



Übersicht Verzahnungs- und Getriebeprüfung





INHALTSVERZEICHNIS

1 Allgemeines	1
2 Prüfverfahren	1
2.1 Geometrische Einflankenwälzprüfung	1
2.2 Geometrische Zweiflankenwälzprüfung	3
2.3 Geräuschprüfung	5
3 Sonderfunktionen	6
3.1 Lehrzahnradkompensation	11
3.2 Zahnmarkierung	11
3.2.1 Laser-optische Zahnmarkierung	11
3.2.2 Zahnmarkierung mit Farbe	11
3.3 Lagersitzkompensation	11
3.4 Zahnspielmessung	12
3.5 Absolute geometrische Zweiflankenwälzprüfung	12
3.6 Bestimmung des diametralen Zweikugelmaßes	12
4 Prüfeinrichtungen	13
4.1 Beispiel: Prüfeinrichtungen mit manueller Beladung und Entnahme	13
4.2 Beispiel: Zweiflankenprüfgerät für Stirnräder	14
4.3 Beispiel: Zweiflankenwälzprüfgerät für Wellen und Stirnräder	15
4.4 Beispiel: Flexible Ein- und Zweiflankenwälzprüfung für Schneckenradsätze	16
4.5 Beispiel: Flexible Ein- und Zweiflankenwälzprüfung an schweren Schneckenradsätzen	17
4.6 Vollautomatische Prüfsysteme mit hohem Durchsatz	18
5 Übersicht Spannmittel	20
5.1 Stehender Dorn	20
5.2 Stehender Dorn mit Kugelbüchse	20
5.3 Drehender Hydrodehnspanndorn	20
5.4 Drehender mechanisch expandierender Dorn	20
5.5 Angetriebene Zentrierspitzen	21
5.6 Stehende Zentrierspitzen	21
5.7 Zentrierspitzen und expandierender Dorn	21
5.8 Anmerkungen zur Reproduzierbarkeit	22

© 2019 Inproq GM GmbH. Alle Rechte vorbehalten.

Microsoft und Windows 7 sind eingetragene Warenzeichen der Microsoft Corporation.

Die Weitergabe sowie die Vervielfältigung dieses Dokuments oder dessen Inhalte sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz.

Microsoft and Windows 7 are registered trademarks of Microsoft Corporation.

The copying, distribution and utilisation of this document as well as its contents to others without express authorisation is prohibited. Offenders will be held liable for the payment of damages.

1 Allgemeines

Die Herstellung einer Verzahnung ist ein komplexer Vorgang, der hohe Anforderungen gleichermaßen an Konstruktion und Auslegung, Material, Fertigungseinrichtungen und Prozesse stellt. Durch Optimierungsmaßnahmen an den einzelnen Positionen kann über die Zeit eine konstant hohe Qualität hinsichtlich Funktion und Lebensdauer erreicht und gehalten werden.

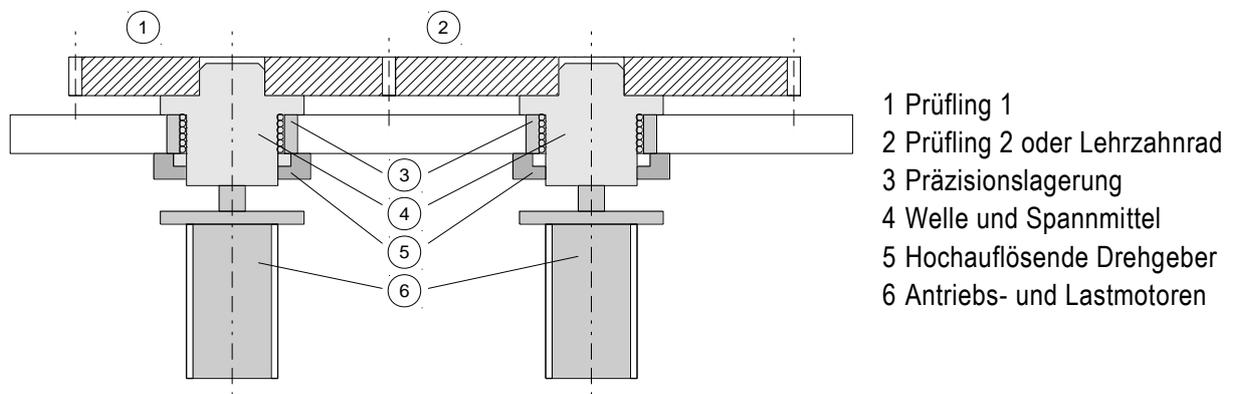
Inproq stellt Systeme und Geräte her, die Abweichungen vom Idealzustand einer Verzahnung sichtbar und dokumentierbar machen und so den Fertigungsprozess nachhaltig absichert. Je nach Aufgabenstellung finden sich die Geräte zur Stichprobenkontrolle in Labor und Produktionsumgebung oder auch am Ende der Fertigungslinie für den vollautomatischen Nachweis der vorgegebenen Qualitätsrichtlinien.

Welche Verfahren oder welche Kombination unterschiedlicher Prüfmethode zum Einsatz kommen, wird im Einzelfall und in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabenstellung festgelegt. Grundsätzlich lassen sich alle Methoden miteinander kombinieren.

2 Prüfverfahren

2.1 Geometrische Einflankenwälzprüfung

Die Einflankenwälzprüfung wird mit zwei Prüflingen (einem Radsatz) oder mit einem Prüfling gegen ein Lehrzahnrad durchgeführt. Die Verzahnung kämmt dabei bei festem Achsabstand. Dies entspricht dem Sollachsabstand bei der Prüfung mit zwei Werkkrädern. Zur Bewertung beider Zahnflanken kann entweder die Drehrichtung der Antriebsachse oder das Lastmoment umgeschaltet werden (Zugrichtung und Schubrichtung). Prüfgeschwindigkeit und das Lastmoment können variiert werden, um so die zur Fehlererkennung günstigsten Betriebsbedingungen herzustellen.



Aus den Daten der beiden Drehgeber berechnet das Auswertesystem neben vielen weiteren Informationen die in der DIN 3960 definierten Kenngrößen zur Einflankenwälzprüfung.

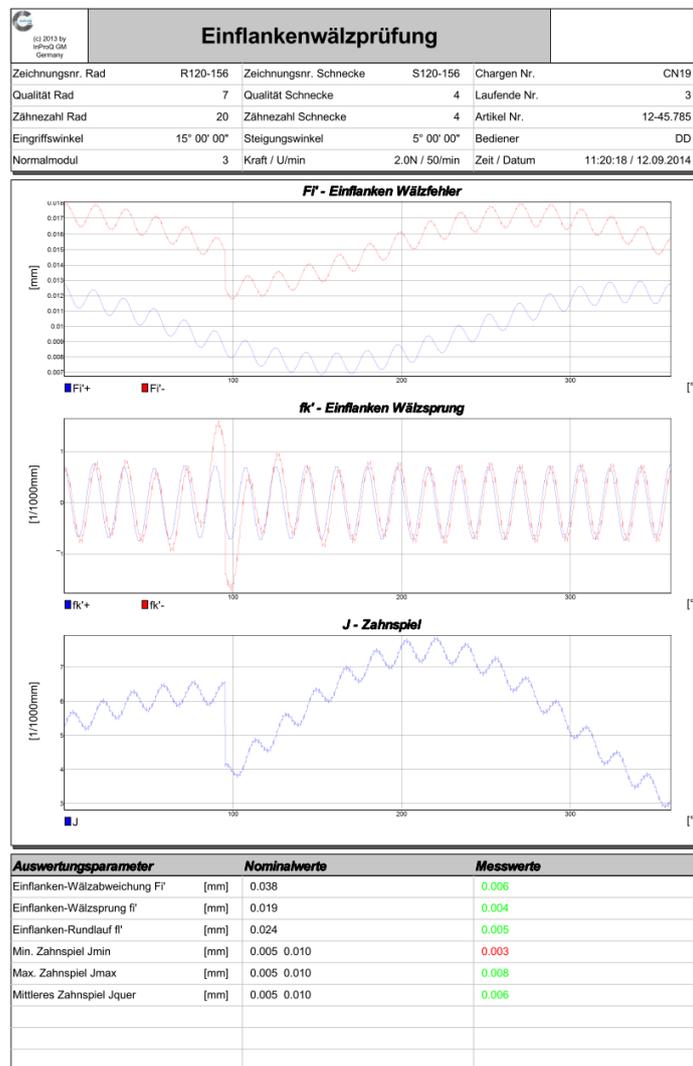
Größe	Benennung
F_i'	Summenfehler der Einflankenwälzabweichung
f_i'	Einflankenwälzsprung
f_l'	Langwelliger Anteil der Einflankenwälzabweichung
f_k'	Kurzwelliger Anteil der Einflankenwälzabweichung
Zahnspiel	Verdrehung Prüfling bei stehendem Gegenrad

Zusätzlich werden die spektralen Komponenten der Einflankenwölzabweichung berechnet. Hieraus lassen sich direkt Hinweise auf mögliche Fehlerquellen bei der Herstellung der Verzahnung entnehmen. Derartige Fehler sind beispielsweise Rundlauffehler, Ovalität und Dreiecksform, Flanken-Geometriefehler und Oberflächenfehler.

Besonderes Interesse verdient das Verfahren der Einflankenwölzprüfung dadurch, dass es sehr genaue Ergebnisse bis in den μm -Bereich hinein liefern kann und der Abrollvorgang dem späteren Einsatz im Getriebe sehr nahe kommt.

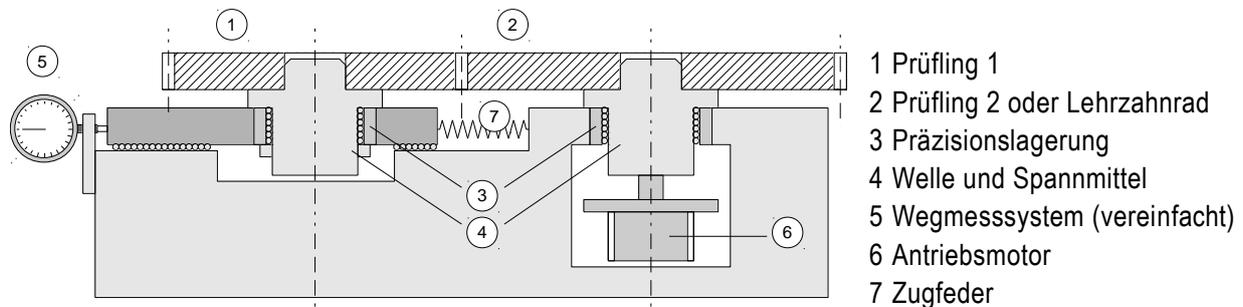
Soll das Verhalten der Verzahnung unter Betriebsbedingungen bewertet werden, lassen sich Prüfdrehzahlen bis zu 6000 Umdr./min und Drehmomente bis 100 Nm realisieren. Bei hohen Drehzahlen und/oder hohen Drehmomenten ist eine geeignete Schmierung der Werkstücke vorzusehen, da es sonst zur Zerstörung der Flankenoberfläche kommen kann. Aufgrund der dynamischen Vorgänge beim Abrollen sollte bei hohen Drehzahlen besser von Drehfehlerdiagnose und nicht mehr von Einflankenwölzprüfung gesprochen werden.

Beispielprotokoll



2.2 Geometrische Zweiflankenwälzprüfung

Bei der Zweiflankenwälzprüfung werden die Zähne von Rad und Gegenrad (bzw. Lehrzahnrad) über eine definierte, kleine Kraft gegeneinander gedrückt. Der Prüfling wird mit geringer Drehzahl angetrieben. Ein Wegmesssystem zeichnet die beim Abwälzen entstehenden Schwankungen des Abstands beider Rotationsachsen auf.



Aus den Daten der Wegmessung berechnet das Auswertesystem neben vielen weiteren Informationen die in der DIN 3960 definierten Kenngrößen zur Zweiflankenwälzprüfung. Zusätzlich könnte eine spektrale Zerlegung der Zweiflanken-Wälzabweichung berechnet werden. Hieraus ließen sich direkt Hinweise auf mögliche Fehlerquellen bei der Herstellung der Verzahnung entnehmen.

Die berechneten Kenndaten nach DIN 3960 sind:

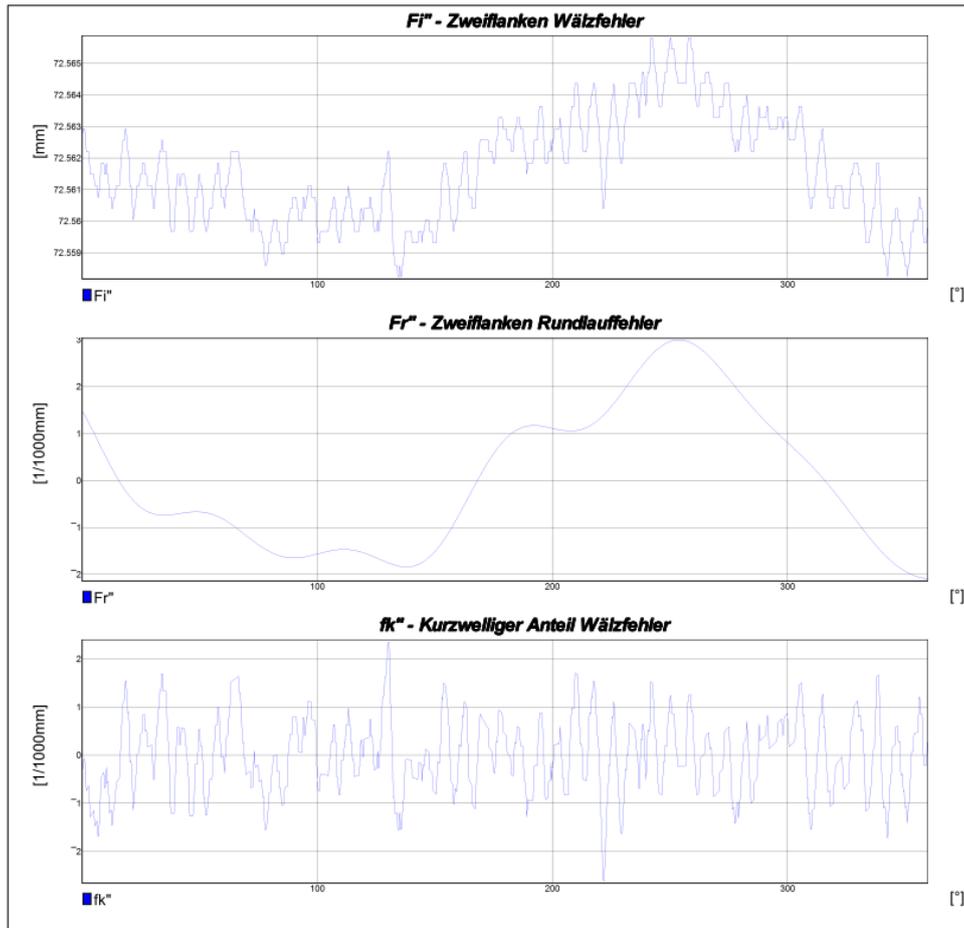
Größe	Benennung
Aa''	gemittelter Achsabstand
Fi''	Wälzabweichung
Fr''	Wälz-Rundlaufabweichung
fi''	Wälzsprung
Mdk	Äquivalent des diametralen Zweikugelmaßes

Typische Drehzahlen sind 10 Umdr./min bis zu 100 Umdr./min. Darüber hinaus sind trägheitsbedingt keine sicheren Ergebnisse für die zahnbezogenen Kenngrößen mehr möglich.



Beispielprotokoll

 <small>(c) 2013 by InProQ GM Germany</small>		Zweiflankenwälzprüfung			
Zeichnungsnr. Rad	19132	Zeichnungsnr. Rad	19132L	Chargen Nr.	CN19
Qualität Rad	7	Qualität Rad	3	Laufende Nr.	3
Zähnezahl Rad	45	Zähnezahl Rad	56	Artikel Nr.	12-45.785
Eingriffswinkel	15° 00' 00"	Steigungswinkel	29° 30' 00"	Bediener	DD
Normalmodul	1.25	Kraft / U/min	5.0N / 12/min	Zeit / Datum	11:20:18 / 12.09.2014



Auswertungsparameter		Nominalwerte	Messwerte
Zweiflanken-Wälzabweichung F''	[mm]	0.029	0.008
Zweiflanken-Wälz sprung fi''	[mm]	0.012	0.004
Zweiflanken-Rundlauf Fr''	[mm]	0.020	0.004
Mittlerer Achsabstand Aquer	[mm]	72.500 72.600	72.562
Mittleres Zweikugelmass MdKquer	[mm]	66.600 66.680	66.652

Druckdatum 29.10.2014 08:20:04 Software-Release RTsc: 1.0.0



2.3 Geräuschprüfung

Alternativ oder auch zusätzlich zu den geometrischen Verfahren lässt sich die Verzahnung während des Abrollens hinsichtlich deren Geräuschentwicklung bewerten. Im weitaus größten Teil der Anwendungen greift man dabei auf die Auswertung eines Körperschallsignals zurück. Der Körperschall erlaubt auch unter widrigen Umständen (bei starken Umgebungsgeräuschen) eine sichere Identifikation von Verzahnungsfehlern.

Die Geräuschprüfung kann sowohl im Zweiflanken-, als auch im Einflankenkontakt durchgeführt werden und liefert dabei ähnliche Ergebnisse. Sie erlaubt Aussagen zur Rundlauf- und Verzahnungsfehlern und ist eine wertvolle Ergänzung zu den geometrischen Verfahren. Ist eine Verzahnung im fertig montierten Zustand zu prüfen (z.B. komplettes Getriebe), ist die Geräuschprüfung oft die einzige Methode, Fehlern systematisch auf die Spur zu kommen.

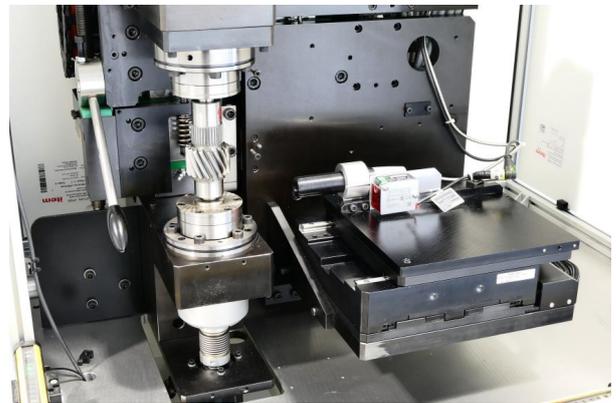
Im Gegensatz zu den geometrischen Prüfverfahren müssen die Prüfsysteme „trainiert“ werden. Das Training erfolgt über „Gutmuster“, d.h. über Komponenten, die akustisch nicht auffällig sind. Bauteile, die diese Grenzmuster überschreiten, werden automatisch als nicht in Ordnung klassifiziert. Geeignete Analyseverfahren (z.B. Ordnungsanalyse) erlauben häufig eine Zuordnung zu den beteiligten Bauelementen.

2.4 Berührungslose Geometrieprüfung

Seit kurzer Zeit sind Prüfanlagen verfügbar, die anstelle eines Meisterrades ein optisches Messsystem nutzen, die Geometrie des Prüflings zu erfassen.



Die dabei gewonnenen Messergebnisse sind weitgehend vergleichbar mit denen taktiler Prüfeinrichtungen. Anders als bei den bisherigen Prüfmethoden lassen sich vergleichsweise schnell alle Zähne eines Prüflings messen und zur Bewertung heranziehen. Sollen nur wenige Prüfmerkmale (wie z.B. Teilungsfehler oder Rundlauf) bewertet werden, lassen sich Prüfzeiten deutlich unter einer Minute erreichen. Somit ist diese Prüfmethode auch für den Einsatz zur 100%-Kontrolle in Fertigungsumgebung nutzbar.



Größe	Benennung
Fr	Rundlaufabweichung
F α	Profil-Gesamtabweichung
ff α	Profil-Formabweichung
fH α	Profil-Winkelabweichung
F β	Flankenlinien-Gesamtabweichung
ff β	Flankenlinien-Formabweichung
fH β	Flankenlinien-Winkelabweichung
f p	Teilungs-Einzelabweichung
f u	Teilungssprung
F p	Teilungs-Gesamtabweichung



Beispielprotokoll - Kenngrößen

Da ein vollständiges Protokoll aller Prüfergebnisse (aller Zähne) mehrere Seiten umfassen, sind hier nur exemplarisch einige wenige Tabellen und Diagramme gezeigt.

Protokoll							
Messung	SW9	Teilbezeichnung	Ritzelwelle	Normalmodul	1.5	Datum/Zeit	27.09.2019/11:06:58
		Teilenummer	09.120	Zähnezahl	15	Bediener	DD
		Zeichnungsnummer	09.120.003	Eingriffswinkel [°]	20	Maschinen-ID	ZM300-0
		Zeichnungsrevision	01	Schrägungswinkel [°]	~12	Messprogramm	RTW_15
				Profilversch.faktor	0.646	Anlass	

Drehzahl [1/min]	30	Profil scannen [Δmm]	0.9	Flanke scannen [Δmm]	0.4
X-Pos. [mm]	5.296	Y-Pos. [mm]	9.421	Z-Pos. [mm]	80.000
Auswerterradius [mm]	11.000 13.400	Auswertebreite [mm]			
Mittelwertfilter	5.0	Steigungsfiter	3.5		

Gesamt [μm]	Fr	10.0	6.3
Fα	6.0	3.9	
ffα	4.5	2.1	
FHα	4.0	-2.8	
Fβ	6.0	5.4	
ffβ	4.5	5.4	
FHβ	4.0	0.5	
fp	5.0	1.3	
fu	6.0	2.0	
Fp	14.0	4.1	

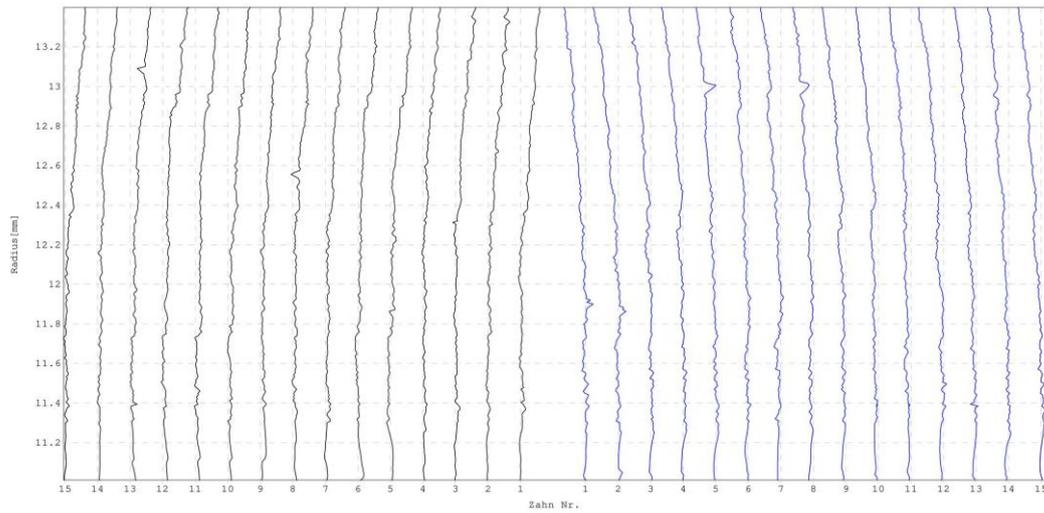
Zähnesae [μm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Fα	3.4	3.9	3.0	3.1	3.1	2.8	2.8	2.6	2.9	2.7	3.0	3.3	2.9	2.8	3.3	3.0
ffα	2.0	2.1	1.9	1.7	2.0	1.7	1.6	2.0	1.7	1.6	1.6	1.7	1.5	1.3	1.3	1.7
FHα	-2.5	-2.8	-2.4	-2.3	-2.5	-2.0	-2.0	-2.0	-2.2	-2.3	-2.2	-2.4	-2.2	-2.3	-2.6	-2.3
Fβ	0.9	0.8	0.8	0.8	5.4	0.9	0.9	1.0	1.0	2.6	1.2	1.2	0.8	0.8	0.8	1.3
ffβ	0.9	0.7	0.8	0.8	5.4	0.8	1.0	1.0	2.6	1.2	1.2	0.8	0.8	0.7	1.3	
FHβ	0.2	-0.2	0.1	-0.1	0.2	0.3	-0.2	-0.3	-0.3	0.1	0.2	0.1	0.2	-0.1	0.5	0.1

Linke Flanke [μm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Fα	2.6	2.9	2.8	2.2	3.1	2.8	2.5	2.6	2.4	2.7	3.0	3.3	2.5	2.4	2.7	2.7
ffα	1.5	1.4	1.9	1.4	1.7	1.7	1.3	2.0	1.5	1.3	1.6	1.7	1.5	1.3	1.3	1.5
FHα	-2.2	-2.5	-2.1	-1.6	-2.5	-2.0	-2.0	-2.0	-1.9	-2.3	-2.2	-2.3	-1.9	-1.9	-2.5	-2.1
Fβ	0.6	0.8	0.6	0.7	0.6	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.8	0.8	0.6	0.8	0.6	0.7
ffβ	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.8	0.6	0.8	0.6	0.7
FHβ	0.2	-0.2	0.1	0.1	-0.1	0.3	-0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

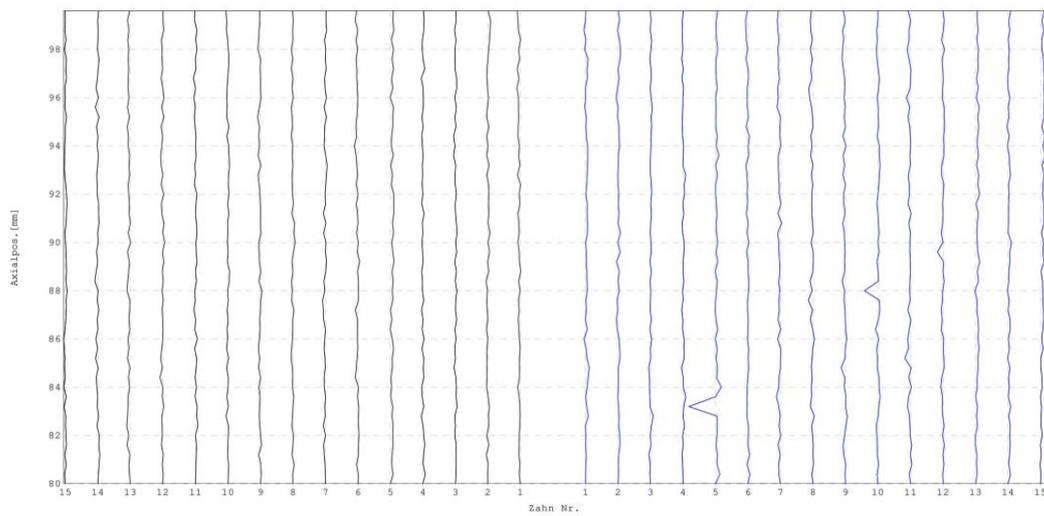
Rechte Flanke [μm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Fα	3.4	3.9	3.0	3.1	2.7	2.5	2.8	2.5	2.9	2.6	2.5	3.3	2.9	2.8	3.3	2.9
ffα	2.0	2.1	1.6	1.7	2.0	1.4	1.6	1.7	1.7	1.6	1.4	1.6	1.2	1.2	1.1	1.6
FHα	-2.5	-2.8	-2.4	-2.3	-2.2	-1.8	-1.9	-1.8	-2.2	-2.0	-1.9	-2.4	-2.2	-2.3	-2.6	-2.2
Fβ	0.9	0.7	0.8	0.8	5.4	0.7	0.9	1.0	1.0	2.6	1.2	1.2	0.8	0.8	0.8	1.3
ffβ	0.9	0.7	0.8	0.8	5.4	0.6	1.0	1.0	2.6	1.2	1.2	0.8	0.7	0.7	1.3	
FHβ	-0.1	0.0	0.1	-0.1	0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	0.1	-0.1	0.1	0.2	-0.1	0.5	0.0

Beispielprotokoll Profil- und Flankenlinien

Profilabweichung

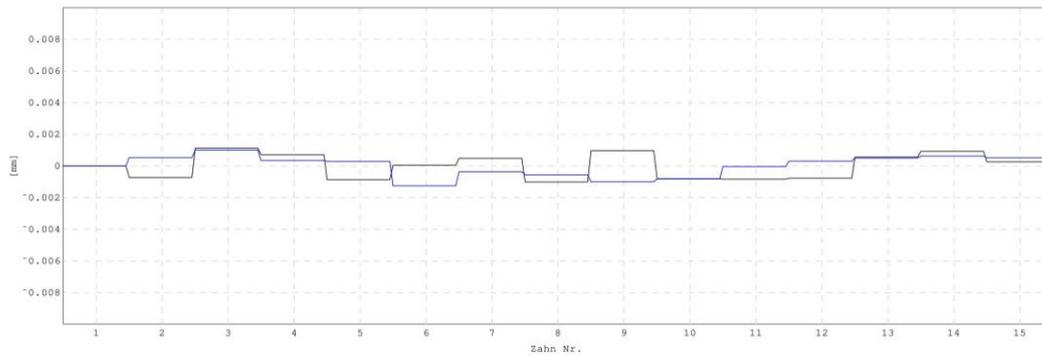


Flankenabweichung

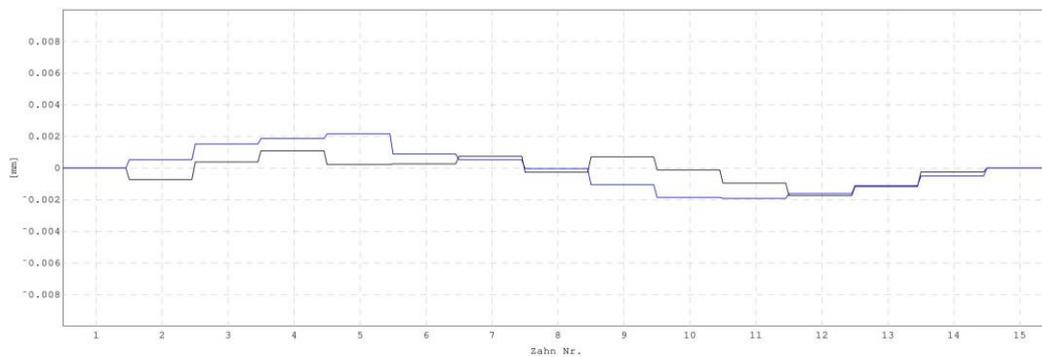


Beispielprotokoll - Teilung

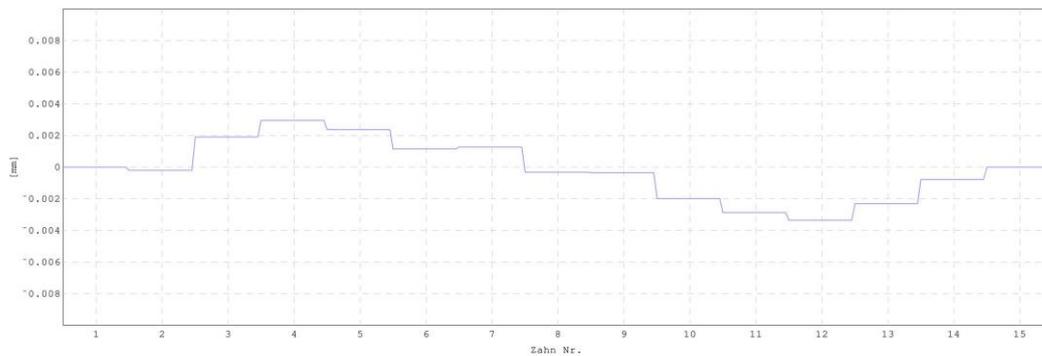
Teilungssprung



Teilungsabweichung

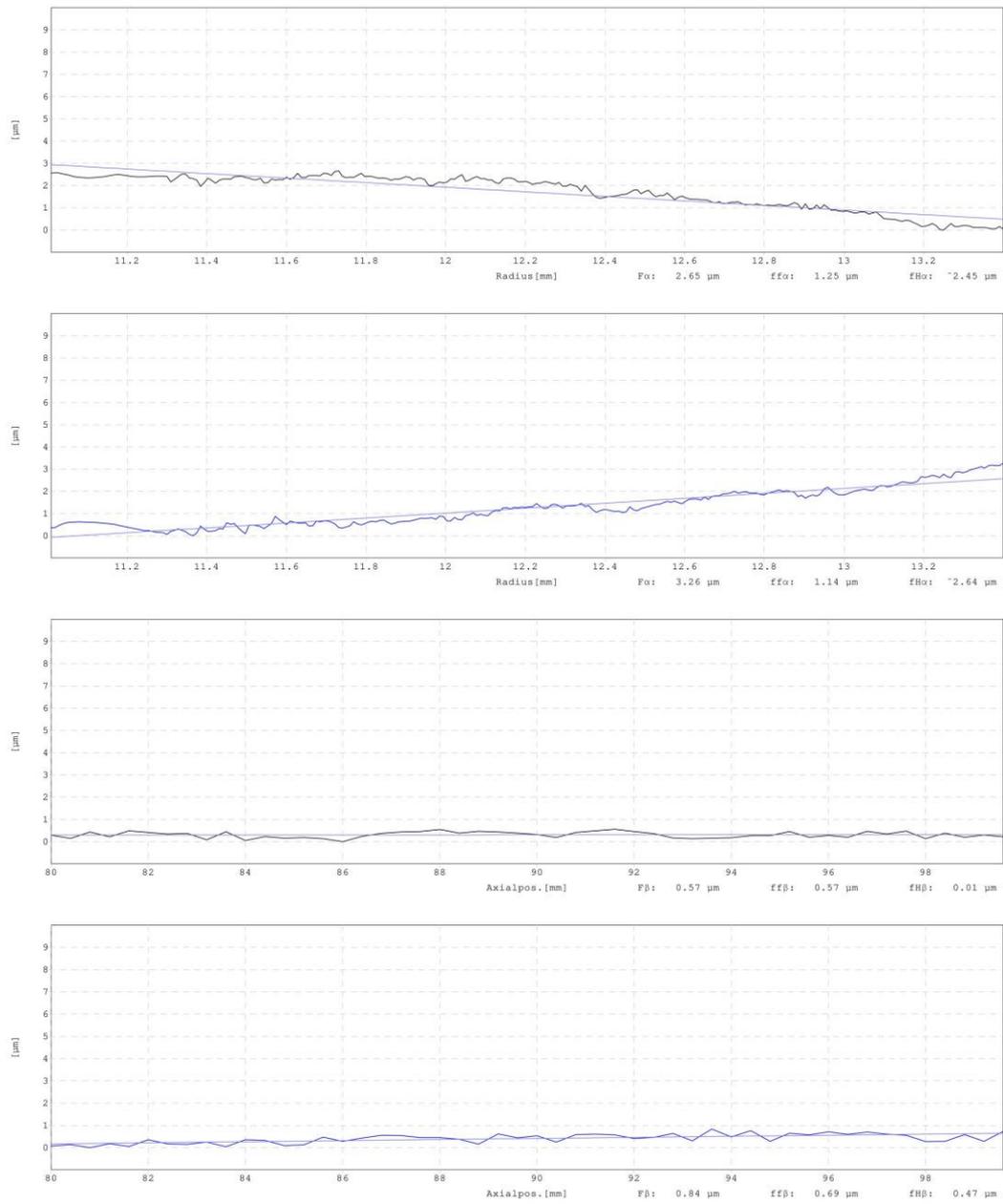


Rundlaufabweichung



Beispielprotokoll - Formabweichung

Formabweichung Einzelzahn #15



3 Sonderfunktionen

3.1 Lehrzahnradkompensation

Diese Methode findet vornehmlich bei der Zweiflankenwälzprüfung Einsatz. Je nach Aufgabenstellung sollte das Lehrzahnrad bzw. das Gegenrad zwischen 2 und 4 Qualitätsstufen besser sein, als der zu untersuchende Prüfling. Häufig ergibt sich bei der Prüfung dennoch eine messtechnisch relevante Abweichung aufgrund der Lehrzahnradfehler. Am deutlichsten nimmt der Rundlauffehler des Lehrzahnrades Einfluss, der je nach Lage beider Räder zueinander addiert oder subtrahiert werden muss. Die sich daraus ergebende Messunsicherheit kann in vielen Fällen nicht akzeptiert werden.

Das mit der Lehrzahnradkompensation ausgerüstete Messsystem erkennt die Lage des Lehrzahnrades und kompensiert das Ergebnis der Messung, d.h. es entfernt den Rundlauf des Lehrzahnrades rechnerisch.

Der Rundlauf des Lehrzahnrades wird in einem speziellen Messzyklus identifiziert.

3.2 Zahnmarkierung

Häufige Ursache für NIO-Bewertung einer Verzahnung sind Beschädigungen der Zahnflanken, vor allem im Bereich des Kopfkreises. Liegen sonst keine Abweichungen der Verzahnungsgeometrie vor, kann das Zahnrad durch Nacharbeiten noch zum IO-Teil werden. Diese Nacharbeit kann mit maschineller Unterstützung oder auch manuell erfolgen. Da die Beschädigungen oft mit dem Auge nur sehr schwer zu erkennen sind, bietet die Zahnmarkierung hierbei Unterstützung an:

3.2.1 Laser-optische Zahnmarkierung

Diese Methode kommt häufig bei manuellen Prüfplätzen zum Einsatz. Hat das Prüfsystem eine Beschädigung erkannt, wird das Bauteil vor der Entnahme aus der Prüfstation an die Stelle gefahren, wo sich die Beschädigung befindet. Ein Laser beleuchtet daraufhin die Winkelposition der Beschädigung.

3.2.2 Zahnmarkierung mit Farbe

Läuft die Prüfung vollautomatisch ab, so muss die Winkelposition der Beschädigung auch nach Entnahme aus der Prüfstation erkennbar bleiben. Wie bei der laseroptischen Zahnmarkierung wird das Werkstück nach Abschluss der Prüfung an die Position der Beschädigung gedreht. Über eine Düse wird auf dem Werkstück ein kleiner Farbpunkt aufgebracht. Die hierbei verwendete Farbe ist hochviskos und trocknet nicht. Der mit der Nacharbeit betraute Werker kann das Bauteil vom Band entnehmen und den Farbpunkt nach Identifizierung bzw. Beseitigung der Beschädigung einfach mit einem Tuch abwischen.

3.3 Lagersitzkompensation

Dies ist ein Verfahren, welches bei der Prüfung von verzahnten Wellen zum Einsatz kommt. Aus handhabungstechnischen Gründen heraus werden Wellen häufig zur Prüfung zwischen Spitzen aufgenommen. Da die bei der geometrischen Prüfung (z.B. Zweiflankenwälzabweichung) gewonnenen Daten dann auch auf die Wellenzentren beziehen, sind diese Ergebnisse nur bedingt auf den Einsatz im zusammengebauten Zustand übertragbar. Besser wäre es, die Prüfergebnisse auf die Lagersitze beziehen zu können.

Um dies zu erreichen, werden die Lagersitze synchron zur Messung mittels präzisen Wegmesssystemen vermessen. Aus den gewonnenen Daten wird eine „virtuelle Rotationsachse“ berechnet und die Ergebnisse aus der geometrischen Prüfung auf diese Achse rückgerechnet - so, als würde das Werkstück an den Lagersitzen aufgenommen werden.

3.4 Zahnspielmessung

Die Zahnspiel- oder auch Verdrehflankenmessung ist eine Prüfmethode, um festzustellen, wie viel tangentiales Spiel eine Verzahnung im eingebauten Zustand hat. Dieses Spiel soll einerseits möglichst klein sein, z.B. um die Geräuschentwicklung beim Betrieb zu minimieren, andererseits darf es nicht zu klein sein oder gar gegen Null gehen, da sonst das Getriebe klemmen und recht bald geschädigt würde.

Die Ermittlung des Zahnspiels erfolgt auf Basis einer Einflankenwälzprüfung. Prüfling und Gegenrad, werden gegeneinander abgerollt. Dabei wird der Prüfling angetrieben, das Gegenrad wird gebremst. In dieser Konstellation wird die Wälzabweichung für eine Prüflingsumdrehung aufgezeichnet. Danach wird das ursprüngliche Bremsmoment umgeschaltet, so dass das Gegenrad den Prüfling treibt. Durch die Umschaltung des Bremsmomentes berühren sich beide Rädern jetzt an den gegenüberliegenden Zahnflanken. Die Wälzabweichung wird erneut über eine Prüflingsumdrehung hinweg aufgezeichnet.

Nach Abschluss der Messung kann aus den Wälzabweichungen der beiden Prüflingsumdrehungen drehwinkelbezogen eine Differenz gebildet werden. Diese Differenz, aufgetragen über eine Prüflingsumdrehung, entspricht dem Zahnspiel an den entsprechenden Prüflingswinkeln.

3.5 Absolute geometrische Zweiflankenwälzprüfung

Häufig werden bei der Zweiflankenwälzprüfung vordergründig der Summenfehler F_i'' , der Rundlauf Fr'' und der Einzelfehler fi'' zur Bewertung herangezogen. Diese Werte bestimmen sich aus dem Verhalten des Achsabstandes im Verlauf einer Prüflingsrotation.

In einigen Fällen interessiert auch die Bewertung des mittleren Achsabstandes A'' selbst. In diesem Fall ist es erforderlich, die Messung kalibriert durchzuführen, d.h. das Messsystem zeichnet den Verlauf des Achsabstandes in absoluten Größen auf. Auf diese Weise lässt sich der Teilkreisdurchmesser des Prüflings überwachen.

Die Kalibrierung des Achsabstandes erfolgt entweder durch Messung eines bekannten Referenzwerkstücks mit der Geometrie eines Prüflings oder durch Anfahren eines fest eingebauten Referenzanschlages. Häufig wird ein genau vermessener Prüfling als Referenzteil eingesetzt. Die Verwendung eines Referenzwerkstückes ist insofern von Vorteil, da der Durchmesser des Lehrzahnrades bei dieser Kalibrieremethode keine Relevanz hat. Ein Nacharbeiten oder Wechseln des Lehrzahnrades führt somit nicht zu Parameteränderungen an der Prüfanlage.

3.6 Bestimmung des diametralen Zweikugelmaßes

Das Zweikugelmaß hat als Qualitätskriterium insofern eine große Bedeutung, da dies mit geringem Aufwand und hoher Präzision direkt in der Produktion abgeprüft werden kann. Das diametrale Zweikugelmaß korreliert mit dem Teilkreisdurchmesser des Prüflings, der wiederum das spätere Abwälzverhalten und das Zahnspiel maßgeblich beeinflusst.

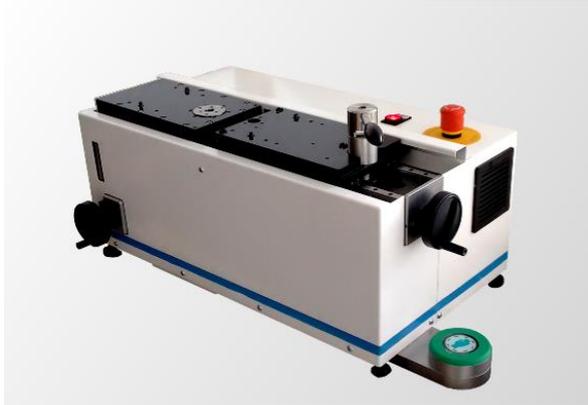
Auf Basis des gemessenen mittleren Achsabstandes lässt sich durch ein iteratives Verfahren ein Wert berechnen, der dem diametralen Zweikugelmaß entspricht. Die Grenzwerte aus den Prüfvorschriften für das diametrale Zweikugelmaß lassen sich direkt in die Prüfsoftware übernehmen.

Soll ein Prüfgerät das diametrale Zweikugelmaß bestimmen können, ist eine Kalibrierung erforderlich (s.o.).

4 Prüfeinrichtungen

4.1 Beispiel: Prüfeinrichtungen mit manueller Beladung und Entnahme

Diese Tester sind geeignet, Bauteile im Durchmesserbereich von 10 mm bis 250 mm mit Hilfe der Zweiflankenwälzprüfung zu prüfen.



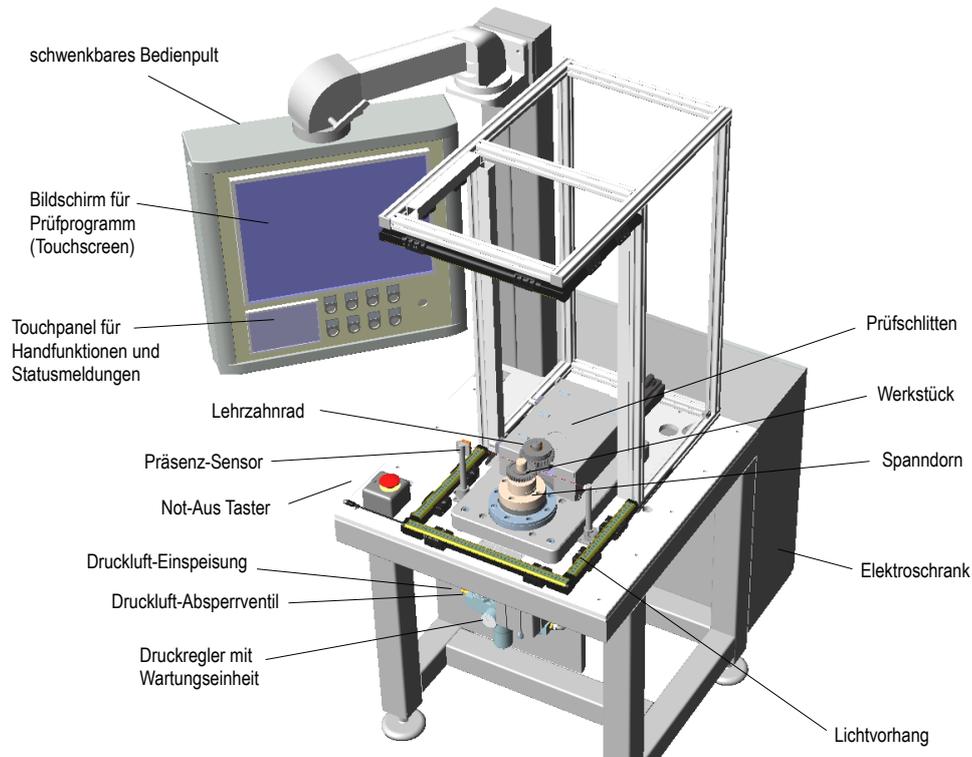
Abhängig von der Teilegeometrie können die Prüflinge entweder zwischen Spitzen oder auf (expandierenden) Dornen aufgenommen werden. Das Prüfgerät ist mit standardisierten Flanschen ausgerüstet, um einer große Zahl unterschiedlicher Spannmittel unterstützen zu können.

Während der Messung wird das Prüfteil bzw. das Lehrzahnrad durch einen geregelten Motor angetrieben. Die Antriebsachse und die Aufnahmespitzen sind in Präzisionslagern geführt. Ein Inkrementalgeber ermittelt Position und Drehzahl der Achse bzw. des Prüflings.

Mit Hilfe des Prüfschlittens wird Rad und Gegenrad in Eingriff gebracht. Während der Zweiflankenwälzprüfung wird der Schlitten mit einer geringen Kraft in Richtung der stehenden Achse gedrückt, so dass sich Rad und Gegenrad kontinuierlich an zwei Zahnflanken berühren (Zahnspiel=0). Die bei der Drehung entstehenden Schwankungen des Achsenabstands werden über einen hochauflösenden Weggeber aufgezeichnet.

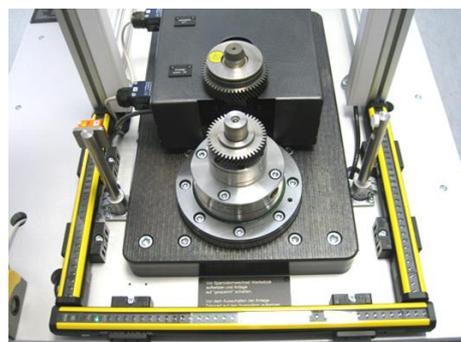
4.2 Beispiel: Zweiflankenprüfgerät für Stirnräder

Ein stabiles Rahmengestell bildet die Basis der Prüfeinrichtung. Alle Präzisionsbauteile, im Wesentlichen sind dies der Schlitten und die Spindel, sind als komplette Einheit auf dem Tisch des Gestells fixiert. Ein Lichtvorhang sichert die bewegten Komponenten während der Prüfung gegen unbeabsichtigtes Berühren.



Der Prüfslitten besitzt einen elektrischen Servoantrieb, um so die im Prüfablauf geforderten Bewegungen automatisch durchführen zu können. Über ein, an diesem Schlitten angebrachtes Messsystem wird die Achsabstandsänderung zwischen beiden Werkstückachsen während der Zweiflankenwälzprüfung erfasst.

Ein elektrischer Servomotor treibt den Spanndorn und damit auch das gespannte Werkstück während der Prüfung an. Positionen und Drehzahlen der Achsen lassen sich am Bildschirm verfolgen.



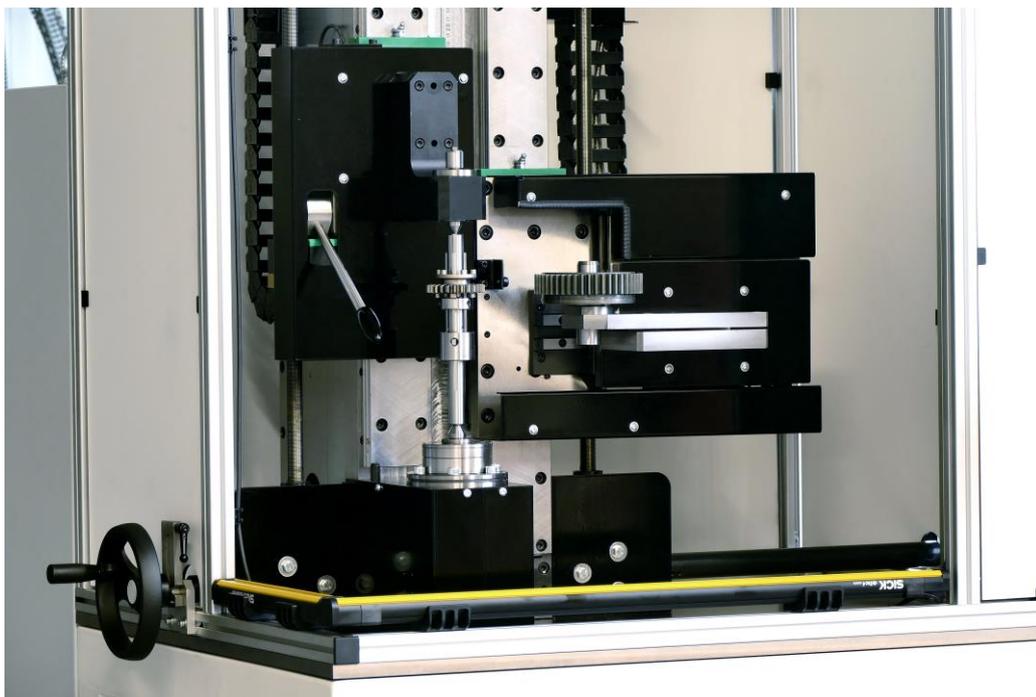
4.3 Beispiel: Zweiflankenwälzprüfgerät für Wellen und Stirnräder



Das Maschinengestell ist als stabile Konstruktion aus Stahl-Hohlprofilen aufgebaut. Über vier nivellierbare Maschinenfüße kann der sichere Stand auch bei unebenem Untergrund gewährleistet werden. Auf dem Rahmengestell ist die Prüfzelle schwingungsarm gelagert. An der rechten Seite des Gestells ist das schwenkbare Tragarmsystem mit dem Bedienpult angebracht. Die Prüfzelle ist auf die Bedienseite allseitig gegen Eingriff geschützt. Der offene Bereich an der Vorderseite der Prüfzelle ist durch einen Lichtvorhang abgesichert.

Handräder links und rechts der Prüfzelle gestatten, Gegenhalter und Prüfschlitten in der Höhe zu verstellen.

Der Drehtisch ist so ausgeführt, dass unterschiedliche Spanneinrichtungen aufgenommen werden können. Zur Prüfung von Wellen wird eine Zentrierspitze eingesetzt, die zusammen mit dem Gegenhalter die präzise Aufnahme in den Zentrierbohrungen gewährleistet. Der Gegenhalter wird über einen Hebel manuell zugestellt. Zur Prüfung von Stirnrädern kann ein Spanndorn eingesetzt werden.

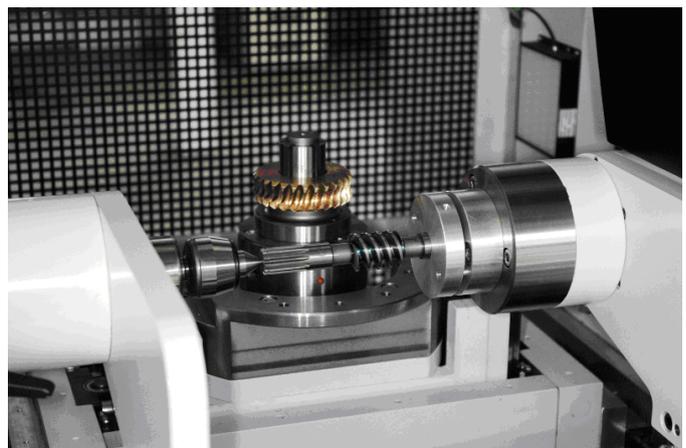


4.4 Beispiel: Flexible Ein- und Zweiflankenwälzprüfung für Schneckenradsätze



Der variabler Prüfstand für den Laborbereich ist in der Lage, Schneckenwellen und -räder, Stirnräder und in einer Ausbaustufe auch Kegelräder prüfen zu können. Das Gerät kann die Werkstücke mittels Zweiflankenwälzprüfung, Einflankenwälzprüfung und hinsichtlich der Geräusentwicklung prüfen.

Zur Prüfung können Drehzahlen bis 6000 U/min und Drehmomente bis 10 Nm vorgewählt werden.



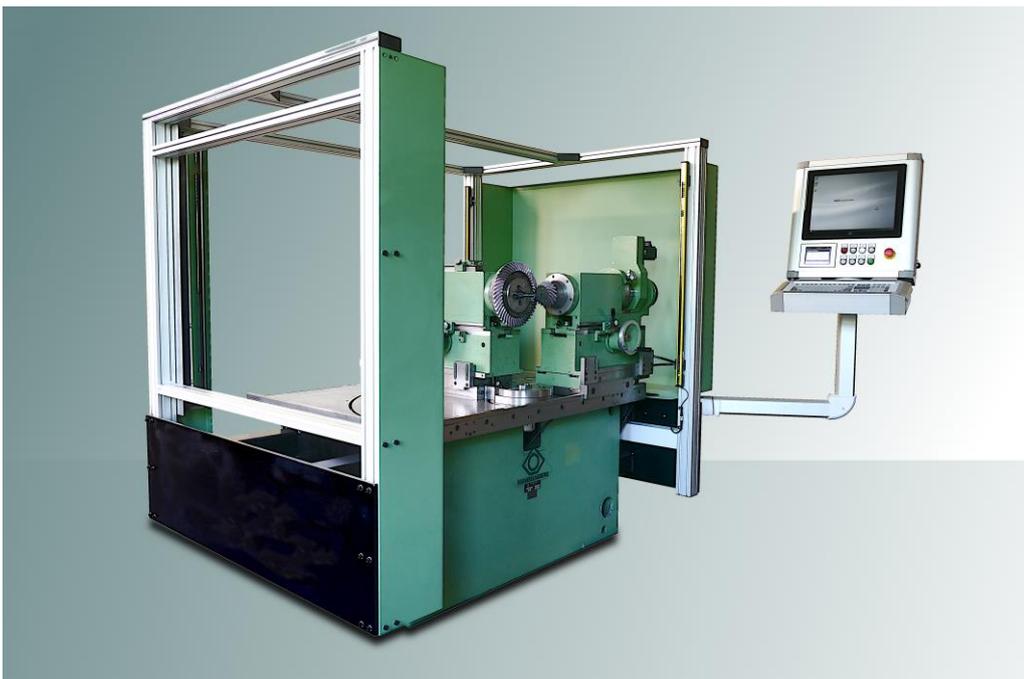
4.5 Beispiel: Flexible Ein- und Zweiflankenwälzprüfung an schweren Schneckenradsätzen

Dieser Labor-Prüfstand ist in der Lage, Ein- und Zweiflankenwälzprüfung an Schneckenradsätzen durchzuführen, deren Masse mehrere hundert Kilogramm betragen kann.



4.6 Beispiel: Nachrüstung bestehender Prüfeinrichtungen

Diese bestehende Prüfeinrichtung wurde mit einer Sicherheitsrichtung (drei Seiten Lichtvorhang, eine Seite Abdeckung) versehen und auf den neuesten Stand der Mess- und Steuerungstechnik gebracht. Die Anlage prüft Kegelräder mit Hilfe der Einflankenwälzprüfung. Die Basismaschine ist in diesem Fall eine Klingenberg PSKE 900.



4.7 Beispiel: Optische Verzahnungsprüfung für Wellen und Stirnräder



Die selbststehende Prüfanlage mit manueller Beladung und Entnahme prüft die Laufverzahnung ähnlich einer taktilen Messmaschine.

Je nach Prüfaufgabe und Werkstückgeometrie ergeben sich Prüfzeiten zwischen 20 Sekunden und über 30 Minuten (für einen vollständigen und hochauflösenden Scan aller Zähne und über die gesamte Zahnflanke).



4.8 Beispiel: Vollautomatisches Prüfsystem mit hohem Durchsatz



Derartige Prüfeinrichtungen sind in der Lage, jegliche Verzahnungsgeometrie mittels der oben beschriebenen Prüfverfahren (Zweiflankenwälzprüfung, Einflankenwälzprüfung und Geräuschprüfung) zu bewerten. Dabei sind Zykluszeiten (Boden-Boden) ab 15 Sekunden realisierbar.



Die Prüfanlagen können, angepasst an die bestehenden Verhältnisse, mit unterschiedlichen Transportsystemen (Stau- und Palettenbänder) ausgerüstet werden. Die anlagen-interne Handhabung erfolgt über Roboter. Falls erforderlich, kann eine automatische Kalibrierung vorgesehen werden.



5 Übersicht Spannmittel

Bei der Bewertung der Werkstückaufnahme stehen sich neben rein prüflings-geometrischen Aspekten auch die erreichbare Prüfgenauigkeit und die Kosten für die Spannmittel gegenüber.

5.1 Stehender Dorn

Das Werkstück wird in der Bohrung aufgenommen. Während des Prüfens dreht sich der Prüfling um den geschliffenen Dorn. Solange nur relative Merkmale (F_i , f_i , Fr sowie die spektrale Zerlegung der Wälzabweichung) erfasst werden, spielt der Innendurchmesser des Prüflings eine untergeordnete Rolle. Eine Ermittlung des Achsabstandes oder des diametralen Zweikugelmaßes ist dagegen nur in den Grenzen der Toleranz des Innendurchmessers möglich. Ebenfalls wichtig und unmittelbar das Prüfergebnis beeinflussend ist die Form des Innendurchmessers. Ovalität, Dreiecksform oder andere Formabweichungen gehen direkt in das Prüfergebnis ein und verfälschen dieses entsprechend.

Voraussetzung für den Einsatz dieser kostengünstigen Prüflingsaufnahme ist, dass das Lehrzahnrad angetrieben werden kann.

5.2 Stehender Dorn mit Kugelbüchse

Diese Methode hat gegenüber dem stehenden Dorn mehrere Vorteile. Zum einen lässt sich der Prüfling einfach zentrieren, zum anderen gleicht die Kugelbüchse fertigungsbedingte Durchmesser- und Formabweichungen bis zu einem gewissen Grad aus. Eine Erfassung der relativen und der absoluten Kenngrößen (Achsabstand und MDK) ist mit hoher Genauigkeit möglich.

Diese Methode der Prüflingsaufnahme kann eingesetzt werden, wenn es möglich ist, das Lehrzahnrad anzutreiben.

5.3 Drehender Hydrodehnspanndorn



Eine Erfassung der relativen und der absoluten Kenngrößen (Achsabstand und MDK) ist mit hoher Genauigkeit möglich. Die Zentrierung ist optimal, Durchmesser- und Formabweichungen werden in Größenordnung der Dornexpansion ausgeglichen und das Werkstück kann über den Dorn angetrieben werden. Hinsichtlich der Aufnahme­genauigkeit lassen sich Spannreproduzierbarkeiten und Rundläufe bis unter $3\ \mu\text{m}$ realisieren.

Die Werkstückspannung kann manuell oder automatisiert erfolgen.

Der Einsatz derartiger Spanndorne ist ab einem Innendurchmesser von ca. 6 mm möglich. Gegenüber stehenden Dornen ist diese Lösung vergleichsweise kostenintensiv, zumal diese Dorne nur über einen sehr geringen Hub verfügen und somit nur für sehr ähnliche, in der Regel nur für einen Innendurchmesser eingesetzt werden können.

5.4 Drehender mechanisch expandierender Dorn

Hierbei gilt das gleiche wie für den Hydrodehnspanndorn mit der Einschränkung, dass die erreichbare Spannreproduzierbarkeit und der Rundlauf in der Regel um mindestens Faktor 2 schlechter als die der Hydrodehndorne sind. Je nach Qualität bzw. je nach Toleranzvorgabe des Prüflings scheiden mechanisch expandierende Dorne somit als Spannmittel für die Verzahnungsprüfung oft als nicht hinreichend genau aus.

Vorteilhaft ist bei derartigen Dornen, dass sich ein vergleichsweise großer Bereich an Innendurchmessern spannen lässt.



5.5 Angetriebene Zentrierspitzen

Wellenförmige Werkstücke können bzw. müssen über Zentrierspitzen aufgenommen werden. Besonders im Fall von Schneckenwellen muss auch an diesem Werkstück angetrieben werden. Je nach Bauteilgeometrie und nach Größe der Zentrierungen wird es erforderlich, einen Mitnehmer vorzusehen. Dieser Mitnehmer ist in den meisten Fällen prüflings-spezifisch und vor der Prüfung an dem zu prüfenden Bauteil zu fixieren. Die Übertragung des Drehmomentes erfolgt formschlüssig.

Die Zentrierspitzen haben einen Rundlauffehler von günstigstenfalls 2 μm . Dieser Fehler geht vollständig in die Messung ein (bei F_i und F_r). Eine Messung der absoluten Merkmale (Achsabstand und MDK) ist mit hoher Genauigkeit möglich.

Ebenfalls ist zu beachten, dass die zu prüfenden Wellen im späteren Einsatz üblicherweise nicht zwischen den Spitzen, sondern in Lagern betrieben werden. Die Abweichung zwischen Spitzenaufnahme und Lager-sitzaufnahme ist zu berücksichtigen (->Koaxialitätsfehler). Bei großen Prüflingen ist es möglich, die Rotationsachse der Welle mittels einem oder mehreren Messtastern bezogen auf den Lagersitz zu erfassen und den Verlauf der Zweiflankenwölzabweichung darüber zu korrigieren (Lagersitzkompensation).

5.6 Stehende Zentrierspitzen

Diese Methode hat den großen Vorteil, dass von den Zentrierspitzen kein Rundlauffehler ausgeht. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass durch diese Art der Aufnahme ein erhebliches Drehmoment aufgebracht werden muss, um das Werkstück anzutreiben. Der Einsatz ist im Einzelfall zu bewerten.

Relative und absolute Merkmale können mit hoher Präzision erfasst werden. Eine Lagersitzkompensation ist bei großen Werkstücken ebenfalls möglich.

5.7 Zentrierspitzen und expandierender Dorn

Eine alternative Methode der Aufnahme ist ein Lamellendorn, der zwischen den Zentrierungen aufgenommen wird. Dieser Dorn gestattet, den Prüfling am Innendurchmesser zu spannen und lässt sich in einem großen Durchmesserbereich einsetzen. Die Rundlaufgenauigkeit eines solchen Dorns ist kleiner 3 μm .





5.8 Anmerkungen zur Reproduzierbarkeit

Bei der Prüfung von Stirnrädern ist die Grundgeometrie üblicherweise so geartet, dass sich die Geometrie des Spannmittels nicht störend auf die Messung der Außenverzahnung auswirken wird. Hier ist lediglich der zusätzliche Rundlauffehler aufgrund des Spannmittels zu beachten.

Bei Hohlrädern ist davon auszugehen, dass sich die Geometrie des Prüflings aufgrund der geringen Wandstärke an das Spannmittel anpasst. Somit werden Formabweichungen an der Außenkontur des Ringes egalisiert oder entsprechend der Geometrie des Spannmittels eingepreßt. Wird das Werkstück nach Herstellung der Verzahnung verformt (z.B. beim Härten), wird dieser Fehler beim Spannen gegebenenfalls ausgeglichen. Nach dem Entspannen geht das Bauteil wieder in seine ursprüngliche Form zurück. Derartige Fehler lassen sich bei der Prüfung somit kaum nachweisen oder gar „herausrechnen“.

Wenn das Spannmittel während des Umrüstens zur Prüfspindel auszurichten ist, ist die Reproduzierbarkeit von F_i'' und F_r'' bzw. F_i' und F_r' natürlich abhängig von der Güte des Ausrichtvorgangs. Anders ausgedrückt ist der Rundlauffehler des Spannmittels nach dem Ausrichten vektoriell zum Fehler des Werkstücks zu addieren. Bei einem Rundlauffehler von $3 \mu\text{m}$ kann das Messergebnis um diesen Betrag größer oder kleiner ausfallen.

Bei der Bestimmung der Messmittelfähigkeit ist darauf zu achten, dass Werkstück und Spanndorn immer den gleichen Winkel relativ zueinander einnehmen und die Aufnahme identisch vorgespannt wird.