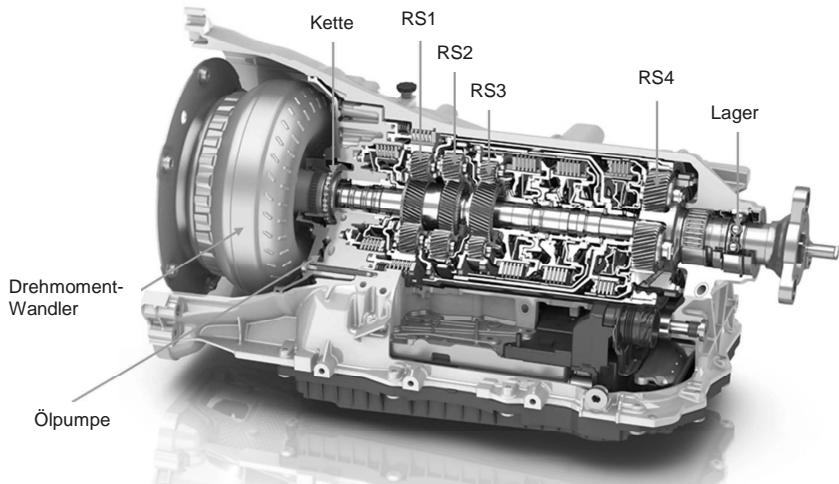


Bild 1: Schnittmodell eines ZF-8-Gang-Automatgetriebes 8HP50 für PKW-Anwendungen mit geräuschkritischen Komponenten [1]

## 2. Geräuschanforderungen

Die allgemeine Anforderung der Automobilhersteller lautet, dass das Getriebe keine störenden Geräusche im Fahrzeug (Fahrgastzelle) und im direkten Umfeld außerhalb des Fahrzeugs erzeugen darf [2]. Um diese subjektive Bewertung "messbar" zu machen, wurde eine

standardisierte Form geschaffen, die erstmalig in der Automobiltechnischen Zeitschrift (ATZ) veröffentlicht worden ist, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Bewertungssystem gemäß ATZ mit Bewertungsindices (BI)

Bewertungsindex (BI)	nicht annehmbar				Grenzfall	annehmbar					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Geräusch	untragbar	sehr störend	störend	schwach störend	nicht störend hörbar	mäßig hörbar	schwach hörbar	kaum hörbar	fast nicht hörbar	nicht hörbar	
Verhalten der Aggregate	Produktionsverwerfung				Grenzfall	gerade noch annehmbar	ausreichend	gut	sehr gut	ausgezeichnet	
	schlecht			Kundenbeschwerde							
erkannt durch	alle Kunden	Durchschnittskunden			kritische Kunden			ausgebildete Beobachter	nicht wahrnehmbar		
Folgerung	Maßnahme notwendig				Untersuchung notwendig		akzeptiert				

Danach muss das Getriebe mit BI 8 (Geräusch kaum hörbar, nur für ausgebildete Beobachter feststellbar) bestehen. Aus dieser allgemeinen Beschreibung der akustischen Eigenschaften des Getriebes resultieren Zielvereinbarungen und Lastenheftanforderungen zwischen Kunde und Getriebehersteller, die z.B. als Zielgrenzkurven (Targets) definiert werden. Die Zielgrenzkurven beziehen sich auf die Anregung und Weiterleitung von Geräuschen und Schwingungen der entsprechenden Getriebekomponenten. Zur Festlegung der Zielpegel werden geeignete Vorgängergetriebe als Basis verwendet.

Ein geräuschoptimal entwickeltes Getriebe muss vereinbarte Frequenzbereiche und Pegelhöhen, passende Übersetzungen und Gangsprünge, ausreichende Lebensdauer, etc. berücksichtigen. Dazu sind entsprechende Konzepte zu Radsätzen, Verzahnungsauslegung, Lagerungen, Pumpen, Anfahrelementen, hydraulischen und elektrischen Komponenten, Gehäusegestaltung, usw. notwendig.

Im Gegenzug wird vom Getriebehersteller ein geräuschoptimales Fahrzeug erwartet. Dabei sollen Aufhängungspunkte, Lagerungskonzepte, Luftschallisolierung, Wellen, Abgasanlage, Kabelführungen etc. berücksichtigt und letztlich das akustische Gesamtsystem gemeinsam optimiert werden.

### 3. Akustikmessungen

#### 3.1 Akustikmessungen auf dem Entwicklungs-Akustikprüfstand

In der Prototypenphase werden die ersten Geräuschuntersuchungen auf einem Entwicklungs-Akustikprüfstand durchgeführt. Hier erfolgt eine vergleichende Bewertung mit bauartgleichen Getrieben hinsichtlich Targets und Lastenheftvorgaben, Luftschallabstrahlung, Getriebeschwingungen (Körperschall) sowie Drehbeschleunigungen am Antrieb und Abtrieb.

Außerdem werden mögliche Betriebsbedingungen am EOL-Prüfstand berücksichtigt und ein erster Vorschlag für die EOL-Geräuschprüfung entwickelt. Dazu gehören Vorgaben für den Prüflauf (z.B. Drehmomente, Drehzahlbereiche), die Sensorik (z.B. Referenzpunkte für Körperschall und Luftschall) sowie die Analyse- und Auswerteverfahren [2].

### **3.2 Akustikmessungen im Prototypen-Fahrzeug (Entwicklung)**

Nachdem die Getriebe auf dem Entwicklungs-Akustikprüfstand geprüft worden sind, werden die ersten Geräuschmessungen im Fahrzeug durchgeführt. Diese dienen zur Überprüfung des Akustikverhaltens des Fahrzeugs (Innengeräusch, Übertragungsverhalten) als auch des Getriebes (Resonanzen, Verzahnungsqualität, Modulationen, etc.). Die subjektive Beurteilung gemäß ATZ erfolgt durch den Akustiker für alle Gänge in Zug- und Schubbetrieb bei unterschiedlichen Lastbereichen (Leicht-, Teil-, Volllast) und Getriebeöltemperaturen (kalt, warm, heiß) sowie erkannt kritischen Betriebspunkten.

Die objektive Messung kann sowohl auf der Straße als auch auf einem Akustik-Rollenprüfstand stattfinden. Auf dem Rollenprüfstand werden die Betriebs- und Prüfbedingungen auf der Straße simuliert. In beiden Fällen kommen Mikrofone im Fahrzeuginnenraum sowie Schwingungssensoren am Getriebe und an wichtigen Schnittstellen Getriebe-Fahrzeug zum Einsatz. Außerdem werden Drehzahlsignale verschiedener Wellen (z.B. Antrieb, Abtrieb) sowie CAN-Bus-Informationen aus Steuergeräten zur Verfügung gestellt.

Alle Sensordaten werden bei den beschriebenen Fahrmanövern aufgezeichnet, mit der subjektiven Bewertung abgeglichen und in nachgeschalteten Analysen (Zeitsignal-, Frequenz-, und Ordnungsanalysen, siehe Kapitel 4) ausgewertet.

### **3.3 Akustikmessungen in Serienfahrzeugen (Qualität)**

Die Serienmessung im Fahrzeug dient der Überprüfung der Serienqualität der laufenden Serie. Diese Messungen beschränken sich auf kritische Gänge, Lasten und Temperaturbereiche. Zur Vergleichbarkeit werden festgelegte Fahrzyklen wiederholt gefahren, subjektiv bewertet und objektiv gemessen. Die objektive Messung verwendet einen Luftschallsensor, ein oder mehrere Schwingungssensoren (Körperschall) am Getriebe, ein bis zwei Drehzahlensensoren sowie die CAN-Bus-Anbindung. Als Referenz wird immer der Körperschallmesspunkt am EOL-Prüfstand aufgezeichnet.

Für akustisch kritische Betriebszustände muss der Höreindruck des Fahrers möglichst gut objektiv mit dem Luftschallmikrofon erfasst werden; meist sind im Rahmen der Korrelation weitere Untersuchungen notwendig, um Problemstellungen auf dem EOL-Prüfstand abbilden zu können.

### 3.4 Akustikmessungen auf dem EOL-Prüfstand (Qualität)

#### 3.4.1 Anforderungen Entwicklung

Das Geräuschprüfprogramm ist das Ergebnis und die Umsetzung unterschiedlicher Anforderungen. Hierzu gehören die Anwendung von internen Richtlinien (z.B. „Die Entwicklung von geräuscharmen Getrieben“), die Anforderungen aus der akustischen Erprobung des Getriebes (siehe Abschnitt 3.1) und die Anforderungen aus der Fahrzeugapplikation (Bewertung der Geräuschkritizität und -sensitivität gemäß Abschnitt 3.2).

Daraus ergeben sich für die EOL-Prüfung die Anforderungen an die Geräuschmesstechnik (Art der Sensoren, Referenzpunkte, Zustellungen, Schwingrichtung), an die Betriebspunkte (Gang, Drehzahl, Drehmoment, Gradient) sowie an die Bildung von Prüfmerkmalen (Analyse, Berechnungsvorschrift, Merkmalsbildung).

#### 3.4.2 Anforderungen Produktion und Qualität

Unter Berücksichtigung der technischen Voraussetzungen (Prüfstandsplanung) und Taktzeitvorgaben entsteht das Funktions- und Geräuschprüfprogramm auf dem EOL-Prüfstand für die Serie. Die Geräuschprüfung ist Teil einer automatisierten Endprüfung auf dem EOL-Prüfstand im parallelen Prozess mit der Funktionsprüfung. Taktzeitoptimiert werden alle relevanten Bauteile und Komponenten funktional und akustisch geprüft.

Im 8-Gang-Automatikgetriebe sind 4 Planetenradsätze mit 22 Zahnrädern und 29 Wälzlagern mit den unterschiedlichsten Anregungs- und Modulationseffekten als Geräuschquellen in Betracht zu ziehen. Weitere mögliche Geräuschursachen können bei Wandler, Ölpumpe mit Kettentrieb, elektromechanischen Aktuatoren, in dynamischen Effekten wie Unwuchten oder Schwingungen sowie in prüfstandseigenen Phänomen zu suchen sein, siehe auch Bild 1. Akustische Beanstandungen können einerseits durch Fertigungsfehler hervorgerufen werden, d.h. durch Bauteile bzw. Baugruppen außerhalb Spezifikation. Aber auch die ungünstige Kombination von Bauelementen, die für sich innerhalb der vorgegebenen Toleranz liegen, ist möglich. Daneben spielen Montagefehler eine wichtige Rolle, wie z.B. falsch montierte, falsche oder fehlende Bauteile. Häufige Fehlerursachen sind:

- Fertigungsfehler von Verzahnungen (z.B. durch Fehler bei der Fertigung oder fehlende Bearbeitungsschritte, d.h. ungeschliffene oder verschliffene Teile)
- Beschädigungen von Zahnflanken (z.B. bei Planeten-, Sonnen- und Hohlrädern, Stirnradstufen, Pumpenantrieben)
- Beschädigungen von Wälzlagern (Defekte an Außen-, Innenring oder Wälzkörper)
- Achslagefehler, exzentrische Lagerungen, Unwuchten an Bauteilen/Komplettierungen
- Schmutzeinträge an sensiblen Lagerstellen

### 3.4.3 Die akustische EOL-Prüfung

Die akustische EOL-Prüfung muss die beschriebenen Anforderungen berücksichtigen und im Prüflauf umsetzen. Im Rahmen von aufwendigen Fehlersimulationen werden definierte Fehler im Getriebe eingebaut und möglichst eindeutige Merkmale zur Diagnose entwickelt.

Die Einbettung des EOL-Prüfstandes sowie der Akustikdaten in der Endprüflinie ist im Blockschaltbild (Bild 2) dargestellt.

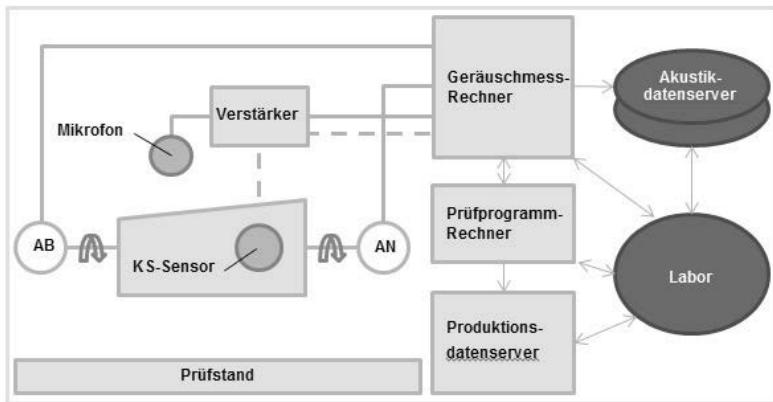


Bild 2: Blockschaltbild der EOL-Prüfung [2]

Die Prüfung selbst basiert auf der Erfassung des Geräusch- und Schwingungsverhaltens mittels eines taktilen Beschleunigungssensors (Körperschall) und eines Luftschallmikrofons im Getriebefeld, siehe Bild 3.

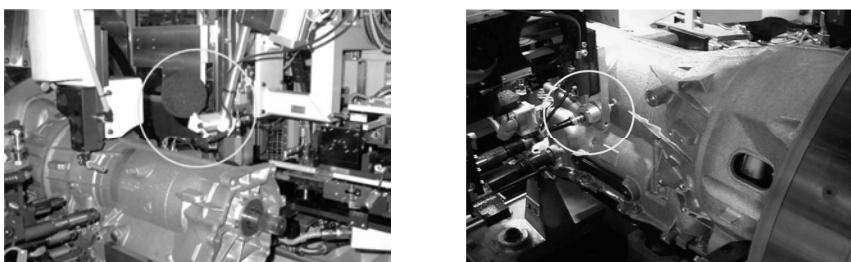


Bild 3: 8HP-Getriebe im EOL-Prüfstand mit Luftschallsensor im Nahfeld (links) und zugestelltem Körperschallsensor (rechts) [2]

Synchron werden Drehzahlen der An- und Abtriebswellen des Getriebes und ggf. weiterer Aktuatoren in Form von Pulssignalen aufgenommen. In einem nachgeschalteten Analyseprozess (Geräuschmessrechner) werden Zeitsignal-, Frequenz-, Ordnungs- und Cepstrum-

analysen durchgeführt und daraus komplexe Merkmale gebildet. Im Prüfprogrammrechner werden die Daten verarbeitet und das Getriebe automatisiert bewertet. Klassifikation und Zuordnung zur Fehlerursache werden zur Diagnose von Fehlern im Produktionsprozess eingesetzt. Für das 8-Gang-Automatgetriebe reicht die Prüfung in der Lastschaltphase bis zum 5. Gang im Zugbetrieb (Gänge 1-2-4-5) und Schubbetrieb (Gänge 5-4-2) aus, die Vorgaben von Entwicklung, Produktion und Qualität umzusetzen, Bild 4. Die Zielsetzungen dabei sind Zuverlässigkeit und Sicherstellung der Laufruhe. Auffällige Getriebe werden ausgesondert, befundet und abschließend repariert.

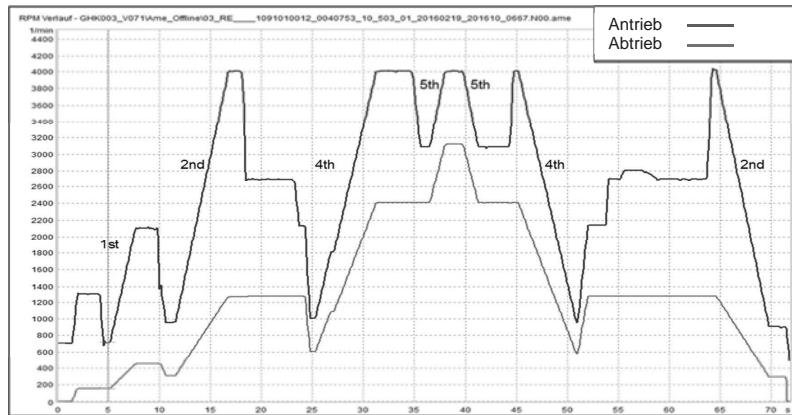


Bild 4: Beispiel eines Getriebe-Prüflaufs für ein 8HP-Automatgetriebe (Lastschaltphase)

#### 4. Analyse und Auswertung

Die Grundlage für die Akustikauswertung sind genügend genau gewonnene Zeitdaten der Sensor- und Drehzahlsignale. Damit sind vielfältige Analysen im Zeit- und Frequenzbereich möglich, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Übersicht von Analyseverfahren und Anwendungsfällen (Auszug)

Analyseverfahren	Merkmale	Fehlerbild
Zeitsignal	Spitzenwert, Effektivwert, statistische Größen Synchron gemittelte Zeitsignale Ein Hüllkurve über Zeitsignale	grobe Beschädigungen stochastische Geräusche
Frequenzspektrum	Dominanz von Einzelkomponenten Statistisch auffällige Störkomponenten Unbekannte Frequenzkomponenten	Resonanzeffekte allgemeine Beschädigungen Montagefehler
Ordnungsspektrum	Ordnungspegel Zahneingriffe/Komponenten Statistisch auffällige Störkomponenten Bestimmung der Mechanik des Prüfstandes	Fehler an Verzahnungen (Geometrie, Oberfläche, ...) Fehler an Bauteilen
Hüllkurvenspektrum	Hüllkurvenpegel von Verzahnungskomponenten Hüllkurvenpegel von Wälzlagern	Modulationen (Rattergeräusche) Beschädigungen an Wälzlagern
Ordnungscepstrum	Periodizitäten im Spektrum	Beschädigungen an Zahnrädern oder Lagern Modulationen

#### 4.1 Zeitsignalanalyse

Aus Zeitdaten der Luft- und Körperschallsignale lassen sich einfach statistische Kenngrößen (z.B. Spitzens- oder Effektivwert, Varianz) berechnen. Sie kommen im Falle von groben Beschädigungen oder transienten/stochastischen Geräuschen zur Anwendung [8].

#### 4.2 Frequenzanalyse

Die Fourier-Transformation bildet die Basis für die meisten Analysen [4]. Dabei werden die Signale in ihre spektralen Komponenten zerlegt, also in Sinus- und Kosinusschwingungen bestimmter Frequenz und Amplitude, siehe Beispiele in Bild 5.

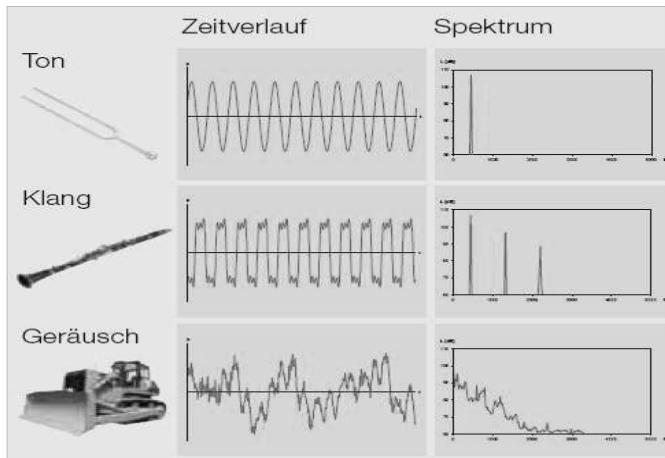


Bild 5: Beispiele von Schallsignalen mit Zeitverlauf und Frequenzspektrum

Die FFT (Fast-Fourier-Transformation) beschreibt einen effizienten, mathematischen Algorithmus, die Fourieranalyse auf digitalisierte Daten anzuwenden [5]. Erfolgt die Digitalisierung zeitäquidistant (d.h. Signalproben werden in gleichen Zeitabschnitten entnommen), erhält man die bekannte Frequenzanalyse. Im Frequenzspektrogramm, auch Campbell-Diagramm genannt, werden die Amplituden der Spektralkomponenten über der Frequenz (x-Achse) und über der Zeit (y-Achse) aufgetragen. Wie bei einer Landkarte lassen sich Muster erkennen, die auf drehzahlunabhängige (Resonanzen) oder drehzahlabhängige Geräusche hindeuten, siehe Bild 7. Wird das Spektrogramm über bestimmte Zeitabschnitte gemittelt, z.B. Bereiche mit konstantem Gang, wird hieraus ein Frequenzspektrum. Aktuell werden bei der EOL-Prüfung Frequenzspektren für alle Gänge sowie Frequenzspektrogramme für die Lastschaltphase gemäß Bild 4 berechnet.

### 4.3 Ordnungsanalyse

Neben der zeitäquidistanten Digitalisierung ist es möglich, die Daten drehwinkelsynchron zu verarbeiten, z.B. mittels eines Drehgebers an einer Welle. Es entsteht eine drehwinkelsynchrone Frequenzanalyse, die Ordnungsanalyse [7]. Die Ordnungsanalyse wird bei der EOL-Prüfung derzeit für 3 Bezugswellen (Antrieb, Abtrieb, Turbine) berechnet. Die Signale aus Luft- und Körperschall werden synchron zu den Getriebewellen erfasst und in ihre spektralen Komponenten zerlegt. Im Campbell-Diagramm werden Amplituden über der Ordnung (x-Achse) und über der Drehzahl der Bezugswelle (y-Achse) aufgetragen, siehe Bild 6.

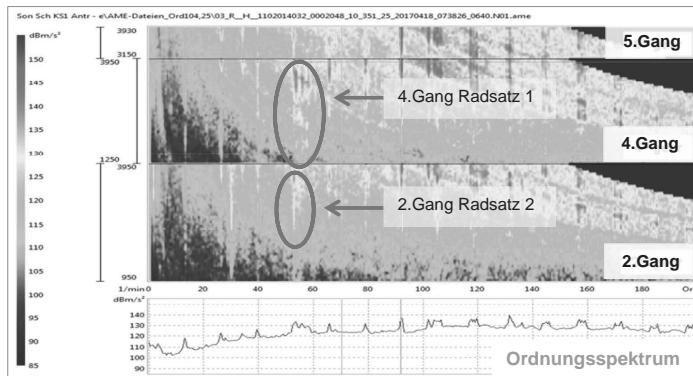


Bild 6: Ordnungs-Spektrogramm für ein 8HP-Getriebe (Schub Körperschall, Gänge 5-4-2)

Die Ordnungen ergeben sich als Quotient aus der Frequenz des Geräuschsignals und der Drehfrequenz (Anzahl der Umdrehungen je Sekunde) der verwendeten Bezugswelle. Der Zusammenhang zwischen Frequenz- und Ordnungsanalyse ist in Bild 7 ersichtlich.

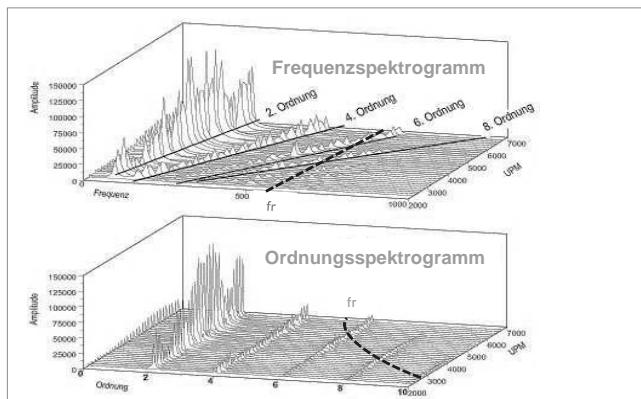


Bild 7: Zusammenhang zwischen Frequenz- und Ordnungsanalyse [9]

Drehzahlsynchrone Geräusche, wie sie z.B. von drehenden und kämmenden Zahnrädern entstehen, lassen sich im Frequenzraum als Ursprungsgeraden und im Ordnungsbereich als Parallelen zur y-Achse beschreiben.

Resonanzen  $f_r$ , also drehzahlunabhängige Anteile mit konstanter Frequenz, stellen im Frequenzbereich Parallelen zur y-Achse dar und genügen im Ordnungsdiagramm einer  $1/x$ -Funktion (Hyperbel).

Aufgrund des bekannten Getriebeaufbaus (Kinematik, Zähnezahlen der Komponenten, Lagerdaten) lassen sich gangspezifisch die Ordnungen der relevanten Zahneingriffe und Vielfache/Harmonische der Planeten, Stirnradstufen, Pumpe etc. berechnen und im Ordnungsspektrum visualisieren. Außerdem kann man unbekannte Geräuscheffekte, sog. Geisterordnungen, im Ordnungsspektrum gut erkennen, Bild 8.

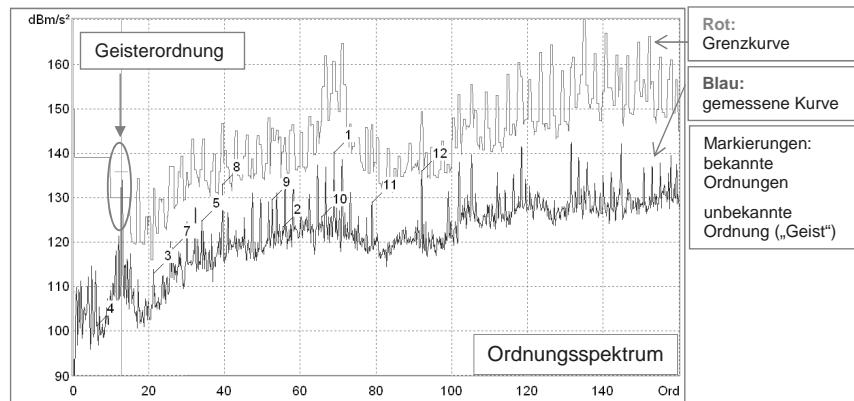


Bild 8: Ordnungsspektrum mit Grenzkurve und markierten Ordnungen [2]

Zudem kann man über vergleichende Messung mit Referenzgetrieben den Zustand des Prüfstands (An- und Abtriebsstrang, Güte der Ausrichtung, Sensorik) akustisch bewerten.

#### 4.4 Cepstrumanalyse

Bei der Cepstrumanalyse wird das Frequenzspektrum quasi einer erneuten "Frequenzanalyse" unterworfen, gerade so, als ob es sich um eine Zeitfunktion handeln würde [4]. Diese Operation führt zur Bildung des Frequenzcepstrums und bei Anwendung auf Ordnungen zu einem Ordnungscepstrum.

Das Cepstrum dient dazu, spezielle Eigenschaften des Systems, z.B. Beschädigungen und versteckte Periodizitäten bei Planetenradsätzen, Stirnradstufen oder Wälzlagern, besser zu erkennen und einer automatisierten Diagnose zugänglich zu machen. Gerade im Fall von

Beschädigungen von Zahnrädern oder Wälzkörpern, sind im normalen Ordnungsspektrum periodische Seitenbandlinien im konstanten Abstand mit relativ geringer Amplitude zu sehen. Im Ordnungscepstrum wird diese Eigenschaft als deutliche Pegelspitze dargestellt, die mittels Schwellwertklassifikator oder Grenzkurve einfach ausgefiltert werden kann, Bild 9.

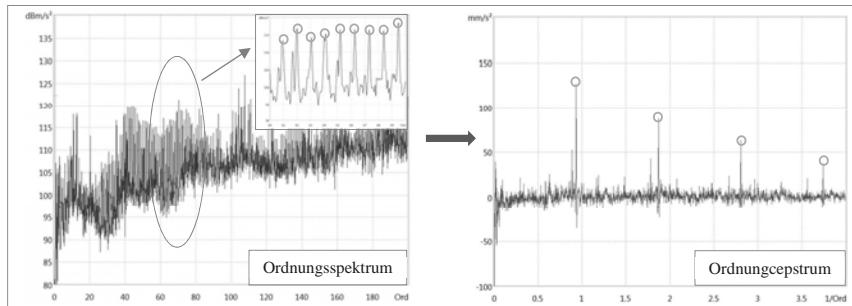


Bild 9: Ordnungsspektrum mit Seitenbändern (links) und zugehöriges Cepstrum (rechts)

#### 4.5 Hüllkurvenanalyse

Das Verfahren der Hüllkurvenanalyse wird bei Modulationen, Klopf- und Rasselgeräuschen eingesetzt, bei denen Ordnungs- und Cepstrumanalyse weniger wirksam sind.

Aus dem Rohsignal wird über Gleichrichtung und Filterung das sog. "Analytische Signal" berechnet und nach FFT-Bildung das Hüllkurven-Ordnungsspektrum generiert [6]. Aufgrund der rechenzeitintensiven Bildung und der fehlerspezifischen Parametrierung wird es nur in ausgewählten Fällen verwendet.

### 5. Merkmalsbildung und Klassifikation

#### 5.1 Grenzkurven bei Spektren

Bei allen vorgestellten Analysen ist es möglich, das berechnete Spektrum gegen obere und untere Grenzkurven (Toleranzen) zu vergleichen und bei Über- oder Unterschreitung ein Fehlerprotokoll zu erzeugen. Zusätzlich ist es möglich, bei bekannten Fehlern einen Fehlercode mit Fehlerursache zu vergeben. Unbekannte Fehler können mit halbautomatisierten Werkzeugen und Datenbanken gelernt und dann als bekannt zugeordnet werden [8].

Aufgrund der Möglichkeit der Nicht-Eindeutigkeit des Fehlerbildes zur Fehlerursache werden kombinatorische Hilfsmittel und Zusammenhänge genutzt.

Die Bestimmung der Grenzkurven ist spezifisch für die jeweilige Analyse. Generell werden ca. 500 Datensätze aus IO-Getriebeprüfungen verwendet und statistisch ausgewertet; nach Vorsortierung, Mittelwertbildung und Anwendung einer internen Berechnungsvorschrift werden für ausgewählte Spektren Grenzkurven erzeugt, siehe Beispiel Bild 8.

## 5.2 Grenzwerte bei Einzahlwerten

Als Kenngrößen für die Geräuschprüfung von Automatikgetrieben werden hauptsächlich Einzahlwerte verwendet. Die Einzahlwerte sind Pegel, die sich aus der Mittelung von Spektraldaten über vorgegebene Trigger (Zeit-, Drehzahl- oder Ereignisbereiche) und der Reduktion auf bestimmte Spektrallinien ergeben. Als Basis können beliebige Frequenz-, Ordnungsspektren oder Ordnungscepstren dienen.

Die Parametrierung der Einzelpegel ist vielfältig möglich [8]. Sie reicht von Einzellinien (bei schmalbandiger Anregung) über Linien mit Bandbreite (bei schmalbandiger, aber driftender Anregung) zu Bereichspegeln (zur Abdeckung eines vorgegebenen Spektralbereichs) und Summenpegeln (zur Bewertung von breitbandigeren Prozess-Schwankungen).

Harmonik-Pegel beschreiben eine Summe von Ordnungs- oder Frequenzlinien aus gleichem Abstand (z.B. Grundwelle und Vielfache zur Bewertung von Pumpengeräuschen) oder aus einem sog. Linienkamm, wie er bei Lagergeräuschen vorkommt.

Spezielle userdefined-Pegel sind ebenfalls konfigurierbar. Beim 8-Gang-Automatgetriebe bilden einige Planetenradsätze Modulationen aus, d.h. der eigentliche Zahneingriff wird von der gleichzeitigen Bewegung des Planetenträgers und seiner Planeten überlagert, Bild 10.

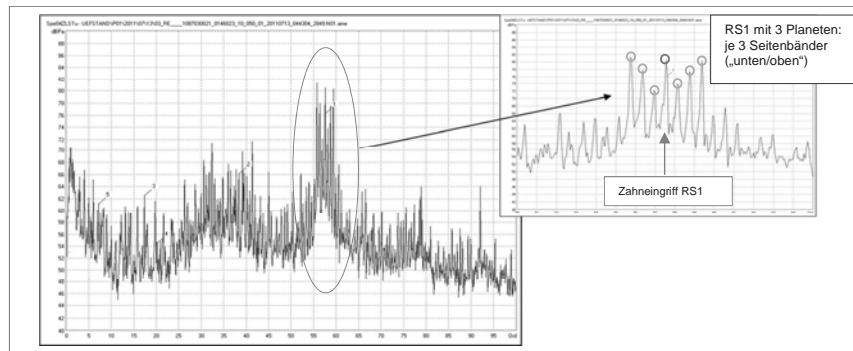


Bild 10: Ordnungsspektrum mit Seitenbandlinien beim Planetenradsatz (userdefined Pegel)

Es entstehen in einem festen Abstand Seitenbandlinien, deren Anzahl u.a. von der Anzahl der Planeten abhängig ist. Aufgrund von Überschneidungen mit benachbarten Geräuschenquellen dürfen nur festgelegte Seitenbandlinien berücksichtigt werden, um die Energie des Radsatzes möglichst vollständig und fehlerfrei zu erfassen (userdefined Pegeltyp).

Die Einzahlwerte werden gegen Grenzwerte verglichen, die in Klassen unterteilt werden: Die Vorgaben der Entwicklung und die Kundenanforderungen bilden die Klasse 1; hierbei handelt es sich meist um Grenzwerte aus einer Komfortprüfung. Interne Vorgaben durch die Verzahnungsqualität und Vorgaben durch die Fehlersimulation repräsentieren die Klasse 2;

statistische Vorgaben nach Berechnungsvorschrift stellen die Klasse 3 als zahlenmäßig größte Gruppe dar. Bei der turnusmäßigen Überrollung der Grenzwerte bzw. im Rahmen einer systemgestützten Grenzwertpflege müssen diese Klassen berücksichtigt werden.

Einzahlwerte sind statistisch schnell auszuwerten und darzustellen. Die wichtigsten Darstellungen sind Streudiagramme, Histogramme oder Box-Plots.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die EOL-Prüf- und Auswertetechnik wurde in den letzten Jahren permanent weiterentwickelt und ist geeignet, auffällige Bauteile und Montagefehler bei den 8-Gang-Stufenautomatgetrieben auszuprüfen. Die akustische Qualitätskontrolle von Automatikgetrieben ist daher ein wesentliches Element zur Sicherstellung der für den Kunden relevanten Qualitätsanforderungen. Mit der zunehmenden Elektrifizierung der Fahrzeuge und der Automatikgetriebe entstehen neue Komponenten, neue Antriebszustände und Fehlerbilder, letztlich neue Qualitätsforderungen. Elektromechanische Aktuatoren, elektrische Maschinen und die notwendige Leistungselektronik spielen hierbei eine wichtige Rolle. Eine enge Zusammenarbeit mit Entwicklung, Verzahnungs- und Getriebequalität ist erforderlich, damit die akustische Prüfung auch künftig Schritt halten und die Qualität weiterhin zuverlässig gewährleistet werden kann.

## 7. Literatur

- [1] ZF Friedrichshafen AG: Funktionsbeschreibung 8-Gang-Automatgetriebe, Saarbrücken 2011
- [2] ZF Friedrichshafen AG, Abt. PQTT1: Geräuschmesstechnik, Saarbrücken 2013
- [3] Lieske, D.: Objektive Geräuschprüfung zur Qualitätssicherung von Automatikgetrieben Dissertationsschrift Technische Universität Dresden, 1999
- [4] Günther, B. C., Hansen, K. H., Veit, I.: Technische Akustik – Ausgewählte Kapitel, 6. Auflage, expert-Verlag 2000
- [5] Brigham, E. O.: FFT – Schnelle Fourier-Transformation, 5. Auflage, Oldenbourg 1992
- [6] Wirth R.: Maschinendiagnose an Industriegetrieben Teil II: Signalidentifikation in der Praxis; Antriebstechnik 37, 1998, Nr. 11
- [7] Groppe, H.: Ordnungsanalyse – Methoden der drehwinkelsynchronen Signalverarbeitung, Version 1.0, Saab Medav Technologie GmbH, 1996
- [8] Saab Medav Technologie GmbH: Flowlet-Dokumentation ANOVIS.2, 2014
- [9] Kuitzsch, W.: Signatur- und Ordnungsanalyse, GenRad Structural Test Products, 1992



# Neue Entwicklungen zur Welligkeitsanalyse akustisch auffälliger Verzahnungen

Prof. Dr.-Ing. **G. Gravel, M.Sc. T. Kahnbley**,  
Institut für Produktionstechnik, HAW Hamburg

## Kurzfassung

Im Pkw-Innenraum ist ein geringer Geräuschpegel ein wichtiges Qualitätskriterium, das besonders bei hochwertigen Fahrzeugen und in der E-Traktion im Focus liegt. Sind Zahnräder im Getriebe für Geräusche verantwortlich, so findet man oft Welligkeiten auf den Zahnoberflächen. Das Vorgehen bei der Analyse dieser Welligkeitsstrukturen wird in diesem Beitrag an einem praktischen Beispiel aufgezeigt. Für die berechneten Welligkeiten ist nicht nur die Ordnung und die Amplitude interessant, sondern auch der Schrägungswinkel, unter dem sie sich auf der Oberfläche abbilden. Dieser Schrägungswinkel kann Hinweise auf die Ursache und die Wirkung der Welligkeit geben und das Verständnis der Zusammenhänge erleichtern. Da in Zahnradmessgeräten standardmäßig Tiefpassfilter eingesetzt werden, um Geräteeinflüsse zu eliminieren, stellt sich die Frage, inwieweit diese Filter auch die Ergebnisse einer anschließenden Welligkeitsauswertung verändern. Dieser Einfluss kann durch eine neue Softwarefunktion klar und einfach überprüfbar dargestellt werden. Die Welligkeitsanalyse kann problemlos auch auf die Messdaten von evolventischen Schnecken angewendet werden. Ein Beispiel zeigt, wie Geräuschordnungen an einem Hilfsantrieb im Pkw-Innenraum erzeugt werden durch eine geometrische Welligkeit auf der Oberfläche der eingebauten Schnecke.

## 1. Einleitung

Geringe Geräusche im Innenraum sind ein wichtiges und zunehmend stärker beachtetes Qualitätskriterium für Pkw. Bei immer leiser werdenden Motoren und insbesondere dem weiteren Einsatz der E-Antriebe geraten Geräusche verursacht durch Getriebe zunehmend in den Focus [1], [2]. Dies gilt nicht nur für das Getriebe im Hauptantriebsstrang, sondern auch für Hilfsantriebe wie z.B. in der Sitzverstellung. Die konsequente Leichtbauoptimierung zur Kraftstoffeinsparung reduziert häufig die Dämpfungseigenschaften des Systems und fördert die Weiterleitung von Schwingungen und Körperschall. Daher ist es für den Getriebehersteller wichtig, die Geräuschentstehung und –weiterleitung als Ursache-Wirkungs-Kette zu kontrollieren.

Bild 1 illustriert eine typische Vorgehensweise bei Geräuschproblemen an Verzahnungen. Ausgehend von einem lauten Getriebe, das entweder subjektiv oder durch die Messung von Luft- oder Körperschall detektiert wurde, erfolgt eine Geräuschprüfung, bei der die verschiedenen Gänge unter Last hochgefahren werden und eine kontinuierliche Geräuschmessung vorgenommen wird. Die Ergebnisse sind farbcodiert in Wasserfall-Diagrammen dargestellt und erlauben dem Akustiker Rückschlüsse auf geräuscherzeugende Komponenten [1]. In der Automobilindustrie ist diese Geräuschprüfung als End-Of-Line (EOL)-Prüfung üblich.

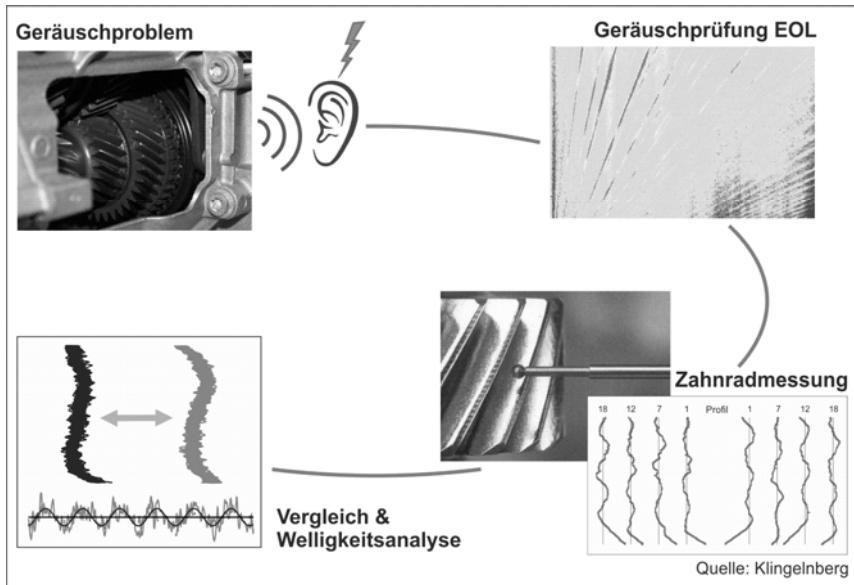


Bild 1: Analyse von Geräuschproblemen.

Wird ein Zahnrad als Fehlerquelle vermutet, so erfolgt häufig ein Austausch und eine neuere Geräuschmessung. Um die Geräuschursache an dem lauten Zahnrad oder Zahnradpaar zu ermitteln, werden laute und leise Bauteile auf hochgenauen Zahnradmessgeräten vermessen. Die Ergebnisse müssen anschließend analysiert werden, um Korrekturmaßnahmen im Fertigungsprozess einzuleiten. Diese Analyse soll im Weiteren erläutert werden.

## 2. Grafische Beurteilung von Abweichungskurven

Üblicherweise erfolgt zunächst der Vergleich der Kennwerte der Verzahnungsmessgrößen, wie sie in den Normen und Richtlinien definiert sind [3], [4]. Lassen sich hier keine eindeutigen Differenzen erkennen, so erfolgt oft ein grafischer Vergleich der Abweichungskurven. Früher wurde dies durch das Übereinanderlegen der Messblätter erreicht, wie Bild 2 links oben zeigt. Heute können die Messkurven viel einfacher und besser in digitaler Weise gemeinsam dargestellt und verglichen werden.

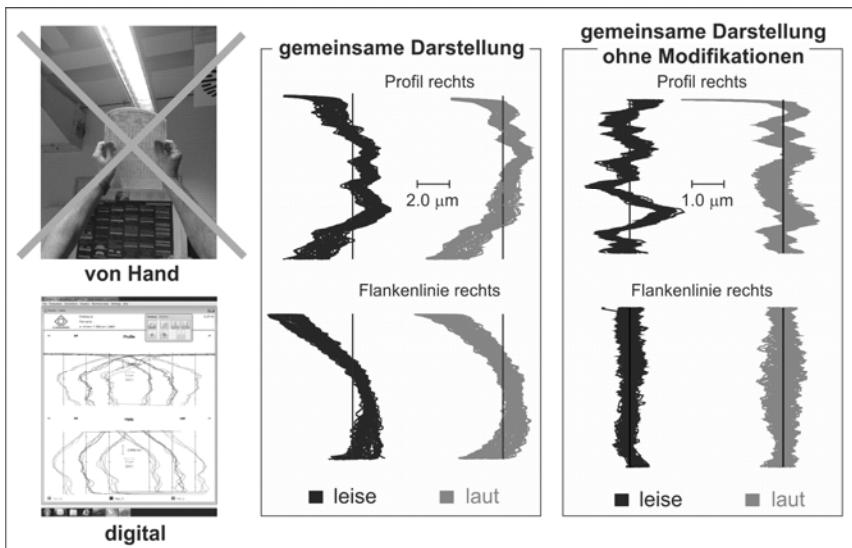


Bild 2: Vergleich von Messungen

Die übereinandergelegten Abweichungskurven aller Zähne einer lauten und einer leisen geschliffenen Verzahnung für das Evolventenprofil und die Flankenlinie der rechten Flanken sind in Bild 2 mitte dargestellt. Im Profil sind Differenzen zwischen laut und leise erkennbar, allerdings erlauben der Sollwert der Balligkeit und die Schwankung der Ist-Modifikationen der Flanke in Form von Balligkeit und Winkelabweichung keine weitere Vergrößerung der Kurven. Werden diese Ist-Modifikationen jeder Kurve eliminiert, so wird im rechten Teil des Bildes bei erhöhter Vergrößerung deutlich, dass das leise Bauteil eine große systematische Formabweichung im Profil aufweist, die Kurven der lauten Verzahnung dagegen in Profil und Flankenlinie etwas stärker streuen. Die laute Verzahnung mit einer Zähnezahl von 47 weist auf dem EOL-Prüfstand eine deutliche Geräuschauffälligkeit in der Geisterordnung 57 auf.

Ein Zusammenhang zu diesem realen Geräuschverhalten der Verzahnungen ist in den Abweichungskurven nicht erkennbar.

### 3. Welligkeitsanalyse

Da Geräusche durch Schwingungen erzeugt werden und die laute Verzahnung eindeutig als Geräuschursache identifiziert wurde, ist es naheliegend, nach periodischen Oberflächenstrukturen zu suchen, die beim Abwälzen solche Schwingungen erzeugen können. Es ist nun nicht sinnvoll, für jeden Zahn ein eigenes Spektrum von Welligkeiten zu berechnen. Günstig ist es, alle gemessenen Kurven zu einer Kurve über dem Umfang zu verdichten und daraus dann das Spektrum einer umlaufenden Welligkeit zu berechnen [5]. Bild 3 verdeutlicht diese Vorgehensweise. Für jeden Messpunkt auf der Verzahnung lässt sich ein Drehwinkel bestimmen, wie er beim Abrollen mit einem Gegenrad wirksam ist. Dieser berechnet sich aus dem Wälzwinkel, dem Teilungswinkel und der Steigung in Achsrichtung.

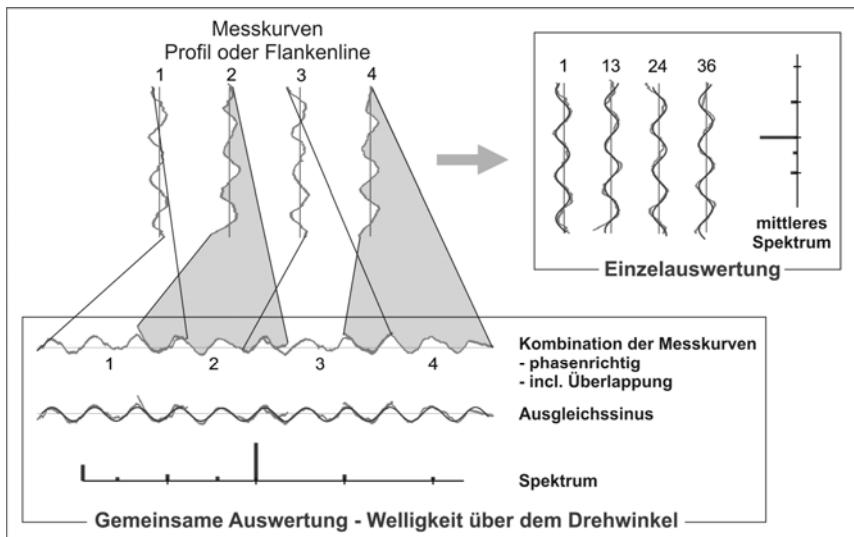


Bild 3: Methoden der Welligkeitsauswertung

Werden nun alle Abweichungen über dem Drehwinkel aufgetragen so ergibt sich eine geschlossene Kurve aller Zähne auf einer Umdrehung. Im Bild 3 links ist zu erkennen, dass sich die Kurven entsprechend der Überdeckung und dem Auswertebereich mehr oder weniger überlappen können. Zur Beschreibung von periodischen Signalen haben sich Ausgleichs-Sinusfunktionen bewährt [5]. Gegenüber einer in der Signalverarbeitung häufig be-

nutzten FFT haben sie den Vorteil, auch offene Kurven und solche mit Überlappungen und Lücken exakt zu beschreiben. Aus den gemessenen Kurven über dem Drehwinkel werden nun Schritt für Schritt die Sinusfunktionen mit der größten Amplitude berechnet und zu einem Spektrum verdichtet. Die Ordnungen dieses Spektrums können direkt mit den auf das Zahnräder bezogenen Geräuschordnungen verglichen werden.

Werden nicht alle Zähne der Verzahnung gemessen, sondern die üblichen 4 gleichmäßig verteilten Zähne, so weist die Abweichungskurve über dem Umfang erhebliche Lücken auf. Ein daraus berechnetes Spektrum reagiert stark auf Formabweichungen und weist z.B. die Ordnung 4 und Vielfache davon auf. Dieses Verfahren ist bei den 4 Zähnen einer Standardmessung nicht brauchbar. Eine gute Lösung für die Welligkeitsberechnung an wenigen Zähnen stellt Bild 3 rechts dar. Für jede Einzelkurve wird ein Spektrum berechnet und diese Spektren werden zu einem mittleren Spektrum verdichtet und auf den Umfang hochgerechnet. Diese Art der Auswertung kann durch die Einzelauswertung allerdings nicht die Phasenlage der Abweichungskurven zueinander berücksichtigen. Weist das reale Bauteil eine Welligkeit auf, die z.B. von Zahn zu Zahn genau gegenphasig verläuft, wird in der gemeinsamen Auswertung keine wirksame Ordnung berechnet, da die Kurven sich auslöschen. In der Einzelauswertung erscheint dagegen die Ordnung der Einzelkurven.

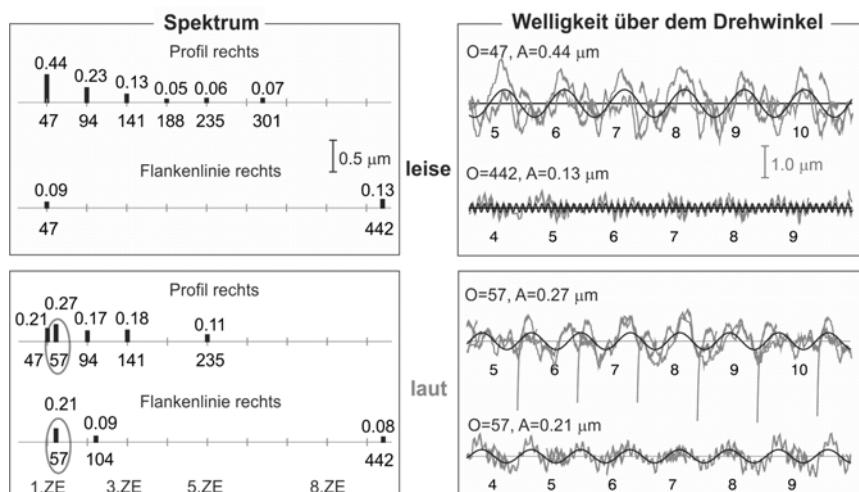


Bild 4: Welligkeitsanalyse an 2 geschliffenen Zahnrädern

In Bild 4 sind links die Ergebnisse der Welligkeitsauswertung der Verzahnung aus Bild 2 als Spektren dargestellt. Die laute Verzahnung weist sowohl im Profil als auch in der Flankenlinie die gesuchte Geräuschordnung 57 als dominante Welligkeit auf. Rechts im Bild ist ein Ausschnitt aus dem Kurvenverlauf dargestellt, der durch die Welligkeit gut approximiert wird. Die leise Verzahnung weist im Profil eine hohe Amplitude in der Zahneingriffsordnung und ihrer Vielfachen auf. Verursacht ist diese durch die schon in Bild 2 deutlich erkennbare systematische Formabweichung im Profil. Die Zahneingriffsordnungen und Vielfache finden sich auch in geringerer Amplitude an der lauten Verzahnung. Unter Umständen können auch diese Ordnungen geräuschverursachend sein. Schließlich weist die Flankenlinie eine hochfrequente Ordnung 442 auf, die in der Regel nicht geräuschrelevant ist und die direkt oder indirekt vom Axialvorschub erzeugt wird.

In der Praxis zeigt sich, dass es oft eine gute Korrelation zwischen der Geräuschmessung und der Welligkeitsanalyse gibt. Das vorgestellte Beispiel macht aber auch deutlich, dass ein offensichtlich schlechteres und periodisches Profil am leisen Rad nicht geräuschverursachend sein muss, sondern hier eine im grafischen Vergleich in Bild 2 kaum erkennbare Welligkeit am lauten Rad geräuschverursachend ist. Ein Rückschluss ausgehend von Welligkeitsordnung und Amplitude auf ein Geräuschverhalten im Getriebe ist daher meist nur zielführend, wenn die kritischen Geräuschordnungen für das Getriebe bekannt sind.

#### 4. Die Richtung der Welligkeit

Für die vertiefte Untersuchung von Welligkeiten auf Zahnflanken im Hinblick auf Ursache und Wirkung ist die Messung von vielen Schnitten auf einzelnen Zahnflanken hilfreich. In Form einer Topografiedarstellung können die Abweichungen 3-dimensional oder farbcodiert über Zahnbreite und Wälzweg aufgetragen werden, wie Bild 5 links zeigt. Der Schrägungswinkel  $\beta_w$ , unter dem die Welligkeit über der Zahnflanke verläuft, berechnet sich für jede Ordnung aus der Phasenverschiebung der Welligkeiten zueinander in den einzelnen Schnitten. Jede Ordnung kann einen anderen Schrägungswinkel aufweisen. In der farbcodierten Darstellung ist deutlich zu erkennen, dass sowohl ein rechtssteigender als auch ein linkssteigender Schrägungswinkel berechnet werden können. Grund dafür ist die Tatsache, dass sich die Phasenlage der Welligkeit eines Schnittes zum mittleren Schnitt nach einer Wellenlänge wiederholt. Je nach Wellenlänge und Anzahl der Schnitte können damit aus den Messdaten verschiedene Schrägungswinkel berechnet werden.

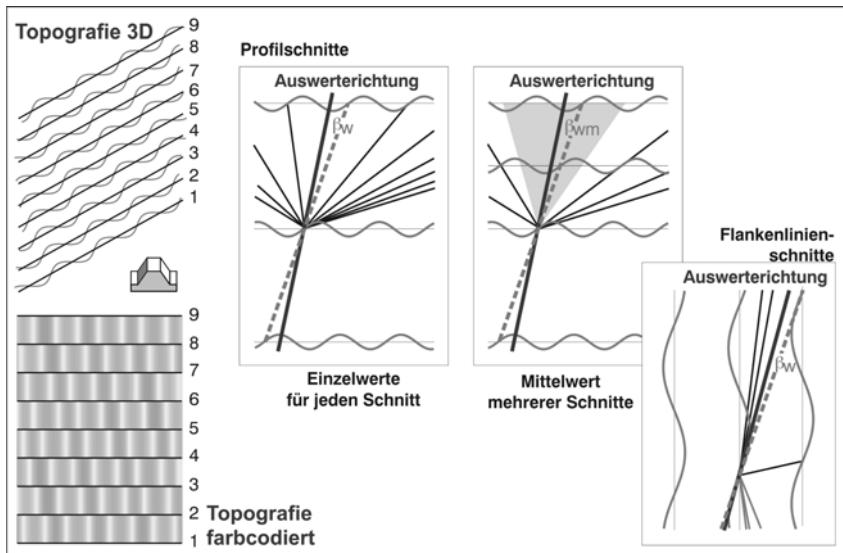


Bild 5: Bestimmung des Schräglungswinkels der Welligkeit

In der Mitte des Bildes 5 ist diese Situation für 3 Profilschnitte dargestellt. Ein einzelner Schnitt kann bezogen auf den mittleren Schnitt sehr viele Schräglungswinkel besitzen. Es ist also nötig, eine Auswerterichtung festzulegen. Der Schräglungswinkel  $\beta_w$  ist dann der nächstliegende zu dieser Auswerterichtung. Bei mehreren Schnitten reduziert sich die Anzahl der möglichen Schräglungswinkel, da nun alle Phasenlagen passen müssen. Insbesondere bei kleinen Wellenlängen oder großen Schräglungswinkel gibt es aber immer noch mehrere Lösungen. Diese Betrachtungen gelten auch für Schnitte der Flankenlinie. Hier gibt es allerdings viele Lösungen bei kleinen Schräglungswinkel. Zusammenfassend ist es empfehlenswert in einer ersten Untersuchung für kleine Schräglungswinkel 30-50 Profilschnitte zu messen, für große Schräglungswinkel 30-50 Flankenlinienschnitte. Bei bekannten Zusammenhängen kann dann die Schnittzahl reduziert werden.

In Bild 6 ist links oben die Topografie einer Welligkeit dargestellt, die unter dem Grundschräglungswinkel  $\beta_b$  geneigt ist. Während des Abwälzens mit dem Gegenrad wandert die um  $\beta_b$  geneigte Kontaktlinie über die Zahnflanke. Es kann angenommen werden, dass Welligkeiten, die einen Schräglungswinkel ähnlich  $\beta_b$  aufweisen, besonders geräuschanregend sind, da die Kontaktlinie sich beim Abwälzen dann durch Berg und Tal bewegt [2]. In den Formeln darunter sind die Wellenlängen und die sich ergebenden Ordnungen auf dem Umfang mit dem

Schrägungswinkel  $\beta_w$  in Beziehung gesetzt. Nach Umrechnung ergibt sich, dass der Schrägungswinkel  $\beta_w$  dem Grundschrägungswinkel dann entspricht, wenn die Ordnung in Profil und Flankenlinie gleich ist. Für alle anderen Schrägungswinkel der Welligkeit sind die Ordnungen von Profil und Flankenlinie nicht gleich. Ist in diesem Fall der Schrägungswinkel z.B. aus der Messung von Profilschnitten bekannt, so kann die zugehörige oder komplementäre Ordnung der Flankenlinie berechnet werden.

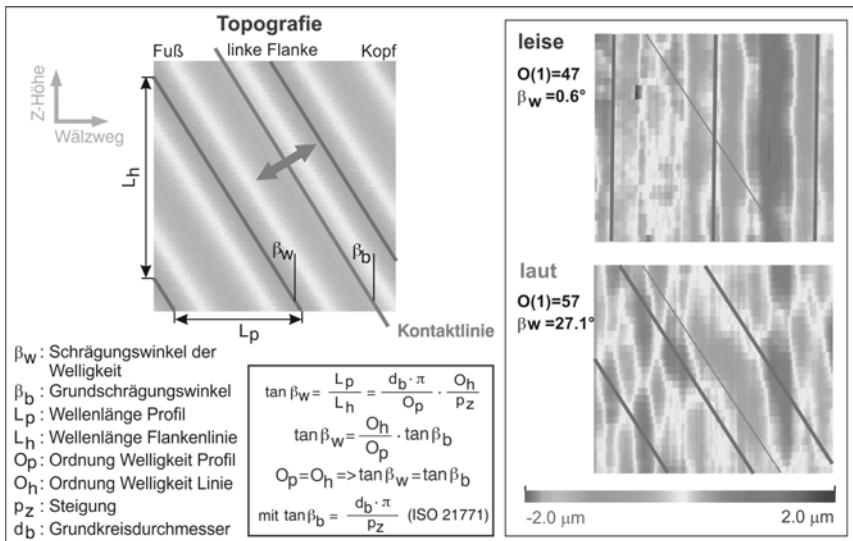


Bild 6: Bezug zwischen Ordnung und Welligkeit, Topografie der geschliffenen Räder

Rechts im Bild 6 sind die Topografien der betrachteten leisen und lauten Verzahnung gegenübergestellt. Die Ordnung 57 der lauten Verzahnung weist einen Schrägungswinkel  $\beta_w$  auf, der dem Grundschrägungswinkel entspricht. Die dominante Ordnung 47 der leisen Verzahnung weist einen Schrägungswinkel von annähernd  $0^\circ$  auf. Diese Ordnung taucht daher im Spektrum der Flankenlinie nur schwach als Folge der Flankenlinienballigkeit auf. Die Vielfachen der Zahneingriffsordnungen zeigen sich bei beiden Rädern in Form von Welligkeiten mit kürzeren Wellenlängen unter einem Schrägungswinkel  $\beta_w=0^\circ$ . Die zur Berechnung und Darstellung verwendete Software ‚Welligkeitsanalyse‘ erlaubt es hier, per Klick von Welligkeit zu Welligkeit zu navigieren.

## 5. Filterung und Welligkeit

In den neueren Normen und Richtlinien [4], [6] werden bei der Messung Tiefpassfilter nach Gauß vorgegeben, die zur Eliminierung von hochfrequenten Schwingungen des Messvorganges dienen. Standardmäßig wird eine Grenzwellenlänge in der Flankenlinie von einem dreißigstel der Zahnbreite und im Profil von einem dreißigstel der Eingriffsstrecke  $L_{AE}$  empfohlen. Hier stellt sich natürlich die Frage, inwieweit die Amplituden von Welligkeiten auf der Zahnflanke durch den Filter beeinflusst werden. In Bild 7 ist die Übertragungsfunktion des Standard-Gauß-Filters [7] dargestellt. Daraus ergibt sich, dass z.B. bei 8.1 Wellen auf der Zahnbreite  $b$  oder auf der Länge  $L_{AE}$  der Filter eine Dämpfung der Amplitude von 5% bewirkt. Da die Umrechnung auf die Ordnung am Umfang immer aufwändig und fehlerträchtig ist, erlaubt es die Auswertesoftware im Spektrum die Ordnungen einzublenden, bei denen die Amplitude um einen bestimmten Prozentsatz gedämpft wird (Bild 7 unten). Der Anwender kann damit schnell den Einfluss des Filters auf eine gesuchte Ordnung abschätzen und gegebenenfalls die Filtereinstellungen am Messgerät anpassen. Bei Stirnrädern ist eine Anpassung nur selten nötig.

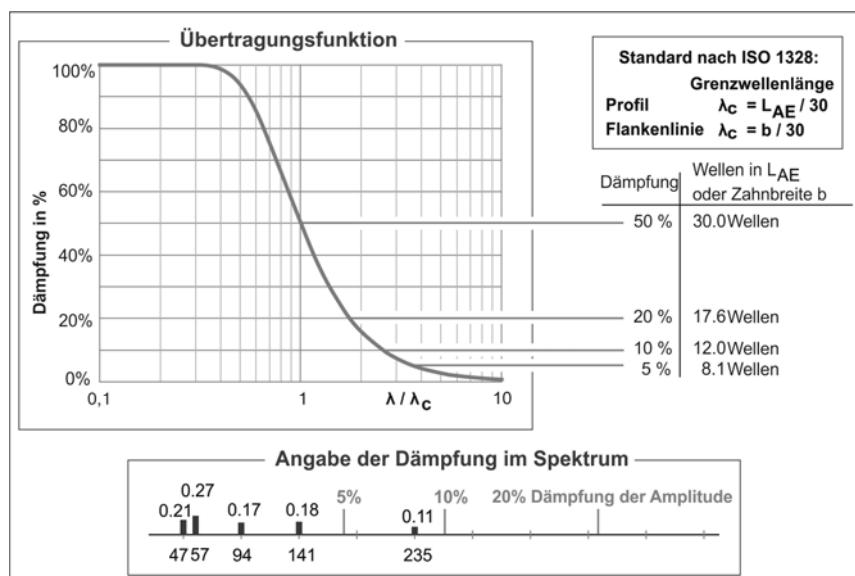


Bild 7: Welligkeitsauswertung bei Nutzung des Standard-Gauß-Filters

## 6. Welligkeitsauswertung an Schnecken

Die Messung von Schnecken auf Zahnradmessgeräten ist seit langem Stand der Technik. ZI-Schnecken werden durch Evolventenflächen definiert und entsprechen geometrisch einem Stirnrad mit sehr großem Schrägungswinkel. Auch die oben beschriebene Welligkeitsauswertung kann mit den gemessenen Abweichungen und den Daten der Evolvente in gleicher Weise wie beim Stirnrad durchgeführt werden. Aufgrund der hohen Überdeckung und der damit großen wirksamen Länge ist bei Schnecken oft die Flankenlinie interessanter als das Profil. In Bild 8 sind die Auswirkung eines simulierten Exzenter und Taumels auf die Flankenlinie der rechten Seite aufgezeigt. Ein Exzenter erzeugt bei einer Überdeckung von 2.9 auf der Zahnbreite 2.9 Wellen. In der Welligkeitsauswertung entspricht dies einer Ordnung 1 pro Umdrehung. Ein Taumel erzeugt eine Form der Welligkeit, die in Achsrichtung leicht trichterförmig verläuft. Im Spektrum entstehen dadurch Seitenbänder zur Ordnung 1. Für die korrekte Beschreibung dieses Spektrums ist es notwendig, auch nicht ganzzahlige Ordnungen zuzulassen.

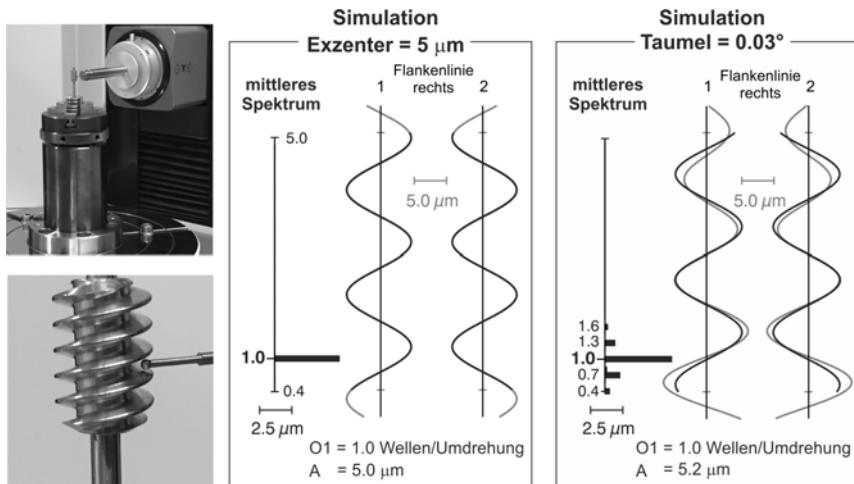


Bild 8: Welligkeitsauswertung an Schnecken, Effekte von Exzenter und Taumel

In Bild 9 sind die Flankenlinienabweichungen und das daraus berechnete mittlere Spektrum beider Flanken einer leisen und einer geräuschauffälligen Schnecke dargestellt. Die Schnecken werden im Pkw-Innenraum eingesetzt und müssen daher besondere akustische Anforderungen erfüllen. Bei beiden Schnecken ist zu erkennen, wie das Summensignal der berechneten Ordnungen sehr gut den tatsächlichen Kurvenverlauf annähert. Die leise Schnecke weist eine größere Formabweichung und damit Ordnungen höherer Amplitude im niedrigen Frequenzbereich auf.

frequenten Bereich auf. Die laute Schnecke zeigt eine ausgeprägte Ordnung 17.2, die auch im Geräuschprüfstand erscheint. Rechts im Bild ist die Form dieser Ordnung dargestellt, nachdem alle anderen Ordnungen eliminiert wurden. Um diese hochfrequenten Ordnungen erfassen zu können, ist es einmal möglich, unter Verwendung des Standardfilters die gemessene Zahnbreite deutlich zu verringern. Damit wird aber nicht mehr der ganze Bereich erfasst, der mit dem Schneckenrad in Kontakt steht. Die bessere Alternative ist eine deutliche Verkleinerung der Grenzwellenlänge des Filters bei der Messung. Dazu ist allerdings ein sehr präzises Messgerät und die Beherrschung der Umgebungseinflüsse notwendig, um Schwingungen des Messgerätes zu vermeiden.

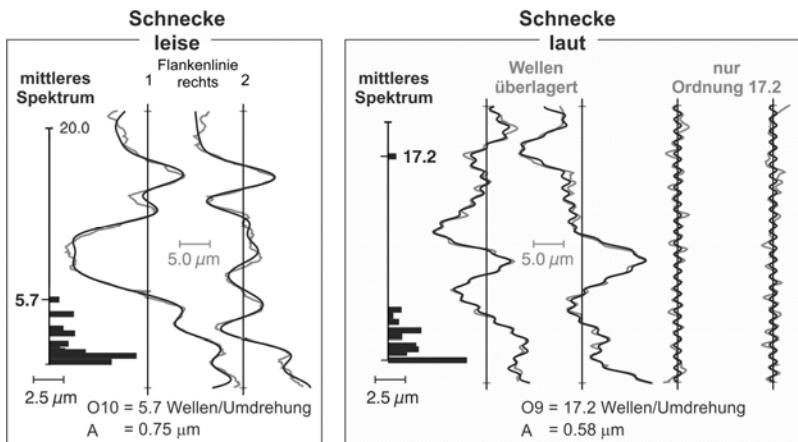


Bild 9: Welligkeitsauswertung an Schnecken, Vergleich von laut und leise

## 7. Zusammenfassung

Es sind heute Werkzeuge verfügbar, die es erlauben, akustisch auffällige Verzahnungen im Hinblick auf Welligkeiten zu beurteilen. Manchmal liefert schon der grafische Vergleich der Abweichungen erste Hinweise. Die Messung aller Zähne und die Verknüpfung der Daten zu einem Signal über den Umfang der Verzahnung erlaubt eine exakte und reproduzierbare Bestimmung der Ordnung einer Welligkeit auf der Zahnradoberfläche. Die berechneten Ordnungen korrelieren gut mit den Geräuschordnungen auf dem End-of-Line-Prüfstand. Die Bestimmung des Schrägungswinkels der Welligkeit liefert zusätzliche Informationen über die funktionale Wirksamkeit der Welligkeit und auch über ihre Entstehungsursachen. Es wurde eine Beziehung abgeleitet, die bei Kenntnis dieses Schrägungswinkels eine Zuordnung der

Ordnungen in Profil und Flankenlinie erlaubt. Insbesondere bei sehr hohen Ordnungen ist die Wirkung des Tiefpassfilters bei der Messung zu beachten. Durch Markierung der auftretenden Dämpfung im berechneten Spektrum wird diese Filterwirkung transparent. Die Verfahren der Welligkeitsauswertung sind problemlos auf evolventische Schnecken übertragbar und erlauben auch hier die Beurteilung akustisch auffälliger Verzahnungen. Zusammenfassend unterstützen die vorgestellten Verfahren die oft aufwändige und langwierige Suche nach den Ursachen von Geräuschen.

## 8. Literatur

- [1] B. Rank; Welligkeiten auf Zahnflanken – Ursachen und akustische Auswirkungen, 5. Tagung Verzahnungsmesstechnik, VDI Bericht 2236, 2014.
- [2] F. Descher, W. Winter; Welligkeitsmessung an Stirnradverzahnungen in der Serienfertigung, 5. Tagung Verzahnungsmesstechnik, VDI Bericht 2236, 2014.
- [3] DIN 21772; Zahnräder – Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnungen – Definition der Abweichungen, Beuth Verlag, 2012.
- [4] VDI/VDE 2612; Messen und Prüfen von Verzahnungen – Blatt1: Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil - Entwurf, VDI/VDE, 2016.
- [5] G. Gravel, J. Seewig; Welligkeitsanalyse von Verzahnungsmessungen, 3. Tagung Verzahnungsmesstechnik, VDI Bericht 2053, 2008.
- [6] ISO 1328-1; Cylindrical gears – Part1: Definition and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth, Beuth Verlag, 2013.
- [7] DIN EN ISO 16610-21; Filterung – Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter, Beuth Verlag, 2013.

## Rauheitsmessung an Verzahnungen

### Optimiertes System für die vollautomatische Messung

Dipl.-Ing. **Georg Mies**, Klingelnberg, Hückeswagen

#### Kurzfassung

Die Bedeutung der Oberflächeneigenschaften an Verzahnungen ist in den letzten 10 Jahren deutlich gestiegen. Durch glattere Verzahnungs-Oberflächen können die Eigenschaften von Getrieben vorteilhaft beeinflusst werden. Demzufolge ist für eine sichere Beurteilung der Oberfläche die Messung der Oberflächenrauheit erforderlich. Mit den bekannten Rauheitsmesseinrichtungen sind stichprobenartige Messungen durchführbar. Das Handling, die Messzeit und Einrichtezeit sind aber nicht optimal. Darüber hinaus sind hierzu speziell geschultes Personal sowie geeignete Umgebungsbedingungen erforderlich. Durch die Entwicklung eines Rauheitsmesssystems, das auf einer Verzahnungsmessmaschine adaptiert ist, gibt es eine Lösung, die Serienmessungen in Kombination mit der Messung der Verzahnungsgeometrie ermöglicht. Die einfache Bedienung und die Robustheit sind dabei vergleichbar zur Verzahnungsmessung. Somit ist auch die Rauheitsmessung an Verzahnungen direkt in der Produktion durchführbar.



## 1. Bedeutung der Oberflächenrauheit

Für die einwandfreie Funktion von Verzahnungsbauteilen im Getriebe, spielt nicht nur die Bauteil-Geometrie, sondern auch die Oberflächenbeschaffenheit der Funktionsflächen eine entscheidende Rolle. Die genaue Auslegung und Überprüfung der Geometrie ist seit Jahrzehnten Stand der Technik und wurde zunehmend weiterentwickelt. Dagegen sind die Erkenntnisse bezüglich des Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit noch relativ jung. Noch vor wenigen Jahren stand dieser Aspekt in der Serienfertigung von Standardgetrieben nicht so sehr im Fokus. Durch neue oder weiterentwickelte Technologien in der Bearbeitung können mittlerweile sehr glatte Oberflächen auch in der Großserie wirtschaftlich erzeugt werden. Moderne Fertigungsverfahren wie Gleitschleifen und Polierschleifen haben hierzu einen wesentlichen Beitrag geleistet.

Möglichst definierte Oberflächeneigenschaften sind eine entscheidende Variable und oftmals auch die Grundvoraussetzung für wertvolle Verbesserungen in der Antriebstechnik. Speziell in der Fahrzeugindustrie und im Besonderen in der Elektromobilität ist die Oberflächenbeschaffenheit der Verzahnungsbauteile essenziell: In Verbindung mit Elektroantrieben werden sehr hohe Drehzahlen übertragen, was zu neuen Herausforderungen bei der Getriebe- und Verzahnungsauslegung führt. Aber auch bei konventionellen Antrieben mit Verbrennungsmotor können glattere Verzahnungen entscheidend zur Verbesserung der Laufeigenschaften beitragen. Zur Reduzierung von Geräuschen, Reibung und Verlustleistung werden deshalb mittlerweile Oberflächen mit  $R_z$  unter  $0,5 \mu\text{m}$  in der Serie eingesetzt.



Bild 1: Höfler Polierschleifen mit einer kombinierten Schleif-Polierschnecke

## 2. Systemvergleich

Infolgedessen hat auch die Bedeutung der Rauheitsmessung von Verzahnungen stark zugenommen. Die Messung der Rauheit an den Zahnflanken ist mit den bekannten Rauheitsmesssystemen zwar möglich, für Serienmessungen eignen sich diese Systeme aber nur bedingt. Die Handhabung ist aufwändig und erfordert geschultes Fachpersonal. Die Messung muss quasi von Hand durchgeführt werden. Um mit den Vorschubsystemen überhaupt solche Messungen durchzuführen, erfordert es einiges an Geschick. Die Ausrichtung des Bauteils spielt dabei eine große Rolle. Besonders anspruchsvoll ist die Einrichteprozедur bei Bezugsebenentastsystemen. Durch die evolventische Krümmung der Zahnkontur wird mit der Diamantnadel ein Bogen gefahren. Da die Vorschubeinheit eine lineare Bewegung durchführt, muss die Ausrichtung so gewählt werden, dass diese Krümmung im Messbereich des Tasters bleibt. Ein entsprechend großer Messbereich ist erforderlich. Die Diamantnadel verändert während der Bewegung außerdem die Ausrichtung zur Oberfläche.

Bei der Verwendung einer Vorschubeinheit mit Gleitkufentaster kann der Messbereich der Tastnadel deutlich kleiner und die Auflösung entsprechende höher sein. Die empfindliche Tastnadel ist durch die Gleitkufe geschützt, das System dadurch auch sehr robust. Dies bringt Vorteile beim Handling, da man beim Einrichten der Tastnadel in der Zahnlücke Beschädigungen der Nadel vermeidet.

In Bild 2 und 3 sind die beiden Systeme mit Linearvorschub in Verbindung mit der Verzahnungsmessung dargestellt.



Bild 2: Bezugsebenentastsystem

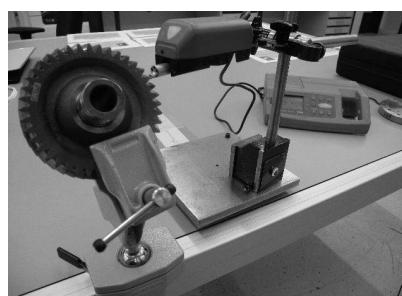


Bild 3: Kufentastsystem

Für eine Adaptierung eines Rauheitsmesssystems auf einem Verzahnungsmessgerät bietet sich die Verwendung eines Gleitkufentastsystems an. Automatische Messabläufe, die in Verbindung mit dem Verzahnungsmessgerät realisierbar sind, erfordern ein robustes System, bei dem die empfindliche Tastnadel nicht beschädigt werden kann. Ein bekannter Nachteil der Gleitkufensysteme ist die Signalverfälschung durch z.B. Erhebungen auf der Oberfläche. Dabei hebt sich die Kufe gegenüber der Nadel zu einem unterschiedlichen Zeitpunkt während der Messwertaufnahme. Im Messsignal wird eine Vertiefung detektiert, die aber real nicht vorhanden ist.

Typischerweise sind auf den geschliffenen Zahnoberflächen solche Erhebungen nicht zu erwarten. Dies ist eine positive Eigenschaft, die den Einsatz eines Gleitkufensystems für die Verzahnungsmessung begünstigt.

### 3. Für Verzahnungen optimierte Lösung

In Bild 4 und 5 ist das System von Klingelnberg gezeigt. Es handelt sich um die Adaptierung eines speziell für die Anwendung an Verzahnungsbauteilen entwickelten Rauheitstasters auf einer Verzahnungsmessmaschine der P-Baureihe. Hierbei wird der Rauheitstaster an Stelle des normalen Taststiftes an dem Wechselteller des 3D-Tastsystems adaptiert. Um in unterschiedlichen Richtungen antasten zu können, ist der Rauheitstaster mit einer integrierten Drecheinrichtung ausgestattet. Diese Kombination aus Rauheitstaster und Drecheinrichtung wurde so stark miniaturisiert, dass die oben beschriebene Adaptierung am Wechselteller überhaupt möglich ist.



Bild 4 und 5: Klingelnberg System:

In den sehr kompakten Klingelnberg Rauheitstastern ist neben der Sensorik auch eine präzise Schwenkeinrichtung integriert. So können die Rauheitstaster wie die taktilen Taststifte am Wechselteller betrieben und automatisch eingewechselt werden. Besonders komfortabel ist dabei der automatisierte Steckvorgang.

Das Rauheitstastsystem ist dabei für die Aufnahme der Rauheitskenngrößen speziell an Verzahnungen optimiert. Dadurch sind die Messabläufe analog zur Verzahnungsmessung nutzbar, sodass dabei optimale Antastbedingungen gewährleistet werden. Zwischen dem taktilen Taststift und dem Rauheitstaster ist ein automatischer Wechsel möglich, was eine vollautomatische Komplettvermessung – bestehend aus Verzahnungsmessung, Maß-, Form- und Lagemessung sowie der Rauheitsmessung – in einer Aufspannung möglich macht.

Durch die integrierte Lösung mit vollautomatischem Ablauf sind Serienmessungen auch von nicht geschultem Personal durchführbar. Dies erfordert ein besonders robustes System, das auch im produktionsnahen Umfeld einsetzbar ist. Diese Anforderung ist durch den Aufbau des Rauheitstasters mit der Gleitkufe gewährleistet, die Diamantnadel ist vor Beschädigung bei einer Kollision sehr wirksam geschützt. Darüber hinaus sorgt der Aufbau mit der Kufe für eine Differenzsignalauswertung, die sehr unempfindlich gegenüber Schwingungen ist.

Ein weiterer Vorteil entsteht dadurch, dass für die Messbewegung nicht nur eine Linearvorschubeinheit verwendet wird, sondern die Möglichkeiten der vierachsigen „Koordinatenmessmaschine mit Rotationsachse“ genutzt werden. Durch den Messablauf, analog zur geometrischen Messung der Verzahnung, wird trotz der evolventischen Krümmung der Zahnkontur über die gesamte Messstrecke eine Antastung der Diamantnadel in Normalenrichtung erreicht. Durch die wälzende Messbewegung wird die Krümmung vollständig ausgeglichen und somit quasi eine Linearisierung der Abtastung auf der Verzahnungsoberfläche erzeugt (siehe Abbildungen 6 und 7).

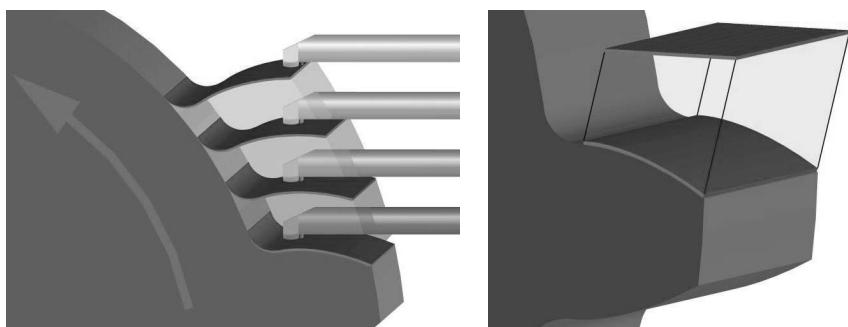
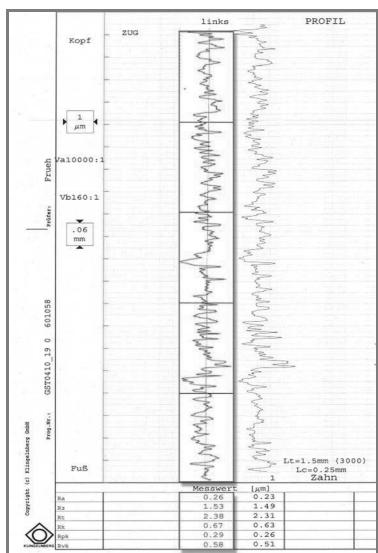


Abb. 6 und 7: Durch die optimierten Mess- und Antaststrategien des Gleitkufen-Tastsystems verhält sich die gekrümmte Oberfläche relativ zum Rauheitstaster wie eine ideale Ebene – hier dargestellt am Beispiel der Profilmessung an einer Evolventenverzahnung.

Aus der Perspektive des Rauheitstaster verhält sich die gekrümmte Oberfläche somit wie eine ideale Ebene. Die Diamantnadel erfasst nur die Oberflächenrauheit und kann dadurch einen sehr kleinen Messbereich mit entsprechend hoher Auflösung nutzen. Fehler bei der Filterung der langwelligen Krümmung werden dadurch ebenfalls vermieden. Über die Auslenkung des 3D-Tastsystems wird darüber hinaus die Auslenkung der Gleitkupe unabhängig von der Diamantnadel-Auslenkung erfasst.

Bei umfangreichen Vergleichsmessungen konnte bewiesen werden, dass bei der Verwendung des Gleitkufentastsystems durch die optimierte Adaptierung und die speziellen Messabläufe auf der Verzahnungsmessmaschine keine Nachteile bei der Messwerterfassung gegenüber Bezugsebenentastsystemen entstehen. Mittlerweile wird neben der klassischen Auswertung der Rauheitsmesskurve über Einzelmessstrecken zunehmend auch die Materialanteil-Auswertung an Verzahnungen genutzt. Dadurch können zusätzliche, für die Beurteilung der Oberflächeneigenschaften nützliche Kenngrößen ermittelt werden. Auch in diesem Zusammenhang gibt es keine Einschränkungen. In Bild 8 ist eine entsprechende Vergleichsmessung gezeigt.

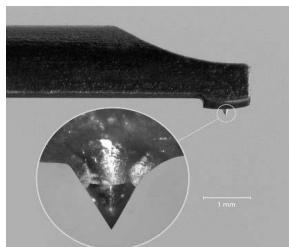


*Bild 8:*  
Diese an einer geschliffenen Verzahnung durchgeführte Vergleichsmessung zeigt die sehr gute Übereinstimmung zwischen der Messung mit einem Referenzmesssystem (rot) und der Klingelnberg Messung (schwarz). Dies gilt nicht nur für die Kenngrößen, sondern auch für den Kurvenverlauf der beiden Messkurven

ZUG		1
	Messwert [µm]	
R <sub>a</sub>	0.26	0.23
R <sub>z</sub>	1.53	1.49
R <sub>t</sub>	2.38	2.31
R <sub>x</sub>	0.67	0.63
R <sub>p</sub>	0.29	0.26
R <sub>pk</sub>	0.58	0.51
R <sub>vk</sub>		

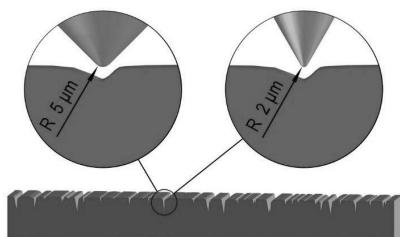
#### 4. Verzahnungen mit kleinen Modulen

In Verbindung mit sehr kleinen Zahnlücken und kurzen Messstrecken ist der oben gezeigte Rauheitstaster nicht mehr einsetzbar. Deshalb wurde mit einem speziellen Design der Gleitkufe und einer parallelen Anordnung der Diamantnadel ein weiterer Rauheitstaster entwickelt, der bei Verzahnungen ab Modul 0,9 mm eingesetzt werden kann. Trotz der extrem kleinen Bauform, die in Bild 9 erkennbar ist, wurde ein Verhältnis von 1:1000 zwischen Tastspitzenradius (2 µm) und Kufenradius (2 mm) erreicht. Darüber hinaus wurde der Abstand zwischen Kufe und Nadel weiter reduziert. Durch dieses sehr spezielle Design wird gewährleistet, dass ein größtmöglicher Anteil der bei kleinen Verzahnungen kurzen verfügbaren Messstrecke aufgenommen werden kann.



*Bild 9: Die Makroaufnahme des Rauheitstasters für Verzahnungen ab Modul 0,9 mm zeigt die Gleitkufe in Relation zur Diamantnadel. Trotz der extrem kleinen Abmessungen des Gesamtsystems wurde ein Verhältnis von 1:1000 zwischen Spitzenradius und Gleitkufen-Radius erreicht. Dieser Rauheitstaster ist grundsätzlich mit einer 2-µm/ 60°-Diamantnadel ausgestattet.*

Bei der Darstellung des Höhenprofils wird typischerweise eine starke Überhöhung in senkrechter Richtung zur Oberfläche genutzt. Dadurch wirken gerade mal 0,5–1,5 µm tiefe Riefen sehr eng und scheinen mit einer 90°-Diamantspitze gar nicht erfassbar. Wenn man die tatsächliche Relation durch eine starke Vergrößerung in Längs- und Höhenrichtung darstellt, sieht man wie die anscheinend engen Riefen im Vergleich zur Nadel tatsächlich aussehen. Dies ist in Bild 10 am Beispiel der engsten Riefe einer typischen Plateauartigen Oberfläche gezeigt.



*Bild 10: Die Vergrößerung mit gleichem Verstärkungsfaktor in allen Richtungen zeigt die Diamantspitze in Relation zur tiefsten Riefe. Durch die Verwendung der ebenfalls verfügbaren Diamantnadel mit 60° und 2 µm Spitzenradius lässt sich die Antastsituation in solchen Fällen verbessern*

## 5. Innenverzahnung

Die Messung von Innenverzahnungen stellt nochmal eine zusätzliche Herausforderung dar. Die Verwendung von Bezugsebenentastsystemen gestaltet sich hierbei noch komplizierter als bereits bei den Aussenverzahnungen.

Durch den sehr kompakten Rauheitstaster mit der integrierten Schwenkeinrichtung konnte ein Gesamtsystem entwickelt werden, das ebenfalls automatisiert einsetzbar ist. In Kombination mit dem Rauheitstaster für Verzahnungen ab Modul 0,9 mm sind somit auch die typischen Hohlräder von komplexen PKW-Automatikgetrieben messbar.

In den Bildern 11 und 12 ist der Aufbau des Systems für die Rauheitsmessung an Innenverzahnungen bzw. Hohlrädern gezeigt

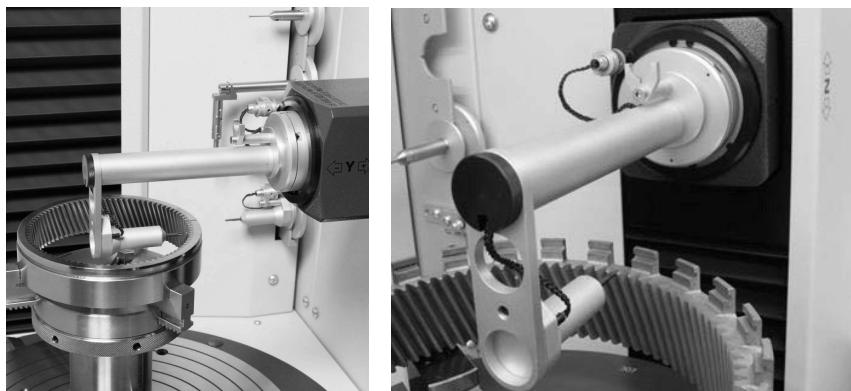
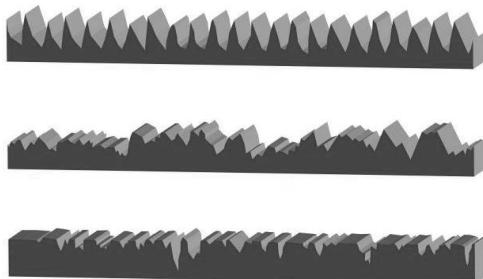


Bild 11 und 12: Rauheitsmessung an Hohlrädern

Bedingt durch die speziellen Antastbedingungen ist die Verwendung des Gelitkufentasters mit paralleler Anordnung von Kufe und Diamantnadel vorteilhaft. Damit lassen sich Schaftantastungen durch einen deutlich größeren Freiheitsgrad bei den Antastwinkeln vermeiden. Außerdem kann ein möglichst großer Messweg relativ zur Zahntiefe abgefahren werden.

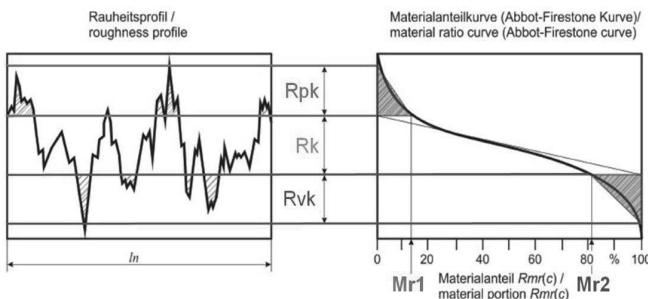
## 6. Auswertung des Materialanteils

Im Laufe der Jahre wurden in den Normausschüssen immer wieder neue Rauheitsparameter definiert, um die Charakteristik der Oberfläche in Kenngrößen fassen zu können. Sehr verbreitet ist dennoch vor allem die Auswertung über die Kenngrößen Ra und Rz, die sehr einfach zu beschreiben sind. Hieraus geht aber die Charakteristik der Oberfläche nicht hervor. Die Oberflächen können extrem unterschiedliche Detailstrukturen aufweisen, obwohl sie den gleichen Wert für Ra oder Rz aufweisen. Unterschiedliche Strukturen bedeuten aber auch in den meisten Fällen unterschiedliche Eigenschaften.



*Bild 13: Diese drei Oberflächenprofile verdeutlichen die Bedeutung der Materialanteil-Auswertung: Obwohl die Charakteristik der Oberflächen bedingt durch die unterschiedlichen Fertigungsverfahren völlig unterschiedlich ist, würde in allen drei Fällen der gleiche Ra-Wert ermittelt.*

Deutlich besser eignet sich die Auswertung des Materialanteils. Dabei werden über die Höhe der aufgenommenen Messkurve Schnitte erzeugt, in denen man rechnerisch den Anteil von Material prozentual bewertet. Daraus lässt sich die sogenannte Abbot-Kurve erzeugen, die wiederum nach einem speziellen Verfahren ausgewertet wird. Hierzu gibt es in der Literatur detaillierte Beschreibungen.



*Bild 14: Entstehung der Abbot- Kurve die zur Charakterisierung der Oberfläche verwendet wird*

Der Vorteil der Materialanteil-Auswertung ist, dass man klare Kenngrößen erhält, die aus der unterschiedlichen Materialdichte über den Höhenverlauf vom obersten Punkt der Oberfläche bis zum Übergang ins Vollmaterial resultieren. Die Charakteristika wie z. B. hohe Spitzen mit breiten Tälern oder breite Plateaus mit engen Vertiefungen werden über die Materialanteil-Kenngrößen Rk, Rvk und Rpk sowie MR1 und MR2 beschrieben. Diese würden demnach bei den in Bild 13 gezeigten Oberflächen deutlich unterschiedlich ausfallen.

## 7. Zusammenfassung

Durch die Verringerung der Oberflächenrauheit von Verzahnungen können die Eigenschaften von Getrieben verbessert werden. Unter anderem wird damit der Wirkungsgrad, die Leistungsdichte, der Verschleiß und das Laufverhalten positiv beeinflusst. Mit modernen Fertigungsverfahren wie z.B. das Polierschleifen auf der Schleif-Bearbeitungsmaschine sind glatte Oberflächen wirtschaftlich und prozesssicher herstellbar. Zur Prozessüberwachung hat dadurch die Rauheitsmessung an Verzahnungen eine große Bedeutung. Mit den bekannten Rauheitsmesseinrichtungen sind Verzahnungen nur bedingt messbar. Dagegen bietet das in einer Verzahnungsmessmaschine integrierte Rauheitsmesssystem von Klingelnberg ideale Voraussetzungen für die gestellten Anforderungen. Systematische Messungen mit automatisierten Abläufen, die Kombination mit der Messung der Verzahnungs-Geometrie und die Messung in der Produktion sind dadurch möglich. Mittlerweile ist auch die Rauheit der Innenverzahnungen an Hohlrädern mit dem gleichen Komfort messbar. Neben der klassischen Auswertung von Ra, Rz, Rt und Rmax lassen sich unabhängig von der Anwendung auch die Traganteilkennwerte wie Rk, Rpk, Rvk, MR1 und MR2 auswerten.

# Ein verkürztes Rosettenverfahren zur Kalibrierung von Teilungsabweichungen

Frank Keller, Martin Stein, Karin Kniel, PTB Braunschweig

## Kurzfassung

Das vollständige Rosettenverfahren ist ein etabliertes Verfahren zur hochgenaue Teilungska-librierung von Zahnrädern. Der Nachteil dieses selbskalibrierenden Fehlertrennverfahrens ist der quadratisch mit der Zähnezahl ansteigende Messaufwand, womit es für sehr große Zäh-nezahlen nur noch bedingt einsetzbar ist. Es wird daher ein verkürztes Verfahren vorge-schlagen, welches auf dem gleichen Abweichungsmodell wie das vollständige Verfahren beruht, aber mit deutlich weniger Messungen auskommt. Im Vergleich zum vollständigen Verfahren sind die Messunsicherheiten für die ermittelten Teilungsabweichungen dabei nur geringfügig höher.

## Abstract

For highly-accurate pitch measurements on gears the so-called three rosette method is the standard procedure. The main drawback of this self-calibrating error-separation method is its high measurement effort, which is proportional to the square of the number of teeth. For large numbers of teeth the method is hence of limited usability. Therefore, a reduced method is proposed, which is based on the same error model, but requires much less measure-ments. Compared to the non-reduced method, the measurement uncertainties for the deter-mined pitch deviations are only slightly higher.

## 1. Einleitung

Bei der Kalibrierung von Zahnrädern stellen die Teilungsabweichungen der Zahnflanken eine der wesentlichen Messgrößen dar. Die Qualität der gefertigten Teilung hat einen signifikan-ten Einfluss auf die Funktion des Zahnrades im Getriebe. Zur Messung der Teilungsabwei-chungen verwendet man üblicherweise taktile Koordinatenmessgeräte, die zumeist zusätz-lich mit einem messenden Drehtisch ausgestattet sind. Dabei sind in natürlicher Weise die Fehler des Messgerätes bzw. des Drehtisches mit den zu bestimmenden Teilungsabwei-chungen des Zahnrades überlagert. Zur Kalibrierung hat sich innerhalb der vergangenen 15 Jahre in der Zahnrädermesstechnik ein Fehlertrennverfahren etabliert. Das vollständige Roset-

tenverfahren [3][4][5] ist ein sogenanntes Selbstkalibrierverfahren, da es die genannten Einflüsse voneinander trennt und dadurch erstens ohne Substitutionsnormal auskommt und zweitens auf einem nicht rückgeführten Messgerät angewendet werden kann.

Der Nachteil des vollständigen Rosettenverfahrens liegt in seinem hohen Messaufwand. In der Literatur existieren verschiedene Ansätze für reduzierte Verfahren [1][2][6]. In der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) ist nun innerhalb eines Forschungsvorhabens der Ansatz von Debler [1] aufgegriffen und ergänzt worden, um ein verkürztes Rosettenverfahren in der Zahnradmesstechnik zu etablieren. Das Verfahren ist in der Anwendung sehr flexibel und enthält zudem das vollständige Rosettenverfahren als Spezialfall. Im Folgenden werden zunächst die mathematischen Grundlagen des vollständigen Verfahrens dargestellt, bevor im Anschluss der verkürzte Ansatz erläutert wird. Abschließend werden Messergebnisse vorge stellt, die mit dem verkürzten Verfahren an einem Teilungsnormal der PTB ermittelt wurden. Diesen Ergebnissen werden Kalibrierwerte gegenübergestellt, die auf dem vollständigen Rosettenverfahren beruhen.

## 2. Vollständiges Rosettenverfahren

Bei der Messung von Teilungs-Summenabweichungen auf einem Verzahnungs- oder Koordinatenmessgerät setzen sich die Messwerte für die Abweichungen aus den folgenden drei unabhängigen Rosetten zusammen:

- Rosette A: Teilungs-Summenabweichungen des Zahnrades
- Rosette B: Teilungs-Summenabweichungen einer Verdrehvorrichtung bzw. Ungenauigkeit beim manuellen Verdrehen
- Rosette C: Teilungs-Summenabweichungen des Koordinatenmessgerätes bzw. des messenden Drehtisches.

Durch mehrfache Messung der Teilungs-Summenabweichungen in verschiedenen relativ zueinander verdrehten Stellungen der Rosetten A und C lassen sich diese drei Fehlereinflüsse vollständig voneinander trennen. Die Rosette B gibt dabei den Fehler des Verdrehens der Rosetten A und C zueinander an. Auf einem Koordinatenmessgerät entspricht die Rosette B dem Verdrehen des Zahnrades gegenüber dem Koordinatensystem der Linearachsen, also einem Verdrehen auf dem Messtisch mit Hilfe einer Drehvorrichtung, oder gegebenenfalls auch durch manuelles Verdrehen in einer Spannvorrichtung. Wird auf einem Verzahnungsmessgerät gemessen, entspricht B dem manuellen Verdrehen des Zahnrades auf dem messenden Drehtisch.

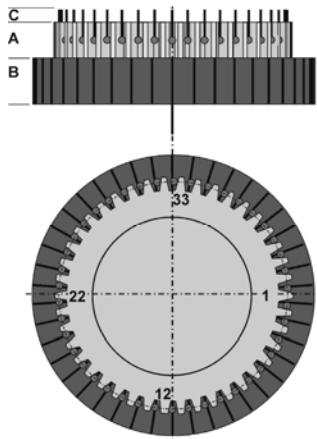


Bild 1: Messaufbau zum Rosettenverfahren auf einem Koordinatenmessgerät mit  
Zahnrad (A), Drehvorrichtung (B) und Koordinatenmessgerät (C).

Im Folgenden bezeichnet  $N$  immer die Teilungszahl (d.h. die Zähnezahl). Beim vollständigen Rosettenverfahren hat man nun  $N$  Messdurchläufe, in denen immer alle Teilungs-Summenabweichungen gemessen werden. Dabei sind im  $j$ -ten Durchlauf die Rosetten  $A$  und  $C$  um den Winkel  $j \cdot \frac{360^\circ}{N}$  gegeneinander verdreht, wobei  $j = 0, 1, \dots, N - 1$ . Damit setzen sich die einzelnen Messwerte wie folgt aus den jeweiligen Teilungs-Summenabweichungen zusammen: Der Messwert  $M_{ij}$  der  $i$ -ten Summenteilungsabweichung des Prüflings, gemessen im  $j$ -ten Durchlauf, ist die Summe

$$M_{ij} = A_i + B_j + C_{i-j} + K + \epsilon_{ij}. \quad (1)$$

Dabei werden die Indizes Modulo  $N$  gelesen, d.h. bei Indexwerten größer oder gleich  $N$  wird  $N$  subtrahiert, und bei negativen Werten wird  $N$  addiert. Weiter ist  $K$  ist ein konstanter Offset aller Messwerte. Zudem enthält jede Messung noch einen zufälligen Fehler  $\epsilon_{ij}$ .

Die gesuchten Teilungs-Summenabweichungen  $A_i$ ,  $B_j$ , und  $C_k$  sowie die Konstante  $K$  werden nun so bestimmt, dass die Gleichungen (1) für alle  $0 \leq i, j \leq N - 1$  mit im quadratischen Mittel möglichst kleinen  $\epsilon_{ij}$  erfüllt sind, wobei zusätzlich noch die Nebenbedingungen

$$\sum_{i=0}^{N-1} A_i = 0, \quad \sum_{i=0}^{N-1} B_i = 0, \quad \sum_{i=0}^{N-1} C_i = 0 \quad (2)$$

gelten. (Alternativ kann auch  $A_{N-1} = 0$ ,  $B_{N-1} = 0$ ,  $C_{N-1} = 0$  gefordert werden.) Genauer wird also die Summe der quadratischen Abweichung

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} \epsilon_{ij}^2 = \sum_{i,j=0}^{N-1} (M_{ij} - A_i - B_j - C_{i-j} - K)^2 \quad (3)$$

unter Berücksichtigung der genannten Nebenbedingungen (2) minimiert. Stehen wie beim vollständigen Rosettenverfahren alle  $N^2$  Messwerte zur Verfügung, können die gesuchten Teilungs-Summenabweichungen  $A_i$ ,  $B_j$ , und  $C_k$  und die Konstante  $K$  besonders einfach durch Mittelwertbildungen bestimmt werden:

$$K = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=0}^{N-1} M_{ij} \quad (4)$$

$$A_i = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} (M_{ij} - K) \quad (5)$$

$$B_j = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (M_{ij} - K) \quad (6)$$

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (M_{k+i,i} - K) \quad (7)$$

Dies kann etwa durch Ableiten der rechten Seite von (3) nach den einzelnen Parametern und anschließendes Nullsetzen der Ableitung gezeigt werden, wobei jeweils zusätzlich die Nebenbedingungen (2) ausgenutzt werden.

### 3. Verkürztes Rosettenverfahren:

Da als Messergebnis nur die Werte der Rosette  $A$ , nicht aber die der Rosetten  $B$  und  $C$  von Interesse sind, bietet sich eine verkürzte Messtrategie an, bei der nicht für alle Positionen in  $B$  und  $C$  Messungen durchgeführt werden. Für die Messung auf einem Verzahnungsmessgerät ist dabei besonders der Fall interessant, dass das Zahnrad nur in ausgewählten Relativpositionen der Rosetten  $A$  und  $C$  zueinander gemessen wird. Dadurch wird nicht nur die Anzahl der insgesamt notwendigen Messungen reduziert, sondern insbesondere auch die der notwendigen manuellen und somit zeitintensiven Verdrehungen des Zahnrades auf dem Drehtisch. Das gleiche gilt für Messungen auf einem Koordinatenmessgerät ohne Drehtisch. Wird die Messung auf einem Koordinatengerät mit Drehtisch durchgeführt, kann es aber auch praktikabel sein, die Zahl der Messpositionen in der Rosette  $C$  zu reduzieren. Da dies aus mathematischer Sicht nur einer Vertauschung der Variablennamen  $B$  und  $C$  entspricht, soll im Folgenden immer angenommen werden, dass die Reduzierung in der Rosette  $B$  erfolgt.

Seien also  $0 \leq q_1 < q_2 < \dots < q_R \leq N - 1$  für  $2 \leq R \leq N$  ausgewählte Relativpositionen zwischen den Rosetten  $A$  und  $C$ , d.h. statt in allen  $N$  Stellungen werden nur in den  $R$  relativen

Winkelpositionen  $q_r \cdot \frac{360^\circ}{N}$  mit  $r = 1, \dots, R$  Teilungsmessungen durchgeführt (in der Praxis wird man im Allgemeinen  $q_1 = 0$  setzen). Werden die  $N$  Teilungs-Summenabweichungen in diesen  $R$  Relativpositionen gemessen, erhält man die  $N \times R$ -Matrix der Messwerte

$$M = \begin{pmatrix} M_{0,q_1} & \cdots & M_{0,q_R} \\ \vdots & & \vdots \\ M_{N-1,q_1} & \cdots & M_{N-1,q_R} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

In der ersten Spalte stehen also die Messwerte der  $N$  Teilungs-Summenabweichungen gemessen in der Relativposition  $q_1$  und entsprechend für die weiteren Spalten. Es spielt dabei keine Rolle, auf welche Referenz sich die Teilungs-Summenabweichung der einzelnen Teilungsmessungen beziehen, also ob etwa  $M_{0,q_r} = 0$ ,  $M_{N-1,q_r} = 0$  oder  $\sum_{i=0}^{N-1} M_{i,q_r} = 0$  festgelegt wird. (Es könnten sogar für die einzelnen Spalten voneinander verschiedene Konventionen verwendet werden.) Nach dem Fehlermodell, das auch dem vollständigen Rosettenverfahren zugrunde liegt, gilt somit

$$M_{i,q_r} = A_i + B_{q_r} + C_{i-q_r} + K + \epsilon_{i,q_r}. \quad (9)$$

Wie zuvor sollen nun die Werte für  $A_i$ ,  $B_{q_r}$  und  $C_j$  sowie die Konstante  $K$  so bestimmt werden, dass die Summe

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{r=1}^R \epsilon_{i,q_r}^2 \quad (10)$$

der quadrierten Abweichungen (Residuen) minimiert wird, wobei zusätzlich die Nebenbedingungen

$$\sum_{i=0}^{N-1} A_i = 0, \quad \sum_{r=1}^R B_{q_r} = 0, \quad \sum_{j=0}^{N-1} C_j = 0 \quad (11)$$

eingehalten werden sollen. Damit handelt es sich also um ein lineares Least-Squares-Problem mit ebenfalls linearen Nebenbedingungen. Solche Probleme sind mathematisch sehr gut verstanden und können mit Standardmethoden gelöst werden.

Wie zuvor können alternativ auch die Nebenbedingungen

$$A_{N-1} = 0, \quad B_{q_R} = 0, \quad C_{N-1} = 0 \quad (12)$$

gefordert werden, was der üblichen Konvention für Teilungs-Summenabweichungen entspricht. Für die Rechnung ist es jedoch angenehmer, zunächst die Bedingung (11) zu verwenden, da auf diese Weise durch Mittelwertbildung bereits einzelne Variablen eliminiert werden können. Am Ende können die Teilungs-Summenabweichungen dann entsprechend verschoben werden, um die Bedingung (12) zu erfüllen. Beide Vorgehensweisen sind äquivalent und führen auf die gleichen Ergebnisse für die Teilungsabweichungen.

## 4. Die Wahl der Messpositionen der Rosette $B$

### 4.1 Bedingung an die Auswahl der zu messenden Positionen

Lineare Least-Squares-Probleme haben zwar immer eine Lösung, allerdings ist die Eindeutigkeit der Lösung nicht immer gegeben. Tatsächlich lässt sich für das vorliegende Problem zeigen, dass eine eindeutige Lösung genau dann existiert, wenn die Zahlen

$$q_2 - q_1, q_3 - q_1, q_4 - q_1, \dots, q_R - q_1, N \quad (13)$$

keinen gemeinsamen Teiler größer Eins haben,

$$\text{ggT}(q_2 - q_1, q_3 - q_1, q_4 - q_1, \dots, q_R - q_1, N) = 1 \quad (14)$$

Beispielsweise dürfen bei einem Zahnrad mit  $N = 12$  Zähnen nicht nur die Relativpositionen  $\{0,2,6,10\}$  gemessen werden, da dann alle Differenzen  $q_r - q_1$  mit  $r = 2,3,4$  sowie die Teilungszahl  $N$  selbst durch 2 teilbar sind,

$$\text{ggT}(2,6,10,12) = 2. \quad (15)$$

Dagegen wären z.B.  $\{0,1,6,10\}$  oder  $\{0,2,5,10\}$  zulässige Kombinationen mit insgesamt vier Messdurchläufen in verschiedenen Relativpositionen. Im Allgemeinen ist die Bedingung (14) immer sehr leicht zu erfüllen, beispielsweise wenn  $q_2 = q_1 + 1$  gewählt wird.

Ist die Bedingung (14) an die Auswahl der Positionen hingegen nicht erfüllt, können immer beliebig viele Lösungen für das Least-Squares-Problem angegeben werden. In diesem Fall kann die Fehlertrennung somit nicht durchgeführt werden. Denn angenommen für eine Auswahl an Positionen gelte  $g = \text{ggT}(q_2 - q_1, q_3 - q_1, q_4 - q_1, \dots, q_R - q_1, N) \geq 2$ . Dies bedeutet, dass das Zahnrad gegenüber dem Messsystem immer nur um ein ganzzahliges Vielfaches von  $g \geq 2$  gedreht wird, wenn zwischen zwei beliebigen Messpositionen in beliebiger Richtung verdreht wird. Daher könne in diesem Fall Teilungsabweichungen der Periode  $g$  nicht von Messabweichungen der gleichen Periode getrennt werden.

### 4.2 Zahl der zu messenden Positionen

Zwar lässt sich das beschriebene Fehlertrennverfahren bereits durchführen, wenn die Teilungsabweichungen in nur zwei Relativpositionen gemessen werden. In diesem Fall findet allerdings keine Mittelung der verschiedenen Messungen statt. Dies kann verglichen werden mit dem Fall, das eine Ebene nur mit drei Punkten gemessen und anschließend die Gauß-Ausgleichsebene dazu bestimmt wird. Der Fall  $R = 2$  sollte daher ausgeschlossen werden.

Insgesamt gilt natürlich, dass die minimal erreichbaren Unsicherheiten der berechneten Teilungsabweichungen (bei gleichbleibender Unsicherheit der einzelnen Messwerte) umso kleiner werden, je mehr Positionen gemessen werden. Da sich die Unsicherheit aus dem Re-

gressionsverfahren näherungsweise wie  $1/\sqrt{R-1}$  verhält, verringert sich die Unsicherheit zunächst stark, wenn die Zahl  $R$  der zu messenden Positionen erhöht wird (vgl. Bild 2). Generell sollten daher immer mindestens fünf Positionen gemessen werden. Andererseits ist der Informationsgewinn durch die Messung von mehr als zehn Positionen meist nahezu erschöpft, so dass dies im Allgemeinen nicht mehr sinnvoll ist. Zudem sind noch weitere systematische Unsicherheitsbeiträge zu berücksichtigen, etwa durch die Bestimmung des Werkstückkoordinatensystems oder der Drehtischachse, die sich durch Erhöhung von  $R$  nicht oder nur kaum verringern lassen.

Da die Wahl einer geeigneten Zahl  $R$  auch von der Teilungszahl  $N$  abhängt, kann für  $N \geq 7$  die Bedingung

$$\max(5, \sqrt{N}) \leq R \leq 2\sqrt{N} \quad (16)$$

als Richtwert für die Bestimmung der Zahl der zu messenden Positionen dienen.

#### 4.3 Auswahl der Position zu vorgegebenen Zahlen $N$ und $R$

Die Unsicherheit der berechneten Teilungsabweichungen hängt nicht nur von der Zahl der gemessenen Positionen ab, sondern auch von der speziellen Wahl der Positionen. Dies macht sich insbesondere dann bemerkbar, wenn insgesamt nur wenige Positionen gemessen werden. Dabei sind solche Positionen günstig, bei denen die Differenzen

$$q_i - q_j \bmod N \quad (17)$$

für  $0 \leq i, j \leq N-1$  möglichst gleichmäßig in  $[0, N-1]$  verteilt sind [1]. Beispielsweise wäre etwa  $\{0, 2, 3, 7, 26\}$  eine besonders günstige Auswahl von fünf Positionen bei der Teilungszahl  $N = 37$ , wohingegen  $\{0, 1, 2, 3, 4\}$  oder  $\{0, 6, 12, 18, 24\}$  zu einer höheren Unsicherheit führen.

In Bild 2 sind für die Teilungszahl  $N = 37$  die minimalen und maximalen Unsicherheitsbeiträge zu den Teilungs-Summenabweichungen in Abhängigkeit zur Zahl der zu messenden Positionen dargestellt. Man erkennt, dass die Auswahl vor allem bei kleinem  $R$  einen signifikanten Einfluss auf die Unsicherheit hat, wohingegen für  $R \geq 10$  die Unsicherheit nur noch geringfügig von der Wahl der Positionen abhängt.

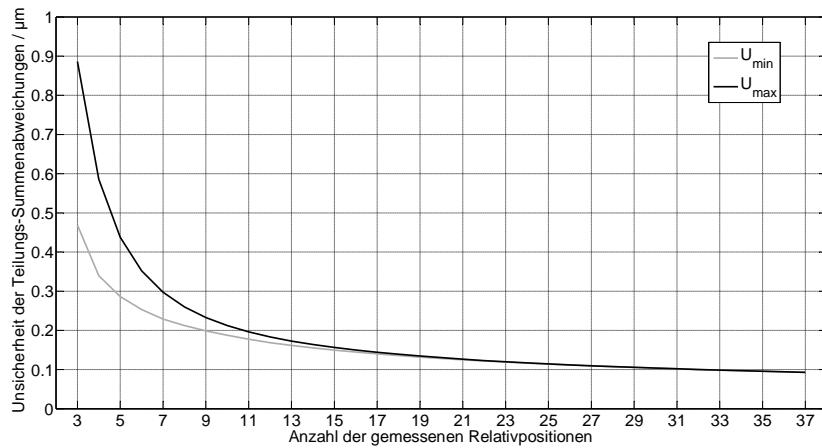


Bild 2: Minimaler und maximaler Unsicherheitsbeitrag ( $k = 2$ , in  $\mu\text{m}$ ) für die Teilungs-Summenabweichung in Abhängigkeit von der Anzahl der gemessenen Relativpositionen  $R$  für die

Teilungszahl  $N = 37$ . Dabei wurde die Standardabweichung der Einzelmessungen als  $0,2 \mu\text{m}$  angenommen.

Abschließend soll nochmal betont werden, dass die Unsicherheit, die sich aus dem Regressionsverfahren ergibt, nur ein Beitrag zur Gesamtunsicherheit ist. Weitere Beiträge ergeben sich durch die Unsicherheit bei der Bestimmung der Drehtischachse oder des Werkstückkoordinatensystems. Für große  $R$  werden die letzteren im Allgemeinen überwiegen.

## 5. Messergebnisse

Zur Verifikation des vorgestellten Verfahrens wurde ein Teilungsnormal mit 37 Zähnen mehrfach auf einem Verzahnungsmessgerät sowie auf zwei verschiedenen jeweils mit einem messenden Drehtisch ausgestatteten Koordinatenmessgeräten mit dem verkürzten Verfahren in  $R = 7$  Relativpositionen gemessen. Es existieren zudem Kalibrierwerte für das Teilungsnormal, die mit dem vollständigen Rosettenverfahren auf dem Verzahnungsmessgerät ermittelt wurden. Die ausgewählten Relativpositionen für das verkürzte Verfahren waren jeweils  $\{0,3,9,13,21,30,35\}$ , was eine besonders günstige Auswahl von sieben Positionen darstellt (vgl. Abschnitt 4.3).

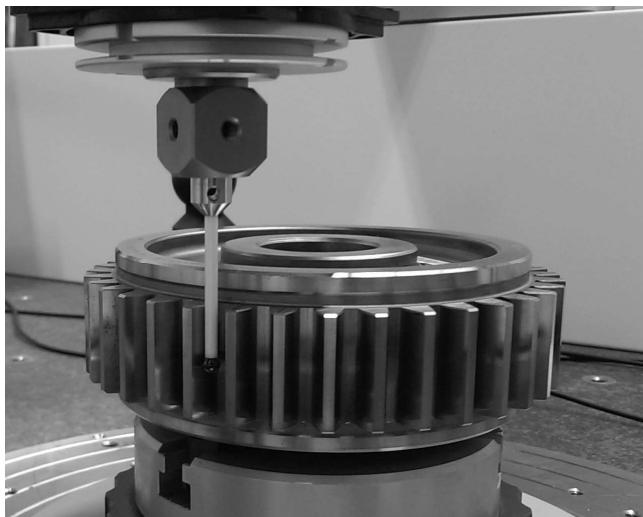


Bild 3: Messung des Teilungsnormals auf einem Koordinatenmessgerät mit Drehtisch

In Bild 4 bzw. Bild 5 sind die Differenzen der ermittelten Summe- bzw. Einzelteilungsabweichen der verschiedenen Messungen dargestellt, wobei bei den Teilungs-Summenabweichungen jetzt die Konvention der Gleichungen (12) verwendet wurde, so dass der letzte Wert gleich Null ist. Das vollständige bzw. verkürzte Rosettenverfahren wurde bei den einzelnen Messungen wie folgt realisiert:

- Bei den Messungen auf dem Verzahnungsmessgerät wurde das Normal zwischen den einzelnen Messdurchgängen auf dem Drehtisch verdreht.
- Bei der Messung auf dem Koordinatenmessgerät 1 erfolgte die Messung mit einem Drehtisch. Der Taster nimmt dabei für jeden Messdurchgang eine andere Position in der Messebene ein. Die gleiche Strategie wurde für die Messung 1 auf dem Koordinatenmessgerät 2 angewandt.
- Bei der zweiten Messung auf dem Koordinatenmessgerät 2 erfolgten die einzelnen Messdurchgänge ohne Drehtisch, d.h. der Taster fährt bei einer Teilungsmessung einmal um das Werkstück herum. Der Drehtisch wurde nur verwendet, um das Normal für die einzelnen Messdurchgänge zu positionieren.

Bei allen Messungen wurde das Werkstückkoordinatensystem vor den sieben einzelnen Messdurchgängen jeweils neu bestimmt.

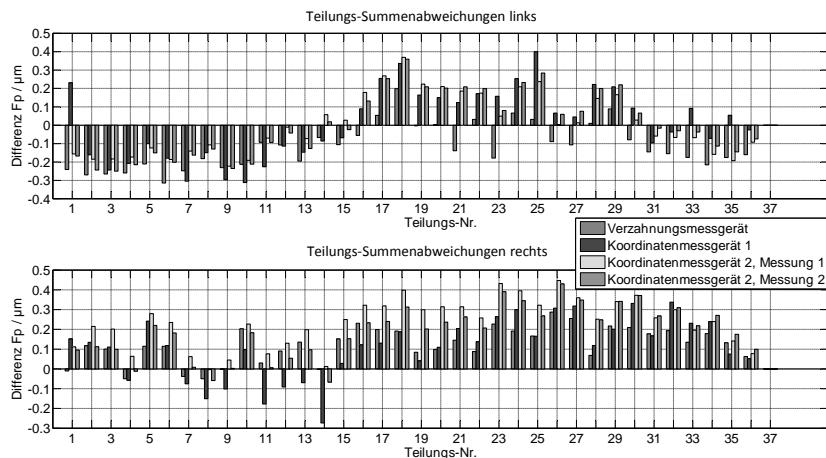


Bild 4: Teilungs-Summenabweichungen: Differenzen zu den Kalibrierwerten

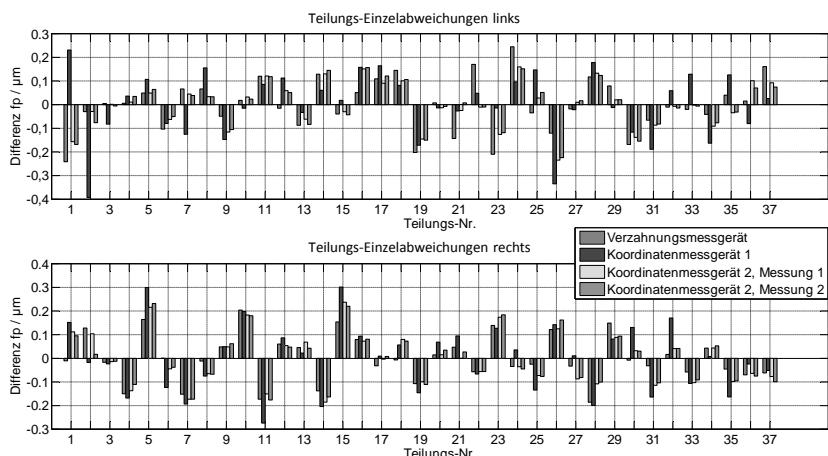


Bild 5: Teilungs-Einzelabweichungen: Differenzen zu den Kalibrierwerten

Tabelle 1 zeigt die rein statistisch ermittelten Standardabweichungen für die einzelnen Messungen. Die Varianz der Einzelmessungen ergibt sich dabei aus der Quadratsumme der Residuen, geteilt durch die Zahl der Freiheitsgrade  $d$ ,

$$s^2 = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{r=1}^R \epsilon_{i,q_r}^2 / d. \quad (18)$$

Die Zahl der Freiheitsgrade berechnet sich aus der Zahl der Messwerte minus der Zahl der unabhängigen Parameter, d.h.

$$d = R \cdot N - 2 \cdot (N - 1) - (R - 1) - 1. \quad (19)$$

Man beachte, dass aufgrund der Nebenbedingungen (11) nur  $N - 1$  bzw.  $R - 1$  Werte der  $A_i, C_j$  bzw.  $B_{q_r}$  unabhängig sind. Die Standardabweichungen für die Teilungs-Summenabweichungen und Teilungs-Einzelabweichungen können anschließend mit Hilfe des Unsicherheitsfortpflanzungsgesetzes bestimmt werden. Für  $R \geq \sqrt{N}$  gilt dabei in guter Näherung

$$s_C \approx s_E \approx s \cdot \sqrt{2 / \sqrt{R - 1}} \quad (20)$$

für die Standardabweichungen  $s_C$  und  $s_E$  der Teilungs-Summenabweichungen bzw. Teilungs-Einzelabweichungen. Für die Teilungs-Summenabweichungen ist hier mit  $s_C$  der Maximalwert gemeint, da die einzelnen Teilungs-Summenabweichungen verschiedene Standardabweichungen haben.

Tabelle 1: Standardabweichungen in  $\mu\text{m}$

	Standardabweichung der Einzelmessung		Standardabweichung der Teilungs-Summenabweichungen (Maximum)		Standardabweichung der Teilungs-Einzelabweichungen	
	Links-flanke	Rechts-flanke	Links-flanke	Rechts-flanke	Links-flanke	Rechts-flanke
Kalibrierwerte	0,067	0,065	0,016	0,015	0,016	0,015
Verzahnungsmessgerät	0,075	0,073	0,043	0,043	0,043	0,043
KMG 1	0,182	0,165	0,105	0,095	0,105	0,095
KMG 2, Messung 1	0,064	0,077	0,037	0,045	0,037	0,045
KMG 2, Messung 2	0,074	0,075	0,043	0,044	0,043	0,044

Aufgrund der guten Reproduzierbarkeit sind die ermittelten Standardabweichungen für alle Messungen sehr klein. Als weiterer Beitrag zur Gesamtunsicherheit müssen jedoch noch Unsicherheiten bei der Bestimmung des Werkstückkoordinatensystems sowie systematische Effekte, die nicht durch das verwendete Fehlertrennverfahren abgedeckt sind, in Betracht gezogen werden. Für die hier verwendeten Messgeräte wurden diese zusätzlich zu berück-

sichtigenden Unsicherheiten mit 0,3-0,4 µm (erweiterte Messunsicherheit) abgeschätzt, so dass sich insgesamt eine erweiterte Messunsicherheit für die Teilungs-Summenabweichungen und Teilungs-Einzelabweichungen von 0,5 µm ergibt. Damit wurde eine sehr gute Übereinstimmung der einzelnen Messungen erreicht.

## 6. Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten verkürzten Rosettenverfahren erhält man eine Möglichkeit zur Teilungskalibrierung, die gegenüber dem bisher verwendeten vollständigen Verfahren eine deutliche Zeitsparnis bei gleichzeitig nur geringfügig erhöhter Messunsicherheit einbringt. Damit kann das Verfahren auch für die Teilungskalibrierung von Zahnrädern mit sehr hohen Teilungszahlen angewandt werden, für die das vollständige Verfahren nicht mehr nur nicht wirtschaftlich, sondern bei Messdauern von über einem Tag auf Grund von zeitabhängigen Driften auch nicht mehr sinnvoll ist. Voraussetzung ist dabei ein reproduzierend messendes Messgerät, das aber, da das Verfahren selbstkalibrierend ist, nicht notwendigerweise rückgeführt sein muss.

## 7. Literatur

- [1] Debler, E. : Verkürztes Dreirosetten-Meßverfahren zur Bestimmung von Winkelabweichungen. In: Z. Vermess. wes 102 (1977), S. 117–126.
- [2] Elster, C. ; Weingärtner, I. : Solution to the shearing problem. In: Appl. Opt. 38 (1999), Nr. 23, S. 5024–5031
- [3] Härtig, F. ; Kniel, K. : Fehler trennverfahren - ein Weg zur hochgenauen Verzahnungsmessungen, GETPRO Kongress 14./15. März 2007 in Würzburg
- [4] Kniel, K. ; Härtig, F. ; Osawa, S. ; Sato, O. : Two highly accurate methods for pitch calibration. In: Measurement Science and Technology 20 (2009), Nr. 11, S. 115110
- [5] Noch, R. ; Steiner, O. : Die Bestimmung von Kreisteilungsfehlern nach einem Rosettenverfahren. In: Z. Instr. kde 74 (1966), S. 307–316
- [6] Probst, R. : Self-calibration of divided circles on the basis of a prime factor algorithm. In: Measurement Science and Technology 19 (2008), Nr. 1, S. 015101

## Rechnerische 2D- und 3D-Lehrung von Pass- und Steckverzahnungen

### Null-Fehler-Montage von Wellenverbindungen

### Virtual 2D- and 3D-gauging of splined connections Zero-defect assembly of shaft connections

Dr.-Ing. Karsten Lübke, Dr. rer. nat Andras Groh,  
Hexagon Metrology GmbH – Powertrain Solutions, Wetzlar

#### Kurzfassung

Die DIN 5480-15:2006 enthält die folgende Aussage [1]: „Das Istmaß der Hüllverzahnung ist zurzeit noch nicht genau direkt messbar“. Das hier vorgestellte Verfahren der computergestützten Lehrung von Pass- und Steckverzahnungen zeigt, dass diese Aussage nicht mehr zutrifft. Basierend auf den tatsächlich erfassten Flächen der Flanken berechnet dieses Verfahren näherungsweise das Istmaß der Hüllverzahnung einer Pass-/Steckverzahnung. Daraus ergibt sich neben den individuellen Zahndicken/Lückenweiten auch die effektive Zahndicke/Lückenweite der Hülle als Maximum-Materialbedingung.

#### 1. Stand der Technik – Geometrie

Bei einer Pass-/Steckverzahnung handelt es sich um eine Welle-Nabe-Verbindung. Dabei sind je nach gewählter Passung sowohl lose als auch feste Verbindungen von Welle und Nabe möglich. Es handelt sich um eine Vielfach-Mitnehmerverbindung, wobei das Drehmoment durch die Zahnflanken übertragen wird. Die Welle ist außen- und die Nabe ist innenverzahnt. Damit möglichst alle Flanken das Drehmoment gleichmäßig übertragen, ist eine hohe Fertigungsgenauigkeit erforderlich.

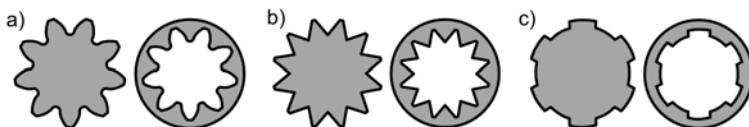


Bild 1: Schematische Darstellungen von Wellen und Nabens verschiedener Typen von Passverzahnungen: a) Evolventenflanken, b) Kerbflanken und c) Keilflanken

Die Verwendung der Begriffe Pass- und Steckverzahnung erfolgt üblicherweise synonym, weshalb im Folgenden lediglich der Term Passverzahnung verwendet wird. Bild 1 zeigt drei bekannte Typen.

Passverzahnungen mit Evolventenflanken entsprechen im Allgemeinen evolventischen Zylinderrädern mit großer Zahnbreite und kleinerer Zahnhöhe als bei einer Laufverzahnung. Dabei ist der Eingriffswinkel gegenüber den in DIN 867 [2] spezifizierten  $20^\circ$  zumeist größer. DIN 5480 und ISO 4156 definieren beispielsweise  $30^\circ$ ,  $37,5^\circ$  oder  $45^\circ$  [3,4,5,6]. Passverzahnungen mit Kerbflanken hingegen besitzen ebene Flanken, die nicht parallel sind und einen spitzen Zahn bilden [7]. Beide Arten von Passverzahnungen weisen eine Flankenzentrierung auf. Die Flanken eines Zahns der Keilverzahnung hingegen sind parallele Ebenen. Bei diesem Typ liegt im Allgemeinen eine Durchmesserzentrierung auf einer der beiden gemeinsamen Zylinderflächen der Kopf- und Fußflächen vor [8].

Die hier vorgestellte computergestützte Lehrung bezieht sich auf Passverzahnungen mit Evolventen- und Kerbflanken. Beispiele für Bauteile mit entsprechenden Passverzahnungen zeigt Bild 2.



Quelle: [www.jakobantriebstechnik.de](http://www.jakobantriebstechnik.de)



Quelle: [www.hahn-fertigungstechnik.de](http://www.hahn-fertigungstechnik.de)

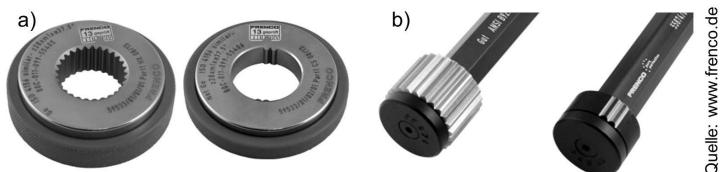
Bild 2: Bauteile mit Passverzahnungen: a) Elastomerkupplung mit Evolventenverzahnung und b) Zylinderrad mit Kerbverzahnung

## 2. Stand der Technik – Qualitätsprüfung

Das Lehren ist allgemein ein Vergleichen der Ist-Geometrie mit der Nenn-Geometrie. Im technischen Sinne wird festgestellt, ob der Prüfgegenstand innerhalb vorgegebener Grenzen liegt [9]. Das Ergebnis dieser funktionsorientierten Prüfung ist kein Zahlenwert, sondern eine qualitative Aussage über die Paarungsfähigkeit.

Mechanische Lehren stellen die verkörperten Grenz-Geometrien einer Messgröße dar. Damit prüfen sie beispielsweise Hüll- und Pferch-Elemente, aber auch durch anliegende Ebenen begrenzte Nuten oder Stege. Die verkörperten Grenz-Geometrien werden als Gut- und Aus-

schusslehre bezeichnet. Detaillierte Informationen über die allgemeine Gestaltung von Lehren definiert beispielsweise DIN 7150-2:1977 [10]. Die Gutprüfung beim mechanischen Lehren ist eine Paarungsprüfung über das ganze Geometrieelement, die Ausschussprüfung eine lokale Prüfung im Zweipunktverfahren. Für Passverzahnungen existieren ebenfalls mechanische Lehren, wobei die Ausschusslehre entsprechend nur wenige Lücken bzw. Zähne verkörpernt. Bild 3 zeigt einige Beispiele für Wellen und Naben.



Quelle: www.frenco.de

Bild 3: Lehren für Passverzahnungen: a) Gut- und Ausschusslehrring mit Evolventenflanken für Wellen und b) Gut- und Ausschuss-Verzahnungslehrnen mit Kerbflanken für Naben

Eine Zusammenfassung der Prüfmerkmale für evolventische Passverzahnungen nach DIN 5480-16:2006 [1] zeigt Bild 4. Bei Passverzahnungen interessieren dabei insbesondere die Zahndicken/Lückenweiten und die allgemeine Lage der Verzahnung zu ihrer Bezugsachse.

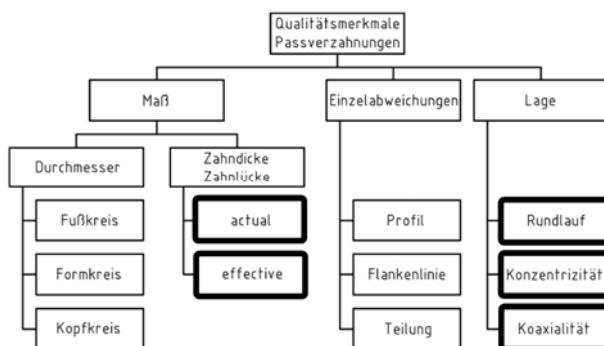


Bild 4: Prüfmerkmale von Passverzahnungen nach DIN 5480-15:2006 [1]

Sinngemäß nach DIN 5480-15:2006 sind individuelle und effektive Lückenweite/Zahndicke folgendermaßen definiert:

- Individuelle Zahndicke/Lückenweite als Bogenlänge am Teilkreis unter Ausschluss aller Einzelabweichungen.
- Effektive Zahndicke/Lückenweite als Bogenlänge am Teilkreis als Maximum-Materialbedingung inklusive aller überlagerten Einzelabweichungen.

Bild 5 illustriert den Begriff der effektiven Zahndicke/Lückenweite. Dabei ist zu beachten, dass prinzipiell die Verzahnungssachse den Bezug für die Berechnung der entsprechenden Bogenlänge darstellt. Die Messung der Verzahnung erfolgt aber zumeist bezogen auf die Laufachse der Welle. Diese wird aus den Lagerflächen während der Messung auf dem KMG gebildet. Fertigungsbedingt können beide Achsen voneinander abweichen, was zu einer Rundlaufabweichung oder einem Taumel der Verzahnung führt. Diese Achsen-Abweichung bewirkt eine fehlerhafte Berechnung der effektiven Zahndicke/Lückenweite.

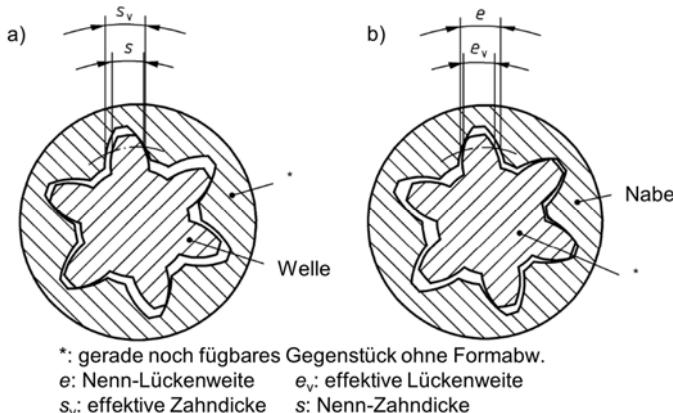


Bild 5: Definition der effektiven Zahndicke/Lückenweite durch eine beidseitig an den Flanken anliegende Hülle: a) effektive Zahndicke an einer Welle und b) effektive Lückenweite an einer Nabe frei nach DIN 5480-15:2006 [1]

Deshalb ist bei Passverzahnungen eine näherungsweise Berechnung der Verzahnungssachse erforderlich. Ein mögliches Verfahren hierfür ist die Erfassung und Berechnung der Rundlaufabweichung nach DIN 3960:1987 [11]. Durch Messungen in mehreren Stirnschnitten erlaubt dieses Verfahren eine Approximation der Verzahnungssachse. Der Nachteil dieses Vorgehens ist, dass die berechnete Achse nicht der Verzahnungssachse entspricht, die eine

mechanische Lehre durch manuelle Prüfung einnimmt. Dies kann dazu führen, dass bei Messung mit einem KMG die Passverzahnung als Ausschuss deklariert werden kann, weil die effektive Zahndicke/Lückenweite die Toleranz überschreitet. Eine mechanische Lehre hingegen könnte dieselbe Passverzahnung als Gutteil deklarieren.

### **3. Prinzip der computergestützten 2D- und 3D-Lehrung: Virtuelle Hülle**

Im Gegensatz zur mechanischen Lehrung mit einer Gut- und einer Ausschusslehre ist das Ergebnis der computergestützten 2D- und 3D-Lehrung eine geometrisch ideale Hülle, die spielfrei an den Messpunkten anliegt. Es handelt sich um eine *berechnete* Hülle, die nicht real existiert, sie wird daher im Folgenden *virtuelle Hülle* genannt. Sie basiert auf den Konstruktionsparametern, wobei die Zahndicke/Lückenweite der Hülle sowie die Lage variabel sind und sie besitzt stets idealgeometrische Gestalt. Die virtuelle Hülle stellt bei einer Welle eine außen an den erfassten Flanken anliegende Nabe dar, bei einer Nabe eine innen anliegende Welle (Bild 5).

Das Konzept der computergestützten Berechnung einer anliegenden virtuellen Hülle wird an einer Außenverzahnung erklärt. Es ähnelt dem in [12] beschriebenen Verfahren und ist auf eine Innenverzahnung übertragbar. Die Voraussetzung für die computergestützte Lehrung von Passverzahnungen ist eine ausreichende Anzahl erfasster Punkte auf linken und rechten Flanken. Diese Erfassung erfolgt mit einem KMG. Während bei optischen Sensoren Oberflächenpunkte direkt erfasst werden [13], sind es bei taktilen kugelförmigen Tastern Tastkugelmittelpunkte. Hier ist zusätzlich eine Radiuskorrektur erforderlich, ein Beispiel hierfür findet sich in [12]. Zur vereinfachten Erläuterung des Verfahrens wird im Folgenden angenommen, dass für das Verfahren Oberflächenpunkte vorliegen.

Die Methode beruht auf der Analyse der Abweichungen der Oberflächenpunkte zur Nenn-Geometrie. Die Abweichung eines Messpunkts ist definiert durch den Abstand des Oberflächenpunktes zu seinem Lotpunkt  $g$  auf der Nenn-Geometrie (Bild 6). Bei Evolventenflanken existiert für jeden Lotpunkt  $g$ , dessen radialer Abstand größer oder gleich dem Grundkreisradius ist, eine definierte Material-Normale  $n$ . Dieser Vektor steht senkrecht auf der Oberfläche und zeigt konventionsgemäß zur materialfreien Seite (Bild 6). Dies erlaubt es, dem Abstand zur Nenn-Geometrie ein Vorzeichen zuzuordnen: Ist die Abweichung positiv, so liegt der Punkt oberhalb der Nenn-Geometrie, ist sie negativ, so liegt er innerhalb. In Bild 6 bezeichnen die Indizes  $i$  und  $j$  zwei beliebige Punkte auf einer Evolventenflanke. Punkt  $i$  liegt im Innern der virtuellen Hülle und  $d_i$  besitzt deshalb ein negatives Vorzeichen, Punkt  $j$  allerdings verletzt die Hüll-Bedingung und  $d_j$  besitzt deshalb ein positives Vorzeichen.

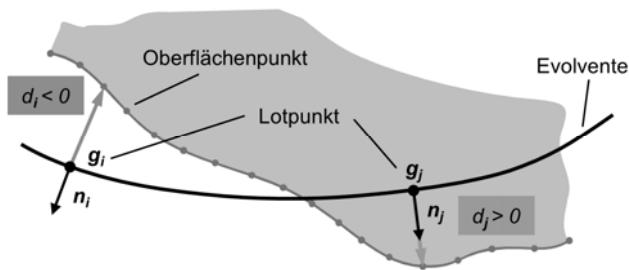


Bild 6: Definition der Material-Normale  $n$  und des vorzeichenbehafteten Abstands  $d$  bei einer Außen-Verzahnung

Bei einer computergestützten Lehrung ist die virtuelle Hülle definiert durch die Evolventen-Nenn-Geometrie, die in jedem Punkt um einen frei wählbaren konstanten Wert verschoben werden kann. Die Zahndicke der idealgeometrischen virtuellen Hülle ist somit variabel. In der Mathematik sowie im ISO-GPS-Sprachgebrauch bezeichnet man diese morphologische Operation als *Dilation* [14, 15]. Anschaulich ist das Ergebnis die Hülle, die entsteht wenn eine Kugel über die Evolvente rollt (Bild 7a). Der Kugeldurchmesser kann dabei frei gewählt werden, er ist bei einer Dilation über das gesamte Profil hinweg jedoch konstant.

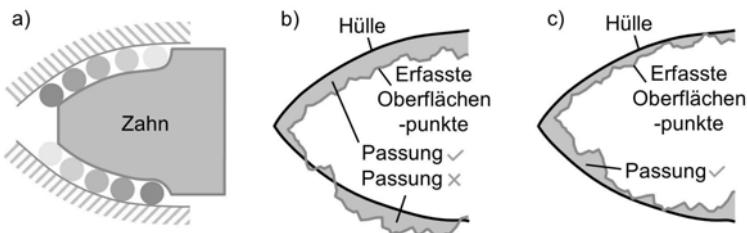


Bild 7: Dilation und Transformation der virtuellen Hülle: a) Änderung der Zahndicke durch Dilation, b) unzureichende und c) akzeptable Verschiebung und Rotation der erfasssten Oberflächenpunkte

Ziel ist es eine Transformation, d.h. eine Verschiebung und eine Rotation, so zu bestimmen, dass die erfassten Oberflächenpunkte bestmöglich in der dilatierten virtuellen Hülle liegen (Bild 7b und c). Im Detail bedeutet dies, dass die Abstände zur virtuellen Hülle möglichst

groß werden sollen. Im Endeffekt erlaubt das Ergebnis dieser Einpassung eine abschließende morphologische Operation, so dass eine *spielfrei anliegende virtuelle Hülle* entsteht.

Die virtuelle Hülle weist dieselbe Orientierung der Materialnormalen auf (Bild 6). Die Abweichungen der erfassten Oberflächenpunkte zur idealgeometrischen Hülle sollen daher negativ und betragsmäßig möglichst groß werden. Dies bedeutet, dass die Abstände der erfassten Punkte zur virtuellen Hülle in Richtung „negativ unendlich“ maximiert werden. Aus mathematischer Sichtweise besteht die Aufgabe darin eine Transformation zu finden, so dass der maximale Fehler minimiert wird. Zu beachten ist, dass bei einer Paarungsfähigkeit mit der virtuellen Hülle alle Vorzeichen der Abweichungen negativ sind. Das Vorgehen generalisiert das Verfahren der Bohrbildeinpassung in [15]. Nach erfolgreicher Minimierung ergibt sich aus den maximalen Abständen die abschließende Zahndicke, so dass die virtuelle Hülle spielfrei an den erfassten Oberflächenpunkten anliegt. Dieses Ergebnis entspricht exakt der Definition der effektiven Zahndicke nach DIN5480-15:2006 [1].

Aus technischer Sicht kann es erforderlich sein, gewisse Freiheitsgrade der Transformation, bestehend aus Translation und Rotation, zu fixieren. Bei einer computergestützten 2D-Lehrung in der  $xy$ -Ebene sind die drei freien Parameter im Bezugskoordinatensystem wie folgt (Bild 8a):

- Translation in  $x$ - und  $y$ -Richtung,
- Rotation um die  $z$ -Achse.

Bei einer computergestützten 3D-Lehrung existieren fünf freie Parameter (Bild 8b):

- Translation in  $x$ - und  $y$ -Richtung,
- Rotation um  $x$ ,  $y$  und  $z$ -Achse.

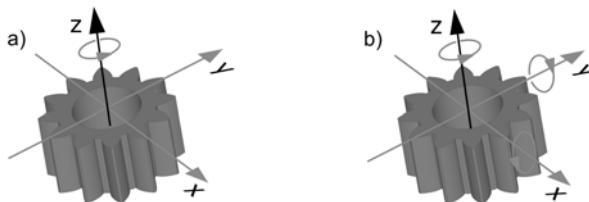


Bild 8: Freiheitsgrade der Transformation: a) 2D-Lehrung und b) 3D-Lehrung

Im letztgenannten Fall ist die Translation in  $z$ -Richtung kein freier Parameter, da eine Verschiebung der erfassten Punkte in  $z$ -Richtung keine Änderung der Abweichungen bewirkt. Das Verfahren berechnet eine Transformation und die effektive Zahndicke. Aus der Trans-

formation in Kombination mit der Zahnbreite sind Aussagen über die Rundlauf-, Konzentrizi-  
täts- und Koaxialitätsabweichung der idealgeometrischen Hülle möglich (siehe Bild 4). Das  
Verfahren ist bei evolventischen Passverzahnungen grundsätzlich auch für schrägverzahnte  
Kombinationen geeignet.

#### 4. Überprüfung des Verfahrens mit simulierten Test-Datensätzen

Die Überprüfung des Verfahrens erfolgte zunächst für simulierte Test-Datensätze mit be-  
kannten Abweichungen der effektiven Zahndicke/Lückenweite und der Lage. Dafür wurden  
Teilungspunkte für Wellen und Naben in einem Stirnschnitt auf Höhe der Bezugsebene mit  $z = 0\text{mm}$  simu-  
liert. Sie stellen Oberflächenpunkte an jeder linken und rechten Flanke dar und  
weisen gegenüber den Konstruktionsparametern in Bild 9 einzig eine Abweichung der effek-  
tiven Zahndicken/Lückenweiten auf dem Teilkreis auf:

1. Zahndicke/Lückenweite basierend auf Konstruktionsparameter:  $s_v/e_v = 1,946\text{mm}$
2. Zahndicke/Lückenweite größer:  $s_v/e_v = 2,085\text{mm}$
3. Zahndicke/Lückenweite kleiner:  $s_v/e_v = 1,807\text{mm}$

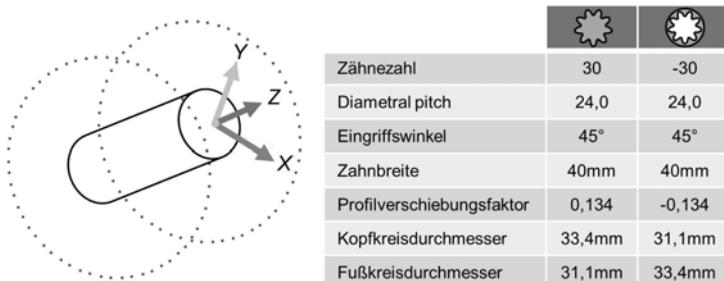


Bild 9: 3D-Ansicht eines simulierten Test-Datensatzes mit Teilungspunkten an jeder linken und rechten Flanke und den Konstruktionsparametern

Es erfolgt eine Translation dieser Teilungspunkte auf zwei verschiedene Höhen:  $z_1 = -5\text{mm}$   
und  $z_2 = -35\text{mm}$ . Daraus ergeben sich sechs verschiedene Test-Datensätze ähnlich zu  
Bild 9. Mit diesen Test-Datensätzen rekonstruiert das Verfahren bei vorsätzlichen Transla-  
tionen um bis zu 10mm und Rotationen um bis zu 10° erfolgreich die vorher bekannten Kenn-  
werte.

## 5. Auswertung der Messung einer realen Nabe

An dieser Stelle erfolgt die Analyse der Auswertung einer realen Messung. Es handelt sich um einen Gut-Lehrring einer evolventischen Passverzahnung für die Prüfung von Wellen (siehe Bild 3a). Der untersuchte Gut-Lehrring ist nicht zeichnungskonform und wurde von der Firma FRENCO GmbH in Altdorf zur Verfügung gestellt. Die Konstruktionsparameter entsprechen den Test-Datensätzen der simulierten Nabe aus Bild 9. Die Messung selbst umfasst Teilungspunkte in jeder Lücke links/rechts in der Mitte der Zahnbreite, drei Profile links/rechts auf 7,5%, 50% und 92,5% der Zahnbreite an neun Lücken und zwei Flankenlinien links/rechts auf 31,5mm und 32,7mm Durchmesser an neun Lücken. Sie erfolgte im Uhrzeigersinn.

Die computergestützte Lehrung berücksichtigt alle auf den Zahnflanken vorhandenen erfassten Punkte. Dabei ist jede beliebige Kombination aus erfassten Punkten auf Profilen, Flankenlinien und Teilungspunkten möglich. Tabelle 1 fasst die Ergebnisse zusammen. Prinzipiell ist zu erkennen, dass je mehr erfasste Fläche der Zahnbreite berücksichtigt wird, die effektive Lückenweite kleiner wird. Die Auswahl der Teilungspunkte in Kombination mit einer dreidimensionalen Auswertung ist nicht sinnvoll, da die erfasste Fläche näherungsweise in eine Ebene liegt. Die zwei- und dreidimensionale Auswertungen unterscheiden sich an dieser Stelle bei der effektiven Lückenweite nur im Sub-Mikrometerbereich: Die Erklärung liegt in der Ausrichtung der Verzahnung. Sie erfolgte direkt in der Verzahnung auf Basis zweier Rundlaufmessungen und nicht zu einer Bezugsachse. Dies ist ein übliches Vorgehen für Lehrringe ohne direkte Lauf-Bezugsflächen.

Tabelle 1: Ergebnisse der computergestützten Lehrung für den zwei- und dreidimensionalen Fall (\*:in mm)

2D	minimale Lückenweite*	maximale Lückenweite*	effektive Lückenweite*	3D	minimale Lückenweite*	maximale Lückenweite*	effektive Lückenweite*
Teilungspunkte	1,939	1,943	1,938				
Profilpunkte	1,928	1,931	1,928		1,928	1,931	1,928
Flankenlinienpunkte	1,889	1,965	1,877		1,889	1,966	1,877
Kombination	1,889	1,977	1,877		1,889	1,978	1,877

Tabelle 1 zeigt Ergebnisse, bei denen die effektive Lückenweite mit zunehmender erfasster Zahnbreite geringer wird. Die Erklärung liegt in der Formabweichung der Flanken. Bild 10 zeigt beispielhaft die grafischen Auswertungen der Profile und Flankenlinien in einer Lücke

des nicht zeichnungskonformen Lehrrings. Die Einzelabweichungen liegen im Bereich weniger Mikrometer. Es ist allerdings in Bild 10b zu erkennen, dass die Zähne eine Hohlballigkeit aufweisen. Dies führt dazu, dass bei einer Bewertung auf Basis der Teilungspunkte die effektive Lückenweite am größten ist. Die über die z-Höhe verteilten drei Profile ergeben eine Hülle, die mit einer kleineren effektiven Lückenweite anliegt. Neben der Tatsache, dass die Hülle an den Flankenlinien über die gesamte Zahnbreite mit noch kleinerer effektiver Lückenweite anliegt, ist in Bild 10b auch ein vorstehender Grat zu erkennen, der die effektive Lückenweite zusätzlich verringert. Dies erklärt warum dieser Lehrring nicht zeichnungskonform ist.

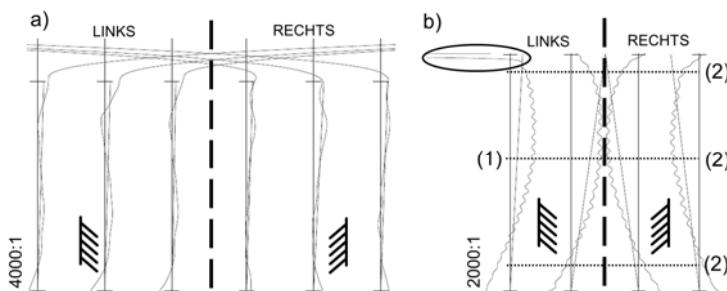


Bild 10: Grafische Auswertung der Messung von Profil und Flankenlinien links/rechts in einer Lücke mit Angabe der Materialseite: a) Profile auf drei Höhen und b) Flankenlinien auf zwei radial unterschiedlichen Positionen mit z-Positionen der Teilungspunkte (1) und Profile (2)

## 6. Blick in die Zukunft – Null-Fehler-Montage mit Industrie 4.0

Abschnitt 2 beschreibt das bekannte Vorgehen beim mechanischen Lehren. Das Ergebnis ist eine Aussage über die Paarungsfähigkeit. Ein Kennwert für die effektive Zahndicke/Lückenweite ergibt sich nicht. Eine Aussage über die Transformation, die ein Prüfer manuell ermittelt hat, existiert ebenso wenig. Das hier vorgestellte neue Verfahren füllt genau diese Lücke, denn das Ergebnis ist eine Aussage über die effektive Zahndicke/Lückenweite der Welle oder Nabe. Damit ist zunächst überprüfbar, ob das Ergebnis innerhalb der vorgegebenen Toleranzen liegt. Neben der Möglichkeit basierend auf diesem Kennwert eine Qualitätsregelkarte zu führen, kann zusätzlich die bei der computergestützten Lehrung berechnete Transformation ausgewertet und mit diesem Kennwert verknüpft werden. Das ist aber nur sinnvoll, wenn jedes Bauteil eine eigene Seriennummer erhält. Für Verzahnungen ist zusätzlich der für die Ausrichtung erforderliche Zahn zu markieren und festzuhalten, ob im oder

gegen den Uhrzeigersinn gemessen wurde. Folgt man dem Gedanken von Industrie 4.0, so ist durch diese Verknüpfung bislang unabhängiger Informationen die Möglichkeit einer Null-Fehler-Montage entstanden. Durch eine Analyse der gespeicherten Informationen können Wellen und Naben ausgewählt werden, bei denen im gefügten Zustand die Lauf-Abweichung der Welle und das Drehflankenspiel näherungsweise Null sind (Bild 11). Zusätzlich kann bei ausreichender Anzahl Bauteile die Passung eingestellt werden.

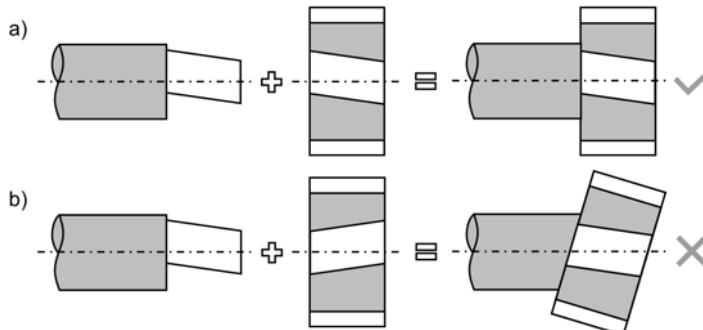


Bild 11: Prinzip der Null-Fehler-Montage am Beispiel einer Welle mit aufgestecktem Zahnrad:  
a) die gewählte Kombination minimiert die Abweichungen und b) die gewählte Kombination maximiert die Abweichungen

## 7. Literaturverzeichnis

- [1] DIN 5480-15, 2006. Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser – Teil 15: Qualitätsprüfung.
- [2] DIN 867, 1986. Bezugsprofile für Evolventenverzahnungen an Stirnrädern (Zylinderrädern) für den allgemeinen Maschinenbau und den Schwermaschinenbau.
- [3] DIN 5480-1, 2006. Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser – Teil 1: Grundlagen.
- [4] DIN 5480-2, 2006. Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser – Teil 2: Nennmaße und Prüfmaße.
- [5] ISO 4156-1, 2005. Passverzahnungen mit Evolventenflanken - Metrische Module, Flankenzentriert - Teil 1: Grundlagen.
- [6] ISO 4156-2, 2005. Passverzahnungen mit Evolventenflanken - Metrische Module, Flankenzentriert - Teil 2: Abmessungen.

- [7] DIN 5481, 2005. Passverzahnungen mit Kerbflanken.
- [8] DIN 5472, 1980. Keilwellen- und Keilnaben-Profile mit 6 Keilen – Innenzentrierung und Maße.
- [9] Dutschke, W.; Keferstein, C. P.: Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren. 6. Auflage. Teubner Verlag, 2007. ISBN 978-3835101500.
- [10] DIN 7150-2, 1977. ISO-Toleranzen und ISO-Passungen – Prüfung von Werkstück-Elementen mit zylindrischen und parallelen Paßflächen.
- [11] DIN 3960, 1987. Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung.
- [12] Lotze, W.: Zahnradmessung mit Koordinatenmessgeräten. 3. Auflage. 2006. ISBN 3-00-015962-2.
- [13] Balzer, F., Lübke, K.: Optische Messung von Pass- und Steckverzahnungen auf einem Koordinatenmessgerät. In: 6. GETPRO Kongress – Die Zukunft der Getriebeproduktion 2017, Würzburg, Deutschland. 28. – 29.03.2017, Band 1, S. 224-238.
- [14] DIN EN ISO 16610-40:2016-12 (D) Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 40: Morphologische Profilfilter: Grundlegende Konzepte (ISO 16610-40:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16610-40:2015.
- [15] Srinivasan, V.: Discrete Morphological Filters for Metrology, Proceedings of the 6th IMEKO ISMQC Symposium on Metrology for Quality Control in Production, TU Wien, Austria, 08.-10.09.1998, S. 623-628.
- [16] Lotze, W.; Lunze, U.: Tolerance-Fit of geometric elements and sculptured surfaces and profiles. In: XVI IMEKO World Congress, Vienna, Austria, 25.-28.09.2000, Vol. VIII, S.173-180.

## 8. Danksagung

Die Autoren bedanken sich im Namen der Firma Hexagon Metrology GmbH bei der Firma FRENCO GmbH für die Bereitstellung des nicht zeichnungskonformen Lehrarrings und für die Einwilligung zur Publikation der Ergebnisse.

# Konzept zur Auswertung vollständig gemessener Verzahnungen

B. Eng. **Philip Jukl**, FRENCO GmbH, Altdorf bei Nürnberg

## Kurzfassung

Das Messen aller Zahnflanken ist für viele Anwendungen interessant. Neben der taktilen Topografie an allen Zähnen gibt es heute auch optische Verfahren, die Verzahnungen vollständig erfassen.

Es wird ein Konzept zum Berechnen von 3D-Kennwerten vorgestellt. Genormte Kennwerte beziehen sich auf Schnitte in Profil- und Flankenlinienrichtung. Es kann jedoch gezeigt werden, dass die Bewertung der 3D-Kennwerte auf Basis der Normen und Regelwerke erfolgen kann.

Außerdem wird vorgestellt, was systematische Abweichungen sind und wie rechnerische Korrekturen eine Aussage über die Qualität des Fertigungsprozesses ermöglichen.

## Abstract

Measuring all tooth flanks is interesting for many applications. Nowadays, in addition to the tactile topography on all teeth, optical methods acquire gears completely.

A concept for the calculation of 3D parameters is presented. Standardized values refer to profile or helix directed sections. However, it can be shown that the assessment of the 3D characteristic values can be based on the standards and regulations.

In addition, it is explained what systematic deviations are and how computed corrections enable the assessment of the manufacturing process' quality.

## 1. Motivation

In der Verzahnungsmesstechnik ist im Augenblick ein Wandel zu beobachten. Noch bis vor etwa drei Jahren wurde die optische Verzahnungsmesstechnik als zu teuer, zu ungenau und zu kompliziert abgetan. Trotzdem gibt es mittlerweile mehrere Unternehmen, die entsprechende Geräte anbieten [1] [2] [3]. Dabei sind die Unternehmen nicht unbedingt auf Verzahnungen spezialisiert, sondern auf das Digitalisieren von Objekten in Form von Punktewolken. FRENCO beschäftigt sich seit längerem mit der Frage, wie mit Punktewolken von Verzahnungen umzugehen ist [4]. Früher wurde bereits erläutert, welche Arten von Punktewolken es gibt und wie die genormten Kennwerte über die gesamte Verzahnung dargestellt werden können [5]. In diesem Vortrag wird ein Konzept zur Qualitätsbewertung vollständig gemessener Verzahnungen vorgestellt. Darüber hinaus wird gezeigt, wie Abweichungsursachen erkannt werden können und somit eine Qualitätsbewertung des Bearbeitungsprozesses möglich wird.

## 2. Ausgangspunkt

Die REANY Software von FRENCO erlaubt das Einlesen der Messdaten taktil oder optisch aufgenommener Zahnflanken. Dabei werden die Punkte auf das übliche Koordinatensystem (Wälzweg, Zahnbreite, Abweichung senkrecht zur Evolente) umgerechnet. Die Nominalzahnflanke ist somit eine ebene Fläche. Abweichungen werden zusätzlich farblich dargestellt. Rot zeigt Abweichungen in Richtung Materialminus, Blau in Richtung Materialplus. Schnittpunkte mit der nominalen Zahnflanke sind weiß dargestellt (Bild 1).

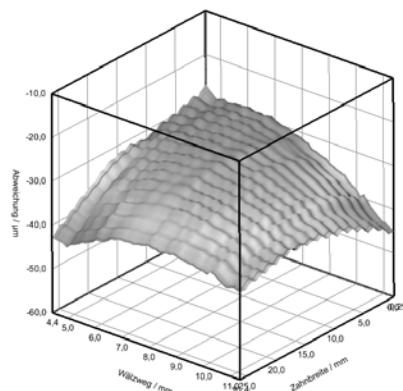


Bild 1: Darstellung einer Zahnflanke mit Abweichungen

Stellt man alle Zahnflanken nebeneinander dar, erhält man eine Übersicht über die Gesamtverzahnung (Bild 2). Diese Werte sind der Ausgangspunkt für alle weiteren Auswertungen.

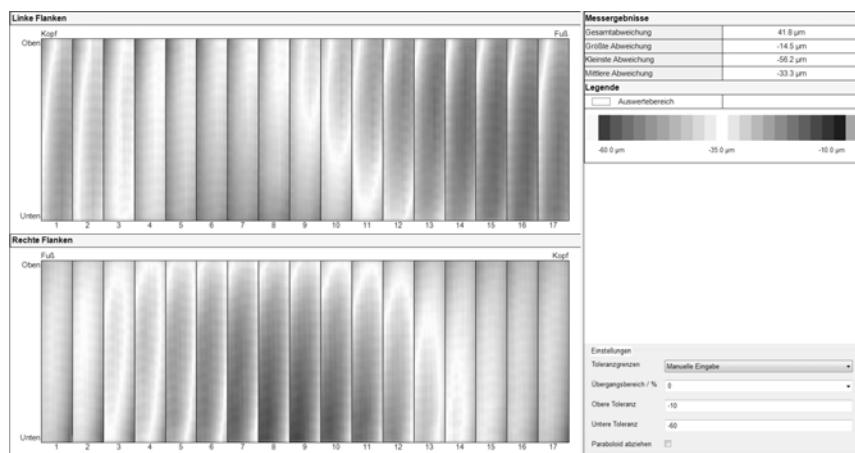


Bild 2: Übersicht über die Abweichungen aller Zahnflanken

### 3. Werkstückqualität - Bewertung mit 3D-Kennwerten

Der Ansatz, statt der üblichen 2D-Kennwerte 3D-Kennwerte zu berechnen, ist nicht neu [6] [7]. Bei FRENCO wird ein ähnlicher Ansatz wie bei [6] verfolgt. Jede Zahnflanke wird mit einem Paraboloid approximiert.

$$f(x, y) = Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F$$

Die Koeffizienten korrelieren mit folgenden Verzahnungsparametern:

A: Profilballigkeit

D: Profilwinkel

B: Flankenlinienballigkeit

E: Flankenlinienwinkel

C: Verschränkung

F: Versatz (ähnlich der Teilung)

Somit erhält man für jede Zahnflanke sechs Kennwerte. Im folgenden Beispiel sind die üblichen 2D-Kennwerte und die aus dem Paraboloid gewonnenen 3D-Kennwerte einer mit Balligkeit modifizierten Schrägverzahnung mit 17 Zähnen gegenübergestellt. Die Verzahnung wurde durch Wälzschleifen hergestellt. Ein Vergleich der Kennwerte zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (Bild 3 / Bild 4).

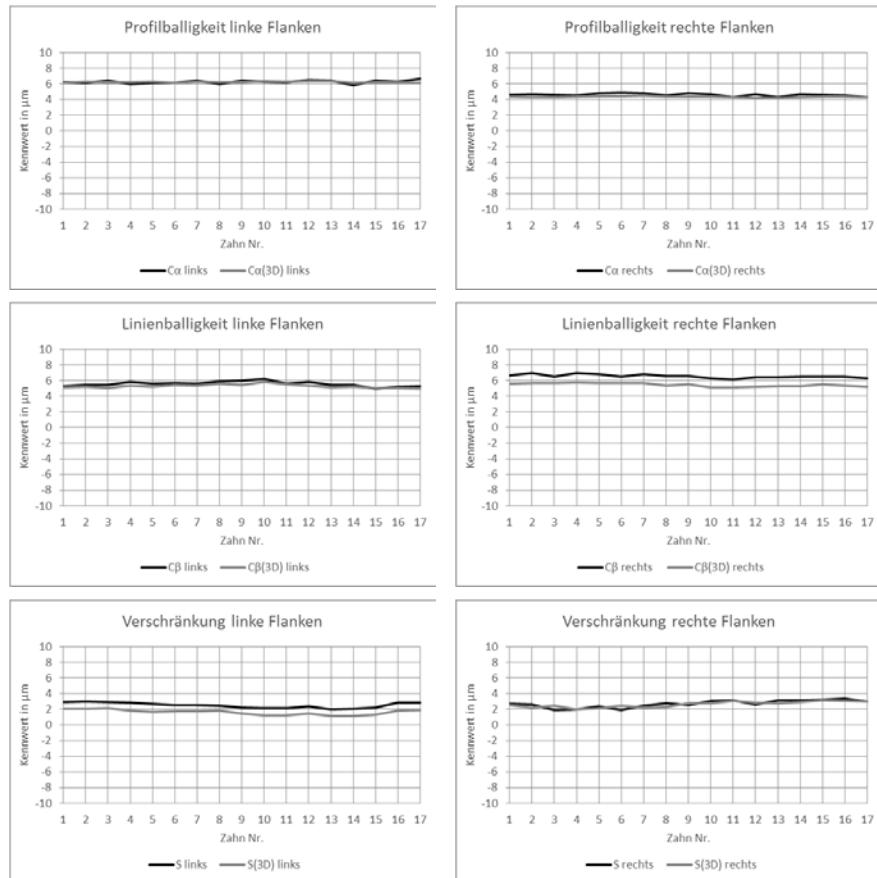


Bild 3: Vergleich zwischen 2D- und 3D-Kennwerten (1)

Zur Berechnung der 2D-Verschränkung wurde jeweils die Differenz zwischen der Flankenlinie am Kopf und der Flankenlinie am Fuß gebildet. Die Verschränkung ist fertigungsbedingt. Sie entsteht typischerweise bei wälzgeschliffenen Schrägverzahnungen mit Breitenballigkeit.

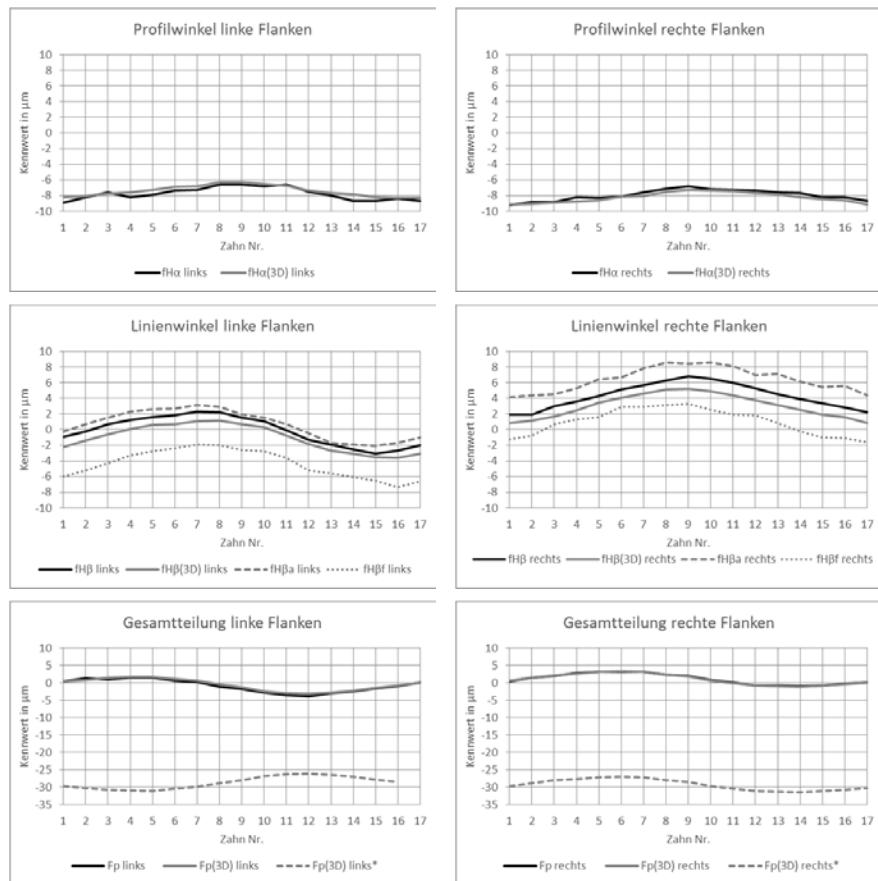


Bild 4: Vergleich zwischen 2D- und 3D-Kennwerten (2)

Die Kennwerte der Linienwinkel unterscheiden sich durchschnittlich um etwa 1 μm. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Durchmesser, an der die Standardmessung der Linie durchgeführt wurde, näher am Kopf liegt. Durch die Verschränkung ist die Winkelabweichung

dort größer. Sieht man sich die Winkelabweichungen am Kopf ( $fH\beta a$ ) und am Fuß ( $fH\beta f$ ) an, ist festzustellen, dass der Paraboloid Kennwert in etwa dazwischen liegt.

Die Kurven der 3D-Gesamtteilung wurden für den Vergleich angepasst. Tatsächlich wurde der Versatz der Zahnflanken zum Nominalwert berechnet ( $Fp(3D)^*$ ). Weil das Maß der Verzahnung kleiner ist, liegen die Kurven im negativen Bereich. Außerdem ergeben sich für die linken Flanken bei Berechnung des Koeffizienten Werte mit umgekehrtem Vorzeichen.

Grundsätzlich ist zu erkennen, dass eine Qualitätsbewertung mit den 3D-Kennwerten auf Basis der vorhandenen Regelwerke sehr gut möglich ist. Statt der Bewertung einzelner Schnitte in Profil- oder Flankenlinienrichtung erhält man jedoch eine Aussage über die gesamte Zahnflanke.

Für jeden 3D-Kennwert wird ein eigenes Diagramm erstellt, das die Werte über alle Zähne zeigt. In Bild 5 sind beispielhaft die ermittelten 3D-Flankenlinienballigkeiten dargestellt. Die geforderte Modifikation beträgt  $5 \mu m$ , die Toleranz  $\pm 3 \mu m$ .

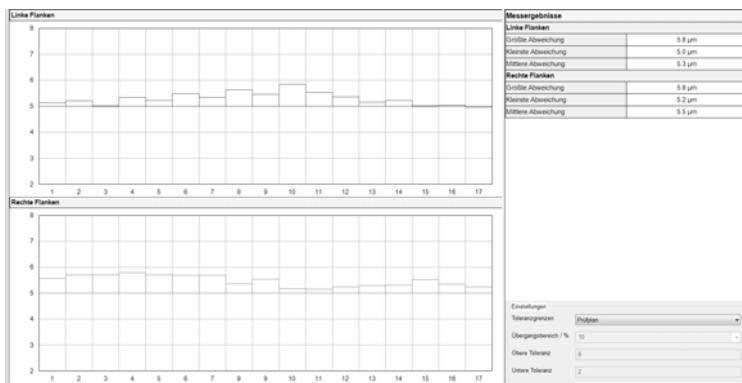


Bild 5: Bewertung der Flankenlinienballigkeit auf Basis der approximierten Paraboloide

#### 4. Prozessqualität - Definition von systematischen Abweichungen

Statt der Qualitätsbewertung des Werkstücks kann mit Hilfe der großen Informationsfülle die Qualität des Fertigungsprozesses bewertet werden. Dazu ist es notwendig, die Daten hinsichtlich systematischer Abweichungen zu analysieren.

Eine systematische Abweichung ist eine Werkstückabweichung, die einem konkreten Fehler bei der Bearbeitung zugeordnet werden kann. Systematische Abweichungen lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen: dynamische und statische Abweichungen (Bild 6).

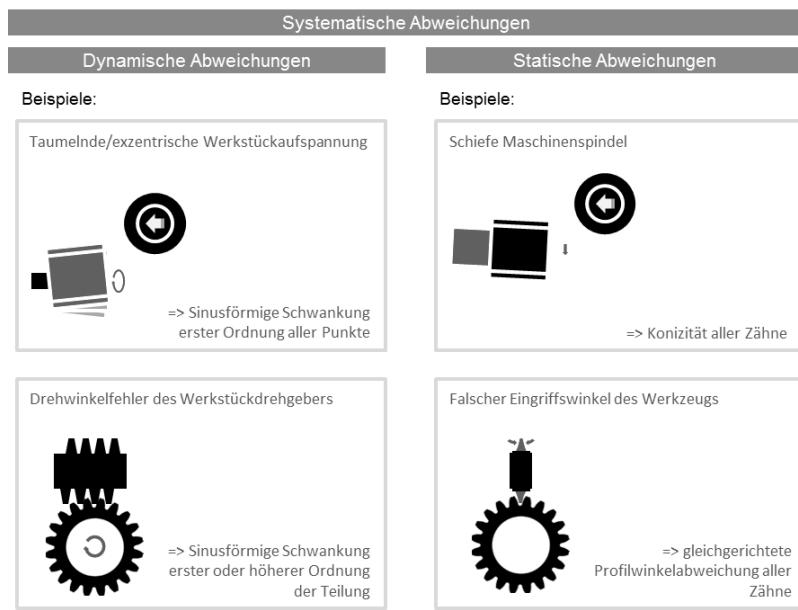


Bild 6: Einteilung systematischer Abweichungen mit Beispielen

Dynamische Abweichungen zeichnen sich dadurch aus, dass sich die Flanken während einer Umdrehung einem bestimmten Muster folgend verändern. Ihre Ursachen sind auf Fehler der Rotationsachsen zurückzuführen, die bei der Bearbeitung beteiligt sind. Diese Fehler wiederholen sich einmal oder mehrmals pro Werkstückumdrehung und führen so zu einer periodischen Abweichung über alle Zahnflanken. Eine exzentrische oder taumelnde Werkstückaufspannung verursacht beispielsweise eine sinusförmige Schwankung der Punkte über alle Zähne. Statische Abweichungen treten am Werkstück in jeder Lücke gleichermaßen auf. Linke und rechte Flanken können zwar unterschiedlich aussehen, doch die Sys-

matik ist bei gleichgerichteten Flanken gleich. Solche Abweichungen werden durch einen Fehler in der Fertigungsmaschine erzeugt, der während der gesamten Fertigungszeit oder zumindest während des letzten Schnitts konstant ist. Eine schiefliegende Maschinenspindel führt zum Beispiel zu einer Konizität der Zähne.

Die Suche nach systematischen Abweichungen setzt die Kenntnis der Fertigungsmethode voraus. Eine Ausnahme bildet die Lageabweichung der Verzahnung zu ihrer Bezugsachse. Sie existiert bei allen Laufverzahnungen und wird zum Beispiel durch eine fehlerhafte Werkstückaufspannung verursacht.

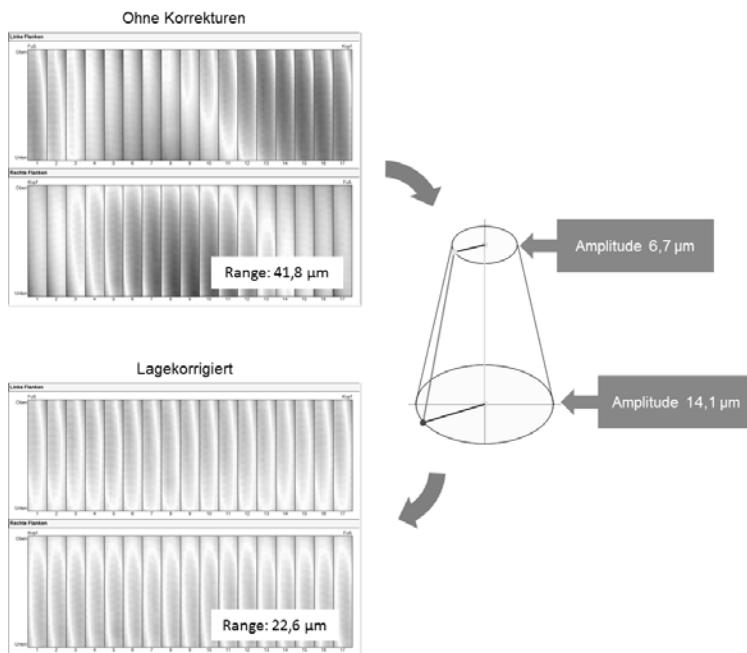


Bild 7: Korrektur der systematischen Lageabweichung bei einer Schrägverzahnung

Die REANY Software analysiert die Daten hinsichtlich systematischer Abweichungen und ermöglicht rechnerische Korrekturen. So ist der Einfluss der jeweiligen systematischen Abweichung auf das Messergebnis zu sehen.

Das Beispiel in Bild 7 zeigt die bereits bekannte Schrägverzahnung. Eine Analyse der Lageabweichung zur Verzahnungsachse ergibt oben eine Amplitude von 6,7 µm und unten eine Amplitude von 14,1 µm. Die Phasen sind annähernd gleich (oben 246° / unten 243°, bezogen auf die Mitte der ersten Lücke). Vor der Lagekorrektur beträgt der Abweichungsrange über alle Punkte 41,8 µm. Nach der Lagekorrektur sind es 22,6 µm. Durch eine genauere Ausrichtung des Aufnahmedorns ist demnach theoretisch eine deutliche Qualitätssteigerung möglich.

Das Werkstück weist eine weitere systematische Abweichung auf. Bild 8 zeigt die 3D-Werte der Profilwinkelabweichung. Die Werte liegen in diesem Fall nahe der unteren Toleranzgrenze. Durch Mittelwertbildung wird der Korrekturwert für die Profilwinkel ermittelt. Die rechnerische Korrektur zeigt schließlich das theoretisch bestmögliche Ergebnis, das nur noch unsystematische Einflüsse enthält.

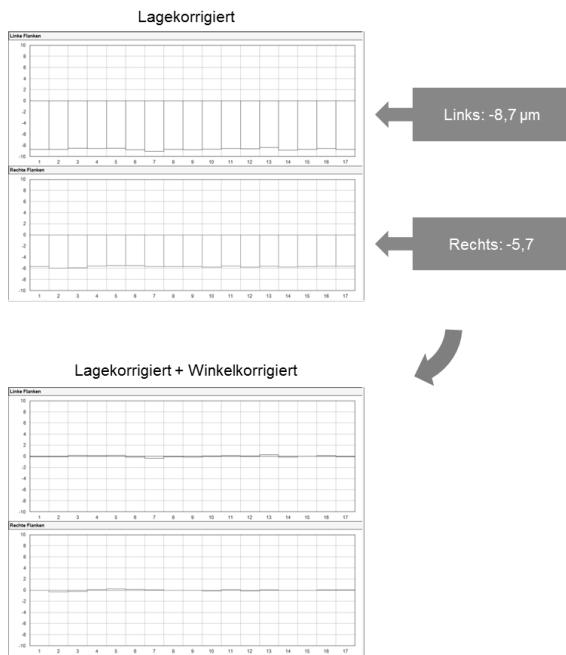


Bild 8: Korrektur der systematischen Profilwinkelabweichung

Wie bereits erwähnt, können weitere systematische Abweichungen definiert werden, die typischerweise beim verwendeten Fertigungsverfahren auftreten. Nach jeder rechnerischen Korrektur einer systematischen Abweichung ist eine Neubewertung der Werkstückqualität möglich. Die Qualität des Fertigungsprozesses kann daran gemessen werden, welche kleinste Qualitätsstufe durch Korrektur der vermeidbaren, systematischen Abweichungen erreichbar ist. Die Prozessqualität ergibt sich dann aus der Überlagerung der unsystematischen und somit nicht steuerbaren Abweichungen (Bild 9).

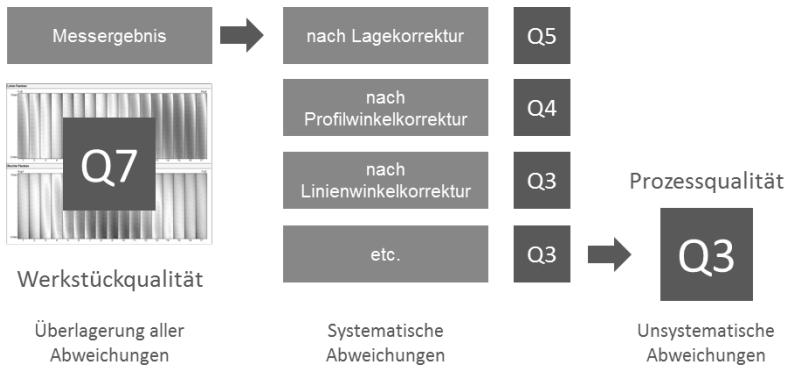


Bild 9: Prinzip zur Beurteilung der Prozessqualität

Bei dieser Methode gilt es zwei Dinge zu bedenken. Erstens spielt die Genauigkeit des Messverfahrens eine entscheidende Rolle. Schließlich ist die auf diese Weise berechnete Prozessqualität eine Überlagerung aus der Ungenauigkeit von Fertigungs- und Messverfahren. Das ist deshalb erwähnenswert, weil unsere bisherige Erfahrung zeigt, dass bei optisch erfassten Daten mit einer größeren Streuung der Einzelpunkte zu rechnen ist. Zweitens kann das Ergebnis für die Prozessqualität nur so gut sein wie das Modell der systematischen Abweichungen, das den Fertigungsprozess abbildet. Systematische Abweichungen, die nicht vom Modell erfasst und damit nicht korrigiert werden, gehen in die Bewertung der Prozessqualität mit ein.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die REANY Software ermöglicht das Einlesen und Auswerten vollständig erfasster Verzahnungen. Die große Informationsfülle bietet Potential für zahlreiche Auswertungen und Analysen.

Es wurde eine Berechnung von 3D-Kennwerten vorgestellt, deren Ergebnis sich nur geringfügig von den üblichen (2D-)Kennwerten unterscheidet. Der Vorteil ist, dass die gesamte Zahnflanke bewertet wird.

Bei Kenntnis des Fertigungsprozesses können die typischerweise auftretenden, systematischen Abweichungen bestimmt werden. Durch rechnerische Korrekturen werden sie vom Messergebnis eliminiert. Übrig bleibt das theoretisch bestmögliche Ergebnis, das sich nur noch aus unsystematischen Abweichungen zusammensetzt. Diese spiegeln die Prozessqualität wider.

Die Methodik, systematische Abweichungen zu finden, dient nicht nur der Qualitätsbewertung, sondern schließlich auch der Ursachenforschung. Das Ermitteln der systematischen Abweichungen ist die Grundlage dafür. Mittelfristig wird eine Ausgabe angestrebt, die dem Bediener klare Anweisungen gibt, welche Korrekturen an der Werkzeugmaschine nötig sind, um Verzahnungen besserer Qualität herzustellen. Langfristig wird ein vollautomatisches Korrekturkonzept im Sinne einer echten Closed-Loop-Methode angestrebt.

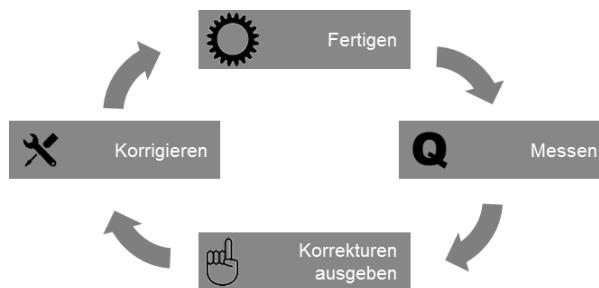


Bild 10: Closed-Loop Methode zur Verbesserung der Verzahnungsqualität

- [1] MS3D: Getriebe in Rekordzeit inspizieren, in: Produktion 10/2016, März 2016
- [2] Nikon Metrology introduces new HN-C3030 3D measuring system,  
[www.tctmagazine.com](http://www.tctmagazine.com), aufgerufen am 16.08.2016
- [3] Verzahnungsmesssystem 300GMSL von Gleason - Laser revolutioniert Verzahnungsmessung, [www.qz-online.de](http://www.qz-online.de), aufgerufen am 18.05.2017
- [4] Och, R.: Die Verzahnung als Regelgeometrie, VDI-Bericht 2148, 2011
- [5] Jukl, P.: Messpunktewolken bei Verzahnungen, VDI-Bericht 2236, 2014
- [6] Schmitt, R.: 3D-Abweichungsanalyse komplexer Zahnflankenflankengeometrien - Spreu vom Weizen trennen, in: QZ 10/2005,
- [7] Stöbener, D.: Areal parameters for the characterisation of gear distortions, in: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 43, No. 1-2, Januar 2012

# Einsatz optischer Sensoren in der Verzahnungsmesstechnik

## Systematische Qualifizierung an Rauheitsverkörperungen

Prof. Dr.-Ing. **M. Stoltz, F. Breutner, A. Haberkern, M. Landenberger, L. Schüller**, Hochschule Heilbronn, Künzelsau

### Kurzfassung

Optische Sensoren werden heute in der Verzahnungsmessung nur vereinzelt eingesetzt. Ausgehend von den Eigenschaften optischer Sensoren und den Anforderungen der Verzahnungen wird mit dem OWIS-Diagramm eine Methode dargestellt, mit der man optische Sensoren für einen Einsatz in der Verzahnungsmessung qualifizieren oder systematisch miteinander vergleichen kann.

### 1. Motivation

„Optische Sensoren sind schnell, genau und rückwirkungsfrei“, so die landläufige Vorstellung, wenn es um die Auswahl eines Sensors für eine Messaufgabe geht und es zeigt sich in vielen Anwendungen tatsächlich auch, dass mit der Miniaturisierung und Funktionsintegration dieser elektro-optischer Komponenten ganz neue Einsatzgebiete erschlossen werden können. Dennoch gibt es mit der Verzahnungsmesstechnik noch immer einen Bereich der industriellen Messtechnik, in der optische Verfahren recht wenig verbreitet sind.

Dies liegt jedoch nicht daran, dass es nicht versucht wurde: Bereits auf der Control 2011 stellte die Firma Klingelnberg die Adaption eines chromatisch-konfokalen Sensors auf einer P-Maschine vor. Damit wurden Formelemente an Verzahnungen hochauflösend gemessen und ausgewertet. Gründe, dass dieser Sensor nicht in der Breite eingesetzt wurde, waren sicher der relativ hohe Preis und die geringere geometrische Flexibilität (z.B. bei Innenverzahnungen), ausschlaggebend war aber insbesondere die fehlende Genauigkeit des verwendeten Sensors bei realen technischen Verzahnungen unter Einsatzbedingungen der Serienfertigung.

Die Diskrepanz zwischen Nenn-Genauigkeit und erreichbarer Genauigkeit führte zu weiteren Untersuchungen, mit denen ein systematischer Weg gefunden werden sollte, optische Sensoren für einen Einsatz in der Verzahnungsmesstechnik zu qualifizieren.

Im Folgenden sollen zunächst die Problematiken der Vermessung von verzahnten Bauteilen herausgearbeitet werden, bevor die Systematik anhand eines Laser-Triangulationssensors vorgestellt wird.

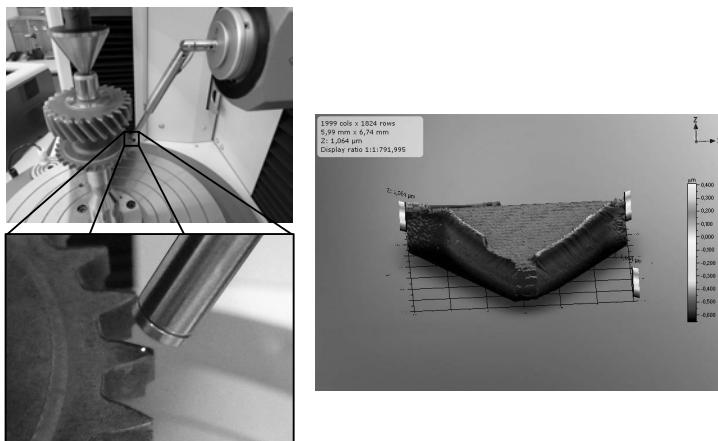


Bild 1: Optische Vermessung von Zahnrändern mit einem chromatisch-konfokalen Sensor

## 2. Herausforderungen bei der optischen Vermessung von Verzahnungen

Optische Sensoren nutzen die Eigenschaften des Lichts:

- Konstante Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
- Transversalwelle, die eine Wellenlänge, Phase und eine Schwingungsebene besitzt
- Laserlicht ist eine kohärente Strahlung, d.h. monochromatisch und gleichphasig
- Es breitet sich im Vakuum linear aus, beim Kontakt mit einem Material kann es zu Absorption, Reflexion, Brechung, Beugung und Streuung kommen, bei Überlagerung mit einer anderen Lichtwelle zu Interferenz

Bei den meisten Sensorsystemen unterscheidet man einen Beleuchtungspfad und einen Beobachtungspfad. Eine Lichtquelle sendet Photonen aus, die üblicherweise gebündelt durch Linsensysteme auf das Messobjekt auftreffen und von dort zurück in den Sensor gelangen [1].

Dort werden sie von einem lichtempfindlichen Element in ein elektrisches Signal gewandelt. Beispielhaft ist dies in Abbildung 2 anhand eines Triangulationssensors beschrieben. Mit Hilfe einer Laserlichtquelle und einer Fokussoptik wird ein Lichtfleck auf das Messobjekt projiziert. Dieser Lichtfleck strahlt nun wiederum Licht ab (diffuse/ spiegelnde Reflexion), das

unter einem bestimmten Winkel auf einen Detektor trifft. Aus der Position des Lichtpunktes auf dem Detektor und aus der Distanz von Sender zum Detektor wird der Abstand zum Messobjekt berechnet.

Eine besondere Bedeutung hat dabei neben der Position des Punkts auf dem Detektor auch die Lichtintensität. Diese ist stark von den Oberflächeneigenschaften und dem Winkel abhängig, in dem das Licht auf das Messobjekt trifft.

Betrachtet man zunächst einmal die Oberflächeneigenschaften, so kann man zwischen diffuser und direkter (spiegelnder)

Reflektion sowie Mischformen unterscheiden. Abbildung 3 zeigt, wie die Rauheit einer Oberfläche einen Einfluss auf die Reflektionseigenschaften nimmt.

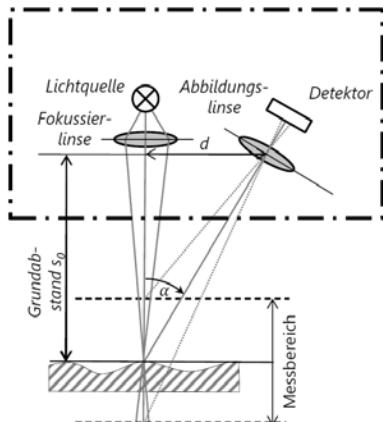


Bild 2: Aufbau eines Triangulationssensors

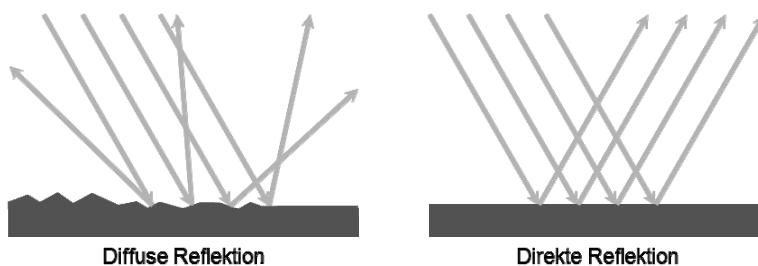


Bild 3: Reflektion an verschiedenen Oberflächen

Berücksichtigt man nun auch noch den Winkel, so kann man die reflektierende Fläche als Lichtquelle mit Richtcharakteristik betrachten, d.h. mit winkelabhängiger Lichtstärke. Beleuchtet man ein Material mit idealer diffuser Reflektion („lambertsches Material“) mit einem Laserpunkt, so erscheint dieser unabhängig von der Betrachtungsrichtung gleich hell. Beispiele für annähernd lambertsche Materialien sind weißes Papier oder Projektionswände.

Bei einem direkt reflektierenden Material, wie einem Spiegel, gilt „Einfallwinkel gleich Ausfallwinkel“, d.h. ein Lichtstrahl ist nur in der Reflektionsrichtung sichtbar. [2]

Bei den meisten technischen Oberflächen (spanend bearbeitete Metalle) findet man eine Mischreflektion, also eine Kombination. Abbildung 4 zeigt u.a. den Fall der Mischreflektion an einer geneigten Fläche. Man erkennt, dass die Strahlungsintensität zurück in den Beobachtungspfad hier abhängig von der Oberfläche und dem Winkel sehr klein werden kann.

Gerade in der Verzahnungsmesstechnik ändert sich der Reflektionswinkel jedoch in einem hohen Maß. Abbildung 5 zeigt oben die Messung eines Zahnrades mit einem optischen Sensor in Polarkoordinaten und unten die aus den Messwerten abgeleiteten Reflektionswinkel ( $0^\circ$  entspricht einem senkrechten Auftreffen, also dem für den Sensor optimalen Fall).

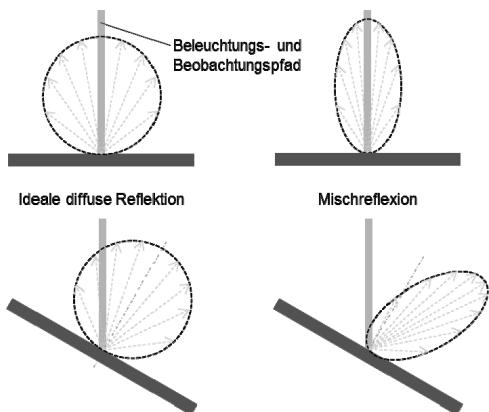


Bild 4: Reflektion an verschiedenen Oberflächen

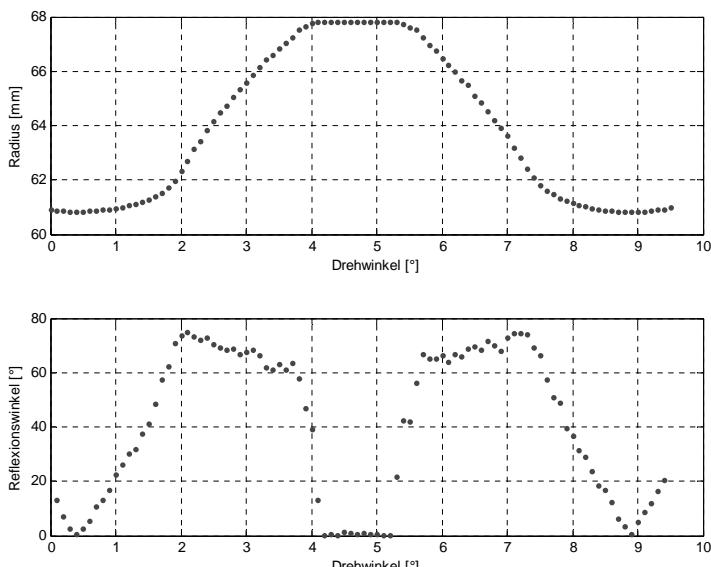


Bild 5: Berechnung der Reflektionswinkel eines Zahns aus einer Messung

Die Darstellung der Reflektionswinkel zeigt wie erwartet, dass im Zahnuß und -kopf gute Messbedingungen herrschen. Auf der Evolente, in der Nähe des Teilkreises, hat man einen Winkel von ca. 70°. Besonders interessant ist der Übergang vom Fußradius in die Evolente. Hier findet man die größten Winkel von knapp 80°, was einem fast senkrechten Auftreffen des Laserstrahls entspricht. Hier sind die größten Schwierigkeiten beim optischen Messen von Verzahnungen zu erwarten.

### 3. Charakterisierung von optischen Sensoren mit dem OWIS-Diagramm

Die Einflüsse der Winkel und der Eigenschaften der technischen Oberflächen an realen Verzahnungsbauteilen auf die Sensorgenaugkeit sind typischerweise nicht in den Datenblätter der Hersteller beschrieben. Teilweise wird, z.B. bei chromatisch-konfokalen Sensoren, ein sog. Grenzwinkel (z. B. STIL ENDO LINE  $\pm 5$  -24°, STIL Everest K1  $\pm 44$ ° [3]) angegeben. Der Anwender könnte nun davon ausgehen, dass dies die Winkelstellung ist, bis zu der die angegebene Genauigkeit erreicht werden kann. Beim Grenzwinkel wird jedoch nur noch so wenig Licht in den Sensor reflektiert, dass eine Auswertung nicht mehr möglich und kein Messwert mehr verfügbar ist. Eine geeignete Größe, um diesen Übergang zu charakterisieren ist die Intensitätsinformation des optischen Sensors, die typischerweise neben dem Messwert zur Verfügung gestellt wird. So liefert zum Beispiel der oben angesprochene chromatisch-konfokale Sensor bei einer Intensität von weniger als 10% keine Messwerte mehr.

Damit zeigt sich der zuvor angesprochene Zusammenhang zwischen:

- Oberflächeneigenschaften
- Winkel des Sensors zur Oberfläche
- Intensität des rückgestrahlten Lichts
- Genauigkeit der Sensorergebnisse

In Ermangelung der Informationen vom Hersteller sollte ein allgemeingültiges Verfahren geschaffen werden, mit dem ein optischer Sensor für bestimmte Messaufgaben qualifiziert werden kann, ohne hierfür Testmessungen an den entsprechenden Bauteilen machen zu müssen.

Es wurden dazu an verschiedenen Rauheitsverkörperungen Messungen in unterschiedlichen Winkelstellungen durchgeführt und die Intensität und die Streuung der Messwerte aufgenommen. Die Streuung wurde anstatt der Genauigkeit verwendet, da sie sich sehr einfach und transparent erfassen lässt. Die Ergebnisse einer solchen Messreihe können in Form

eines Oberflächen-Winkel-Intensitäts-Streuungs-Diagramm („OWIS-Diagramm“) visualisiert werden.

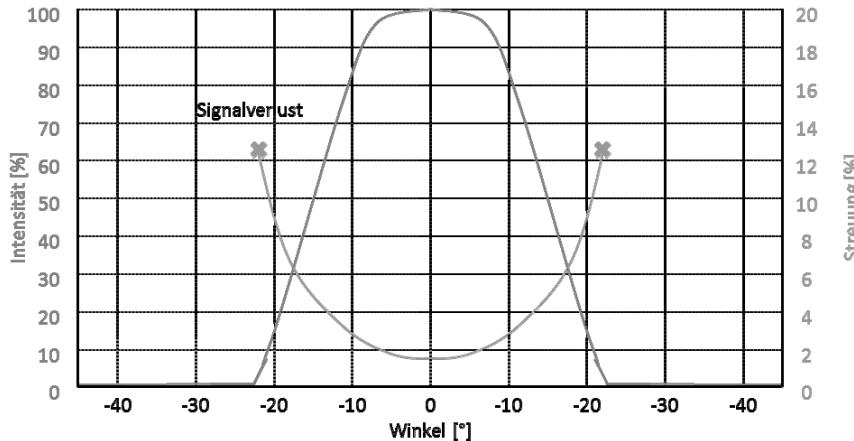


Bild 6: Typische Form eines OWIS-Diagramms (Chromatisch-konfokaler Sensor, matte Oberfläche, z.B. gehont)

Abbildung 6 zeigt ein solches Diagramm schematisch für einen chromatisch-konfokalen Sensor mit einer matten, diffus reflektierenden Oberfläche. Es zeigt sich, dass der Sensor sich wie bauartbedingt erwartet weitgehend symmetrisch verhält. Die hohe Genauigkeit wird nur im engen Umfeld einer senkrechten Messung erreicht. Bei  $10^\circ$  und mehr nimmt die Intensität deutlich ab und die Streuung der Messwerte zu. Ab ca.  $21^\circ$  ist die Intensität auf 10% abgefallen, die Streuung ist hier um Faktoren größer als bei  $0^\circ$ .

Verwendet man wie in Abbildung 7 gezeigt eine geschliffene Oberfläche, die stärker gerichtet reflektiert, so verändert sich das OWIS-Diagramm. Die Streuung bei senkrechter Messung ( $0^\circ$ ) ist teilweise kleiner, doch der Winkeleinfluss gewinnt schneller an Bedeutung, so dass der Grenzwinkel schon bei  $15^\circ$  erreicht wird.

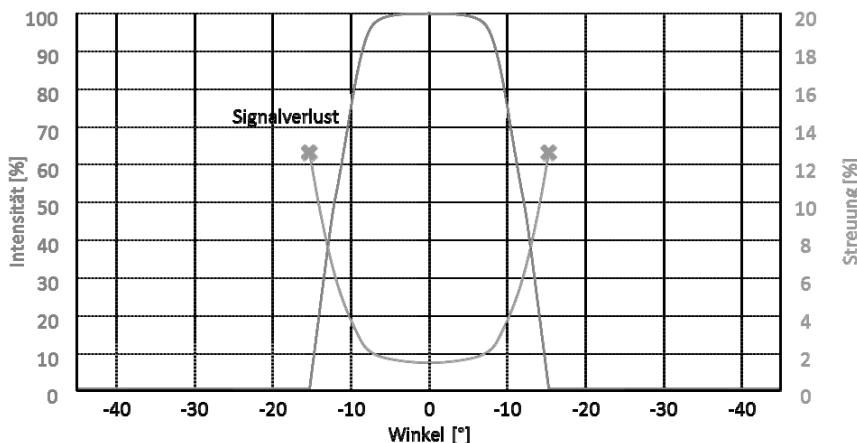


Bild 7: Typische Form eines OWIS-Diagramms (Chromatisch-konfokaler Sensor, geschliffene Oberfläche)

Mit diesen relativ einfachen Untersuchungen und den Überlegungen zu den Winkeln bei der Zahnradmessung (Abbildung 5) wird schnell klar, dass ein Sensor mit solchen Eigenschaften nur sehr eingeschränkt für eine Messung in der Verzahnung eingesetzt werden kann.

#### **4. Charakterisierung eines „intelligenten Lasertriangulationssensors“ mit dem OWIS-Diagramm**

Wie bereits angesprochen sind in der Verzahnungsmessung die Winkeländerungen und die damit einhergehenden Reflexionsänderungen des Lichts eine große Herausforderung. Der Sensor darf bei direkter Reflexion nicht überbelichtet werden (führt zu ungenauen Messungen) aber bei großen Winkeln auch nicht unterbelichtet (kein Messsignal). Mit den klassischen Verfahren der Bilderfassung und -auswertung sind hier nur sehr kleine Dynamiken erreichbar (ca. Faktor 10 zwischen kleinstem und größtem messbaren Signal).

Um die Dynamik im Hinblick auf die rückgestrahlte Lichtintensität zu erhöhen, verwendet die Firma Micro Epsilon in ihrem „intelligenten“ Laser-Triangulations-Sensor optoNCDT 2300 einen adaptiven Ansatz. Die Belichtungszeit des Detektors (Sensorzeile) wird so geregelt, dass ca. 70-80% der maximalen Intensität des Detektors erreicht werden. Erhöht sich der Winkel bei einer Messung, so erkennt der Sensor eine sinkende Intensität und erhöht automatisch die Belichtungsdauer. Umgekehrt stellt der Sensor sicher, dass es bei einer stärker

reflektierenden Fläche nicht zu einer Überbelichtung kommt. Die Grenze für die Länge der Belichtungszeit stellt allerdings die eingestellte Messrate dar. [4]

Der für die folgenden Messungen verwendete Sensor ILD 2300-10 hat einen Messbereich von 10 mm, der Messbereichsanfang ist 35 mm von der Vorderkante des Sensors entfernt. Nominell besitzt der Sensor eine Linearität von 2 µm und eine Auflösung von 0,15 µm. Interessanterweise wird kein Grenzwinkel angegeben. Die Messrate kann zwischen 1,5 kHz in Stufen bis 30 kHz eingestellt werden, mit halbiertem Messbereich sogar auf 49,1 kHz.

Der Sensor speichert Messwerte intern zwischen und bietet eine Reihe von Einstellmöglichkeiten zur Steuerung von Messwertaufnahme und -verarbeitung. So können sowohl auf der Ebene der Videobilder als auch auf Ebene der ermittelten Messwerte Filteralgorithmen angewendet und statistische Kennwerte ermittelt werden.

Zur Qualifizierung des Triangulationssystems wurde ein einfacher Messaufbau entwickelt, auf dem Prüflinge mit verschiedenen Rauheiten untersucht werden können (Abbildung 8).

Als Prüflinge wurden vier verschiedene spanend bearbeitete Rauheitsverkörperungen mit damit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen herangezogen (Tabelle 1, Abbildung 9).

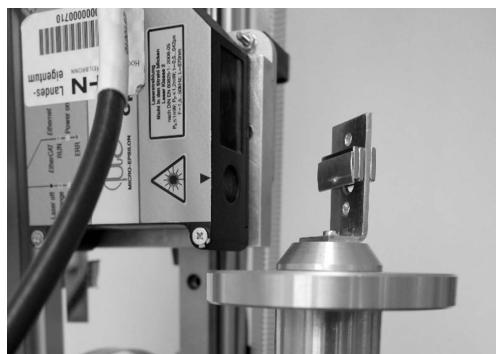


Bild 8: Messaufbau mit Rauheitsverkörperung

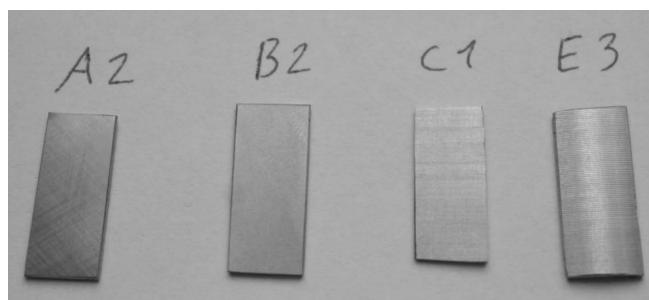


Bild 9: Ausgewählte Plättchen als Rauheitsverkörperungen

Die Plättchen wurden jeweils vertikal und horizontal eingespannt und vermessen, um Unterschiede aufgrund der Bearbeitungsrichtung zu erkennen.

Tabelle 1: Oberflächeneigenschaften der Messobjekte

Messobjekt	Bearbeitungsstruktur	Rautiefe $R_z$	Mittelrauwert $R_a$
A2	Flachläppen	1,0 µm	0,1 µm
B2	Flachschräufen	1,0 µm	0,1 µm
C1	Horizontalfräsen	2,5 µm	0,4 µm
E3	Längsdrehen	16 µm	3,2 µm

## 5. Ergebnisse der Untersuchung an den Rauheitsverkörperungen

Mit dem oben beschriebenen Messaufbau wurden die Prüflinge nun in 5° Schritten von -90° bis +90° gedreht und jeweils die Streuung und die Intensität der Messwerte an diesen Punkten ermittelt. Diese Messung wurde an verschiedenen Stellen der Proben wiederholt, in den vorliegenden Diagrammen an sieben Positionen. Die Messungen wurden statisch durchgeführt, um Fehler durch die Kinematik zu minimieren.

Die Messungen sind in den folgenden OWIS-Diagrammen dargestellt. Dabei sollen im Rahmen dieses Artikels jedoch nur die Ergebnisse für das Flachläppen (Probe A2) und das Flachschräufen (Probe B2) diskutiert werden, da diese Verfahren repräsentativer für ein hartfein bearbeitetes Zahnräder sind als Drehen und Fräsen. Die Diagramme dieser Bearbeitungsverfahren sind jedoch sehr ähnlich, doch es gibt hier einzelne Messpunkte mit einer deutlich höheren Streuung (Ausreißer), die sich wahrscheinlich durch die heterogenere Oberflächenstruktur ergeben.

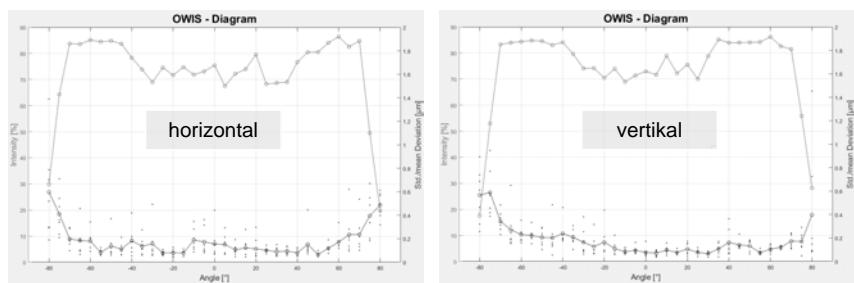


Bild 10: OWIS-Diagramm A2 (Flachläppen,  $R_z$  1,0 µm)

Am Beispiel von Abbildung 10, der flachgeläppten Probe, soll die Struktur des OWIS-Diagramms beschrieben werden. Auf der Abszisse sind die Winkel der Probe gegenüber dem Sensor angegeben, wobei ein Winkel von  $0^\circ$  für ein senkreiches Auftreffen des Laserstrahls steht. Bei  $90^\circ$  sind Strahl und Probe parallel, der Lichtfleck wird zur Linie, was die Messung sinnlos macht. Auf der linken Ordinate wird die Intensität des Lichtsignals in Prozent der maximal zulässigen Intensität aufgetragen. Im Falle des vorliegenden Sensors versucht dieser durch Anpassung der Belichtungszeit die Intensität zwischen 70% und 80% einzuregeln. Man erkennt, dass dies im Bereich von  $-70^\circ$  bis  $+70^\circ$  gelingt, danach bricht die Intensität deutlich ein, wobei auch noch bei  $\pm 80^\circ$  Messwerte vorhanden sind.

Die rechte Ordinate stellt die Streuung der Messwerte dar. Für einen Überblick über die Einzelmessungen und den Mittelwert der 7 Einzelmessungen werden beide getrennt angezeigt. Die Einzelmessungen sind als kleine Punkte dargestellt, die Mittelwerte als Kreise mit durchgezogener Linie. Im Falle der Probe A2 erkennt man, dass im Bereich von ca.  $-70^\circ$  bis  $+70^\circ$  eine weitgehend konstante mittlere Streuung von unter  $0,2 \mu\text{m}$  eingehalten wird, die dann bei noch steileren Winkeln bis auf das Dreifache ansteigt. Dies entspricht dem Bereich, in dem die Regelung der Belichtungszeit/ Intensität an ihre Grenzen stößt, so dass diese Parameter geeignet für die Güte von Messpunkten sein könnten.

Bei einem symmetrischen Sensoraufbau wird auch das OWIS-Diagramm weitgehend symmetrisch sein, was wegen des senkrecht angeordneten Sensors und der horizontal gedrehten Probe hier auch der Fall ist. Die Effekte durch die inhärente Asymmetrie des Triangulationsensors wurden noch nicht untersucht.

Die Kreuzstruktur des Läppens hat keine besondere Vorzugsrichtung der Bearbeitung und so sind auch die Diagramme für die horizontal und die vertikal eingespannte Probe weitgehend identisch.

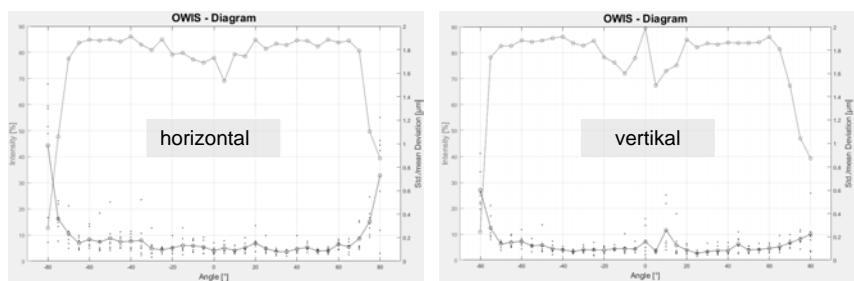


Bild 11: OWIS-Diagramm B2 (Flachsleifen,  $R_z 1,0 \mu\text{m}$ )

Beim Flachschleifen (Abbildung 11) ergibt sich ein sehr ähnliches Bild. Auch hier ist im Bereich von  $\pm 70^\circ$  die mittlere Streuung unter  $0,2 \mu\text{m}$  und die Intensität kann auf den Zielwert geregelt werden. Bei beiden Aufspannrichtungen sieht man stärkere Schwankungen um  $0^\circ$  herum, was mit der hohen Intensität des rückgestrahlten Lichts zusammenhängen dürfte, auch Speckle-Bildung könnte hier ein Grund sein.

Trotz der anisotropen Oberfläche beim Schleifen sind keine deutlichen Unterschiede hinsichtlich der Richtungsabhängigkeit erkennbar. Hier könnte eine Untersuchung von geschliffenen Bauteilen mit höherer Rauheit weitere Erkenntnisse bringen.

Vergleicht man diese Ergebnisse mit den in Abbildung 5 geforderten Winkeln für eine Zahnrädmessung, so sieht man, dass eine solche Messung mit einer Streuung von ca.  $0,2 \mu\text{m}$  möglich sein sollte, lediglich in den genannten Bereichen von über  $70^\circ$  könnte es zu Problemen kommen.

## 6. Messung an einem Zahnräder

Um diese These zu überprüfen, wurde mit dem in Abbildung 8 dargestellten Messaufbau ein Zahnräder vermessen. Aufgrund der fehlenden geometrischen Genauigkeit des Messaufbaus konnte dabei jedoch nur die prinzipielle Eignung des Sensors untersucht werden, nicht eine Abweichung von der Soll-Geometrie. Abbildung 12 zeigt das Ergebnis dieser Messung. Auf den ersten Blick konnten alle Bereiche des Zahnrads mit dem Sensor erfasst werden, wobei ein solches Bild keine Aussage über Genauigkeiten zulässt.

Betrachtet man die Messergebnisse etwas genauer, zeigt sich, dass wie erwartet im Übergang von der Fußrundung zur Evolvente Messpunkte fehlen. Ein weiterer Effekt wird in Abbildung 13 gezeigt. Der Laser spiegelt sich an der steilen Flanke und wird in der gegenüberliegenden Fußrundung reflektiert. Da diese noch im Sensor-Messbereich liegt, wird der falsche Abstandswert nicht als solcher erkannt und führt zu Ausreißern.



Bild 12: Messung am Zahnräder

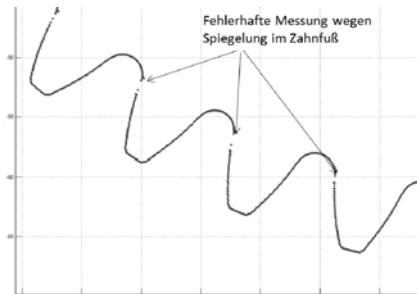


Bild 13: Spiegelung im Zahngrund

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem OWIS-Diagramm wurde ein Ansatz zur allgemeinen Qualifizierung von optischen Sensoren für die Anwendung in der Verzahnungsmesstechnik dargestellt. Mit Hilfe von Rauheitsnormalen kann so ohne konkretes Verzahnungsbauteil eine Aussage über die zu erwartende Qualität von Messungen getroffen werden, auch ein systematischer Vergleich verschiedener Sensoren wird so möglich.

Der verwendete Triangulationssensor kann als eingeschränkt tauglich für die Verzahnungsmessung betrachtet werden, wobei die Messfehler im Übergang von Flanke zu Zahnuß z.B. durch eine exzentrische Messung des Zahnrads vermieden werden müssen.

Wegen der geometrischen Einschränkungen der verwendeten Kinematik konnte nur qualitativer Nachweis erbracht werden, daher sollen die Messungen mit besseren Kinematiken (Newport-Achsaufbau/ Klingelnberg P-Maschine) wiederholt werden, um die Zusammenhänge zwischen der Streuung und den Abweichungen am Zahnräder zu untersuchen.

## Literatur

- [1] Wolff, M.:  
Sensor-Technologien. Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2016.
- [2] Zinth, W.:  
Optik : Lichtstrahlen - Wellen – Photonen. 4. akt. Aufl., München: Oldenbourg, 2013.
- [3] STIL:  
<http://ecatalog.stil-sensors.com/STIL-catalog.pdf>, Stand: 25.07.2017.
- [4] Micro Epsilon:  
<http://www.micro-epsilon.de/download/manuals/man-optoNCDT-2300--de.pdf>,  
Stand: 25.07.2017.

# Laserinterferometrische Verzahnungsmessung auf einem Koordinatenmessgerät

## Ein Ansatz zur vollständigen Verzahnungsmessung?

**Dr.-Ing. Felix Balzer, Dr.-Ing. Karsten Lübke,**  
Hexagon Metrology GmbH – PowerTrain Solutions, Wetzlar

### Kurzfassung

Die taktile Messung von Zahnrädern auf Verzahnungsmessgeräten (VMGs) und Koordinatenmessgeräten (KMGs) ist seit mehreren Jahrzehnten etabliert. In den letzten Jahren ist ein Trend zur Multisensorik an VMGs und KMGs zu verzeichnen. Viele Messgerätehersteller bieten die Integration zusätzlicher optischer Sensoren an. Zahlreiche optische 1-D-, 2-D- und 2,5-D-Sensoren mit den unterschiedlichsten Funktionsprinzipien sind kommerziell verfügbar. Diese Sensoren sind entweder in alleinstehende Messplätze oder als OEM-Sensoren in VMGs und KMGs serienmäßig integriert. Demzufolge ist auch eine verstärkte Nachfrage nach optischer Verzahnungsmessung auf KMGs zu beobachten.

Nach einer kurzen Zusammenfassung der konventionellen, taktilen Verzahnungsmessung auf KMGs betrachtet dieser Beitrag zunächst einen von der Firma Hexagon MI entwickelten laserinterferometrischen Punktsensor. Im Anschluss werden die wesentlichen Unterschiede zwischen taktiler und optischer Verzahnungsmessung erläutert, die im praktischen Einsatz zu beachten sind. Diese Unterschiede werden mit mehreren Applikationsbeispielen aus der Automobilindustrie und der Windkraftindustrie dargestellt.

Im letzten Abschnitt dieses Beitrags werden die hieraus gewonnenen Erkenntnisse dann auf optische 2-D- und 2,5-D-Sensoren angewandt und deren Potential für Messaufgaben an Verzahnungen abgeschätzt.

### 1. Einleitung

Seit mehreren Jahrzehnten ist die taktile Messung von Zahnrädern auf VMGs und KMGs etabliert. Auf KMGs hat sich die Messung mit einem Sterntaster oder die Messung mit einem Taster und Drehtisch etabliert. In den letzten Jahren ist ein zunehmender Trend zur Multisensorik an VMGs und KMGs zu verzeichnen. Viele Messgerätehersteller bieten die Integration zusätzlicher Sensoren für unterschiedliche Messgrößen an. So sind mittlerweile optische 1-D-, 2-D- und 2,5-D-Sensoren und taktile Rauheitssensoren an einigen Messgeräten serienmäßig integriert. Darüber hinaus verfügen manche Messgeräte auch über semi-

automatische oder vollautomatische Messkopfwechselsysteme, 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 [1], der sich sehr gut für die optische, berührungslose Messung rotationssymmetrischer Werkstücke eignet. Dieser Beitrag behandelt die Fragestellung, inwiefern optische Punktsensoren (d.h. 1-D-Sensoren), im Speziellen der HP-O, für die optische, berührungslose Messung von Verzahnungen industriell einsetzbar sind. Die gewonnenen Erkenntnisse werden dann auf optische 2-D- und 2,5-D-Sensoren angewandt und das Potential abgeschätzt.

## 2. Taktile Messung

Der derzeitige Stand der Normung für die Qualitätsprüfung von Verzahnungen orientiert sich an taktilen Messverfahren. Die zu erfassenden Merkmale sind unter anderem Profil-, Flankenlinien-, Teilungs- und Rundlaufabweichungen [2]. In der Regel werden die Profil- und Flankenlinienabweichungen an 3 bis 4 gleichmäßig verteilten Zähnen mit jeweils einem Profil und einer Flankenlinie gemessen. Zusätzlich erfolgt in vielen Fällen noch die Charakterisierung der Verschränkung an Zahn 1 mit Hilfe von drei auf unterschiedlichen Höhen erfassten Profilen oder drei auf verschiedenen Durchmessern erfassten Flankenlinien. Die Teilungsabweichungen werden an jedem Zahn gemessen. Die Berechnung der Rundlaufabweichung der Verzahnung kann sich aus den Teilungspunkten ergeben. Bei manchen Verzahnungstypen sind zusätzliche Prüfmerkmale relevant. So ist beispielsweise bei Pass- und Steckverzahnungen das Maß für die effektive Zahndicke bzw. Lückenweite als Prüfmerkmal vorgeschrieben, da es die Beurteilung der Paarung mit dem Gegenstück ermöglicht.

Eine etablierte Möglichkeit zur Qualitätsprüfung ist das taktile Messen von Verzahnungen auf einem KMG. In den meisten Fällen werden die Verzahnungen vertikal aufgespannt, so dass die Verzahnungssachse näherungsweise parallel zur z-Achse des KMGs ist. Bei langen Wellen ist es auch möglich, diese liegend anzutragen. Dann berechnet die eingesetzte Mess- und Auswertesoftware die Verfahrwege entsprechend. Bei der taktilen Messung erfolgt zu meist der Einsatz von kugelförmigen Tastern. Die Tastkugeldurchmesser hängen vom Modul der Verzahnung ab und starten ab etwa 0,3 mm. Wenn das KMG ohne Drehtisch ausgestattet ist, erfolgt der Einsatz eines Sterntasters. Wenn die Verzahnung auf einem KMG mit Drehtisch gemessen wird, reicht ein Taster aus. Das Messobjekt wird dann mit Hilfe des Drehtisches relativ zum Taster positioniert.

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 Verzahnung. Nach dem Erfassen der Profile und Flankenlinien dienen Einzelpunktantastungen an jeder Zahnflanke in den Lücken der Verzahnung 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 limitiert. Bei der scannenden Erfassung der Profile und Flankenlinien beträgt die Geschwindigkeit in der Regel maximal  $v = 15 \text{ mm/s}$ . Die Einzelpunktantastungen erfolgen mit reduzierter Antastgeschwindigkeit von ca.  $v = 1 \text{ mm/s}$ .

### 3. Laserinterferometrischer Punktsensor für die optische, berührungslose Messung

Ein neuer Ansatz ist die optische, berührungslose Messung von Verzahnungen auf einem KMG mit mindestens einer Drehachse. 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 Lücken der Verzahnung gegeben. Eine weitere Anforderung ist eine hohe vertikale Auflösung, d. h. in Strahlrichtung, im Sub-mikrometerbereich. Die laterale Auflösung, also der Durchmesser des Lichtflecks, über den der Sensor sein Messsignal integriert, muss kleiner als  $100 \mu\text{m}$  sein. Damit ist einerseits auf den evolventischen Zahnflanken ein geeignetes Messsignal gewährleistet und andererseits auch im Fußbereich der Verzahnung eine Messung möglich. Darüber hinaus muss der optische Sensor einen großen Akzeptanzwinkel besitzen, da es insbesondere im Fußbereich der Verzahnung je nach Modul nicht möglich ist, die Strahlrichtung senkrecht zur Oberfläche zu positionieren.

Von der Firma Hexagon MI wurde ein 1-D laserinterferometrischer Punktsensor, genannt HP-O, entwickelt und in Leitz-KMGs integriert, der diese Anforderungen erfüllt [3]. Das Gesamtsystem besteht aus einer Elektronikeinheit inklusive Laserlichtquelle, dem Optical Probe Controller (OPC), und einem optischen Sensor, der wie ein normaler taktiler Taster vollautomatisch als Taster in einem KMG eingewechselt und verwendet werden kann. Das Funktionsprinzip ist in Bild 1 dargestellt.

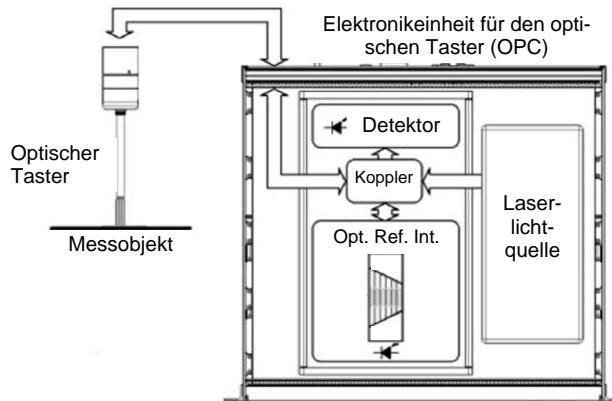


Bild 1: Funktionsprinzip des laserinterferometrischen Punktsensors HP-O (siehe [3])

Hierfür wurde eine neue optische Schnittstelle entwickelt [5], die einen automatischen Sensorwechsel verschiedener optischer und taktiler Sensoren innerhalb eines Teilemessprogramms ermöglicht. Diese Wechselschnittstelle ist für mindestens 100.000 Wechselvorgänge von optischen Tastern ausgelegt [6].

Die Verbindung zum OPC erfolgt über einen beweglichen Lichtwellenleiter, der vom Tastkopf über die bewegliche Pinole zum Grundbett und von dort zum OPC verlegt wird. Der OPC steht in der Regel in der Nähe des Elektronikschranks 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  $\lambda \approx 1550$  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 2 gezeigt wird.

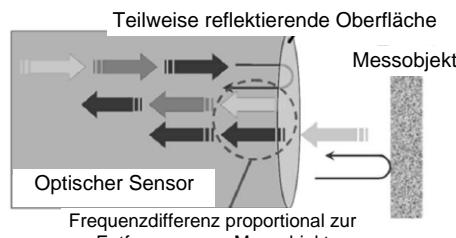


Bild 2: Prinzip der Interferenzezeugung (siehe [3])

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.

Interferometer sind prinzipbedingt inkrementelle Messverfahren [4]. Deshalb muss nach jedem Kontaktverlust der Messobjektoberfläche der Sensor neu genutzt werden. Das wäre für die Anwendung als messender Nullpunktsensor in einem KMG ungeeignet. Deswegen befindet sich im OPC zusätzlich ein optisches Referenzinterferometer. Das von der Laserlichtquelle ausgesandte Licht wird über einen optischen Koppler aufgeteilt. Ein Teil des Lichts wird über den Lichtwellenleiter zum optischen Sensorkopf übertragen. Der andere Teil des Lichts wird ohne Phasenversatz zum Referenzinterferometer gesendet und dient als Abstandsreferenz. Darüber hinaus dient das Referenzinterferometer auch zur Kompensation von Nichtlinearitäten und Temperatureffekten.

Die optischen Taster wiegen ca. 190 g und sind in vielen verschiedenen Ausführungsformen erhältlich, um die Einsatzbedingungen für verschiedenste Applikationen zu erfüllen [1]. Die optischen Standard-Taster sind mit verschiedenen Arbeitsabständen, d.h. Abständen der Fokusebene, erhältlich. Die Arbeitsabstände betragen 6,5 mm für den short range Sensor, 10,5 mm für den mid range Sensor und 16 mm für den long range Sensor. Diese drei Sensortypen sind jeweils mit verschiedenen Strahlaustrittswinkeln von 0°, 45° oder 90° erhältlich. Aufgrund der numerischen Apertur der Fokussierlinse variiert je nach Arbeitsabstand des Sensors der Durchmesser des Lichtflecks in der Fokusebene und der Akzeptanzwinkel. Auf rauen metallischen Oberflächen beträgt der Akzeptanzwinkel für short und mid range Sensoren ungefähr  $\pm 30^\circ$ , für long range Sensoren ca.  $\pm 10^\circ$ . Ebenso unterscheiden sich die linearen Messbereiche für die drei Sensortypen. Short range Sensoren besitzen etwa  $\pm 0,2$  mm linearen Messbereich, mid range Sensoren etwa  $\pm 1$  mm und long range Sensoren etwa  $\pm 10$  mm. Die Mitte des Messbereichs bezieht sich hierbei auf den Arbeitsabstand des Sensors.

#### 4. Verzahnungsmessung mit einem optischen 1-D-Punktsensor

Der optische Sensor HP-O eignet sich im Allgemeinen gut für die Messung rotationssymmetrischer Werkstücke [7]. In diesem Beitrag soll im Folgenden nun die Anwendung für die Messung von Verzahnungen behandelt werden.

Die Eigenschaften des optischen Systems müssen für Verzahnungsmessungen auf einem KMG berücksichtigt werden. Mindestens eine Drehachse ist erforderlich, um entweder den Sensor relativ zur Verzahnung mit einem Dreh-Schwenk-Gelenk oder das Messobjekt relativ zum Sensor mit einem Drehtisch auszurichten. Im ersten Fall, also bei Einsatz eines Dreh-Schwenk-Gelenks, sind die kleinsten einstellbaren Winkelschritte durch die Indexierung der Mechanik vorgegeben. Die Dreh-Schwenk-Gelenke besitzen fest einstellbare Winkelstellungen mit Abstufungen von in der Regel  $2,5^\circ$  oder  $5^\circ$ . Auf diese Weise kann der optische Sensor vor Beginn der Messung zum Werkstück ausgerichtet werden. Diese Variante ist für Messaufgaben an Verzahnungen technisch möglich, jedoch wirtschaftlich aus Zeitgründen nicht darstellbar, da für jede zu messende Lücke Dreh-Bewegungen des Sensors erforderlich sind. Deswegen ist für Verzahnungsmessungen nur der Einsatz eines feststehenden optischen Sensors in Verbindung mit einem Drehtisch auf dem KMG empfehlenswert. Der Drehtisch wird dann als vierte, kontinuierlich messende Achse zur stufenlosen Positionierung der Verzahnung relativ zum Strahlaustritt des optischen Sensors eingesetzt. Der optische Sensor kann vor Beginn der Messung mechanisch mit Hilfe eines Drehgelenks optimal zur Verzahnung ausgerichtet werden.

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.

#### 5. Anwendungsbeispiel: Optische Messung einer typischen Laufverzahnung aus der Automobilindustrie

Typische Laufverzahnungen, wie sie weit verbreitet in Getrieben in der Automobilindustrie eingesetzt werden, sind gerad- oder schrägverzahnt, besitzen ein Normalmodul in der Größenordnung zwischen  $m_n > 2 \text{ mm}$  und  $m_n < 10 \text{ mm}$  und einen Teilkreisdurchmesser zwischen  $d > 50 \text{ mm}$  und  $d < 200 \text{ mm}$ . Taktile und optische Vergleichsmessungen an derartigen Verzahnungen wurden an zahlreichen Demobauteilen durchgeführt.

Als Messgerät wird in der Regel ein KMG vom Typ PMM-C mit integriertem Drehtisch eingesetzt [8]. Als optische Sensoren kommen nur short range Sensoren in Betrachtung, da sie

den größten Akzeptanzwinkel aufweisen und dementsprechend gut geeignet sind, auch im Fußbereich der Verzahnung zu messen, wo aufgrund der äußersten Abmessungen des Sensors unter keinen Umständen der Laserstrahl annähernd senkrecht zur Zahnflanke positioniert werden kann.

Der lineare Messbereich dieser Sensoren beträgt  $\pm 0,2$  mm, so dass aufgrund des Moduls der Verzahnungen in jedem Fall eine Positionierung in jede zu messende Lücke hinein erfolgt. Demzufolge werden ähnliche Messstrategien wie bei der taktilen Messung angewandt. Es werden dieselben Solltrajektorien generiert. Allerdings werden diese in anderer Reihenfolge abgefahren. Bei der taktilen Messung wird meist zahnweise gemessen, d. h. an jedem zu erfassenden Zahn werden erst linke und dann rechte Profile und Flankenlinien abgefahrt. Bei der optischen Messung müssen linke und rechte Zahnflanken mit zwei unterschiedlichen Drehtisch-Offsetwinkeln erfasst werden. Deshalb werden zunächst alle linken und anschließend alle rechten Profile und Flankenlinien gemessen. Daran schließt sich die Erfassung der Teilungsabweichungen an. Optisch werden die Teilungspunkte erst an allen linken Zahnflanken gemessen, danach dann an allen rechten.

Der quantitative Vergleich zwischen taktilen und optischen Messergebnissen im Rahmen dieses Beitrags erfolgt exemplarisch an einem IC-Artefakt vom Typ Bm der Firma FRENCO GmbH. Es handelt sich um eine Geraerverzahnung mit  $z = 36$  Zähnen, einem Normalmodul  $m_n = 3$  mm und einem Teilkreisdurchmesser von  $d = 108$  mm. Das IC-Artefakt ermöglicht die Charakterisierung von Profil- und Flankenlinienabweichungen in einer Lücke sowie die Teilungsabweichungen. Einen beispielhaften Messaufbau auf einem KMG mit integriertem Drehtisch zeigt Bild 3.

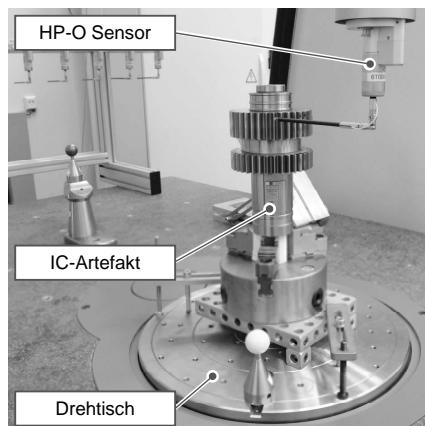


Bild 3: Optische Verzahnungsmessung eines IC-Artefakts mittels HP-O auf einem KMG

Die taktilen Messungen wurden mit einem Tastkugeldurchmesser von 1.5 mm und einer Scangeschwindigkeit von  $v=5$  mm/s durchgeführt. Die optischen Messungen wurden mit  $v = 10$  mm/s durchgeführt. Die Filterung der Messpunkte erfolgte nach den Vorgaben in ISO 1328-1 [9]. Es wurden 50 Wiederholungsmessungen für jeden Sensor durchgeführt.

Bild 4 zeigt die Abweichung der Mittelwerte der Wiederholungsmessungen im Vergleich zum Kalibrierwert für die Profil- und Flankenlinienabweichungen. Die Fehlerindikatoren visualisieren die Standardabweichung dieser 50 Messungen. Es ist ersichtlich, dass die Profil- und Flankenwinkelabweichungen  $f_{Ha}$  und  $f_{H\beta}$  für die taktilen und die optischen Messungen gut übereinstimmen. Auffällig ist jedoch, dass die Mittelwerte der Form- und Gesamtabweichungen von Profil und Flankenlinie bei optischer Messung systematisch um 2 µm bis 3 µm größer sind als bei taktiler Messung. Darüber hinaus sind die Standardabweichungen dieser Parameter um den Faktor 2 bis 3 größer als bei taktiler Messung.

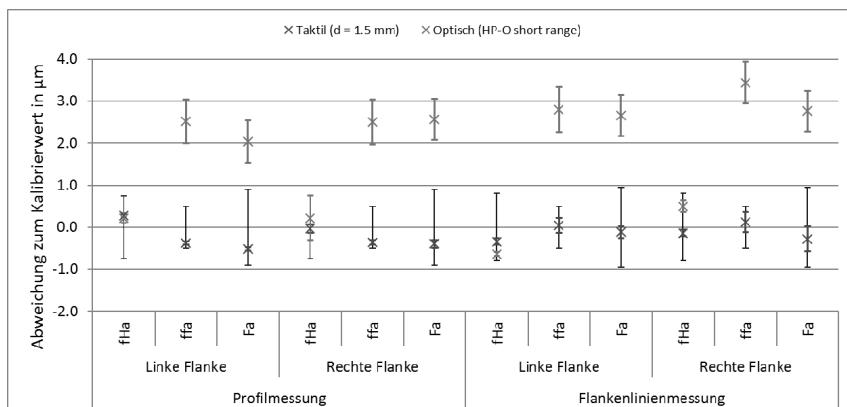


Bild 4: Profil- und Flankenlinienabweichungen in Bezug zu den Kalibrierwerten bei taktiler und optischer Messung

Eine mögliche Ursache liegt prinzipbedingt darin begründet, dass durch das kugelförmige Antastelement mit  $d = 1.5$  mm bei der taktilen Scanmessung eines Profils oder einer Flankenlinie eine andere Filterung der Messwerte erfolgt als beim optischen Sensor. Dieser hat einen sehr kleinen Messfleckendurchmesser von etwa 10 µm. Eine weitere Hauptursache liegt prinzipbedingt darin begründet, dass während der taktilen Messung das kugelförmige Antastelement permanent Werkstückkontakt besitzt. Dadurch werden mechanische Restschwingungen aus der Umgebung bedämpft, die nicht vom pneumatischen Dämpfungssystems des

KMGs gefiltert werden. Die optischen Messungen erfolgen berührungslos, so dass diese Restschwingungen zu kleinen Relativbewegungen zwischen optischem Sensor und Werkstück führen können. Dies zeigt sich dann unter anderem in den Formabweichungen. Durch eine Optimierung der Aufstellbedingungen können diese Restschwingungen reduziert werden. Als dritte Hauptursache sind die Filtereinstellungen bei der Verzahnungsauswertung zu nennen, die wegen der Vergleichbarkeit für beide Messverfahren identisch gewählt wurden. Hier ist also ein Verbesserungspotential durch die Anpassung der Filtereinstellungen für die optischen Messungen gegeben, wenn ein KMG speziell für Serienmessungen einer oder mehrerer definierter Verzahnungen eingesetzt wird.

Bild 5 zeigt die Mittelwerte der Teilungsabweichungen und die Standardabweichung der 50 Messungen. Taktile und optische Messergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit Abweichungen der Mittelwerte von weniger als 1 µm. Dies liegt im Rahmen der Erwartungshaltung. Auffällig ist, dass die Standardabweichungen der optischen Messwerte größer als bei den taktilen Messwerten sind. Hierfür sind dieselben Ursachen verantwortlich, die zuvor bei der Diskussion der Profil- und Flankenlinienabweichungen erwähnt wurden.

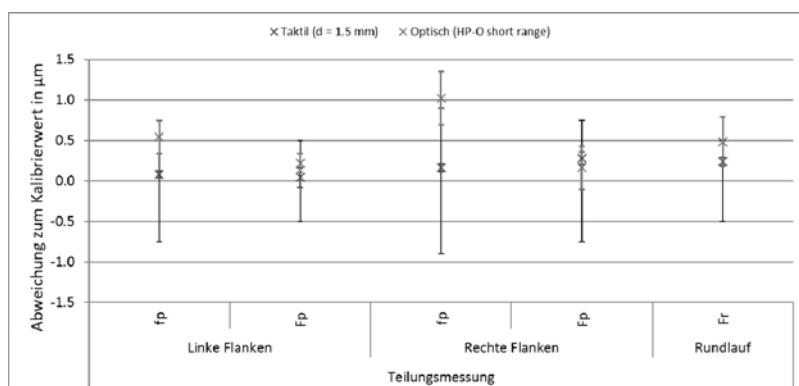


Bild 5: Teilungsabweichungen in Bezug zu den Kalibrierwerten bei taktiler und optischer Messung

Da bei der optischen Messung eine ähnliche Messstrategie wie bei der taktilen Messung verwendet wird, lassen sich keine wesentlichen Messzeiteinsparungen aufgrund der Messstrategie erzielen. Messzeit kann nur aufgrund einer etwas höheren Scangeschwindigkeit als bei taktiler Messung eingespart werden.

## 6. Anwendungsbeispiel: Optische Messung von Großverzahnungen

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt, genannt EVeQT [10], mit dem Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ) und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) wurde unter anderem die Eignung des HP-O für die Messung von Großverzahnungen auf KMGs mit Drehtisch untersucht und bewertet. Mit dem Begriff Großverzahnung sind im Allgemeinen Verzahnungen mit einem Normalmodul  $m_n \gg 10$  und einem Teilkreisdurchmesser  $d \gg 1000$  mm gemeint. Als Messgerät wurde das KMG beim BIMAQ genutzt, das im Projektverlauf mit der Schnittstelle für den HP-O, dem OPC und einem hydrostatischen Drehtisch erweitert wurde [11]. Die Messungen wurden am neuen Großverzahnungsnormal der PTB [12], das ebenfalls im EVeQT-Projekt entwickelt und umgesetzt wurde, durchgeführt. Der Messaufbau ist in Bild 6 dargestellt.

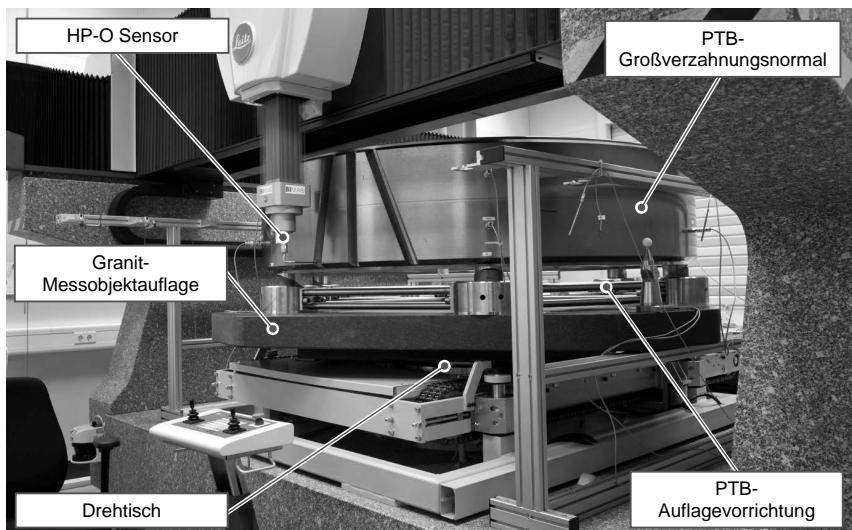


Bild 6: Optische Messung des PTB-Großverzahnungsnormal beim BIMAQ

Bei den grundlegenden Voruntersuchungen zeigte sich, dass aufgrund der evolventischen Geometrie der Zahnflanken long range Sensoren prinzipiell ungeeignet sind. Sie besitzen einen zu kleinen Akzeptanzwinkel, was dazu führt, dass keine gültigen Messwerte in der Messsoftware zur Auswertung vorliegen. Die short range Sensoren sind universeller einsetzbar und ermöglichen bei der Profilmessung einen Scanstart in der Zahnußregion. Insbesondere bei der 20°-Schrägverzahnung des Großverzahnungsnormal muss für die optische

Messung aufgrund der Zahnbreite von  $b = 420$  mm kontinuierlich 4-achsig gescannt werden, damit der Winkel des Lichtstrahls zur Oberfläche der Zahnflanke im Bereich des zulässigen Akzeptanzwinkels des Sensors liegt. Aufgrund des großen Trägheitsmoments des Großverzahnungsnormals und der Auflagevorrichtung auf dem Drehtisch kann es dann zu Schleppfehlern der vierten Achse kommen, die größer als der lineare Messbereich des optischen Sensors von  $\pm 0,2$  mm sind. Deshalb wurden für die Vergleichsmessungen letztlich mid range Sensoren mit einem linearen Messbereich von  $\pm 1$  mm eingesetzt.

Die Messstrategie für optische Messungen an Großverzahnungen ist ähnlich wie bei der taktilen Messung. Aufgrund des großen Normalmoduls wird jede Lücke separat gemessen, da der optische Sensor hinein positioniert werden muss. Es werden dieselben Solltrajektorien generiert. Anpassungen erfolgen nur, falls mehrere Flankenlinien an einer Zahnflanke erfasst werden sollen. Bei der herkömmlichen taktilen Messung starten die einzelnen Scanlinien immer nahe der unteren Stirnfläche der Verzahnung und werden in Richtung der oberen Stirnfläche abgefahren. Bei der optischen Messung starten die Scanlinien etwas unterhalb der unteren Stirnfläche und enden etwas oberhalb der oberen Stirnseite der Verzahnung. Anschließend erfolgt eine mäanderförmige Verschleifung der einzelnen Scanlinien in den Endbereichen, so dass die Flankenliniencans dann abwechseln von der unteren Stirnfläche in Richtung der oberen Stirnfläche und umgekehrt verlaufen. Die Messpunkte außerhalb der Verzahnung im Bereich der Verschleifung der Mäanderlinien werden vom KMG-Controller als ungültig gekennzeichnet und dann vor der Verzahnungsauswertung in der Mess- und Auswertesoftware herausgefiltert. Für die Flankenlinienauswertung stehen auf diese Weise wieder einzelne Linien zur Verfügung, die dann herkömmlich ausgewertet werden können.

Bild 7 zeigt exemplarisch den Vergleich zwischen taktiler und optischer Messung der Außenverzahnungen des PTB-Großverzahnungsnormals. Dargestellt sind die Mittelwerte von 10 Wiederholmessungen derselben Flankenlinie und die Standardabweichungen, visualisiert mit Fehlerindikatoren. Die taktilen Messwerte sind ungefiltert. Die optischen Messwerte sind einmal dargestellt ohne zusätzliche Filterung in der Mess- und Auswertesoftware. Dieselben Messwerte wurden dann in der Auswertesoftware nachträglich gefiltert und sind zum Vergleich als zweiter Datensatz aufgetragen.

Eine ausführliche Diskussion und Bewertung der Messergebnisse ist in [13] zu finden. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Flankenwinkelabweichungen im Vergleich zwischen taktiler und optischer Messung gut übereinstimmen. Auffällig ist, dass die Formabweichungen bei optischer Messung systematisch größer sind als bei taktiler Messung. Auch eine zusätzliche Filterung der optischen Messwerte bewirkt keine nennenswerte Reduzie-

rung des Offsets zwischen taktilen und optischen Messergebnissen. Diese Beobachtung wurde bereits in Abschnitt 5 diskutiert und ist auf ähnliche Ursachen zurückzuführen.

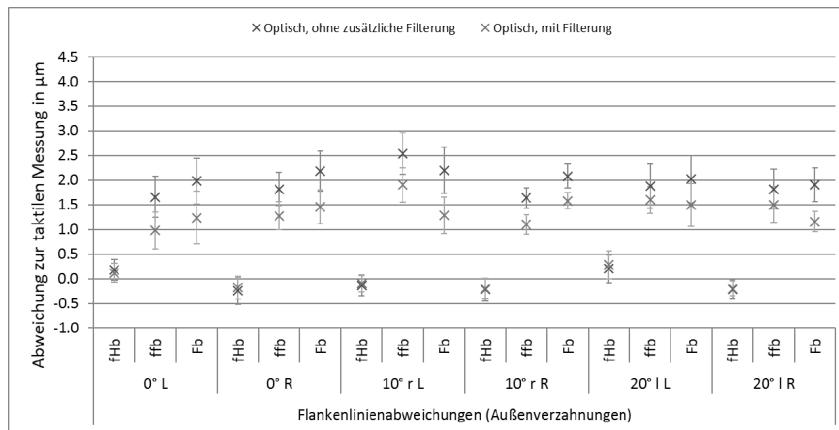


Bild 7: Vergleich der Flankenlinienabweichungen bei taktiler und optischer Messung der Außenverzahnungen des PTB-Großverzahnungsnormals

Der Vorteil bei den berührungslosen Messungen mit dem HP-O liegt hauptsächlich darin, dass die Messpunkte mit höherer Scangeschwindigkeit erfasst werden können und dadurch Messzeit im Vergleich zur taktilen Messung eingespart werden kann.

## 7. Anwendungsbeispiel: Optische Messung von Pass- und Steckverzahnungen

Ein weiteres Anwendungsbeispiel in völlig anderen geometrischen Dimensionen ist die optische Messung von Pass- und Steckverzahnungen. Diese zeichnen sich durch einen normalerweise kleinen Normalmodul  $m_n$  aus. Eine möglichst umfassende Erfassung der wesentlichen Verzahnungsmerkmale und der Zahndicke bzw. Lückenweite von Welle bzw. Nabe ist zur Prüfung der Qualität wichtig, um die Beurteilung der Paarung mit dem Gegenstück zu ermöglichen.

Der üblicherweise kleine Normalmodul einer Pass- und Steckverzahnung eröffnet für die optische Messung unter Verwendung eines mid range HP-O mit einem Messbereich von  $\pm 1$  mm und einem Messfleckdurchmesser von 40 µm im Fokus einen interessanten Ansatz für eine schnelle Allzahnmessung. Um das Leistungspotential des Sensors voll ausschöpfen zu können, wurden neuartige Messstrategien für Pass- und Steckverzahnungen auf Basis

des sogenannten Spin-Scan-Prinzips entwickelt und in der Messsoftware umgesetzt [14]. Das Spin-Scan-Prinzip ist in Bild 8 dargestellt.

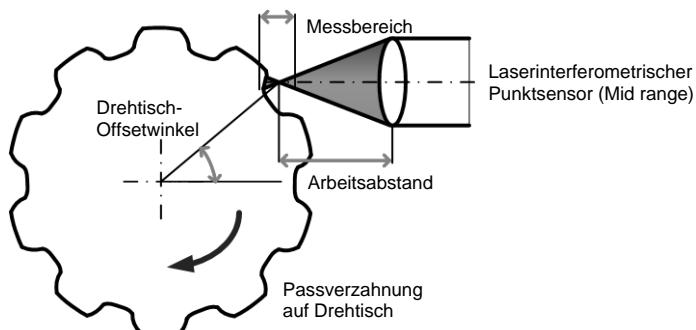


Bild 8: Spin-Scan-Prinzip für die optische Messung von Pass- und Steckverzahnungen

Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung dieses neuartigen Messprinzips für Pass- und Steckverzahnungen ist, dass der Messbereich des verwendeten optischen Sensors ausreicht, um die Verzahnung auf der gesamten Zahnflanke und auch im Fußbereich ganzheitlich erfassen zu können, ohne dass der Sensor in jede Lücke eintauchen muss. Dann ist es nämlich möglich, den Sensor vor der Verzahnung zu positionieren. Die Verzahnung wird anschließend mit Hilfe des Drehtisches um  $360^\circ$  kontinuierlich gedreht und der optische Sensor erfasst simultan die Messpunkte der Kontur mit hoher Datenerfassungsrate. Zur Erfassung und nachträglichen Auswertung der gesamten Verzahnungskontur auf einer Messebene werden mehrere Spin-Scans benötigt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des vorgegebenen Soll-Durchmessers, d.h. des Durchmessers, bei dem die Fokusebene des Sensors liegt, und des Offsetwinkels des Drehtisches zu Beginn des Scans. Der Offsetwinkel ist erforderlich, um dem Akzeptanzwinkel des optischen Sensors Rechnung zu tragen. In der Regel reichen vier Spin-Scans auf einer Messebene zur Konturerfassung aus:

- Erfassung der Kontur am Kopfkreis mit Offset-Winkel =  $0^\circ$  und Solldurchmesser = Kopfkreisdurchmesser
- Erfassung der Kontur im Fußbereich der Verzahnung mit Offset-Winkel =  $0^\circ$  und Soll-durchmesser = Fußkreisdurchmesser
- Erfassung der rechten Zahnflanken mit Offset-Winkel =  $20^\circ \dots 40^\circ$  je nach Verzahngesetzmäßigkeit und Solldurchmesser = V-Kreis-Durchmesser
- Erfassung der linken Zahnflanken mit Offset-Winkel =  $-20^\circ \dots -40^\circ$  und Solldurchmesser = V-Kreis-Durchmesser

Die Messpunkte der vier Spin-Scans einer Messebene werden nachträglich in der Mess- und Auswertesoftware zu einer resultierenden Gesamtkontur zusammengesetzt und ausgewertet. Auf Basis einer solchen Konturmessung erfolgt dann die Auswertung von Kopfkreis- und Fußkreisdurchmesser, Profilabweichungen sowie Teilungs- und Rundlaufabweichungen. Beispielsweise ist es auch möglich, zunächst nachträglich die Teilungsabweichungen auszuwerten, dann eine rechnerische Exzentrizitätskorrektur vorzunehmen und die Kontur anschließend hinsichtlich Profilabweichungen in dem exzentrizitätskorrigierten Koordinatensystem auszuwerten. Das Prozedere kann für mehrere Messebenen einer Pass- bzw. Steckverzahnung wiederholt werden.

Die Messstrategie für die Flankenlinienabweichungen einer Pass- bzw. Steckverzahnung entspricht der bei taktiler Messung. Demzufolge werden einzelne Scanlinien an jeder Flankenseite an den zu messenden Zähnen auf einem vorgegebenen Durchmesser erfasst und ausgewertet. Bei der Erfassung ist derselbe Drehtisch-Offsetwinkel wie bei den Spin-Scans zu berücksichtigen, um den Akzeptanzwinkel des optischen Sensors einzuhalten.

Bild 9 zeigt exemplarisch die Profilabweichungen an einer Kerbverzahnung, die von der Firma FRENCO GmbH zur Verfügung gestellt wurde. Die Verzahnung weist folgende Parameter auf: Zähnezahl  $z = 40$ , Modul  $m_n = 0,79375$  mm, Zahnbreite  $b = 25$  mm, Fußkreisdurchmesser  $d_f = 30,05$  mm, Kopfkreisdurchmesser  $d_k = 31,65$  mm und Lückenwinkel der Welle  $75^\circ$ . Im Bild sind die Mittelwerte von 25 Wiederholmessungen taktil und optisch für 4 gleichmäßig am Umfang verteilte Zähne gegenübergestellt. Optisch können zwar alle Lücken mit ausgewertet werden, jedoch liegen nur für diese 4 Lücken taktil ermittelte Vergleichswerte vor. In dem Diagramm sind die Standardabweichungen der taktilen und optischen Messreihen als Fehlerbalken visualisiert.

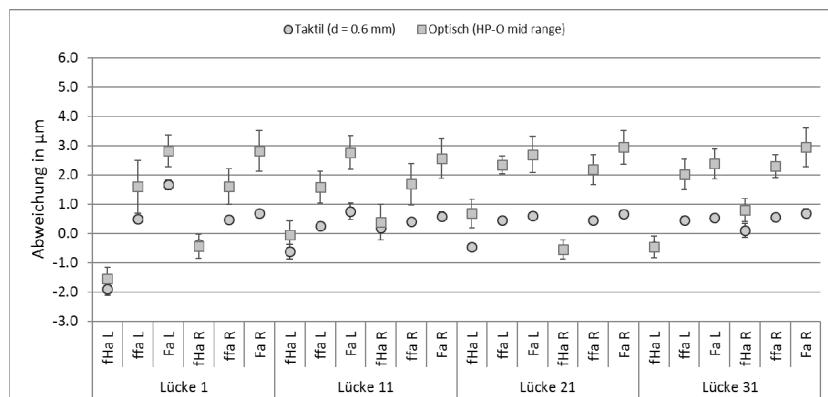


Bild 9: Vergleich der Profilabweichungen, ausgewertet aus der Konturmessung

In dem Diagramm ist gut zu erkennen, dass in Bezug auf die Winkelabweichungen vom Profil  $f_{H_a}$  die optischen Messwerte sehr nah an den taktilen Messwerten liegen. Der maximale Offset beträgt weniger als 1,0 µm. Die Standardabweichungen für die taktilen Messungen sind kleiner als 0,25 µm. Hingegen liegen sie bei den optischen Messungen zwischen 0,2 µm und 0,6 µm. Sie sind also systematisch um den Faktor 2 bis 3 größer. Eine ähnliche Beobachtung ist bei der Bewertung der Formabweichungen festzustellen. Es fällt wie zuvor schon auf, dass die optischen Messreihen einen etwas größeren, systematischen Offset von bis zu 3 µm zu den taktilen Messreihen besitzen. Darüber hinaus ist ebenso systematisch zu erkennen, dass die optischen Messwerte etwas mehr streuen als die taktilen.

Eine ausführliche Diskussion weiterer Messergebnisse und eine Analyse der Ursachen für diese Abweichungen ist in [14] zu finden. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit dem laserinterferometrischen Punktsensor HP-O im Vergleich zur taktilen Messung bei gleicher Messzeit mehr Prüfmerkmale erfasst werden können, insbesondere im Hinblick auf die Profilabweichungen, die bei der optischen Messung ohne Mehraufwand an allen Zähnen der Pass- und Steckverzahnung charakterisiert werden können. Somit ist eine umfassendere Qualitätsprüfung möglich.

## 8. Vorteile und Grenzen der optischen Verzahnungsmessung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Applikationsbeispiele sind repräsentativ für eine Vielzahl von optischen Messaufgaben an gewöhnlichen Verzahnungen. Die Diskussion der Möglichkeiten und Grenzen der optischen Verzahnungsmessung beinhaltet zwei wesentliche Aspekte: allgemeine, sensorunabhängige Punkte und sensorspezifische Themen.

Beginnend mit den sensorspezifischen Aspekten lässt sich zusammenfassend feststellen, dass der HP-O für die verschiedensten Messaufgaben an Verzahnungen im Allgemeinen gut geeignet ist. Die taktilen und optischen Messungen haben gezeigt, dass die meisten Verzahnungsparameter annähernd vergleichbar sind. Es ist zu beobachten, dass die Formabweichungen bei optischer Messung in der Regel etwas größer sind als bei taktiler Messung, wenn man identische Filtereinstellungen in der Mess- und Auswertesoftware zugrunde legt. Für Verzahnungen aus dem Automobilbereich und für Großverzahnungen unterscheiden sich die Messstrategien zwischen taktiler und optischer Messung geringfügig. Beide Sensorarten müssen in jede zu messende Lücke der Verzahnung hinein positioniert werden. Demzufolge sind keine signifikanten Messzeiteinsparungen aufgrund einer geänderten Messstrategie möglich. Lediglich über eine höhere Scangeschwindigkeit bei optischer Messung und ggf. veränderte KMG-Vorhalte- und Suchbereiche lässt sich Messzeit im Vergleich zur taktilen Messung einsparen. Für die Messung von Pass- und Steckverzahnungen stellt der HP-O

eine interessante Alternative im Vergleich zur taktilen Messmethode dar. Die neuartige Messstrategie auf Basis von Spin-Scans ermöglicht eine zeiteffiziente Allzahnmessung und eröffnet damit neue Möglichkeiten in der Qualitätsprüfung.

Um die allgemeine Eignung des HP-O für die Messaufgaben an Verzahnungen zu bewerten, müssen auch die einzuhaltenden Toleranzen und die Prozessfähigkeit betrachtet werden. Für das prozesssichere Messen von Meisterrädern, deren Merkmale sehr enge Toleranzen aufweisen, ist der HP-O weniger gut geeignet. Der Vergleich von taktilen und optischen Messungen hat gezeigt, dass die Optischen grundsätzlich eine um den Faktor 2 bis 3 größere Standardabweichung besitzen. Wenn allerdings in der Serienfertigung schnelle Qualitätsprüfungen mit Toleranzen größer als etwa 5 µm prozesssicher geprüft werden sollen, ist der HP-O eine interessante Alternative zur taktilen Messungen.

Diese Untersuchungsergebnisse lassen sich auf andere optische Sensoren erweitern. Bei allen optischen Sensoren stehen Akzeptanzwinkel und Arbeitsabstand in direkter Korrelation. Deswegen sind 1-D-Sensoren bei der optischen Verzahnungsmessung nur dann besonders geeignet, wenn der lineare Messbereich des 1-D-Sensors in der Größenordnung des Moduls der Verzahnung liegt und dann das in diesem Beitrag beschriebene neuartige Spin-Scan-Prinzip angewandt werden kann. Bei Verzahnungen mit größerem Modul muss ansonsten in jede Lücke hinein positioniert werden, so dass keine nennenswerten Messzeiteinsparungen bei in etwa gleichbleibender Genauigkeit realisierbar sind. Es gibt zwar Ansätze für optische 1-D-Sensoren mit mehreren, parallelen Strahlaustritten, so dass man mehrere Profil- oder Flankenlinien gleichzeitig in einer Lücke erfassen könnte [15]. Jedoch sind die derzeit kommerziell verfügbaren Sensoren aufgrund ihrer äußeren Abmessungen nicht für Verzahnungsmessungen geeignet.

Eine interessante Alternative stellen 2-D-Liniensensoren oder 2,5-D-Flächensensoren dar. Diese haben eine deutlich höhere Punktdichte und eignen sich demzufolge für die ganzheitliche Charakterisierung einer Verzahnung innerhalb deutlich kürzerer Zeit als bei konventioneller taktiler Messung. Allerdings ist auch bei diesen Sensoren das Problem, dass das Licht nur in einem bestimmten Winkelbereich zur Oberfläche auftreffen darf, allgegenwärtig. Störinterferenzen müssen durch eine Vorverarbeitung der Punktwolken reduziert werden.

Nicht zuletzt bedarf es auch einer allgemeinen Überarbeitung bzw. Erweiterung heutiger Normen und Richtlinien für die Verzahnungsmessung und -auswertemethoden. Es ist ein steigender Bedarf an ganzheitlicher Erfassung von Verzahnungen zu verzeichnen, da immer mehr und auch neue Zahnflankenmodifikationen in der Praxis eingesetzt werden. Diese sind mit den heutigen Auswerteparametern nur unzureichend zu bewerten [16].

## 7. Literaturverzeichnis

- [1] Hexagon Manufacturing Intelligence: *Optical Sensor HP-O – System solution with Leitz PMM-C*. Technisches Datenblatt, [www.hexagonmi.com](http://www.hexagonmi.com), Abruf am 24.07.2017
- [2] Norm DIN 3960, *Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung*, März 1987
- [3] Schutzrecht EP 2 037 214 A1 (2009-03-18). Leica Geosystems AG. – Bezeichnung: *Verfahren und Messgerät zum Vermessen von Oberflächen*
- [4] 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
- [5] Schutzrecht DE 10 2015 109 076 A1 (2016-01-07). Hexagon Metrology GmbH. – Bezeichnung: *Koordinatenmessgerät mit einem optischen Sensorelement*
- [6] Paduch, A.: *Usage of optical fibers in metrology – Applications in Hexagon products*. In: Swissphotonics Workshop, Juni 2014, Losone, Schweiz
- [7] Hexagon Manufacturing Intelligence: *Rotationally symmetrical workpiece – HP-O Measurement Solution on Leitz CMMs*. Anwendungsbericht, [www.hexagonmi.com](http://www.hexagonmi.com), Abruf am 19.06.2017
- [8] Hexagon Manufacturing Intelligence: *Leitz PMM-C – Hochgenaues KMG & Verzahnungsmesszentrum*, <http://www.hexagonmi.com/de-DE/products/coordinate-measuring-machines/bridge-cmms/leitz-pmmc>, Abruf im August 2017
- [9] Norm ISO 1328-1, Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification – Part 1: *Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth*, September 2013
- [10] Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ): *EVeQT – Erhöhung der Verfügbarkeit und Qualitätsoptimierung von Triebstrangkomponenten und Verzahnungen für Windenergieanlagen*, <http://www.bimaq.de/de/forschung/projekte/eveqt>, Abruf im August 2017
- [11] Günther, A.; Balzer, F.; Lindner, I.; Stöbener, D.; Westerkamp, J.F.; Goch, G.: *Einsatz von Koordinatenmessgeräten an Großverzahnungen – Applikationsbeispiele aus dem Forschungsprojekt EVeQT*. In: 9.VDI-Tagung Koordinatenmesstechnik, Nov. 2014

- [12] Physikalisch-Technische Bundesanstalt: *Large ring gear measurement standard*, [https://www.ptb.de/emrp/fileadmin/documents/eng56/memberrs/upload/Measurement\\_Standards/large\\_ring\\_gear\\_standard.pdf](https://www.ptb.de/emrp/fileadmin/documents/eng56/memberrs/upload/Measurement_Standards/large_ring_gear_standard.pdf), Abruf im August 2017
- [13] Balzer, F.; Steffens, N.; Stein, M.; Kniel, K.: *Traceable measurement of large gears with micrometer accuracy – An essential basis for reliable wind energy systems*. In: 59<sup>th</sup> Ilmenau Scientific Colloquium, Sep. 2017
- [14] Balzer, F.; Luebke, K.: *Optische Messung von Pass- und Steckverzahnungen auf einem Koordinatenmessgerät*. In: 6. GETPRO Kongress, März 2017
- [15] Hexagon Manufacturing Intelligence: GLOBAL Advantage HTA - The High Throughput and Accuracy Measurement Solution for Aerospace Compressor Blade Manufacturers, <http://www.hexagonmi.com/en-IN/products/coordinate-measuring-machines/bridge-cmms/global-advantage-hta>, Abruf im August 2017
- [16] Goch, G.; Ni, Kang; Peng, Yue; Günther, A.: *Future gear metrology based on areal measurements and improved holistic evaluations*. In: CIRP Annals Manufacturing Technology, 2017, Vol. 66, S. 469-474

# Vergleich verschiedener Messsysteme in der Verzahnungsmesstechnik

## Kunststoffzahnräder auf Koordinatenmessgeräten und berührungslosen Messsystemen

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

### Kurzfassung

Die taktile (berührende) Messtechnik im Bereich der Verzahnungstechnik hat sich in der Industrie über die letzten Jahrzehnte bewährt und wurde kontinuierlich optimiert. Aber der Trend zu kürzeren Messzeiten innerhalb der Qualitätssicherung für die industrielle Produktion erfordert auch in der Verzahnungstechnik schnellere Verfahren, die gleichzeitig den Anforderungen an die Messunsicherheit entsprechen. Ebenso wird der Bedarf an einer flächenhaften Auswertung von Verzahnungsflanken größer [1].

Berührungslose Messsysteme haben in diesem Zusammenhang verschiedene Applikationsfelder erschlossen und finden praktischen Einsatz. Dabei werden häufig große Punktemengen innerhalb kurzer Zeit erfasst. Damit ist die vollflächige Erfassung der Werkstückoberfläche möglich. In diesem Beitrag werden Ergebnisse berührungsloser Messsysteme sowie optischer Messkopfsysteme für Koordinatenmessgeräte (KMG) taktilen Ergebnissen im Hinblick auf Vergleichbarkeit, Genauigkeit sowie Handhabung des jeweiligen Systems gegenübergestellt. Der Vergleich wird anhand von Werkstücken, die für alle Messsysteme geeignet sind, durchgeführt, wobei der Schwerpunkt auf dem Vergleich der numerischen Zahnradkenngrößen nach ISO 1328-1:2013-09 liegt.

### 1. Einführung: Werkstücke für den Vergleich

Zum Vergleich werden zwei unterschiedliche Kunststoffzahnräder aus verschiedenen Anwendungsgebieten verwendet. Kunststoff als Werkstückmaterial wird wegen der Durchstrahlbarkeitseigenschaften und der damit verbundenen Eignung für die Computertomographie gewählt.

Die beiden Werkstücke werden im Folgenden vorgestellt und im weiteren Verlauf des Beitrags durch die Abkürzungen **W-gear** und **B-gear** unterschieden.

### 1.1 W-gear

Das von der Firma Horst Scholz GmbH & Co. KG gefertigte weiße Kunststoffzahnrad (**W-gear**) kommt im Bereich der Lebensmittelindustrie in einem Fleischwolf zum Einsatz. Die Laufverzahnung besteht aus zwei Zylinderrädern mit einer Gerad- und einer Schrägverzahnung (Bild 1 / Tabelle 1).

### 1.2 B-gear

Das schwarze Kunststoffzahnrad (**B-gear**) der Schaeffler Technologies AG & Co. KG kommt im Thermomanagementmodul für Motoren in der Automobilindustrie zum Einsatz. Die Laufverzahnung besteht aus zwei geradverzahnten Zylinderrädern (Bild 2 / Tabelle 1).

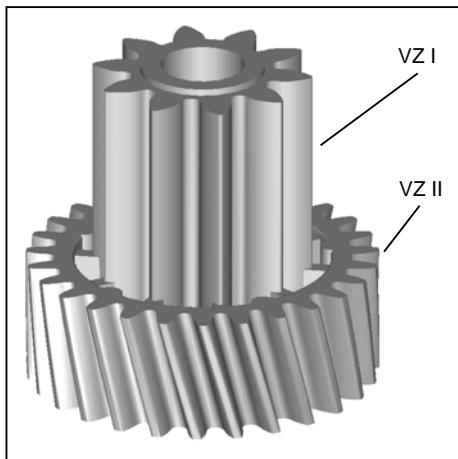


Bild 1: W-gear

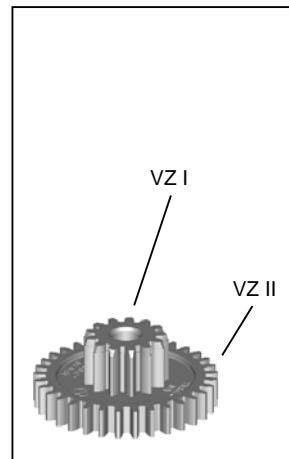


Bild 2: B-gear

Tabelle 1: Übersicht der Geometriedaten W-gear und B-gear

Zahnrad	W-gear		B-gear	
Verzahnung	VZ I	VZ II	VZ I	VZ II
Bezeichnung	W-gear_z10_m2.5_β0	W-gear_z27_m1.75_β15	B-gear_z13_m0.75_β0	B-gear_z33_m0.75_β0
Zähnezahl z	10	27	13	33
Modul m <sub>n</sub>	2.5 mm	1.75 mm	0.75 mm	0.75 mm
Eingriffswinkel α	20°	20°	20°	20°
Schrägungswinkel β	0°	15° L	0°	0°
Kopfkreis d <sub>a</sub>	32 mm	50.95 mm	11.85 mm	25.25 mm
Zahnbreite b	28 mm	18 mm	6 mm	4 mm

## 2. Übersicht der verwendeten Messprinzipien

### 2.1 Taktiles Messprinzip

Im Bereich der taktilen Messtechnik unterscheidet man zwischen schaltenden Messkopfsystemen für Einzelpunktmessungen und messenden Messkopfsystemen, die auch scannen können. Für die Verzahnungsmesstechnik haben sich messende Messkopfsysteme etabliert. Bei messenden Messkopfsystemen unterscheidet man weiterhin zwischen aktiv und passiv messenden Systemen. Der Vorteil von aktiven Systemen liegt dabei in der aktiv geregelten Messkraftüberwachung, welche einerseits hohe Punktemengen bei großer Messgeschwindigkeit erlaubt, sowie andererseits einen großen Nachregelbereich für den Taster an der Messobjektoberfläche bereitstellt. Dadurch kann sichergestellt werden, dass auch große Abweichungen des Bauteils zur Nominalkontur im angetasteten Zustand ohne Luftantastung gemessen werden können bzw. der Taster sicher der Bauteilkontur folgt. Diese Vorteile bilden die Basis für die Genauigkeit aktiver Messkopfsysteme für Koordinatenmessgeräte.

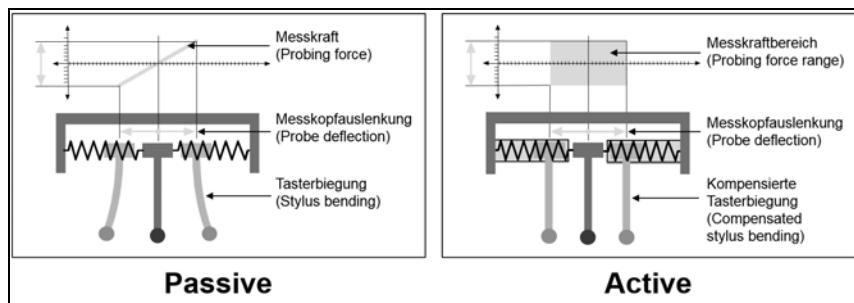


Bild 3: Prinzip messender taktiler Messkopfsysteme mit passiver/aktiver Messkrafterzeugung

Zusätzlich können solche Messsysteme noch mit einer zusätzlichen vierten Achse, das heißt mit einem Drehtisch, ausgerüstet werden und eignen sich damit sehr gut für die Anforderungen der Verzahnungsmesstechnik im klein- bis mittelmoduligen Zahnradbereich.

### 2.2 Optisches Messprinzip: chromatisch-konfokal

Koordinatenmessgeräte können mit berührungslosen optischen Messkopfsystemen erweitert werden [2]. Neben der Messung mittels Bildverarbeitungssystem (Kamera) kommen auch verstärkt chromatisch-konfokale Messkopfsysteme zum Einsatz.

Der Nachteil von Kamerasystemen in Bezug auf Zahnräder besteht unter anderem darin, dass bei Schrägverzahnungen nicht wie erforderlich das Profil in der Mitte der Zahnbreite

erfasst werden kann, da das Messobjekt die Zugänglichkeit für das Kamerasystem einschränkt und damit kein komplettes Bild erfasst werden kann. Eine Bildverarbeitung mit Mehrfachaufnahmen wäre hier zwar denkbar, ist im Hinblick auf die erforderliche Messzeit allerdings als kritisch zu bewerten. Kamerasysteme sind daher eigentlich nur für sehr flache geradverzahnte Zahnräder, zum Beispiel Kettenräder, interessant.

Beim chromatisch-konfokalen Messprinzip wird ein weißes Licht durch eine Optik auf ein Bauteil projiziert, wobei die Optik eine sogenannte chromatische Längsaberration aufweist. Dies führt dazu, dass Licht mit unterschiedlicher Wellenlänge in unterschiedlichen Entfernung zum Objektiv fokussiert wird. Durch die spektrale Auswertung der Reflektion des projizierten Punktes wird der Abstand zur Oberfläche bestimmt. Innerhalb des Messbereichs ist dabei keine Abtastbewegung entlang der optischen Achse erforderlich. Dies bedeutet, dass gegenüber einer taktilen Messung schneller gescannt werden kann.

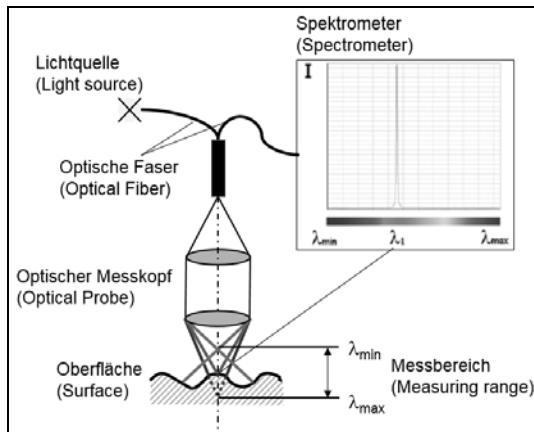


Bild 4: Prinzip der chromatisch-konfokalen Messung [2]

Um verwertbare Reflexionen und damit geeignete Messpunkte zu bekommen, sollte die Einstrahlrichtung weitgehend orthogonal zur Messobjekt-Oberfläche stehen. Der Akzeptanzwinkel zur Aufnahme von Messpunkten bewegt sich abhängig vom verwendeten Messkopfsystem und dessen Arbeitsabstand in der Größenordnung von 17° bis 30° abweichend zur Orthogonalen. Dieser Winkelbereich ist gerade im Fußbereich der Lücken von Laufverzahnungen oft schwer erreichbar.

Ein wesentlicher Vorteil des chromatisch-konfokalen Messprinzips ist die gute Eignung sowohl für reflektierende als auch streuende Oberflächen. Ebenfalls kann ein chromatisch-

konfokales Messkopfsystem mit einem Drehtisch kombiniert und damit sinnvoll für die Verzahnungsmessung ergänzt werden.

Erfordert die Anwendung eine flächige Bewertung des Messobjekts, erhöht sich die Messzeit von taktilen und chromatisch-konfokalen Messkopfsystemen immens, da die Scanningbahnen Zeile für Zeile über die gesamte Objektoberfläche erfasst werden müssen. An dieser Stelle spielen flächenhaft erfassende Messsysteme ihre Vorteile aus. Zwei Varianten werden in diesem Beitrag näher betrachtet: die Streifenprojektion und die Computertomographie.

### 2.3 Optisches Messprinzip: Triangulation / Streifenprojektion

Bei der Streifenprojektion wird ein regelmäßiges Streifenmuster auf das zu messende Objekt projiziert. Das Bild des Objektes mit dem Muster wird von einer Kamera aufgenommen. Durch die dreidimensionale Form des Objekts wird das regelmäßige Muster verformt. Aus der Verformung werden mit unterschiedlichen Vorgehensweisen auf Basis einer Triangulation die dreidimensionalen Koordinaten der Objektoberfläche ermittelt. Die Streifenprojektion liefert damit eine flächenhafte Information über das Objekt [3].

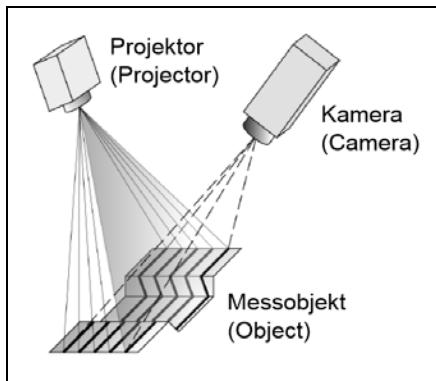


Bild 5: Prinzip der Triangulation / Streifenprojektion

Einschränkungen in Bezug auf Zahnräder gibt es, ähnlich wie beim chromatisch-konfokalen Messprinzip, im Zugänglichkeitsbereich der Zahnlücken und bei Innenverzahnungen. Auch die Oberflächenbeschaffenheit des Messobjekts beeinflusst die Streifenprojektion wesentlich. Bei spiegelnden Oberflächen muss bei Triangulationsmesssystemen typischerweise das Messobjekt vor der Messung mit einem Entspiegelungsspray eingesprüht werden. Das gleichmäßige Aufbringen dieses Mediums auf die Werkstückoberfläche ist sehr aufwendig. Definitiv beeinflusst somit das Medium die Maßhaltigkeit der zu messenden Werkstücke.

Typische Größenordnungen mit geeigneten Airbrush-Systemen betragen 5 µm bis 10 µm Materialauftrag am Messobjekt.

## 2.4 Optisches Messprinzip: Computertomographie

Die Computertomographie (CT) ist ein auf der Röntgendiffraktion (Radioskopie) basierendes, computergestütztes bildgebendes Verfahren, welches nach dem Schichtaufnahmeverfahren, der Tomographie, arbeitet. Sie basiert auf Abbildungsprinzipien der Optik und wird daher den optischen Messverfahren zugeordnet.

Im Unterschied zu allen bisher vorgestellten Messprinzipien, die die Oberfläche von Produkten erfassen, lassen sich durch die Nutzung der Computertomographie zur Koordinatenmessung zerstörungsfrei auch von außen unzugängliche geometrische Merkmale im Inneren eines Werkstücks messen [4].

Die Computertomographie ist stark materialabhängig. Das Messobjekt muss mit Röntgenstrahlen ohne entsprechende Strahlauflärtung durchstrahlbar sein. Die Materialdichte hat dabei großen Einfluss. Aus diesem Grund ist Stahl ein eher ungeeigneter Werkstoff für die Computertomographie und es sind nur kleine Stahlbauteile messbar. CT-Messsysteme werden daher bevorzugt im Kunststoffbereich eingesetzt.

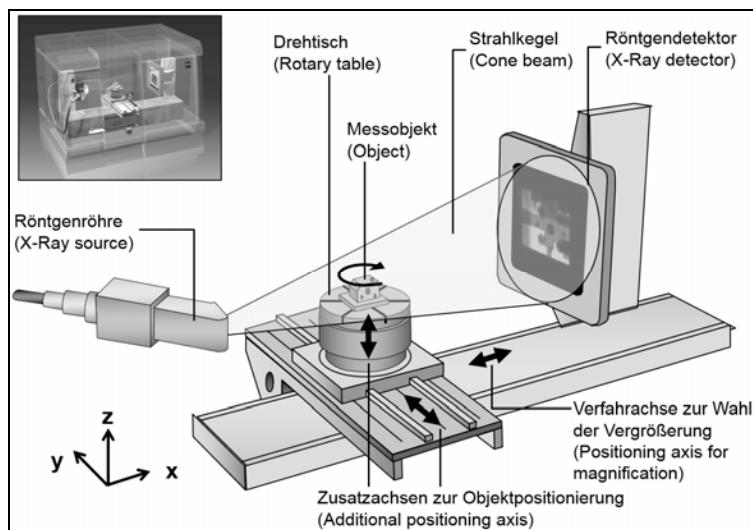


Bild 6: Prinzip der Computertomographie

### 3. Übersicht der verwendeten Messsysteme

Für den Messvergleich wurden insgesamt vier verschiedene Messsysteme untersucht, wobei für zwei ein KMG mit zwei unterschiedlichen Messkopfsystemen verwendet wurde. Die Messverfahren werden in den Tabellen in Abschnitt 4 miteinander verglichen.

#### 3.1 Taktile – ZEISS PRISMO ultra

Als Referenz für den Vergleich dient die taktile Messung auf dem KMG ZEISS PRISMO ultra. Es handelt sich dabei um ein hochgenaues KMG in Portalbauweise. In Verbindung mit dem aktiven Messkopfsystem VAST gold und dem luftgelagerten Drehtisch RT-AB eignet sich das Messsystem ideal für die Verzahnungsmessung. Bezogen auf VDI/VDE 2612:2000-05 und VDI/VDE 2613:2003-12 erfüllt die ZEISS PRISMO ultra alle Anforderungen an ein Messgerät zur Verzahnungsmessung nach Gruppe I. Für alle Verzahnungen wurde ein Taster mit einem Tastkugeldurchmesser von 0,5 mm verwendet.



Bild 7: ZEISS PRISMO ultra

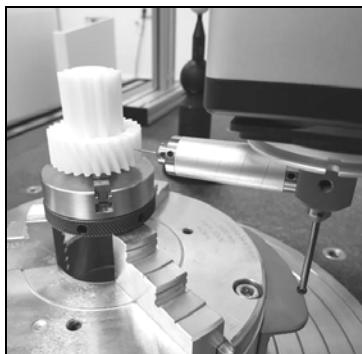


Bild 8: W-gear mit taktilem Tastersystem und Drehtisch

#### 3.2 Chromatisch-konfokal – ZEISS DotScan



Sowohl die KMG-Plattformen ZEISS ACCURA als auch ZEISS PRISMO haben die Möglichkeit neben herkömmlichen taktilen Messkopfsystemen auch chromatisch-konfokale Messkopfsysteme zu nutzen. Den ZEISS DotScan gibt es in drei Varianten mit 1 mm, 3 mm und 10 mm Arbeitsbereich. Für den Messvergleich wurde das System mit Messbereich 3 mm, Arbeitsabstand 20 mm, Akzeptanzwinkel +/- 24°, Spotdurchmesser 9 µm verwendet.

Bild 9: ZEISS DotScan

### 3.3 Triangulation Streifenprojektion – ZEISS COMET

Als Vertreter der Streifenprojektion wurde ein ZEISS COMET LED 8M 150 Messsystem mit 3296 x 2472 Pixel Auflösung verwendet. Das System nutzt ein 3D-Messkopfsystem mit LED-Beleuchtungstechnik. Für die Messungen wurde ein Messfeld von 150 mm verwendet.



Bild 10: ZEISS COMET LED Messsystem

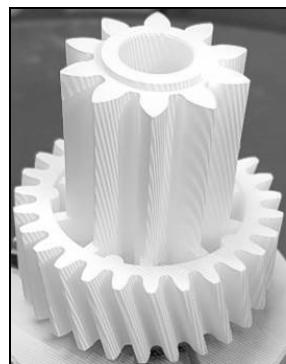


Bild 11: Streifenprojektion auf W-gear

### 3.4 Computertomographie – ZEISS METROTOM

Für den Messvergleich wurde ein ZEISS METROTOM 1500 Messsystem verwendet. Der METROTOM 1500 ist mit einer 225 kV Mikrofokusröhre und einem 2048 x 2048 Pixel Flächendetektor ausgerüstet.

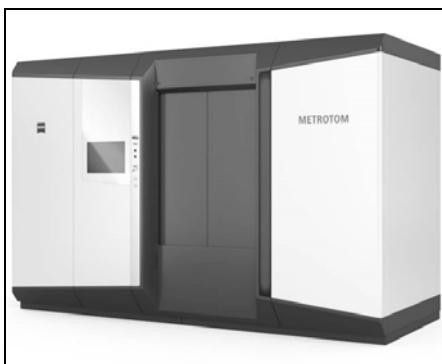


Bild 12: ZEISS METROTOM 1500

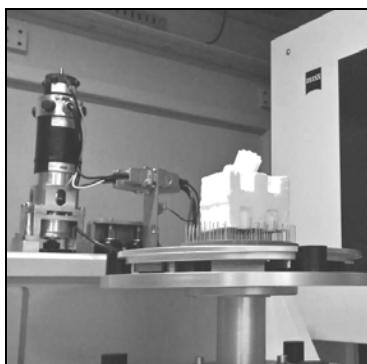


Bild 13: Messaufbau W-gear im CT

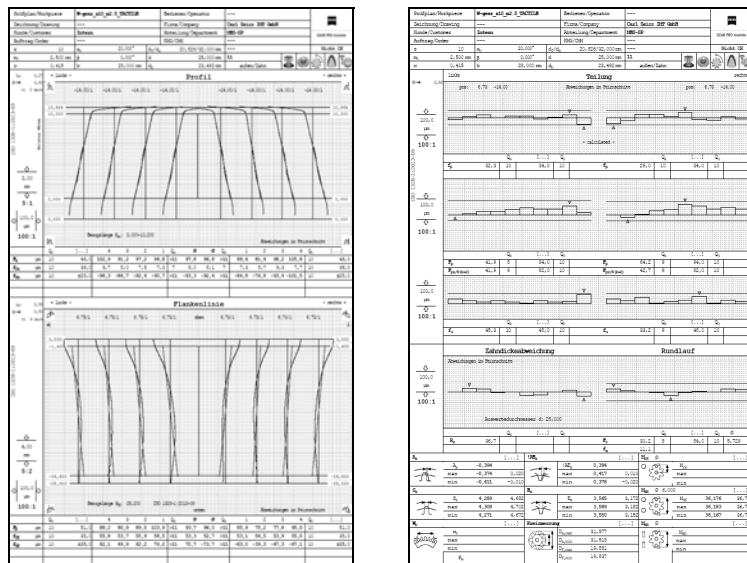
#### 4. Messvergleich

Bevor im Detail auf den Messvergleich eingegangen wird, ist ein **Hinweis** auf die Größenordnung der Messergebnisse sowie die Auswahl der Werkstücke zu berücksichtigen. Das ausgewählte Bauteil **W-gear** beinhaltet zwei Verzahnungen. Eine Geradverzahnung und eine Schrägverzahnung mit  $\beta = 15^\circ$  linkssteigend, jeweils mit einem **Eingriffswinkel  $\alpha = 20^\circ$** . Die Auswahl für eine **Laufverzahnung** wurde dabei ganz bewusst getroffen. Es wurde keine Passverzahnung mit einem Eingriffswinkel  $\alpha = 30^\circ$  oder größer gewählt, da diese generell für optische Messsysteme günstigere Zugangsverhältnisse im Fußbereich einer Verzahnung bieten.

Des Weiteren besteht das **W-gear** aus einem volumenstreuenden, halbtransparenten Material. Dies kann dazu führen, dass das optische Messsignal aus dem Material heraus und nicht eindeutig von der Oberfläche kommt. Somit stellen solche Materialien generell eine Herausforderung für optische Messungen dar.

Ebenfalls wurden für diesen Vergleich bewusst **Bauteile mit großen Abweichungen** von der Nominalgeometrie gewählt. Erfahrungsgemäß liefert ein Vergleich an Bauteilen mit geringen Abweichungen eine sehr gute Vergleichbarkeit der jeweiligen Messsysteme. Ein praxisorientierter Messvergleich sollte jedoch unter realen Bedingungen zuverlässige Vergleichsergebnisse liefern. Die Größenordnung der Abweichungen gegenüber den Sollvorgaben liegen am Bauteil **W-gear** für die Profil- und Flankenlinien-Winkelabweichung bis zu 100 µm, für die Teilungs-Gesamtabweichung bis zu 80 µm und für die Zahndickenabweichung bei bis zu 400 µm. Hierbei handelt es sich um ein Erstmusterteil, dessen Abweichungen zu den Sollvorgaben über denen des später in Serie produzierten Bauteils liegen. Zur Verdeutlichung sind in Bild 14 die Messergebnisse als Verzahnungsmessprotokoll einer taktilen Messung exemplarisch für das **W-gear z10 m2.5 β0** dargestellt. Die Überhöhung beträgt dabei 100:1. Die Absolutabweichungen zur Nominalgeometrie betragen beim **B-gear** für die Profil- und Flankenlinien-Winkelabweichung bis zu 15 µm, für die Teilungs-Gesamtabweichung bis zu 150 µm und für die Zahndickenabweichung bis zu 150 µm. Die Materialeigenschaften sind dabei für optische Messsysteme besser konditioniert als beim weißen Kunststoffzahnrad, da das schwarze Zahnrad keine volumenstreuenden Materialeigenschaften hat.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Leistung der Messsysteme untereinander, werden entsprechend der **Messumfang und das Werkstück-Bezugssystem bei allen Messsystemen gleich gewählt**. Da es sich um Kunststoffzahnräder handelt, werden für die Auswertung von Profil und Flankenlinie alle Zähne der beiden Verzahnungen, an Stelle von lediglich vier am Umfang verteilten, gemessen. Das Werkstück-Bezugssystem liegt in der Bohrung des Zahnrades. Teilung, Rundlauf und Zahndicke werden aus der Profilmessung berechnet.

Bild 14: Messergebnis W-gear z10 m2.5  $\beta_0$ 

Die Ergebnisse der untersuchten Messsysteme werden in **Tabelle 2 und 3** miteinander verglichen. Um ein aussagekräftiges Messergebnis für jedes Messverfahren zu bekommen werden jeweils fünf Wiederholmessungen durchgeführt. Die Streubreite der Wiederholmessungen ist jeweils in der Spalte **RANGE** (Spannweite) aufgeführt. Die Messergebnisse werden im Vergleich auf den Mittelwert der taktilen Messung normiert.

Die Abweichungen der Mittelwerte zur taktilen Messung jedes Messsystems sind jeweils in der Spalte **BIAS** (systematische Abweichung) aufgeführt. Für eine bessere Lesbarkeit wird eine vereinfachte Darstellung der Tabelle gewählt. Dabei werden die verzahnungstypischen Merkmale wie folgt gruppiert, das heißt in der Tabelle ist jeweils nur der größte Abweichungswert der Merkmale aller Messungen aufgeführt:

**Profil-/Flankenlinien-Form** = Profil-Formabweichung  $f_{\alpha}$  / Flankenlinien-Formabweichung  $f_{\beta}$

**Profil-/Flankenlinien-Winkel** = Profil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  / Flankenlinien-Winkelabw.  $f_{H\beta}$

**Teilung** = Teilungs-Gesamtabweichung  $F_p$ , Teilungs-Einzelabweichung  $f_p$

**Rundlauf** = Rundlaufabweichung  $F_R$

**Zahndicke** = Zahndicke S

Der Punkt **Datensatzgröße** liefert eine Größenordnung für die entstandene Datenmenge bei der Streifenprojektion und der Computertomographie. Für die KMG-Messungen ist dieser Punkt nicht relevant, da kein Flächen- oder Volumenmodell zur Messung notwendig ist.

Ein weiterer wichtiger Vergleichsparameter ist die notwendige Zeit für die Durchführung einer Messung. Hierbei wird zwischen fünf Zeitanteilen unterschieden. Unter **Datensatz-erstellung [t]** versteht man die Zeit zur Erzeugung des Datensatzes, z.B. als STL-Punktwolke. Die Zeit für die **Vorbereitung [t]** der Messung bedeutet bei der taktilen und der chromatisch-konfokalen Messung auf dem KMG das Einmessen des Tastersystems und die Ermittlung der Drehtischachse. Beides ist bei den berührungslosen Messsystemen Streifenprojektion und Computertomographie nicht notwendig. Dafür sind bei diesen beiden Systemen diverse andere Vorbereitungen zu treffen, z.B. Werkstück einsprühen oder System einmessen. Unter der **Messzeit [t]** versteht man beim taktilen und dem chromatisch-konfokalen Messkopfsystem die eigentliche Messzeit auf dem KMG, d.h. die Zeit für die Bezugssystembildung und die Verzahnungsmessung. Bei den beiden anderen optischen Messsystemen versteht man unter der Messzeit die Ladezeit des Datensatzes in die Auswertesoftware, sowie die Zeit zur Bezugssystembildung und Verzahnungsmessung. Die **Aus-wertezeit [t]** beinhaltet die Berechnung der Zahnradkenngrößen, die Protokollerstellung und -speicherung mit ZEISS CALYPSO und ZEISS GEAR PRO involute. Die **Gesamtzeit [t]** stellt die Summe aus den fünf genannten Zeiten für jeweils eine Messung dar.

Tabelle 2: **W-gear** Messergebnisvergleich

Messprinzip	Taktil	Chromatisch-konfokal	Streifenprojektion		Computer-tomographie	
<b>Messsystem</b>	ZEISS PRISMO ultra	ZEISS DotScan 3 mm	ZEISS COMET LED 8M 150		ZEISS METRO-TOM 1500	
<b>W-gear</b>	RANGE	RANGE	BIAS	RANGE	BIAS	RANGE
<b>Profil-Form</b>	0.2 µm	2 µm	6 µm	3 µm	2 µm	3 µm
<b>Profil-Winkel</b>	0.5 µm	3 µm	8 µm	2 µm	10 µm	2 µm
<b>Flankenlinien-Form</b>	0.2 µm	2 µm	3 µm	3 µm	2 µm	2 µm
<b>Flankenlinien-Winkel</b>	0.5 µm	3 µm	3 µm	2 µm	10 µm	2 µm
<b>Teilung</b>	0.5 µm	4 µm	2 µm	4 µm	10 µm	5 µm
<b>Rundlauf</b>	0.5 µm	4 µm	2 µm	4 µm	10 µm	5 µm
<b>Zahndicke</b>	0.5 µm	2 µm	8 µm	2 µm	20 µm	4 µm
<b>Datensatzgröße</b>	-	-	-	40 MB	8000 MB	
<b>Datensatzerstellung [t]</b>	-	-	-	20 Min	50 Min	
<b>Vorbereitung [t]</b>	7 Min		9 Min	15 Min	5 Min	
<b>Messzeit [t]</b>	30 Min		30 Min	6 Min	10 Min	
<b>Auswertezeit [t]</b>	< 1 Min		< 1 Min	< 1 Min	< 1 Min	
<b>Gesamtzeit [t]</b>	38 Min		40 Min	42 Min	66 Min	

Tabelle 3: **B-gear** Messergebnisvergleich

Messprinzip	Taktile	Chromatisch-konfokal	Streifenprojektion	Computer-tomographie
<b>Messsystem</b>	ZEISS PRISMO ultra	ZEISS DotScan 3 mm	ZEISS COMET LED 8M 150	ZEISS METROTOM 1500
<b>B-gear</b>	RANGE	RANGE	BIAS	RANGE BIAS
<b>Profil-Form</b>	0.2 µm	2 µm	3 µm	2 µm 3 µm
<b>Profil-Winkel</b>	0.5 µm	1 µm	3 µm	2 µm 6 µm
<b>Flankenlinien-Form</b>	0.2 µm	2 µm	3 µm	2 µm 3 µm
<b>Flankenlinien-Winkel</b>	0.5 µm	1 µm	3 µm	2 µm 6 µm
<b>Teilung</b>	0.5 µm	3 µm	4 µm	5 µm 10 µm
<b>Rundlauf</b>	0.5 µm	3 µm	4 µm	5 µm 12 µm
<b>Zahndicke</b>	0.5 µm	1 µm	5 µm	4 µm 10 µm
<b>Datensatzgröße</b>	-	-	-	40 MB 4500 MB
<b>Datensatzerstellung [t]</b>	-	-	-	20 Min 50 Min
<b>Vorbereitung [t]</b>	7 Min	9 Min	15 Min	5 Min
<b>Messzeit [t]</b>	22 Min	22 Min	4 Min	9 Min
<b>Auswertezeit [t]</b>	< 1 Min	< 1 Min	< 1 Min	< 1 Min
<b>Gesamtzeit [t]</b>	30 Min	32 Min	40 Min	65 Min

## 5. Analyse

### 5.1 Chromatisch-konfokal – ZEISS DotScan

Aufgrund des Gehäusedesigns des ZEISS DotScan und des kleinen Bohrungsdurchmessers der Werkstücke, kann das chromatisch-konfokale Messkopfsystem nicht zur Bezugssystembildung in der Bohrung verwendet werden. Hierzu ist ein Tastersystemwechsel auf ein taktiles Tastersystem notwendig. Dies verursacht eine größere Gesamtzeit welche so eigentlich nicht zu erwarten ist, da grundsätzlich der Vorteil dieses Messkopfsystems in einer größeren Scanninggeschwindigkeit im Vergleich zu einer taktilen Messung liegt.

Der RANGE an beiden Bauteilen bewegt sich in einer Größenordnung von kleiner als 4 µm. Als Begründung für den BIAS bei Profil-Formabweichung und Profil-Winkelabweichung am **W-gear** ist die eingeschränkte Zugänglichkeit im Fußbereich unter Berücksichtigung des Akzeptanzwinkels zu nennen. Das halbtransparente Werkstoffmaterial stellt eine zusätzliche Schwierigkeit dar. Die Volumenstreuung verfälscht dabei das Messsignal. Es kann unter Umständen kein eindeutiger Messpunkt an der Werkstückoberfläche erzeugt werden, wenn im Material fokussiert wird.

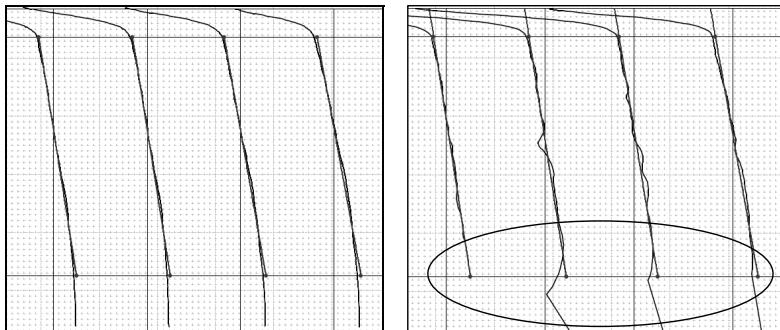


Bild 15: W-gear z27 m1.75  $\beta$ 15 – links Profil taktile – rechts Profil chromatisch-konfokal

## 5.2 Triangulation Streifenprojektion – ZEISS COMET

Der RANGE bewegt sich an beiden Bauteilen in einer Größenordnung von kleiner 5  $\mu\text{m}$ . Unter Berücksichtigung der großen Abweichungen zur Nominalgeometrie und der schlechten Zugänglichkeit in der Bohrung des Zahnrads, welche allerdings zur Bezugssystembildung notwendig ist, stellt dies ebenfalls ein gutes Ergebnis dar.

Der BIAS zur taktilen Messung ist zu einem großen Anteil im Aufbringen des Entspiegelungssprays zu begründen. Das Medium ist zur Minimierung von Reflexionen an spiegelnden Oberflächen für die Messung notwendig. Ein homogenes Aufbringen des Entspiegelungssprays über die Zahnhöhe und Zahnbreite ist nicht trivial. Entsprechend wirkt sich dies auf die Profil- und Flankenlinien-Winkelabweichung aus.

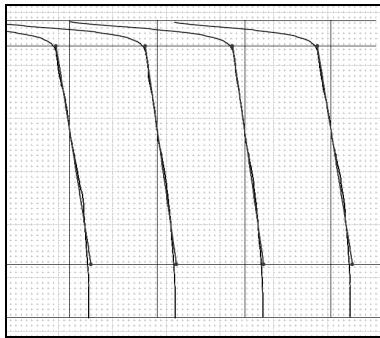


Bild 16: W-gear z27 m1.75  $\beta$ 15 – gemessenes Profil mit Streifenprojektor

Zusätzlich ist die Zahndicke beeinträchtigt, da sich das Medium auf rechter und linker Flanke mit zirka Faktor 2 in der Zahndicke auswirkt.

### 5.3 Computertomographie – ZEISS METROTOM

Der auffälligste Punkt der CT-Messungen am **W-gear** ist der BIAS von 12 µm bei den Formabweichungen. Systembedingt ist die Auflösung von der erforderlichen Durchstrahlungsleistung abhängig. Je größer und dickwandiger das Werkstück ist, desto mehr Leistung ist erforderlich. Bei größerer Leistung entsteht ein größerer Brennfleck und dadurch bekommt man entsprechend weniger Messpunkte oder entsprechend ungenauere Messpunkte an der Objektoberfläche.

Mit den erforderlichen Filtereinstellungen nach ISO 1328-1:2013-09 ist die Formabweichung deutlich größer als bei der taktilen Messung. Verdoppelt man die von ISO empfohlene Grenzwellenlänge, reduziert sich der BIAS auf 6 µm.

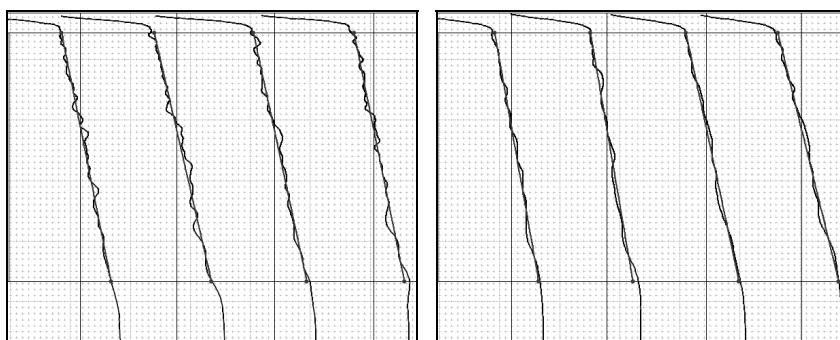


Bild 17: W-gear z27 m1.75  $\beta$ 15 – Profil CT – links ISO-Filter – rechts doppelter ISO-Filter

Beim **B-gear** ist der BIAS deutlich kleiner als beim **W-gear**. Wie oben beschrieben, sind die Werkstückgröße und die Materialdichte maßgeblich für die erforderliche Strahlungsleistung zu nennen. Damit konnte bei dem kleinen Bauteil mit höherer Auflösung gemessen werden.

### 5.4 Vorteile berührungsloser Messsysteme

Der Vorteil berührungsloser flächiger Messsysteme stellt die komplette Erfassung eines Werkstücks dar. Die Visualisierung und Beurteilung gegenüber einem 3D-Modell ist damit einfach und schnell realisierbar. Abweichungen am Werkstück werden dabei farblich in benutzerdefinierten Abstufungen dargestellt. Man erhält eine ganzheitliche Veranschaulichung des Werkstücks gegenüber dem Nominalmodell, wie beispielhaft in Bild 18 abgebildet. Zusätzlich kann dabei der Überhöhungsfaktor der Werkstück-abweichungen festgelegt werden. Damit können Zahnrädenkenngroßen des Verzahnungs-messschreibs in einer 3D-Ansicht vollständig dargestellt werden.

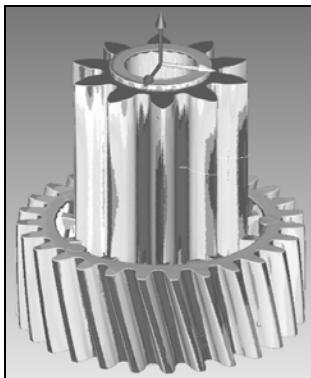


Bild 18: W-gear Soll-/Istvergleich

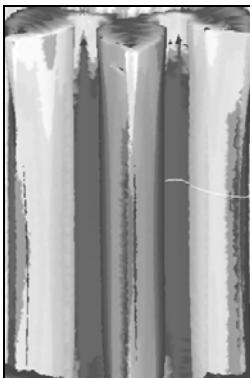
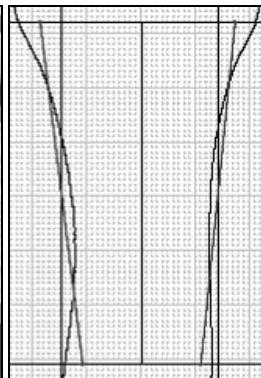


Bild 19: W-gear überhöhte Abweichungsdarstellung



Beim **W-gear z10 m2.5 β0** zeigt sich dies besonders eindrucksvoll in der konkav ausgeprägten Flankenlinien-Winkelabweichung wie in Bild 19 gezeigt wird. Ebenso erkennt man durch die farbliche Abweichungsvisualisierung sehr gut, dass speziell im Zahnkopfbereich zu wenig Material vorhanden ist, was sich wiederum in einer negativen Profil-Winkelabweichung auswirkt.

## 6. Zusammenfassung

**Taktile Messsysteme** bieten zur reinen Bewertung von zahnradspezifischen Kenngrößen die höchste Genauigkeit. Die Wiederholbarkeit von Messungen bewegt sich im Bereich deutlich kleiner 1 µm. Für flächenhafte Bewertungen von Zahnrädern ist diese Methode, speziell in Bezug auf die erforderliche Messzeit zur flächigen Erfassung, allerdings nicht zu bevorzugen. Bei weichen Werkstücken kann das Thema Messkraft unter Umständen eine ungewünschte Auswirkung haben. Damit die taktile Berührung des Tasters auf der Werkstückoberfläche beim Messen keinen Einfluss auf die Messergebnisse nimmt, können aktiv messende Messkopfsysteme die Antastkraft regeln. Im Kunststoffbereich werden dabei typischerweise Größenordnungen von 10 mN bis 100 mN verwendet.

Die Messabweichung von **chromatisch-konfokalen Messkopfsystemen** bewegt sich an gut zugänglichen Zahnrädern (Passverzahnungen und Geradverzahnungen) in der Größenordnung kleiner 5 µm. Bei schlechter Zugänglichkeit und beim Messen in den Randzonen des Arbeitsbereiches, schwindet diese Genauigkeit allerdings und es zeigt sich eine deutlich größere Abweichung zur taktilen Messung in der Größenordnung bis 8 µm. In Bezug auf die

flächige Erfassung und Auswertung gelten dieselben Einschränkungen wie bei der taktilen Messmethode. Der Faktor Zeit erhöht sich immens.

**Streifenprojektoren** liefern eine erstaunlich gute Performance für Anwendungen, bei denen „nicht das letzte Mikrometer“ gefunden werden muss. Im Bereich 5 µm bis 20 µm kann man zuverlässige Messergebnisse erzielen. Der größte Nachteil dieses Messprinzips wirkt sich bei spiegelnden Oberflächen in diffusen Reflexionen aus und erzeugt damit Ungenauigkeiten. Vorteil dieser Messsysteme ist die flächenhafte Erfassung des gesamten Werkstücks.

Die **Computertomographie** ist speziell für Kunststoffanwendungen sehr interessant. Wie bei der Streifenprojektion muss man hierbei mit systembedingten Genauigkeitseinbußen in der Größenordnung 10 µm bis 15 µm rechnen. Mit stärkerer Filterung kann man eine bessere Vergleichbarkeit im Hinblick auf Formabweichungen erzielen.

## Danksagung

Die Zahnräder wurden freundlicherweise von der Schaeffler Technologies AG & Co. KG, 91074 Herzogenaurach, Herr Dr.-Ing. Peter-Frederik Brenner, Leiter Qualität Zentraler Feinmessraum, sowie der Firma Horst Scholz GmbH & Co. KG, 96317 Kronach, Herr Dr.-Ing. Andreas Langheinrich, Entwicklung Antriebstechnik in Kunststoff, zur Verfügung gestellt.

## Literatur

- [1] Imkamp, D., et al.: Herausforderungen und Trends in der Fertigungsmesstechnik - Industrie 4.0, in: tm - Technisches Messen 2016, Vol. 83 (7–8): pp. 417–429, De Gruyter Oldenbourg Wissenschaftsverlag
- [2] Imkamp, D.: Multisensorsysteme zur dimensionellen Qualitätsprüfung, in: PHOTONIK - Fachzeitschrift für optische Technologien, AT-Fachverlag GmbH Fellbach, Ausgabe 06/2015
- [3] Bauer, N. (Hrsg.): Leitfaden zu Grundlagen und Anwendungen der optischen 3D-Messtechnik, Vision 6, Fraunhofer Allianz Vision, Erlangen 2003
- [4] VDI/VDE-Richtlinie 2630 Blatt 1.1 bis 1.4 Computertomographie in der dimensionellen Messtechnik, 2008-2009

# Werkzeug- und Fertigungseinflüsse in der Verzahnungsmessung erkennen

M. Sc. Thies Kahnhenbley, Prof. Dr.-Ing. Günther Gravel,  
HAW Hamburg, Hamburg

## Kurzfassung

Die Fertigungstoleranzen für Zahnräder in automobilen Getrieben werden kontinuierlich kleiner, da die PKW-Hersteller immer leichtere, effizientere und geräuschärmmere Getriebe entwickeln müssen um im Wettbewerb bestehen zu können. Schon geringe Abweichungen im Fertigungsprozess sorgen für Ausschusswerkstücke, die eine schnelle Reaktion erfordern. Dafür ist die Kenntnis der Ursache erforderlich. In einer Analyse der Messergebnisse können oft die Auswirkungen der Fertigungsprobleme erkannt werden. Häufig sind Einflüsse aus dem Werkzeug oder dem Werkstück, wie zum Beispiel Lagefehler oder die gewählten Prozessparameter, für die Abweichungen verantwortlich. Durch den Vergleich von guten und schlechten Werkstücken können fehlerhafte Maschinen oder Prozesse identifiziert werden. Neue Simulationswerkzeuge erlauben es typische Werkzeug- und Prozesseinflüsse darzustellen und helfen dem Anwender die Zusammenhänge leichter zu verstehen.

Dieser Beitrag soll aufzeigen, welche Informationen über den Fertigungsprozess aus einem digitalen Messblatt gewonnen werden können. Am Beispiel von Werkzeug-Lagefehlern und Prozessparametern werden die Auswirkungen auf das Werkstück anhand der Messkurven anschaulich diskutiert. Ein besonderes Augenmerk ist auf die Identifizierung systematischer Werkzeugfehler gelegt. Mit einer neuartigen Methode ist es möglich, bei mehrgängigen Werkzeugen die Messkurven nach Gangzahl zu sortieren. Unterschiede in den Gängen können so leicht sichtbar gemacht werden. Zusammenfassend stellt der Beitrag die Auswirkungen von Werkzeug- und Fertigungseinflüssen dar, die mit wenigen Informationen aus dem Fertigungsprozess schon im Messblatt zu erkennen sind.

## Abstract

This paper shows how information can be gained from gear measurement gradients. In a first step, it is often helpful to compare measurements to determine deviations between good and poor gears. In a second step, the effects of faulty production processes and process parameters can be compared. Software solutions support the analysis and simulation of deviations

for generation grinding processes. In addition, the application of a new method for “sorting by number of starts” is presented. The advantage of automatically sorted deviations which are related to starts on hobbing or grinding tools is explained by taking example of position deviations. Helpful procedures are explained on the basis of practical examples to handle deviations on gears. In summery the article makes clear which tool and process deviations can be easily detected by suitable methods and software support.

## 1. Einleitung

Die Getriebehersteller müssen sich heute in einem anspruchsvollen Spannungsfeld zwischen effizienter Fertigung und Kundenerwartungen bezüglich Lebensdauer, Gewicht und Geräuschentwicklung bewegen. Die Fertigungstoleranzen für Zahnräder in automobilen Getrieben werden daher kontinuierlich geringer. Diese Entwicklung wird durch immer leiser werdende Motoren und E-Antriebe weiter verschärft. Schon geringe Abweichungen im Fertigungsprozess können die Oberfläche von Zahnrädern so beeinflussen, dass unerwünschte Geräusche entstehen können [1-3].

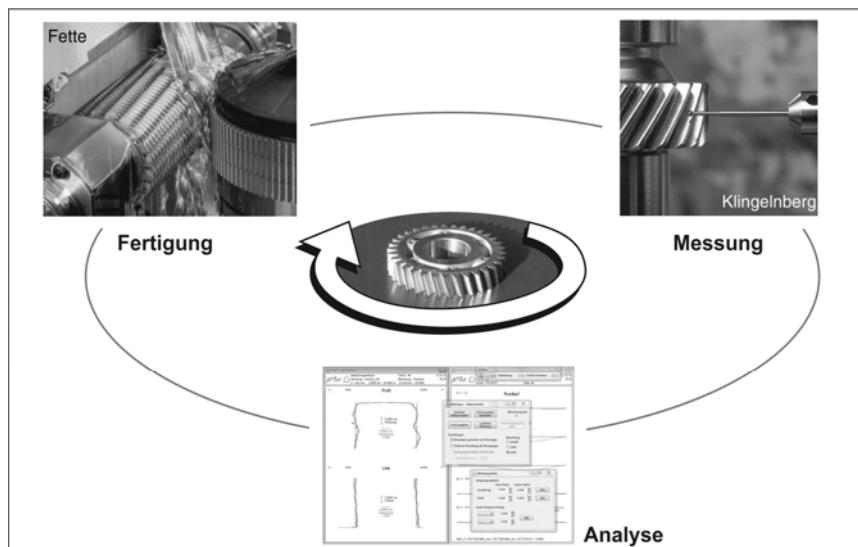


Bild 1: Qualitätsregelkreis

Bild 1 zeigt einen Qualitätskreis von der Fertigung über die Messung bis zur Analyse. Fehlerbehaftete Zahnräder können auf einem Verzahnungsmessgerät zuverlässig erkannt und unzulässige Abweichungen geometrisch festgestellt werden. Im weiteren Verlauf muss das Messergebnis analysiert werden, um mit den Ergebnissen den Fertigungsprozess zu korrigieren. Bei der Analyse der Abweichungen ist die wesentliche Frage, wie die Messergebnisse interpretiert und welche Informationen über den Fertigungsprozess gewonnen werden können. Simulationen können den Anwender bei der Ursachensuche sinnvoll unterstützen [4], [5].

## 2. Qualitätseinflüsse in der Fertigung

Es gibt eine Fülle von Parametern, die einen Einfluss auf die Qualität des Werkstückes ausüben können. Diese lassen sich grob in drei Kategorien unterteilen: Werkstück- und Werkzeugeinflüsse sowie Prozessparameter. Die Übersicht in Bild 2 zeigt einige wichtige Einflüsse, wie sie unter anderem in [1] und [2] genannt sind.

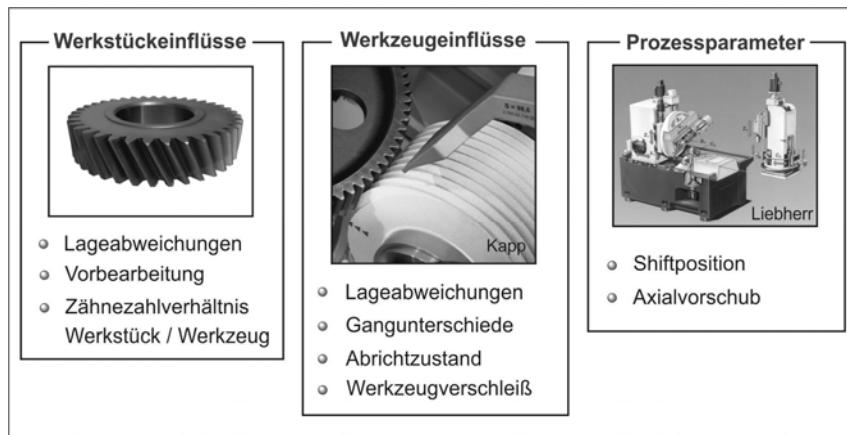


Bild 2: Mögliche Einflussparameter auf die Qualität des Werkstückes

Das Werkstück selbst kann zur Entstehung von Abweichungen auf den Zahnflanken beitragen. Laufen zum Beispiel die Lagersitze bei der Fertigbearbeitung nicht zur aktuellen Mitte der Aufspannung, so ergeben sich Lageabweichungen der Verzahnung. Große und besonders periodische Abweichungen aus der Vorbearbeitung können den anschließenden Feinbearbeitungsprozess anregen. Fehler am Werkzeug wirken sich beim Wälzfräsen und Wälzschräfen im Verhältnis der Zähnezahlen auf die Oberfläche aus. Lageabweichungen des

Werkzeugs entstehen durch Unwucht, Aufspannfehler oder Abrichtabweichungen. Durch den Werkzeugverschleiß wird die Schneide stumpf und verursacht zusätzliche Abweichungen im Schneidprozess. Der Abrichtprozess bestimmt allgemein die Qualität der Oberfläche und kann konkret Unterschiede in den Gängen verursachen, die sich dann auf das Werkstück abbilden. Die Prozessparameter beeinflussen in der Fertigung ebenfalls die Qualität der Werkstücke. Abhängig von der Shiftposition wirken sich die Lagefehler des Werkzeugs unterschiedlich aus, da die Wirkung eines Taumels von der Position des Werkzeugs bestimmt wird. Schließlich können sich Werkzeugabweichungen in Abhängigkeit vom Axialvorschub auf die Oberfläche des Werkstückes übertragen. Dabei besteht eine gemeinsame Wirkung von Fehlergröße am Werkzeug und dem Axialvorschub [6].

### 3. Vergleich mehrerer Werkzeugmaschinen

Im Analyseprozess werden in einem ersten Schritt die Abweichungskurven miteinander verglichen. Bild 3 links zeigt die gemeinsame Darstellung der Abweichungskurven von vier gemessenen Zähnen eines 1-gängig geschliffenen Werkstückes.

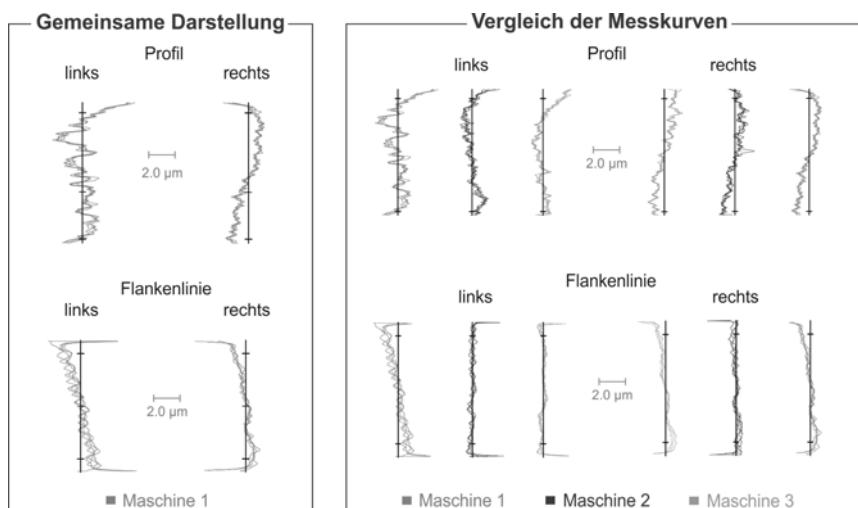


Bild 3: Gemeinsame Darstellung der Messkurven verschiedener Werkzeugmaschinen

Die übereinandergelegten Abweichungskurven haben sowohl im Profil als auch in der Flankenlinie einen ähnlichen Verlauf. Gerade im Profil weisen alle vier Messkurven eine deutliche Übereinstimmung auf. In der Flankenlinie links ist die Streuung der Messkurven etwas breiter

als auf der rechten Seite. Rechts im Bild 3 ist ein Vergleich mehrerer Messkurven dargestellt, bei denen die Werkstücke von verschiedenen Maschinen gefertigt wurden. Auf der rechten Seite sind in Profil und Flankenlinie keine wesentlichen Unterschiede zu erkennen. Auf der linken Seite weisen die Messkurven der Maschine 1 eine größere Profilabweichung gegenüber den anderen Maschinen auf. In der linken Flankenlinie hat die gleiche Maschine eine deutliche Winkelabweichung, die die anderen Maschinen nicht zeigen. Die Profilabweichungen werden bei 1-gängig wälzgeschliffenen Werkstücken häufig durch das Werkzeug verursacht, sodass hier eine weitere Analyse wie die Überprüfung des Abrichtzustandes anschließen sollte. Zusammenfassend wird aus dem Vergleich der Messkurven ersichtlich, dass bei Maschine 1 Abweichungen auftreten. Diese sollten intensiver untersucht werden, wenn die dargestellten Abweichungen zu einem Toleranzproblem führen.

#### 4. Vergleich mehrerer Werkstücke

Nicht nur der Vergleich mehrerer Maschinen, sondern auch der Vergleich mehrerer Werkstücke im zeitlichen Verlauf kann Aufschluss über mögliche Abweichungen im Fertigungsprozess geben. Bild 4 links zeigt die gemeinsame Darstellung der Zähne zweier wälzgefräster Zahnräder, bei denen alle Flanken gut reproduzierbar hergestellt wurden.

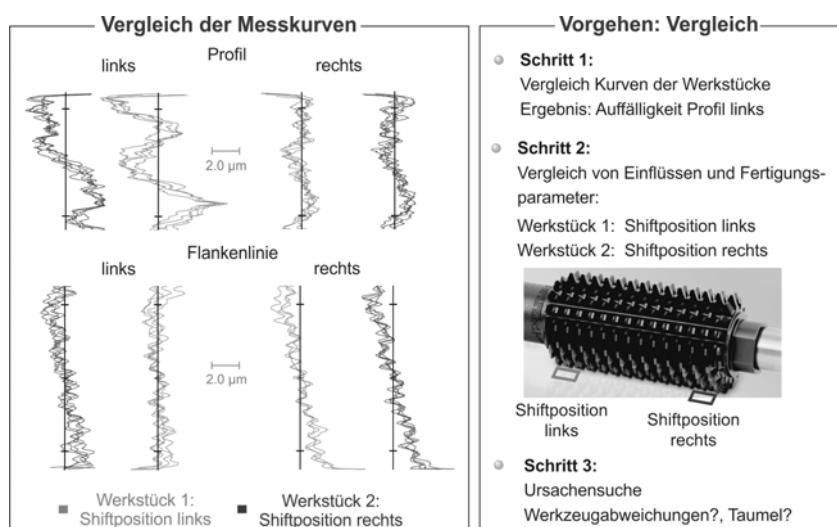


Bild 4: Vergleich und Analyse mehrerer Werkstücke

Werden die dargestellten Messkurven der Zahnräder in einem ersten Schritt miteinander verglichen, zeigt sich ein auffälliger Unterschied im Profil links am Werkstück 1. Es tritt eine größere systematische Formabweichung auf. In einem zweiten Schritt müssen Unterschiede gesucht und mögliche Einflüsse und Fertigungsparameter miteinander verglichen werden. In diesem Beispiel sind, wie in Bild 4 rechts dargestellt, die Shiftpositionen bei der Herstellung der Zahnräder verschieden gewesen. Das Werkstück 1 ist mit der Shiftposition links am Gegenlager hergestellt worden, das Werkstück 2 mit der Shiftposition rechts am Hauptlager.

Im dritten Schritt erfolgt die Ursachensuche. Sowohl ein Taumel (vgl. Kapitel 6: Lagefehler des Werkzeugs) als auch das Werkzeug selbst können die vorgestellte Abweichungskurve erzeugen. Ein Werkzeugexzenter kann nicht die Ursache sein, da dann die Formabweichung im Profil links und rechts vergleichbar sein müsste. Eine Simulation der möglichen Abweichungen kann mit einer vollständigen Werkzeugmessung sehr hilfreich sein. Dabei sollten weitere mögliche Abweichungsursachen ebenfalls untersucht werden. Die Eliminierung einer einzelnen Möglichkeit kann unter Umständen nicht ausreichend sein, da es auch zu Überlagerungen mehrerer Effekte kommen kann.

## 5. Profilschleifen: Lagefehler des Werkzeugs

Sehr einfach ist es, wenn bestimmte Formen einer Messkurve direkt einer Abweichungsursache zugeordnet werden können. Beim Fertigungsprozess Profilschleifen ist dies im Profil gut möglich. In Bild 5 sind zwei unterschiedliche Messungen dargestellt.

Auf der linken Seite des Bildes wird das Werkzeug in radialer Richtung (Zustellung) nach außen verschoben. Dadurch wird der Grundkreis der entstehenden Evolvente größer. Dies äußert sich in einer entgegengesetzten Verkipzung der rechten und linken Messkurven. Die Zustellung wird oft für eine Anpassung der Zahndicke genutzt. Auf der rechten Seite des Bildes ist eine gleichsinnige Verkipzung der Messkurven zu erkennen. Diese Art der Verkipzung ist ein Hinweis auf eine tangentiale Verschiebung des Werkzeuges. Die entstehende Außermittigkeit sorgt für einen größeren Grundkreis auf der linken Flanke des Werkstücks und einen kleineren Grundkreis auf der rechten Flanke. Die Auswirkung der Grundkreisänderung ist bei der Außermittigkeit kleiner als bei einer Zustellung, wie die Kennwerte der Profilwinkelabweichung  $f_{Ha}$  zeigen.

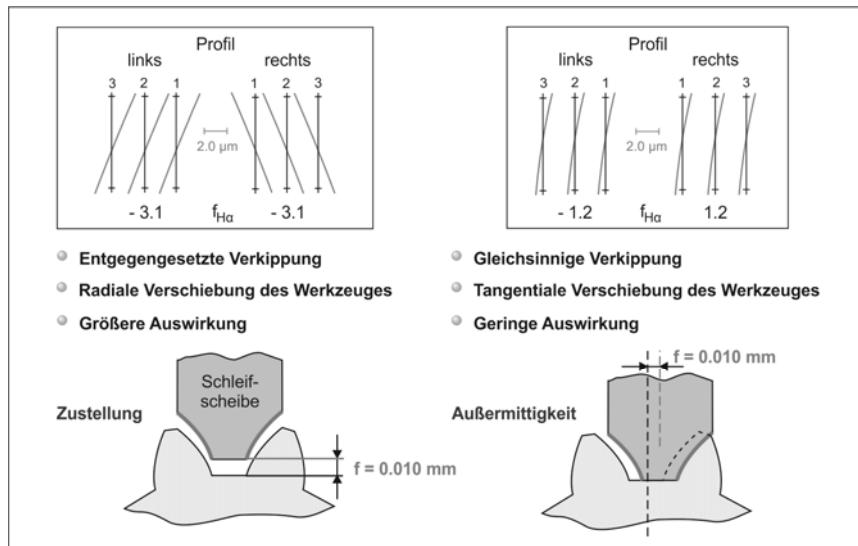


Bild 5: Auswirkungen von Werkzeug - Lagefehlern beim Profilschleifen

## 6. Wälzfräsen: Lagefehler des Werkzeuges - Exzenter

Die Messung eines wälzgefrästen Werkstücks ergibt die in Bild 6 links dargestellten Abweichungskurven im Profil. Die Messkurven sind gut reproduzierbar, zeigen aber eine auffällige periodische Abweichung. Es ist denkbar, dass ein exzentrisches Werkzeug die Ursache der Abweichung ist. In einer Simulation wird ein Exzenter am Haupt- und Gegenlager so lange eingestellt, bis sich in Amplitude und Phasenlage eine vergleichbare Abweichungskurve ergibt. Dies ist der Fall bei einem  $10.0 \mu\text{m}$  Rundlauf Fehler am Haupt- und Gegenlager.

Im Folgenden wird die Entstehung der Abweichungskurve bei einer exzentrischen Lage eines 1-gängigen Werkzeuges erläutert. Die Drehbewegung des Werkzeugs erzeugt einen sinusförmigen Rundlauf Fehler, der sich als eine tangentiale Bewegung des Schneidenprofils ausprägt. Am Punkt  $P_1$  liegt das Werkzeug durch den Rundlauf Fehler weiter vom Profil entfernt und nimmt nur wenig Material ab. Das Schneidenprofil verschiebt sich bei einer Umdrehung des Werkzeugs einmal in das Profil hinein und wieder hinaus bis es am Punkt  $P_2$  angekommen ist. Die Länge von  $P_1$  und  $P_2$  korreliert mit dem Wälzweg  $\Delta L$ . Dieser ist von vielen Parametern abhängig, insbesondere von Prozessparametern, wie dem Axialvorschub und

dem Zähnezahlverhältnis von Werkstück zu Werkzeug. Wegen der komplexen Zusammenhänge ist es notwendig für jede Konfiguration den Exzenter zu simulieren.

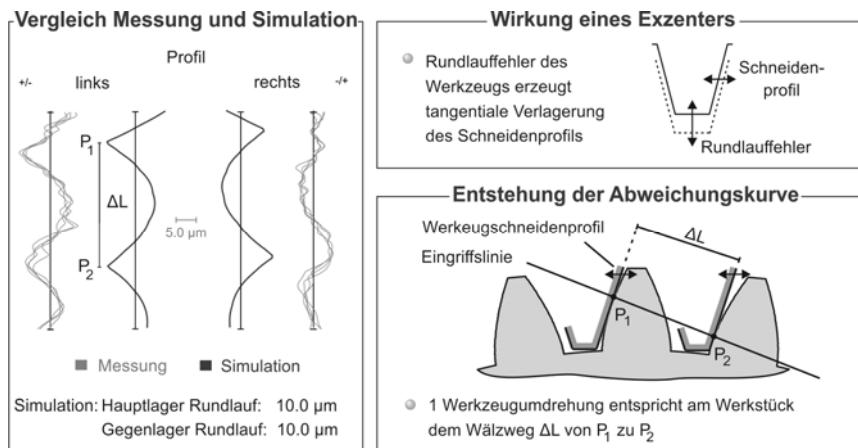


Bild 6: Messung, Simulation und Entstehung der Abweichungskurve eines Exzentrers

Dieses Beispiel zeigt den Vergleich einer Messung mit einer Simulation und stellt gleichzeitig den Ablauf der Entstehung eines Exzentrers dar. Die vorgestellte Konstellation von Werkzeug und Werkstück ergibt eine spezielle Abweichungskurve, die sich bei anderen Kombinationen verändert. Allerdings können auch Werkzeugfehler, die sich nach einer Umdrehung wiederholen, eine vergleichbare periodische Abweichungskurve erzeugen.

## 7. Bestimmung des Axialvorschubes

Häufig sind bei der Interpretation einer Messung nicht mehr alle Prozessgrößen ohne weiteres abrufbar. Einige Daten können sich jedoch direkt aus dem Messblatt heraus erschließen, wie auch der Axialvorschub. Er kann in vielen Fällen direkt abgelesen werden. Dies ist umso einfacher, je größer der gewählte Axialvorschub bei der Fertigung gewesen ist. Im Beispiel des Bildes 7 kann man oben links direkt am wälzgefrästen Zahnrad die Vorschubmarkierung des Axialvorschubes erkennen. Auf einem ausgedruckten Messprotokoll lässt sich der Axialvorschub abmessen. Allerdings verringern Formfehler die Genauigkeit.

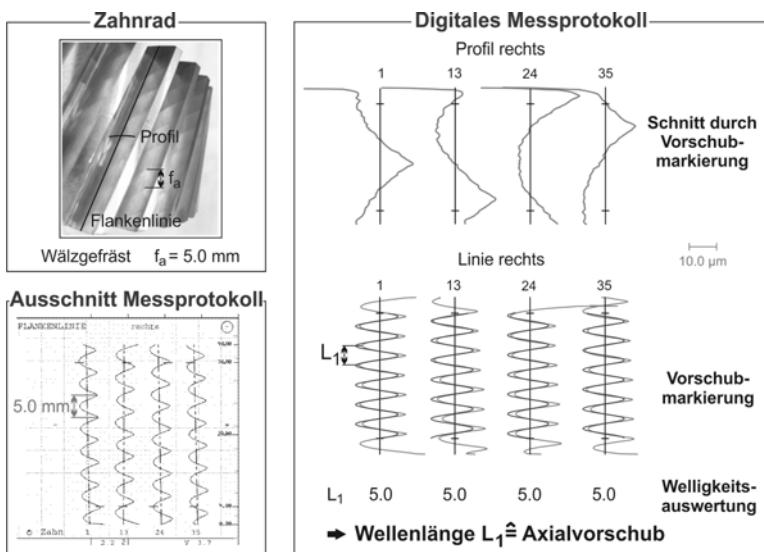


Bild 7: Bestimmung des Axialvorschubes

Bei einem digitalen Messprotokoll besteht die Möglichkeit sich die Wellenlänge  $L_1$  direkt über eine Welligkeitsauswertung ausgeben zu lassen. Formabweichungen werden bei der Welligkeitsauswertung ausgeglichen. Rechts oben im Bild ist der Schnitt durch die Vorschubmarkierungen im Profil zu erkennen. Dieser eignet sich nicht zur Bestimmung des Axialvorschubes. Vorsicht ist bei mehrgängigen Werkzeugen und nicht teilbaren Zähnezahlverhältnissen geboten. Bei einem Werkzeugfehler können periodische Strukturen entstehen, die dem Wert der Vorschubmarkierung multipliziert mit der Gangzahl entsprechen. Ist also die gemessene Wellenlänge ein Vielfaches vom tatsächlichen Axialvorschub, ist dies ein Hinweis auf ein defektes Werkzeug oder eine Lageabweichung des Werkzeugs.

## 8. Sortierung nach Gangzahl

Unterschiede in den Gängen eines Werkzeugs übertragen sich auf das Werkstück. Mit einer neuen Methode können diese deutlich sichtbar gemacht werden. Im Bild 8 links sind die Abweichungskurven eines rechten Profils eines Zahnrads abgebildet, das mit einem 4-gängigen Werkzeug hergestellt wurde. Die Form der Abweichungskurven verändert sich augenscheinlich von einem zum nächsten Zahn. Ein sich wiederholendes Muster ist schwer zu erkennen.

Wenn die Messkurven in Abhängigkeit der Gangzahl des verwendeten Werkzeuges sortiert werden, entsteht ein klares Muster mit sich wiederholenden Formen je Gang.

Die Zuordnung der Zähne des Werkstückes zum jeweiligen Gang erfolgt, wie in Bild 8 oben rechts dargestellt, nach folgendem Ablauf: Gang 1 schneidet das linke Profil von Zahn 1, Gang 2 schneidet das rechte Profil von Zahn 1 und das linke Profil von Zahn 2, usw. Wird dazu der Ablauf des Fertigungsprozesses betrachtet (Bild 8 unten), so ist das Werkstück nach einer Werkzeugumdrehung nicht fertiggestellt, sondern das Werkzeug bewegt sich in Abhängigkeit des Axialvorschubes  $f_a$  in einer Schraubenlinie am Werkstück entlang. Bei einem teilbaren Zähnezahlverhältnis würde nach jeder Umdrehung ein Gang immer den gleichen Zahn schneiden. In der Regel werden aber nicht teilbare Zähnezahlverhältnisse bevorzugt, da sich sonst Werkzeugfehler stark auf das Werkstück übertragen [7].

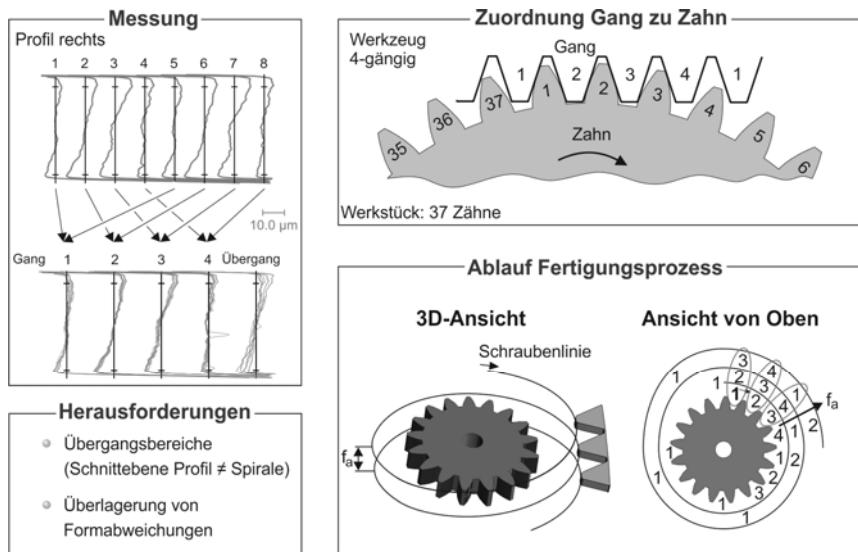


Bild 8: Sortierung der Messkurven nach Gangzahl des Werkzeuges

Ist das Zähnezahlverhältnis von Werkstück zu Werkzeug nicht teilbar, wird Zahn 1 von wechselnden Gängen bearbeitet. Dabei wird Zahn 1 erst nach fünf Umdrehungen wieder von Gang 1 bearbeitet. Die Bewegung auf einer Schraubenlinie und der Wechsel der bearbeitenden Gänge sorgen dafür, dass es irgendwo einen Übergangsbereich gibt, denn der Stirn-

schnitt der Evolvente weicht von der Schraubenlinie des Axialvorschubes ab. Dieses Muster wird zusätzlich von Formabweichungen aus der Bearbeitung überlagert. Der Sortieralgorithmus erkennt den Übergangsbereich und weist ihn als gesonderten Block aus.

Am Beispiel eines simulierten Exzentrers soll die Anwendbarkeit der Methode dargestellt werden. Bei einem 5-gängigen Werkzeug wurde ein Exzenter von  $2.0 \mu\text{m}$  eingestellt. Das Werkstück weist 37 Zähne auf, sodass das Zähnezahlverhältnis nicht teilbar ist.

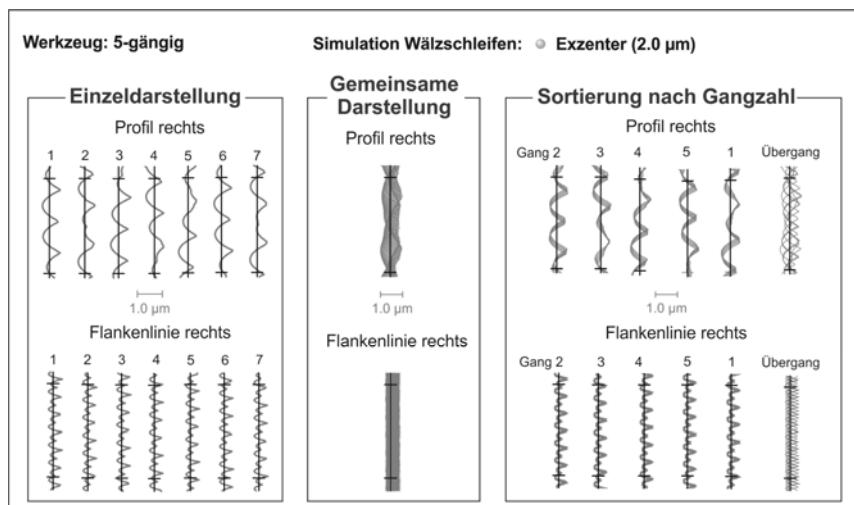


Bild 9: Beispieldarstellung der Sortierung der Gänge nach simulierten Exzenter

In der Einzeldarstellung der Messkurven in Bild 9 links ist ein Muster der Wiederholung der Abweichungen nur schwer festzustellen. In der gemeinsamen Darstellung in der Mitte des Bildes wird nur deutlich, dass die Abweichungskurven veränderlich sind. Eine Sortierung nach Gangzahl im Bild rechts zeigt auf, wie die unterschiedlichen Messkurven periodisch geordnet werden können. Es entsteht je Gang ein einheitliches Muster. Zeigen sich deutliche Differenzen in den Gängen untereinander, so sollte das Werkzeug genauer betrachtet werden. Korreliert die Form der Abweichungen mit dem Muster aus einem Taumel oder Exzenter, so ist eine Lageabweichung naheliegend. Korrelieren sie nicht, ist der Zustand des Werkzeugs oder die Abrichtung zu überprüfen.

## 9. Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt einige Möglichkeiten zur einfachen Analyse der Abweichungskurven aus Verzahnungsmessungen dar. Beispiele zeigen auf, wie ein Anwender dabei Rückschlüsse auf Werkzeug- und Fertigungseinflüsse ziehen kann. Ein Vergleich von Messkurven ist in einem ersten Schritt häufig hilfreich, um unterschiedliche Abweichungen zwischen einem Gut- und Schlecht-Teil feststellen zu können. Sind die Zusammenhänge aus dem Fertigungsprozess und der Prozessparameter bekannt, kann der Anwender ausgehend von einem Messblatt eine Prognose der Fehlerursachen stellen und auf diese reagieren. Er wird dabei von modernen Softwaretools unterstützt, mit denen er nicht nur mehrere Messkurven vergleichen, sondern auch Simulationen nutzen kann, um die vielfältigen Möglichkeiten von Werkzeugfehlern analysieren zu können. Hier ist es manchmal schon hilfreich, wenn ein bestimmter Werkzeugfehler ausgeschlossen werden kann. Mit der neuen Methode „Sortierung nach Gangzahl“ können Abweichungsmuster, die aus Unterschieden in den Gängen des Werkzeuges entstehen, automatisch entsprechend der Gangzahl sortiert werden. Die Ursachensuche kann dadurch deutlich erleichtert werden.

## Literatur:

- [1] Rank, B.: Welligkeiten auf Zahnflanken – Ursachen und akustische Auswirkungen, 5. Tagung Verzahnungsmesstechnik, VDI Berichte 2236, 2014.
- [2] Descher, F., Winter, W.: Waviness analysis in the serial production of cylindrical gears, International conference on gear production, VDI-Berichte 2255, 2015.
- [3] Klocke, F., Brecher, C., Löpenhaus, C., Krömer, M.: Influence of Tolerances on Characteristic Manufacturing Deviations in Soft Gear Machining: International Conference on Gears; VDI-Berichte 2255, 2015.
- [4] Gravel, G.: Simulation von Abweichungen beim Wälzfräsen und Wälzschleifen, GET-PRO-Kongress zur Getriebefertigung, 2013.
- [5] Svahn, M., Vedmar, L., Andersson C.: Tooth Deviation of an Involute Helical Gear Manufactured in a Simulated Hobbing Process with Introduced Errors, CIRP 1st International Conference on Virtual Machining Process Technology, Montreal, 2012.
- [6] Gravel, G.: Dem Geräusch auf der Spur – Welligkeiten auf Zahnflanken und ihre Ursachen, GETPRO Kongress zur Getriebefertigung, 2017.
- [7] Rank, B.: Geräuschanalyse an PKW-Automatikgetrieben in der Praxis, 4. Fachtagung Verzahnungsmesstechnik, VDI-Berichte 2148, 2011.

# Closed Loop – Jetzt auch für Stirnräder

## Durchgängiger Datenfluss in der Produktion

Dr.-Ing. Christof Gorgels, Klingelnberg GmbH, Hückeswagen

### Kurzfassung

In der Produktion werden an unterschiedlichen Stellen unterschiedliche Daten benötigt. Dabei handelt es sich nicht nur um einmalige Daten (z. B. eine Bauteilgeometrie) oder gesammelte Daten für eine Statistik sondern auch um einen regelmäßigen Austausch von Daten, wie er zum Beispiel bei der Korrektur von Werkzeugmaschinen aufgrund eines Messergebnisses vorkommt. In der Produktion von Kegelradverzahnungen ist dieser Datenfluss seit Jahren ganz selbstverständlich digital. Demgegenüber wird bei Stirnrädern die Korrektur immer noch manuell in die Bearbeitungsmaschine eingegeben. Die Möglichkeiten für einen durchgängigen Datenfluss und die Potenziale zur Verbesserung und Absicherung der Produktion sollen in diesem Beitrag aufgezeigt werden.

### 1. Einleitung

Unternehmen stehen im Zuge der Digitalisierung und der Globalisierung neuen Herausforderungen gegenüber. Weltweite Kunden für die Produkte erfordern auch eine Produktion da, wo die Kunden sind. Gleichzeitig wird dadurch die Qualifikation der Mitarbeiter in der Produktion zu einer kritischen Ressource. Die Digitalisierung eröffnet neue Möglichkeiten, von der Mitarbeiterqualifikation unabhängiger zu werden. Ein Weg hierbei ist, dass Aufgaben, die bisher von qualifizierten Maschinenbedienern ausgeführt wurden, durch Softwareentwicklungen zu substituieren. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Korrektur von Stirnrädern in der Produktion. Typischerweise wird heute das erste Bauteil eines Loses gemessen. Mit diesem Messergebnis geht der Bediener zurück zur Maschine und bestimmt manuell die Korrekturen. Mit der Einführung des Closed Loop kann dieser Prozess automatisiert werden. Die gemessenen Abweichungen von der Sollgeometrie können digital an die Produktionsmaschine übermittelt und dort die erforderlichen Korrekturen direkt berechnet werden. Der Ist-Stand und der Einfluss der Korrekturen werden dann dem Bediener angezeigt und er braucht diese nur noch zu bestätigen. Auch dieser letzte Schritt kann bei Bedarf automatisiert werden.

Speziell in der Großserienfertigung nimmt die Bedeutung der Nachverfolgbarkeit von Bauteilen deutlich zu. Hier steckt ein großes Potenzial, um Kosten einzusparen und Produktionsri-

siken zu minimieren. Tritt beispielsweise ein Fehler in der Produktion auf muss festgestellt werden, welche Bauteile davon betroffen sind, um diese fehlerhaften Bauteile nicht im Endprodukt zu verbauen. Je enger die betroffenen Bauteile eingegrenzt werden können, umso geringer ist der finanzielle Schaden. Das gilt insbesondere dann, wenn der Fehler erst nach der Fertigstellung des Endproduktes auffällt. Dann kommt es auch noch darauf an, nicht nur die betroffenen Bauteile einzuzgrenzen sondern auch zu wissen, in welche konkreten Baugruppen diese Komponenten eingebracht wurden.

Es bleibt also festzuhalten, dass die Digitalisierung große Chancen beinhaltet, um sowohl Produktivität zu steigern als auch Fehlerkosten zu senken. Dabei stellt aber die Vernetzung von Maschinen und Daten eine wesentliche Voraussetzung dar.

## 2. Closed Loop für die Stirnradproduktion

Der Closed Loop ist eine bekannte Technologie aus der Kegelradfertigung und -auslegung. Aufgrund der dreidimensionalen Verzahnungsgeometrie ist die Simulation des Herstellungsprozesses Teil der Bauteilauslegung. Dadurch ist von vorneherein sichergestellt, dass die Sollgeometrie eines Kegelrades auch eine herstellbare Geometrie ist. Darüber hinaus enthält der Auslegungsdatensatz des Kegelrades neben der Geometrie auch Informationen über das Werkzeug und die Maschinenkinematik bei der Herstellung.

Bei der Messung sowohl der Werkzeuge als auch des Kegelrades selbst wird als Grundlage die Soll-Geometrie aus der Auslegung genutzt und mit der Ist-Geometrie verglichen. Anhand einer Fertigungssimulation werden dann Maschinenindividuelle Korrekturen für die Achsbewegungen errechnet und über eine zentrale Datenbank zwischen Messgerät und Werkzeugmaschine ausgetauscht. Letztlich wird so die gesamte Prozesskette dokumentiert. Der Closed Loop ist in Bild 1 dargestellt.

Bei der Herstellung von Stirnrädern werden typischerweise die Korrekturen aufgrund eines Messergebnisses manuell vorgenommen. Der Maschinenbediener nimmt den ausgedruckten Messschrieb mit zur Frä- oder Schleifmaschine und gibt die Abweichungen von der Sollgeometrie von Hand über die Tastatur ein. Dieser Prozess ist in mehreren Hinsichten fehleranfällig. Neben der Gefahr der Fehleingabe hängt der auf dem Messschrieb stehende Zahlenwert auch von den angewandten Auswertevorschriften ab. Hier gibt es viele Einflussfaktoren wie z. B. den Auswertebereich oder auch die Auswertevorschrift, die beispielsweise sogar das Vorzeichen des Schrägungswinkelfehlers  $f_{H\beta}$  verändern kann. Fehler bei der Korrektur sind damit vorprogrammiert und werden erst nach der Fertigung und Messung des zweiten Bauteils erkannt. Neben den unnötigen Ausschusskosten wird damit auch der Produktionsanlauf verzögert und damit die tatsächliche Maschinenverfügbarkeit reduziert.

Um diese Probleme zu umgehen, hat Klingelnberg das Konzept des Closed Loop auf Stirnräder ausgeweitet. Dabei wird im ersten Schritt die Übermittlung der Abweichungen von der Sollgeometrie digitalisiert. Damit bleiben die heute bewährten Korrekturmechanismen bestehen, die Fehlereinflüsse werden aber minimiert. Neben den Abweichungen werden zusätzlich Informationen über die Messung und Messvorschriften mit übermittelt, so dass bei der Korrektur der Maschine die Maschinensoftware die Abweichungen korrekt interpretieren kann (Bild 2).

Diese Art zu korrigieren steht heute auf allen Messgeräten und Werkzeugmaschinen von Klingelnberg zur Verfügung. Existierende Maschinen im Markt können durch entsprechende Softwareerweiterungen für diesen Closed Loop ertüchtigt werden. Jedoch ist es erforderlich, dass Bearbeitungsmaschinen und Präzisionsmessgeräte an ein Netzwerk angeschlossen sind, um Daten austauschen zu können. Trotz der Digitalisierung der Maschinenkorrekturen bekommt der Maschinenbediener weiterhin die Möglichkeit, in die Korrekturen eingreifen zu können. Dazu werden ihm für die zu korrigierenden Werte die Toleranzen für den Kennwert, die Position des Wertes aktuell im Toleranzfeld und das erwartete Korrekturergebnis angezeigt. Diese händische Eingriffsoption ist wichtig, um mögliche Fehler (wie z. B. ein vor der Messung unzureichend gereinigtes Bauteil) erkennen zu können.

Der Datenaustausch wird über das Gear Data Exchange (GDE) Format realisiert. Dadurch ist sichergestellt, dass die zwischen Mess- und Werkzeugmaschine ausgetauschten Informationen transparent sind. Damit können aber grundsätzlich neben den Werkzeugmaschinen von Klingelnberg auch Maschinen anderer Hersteller an das System angeschlossen werden unter der Voraussetzung, dass diese eine GDE-fähige Maschinensoftware haben. Einzig bleibt dann noch der zentrale Ablageort zum Austausch der Daten festzulegen. Dieser Ablageort befindet sich üblicherweise auf einem Server bzw. Netzlaufwerk, welches aus dem Produktionsnetzwerk erreichbar ist. Die prinzipielle Netzwerkstruktur ist in Bild 3 dargestellt. Im Gegensatz zur Darstellung für Kegelräder ist mit der Auslegung hier in erster Linie das Originalbearbeitungsprogramm für das Zahnrad gemeint. Die Vernetzung aller Maschinen ermöglicht es grundsätzlich, die Bearbeitungsprogramme für einzelne Bauteile nicht mehr auf jeder Maschine abzulegen, sondern auch zentral auf einem Server abzulegen. Dies stellt einen ersten Schritt in Richtung der global vernetzten Produktion dar.

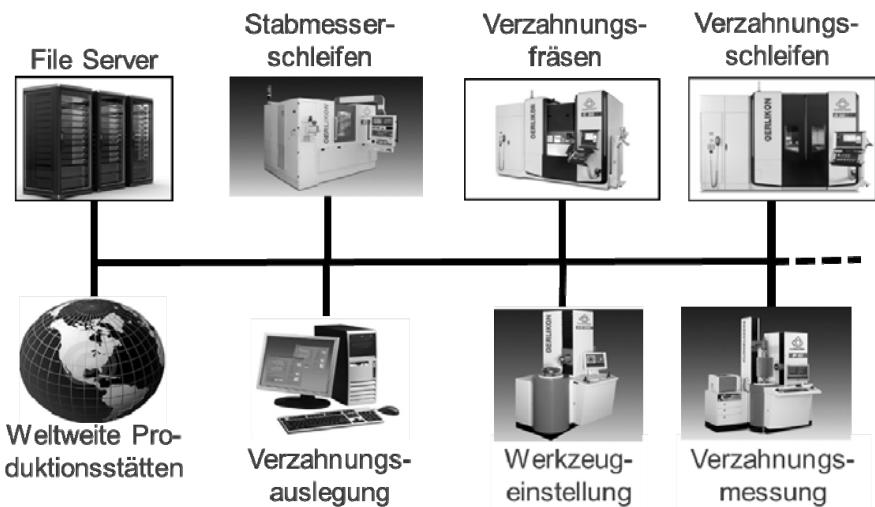


Bild 1: Closed Loop in der Kegelradauslegung und -fertigung

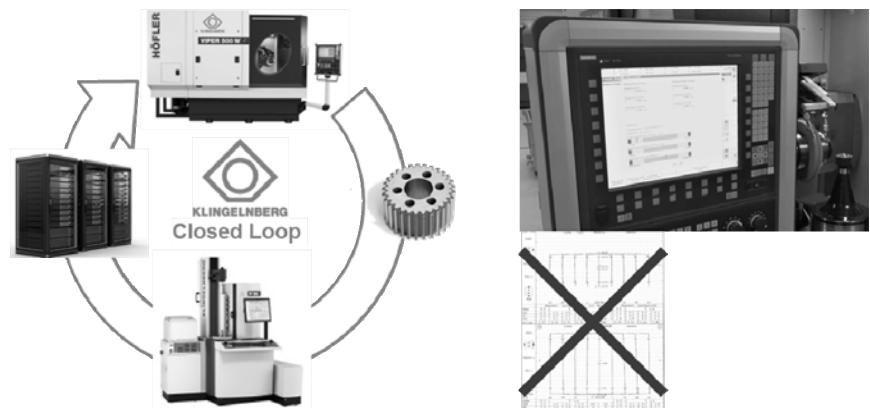


Bild 2: Closed Loop für die Stirnradfertigung

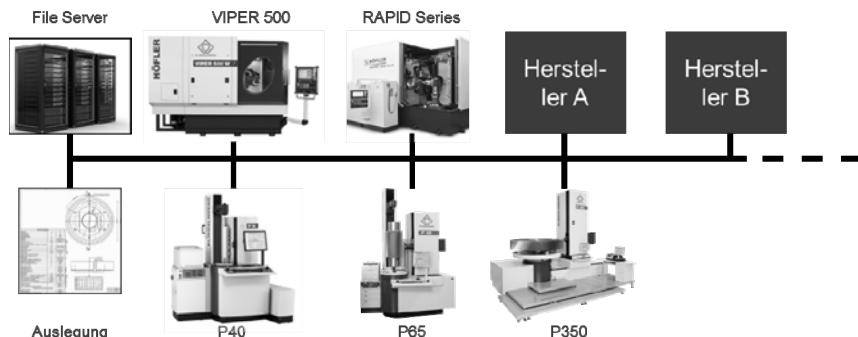


Bild 3: Produktionsnetzwerk für den Closed Loop

Zwischen Kegel- und Stirnradverzahnungen gibt es einen wesentlichen Unterschied, der sich auch direkt auf den Closed Loop auswirkt. Bei der Auslegung von Stirnrädern wird die Herstellkinematik üblicherweise nicht berücksichtigt. Das Ergebnis umfangreicher Auslegungsrechnung ist eine geringe Zahl von Kennwerten, die ein evolventenverzahntes Stirnrad eindeutig beschreiben. Die Kinematik zur Herstellung wird häufig erst auf der Bearbeitungsmaschine selbst berechnet und hängt vom Bearbeitungsverfahren ab, wobei jedoch unterschiedliche Bearbeitungsverfahren in Frage kommen. Auch kann die Kinematik bei gleichem Prozess auf Maschinen unterschiedlicher Hersteller variieren.

Der zentrale Punkt hierbei ist jedoch, dass bei der Auslegung die Herstellbarkeit nicht geprüft wird. In der Realität weisen besonders die Verfahren Profil- und Wälzschleifen charakteristische Abweichungen der Verzahnungsgeometrie auf, die sogenannte Verschränkung. Charakteristisch für diese Abweichung ist, dass in der Mitte des Evolventenprofils und der Verzahnungsbreite die Unterschiede zur Sollgeometrie sehr gering sind. An den Rändern der Verzahnung erreicht die Abweichung aber eine signifikante und bei manchen Verzahnungen nicht mehr zu vernachlässigende Größenordnung, die zu einem veränderten Einsatzverhalten führen kann.

Mit der Einführung der neuen Schleifmaschinengeneration der SV-Baureihe hat Klingelnberg auch für Stirnradverzahnungen eine Systematik entwickelt, wie genau diese Problematik transparent und korrigierbar wird (Bild 4). Dabei wird für die Arbeitsvorbereitung und auch die Verzahnungsauslegung die Software Gear Engineer zur Verfügung gestellt. Hier kann der Herstellprozess definiert und ausgelegt werden. Das Ergebnis sind ein fertiger Datensatz für die Bearbeitungsmaschine und eine Verzahnungsgeometrie als Ergebnis einer Herstellsimulation.

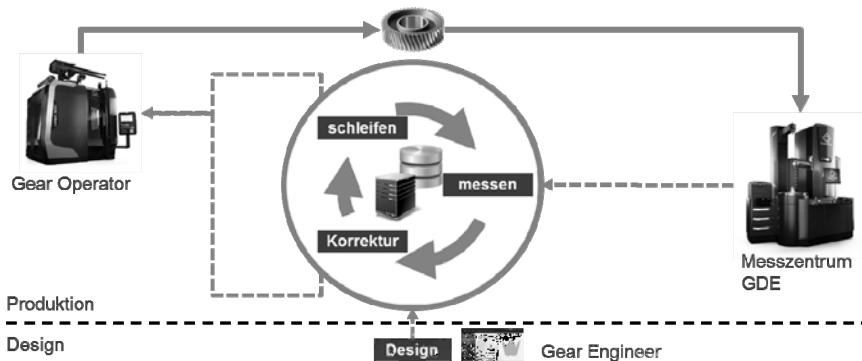


Bild 4: Produktionsnetzwerk für den Closed Loop

Die simulierte Verzahnungsgeometrie kann dann hinsichtlich ihrer Funktionserfüllung direkt in der Verzahnungsauslegung bewertet, und auf dieser Basis auch Korrekturen der Maschinenbewegungen vorgenommen werden. Gleichzeitig dient diese simulierte Soll-Geometrie auch als Basis für die Korrekturen im Closed Loop, so dass gegen die tatsächlich erreichbare Topographie korrigiert werden kann. Hierdurch können sich Auslegungs- und Herstellprozess ähnlich der Vorgehensweise bei der Herstellungsweise für Kegelradverzahnungen annähern. Letztlich ist damit das digitale Abbild der Stirnradverzahnung deutlich näher an der Realität.

### 3. Nachverfolgbarkeit von Produktionsteilen

Je mehr Daten entlang der Wertschöpfungskette gesammelt werden, umso besser können Einflüsse und Wechselwirkungen verstanden und zur Produktionsoptimierung und Fehlervermeidung eingesetzt werden. Beispielhaft ist in Bild 5 die digitale Abbildung der realen Bauteile und Prozesse dargestellt, wie sie bei Klingelnberg in der hauseigenen Produktion von Kegelrädern eingesetzt wird. Die obere Hälfte der Darstellung zeigt die Prozessschritte und Ergebnisse in der physischen Welt, die untere Hälfte die digitale Abbildung. So entsteht an jeder Stufe der Prozesskette ein digitaler Zwilling des realen Bauteils. Diese Informationen helfen, Fehler im Prozessablauf zu identifizieren und parallel Optimierungspotenziale in der Fertigung zu heben. Gleichzeitig trägt die digitale Abbildung von Prozessen wesentlich dazu bei, Prozesse zu standardisieren und damit Fehlerquellen auszuschließen.

Mit der Gear Engine verfolgt Klingelnberg den Ansatz, alle Informationen über ein Bauteil von der Auslegung entlang der gesamten Produktionskette zu einem digitalen Zwilling auf-

zubereiten. Voraussetzung hierfür ist die Vernetzung aller beteiligten Partner und die eindeutige, individuelle Identifizierung eines Bauteils an allen Stationen entlang der Prozesskette. Diese gesammelten und aufbereiteten Daten sind die Basis, um weitergehende Optimierungspotenziale erschließen zu können.

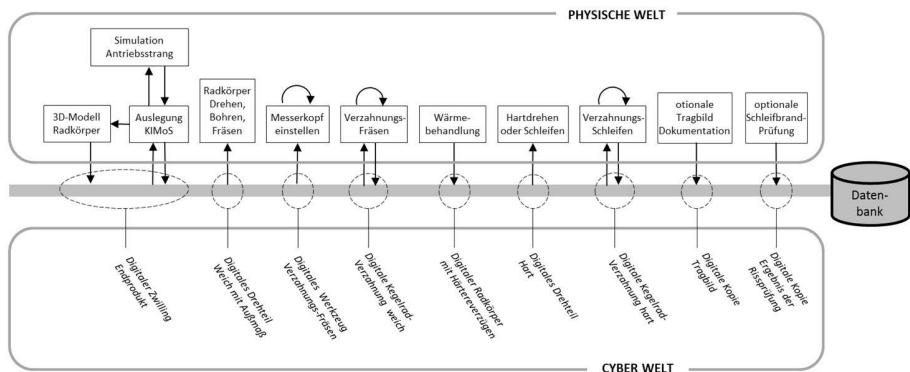


Bild 5: Abbildung der physischen Produktion in der digitalen Welt

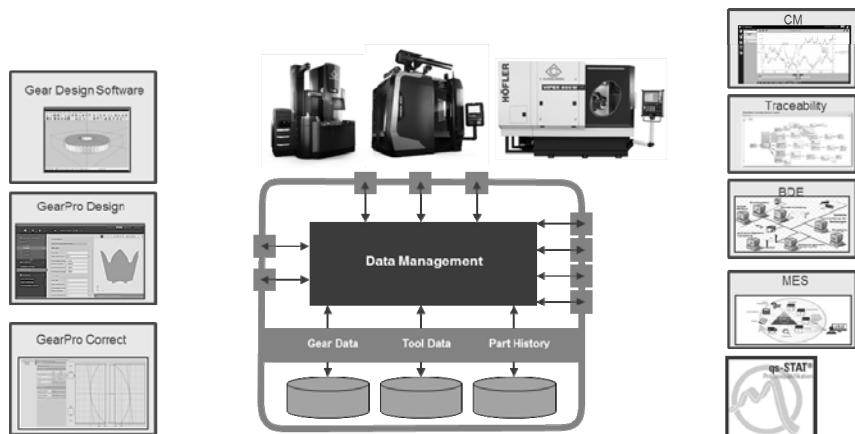


Bild 6: Die Klingelnberg Gear Engine als Basis für eine digitale Produktion

#### 4. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde aufgezeigt, dass durch die Vernetzung von Maschinen in der Produktion und den Austausch von Daten Optimierungspotenziale gehoben werden können. Im Zentrum steht hierbei der Closed Loop, der eine Standardisierung der Korrektur von Verzahnungsmaschinen ermöglicht und damit Fehlereinflüsse durch eine Bedienerinduzierte manuelle Korrektur ausschließt. Die Weiterführung des Closed Loop schon in die Auslegung ermöglicht über die heute üblichen Möglichkeiten auch die topologische Korrektur von Stirnradverzahnungen.

Hinzu kommen weitere Aspekte bei der Speicherung von Daten in auswertbaren Formaten. Hierdurch kann ein digitaler Zwilling des physischen Bauteils entstehen, der alle relevanten Informationen enthält, die seinen Zustand beschreiben. Diese Informationen können sowohl zur Handhabung von auftretenden Fehlern als auch zur Optimierung der Produktion genutzt werden. Grundsätzlich bietet die Digitalisierung die Chance, heute häufig individuell und manuell ablaufende Prozesseingriffe zu standardisieren und damit auch zu verbessern.

Abschließend muss aber noch kurz auf die erforderliche Vernetzung von Maschinen eingegangen werden. Diese beinhaltet heute auch ein Risiko, dass zum Beispiel durch Schadsoftware von außen in die Produktion eingegriffen werden kann. Daher ist die Absicherung des Netzwerks ein wichtiger Baustein beim Aufbau der digitalen Vernetzung. Grundsätzlich ist es empfehlenswert, für die Produktion ein eigenes Netzwerk aufzubauen, welches vom Internet und damit vom Zugriff außenstehender vollständig getrennt ist.

## Messen von Verzahnungswerkzeugen

### Fertigungsorientierte Lösungen und Prozessintegration

Dipl.-Ing. Dietmar Ernst, esco GmbH, Herzogenrath

#### Kurzfassung

Qualitätssicherung in der Getriebefertigung fängt bereits bei der Werkzeugkontrolle an. Der Einsatz hochgenauer und anwendungsorientierter dimensioneller Messtechnik als Bestandteil einer qualitätsgeführten Fertigung gewährleistet eine reproduzierbare und gleichbleibend hohe Qualität der Verzahnungswerkzeuge. Die Integration von Konstruktion/ Werkzeugauslegung, Fertigung und Qualitätssicherung ist ein wesentlicher Faktor für die Effizienz innerhalb der Prozesskette. Der vorliegende Beitrag zeigt zunächst Anforderungen und Lösungen für das fertigungsorientierte Messen von Verzahnungswerkzeugen auf. Zum Thema „Prozessintegration“ werden unterschiedliche Blickrichtungen skizziert: prozessbegleitendes Messen, ClosedLoop, Bereitstellung werkstück-orientierte Solldaten, Zusatzinformationen zur Werkzeugeinstellung bei der Verzahnungsfertigung und die Optimierung der Werkzeug-Standmenge durch eine automatisierte Verschleißmessung.

#### 1. Allgemeine Ausgangssituation



Quelle: Schnyder SA, CH-Biel

Bild 1: Verzahnungswerkzeuge , exemplarischer Querschnitt

Bei der Fertigung von Verzahnungswerkzeugen ist in vielerlei Hinsicht von einer heterogenen Konfiguration der Systemkomponenten auszugehen:

- im Kern die unterschiedlichen Typen der Verzahnungswerkzeuge, einen exemplarischen Querschnitt zeigt Bild 1
- Maschinenpark für die Weich- und Hartbearbeitung, Prüfmittel und Messgeräte mit unterschiedlicher Sensorik/Sensorik-Konfiguration; Werkzeugmaschinen und Messgeräte jeweils mit unterschiedlichem Automatisierungs- und Integrationsgrad
- unterschiedlichste Datenquellen und -senken mit unterschiedlichem Integrationsgrad

Hieraus lassen sich grundlegende Anforderungen an eine universelle Softwarelösung für die Verzahnungswerkzeug-Messtechnik ableiten:

- bezogen auf die Variantenvielfalt der Verzahnungswerkzeuge:
  - o leichte, analoge Handhabung für die unterschiedlichen Werkzeugtypen
  - o normbasierte parametrische Beschreibung der Werkzeuge und Messaufgaben; Bild 2 zeigt exemplarisch Eingabeseiten zur Definition der Messaufgaben für die Schneidrad- und Wälzfräsermessung
  - o Sonderprofile: Import der Schneidengeometrie ersetzt die Profilparametrierung; Handhabung der Messung direkt analog zum Standard, automatische Anpassung der Auswertung im Hinblick auf für das Sonderprofil ungültige Merkmale
- verständliche und, so weit möglich, normgerechte Dokumentation und Visualisierung der Messergebnisse
- bezogen auf die Prozess- und Datenintegration:  
flexible -möglichst standardisierte- Schnittstellen der Mess-Software, originär zum jeweiligen Messgerät, darüber hinaus zur Werkzeugkonstruktion bzw. -auslegung und zur „Fertigung“.

Die Auswahl der durchzuführenden Messungen über die in Bild 2 gezeigten Menüs sind ein wesentliches Mittel zur Standardisierung der Messungen: Untermengen der gezeigten Messungen - z. B. für fertigungsabhängige Zwischenmessungen - können vom Anwender in vorausgefüllten Menüs zusammengestellt werden. Darüber hinaus können die Messorte allgemeingültig über frei zugängliche Algorithmen „voreingestellt“ und in den „Messkatalogen“ abgelegt werden. Im Idealfall kann die Messung sofort gestartet werden nachdem ein „Messkatalog“ aus der verfügbaren Liste ausgewählt wurde.

Messanwendung Schedued		Messanwendung	
<input checked="" type="checkbox"/> Allgemein <input type="checkbox"/> Technologie <b>SRL.TEC</b> <input type="checkbox"/> Drehachse einmessen <b>Lage und Richtung</b> <input type="checkbox"/> Bezugspunkte einmessen <input type="checkbox"/> Bezug einmessen		<input type="checkbox"/> Zahnauwahl <b>(F)</b> <input type="checkbox"/> Gleichverteil am Umfang <input type="checkbox"/> Aufteilung <input type="checkbox"/> Wahlfrei	
<b>Messungen</b> <input type="checkbox"/> Kapferdurchmesser <input type="checkbox"/> Rundlauf am Zahnskopf <b>[Fr]</b> <input type="checkbox"/> Rundlauf am Zahnhals <b>[Fr]</b> <b>DIN Nr. 1, 2</b> <input type="checkbox"/> Planlauf der Spanfläche <b>[Tp]</b> <b>DIN Nr. 3</b> <input type="checkbox"/> Messstiftdurchmesser <b>[113.317]</b> mm <b>DIN Nr. 4</b> <input type="checkbox"/> Spawinkel <b>[teta]</b> <input type="checkbox"/> Form und Lage der Spanfläche <input checked="" type="checkbox"/> Kopf-Freihöhe <b>[hteta]</b> <b>DIN Nr. 5</b> <input type="checkbox"/> Spurflanken-Steigungswinkel <b>[beta]</b> <b>DIN Nr. 6, 7 (*)</b> <input type="checkbox"/> Flankendicke <b>[retta]</b> <input type="checkbox"/> Messbreite <b>[2]</b> mm <input type="checkbox"/> Messposition links <input type="checkbox"/> Messposition rechts <input type="checkbox"/> Flankendicke DIN 1029 <b>[M, Rts, F]</b> <input type="checkbox"/> Messposition links <input type="checkbox"/> Messposition rechts <input type="checkbox"/> Flankendicke hinter der Schneide <b>[M, Rts, F]</b> <input type="checkbox"/> Messposition links <input type="checkbox"/> Flanschform der Flanke <input type="checkbox"/> Profil hinter der Schneide <input type="checkbox"/> Flanschform über die Schneide <input type="checkbox"/> Zahndicke <input type="checkbox"/> Zahndickenabweichung <b>[Rd]</b> über <input type="checkbox"/> Zahndicke über <b>Z</b> Zähne <input type="checkbox"/> Tiefung <b>(Tp, Fr, fd)</b> <input type="checkbox"/> Rundlauf am Teilkreis <b>[Fr]</b>		<b>Technologie</b> <b>Völkfräser.tec</b> <input type="checkbox"/> Drehachse einmessen <b>Lage und Richtung</b> <input type="checkbox"/> Bezugspunkte einmessen <input type="checkbox"/> Bezug einmessen	
<b>DIN Nr. 4</b> <input type="checkbox"/> Rundlauf am Prüfkumb <input type="checkbox"/> Rundlauf am Schaft <input type="checkbox"/> Rundlauf am Schaftende <b>DIN Nr. 5</b> <input type="checkbox"/> Planlauf am Prüfkumb <input type="checkbox"/> Rundlauf am Zahnskopf <input type="checkbox"/> Rundlauf am Zahnhals <b>DIN Nr. 6</b> <input type="checkbox"/> Zylindrizität am Zahnskopf <input type="checkbox"/> Zylindrizität am Zahnhals <b>DIN Nr. 7</b> <input type="checkbox"/> Form und Lage der Spanfläche <b>DIN Nr. 8-10</b> <input type="checkbox"/> Spannuteileitung <b>DIN Nr. 11</b> <input type="checkbox"/> Spannuteileitung <b>DIN Nr. 12, 13</b> <input type="checkbox"/> Profilform an der Schneide <input type="checkbox"/> Profilform hinter der Schneide <input type="checkbox"/> Hinterschneidkontrolle <input type="checkbox"/> 0,2 mm bis 1,5 mm hinter der Schneide <input type="checkbox"/> Flanken-Faultlast <input type="checkbox"/> Zahnskopf-Hinterschiff <input type="checkbox"/> Flankens-Hinterschiff <input type="checkbox"/> Stellenbreite / Zahnlänge <input type="checkbox"/> Steigungshöhe <b>DIN Nr. 14, 15</b> <input type="checkbox"/> Einstellstellung <input type="checkbox"/> Axialbelastung <input type="checkbox"/> Zahndickenschwankung		<b>extern links</b> <input type="checkbox"/> links <input type="checkbox"/> rechts <b>extern rechts</b> <input type="checkbox"/> links <input type="checkbox"/> rechts <b>DIN Nr. 16, 17</b> <input type="checkbox"/> von Gang <b>[1]</b> Zahn <b>[1]</b> <input type="checkbox"/> bis Gang <b>[4]</b> Zahn <b>[1]</b> <input type="checkbox"/> in Stufen an Gang <b>[1]</b> Zahn <b>[1]</b> <input type="checkbox"/> Offset 1. Zahn <b>[0]</b> Anzahl <b>[12]</b> Zahn <b>[1]</b> <input type="checkbox"/> an Gang <b>[1]</b> Zahn <b>[1]</b> <input type="checkbox"/> an Gang <b>[1]</b> Zahn <b>[1]</b> <input type="checkbox"/> von Gang <b>[1]</b> Zahn <b>[1]</b> <input type="checkbox"/> bis Gang <b>[4]</b> Zahn <b>[1]</b> <input type="checkbox"/> in Stufen an Gang <b>[1]</b> Zahn <b>[1]</b> <input type="checkbox"/> Offset 1. Zahn <b>[2]</b> Anzahl <b>[12]</b> Zahn <b>[1]</b> <input type="checkbox"/> an Gang <b>[1]</b> Zahn <b>[1]</b> <input type="checkbox"/> 0,1 mm <input type="checkbox"/> 3 Schlitzen <input type="checkbox"/> Start <b>[1]</b> mm hinter der Schneide <input type="checkbox"/> Messhöhe <b>[2]</b> mm vom Zahnskopf <input type="checkbox"/> Zahndicke über <b>Z</b> Zähne <input type="checkbox"/> bis Gang <b>[4]</b> Zahn <b>[22]</b> <input type="checkbox"/> ab Gang <b>[1]</b> Zahn <b>[1]</b> <input type="checkbox"/> in Stufen an Gang <b>[1]</b> Zahn <b>[1]</b> <input type="checkbox"/> Offset 1. Zahn <b>[2]</b> Anzahl <b>[12]</b> Zahn <b>[1]</b>	
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Abbrechen"/>		<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Abbrechen"/>	

Bild 2: Definition der Messaufgaben für Schneidräder und Wälzfräser

## 2. Fertigungsorientiertes Messen

Zielsetzung: Frühestmögliche und effiziente Kontrolle und Optimierung der Produktqualität bereits bei der „Produktentstehung“. Das fertigungsorientierte Messen ist eine entscheidende Voraussetzung für die Prozessintegration der Qualitätssicherung.

## Maßnahmen:

- fertigungsbegleitendes Messen, maschinennah oder in der Maschine
  - sequentielles Messen entsprechend dem Fertigungsfortschritt, Zusammenführung der Ergebnisse
  - Bereitstellung pragmatischer Hilfsmittel zur Analyse/Verifizierung der Messergebnisse, z.B.:
    - o Analyse von Einzelabweichungen
    - o Funktionsorientierte Best-fit-Methoden
    - o gezielte Wiederholmessungen an einem definierten Messort ohne einen Messablauf insgesamt wiederholen zu müssen, Bild 4
  - Ermöglichung zusätzlicher, nicht in Normen vorgegebener aber fertigungs-/funktionsrelevanter Messungen wie z.B. die Profilmessung im möglichen Nachschliffbereich des Wälzfräzers

- Bereitstellung oder „On-line-Erzeugung“ von Vergleichs-(Soll-)Geometrien mit *Blick auf die zu fertigende Verzahnung* (vergl. hierzu auch Bild 9 zum Beispiel „Wälzschälen“)
- für den ClosedLoop: Bereitstellung von Schnittstellen und Methoden zur Rückführung der gemessenen Abweichungen zur Prozesskorrektur, z.B. zur
  - o Korrektur des Schleifscheibenprofils für das Profil-, Hinter- oder Teilwälzschleifen
  - o Korrektur der Einstelldaten für die Schleifscheibe
  - o Bahnkorrektur beim zeilenweisen Hinterdrehen oder Hinterschleifern

Bild 3 zeigt beispielhaft die Messung eines Wälzfräzers während seines Entstehungsprozesses. Das „Wälzfräser-Halbzeug“ kann zur Vorbereitung artgleicher Wälzfräser, die sich z.B. lediglich in Profildetails unterscheiden, gefertigt, gemessen und ins Lager aufgenommen werden. Die Messergebnisse aus der Spannungsmessung werden in der Datenbank abgelegt. Zur Fertigstellung entsprechend einem zugehörigen Auftrag wird die Schleifscheibe zum Hinterschleifen hergestellt oder bereitgestellt und mit dem Wälzfräser-Halbzeug in die Fertigung eingesteuert. Nach der Fertigstellung und Messung der Wälzfräser-Verzahnung können die Messergebnisse zu einem Gesamtprotokoll zusammengeführt, gespeichert und dokumentiert werden. Als additive Information liegt gleichzeitig das Messprotokoll zum „Fertigungshilfsmittel“, hier zur Profil-Hinterschleifscheibe vor.



Bild 3: Prozessbegleitende sequentielle Messung entsprechend dem Fertigungsfortschritt

Bild 4 zeigt die einfache Vorgehensweise zur Durchführung einer Wiederholmessung. In der Anzeige der Messergebnisse -hier exemplarisch zur Messung der Axialteilung- wird der Messort, an dem die Messung wiederholt werden soll, im Balkendiagramm angeklickt. Zur konkreten Identifikation des Messortes wird in der Kommentarzeile der Ergebnisgrafik die exakte Bezeichnung angegeben: Gang-, Stollen- und Zahnnnummer, Nummerierung entsprechend VDI 2606 [1]. Nach der Auswahl und Bestätigung des Messortes fährt das Messgerät automatisch dorthin. Der Operator hat dann die Möglichkeit, den Messort ggf. zu reinigen und dann die Aufnahme des neuen Messwertes per Knopfdruck zu initiieren. Die vorangegangene Messung wird überschrieben.

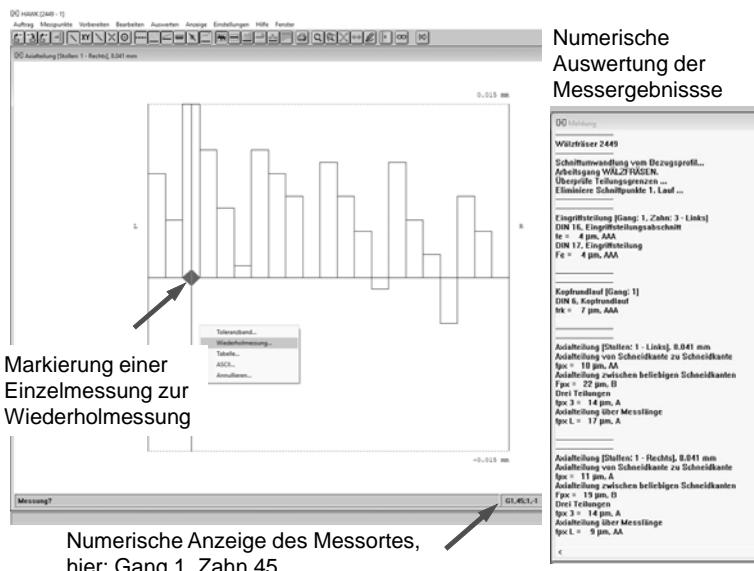


Bild 4: Anwahl einer Wiederholmessung, Beispiel Axialteilung

### 3. Prozessintegration

Der Begriff „Prozessintegration“ ist für die Werkzeugmesstechnik unter unterschiedlichen Blickwinkeln zu betrachten:

- die -auch hardwaretechnische- Integration der Messtechnik in die Werkzeugmaschine, z.B. die Schleifmaschine zum Hinterschleifen eines Wälzfräzers
- die direkte datentechnische Kopplung von Werkzeugmaschine und Messgerät für den ClosedLoop in der Werkzeugfertigung

- Prozessoptimierung bis zum Einsatz des Verzahnungswerkzeugs: liefern von Einstelldaten zur Reduzierung des Einrichtaufwands auf der Verzahnmaschine
- die automatisierte Verschleißmessung mit dem Ziel der Erhöhung der Gesamtstandmenge des Werkzeugs
- die Einbeziehung der „Zielgröße Werkstück“ (Verzahnung) in die Datenvorgabe und Ergebnisanalyse für das Messen des Werkzeugs

Das **Messen in der Maschine** ersetzt bei der Werkzeugmessung zwar nicht die Endkontrolle, kann jedoch einen nennenswerten Beitrag zur Verkürzung der Durchlaufzeiten und der Reduzierung der notwendigen Ressourcen leisten. Besonders interessant ist diese Lösung für große und/oder schwere Werkzeuge mit entsprechenden Anforderungen an das Handling, für das Anlaufen eines Prozesses sowie für eine begleitende Messung der Grunddaten. Beim Wälzfräser z.B. ist das die Messung von Zahndicke/Zahndickenschwankung und Eingriffswinkels zur Kontrolle der gleichbleibenden Qualität. Die vorhandenen Schnittstellen erlauben die Installation der Mess- und Auswertesoftware als „Blackbox“ in der Maschinensteuerung. Standardisierte Messabläufe sind in Form von Templates hinterlegt, Messpositionen werden on-line berechnet, die Ergebnisse als Punktfolgen ausgelesen und ausgewertet. Die Kommunikation (Daten- und Befehlsstruktur) erfolgt über XML-Strukturen. Die Ergebnisse werden in der Benutzeroberfläche der Maschinensteuerung angezeigt.



Quelle: SMS

Bild 5: Wälzfräsermessung in der Hinterschleifmaschine

Bild 6 zeigt eine **ClosedLoop-Applikation**, in der das Hinterschleifen und die Wälzfräser-Messung auf einer durchgängigen Datenbasis aufbauen. Ziel ist hierbei die reproduzierbar hohe Qualität des Wälzfräserprofils (bis Qualität 4A!). Die Messung der Profilformabweichung kann wahlweise optisch oder taktil erfolgen. Referenzpunkt für das Abrichten und damit für die Profilkorrektur ist der Zahnkopf des Wälzfräserprofils, d.h. vor der Korrekturwert-

berechnung müssen die Messwerte zunächst auf den Kopf eingepasst werden; das geschieht automatisch über einen entsprechenden Funktions-Best-fit. Abschließend wird für die technisch sinnvolle Weiterverarbeitung vor der Übertragung zur Abricht- und Schleifsoftware ein Glättungsalgorithmus nachgeschaltet. Die Korrektur wird über die Simulation des Hinterschleifens, d.h. prozesskonform, auf die Schleifscheibe übertragen, Bild 7.

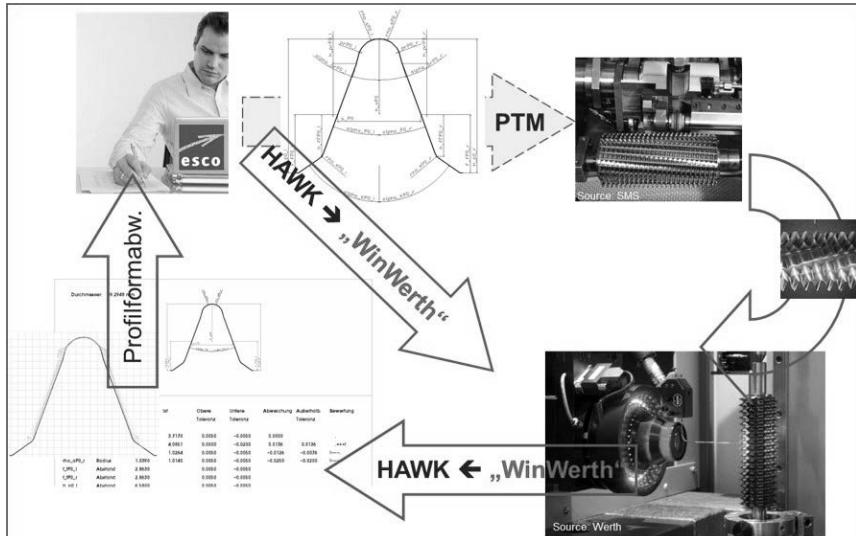


Bild 6: Wälzfräserfertigung - ClosedLoop für das Profil-Hinterschleifen

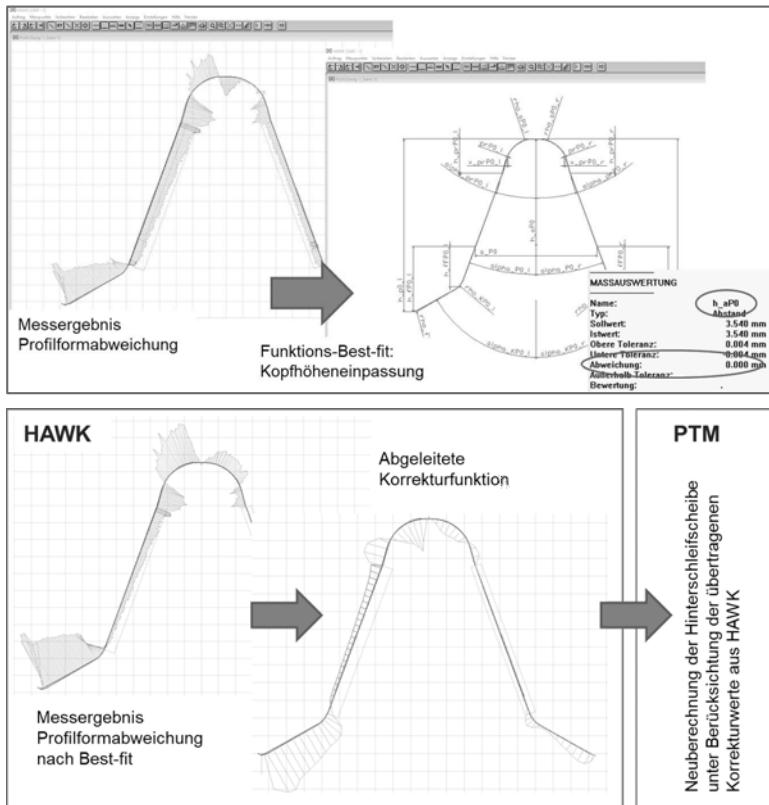


Bild 7: ClosedLoop für das Profil-Hinterschleifen, Berechnung der Korrekturwerte aus den gemessenen Profilform-Abweichungen

Erweiterte Messmöglichkeiten erhöhen die Informationsdichte und reduzieren den Aufwand für das **Einrichten der Werkzeuge auf der Wälzfräsmaschine**, Bild 8. So können die Winkellage des Bezugszahns zur Längs- oder Quernut und der Abstand des Bezugszahns zur Prüfbund-Planfläche oder einer adäquaten Referenzfläche gemessen und an den Anwender weitergegeben werden. Dabei ist es generell möglich, unterschiedliche Definitionen für diese Einstelldaten zu berücksichtigen.

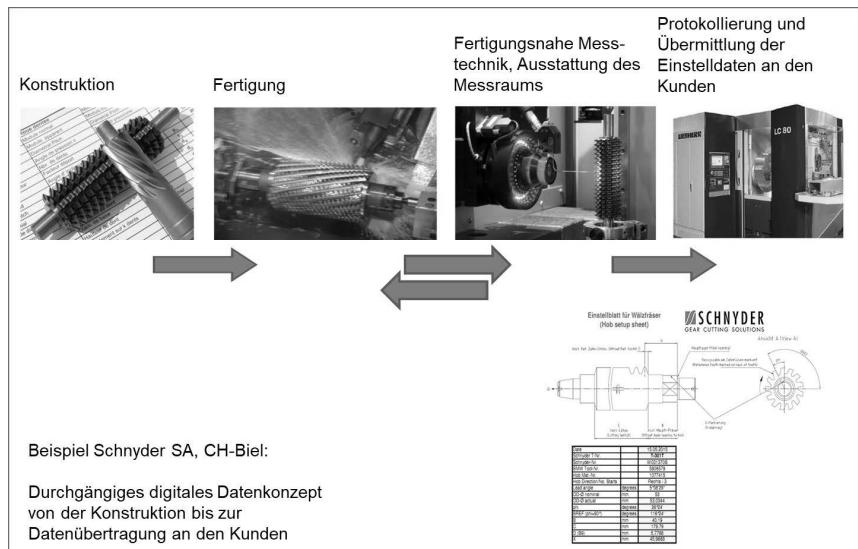


Bild 8: Durchgängiges Datenkonzept - Prozessintegration mit direktem Kundennutzen

Bild 9 zeigt die Messung von konischen Wälzschälrädern als anschauliches Beispiel für die Wichtigkeit der **zielorientierten Bereitstellung der Referenz-/Solldaten** für die Werkzeugmessung. Die Erzeugung der räumlichen Schneide eines Wälzschälrades erfolgt durch die Simulation des Wälzschälprozesses, beschreibbar durch das „Wälzen“ von Werkzeug und Werkstück mit gekreuzten und/oder gekippten Achsen. Das Profil ist gebunden an definierte Auslegungsparameter und verändert sich durchmesser-/achsabstandsabhängig, je nach zu erzeugendem Werkstückprofil u. U. erheblich. Die oberen beiden Pfade in Bild 9 zeigen die Zusammenhänge beim Messen während der Fertigung: Zur Messung der fertigungsbedingten Abweichungen wird die Auslegungsgeometrie als Referenzprofil herangezogen ( $WSR_{0,0mm} = WSR_{Sol}$ ). Die Messung an der oder über die Schneide zeigt als Basisinformation für die Fertigung die Abweichungen zum Soll im Neuzustand. Insbesondere beim Wälzschälen mit konischen Schälrädern ist zusätzlich die erreichbare Genauigkeit beim Einsatz nachgeschärfter Schälräder von großem Interesse. Hierfür stehen zwei Informationswege zur Verfügung:

- (a) das Messen in einem fiktiven Nachschliffzustand relativ zur Sollgeometrie ( $WSR_{4,5mm}$ ) zur Prüfung der Fertigungsgenauigkeit beim Hinterschleifen des Schälrades

(b) das Messen an dieser Stelle relativ zur werkstückbezogenen idealen Schälradgeometrie ( $WSR_{4,5mm\ ideal}$ ) für diesen Durchmesser.

Die Sollgeometrie „ $WSR_{4,5mm}$ “, hier fiktiv 4,5mm hinter der Schneide, entsteht aus der Simulation des Nachschärfens durch axiales Nachsetzen des Treppenschliffs und die Berechnung der hieraus entstehenden Raumschneide bei einem durch Teilwälzscheiben hinterschliffenen Schälrad. Im Gegensatz hierzu entsteht die Sollgeometrie „ $WSR_{4,5mm\ ideal}$ “ im Fall (b) aus einer neuen Auslegung zum aktuellen Durchmesser im Nachschliffzustand. Die Messung erlaubt somit entsprechende Rückschlüsse auf die erreichbare Genauigkeit im Werkstück. Bedingt durch die komplexen Zusammenhänge beim Wälzschälen erfordert die Nutzung dieser Möglichkeiten eine direkte Kopplung zwischen Werkzeugkonstruktion und Qualitätssicherung. Deutlich einfacher stellt sich diese Vorgehensweise für die Fertigung von Wälzfräsern und Schneidrädern dar: Hier kann die aktuelle Sollgeometrie für das Messen in einem fiktiven Nachschliffzustand „online“ automatisch innerhalb der Mess-Software im Hintergrund erzeugt werden; Basis hierfür ist lediglich eine aktuelle Durchmessermessung.

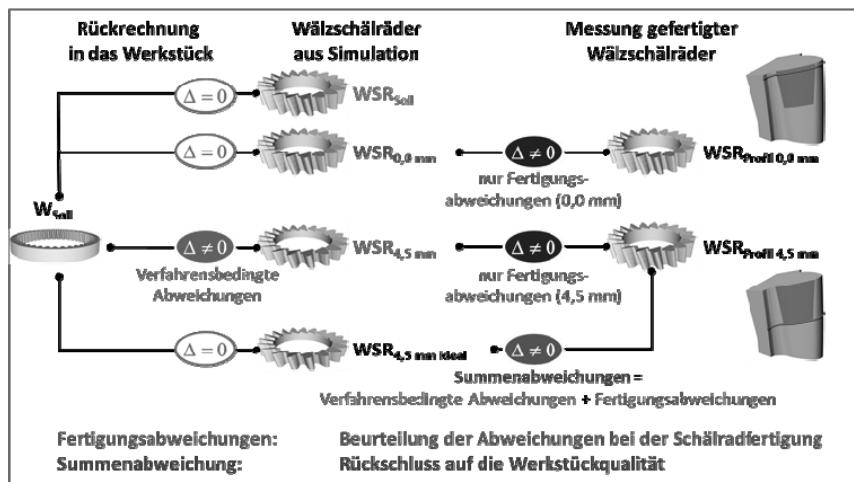


Bild 9: Globale Integration von Werkzeugauslegung, Werkzeugfertigung und Qualitätssicherung

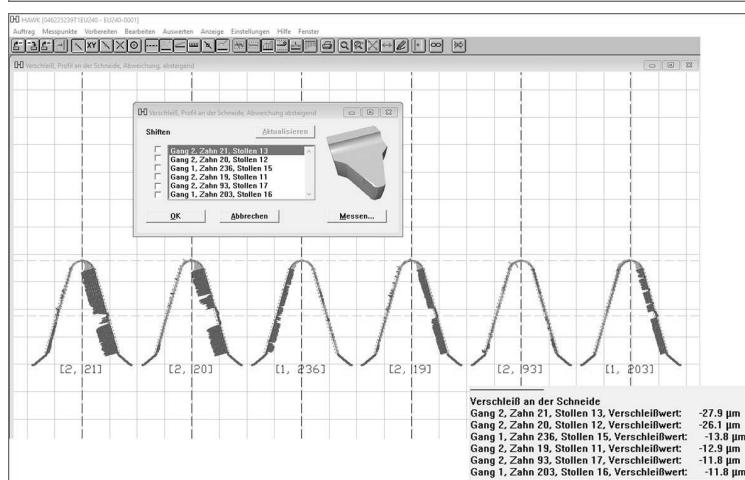
Die **Verschleißmessung** ist ein Beispiel für einen gänzlich anderen Blickwinkel auf die Prozessintegration der Verzahnungswerkzeugmessung. Der verschleißbedingte Werkzeugwechsel beruht auf statistischen Standzeitwerten, diese im Allgemeinen wiederum auf visuellen Beurteilungen der Verschleißzustände. Letztere sind auch die Basis zur Definition der

Nachschärfbeträge. Die hier vorgestellte automatisierte Freiflächen-Verschleißanalyse dient der Vermeidung subjektiver Beurteilungskriterien und -unterschiede. Die entscheidende Zielsetzung ist die Minimierung der Nachschliffbeträge und damit die Maximierung der Wälzfräser-Gesamtstandmenge. Die Messung erfolgt zweistufig: Zunächst werden die Zähne mit der voraussichtlich größten Verschleißmarkenbreite durch eine optische Messung aller Zähne im Durchlicht ermittelt und nach der Größe des Verschleißbetrages sortiert angezeigt, Bild 10. Der Bediener entscheidet anhand der Verschleißwerte, welche Zähne beim nächsten Einsatz des Wälzfräzers „geshiftet“ werden sollen. Für die verbleibenden Zähne wird im zweiten Schritt der maximal notwendige Nachschliffbetrag durch taktiles Messen hinter der Schneide ermittelt. Als Ergebnis werden alle relevanten Informationen und Daten zum Nachschärfen inkl. der maschinenbezogenen Shift-Informationen für den Folgeeinsatz des Wälzfräzers protokolliert, Bild 11.

- Messung des Wälzfräserprofils je Stollen im Durchlicht
- Notwendige hohe Messgeschwindigkeiten ► „Rasterscanning HD“
- Zur gezielten Analyse des Verschleißortes automatische Separierung der Zähne
- Auswertung je Stollen simultan zur weiteren Bildaufnahme möglich



Bildausschnitt eines gemessenen Stollens im „Bildverarbeiter“



Bilder 10: Verschleißanalyse auf der Basis des optischen „Rasterscans“

Identnummer - Evolvente	WF	Eingriffswinkel links	17.000	Steigung	4.778
Modul	1.520	Eingriffswinkel rechts	17.000	Spannutenzahl	11
Gangrichtung	L	Zahnkopfhöhe	3.050	Spannfächernabstand	0.000
Gangzahl	1	Zahnhöhe	4.900	Spannutensteigung	gerade
Kopfkreisdurchmesser	48.595	Zahndicke	2.388	Schneidenlänge	170.000

Freiflächenverschleiß Gang 1, Zahn 281, Stollen 6

Nr. i	Messord d	Abweichung
1	0.123	-0.013
2	0.127	-0.011
3 ...	0.132	-0.010
4	0.142	-0.007
5	0.161	-0.004
6	0.200	-0.002

Shiftbeträge Felsomat, Liebherr, FFG, Gleason horizontal

Nr.	Start	Ende	Länge (%)	Nr.	Start	Ende	Länge (%)
1	0.00	3.47	2.0	1	170.00	166.53	2.0
2	20.42	31.27	6.4	2	149.58	138.73	6.4
3	64.27	89.48	3.1	3	85.73	80.52	3.1

Shiftbeträge Gleason vertikal

Kunde
Nutzbare Länge 88.5 %

**Nachschliff**

Betrag	0.132 mm
Durchmesser	48.548 mm

**werth** esco GmbH  
WÄLZFRÄSER

**werth**

**esco**

Bild 11: Protokollierung der Daten für das Nachschärfen und den Folgeeinsatz des Wälzfrärsers

#### 4. Literatur

- [1] VDI/VDE – Richtlinie 2606, Blatt 1: Messen von Verzahnungswerkzeugen – Messen von Wälzfräsern, Beuth Verlag 2010

# Verzahnungswerkzeug: Messen von Räumbuchsen auf einem Koordinatenmessgerät

## Cutting Tool: Measurement of Broach Shells on a CMM

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

### Kurzfassung

In Automatikgetrieben und in anderen Bereichen finden Innenverzahnungen Verwendung, die durch Räumen hergestellt werden. Die Messung der zugehörigen Werkzeuge ist nur selten ein Thema, weil dies meist ganz in den Händen der Hersteller liegt. In diesem Beitrag wird die Messung von Räumbuchsen (Endstücke der Räumwerkzeuge) mit ringförmigen oder wendelgenuteten Spannuten auf Koordinatenmessgeräten beschrieben. Die Messung kann entweder mit Verwendung eines Drehtisches oder ohne Drehtisch mit einem geneigten 8-er Tasterstern erfolgen.

### Abstract

In many automatic gear drives and in other areas internal gearings are used which are manufactured by broaching. Nevertheless, the measurement of the related tools is rarely mentioned in papers, perhaps because it belongs to the duties of the tool manufacturer. This paper deals with the measurement of broach shells (end part of a needle) with ring or helical chip spaces on a CMM. The measurement can be executed using a rotary table or an 8 star probe.

### 1. Geometrie des Räumwerkzeugs

Zur Herstellung von evolventischen Innenverzahnungen für große Stückzahlen werden in der Regel Räumwerkzeuge, sogenannte Räumnadeln, verwendet. Das Prinzip eines solchen Werkzeugs wird in DIN 1415 behandelt (Bild 1).

Das Werkzeug wird durch das fixierte Werkstück gezogen. Der Durchmesser der Räumnadel nimmt dabei schrittweise zu, bis die Endkontur erreicht ist.

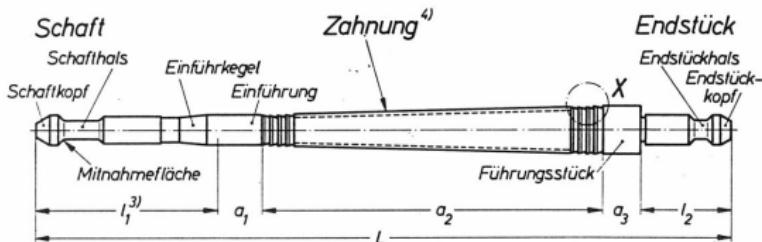


Bild 1: Quelle DIN 1415

Bei größeren Modulen besteht die Räumnadel aus der eigentlichen Nadel beginnend mit Zahnhöhe Null bis nahezu der vollen Zahnhöhe und einer Buchse als Fertigschneider.

Zusammengesetzte Innen-Räumwerkzeuge, bestehend aus Räumwerkzeug-Aufnahme und Räumbuchsen

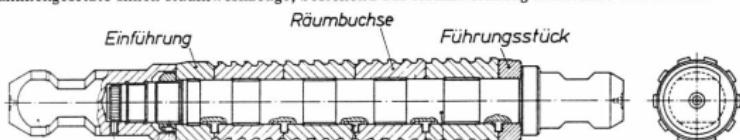


Bild 2: Quelle DIN 1415

Die Verbindung der beiden Elemente Nadel und Buchse erfolgt (anders als in Bild 2 dargestellt) mit Nut und Feder. Von der Bauform werden gerad- und wendelgenutete Räumbuchsen unterschieden (Bild 3). Erstere werden für gerade Innenverzahnungen und letztere für schräge Innenverzahnungen verwendet.



Bild 3: Gerad- und wendelgenutete Räumbuchsen mit Montagennut.

Zur Schnittfähigkeit sind die Zähne einer Räumbuchse mit einem Spanwinkel an der Spanfläche und Freiwinkeln am Außen- und Innendurchmesser und an den Profilseiten versehen.

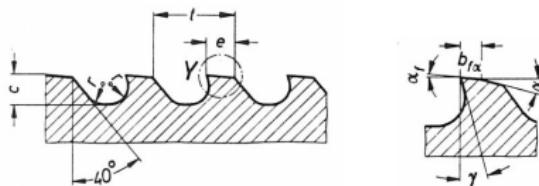


Bild 4: Quelle DIN 1415

## 2. Messaufgaben an einer Räumbuchse

Vom Eintritt des Räumwerkzeugs in die zu fertigende Verzahnung bis zum Austritt aus der Verzahnung nehmen Durchmesser und Zahndicke der Räumbuchse schrittweise zu. Die Stufung von Zahn zu Zahn definiert die Spandicke. Der letzte Teil der Buchse ist zylindrisch.

Aus der Funktion einer Räumbuchse ergeben sich zahlreiche Messaufgaben zur Qualitätsprüfung des Werkzeugs. Hierzu zählen:

- Planlauf bzw. Steigung der Spankammernut
- Teilung der Spankammern
- Rundlauf am Innen- und Außendurchmesser
- Profil-Staffelung in einer Lückenreihe
- Winkelstellung der Verzahnung zur Nut
- Stirnteilung im Endzylinderbereich
- Durchmesser innen und außen
- Diametrales Zwei-Kugelmaß
- Radiale Staffelung am Außen- und Innendurchmesser
- Radiale Staffelung des Ein-Kugelmaßes
- Spanwinkel im Normalschnitt
- Freiwinkel innen, außen und in der Profilmittle
- Zahn-Stirnprofil
- Übergang am Zahnkopf

### 3. Aufspannung und Ausrichtung der Räumbuchse auf dem KMG

Zur Messung der Räumbuchse wird diese z.B. mit einem Dreibackenfutter auf dem Tisch des Messgeräts aufgespannt. Zur Vorbereitung der Messung wird an der Buchse ein Koordinatensystem eingemessen, in dem anschließend die gesamte Messung durchgeführt wird. Eine leichte Schiefheit zum Koordinatenmessgerät oder eine Exzentrizität haben daher keinen Einfluss auf das Messergebnis.

Die Mittelbohrung der Buchse bildet die Z-Achse, die untere Stirnfläche definiert den Nullpunkt in Z. Die Richtung der X-Achse wird durch die Richtung der Montagenut am oberen Ende festgelegt. Dadurch ist das Koordinatensystem, in dem die gesamte Buchse gemessen wird, eindeutig definiert. Im Allgemeinen ist die Mittelbohrung nur in den Endbereichen voll ausgebildet. Man misst daher z.B. unten und oben je einen Kreis und verknüpft diese zu einer Achse. Um beim unteren Kreis eine Schaftberührung des Tasters sicher zu vermeiden ist es sinnvoll einen Scheibentaster zu verwenden.

### 4. Taster für die Räumbuchsenmessung

Damit alle Messpositionen an Zähnen und Spannuten erreicht werden können, muss wegen des positiven Spanwinkels (außer bei Schälwerkzeugen) ein nach unten geneigter Taster verwendet werden.

Bei Verwendung eines Drehtisches reicht ein einzelner geneigter Taster. Bei Messung ohne Drehtisch ist ein 8-Stern zu verwenden (Bild 5). Aus der räumlichen Normalenrichtung der Antastpunkte ergibt sich der geeignete Taster bzw. die Drehtischstellung.

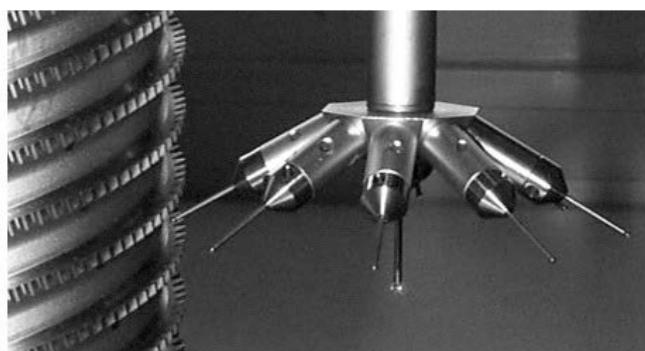


Bild 5: Tasteranordnung bei Messung ohne Drehtisch

## 5. Start der automatischen Messung

Nach dem Einmessen des Werkstück-Koordinatensystems muss dem Messsystem mitgeteilt werden, wo die Zähne am Umfang der Buchse sitzen. Dies geschieht durch eine manuelle Antastung in der Spanfläche eines voll ausgeprägten Zahns am unteren Ende der Buchse bzw. auf dem unteren Ring. Danach verläuft die weitere Messung automatisch.

Von der angetasteten Stelle in der Spanfläche scannt das Gerät, jeweils in der Spanfläche beginnend, über die rechte und linke Profilschneide und dann in der Mitte des Zahns beginnend bis über den Zahnkopf hinaus. Damit sind am Zahn 1 die Lage des linken und rechten Profils und die Position am Zahnkopf bestimmt. Alle übrigen Messpositionen können aus diesen drei Positionen und den eingegebenen Parametern abgeleitet werden.

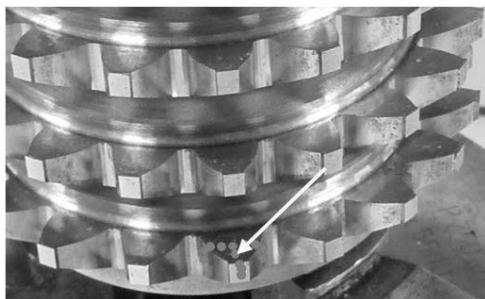


Bild 6: Antastung am Bezugszahn (Zahn 1)

## 6. Geometrie-Parameter der Räumbuchse

Zur Messung der Räumbuchse sind in mehreren Dialogen zahlreiche Parameter einzugeben, die alle auf der technischen Zeichnung der Räumbuchse zu finden sind. Hierzu zählen insbesondere die Zähnezahl der erzeugten Verzahnung, der Normalmodul, der Normal-Eingriffswinkel, die Drallsteigung (= Steigungshöhe der erzeugten Verzahnung), die Richtung der Steigung (links, rechts), die Anzahl der Spankammern, die Steigungshöhe der Spankammern und deren Richtung (links, rechts), der Spanwinkel im Normalschnitt, der Freiwinkel am Innen- und Außendurchmesser, der Freiwinkel am Profil, der Außen-durchmesser, der Innendurchmesser und der axiale Messbereich.

Zusätzlich zu diesen allgemeinen Parametern können in weiteren Dialogen spezielle Eingaben zu den einzelnen Messaufgaben gemacht werden.

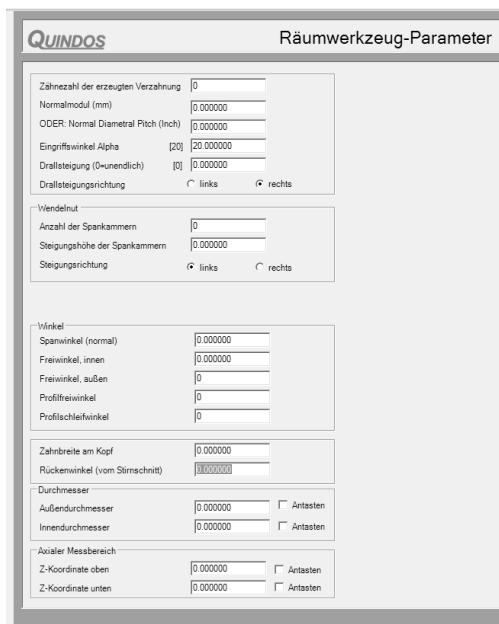


Bild 7: Eingabedialog für Geometrieparameter

**Anmerkung:** Die Dialogseiten sind bei gerad- und wendelgenutete Räumbuchsen unterschiedlich, da z.B. die Spannuten bei einer geradgenuteten Buchse keine Steigung haben.

## 7. Spezielle Eingabe für geradgenutete Räumbuchsen

Zur Minimierung der Schwingungsanregung beim Räumen sind bei geradgenuteten Buchsen die Abstände der einzelnen Ringe zueinander, d.h. ihre Axialteilung, unterschiedlich. Für diese Räumbuchsen erscheint ein zusätzlicher Dialog, in dem die Abstände der einzelnen Ringe eingegeben werden können. Vor dem Start der Messung werden die Abstände aber noch einmal automatisch nachgemessen, da sich die Abstände z.B. durch Nachschleifen verändert haben können.

## 8. Definition der Messaufgaben

In einer Auswahlseite können die zu messenden Parameter festgelegt werden. Dadurch wird der Prüfumfang an die aktuelle Messaufgabe angepasst. Eine vollständige Messung wird man nur bei einem neuen Werkzeug durchführen. Nach einem Scharfschliff werden hingegen nur profil- und teilungsrelevante Parameter geprüft.

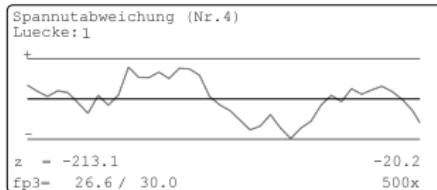
Für die ausgewählten Messaufgaben erscheint jeweils ein spezieller Dialog, in dem z.B. die Nummern der zu prüfenden Zähne oder Nuten, die Anzahl der Messpunkte, die Entfernung von der Schneidkante, die Plotvergrößerung etc. angegeben werden können.

## 9. Beschreibung der einzelnen Messaufgaben

### 9.1 Steigung der Spankammernut

Die Spanfläche bildet bei einer geradgenuteten Räumbuchse eine nach innen geneigte Kegelfläche bzw. bei einer wendelgenuteten Buchse eine nach innen geneigte Wendelfläche. Die Messpunkte der Steigung werden stets in der Mitte der Spanfläche senkrecht zur Oberfläche angetastet. Weil die Spanfläche durch Schleifen erzeugt wird, ist es unnötig die Spanflächen aller Zähne in einer Nut anzutasten. Man kann daher eine Schrittweite angeben. Bei geradgenuteten Buchsen wird der Planlauf ausgewertet, bei wendelgenuteten Räumbuchsen die Steigung.

Bild 8



Anmerkung: Für die Testmessung wurde der Z-Nullpunkt in die obere Stirnfläche gelegt. Der Z-Bereich reicht daher von -213.1 mm bis -20.2 mm. Es wurde nur jeder dritte Zahn angetastet.

### 9.2 Teilung der Spankammern

Die Teilung der Spankammern wird bei ringgenuteten Buchsen axial, bei wendelgenuteten Buchsen auf einer Wendel normal zur Wendel der Spankammern gemessen.

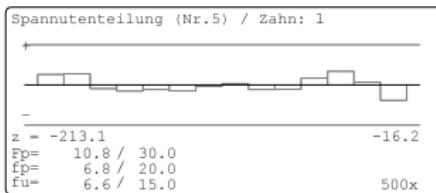


Bild 9

### 9.3 Rundlauf innen/außen

Bei manchen Räumbuchsen braucht der Rundlauf innen nicht gemessen zu werden, weil der Zahnkopf der Verzahnung nicht überschnitten wird, d.h. der Zahnkopf wird durch die Innenbohrung des Ringes definiert.

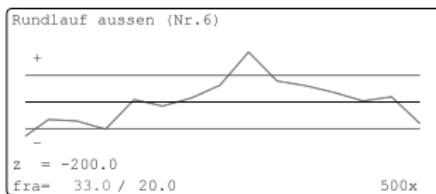


Bild 10

### 9.4 Staffelung in der Profillücke

Bei dieser Messung wird die Veränderung der Lage des Profils der Schneidkante aufeinander folgender Zähne senkrecht zur Hüllschraube bestimmt. Im nachstehenden Bild erkennt man, dass am unteren Ende der Buchse praktisch kein Material abgetragen wird. Bei den weiteren Zähnen beträgt die Spandicke etwa 0.014 mm. Die Messung wird an der linken und rechten Lückenflanke für alle Zähne einer Lückenreihe durchgeführt.

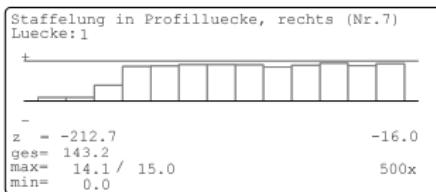


Bild 11

## 9.5 Stellung der Verzahnung zur Nut

Wenn die Räumbuchse mit der Räumnadel zusammengesteckt wird, muss die Richtung der Zahnreihen beider Teile genau übereinstimmen. Andernfalls wäre beim ersten schneidenden Zahn die Spanaufteilung stark unsymmetrisch. Im Extremfall könnte der Zahn sogar wegen Überlastung sofort abbrechen. Bei wendelgenuteten Buchsen wird zur Prüfung der Winkelposition in einer bestimmten Höhe (Axialposition) die Position einer zentrierenden Messkugel bestimmt, bei geradgenuteten Buchsen die Mitte eines Zahns. Die Fehlstellung wird als Abstand zur XZ-Ebene und als Winkelabstand ausgegeben.

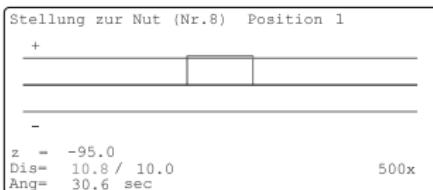


Bild 12

## 9.6 Stirnteilung und Rundlauf im Endzylinderbereich

Zur Messung der Stirnteilung wird bei ringgenuteten Buchsen die Ring-Nummer oder bei wendelgenuteten Buchsen die Z-Höhe angegeben. Da die Teilungspunkte auf den Schneidkanten bei einer wendelgenuteten Buchse nicht in einer Ebene liegen, bildet die Messung in der abgewickelten Seitenansicht die Form einer Zickzack-Kurve, wobei angestrebt wird, möglichst nahe an der gewählten Z-Höhe zu bleiben. Zur Auswertung werden die Messpunkte in einen gemeinsamen Stirnschnitt geschraubt. Die Teilungsmessung wird im zylindrischen unteren Teil der Buchse durchgeführt. Gemessen und ausgewertet werden linke und rechte Flanken. Für eine wirtschaftliche Messung kann eine Schrittweite angegeben werden, damit bei großer Zähnezahl nicht alle Zähne gemessen werden müssen. Das Programm wählt aber Lücken aus, damit auch eine Rundlaufauswertung möglich ist.

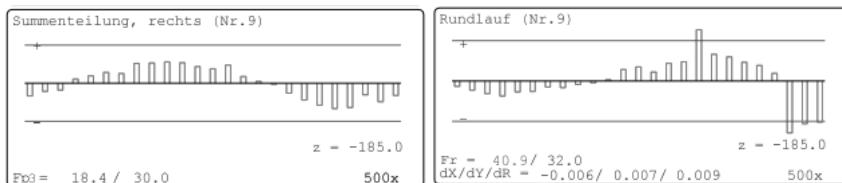


Bild 13

## 9.7 Außen- und Innendurchmesser

Der Außendurchmesser wird an der Zahnspitze gemessen. Z.B. wurde in Bild 14 der Außen-durchmesser an 4 ca. gleichverteilten Stellen gemessen, d.h. es wurden 8 Zahnspitzen angetastet. Die Messpunkte liegen bei einer wendelgenuteten Räumbuchse nicht in einer Ebene und werden vor der Auswertung in eine gemeinsame Ebene geschraubt. Die Messung erfolgt im zylindrischen Teil der Buchse. Der Innendurchmesser wird häufig nicht gemessen, weil der Zahnkopf der Verzahnung nicht überschnitten wird oder weil die Platzverhältnisse eine Antastung nicht erlauben.

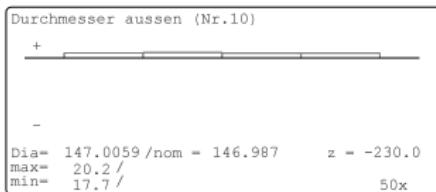


Bild 14

## 9.8 Diametrales Zwei-Kugelmaß

Beim diametralen Zwei-Kugelmaß ist die Anzahl der Messstellen wählbar. Es können auch mehrere unterschiedliche Kugel-Durchmesser angegeben werden, um die Kugelmaße für diese Durchmesser zu erhalten. Entsprechend werden dann mehrere Antastungen pro Lückenseite gemacht. Zur Messung werden die Antastungen dicht an die Schneidkanten gesetzt. Zur Bestimmung des diametralen Zwei-Kugelmaßes wird die Profil-Hüllverzahnung verwendet.

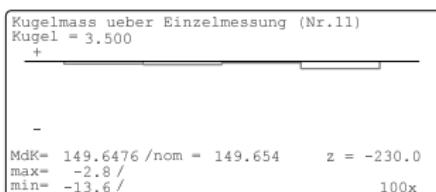


Bild 15

## 9.9 Radiale Staffelung innen und außen

Bei dieser Messung wird die Veränderung der radialen Lage der Schneidkanten am Zahnkopf bzw. am Innendurchmesser bestimmt. Die Messung am Innendurchmesser wird nur vorgenommen, wenn dieser Durchmesser auch schneidet (Überkopfschneider). Die Messung erfolgt über die ganze Länge der Buchse.

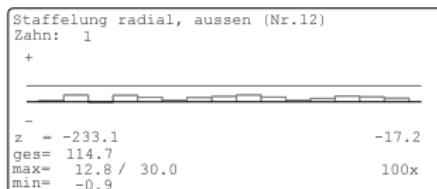


Bild 16

## 9.10 Radiale Staffelung des Ein-Kugelmaßes

Die radiale Staffelung bedeutet die Änderung der radialen Position einer Zentrierkugel entlang einer Lückenreihe. Bei einer geradgenuteten Buchse erfolgt dies in axialer Richtung von unten nach oben. Bei einer wendelgenuteten Buchse verläuft die Messung entlang der Zahnlückenwendel. Die Auswertung erfolgt zentrierend in der Profil-Hüllschraube.

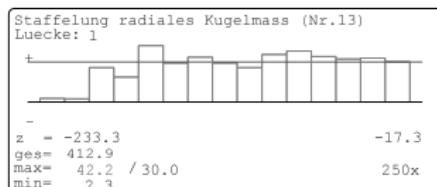


Bild 17

## 9.11 Spanwinkel im Normalschnitt

Der Spanwinkel wird im Normalschnitt der Spanfläche bestimmt. Normalerweise sollte dieser Schnitt eine Gerade ergeben. Andernfalls ändert sich das wirksame Schnittprofil. Ausgewertet werden der Winkel und die Form der Zahnmittellinie im Normalschnitt.

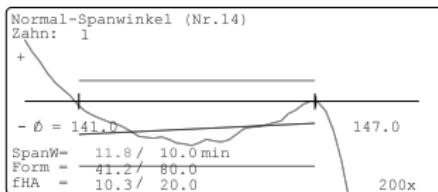


Bild 18

### 9.12 Freiwinkel innen, außen und am Profil

Die Freiwinkel werden in einer bestimmten Z-Höhe und an wählbaren Messzähnen bestimmt. Zur Messung werden Zahnflanken ausgewählt, die möglichst nahe an der angegebenen Z-Höhe liegen. Bei geradgenuteten Buchsen wird die Ringnummer angegeben. Die Ist-Werte werden mit den Soll-Werten und der Toleranz verglichen.

### 9.13 Zahn-Stirnprofil

Das Zahnprofil der Buchse entsteht als Durchdringung der kegeligen bzw. verschraubten Spanfläche mit den verschraubten Freiflächen. Die räumlich gekrümmte Profilschneide wird für die Auswertung in eine Stirnschnittebene geschraubt. In dieser Ebene bildet sich dann das Stirnprofil (oder das effektive Profil) ab als Basis für die Auswertung. Nachstehend wird die Auswertung eines linken und rechten Profils gezeigt.

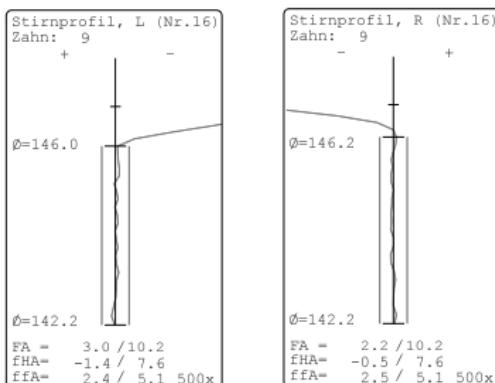


Bild 19

### 9.14 Profil-Übergang

Bei dieser Prüfung geht es um den Übergang vom evolventischen Profil in den Kopf des Räumzahnes. Die Auswertung erfolgt im Stirnschnitt und dient nur zur visuellen Kontrolle.

Häufig ist ein runder Übergang ohne ausgeprägte Ecken gefordert (Verringerung der Fußbruchgefahr bei der erzeugten Verzahnung).

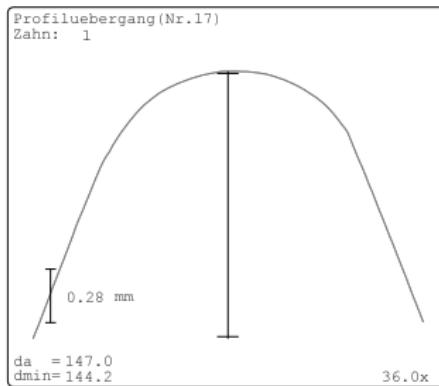


Bild 20

## 10. Literatur

- [1] DIN 1416, 1971. Räumwerkzeuge, Gestaltung von Schneidzahn und Spankammer
- [2] QUINDOS Räumbuchsenmessung, Referenzhandbuch, Hexagon Metrology GmbH



# Schrägungswinkelmodifikationen exakt umsetzen

Dr.-Ing. Jörg Börner, ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen

## Kurzfassung

Für ein optimales Breitentragen von Verzahnungen unter Last sind Modifikationen des Flankenschrägungswinkels erforderlich, um Einflüsse des Umfeldes zu kompensieren. Diese Modifikationen können durch Anpassungen des Herstellschrägungswinkels und des Herstellfußkegelwinkels (Konizität) erzeugt werden. Es ergeben sich dabei Abweichungen in der Grundkreisgeometrie (Durchmesser und Schrägungswinkel) gegenüber der Nennverzahnung. Die richtige Berechnung dieser Geometrie steht im Fokus dieses Beitrages, da in der Software von Messmaschinen immer noch fehlerhafte Algorithmen zum Einsatz kommen. Es werden die Ursachen des fehlerhaften Ansatzes erläutert und der exakte Algorithmus beschrieben. Außerdem wird an einzelnen Berechnungsbeispielen gezeigt, wie man mit Modifikationen des Flankenschrägungswinkels eine Kompensation der Einflüsse einer nicht-parallelen Achslage erreicht. Das mit den modifizierten Grundkreisdaten in einer Zahnkontaktanalyse ermittelte Tragbild zeigt jeweils die beabsichtigte Kompensation der Achsverlagerungen. Die aufgelisteten Berechnungsgleichungen sollen eine Basis sein, um zukünftig den Konflikt zwischen fehlerhafter Messsoftware und exakten Vorgaben nach Firmendatenblättern zu vermeiden.

## 1. Erfordernis für Schrägungswinkelmodifikationen

Beim Einsatz von Verzahnungen sind oft Modifikationen der Flankengeometrie erforderlich, um ungünstige Auswirkungen der Achslage unter Last zu kompensieren. Lastbedingte Neigungen und Verlagerungen der Räder führen zu einer wirksamen Flankenlinienwinkelabweichung in der Eingriffsebene, die für ein annähernd mittiges Tragen kompensiert werden muss. In der Auslegung der Verzahnung für nominell parallele Achsen wird die Verzahnung als eine Paarung zweier Räder mit dem Betrag nach identischem Schrägungswinkel definiert. Nach der Festlegung der Makrogeometrie werden Modifikationen vorgegeben, die zu einem optimalen Tragverhalten unter Last führen sollen. Dabei geht es vor allem um Anpassungen der Flankenschrägungswinkel, die sich für Links- und Rechtsflanke meist unterscheiden.

## 2. Ermittlung der erforderlichen Schräglungswinkelmodifikationen

Aus den Abweichungen von der Achsparallelität ergibt sich eine Drehung der Flankenlinie um den Winkel  $\lambda$  in der Eingriffsebene. Diese Drehung ist durch eine Kombination von zusätzlicher Verschraubung und Konizität erreichbar. Die Verzahnung muss mit einem Herstellsschräglungswinkel erzeugt werden, der meist vom Nennschräglungswinkel abweicht und zu den gewollten Modifikationen führt. Die erforderliche Drehung  $\lambda$  in der Eingriffs-ebene kann mit den Kippwinkeln für die Achsneigung  $\delta$  und für die Achsschränkung  $\vartheta$  (Definition siehe Bild 1 und 2) wie folgt berechnet werden:

$$\text{Linksflanke: } \tan \lambda_L = i_v \cdot (+(\tan \vartheta_1 - \tan \vartheta_2) \cdot \cos \alpha_{wt} - (\tan \delta_1 - \tan \delta_2) \cdot \sin \alpha_{wt}) \quad (1)$$

$$\text{Rechtsflanke: } \tan \lambda_R = i_v \cdot (-(\tan \vartheta_1 - \tan \vartheta_2) \cdot \cos \alpha_{wt} - (\tan \delta_1 - \tan \delta_2) \cdot \sin \alpha_{wt}) \quad (2)$$

Der Faktor  $i_v$  ist gleich 1 für Außenradpaare und gleich -1 für Innenradpaare mit dem Rad 2 als Hohlrad. Die sich aus der Drehung entlang der Eingriffslinie ergebende Verschiebung  $h$  muss sich aus einer Modifikation  $\Delta\beta_b$  des Grundschräglungswinkels ergeben, wie es in Bild 3 dargestellt ist, wobei ein linkssteigender Schräglungswinkel negativ definiert ist:

$$\Delta\beta_b = \tan^{-1}(\tan \beta_b + \tan \lambda) - \beta_b \approx \lambda \cdot \cos^2 \beta_b \quad (3)$$

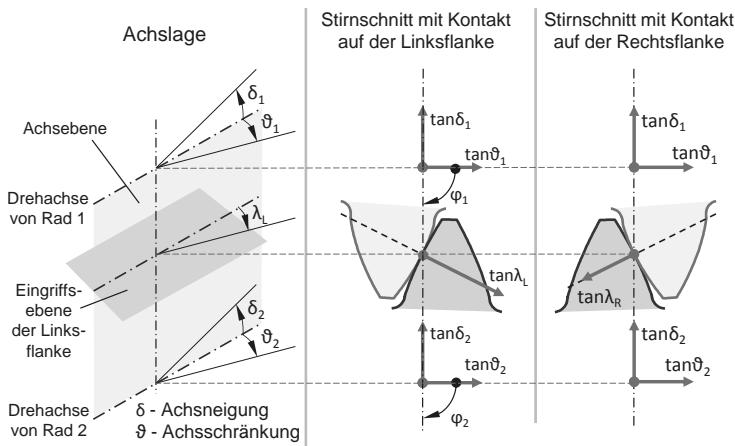


Bild 1: Kippwinkel der Drehachsen und Drehwinkel der Flankenlinie an Außenradpaaren

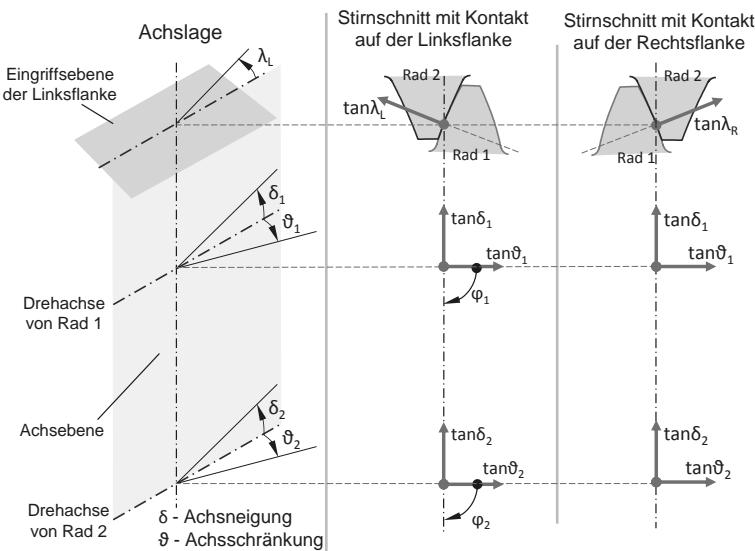
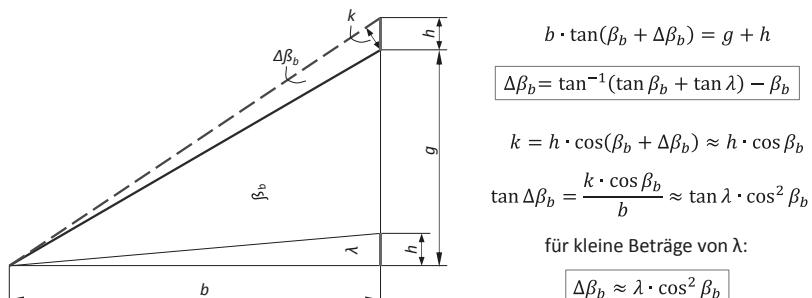


Bild 2: Kippwinkel der Drehachsen und Drehwinkel der Flankenlinie an Innenradpaaren

Aus der Modifikation des Grundschrägungswinkels ergibt sich die Vorgabe für die Modifikation des Nennschrägungswinkels  $\Delta\beta$ :

$$\Delta\beta = \tan^{-1} \left( \frac{\tan(\beta_b + \Delta\beta_b)}{\cos \alpha_t} \right) - \beta \quad (4)$$

Bild 3: Umrechnung des Flankenlinienkippwinkels  $\lambda$  in die Grundschrägungswinkelmodifikation  $\Delta\beta_b$

### 3. Einstellwerte zur Erzeugung der Schrägungswinkelmodifikationen

Für die Herstellung der Schrägungswinkelmodifikationen müssen der Herstellsschrägungswinkel und der Herstellfußkegelwinkel am Werkzeug eingestellt werden, mit denen sich die geforderte Grundkreisgeometrie ergibt, wie es in Bild 4 dargestellt ist.

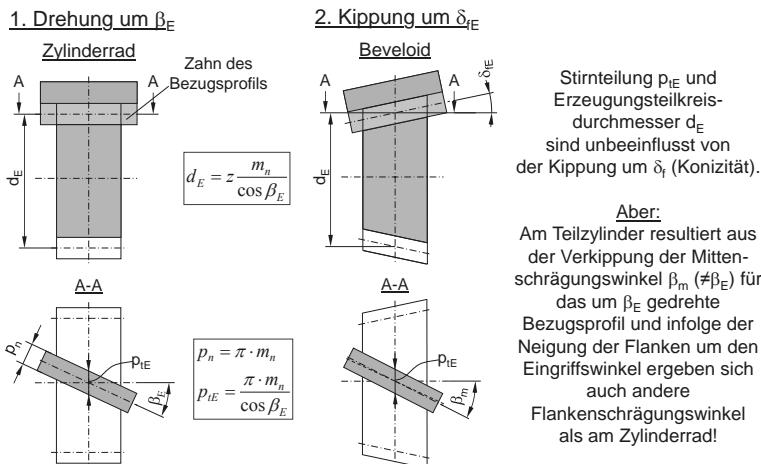


Bild 4: Definition des Herstellsschrägungswinkels  $\beta_E$  und des Herstellfußkegelwinkels  $\delta_{IE}$

Für eine effektive Zweiflankenbearbeitung müssen die Einstellwinkel in der Fertigung so gewählt werden, dass sich gleichzeitig die Modifikationen auf Rechts- und Linkslanke ergeben. Die Abweichung des Erzeugungsschrägungswinkels vom Nennwert führt dabei zu einer Abweichung des Herstellteilkreises vom Nennwert, die in der Berechnung der Grundkreisgeometrie unbedingt beachtet werden muss. Es ist falsch, jede Flanke separat mit dem modifizierten Schrägungswinkel zu berechnen. Bei Zweiflankenbearbeitung gelten für beide Flanken dieselben Erzeugungsschrägungswinkel und Erzeugungsfußkegelwinkel. Verwendet man den aus beiden Flankenschrägungswinkeln arithmetisch gemittelten Wert als Erzeugungsschrägungswinkel, ergibt sich nicht die gewollte Modifikation, da der Erzeugungsteilkreis vom Nennteilkreis abweicht. Die exakte Berechnung ist für beliebige Werkzeugeingriffswinkel anwendbar, die vom Nenneingriffswinkel abweichen können. Definiert man den Werkzeugeingriffswinkel auf der Linkslanke  $\alpha_{nEL}$ , ergibt sich  $\alpha_{nER}$  auf der Rechtslanke zu:

$$\alpha_{nER} = \cos^{-1} \left( \cos \alpha_{nR} \cdot \frac{\cos \alpha_{nEL}}{\cos \alpha_{nL}} \right) \quad (5)$$

Die Erzeugungseinstellwinkel  $\beta_E$  und  $\delta_{IE}$  können aus den am Nennteilkreis vorgegebenen Flankenschrägungswinkeln  $\beta_{modL}$  und  $\beta_{modR}$  wie folgt berechnet werden:

$$\text{Erzeugungsnormalmodul} \quad m_{nE} = m_n \cdot \frac{\cos \alpha_{nL}}{\cos \alpha_{nEL}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{\tan \beta_{modR} - \tan \beta_{modL}}{\tan \alpha_{nEL} + \tan \alpha_{nER}} \\ \text{Konstanten} \end{aligned} \quad (7)$$

$$K_2 = \frac{\cos \beta}{2} \cdot \frac{\cos \alpha_{nL}}{\cos \alpha_{nEL}} \cdot (\tan \beta_{modL} + \tan \beta_{modR} - K_1 \cdot (\tan \alpha_{nER} - \tan \alpha_{nEL})) \quad (8)$$

$$\text{Erzeugungsfußkegelwinkel} \quad \delta_{fE} = \sin^{-1}(K_1 \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha_{nL} / \cos \alpha_{nEL}) \quad (9)$$

Erzeugungsschrägungswinkel:

$$\text{Startwert: } \beta_{E,0} = 0,5 \cdot (\beta_{modL} + \beta_{modR}) \cdot \cos \beta / \cos(0,5 \cdot (\beta_{modL} + \beta_{modR})) \quad (10)$$

$$\text{Iteration } i = 1, 2, 3, \dots, 20: \quad \beta_{E,i} = \tan^{-1}(K_2 / (\cos \delta_{fE} \cdot \cos \beta_{E,i-1})) \quad (11)$$

Für die Berechnung der erzeugten Geometrie am Grundzylinder für den Erzeugungsschrägungswinkel  $\beta_E$  und den Erzeugungsfußkegelwinkel  $\delta_{IE}$  gelten die folgenden Gleichungen:

Linksflanke

$$K_3 = \tan \beta_E \cdot \sin \delta_{fE} \quad (12)$$

$$K_4 = \tan \beta_E \cdot \cos \delta_{fE} \quad (13)$$

$$K_5 = \cos \delta_{fE} / \cos \beta_E \quad (14)$$

$$K_6 = \sin \delta_{fE} / \cos \beta_E \quad (15)$$

Stirneingriffswinkel am Herstellteilkreis:

$$\alpha_{tEL} = \tan^{-1}(K_5 \cdot \tan \alpha_{nEL} + K_3) \quad \alpha_{tEL} = \tan^{-1}(K_5 \cdot \tan \alpha_{nEL} - K_3) \quad (16)$$

Flankenschrägungswinkel am Herstellteilkreis:

$$\beta_{EL} = \tan^{-1}(K_4 - K_6 \cdot \tan \alpha_{nL}) \quad \beta_{ER} = \tan^{-1}(K_4 + K_6 \cdot \tan \alpha_{nR}) \quad (17)$$

Grundkreisdurchmesser:

$$d_{bEL} = \frac{z \cdot m_n}{\cos \beta_E} \cdot \cos \alpha_{tEL} \quad d_{bER} = \frac{z \cdot m_n}{\cos \beta_E} \cdot \cos \alpha_{tER} \quad (18)$$

Grundschrägungswinkel:

$$\beta_{bEL} = \tan^{-1}(\tan \beta_{EL} \cdot \cos \alpha_{tEL}) \quad \beta_{bER} = \tan^{-1}(\tan \beta_{ER} \cdot \cos \alpha_{tER}) \quad (19)$$

Wenn man die erforderlichen Modifikationen am Grundzylinder voraussetzt, die sich aus den Achsneigungen nach Gl. (3) berechnen lassen, bietet sich folgender Algorithmus an,

um die Einstellwinkel für die Herstellung und die sich ergebenden Modifikationen am Nennteilkreis  $\Delta\beta$  effektiv zu berechnen:

Linksflanke

$$\alpha_{tL} = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \alpha_{nL}}{\cos \beta} \right) \quad \text{Rechtsflanke} \quad (20)$$

$$\beta_{bmodL} = \tan^{-1}(\tan \beta \cdot \cos \alpha_{tL}) + \Delta\beta_{bL} \quad \beta_{bmodR} = \tan^{-1}(\tan \beta \cdot \cos \alpha_{tR}) + \Delta\beta_{bR} \quad (21)$$

$$\beta_{modL,0} = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \beta_{bmodL}}{\cos \alpha_{tL}} \right) \quad \beta_{modR,0} = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \beta_{bmodR}}{\cos \alpha_{tR}} \right) \quad (22)$$

$$\text{Startwert: } \beta_{E,0} = 0,5 \cdot (\beta_{modL,0} + \beta_{modR,0}) \cdot \frac{\cos \beta}{\cos(0,5 \cdot (\beta_{modL,0} + \beta_{modR,0}))} \quad (23)$$

Iteration:  $i = 1, 2, 3, \dots, 20$

$$K_{1,i} = \frac{\tan \beta_{modR,i-1} - \tan \beta_{modL,i-1}}{\tan \alpha_{nEL} + \tan \alpha_{nER}} \quad (24)$$

$$K_{2,i} = \frac{\cos \beta}{2} \cdot \frac{\cos \alpha_{nL}}{\cos \alpha_{nEL}} \cdot \left( \tan \beta_{modL,i-1} + \tan \beta_{modR,i-1} - K_{1,i} \cdot (\tan \alpha_{nER} - \tan \alpha_{nEL}) \right) \quad (25)$$

$$\delta_{fE,i} = \sin^{-1} \left( K_{1,i} \cdot \cos \beta \cdot \frac{\cos \alpha_{nL}}{\cos \alpha_{nEL}} \right) \quad (26)$$

$$\beta_{E,i} = \tan^{-1} \left( \frac{K_{2,i}}{\cos \delta_{fE,i} \cdot \cos \beta_{E,i-1}} \right) \quad (27)$$

$$K_{3,i} = \tan \beta_{E,i} \cdot \sin \delta_{fE,i} \quad (28)$$

$$\alpha_{tEL,i} = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \alpha_{nL} \cdot \cos \delta_{fE,i}}{\cos \beta_{E,i}} + K_{3,i} \right) \quad \alpha_{tER,i} = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \alpha_{nR} \cdot \cos \delta_{fE,i}}{\cos \beta_{E,i}} - K_{3,i} \right) \quad (29)$$

$$\beta_{modL,i} = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \beta_{bmodL}}{\cos \alpha_{tEL,i}} \cdot \frac{\cos \beta_{E,i}}{\cos \beta} \cdot \frac{\cos \alpha_{nEL}}{\cos \alpha_{nL}} \right) \quad \beta_{modR,i} = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \beta_{bmodR}}{\cos \alpha_{tER,i}} \cdot \frac{\cos \beta_{E,i}}{\cos \beta} \cdot \frac{\cos \alpha_{nER}}{\cos \alpha_{nR}} \right) \quad (30)$$

erforderliche Modifikation am Nennteilkreis:

$$\Delta\beta_L = \beta_{modL,20} - \beta \quad \Delta\beta_R = \beta_{modR,20} - \beta \quad (31)$$

resultierender korrigierter Stirneingriffswinkel am Nennteilkreis:

$$\begin{aligned} \alpha_{t,modL} &= \cos^{-1} \left( \frac{d_{bmodL}}{d} \right) & \alpha_{t,modR} &= \cos^{-1} \left( \frac{d_{bmodR}}{d} \right) \\ &= \cos^{-1} \left( \cos \alpha_{tEL,20} \cdot \frac{\cos \beta}{\cos \beta_{E,20}} \right) & &= \cos^{-1} \left( \cos \alpha_{tER,20} \cdot \frac{\cos \beta}{\cos \beta_{E,20}} \right) \end{aligned} \quad (32)$$

#### 4 Fehlerhafte Berechnung mit unterschiedlichen Herstellwinkeln

Häufig wird immer noch der einfache Ansatz verwendet, den modifizierten Schrägwinkel separat für jede Flanke als Herstelleinstellwinkel zu definieren. Daraus ergeben sich Grundkreisdaten, die nicht zu der gewollten Modifikation am Nennteilkreis führen, da die Modifikation bei dieser Vorgehensweise am Herstellteilkreis vorgegeben wird und nicht am Nennteilkreis. Die fehlerhaften Grundkreisdaten resultieren aus folgendem Algorithmus:

Linksflanke

$$\alpha_{tmodL} = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \alpha_{nL}}{\cos \beta_{modL}} \right) \quad (33)$$

$$\beta_{bmodL} = \tan^{-1}(\tan \beta_{modL} \cdot \cos \alpha_{tmodL}) \quad \beta_{bmodR} = \tan^{-1}(\tan \beta_{modR} \cdot \cos \alpha_{tmodR}) \quad (34)$$

$$d_{bmodL} = \frac{z \cdot m_n}{\cos \beta_{modL}} \cdot \cos \alpha_{tmodL} \quad d_{bmodR} = \frac{z \cdot m_n}{\cos \beta_{modR}} \cdot \cos \alpha_{tmodR} \quad (35)$$

Rechnet man die Modifikation vom Grundkreis auf den Nennteilkreis zurück, ergibt sich eine Abweichung  $\beta_{dev}$ , da die Modifikationsvorgabe nicht am Nennteilkreis angesetzt wurde:

Linksflanke

$$\begin{aligned} \beta_{resL} &= \tan^{-1} \left( \tan \beta_{bmodL} \cdot \frac{d}{d_{bmodL}} \right) \\ &= \tan^{-1} \left( \tan \beta_{modL} \cdot \frac{\cos \beta_{modL}}{\cos \beta} \right) \end{aligned} \quad \begin{aligned} \beta_{resR} &= \tan^{-1} \left( \tan \beta_{bmodR} \cdot \frac{d}{d_{bmodR}} \right) \\ &= \tan^{-1} \left( \tan \beta_{modR} \cdot \frac{\cos \beta_{modR}}{\cos \beta} \right) \end{aligned} \quad (36)$$

$$\beta_{devL} = \beta_{resL} - \beta_{modL} \quad \beta_{devR} = \beta_{resR} - \beta_{modR} \quad (37)$$

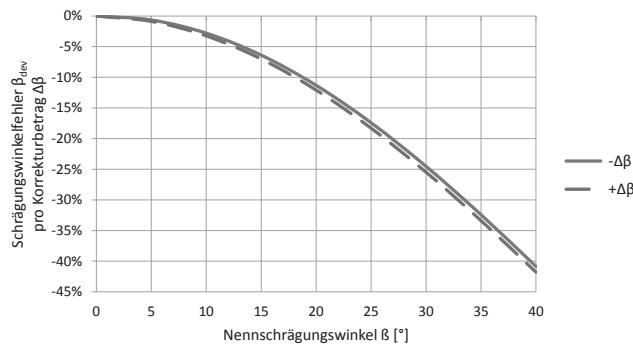


Bild 5: Modifikationsfehler  $\beta_{dev}$  am Teilkreis bei der Berechnung nach Gl. (37)

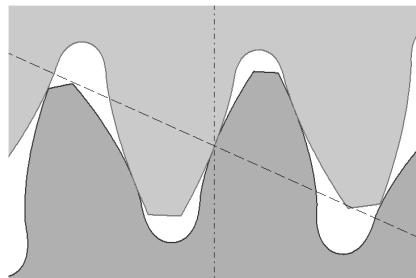
In Bild 5 ist die resultierende Abweichung  $\beta_{dev}$  bezogen auf die Modifikation  $\Delta\beta$  dargestellt. Die Modifikation beträgt  $0,5^\circ$ . Mit steigendem Modifikationsbetrag nimmt der Abstand zwischen den Kurven für positive und negative Modifikation zu. Unabhängig vom Modifikationsbetrag nimmt der Fehler prozentual zur Modifikation mit steigendem Schräglungswinkel deutlich zu. Für das Verhältnis des nach Gl. (33) falsch berechneten Stirneingriffswinkels zum nach Gl. (32) exakt bestimmten Sollwert liegt in der gleichen Größenordnung wie die in Bild 5 dargestellte Differenz der Schräglungswinkel.

## 5 Rechenbeispiele

Im Folgenden sind einige Berechnungsbeispiele für verschiedene Modifikationsvorgaben zusammengestellt. Es wurden jeweils Neigungswinkel am Rad 1 und die dafür erforderliche Modifikation der Grundschräglungswinkel vorgegeben und daraus die Herstelleinstellwinkel und die resultierenden Werte am Grundzylinder bestimmt. In einer detaillierten Zahnnkontaktanalyse mit dem Programm BevGear /1/ wurden die Klaflmaße (Ease-Off) an der modifizierten Verzahnung in der jeweils vorgegebenen Achslage bestimmt. Die Parameter der analysierten Radpaarung sind in Tabelle 1 aufgelistet. Zusätzlich zur Schräglungswinkelmodifikation wurde eine Breitenballigkeit von  $8 \mu\text{m}$  an Rad 2 vorgegeben. Auf Profilmodifikationen wurde verzichtet, da in den Klaflmaßdiagrammen die Auswirkungen der Stirneingriffswinkelabweichungen ohne Überlagerung von Rücknahmen sichtbar werden sollen.

Tabelle 1 Verzahnungsdaten des Rechenbeispiels

Parameter	Rad 1	Rad 2
Normalmodul [mm]	3,8	
Achsabstand [mm]	136,1	
Eingriffswinkel [ $^\circ$ ]	20	
Schräglungswinkel [ $^\circ$ ]	30	-30
Zähnezahl	25	37
Profilverschiebungsfaktor	0	0
Kopfkreisdurchmesser [mm]	120	172
Zahnbreite [mm]	32	30
Breitenballigkeit [ $\mu\text{m}$ ]	0	8



Die Analyse startet mit einer Achsneigung von  $0,5^\circ$  an Rad 1. In dieser Achslage ergibt sich mit der unmodifizierten Verzahnung eine deutliche Störung des Linienkontakte über der Zahnbreite und über dem Wälzweg, wie es in Bild 6 sichtbar wird. In Variante A der Modifikationen wurde diese Achsneigung von Rad 1 für beide Flanken unter Last vorausgesetzt. Die erforderlichen Schräglungswinkelmodifikationen entsprechen einer Konizität am modifi-

zierten Rad mit sehr geringer zusätzlicher Verschraubung. In Bild 7 sind die Grundkreisdaten und Klaffmaße dieser Variante A dargestellt. Die geringe zusätzliche Verschraubung ergibt sich aus dem Rechenansatz, der von der Berechnung der Grundschrägungswinkelmodifikation an der Nennverzahnung ausgeht. Durch die Anwendung der Modifikation ergibt sich eine geringe Abweichung der Grundschrägungswinkelmodifikation, die für die vorgegebene Achslage benötigt wird. Vernachlässigbar ist die geringe Änderung der Klaffung über dem Wälzweg. Die Stirneingriffswinkel der modifizierten Verzahnung weichen deutlich von den Nennwerten der unmodifizierten Verzahnung ab, was für einen optimalen Zahnkontakt über dem Wälzweg erforderlich ist. In der Variante B wurde nur eine für beide Kontaktflanken identische Achsschränkung vorgegeben, die an der modifizierten Verzahnung zu einer Verschraubung ohne Konizität führt.

Tabelle 2 Gelistete Verzahnungsdaten

Parameter	Einh.	Symbol
Achsneigungswinkel	°	$\delta$
Achsschränkungswinkel	°	$\vartheta$
Betriebseingriffswinkel	°	$\alpha_{wt}$
Erzeugungsschräg.-Winkel	°	$\beta_E$
Erzeugungsfußkegelwinkel	°	$\delta_{IE}$
Grundschräg.-Winkelmodif.	°	$\Delta\beta_b$
Grundkreisdurchmesser	mm	$d_b$
Grundschrägungswinkel	mm	$\beta_b$

Sym.	Links	Rechts
$\Delta$	0,5	0,5
$\vartheta$	0	0
$\alpha_{wt}$	22,87	
$\beta_E$	30	
$\delta_{IE}$	0	
$\Delta\beta_b$	0	0
$d_b$	101,128	101,128
$\beta_b$	28,0243	28,0243

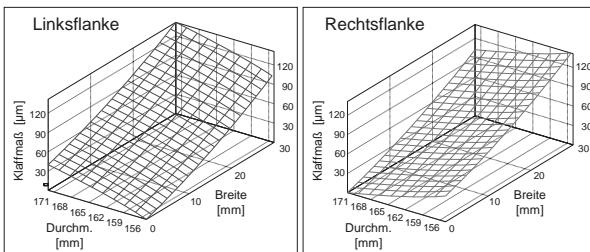


Bild 6: Grundkreisdaten der unmodifizierten Verzahnung und Klaffmaße bei Achsneigung

Sym.	Links	Rechts
$\delta$	0,5	0,5
$\vartheta$	0	0
$\alpha_{wt}$	22,86	
$\beta_E$	30,001	
$\delta_{IE}$	0,50135	
$\Delta\beta_b$	-0,19425	0,19425
$d_b$	100,947	101,312
$\beta_b$	27,8301	28,2186

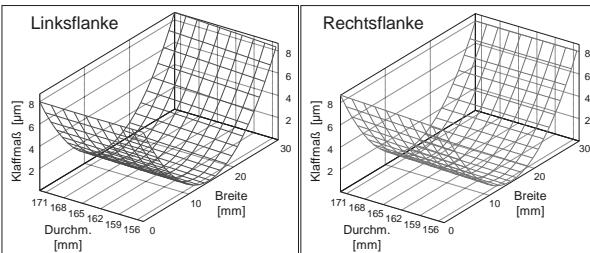


Bild 7: Klaffmaße und Grundkreisdaten der Modifikationsvariante A (nur Achsneigung)

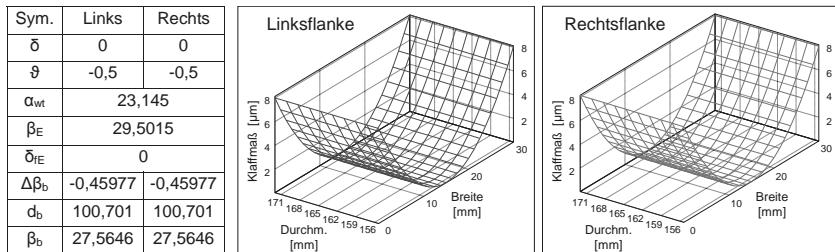


Bild 8: Klaffmaße und Grundkreisdaten der Modifikationsvariante B (nur Achsschränkung)

Die Ergebnisse in Bild 8 zeigen auch hier nur eine minimale Verkippling des Klaffmaßes über dem Wälzweg. Für tatsächlich zu erwartende Achslagen unter Last ist eine Kombination von Verschraubung und Konizität realistisch, wie sie in Variante C mit einer Achsneigung und einer Achsschränkung von  $0,5^\circ$  modelliert ist. Die Achsschränkung der Rechtsflanke ist im Vorzeichen entgegengesetzt zum Wert auf der Linksflanke, was typisch ist für den Einfluss der Wellenbiegung.

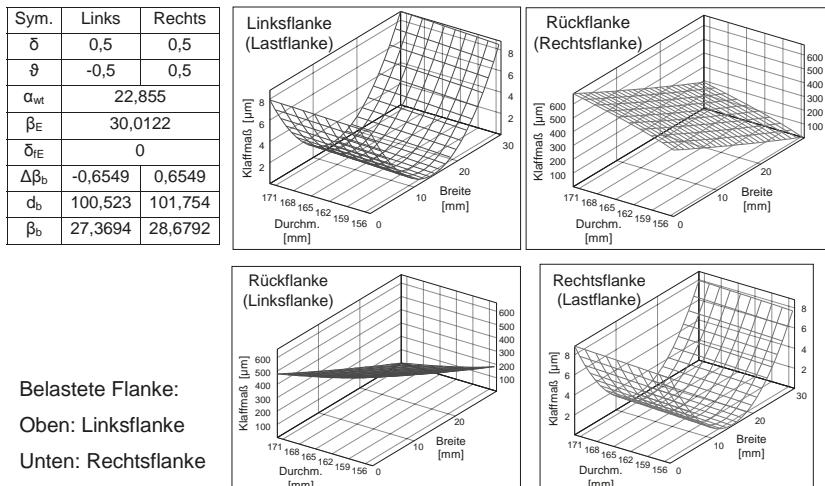


Bild 9: Klaffmaße und Grundkreisdaten der Modifikationsvariante C

Die Klaffmaße und die Modifikationsdaten sind in Bild 9 zusammengestellt. In der oberen Zeile sind die Klaffmaße für die Achslage bei Belastung der Linksflanke und in der unteren Zeile für die Last auf der Rechtsflanke dargestellt, jeweils für die Lastflanke und die lastfreie Rückflanke. Durch die gegenläufige Achsschränkung ergeben sich sehr große ungleichmäßige Klaffungen auf der lastfreien Rückflanke. Um ausreichend Flankenspiel zu erreichen, ist bei dieser Variante der Profilverschiebungsfaktor am Rad 1 auf -0,1 reduziert. In Variante D ist die Modifikation auf ein mittiges Tragbild auf der Linksflanke eingestellt, ohne Beachtung der Klaffung auf der Rechtsflanke unter der Annahme, dass die Rechtsflanke nie als Lastflanke zum Einsatz kommt. Es ist dieselbe Achslage wie für die Linksflanke von Variante C vorgegeben. In diesem Fall kann die für die Linksflanke vorgegebene Modifikation mit verschiedenen Kombinationen von Herstellschrägungswinkel und Herstellfußkegelwinkel erzeugt werden. In Variante D1 (Bild 10) wurde nur der Herstellschrägungswinkel angepasst, ohne zusätzliche Verschraubung und in Variante D2 (Bild 11) wurde nur der Fußkegelwinkel vorgegeben. Die jeweils für die Rückflanke (Rechtsflanke) in Klammern angegebenen Achsnieigungen und Achsschränkungen würden mit den hergestellten Modifikationen auf der Rechtsflanke zum Linienkontakt führen (nur eine Klaffung durch die Breitenballigkeit).

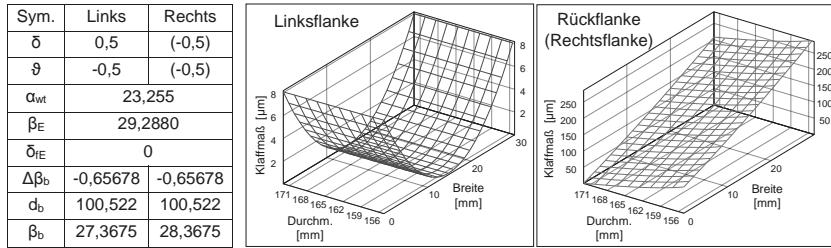


Bild 10: Klaffmaße und Grundkreisdaten der Modifikationsvariante D1

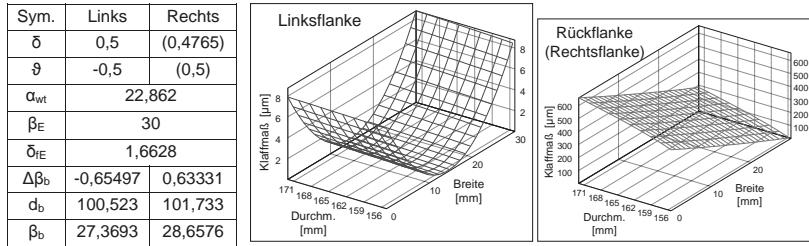


Bild 11: Klaffmaße und Grundkreisdaten der Modifikationsvariante D2

## 6 Zusammenfassung

Bei der Herstellung von Schrägungswinkelmodifikationen muss die Änderung des Herstellteilkreises bei der Verwendung eines vom Nennwert abweichenden Herstellschrägungswinkels beachtet werden. Für die Erzeugung der vorgegebenen Modifikationen in der Zwei-flankenbearbeitung ist die separate Berechnung der Grundkreisgeometrie für jede Flanke mit der Verwendung des modifizierten Flankenschrägungswinkels als Herstellschrägungswinkel fehlerhaft. Die für eine vorgegebene nicht-parallele Achslage erforderlichen Schrägungswinkelmodifikationen und die dafür erforderlichen Herstelleinstellwinkel lassen sich mit dem in diesem Artikel angegebenen Algorithmus berechnen. Außerdem sind die Gleichungen für die Berechnung der resultierenden Grundkreisgeometrie angegeben. Aus den Modifikationen ergeben sich auch Abweichungen der Stirneingriffswinkel der Flanken vom Nennwert. Diese Abweichungen sind aber erforderlich, um unter geneigter Achslage einen optimalen Kontakt über dem Wälzweg zu erreichen, wie es die Ergebnisse für Variante A bis D gezeigt haben.

## 7 Literatur

- /1/ BevGear PC-Programm zur Zahnkontaktanalyse evolventischer Verzahnungen in beliebiger Achslage; ZF Friedrichshafen AG, 2012

# Rückführung von Verzahnungsmessungen für Großgetriebe

**Ann-Kathrin Wiemann, Martin Stein, Karin Kniel, PTB, Braunschweig**

## Kurzfassung

Zahnräder für Großgetriebe sind mehr und mehr gefragt. Ein wichtiger Einsatzbereich sind Windenergieanlagen, deren Anzahl und Leistung, unterstützt durch die gesetzlich geregelte Energiewende, ebenfalls stetig steigen. Ob die Werkstücke innerhalb der geforderten Toleranzen liegen, kann jedoch nicht mit aller Gewissheit festgestellt werden, da eine metrologische Rückführungskette bislang nicht existierte. Als nationales Metrologieinstitut hat sich die Physikalisch-Technische Bundesanstalt dieser Herausforderung gestellt. Ziel war und ist es, zukünftig quantitative Aussagen über die Qualität von Messungen an Großverzahnungen treffen zu können. Hierfür wurde im Zuge eines Forschungsprojektes in Kooperation mit der Industrie ein Normal entwickelt. Für die Kalibrierung des Normals wurde das M3D3-Verfahren, ein neuartiges Kalibrierverfahren basierend auf dem Multilaterationsprinzip unter Einsatz mehrerer LaserTracer, verwendet. Anschließend wurde das Normal in einem nationalen Ringvergleich eingesetzt. Die Ergebnisse der zwölf Messungen verschiedener Partner (Getriebehersteller, Messgerätehersteller, Prüf- und Kalibrierlaboratorien sowie Forschungsinstitute) im Verhältnis zu den ermittelten Messunsicherheiten werden in diesem Beitrag ebenfalls diskutiert.

## 1. Einleitung

Das erneuerbare Energien-Gesetz (EEG17) fordert, bis 2035 mehr als 50 % des Bruttostromverbrauches aus erneuerbaren Energien (eE) zu generieren. Bereits 2016 entfielen auf die Windenergie mit 41 % der größte Anteil unten den eE (siehe Abbildung 1). Der Ausbau von Windenergieanlagen (WEA) steigt weiterhin. Dies bedeutet für die Industrie eine steigende Nachfrage an Großgetriebeteile, wie z.B. Verzahnungen. Diese können in der Industrie produziert und gemessen werden. Aufgrund der nicht erschlossenen Verfahrenskette zur Rückführung der Messungen auf SI-Einheiten ist jedoch keine quantitative Aussage über die Qualität der Messung und somit des gefertigten Getriebeteils zu treffen. Da jedoch ein Anteil von 15 % der Ausfälle von WEAs auf Getriebeschäden zurück zu führen ist [2], ist eine Rückführung der Messungen erforderlich.

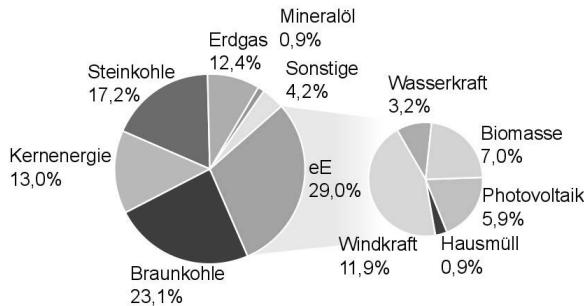


Abbildung 1 – Bruttostromerzeugung 2016 in Deutschland (nach [1])

Seit 2010 beschäftigt sich die PTB intensiv mit dem Thema der Rückführung für Großverzahnungen [3]. Hierbei entstand ein erstes nationales Normal für evolventische Großverzahnungen (siehe Abbildung 2). Es entspricht einem 60°-Segment eines Zahnrad-Vollkörpers mit einem Durchmesser von 1 m. Die Zahnbreite beträgt knapp 400 mm. Das Normal verkörpert drei Lücken verschiedener Zahnräder mit Schrägungswinkeln von 0°, 10° und 20° verschiedener Steigungsrichtungen, um den vielseitigen Bedarf der Industrie abzudecken. Die erzeugten Lücken verkörpern je eine Links- und Rechtsflanke.



Abbildung 2 – Segmentförmiges Großverzahnungsnormal der PTB

Weiterhin ist das Normal mit Sensoren zur Überwachung der Werkstücktemperatur ausgestattet, sowie mit Halbkugel-Füßen für eine statisch bestimmte Lagerung. Für die gut reproduzierbare Werkstücklagenbestimmung dienen zwei hochgenaue Prüfbunde mit Formabweichungen unter 1 µm. Das Normal konnte aufgrund seiner besonderen Bauweise als Segment auf einem rückgeführten Präzisions-Koordinatenmessgerät mit etwa 1 m<sup>3</sup> Messvolumen kalibriert und innerhalb eines nationalen Ringvergleichs eingesetzt werden [4].

Das Projekt „Erhöhung der Verfügbarkeit und Qualitätsoptimierung von Triebstrangkomponenten und Verzahnungen für Windenergieanlagen“ (EVeQT) wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert und lief von September 2012 bis Januar 2017. Seitens der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) lag der Aufgabenbereich in der Konstruktion und Kalibrierung eines Normals, der Entwicklung einer messtechnischen Infrastruktur für zukünftige Akkreditierungen durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) und der Betreuung und Auswertung eines Ringvergleiches.

## 2. Evolventisches Großverzahnungsringnormal

Das neue Normal wurde auf Basis einer Umfrage bei verschiedenen Industriepartnern konzipiert. Die Umfrage beinhaltete die Abfrage nach den Anforderungen an ein großes, evolventisches Verzahnungsringnormal als auch die Möglichkeiten bei der Fertigung.

Resultierend verkörpert das ringförmige Normal erstmals sowohl Innen- als auch Außenverzahnungen in großen Dimensionen. Ebenso wie bei dem vorangegangenen großen Evolventennormal sind verschiedene Schrägungswinkel und Steigungsrichtungen vertreten. Durch die größere Vielfalt dieses Normals, symbolisiert durch die Lücken der Innenverzahnung, wurden verschiedene Kombinationen an Steigungsrichtung und Schrägungswinkel (außen:  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  r,  $20^\circ$  l; innen:  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  l,  $20^\circ$  r) abgebildet [5]. Die drei Lücken ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$  und  $20^\circ$ ) können jeweils als Gruppe von Verzahnungen angesehen werden. Über den kompletten Umfang des Rings wurden drei dieser Gruppen je Innen- und Außenverzahnung realisiert.



Abbildung 3 – Normal auf Auflagevorrichtung im Messvolumen

Die zu bestimmenden Verzahnungsparameter einer Verzahnungsgruppe belaufen sich auf 36 Parameter (6 Zahnflanken mit je 3 Profil- und 3 Flankenlinienparametern). Für die Kalibrierung wurde je eine Gruppe exemplarisch für die Innen- und eine für die Außenverzahnung ausgewählt. Die Gesamtheit der zu kalibrierenden Parameter beläuft sich somit auf 72 Werte.

### Entwicklung einer Auflagevorrichtung

Insbesondere bei Großbauteilen spielt die Durchbiegung durch Eigengewicht eine wesentliche Rolle beim Messen. Um die Reproduzierbarkeit und Reduzierung dieser Effekte bei dem Normal zu gewährleisten, wurde eine spezielle 6-Punkt-Auflagevorrichtung konzipiert. Diese besitzt sechs Winkelemente, die mit Querstrebten sternförmig und miteinander verbunden sind (siehe Abbildung 4). Die Winkelemente bestehen im Wesentlichen aus definiert ausgerichteten Winkelverkörperungen, die bis auf bei einem starren Winkelement alle je mit einem Kreuzfedergelenk und einer Membranfeder ausgestattet sind. Auf diese Weise werden Zwangskräfte und Verspannungen ausgeglichen. Das starre Winkelement sorgt für die notwendige Stabilität. An das Normal werden sechs entsprechende Winkelemente angeschraubt, so dass das Normal momentensteif und durchbiegungsarm gelagert werden kann.

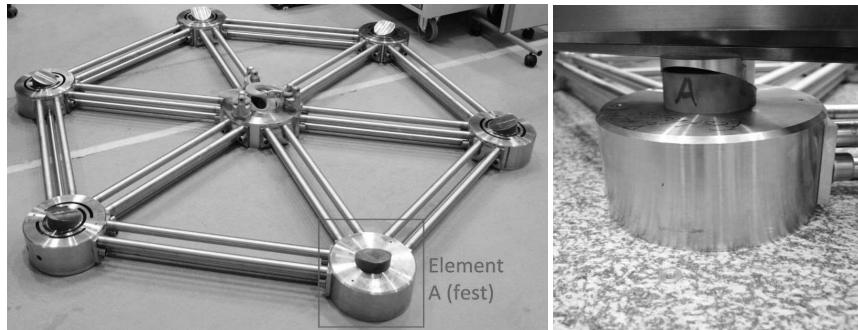


Abbildung 4 – Gesamte Auflagevorrichtung (links) und Detailaufnahme eines Fußes (rechts)

Um das Normal auch in gestürzter Lage messen zu können, sind Gewindebohrungen für die Winkelemente beidseitig an den Stirnflächen des Normals angebracht. Zwei seitliche Bohrungen mit Messingbuchsen sollen das Durchstecken einer Welle ermöglichen, um die das Normal mithilfe einer entsprechenden Wendevorrichtung gedreht werden kann.

## Temperatur erfassung des Normals

Temperaturinhomogenitäten beeinflussen insbesondere die Messung großer Messobjekte, da wesentlich längere Temperierungszeiten eingehalten werden müssen, für die nicht immer die Zeit zur Verfügung steht. Häufig fehlt auch das Wissen über die Dauer solcher Klimatisierungsprozesse. Für eine eindeutige Temperaturüberwachung und für die Feststellung typisch notwendiger Temperierungszeiten wurde das Normal ebenso mit Bohrungen für Temperatursensoren ausgestattet. In diesen Bohrungen können Sensoren zur Überwachung der Materialtemperatur im Innern angebracht werden. Dies ist von besonderem Interesse für die absolute innere Temperatur, als auch für eine potentielle inhomogene Temperaturverteilung. Insgesamt sind zwölf Sensoren vorgesehen. Auf zwei Höhen befinden sich, gleichmäßig über den Umfang verteilt, sechs Anschlüsse, welche mit Sensoren an ein Überwachungssystem angeschlossen werden (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5 – Erfassungssystem (links) und Temperatursensoren im Normal (rechts)

### 3. Kalibrierungsprozess mit M3D3-Verfahren

Die Kalibrierung erfolgte auf einem industriellen Groß-KMG unter Einsatz des M3D3-Verfahrens (siehe Abbildung 6) [6]. Das zweistufige Verfahren verbindet die klassische, taktile Messung eines KMG mit rückgeführten laserinterferometrischen Messungen. Mit den sogenannten LaserTracern [7] werden hochpräzise Distanzmessungen ausgeführt. Für die Positionsbestimmung eines 3D-Punktes mit dem Multilaterationsverfahren ist der parallele Einsatz von mindestens vier LaserTracern notwendig.

Im ersten Schritt wird das Werkstück taktil gemessen. Anschließend wird das Tastelement am KMG durch einen Retroreflektor ersetzt. Für eine uneingeschränkte Sichtverbindung zwischen den LaserTracern und dem Reflektor wird das Normal aus dem Messvolumen entfernt. Die zuvor taktil erfassten und gespeicherten Ist-Punkte der Prüfbunde und Verzahnungen werden als Grundlage der interferometrischen Erfassung verwendet.



**Abbildung 6 – Zweistufiges M3D3-Verfahren (taktile (links) und interferometrisch (rechts))**

Dieser zweistufige Prozess aus taktiler und interferometrisch Messung ermöglicht den Vergleich zwischen den Einzelpunkten erfasst vom KMG und denen der LaserTracer. Daraus kann eine Korrektur für jeden KMG-Punkt erfolgen. Durch den Einfluss der Korrekturen und die Möglichkeit einer Messunsicherheitsbestimmung basierend auf den rückgeführten Messungen der LaserTracer erfolgt eine quantitative Aussage der Qualität des Messprozesses. Die korrigierten Punkte wiederum werden in die Auswertesoftware des KMGs eingefügt um die Verzahnungsparameter zu ermitteln.

Die taktile Messung erfolgte bei dieser Kalibrierung mit einer speziellen Messstrategie, bei der eine erneute Werkstücklagenbestimmung vor jeder zu messenden Lücke durchgeführt wurde. Das aufwändige Vorgehen hat sich bewährt, da auf diese Weise Drifteffekte bedingt durch die hohen Messzeiten kompensiert werden können.

**Die Kalibrierwerte und die Messunsicherheiten für die Verzahnungsparameter der rechts- oder linkssteigenden (r/l) Rechts- und Linksflanken (R/L) der Profil- (siehe Tabelle 1) und Flankenlinienmessungen (siehe**

Tabelle 2) ergaben sich unter Berücksichtigung der Streuung der taktilen (Wiederholungs-) Messungen und der optischen Messungen bzw. den resultierenden Korrekturwerten.

**Tabelle 1 - Tabelle der Messunsicherheiten für die Parameter der Profilmessung**

	$U(k=2)$ für $f_{H\alpha}$ in $\mu\text{m}$	$U(k=2)$ für $f_{l\alpha}$ in $\mu\text{m}$	$U(k=2)$ für $F_\alpha$ in $\mu\text{m}$
0 ° L/R			
10° l/r L/R	2,4	0,8	2,5
20° l/r L/R			

**Tabelle 2 - Tabelle der Messunsicherheiten für die Parameter der Flankenlinienmessung**

	$U(k=2)$ für $f_{H\beta}$ in $\mu\text{m}$	$U(k=2)$ für $f_\beta$ in $\mu\text{m}$	$U(k=2)$ für $F_\beta$ in $\mu\text{m}$
0° L/R	2,6	1,2	2,9
10° l/r L/R	2,8	1,2	3,0
20° l/r L/R	3,2	1,2	3,4

Für die Profilmessungen sind die Messunsicherheiten unabhängig vom Schräglungswinkel der Verzahnung. Bei der Flankenlinienmessung, insbesondere bei langen Messlinien (in diesem Fall knapp 400 mm), steigt die Messunsicherheit, umso größer der Schräglungswinkel der Verzahnung ist.

#### 4. Nationaler Ringvergleich für das neue Großverzahnungsnormal

Anschließend an die Kalibrierung wurde ein nationaler Ringvergleich von der PTB organisiert. Insgesamt wurden Messungen von sieben Teilnehmern (Messgerätehersteller, Getriebehersteller, Dienstleister und Forschungs-Institute) auf zwölf Messgeräten durchgeführt. Aufgrund der Größe des Normals waren bei diesem Ringvergleich nicht nur die Messungen, sondern auch Handhabung und Logistik eine besondere Herausforderung.

Der Aufbau des Normals inklusive der Auflagevorrichtung und die Messstrategie sind in einer eigens erstellten technischen Dokumentation vorgeschrieben. Das Temperaturerfassungssystem wurde mitgeliefert und sollte zu Zwecken der Messprozessüberwachung vor und während der Messungen angeschlossen sein. Die Ergebnisse der Verzahnungsmessungen und Temperaturüberwachung wurden anschließend von der PTB ausgewertet und verglichen.

Dies Auswertung der Verzahnungsmesswerte erfolgte mit Bezug auf die PTB-Kalibrierwerte und die dazugehörigen Messunsicherheiten. In den folgenden Diagrammen sind Differenzen zwischen den Teilnehmerergebnissen und Ergebnissen der PTB aufgetragen. Die Diagramme sind aufgeteilt nach Außen- und Innenverzahnungsgruppe sowie nach Profilmessungen und Flankenlinienmessungen. Dort sind die Verzahnungsparameter für die einzelnen Flanken der unterschiedlichen Zahnlücken aufgelistet (unterschieden wird der Schräglungswinkel 0°, 10° und 20°, die Steigungsrichtung links-/rechtssteigend (l/r) und die Links- und Rechtsflanke (L/R)). Die Verzahnungsparameter  $f_{H\alpha}$ ,  $f_\alpha$  und  $F_\alpha$  sind beschriftet mit  $f_{H\alpha}$  für die Winkel-,  $f_\alpha$  für die Form- und  $F_\alpha$  für die Gesamtabweichung der Profile (siehe Abbildung 7 und Abbildung 9). Analog gelten die Beschriftungen mit  $f_{H\beta}$ ,  $f_\beta$  und  $F_\beta$  für  $f_{H\beta}$ ,  $f_\beta$  und  $F_\beta$  der Flankenlinie (siehe Abbildung 8 und Abbildung 10).

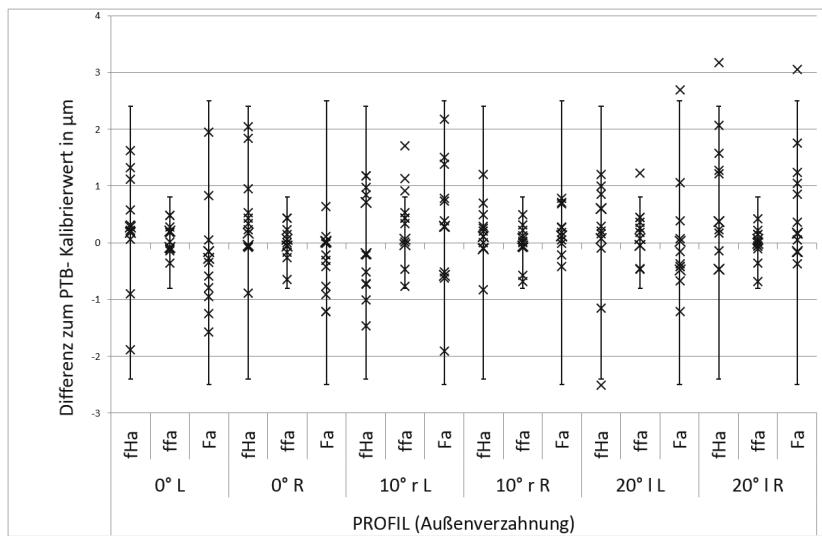


Abbildung 7 – Ergebnisse des Ringvergleichs für die Profilmessungen der Außenverzahnungsgruppe

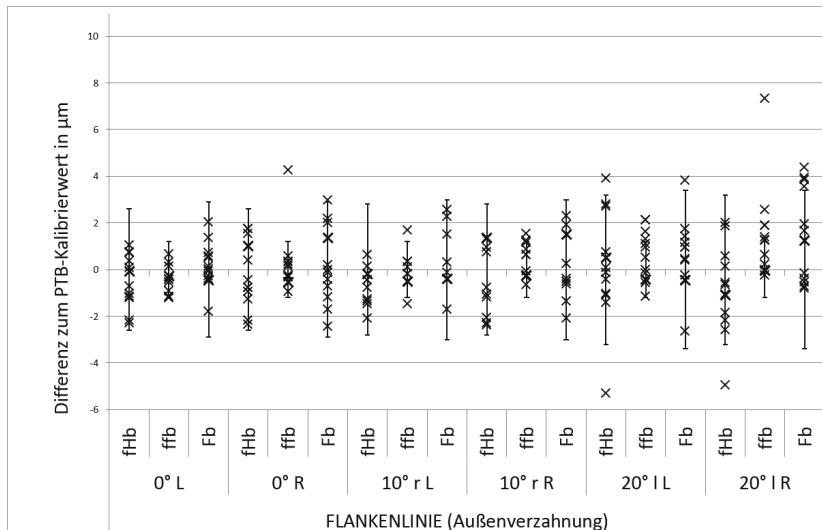


Abbildung 8 - Ergebnisse des Ringvergleichs für die Flankenlinienmessungen der Außenverzahnungsgruppe

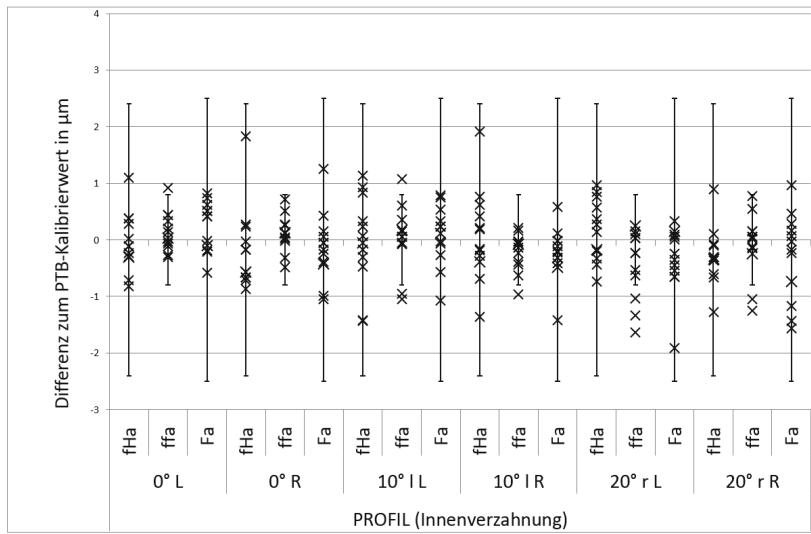


Abbildung 9 - Ergebnisse des Ringvergleichs für die Profilmessungen der Innenverzahnungsgruppe

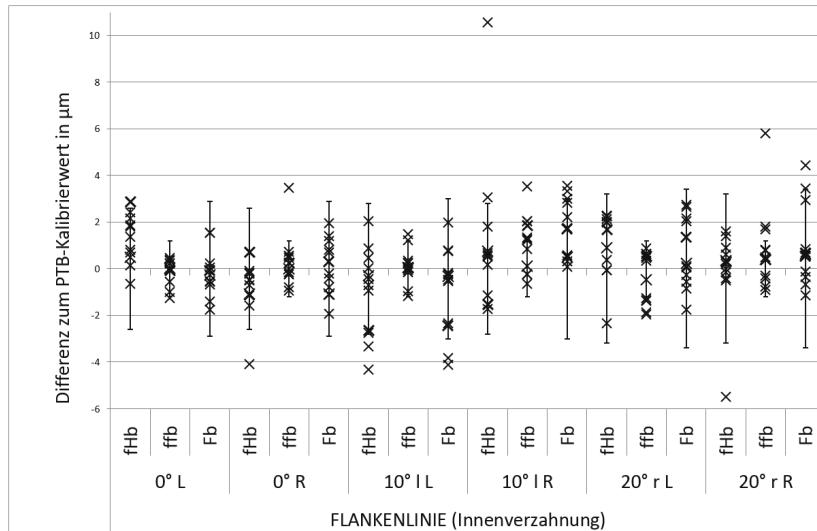
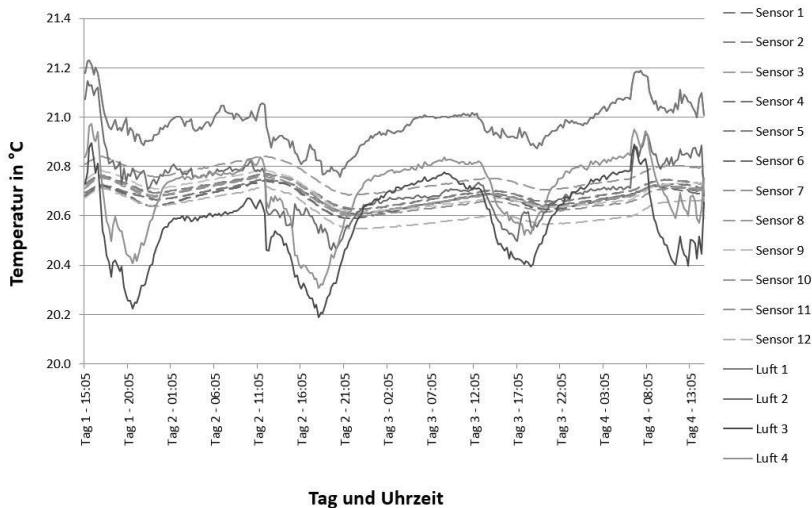


Abbildung 10 - Ergebnisse des Ringvergleichs für die Flankenlinienmessungen der Innenverzahnungsgruppe

Die in den Diagrammen dargestellten Ergebnisse sind die Differenzen der Parameter der Teilnehmer zu den Kalibrierwerten der PTB. Die Parameter der jeweiligen Profil- oder Flankenlinienmessung einer Außen- oder Innenverzahnungsgruppe sind auf der Abszisse aufgelistet. Die dazugehörigen, ermittelten erweiterten Messunsicherheiten sind als Fehlerbalken oberhalb und unterhalb des jeweiligen Kalibrierwertes eingetragen.

Die Ergebnisse der Teilnehmer liegen größtenteils innerhalb der Konfidenzintervalle und streuen ohne sichtbare Systematik um den Kalibrierwert. Einzelne Ausreißer sind vorhanden, sind jedoch zum Teil mit abweichenden Bedingungen zur Messstrategie der taktilen Kalibrierungsmessung zu begründen. Derartige Abweichungen waren beispielsweise die Messung im Scanningmodus anstelle des Einzelpunktmodus, die Wahl einer anderen Lagerung als der Auflagevorrichtung und die Nichteinhaltung der Umgebungsbedingungen. Bei den aufgezeichneten Temperaturwerten während der Messungen sind keine Besonderheiten aufgetreten (siehe Abbildung 11; gestrichelte Linien entsprechen den Sensoren zur Aufnahme der Materialtemperatur im Innern des Werkstücks). Das Temperaturmonitoring konnte jedoch nicht bei jedem Teilnehmer ausgeführt werden.



**Abbildung 11 – Beispiel des Temperaturmonitorings bei einer Ringvergleichsmessung**

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Während des Projektes wurde ein werkstückähnliches Verzahnungsringnormal mit Innen- und Außenverzahnungen unter Berücksichtigung des Bedarfs der Industrie konstruiert und gefertigt. Anhand des Kalibrierprozesses mit dem M3D3-Verfahren sind unter Verwendung der speziell gefertigten Auflagevorrichtung und einer Überwachung der Werkstücktemperatur Kalibrierwerte und dazugehörige Messunsicherheiten für die Verzahnungsparameter bestimmt worden. Zum einen ergab der erfolgreich durchgeführte Ringvergleich größtenteils Streuungen der Messwerte zu den einzelnen Verzahnungsparametern in einem Bereich von  $\pm 4 \mu\text{m}$  um den Kalibrierwert. Auf der anderen Seite wurden aber auch die Herausforderungen der Handhabung eines groß-dimensionierten Bauteils aufgezeigt. Nach Abschluss des Projektes steht somit ein kalibriertes Großverzahnungsnormal zur Verfügung, um die Lücke in der Rückführungskette zu schließen und Akkreditierungen für Kalibrierdienstleistungen an großen Zahnrädern gemeinsam mit der DAkkS durchzuführen. Ein weiteres Projekt dieses Themenfeldes wurde ebenfalls vom BMWi gefördert und ermöglicht den derzeitigen Aufbau eines neuen Kompetenzzentrums „WIND“ an der PTB. Hier können zukünftig Messungen an großen Zahnrädern auf einem rückgeführten KMG in der PTB erfolgen und das Kalibrierangebot der PTB erweitert werden. Ein Schwerpunkt wird zukünftig sein, die Industrie bei der Bewältigung der metrologischen Herausforderungen, die die Messung großer Bauteile mit sich bringen, zu unterstützen.

Hierzu sind unter anderem Untersuchungen für die Weiterentwicklung einer Software zur Ermittlung der Messunsicherheiten am KMG für Messungen von Großbauteilen geplant. Dabei sind die charakteristischen Eigenschaften des neu angeschafften Groß-KMG, sowie spezielle Eigenschaften großer Bauteile zu untersuchen. Weiterhin soll das M3D3-Verfahren in den Aufbau implementiert werden.

## Danksagung

Die Forschungsergebnisse resultieren aus dem Projekt EVeQT gefördert durch das BMWi. Weiterer Dank gilt unseren PTB-Kolleginnen und Kollegen Vaclava Dunovska, Matthias Franke, Frank Härtig, Konrad Hierse, Marlen Krause, Achim Wedmann und Klaus Wendt für ihre Unterstützung.

## Referenzen

- [1] BMWi – Erneuerbare Energien auf einen Blick - <http://bit.ly/21hUbf8>, Stand Aug. 2016
- [2] Durstewitz, M., Hahn, B., Rohrig, K.: Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm (WMEP) zum Breitentest "250 MW-Wind", Kassel, 2007
- [3] Härtig, F., Kniel, K., Wedmann, A.: Rückführung von Großverzahnungen, VDI-Berichte: 2148, 4. Fachtagung Verzahnungsmesstechnik (2011) S. 225 – 233
- [4] Kniel, K., Härtig, F.: Nationale und internationale Vergleichsmessungen in der Verzahnung, VDI-Berichte: 2236, 5. Fachtagung Verzahnungsmesstechnik (2014) S. 175– 186
- [5] Stein, M.: Entwicklung eines neuen Großverzahnungsringnormals mit  $d = 2\text{ m}$ , <http://bit.ly/2jnGa0k>, Stand Jan. 2017
- [6] Wendt, K., Franke, M., Härtig, F.: Mobile multi-lateration measuring system for high accurate and traceable 3D measurements of large objects, Proceedings of the 10th ISMQC (2010) S. 224-227
- [7] Kniel, K.: Ein Beitrag zur Entwicklung eines laserinterferometrischen Trackingsystems für die Genauigkeitssteigerung in der Koordinatenmesstechnik, TU Ilmenau Diss. 2007
- [8] Stein, M.: Groß-Koordinatenmessgerät für Kompetenzzentrum WIND (CCW), <http://bit.ly/2szPNRG>, Stand Juni 2017
- [9] Wäldele, F., Schwenke, H.: Automatische Bestimmung der Messunsicherheiten auf KMGs auf dem Weg in die industrielle Praxis, Technisches Messen (2002) S. 550-557