

# **KLINGELNBERG ABWEICHUNGSANALYSE**

PRÄZISIONSMESSZENTREN - SOFTWARE



**KLINGELNBERG**

## Zukunftssicheres Qualitätsmanagement von Antriebselementen

Die hohen Genauigkeitsanforderungen bei der Messung von Verzahnungen und die ständig steigende Komplexität von Antriebskomponenten erfordern zweierlei: die beste verfügbare Messtechnik und ein auf diese Anwendungen optimiertes Maschinen- und Softwarekonzept. Daher vertrauen weltweit führende Hersteller auf die Präzisionsmesszentren von Klingelnberg, die sowohl den meist verbreiteten Standard in der Industrie als auch die Referenz für Metrologie-Institute darstellen.

Präzisionsmesszentren von Klingelnberg (P-Serie) decken schon heute einen Großteil der Messaufgaben ab, die in den verschiedensten Branchen für eine zukunftsgerichtete, effiziente Produktion relevant sind. Anwender aus der Automobil- und Nutzfahrzeug-Industrie, der Luft- und Raumfahrt-Industrie sowie der Windkraft-Industrie setzen auf diese Technologie, **die bis zu sechs verschiedene konventionelle Messgeräte ersetzt**. So können folgende Messaufgaben vollautomatisch in einer Aufspannung durchgeführt werden:

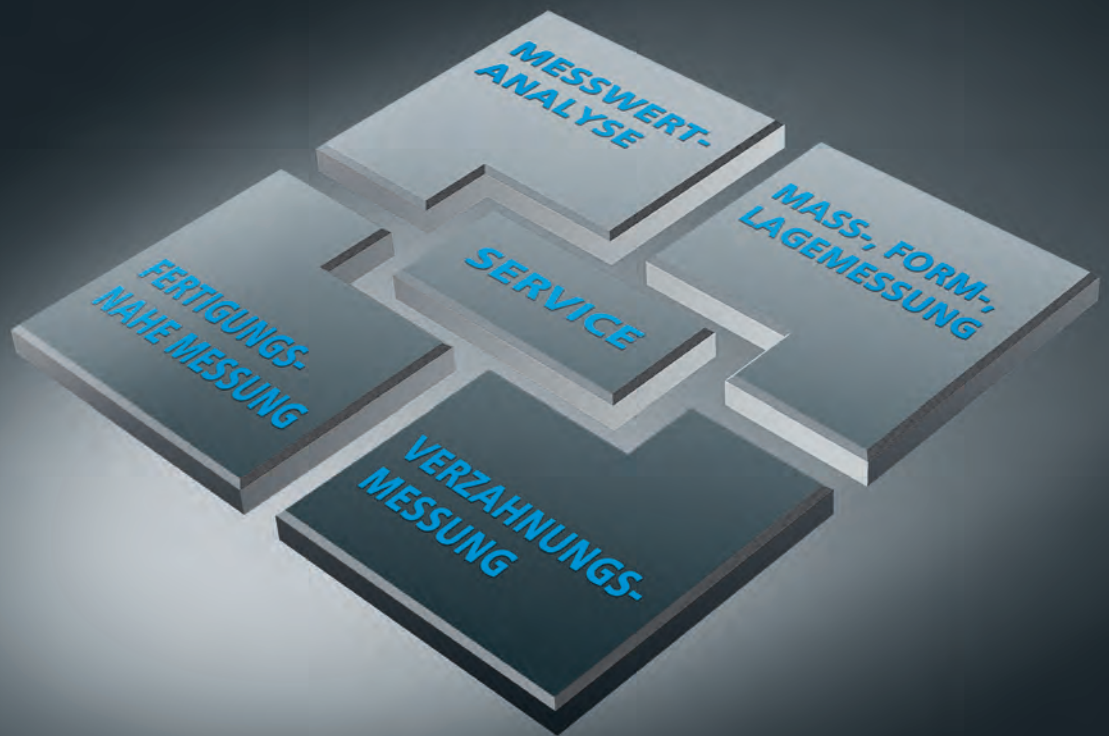
- Verzahnungsmessung
- Optische Messung
- Allgemeine Koordinatenmessung
- Form- und Lagemessung
- Rauheitsmessung
- Konturmessung

Das Baukasten-Konzept der P-Serie bietet Messgeräte in passender Größe und einem breiten Anwendungsspektrum für höchste Präzision:

- Messzentren für Werkstücke bis 3.800 mm Durchmesser und 20.000 kg Gewicht
- Verzahnungsmessungen ab Modul 0,1 mm



P 26 – Durchmesserbereich des Werkstücks bis 260 mm



### Nah am Markt und an den Anforderungen der Anwender

- Erstklassige Maschinenqualität als Garant für eine zuverlässige Qualitätssicherung über einen langen Zeitraum
- Robuste Messmaschinen-Technologie mit geringem Wartungs- und Kalibrieraufwand
- Hohe Messgenauigkeit als Basis zur Prüfung von Antriebskomponenten höchster Qualität
- Maschinenauslegung für den produktionsnahen Einsatz geeignet
- Einfache und sichere Bedienung der Messzentren für alle Anwendungen
- Ständige Weiterentwicklung der Auswertestandards nach den Vorgaben der Industrie und der Normenverbände
- Umfangreiche Serviceleistungen: schnell, kompetent, weltweit

## Komplexe Zusammenhänge einfach erkennen

Durch hohe Anforderungen an Komfort, Leichtbau und eine wirtschaftliche Fertigung müssen Zahnräder bis in die Feinstruktur hinein immer genauer werden. Das gilt besonders auch für Antriebe in der Elektromobilität. Um seine Kunden in dieser herausfordernden Situation zu unterstützen, stellt Klingelnberg ein Softwaretool bereit, mit dem sich die Messergebnisse auf den P-Maschinen in vielfältiger Hinsicht analysieren lassen. Das Analysewerkzeug bietet eine Reihe an Möglichkeiten, um die Abweichungen so darzustellen und auszuwerten, dass Ursachen von Problemen leicht erkannt und Korrekturen vorgenommen werden können.

Oberflächenwelligkeiten können ab einer Größe von 100 Nanometern in Getrieben Geräusche verursachen. Diese feinen Strukturen lassen sich auf Klingelnberg Präzisionsmesszentren erfassen, aber nur mithilfe einer Welligkeitsauswertung sichtbar machen. So werden geräuschverursachende Effekte schon bei der Fertigung der Zahnräder und nicht erst bei der Endprüfung der fertigen Getriebe erkannt – und lassen sich abstellen. Die Klingelnberg Verzahnungsanalyse zeigt Welligkeiten sicher an und ermöglicht damit eine genaue Prozessüberwachung und -regelung.

Die Herstellung von hochgenauen Verzahnungen ist ein sehr dynamischer Vorgang, in dem mehrgängige Schleifschnecken mit dem Werkstück abwälzen. Dieser Prozess ist sehr komplex

und der Einfluss von kleinsten Abweichungen am Werkzeug oder bei der Aufspannung intransparent. Deswegen bietet Klingelnberg seinen Kunden Auswerteprogramme und Simulationen an, die es erlauben, Einflüsse im Herstellprozess sehr genau zu simulieren und vorherzusagen. Vorangestellte Simulationen und Berechnungen machen den Produktionsprozess präziser und robuster.

- Vergleich von Werkstücken und Werkzeugen
- Optimierung von Geräuschverhalten
- Simulation und Vorhersage von Einflüssen im Herstellprozess
- Bestimmung von Abweichungsursachen

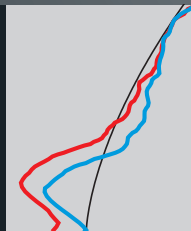


# Abweichungsanalyse

## Übersicht der Softwaremodule

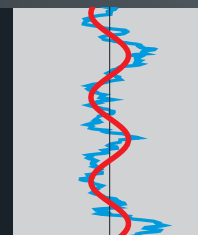
### VIEW

Basismodul zur visuellen Prozessüberwachung mittels gespeicherter Messdiagramme



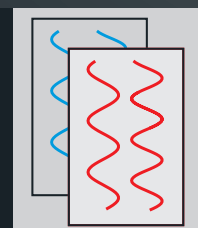
### OPTIMIZE & WAVE

Software zur automatischen und schnellen Welligkeitsauswertung nach der Messung



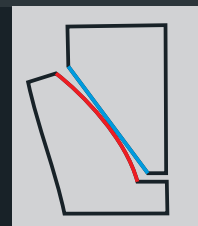
### WAVE PRODUCTION

Software zur automatischen Welligkeitsauswertung während der Messung



### PRODUCE

Ausbaumodul zur Simulation von Abweichungen beim Wälzfräsen und Wälzschleifen



## Basismodul zum einfachen Vergleich von Messkurven

Das Software-Basismodul View stellt alle Grundfunktionen zur Verfügung, um Abweichungen, die mit den Klingelnberg Präzisionsmesszentren erfasst werden, grafisch darzustellen. Alle weiteren Ergänzungsmodule bauen auf diesen Funktionen auf.

Ein zentrales Element ist der Vergleich von Abweichungskurven. Per Klick lassen sich die Abweichungskurven im Profil und in der Flankenlinie übereinandergelegt in einem Diagramm darstellen. Damit sind Variationen der Form leicht zu erkennen. Auf diese Weise können insgesamt bis zu zwölf verschiedene Messungen miteinander verglichen werden. So lassen sich sowohl der Einfluss von Parameter- und Werkzeugänderungen als auch die Stabilität von Fertigungsmaschinen schnell überprüfen.

Da Zahnräder heute oft ballig korrigierte Formen aufweisen, ist der Vergleich der Kurven nicht immer aussagefähig. Durch die Eliminierung der Ist-Balligkeit und der Ist-Winkelabweichung wird es aber möglich, die darunter versteckte Formschwankung zu erkennen. Die Darstellung lässt sich so weit vergrößern, dass selbst kleine wellige Strukturen sichtbar werden. Da Abweichungen aus Topografiemessungen farbcodiert dargestellt werden können, ist es möglich, dreidimensionale Muster auf der Zahnoberfläche leicht zu erkennen und zuzuordnen.

Durch die Darstellung von Form und Zahndicke werden die Abweichungskurven in Bezug zu ihrer Soll-Zahndicke gezeigt. Aufmaß und Spiel lassen sich so einfach beurteilen.

### Analyse View auf einen Blick:

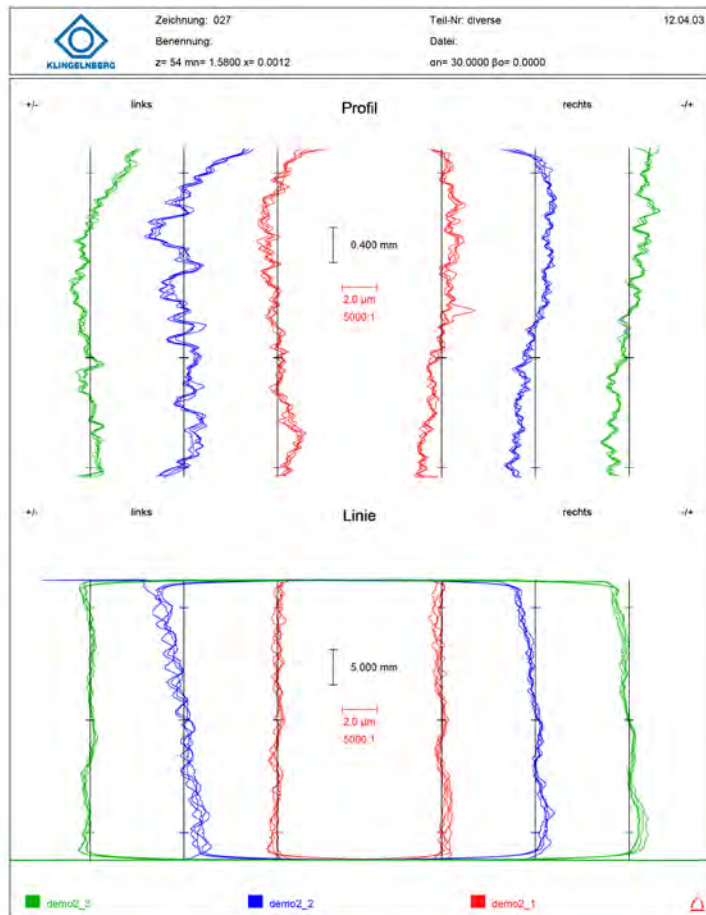
- Einfacher Vergleich von Abweichungskurven
- Direkte Erkennung von Prozessänderungen
- Darstellung von Form und Zahndicke
- Ursachensuche im Problemkreis Passung und Flankenspiel
- Darstellung der Abweichungskurven ohne Balligkeit
- Mustererkennung durch farbige Topografie



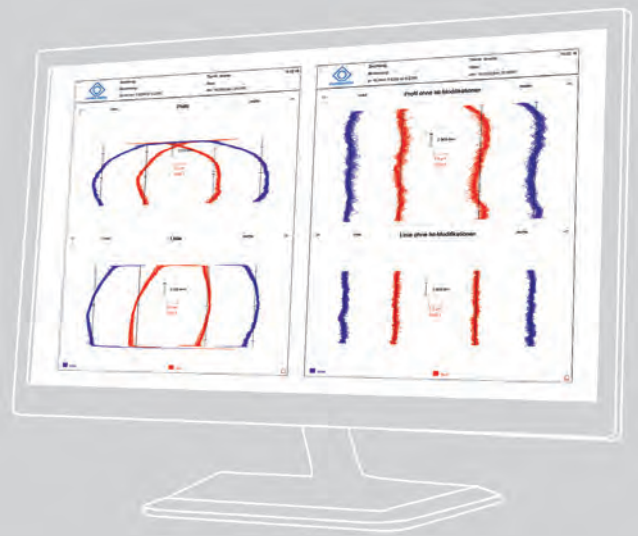
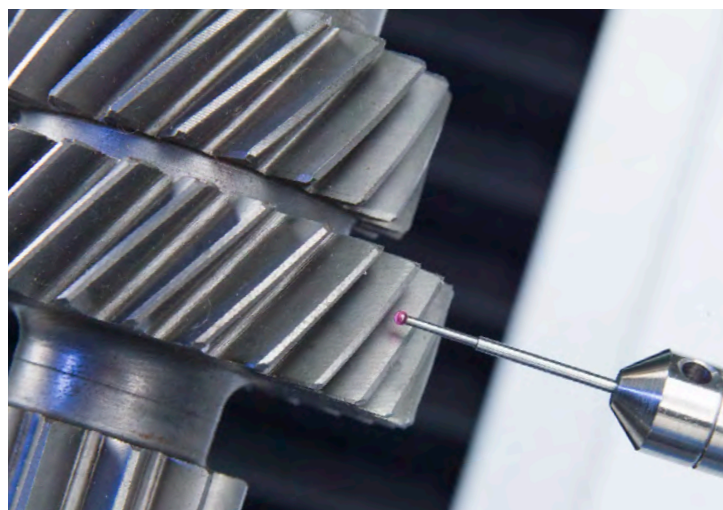


Werden für eine Steckverzahnung die Messungen von Außen- und Innenverzahnung geladen, lassen sich sowohl das entstehende Spiel als auch die Passung beurteilen. Für spritzgessene Zahnräder ist damit ein direkter Vergleich von Werkzeug und Werkstück möglich.

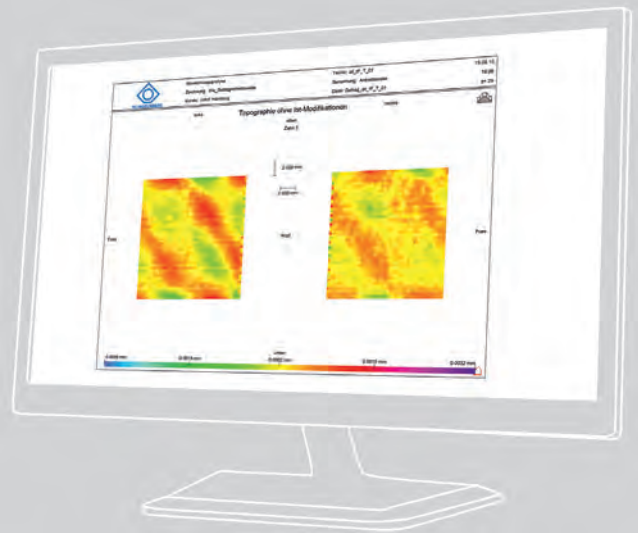
Die Software ist einfach und intuitiv zu bedienen. Frei positionierbare Toolboxes beinhalten häufig genutzte Features, Standardauswertungen können automatisch durchgeführt werden.



Der Vergleich der Abweichungskurven von drei Werkstücken zeigt deutlich die systematischen Formänderungen durch Variation der Prozessparameter.



Erst nach Beseitigung der Ist-Modifikationen (Balligkeit und Winkel) wird die wellige Form sichtbar.



Die farbige Darstellung der Topografieabweichungen ermöglicht die einfache Beurteilung von komplexen Abweichungsmustern.



Die Darstellung der Form inklusive der Zahndicke macht das Passungsspiel zwischen Außen- und Innenverzahnung sichtbar.

## Abweichungen an Verzahnungen simulieren und sicher korrigieren

Das Software-Ergänzungsmodul Optimize & Wave macht es extrem einfach, Welligkeiten auf Verzahnungsoberflächen sehr genau zu erkennen. Gleichzeitig lassen sich typische Fehler an der Verzahnung simulieren und Korrekturen für eine verbesserte Fertigung berechnen.

Das Modul Optimize & Wave übernimmt die Welligkeitsauswertung aller gemessenen Zähne. Dabei werden die Messpunkte entsprechend ihrem Drehwinkel zu einer geschlossenen Kurve zusammengefügt. Mit Hilfe von Ausgleichsinus-Funktionen lässt sich daraus ein Ordnungsspektrum berechnen. Die Ordnungen beziehen sich auf eine Umdrehung des Zahnrades und beschreiben sehr genau die periodischen Abweichungen der Oberfläche. Werden mehrere Schnitte gemessen, so kann für jede Ordnung der Schrägungswinkel der Welligkeit berechnet werden. Dieser gibt wichtige Hinweise auf die Wirkung der Welligkeit im Getriebe und auf die Entstehung der Welligkeiten bei der Fertigung. Die topografische Darstellung erlaubt es, die komplexen Muster zu beurteilen.

Zum besseren Verständnis der Welligkeitsstrukturen und der Überlagerung verschiedener Ordnungen lassen sich Welligkeiten mit allen Parametern simulieren. In der Auswertung dieser idealen Kurven ohne störende Formabweichungen können Wechselwirkungen und Einflüsse auf die Auswertung beurteilt werden. Wird die Struktur einer Verzahnungsoberfläche sicher aufgenommen, lassen sich die vorhandenen Geräuschordnungen erkennen und simulieren. Sind die Geräuschprobleme bekannt, ist es möglich, für das Ordnungsspektrum Toleranzkurven zu definieren.



### Analyse Optimize & Wave auf einen Blick:

- Welligkeitsberechnung aller Zähne über dem Drehwinkel
- Darstellung von Welligkeitskurven und Ordnungsspektren
- Simulation von Welligkeiten
- Vergleich mit Toleranzkurven
- Export der Kennwerte nach Microsoft Excel
- Simulation und Berechnung von Exzenter und Taumel
- Optimierung von Eingriffswinkel, Schrägungswinkel, Modul und Zahndicke
- Einfluss von Temperaturänderungen

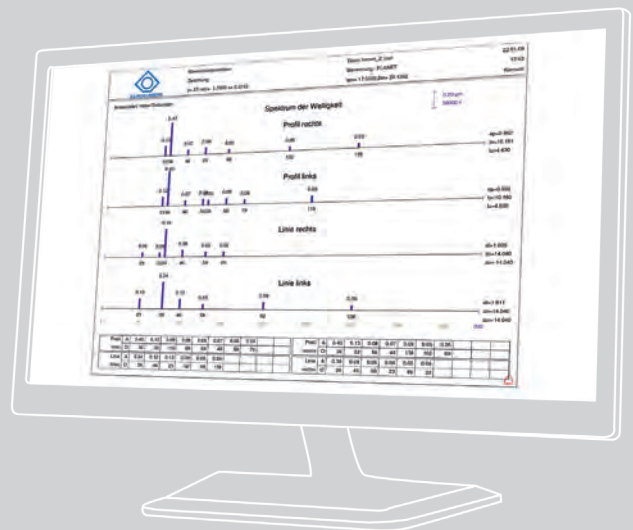


Ordnungen, die die Toleranz überschreiten, werden hervorgehoben. Die Welligkeitskennwerte können für einen weitergehenden Vergleich von Versuchsserien exportiert und in Microsoft Excel aufbereitet werden.

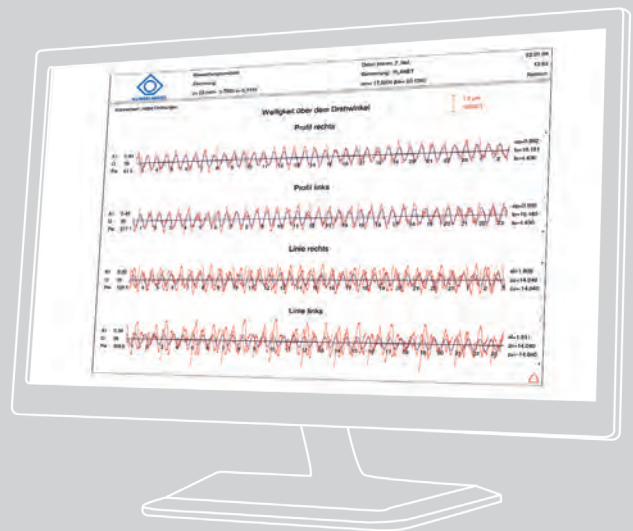
Die Funktionen in Optimize & Wave erlauben es, typische Abweichungen an Verzahnungen zu simulieren und zu korrigieren. Per Klick können Lagefehler, Einflüsse der Temperatur und geometrische Kenngrößen wie Eingriffswinkel und Schrägungswinkel verändert werden. In den Messkurven lassen sich so schrittweise diese Einflüsse eliminieren oder auch direkt automatisch Korrekturwerte berechnen. Eine Kopierfunktion unterstützt die anschauliche Dokumentation der einzelnen Korrekturschritte und deren Wirkung.



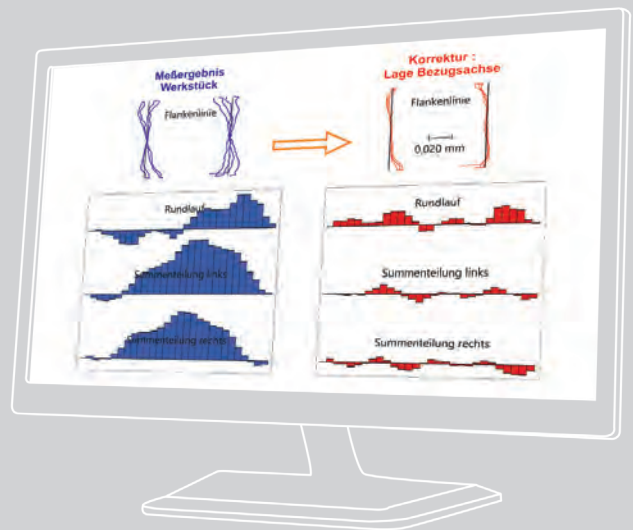
Vergleich der Spektren zweier Verzahnungen.



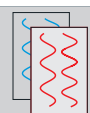
Das Ordnungsspektrum einer lauten Verzahnung.



Die gemeinsame Darstellung der Abweichungskurven einer lauten Verzahnung.



Korrektur von Exzenter und Taumel.



### Vollautomatische Welligkeitsauswertung von Profil, Flankenlinie und Teilung

Die auf den Messgeräten installierte Software Wave Production führt in Verbindung mit der Mess- und Auswertesoftware der Präzisionsmesszentren eine automatische Welligkeitsauswertung durch – und bewertet die Ergebnisse gegen Toleranzkurven.

Mit Wave Production ist es möglich, die Welligkeitsbewertung auch bei einer Standard-Messung von wenigen Zähnen ohne Verzögerung vorzunehmen. Diese prozessbegleitende Messung erlaubt eine schnelle Reaktion, falls sich auf der Oberfläche der Verzahnung geräuschverursachende Strukturen ausbilden.

Um niederfrequente Ordnungen zu erkennen, wird auch für die Teilungsmessung ein Ordnungsspektrum berechnet. Darüber hinaus ermöglichen es die neuen Kennwerte  $6s$  und der daraus abgeleitete Welligkeitsindikator  $w$ , Abweichungskurven dahingehend zu prüfen, ob generell periodische Anteile enthalten sind. Die Auswertung lässt sich auf verschiedene Arten und in unterschiedlichem Umfang ausgeben: als PDF-Dokument, als Ausdruck – und auch nur auf die Fälle beschränkt, wenn die Ergebnisse nicht in Ordnung (niO) sind.

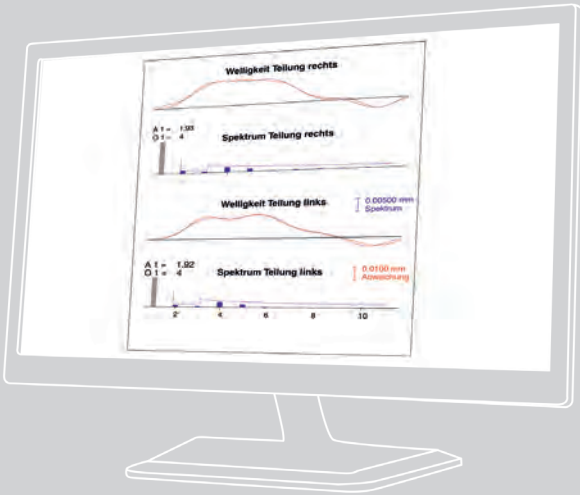
Für kritische Ordnungen beschreiben Toleranzkurven im Spektrum die zulässigen Amplituden auf dem Zahnrad. Sind diese für einen Getriebe- oder Zahnradtyp definiert, kann in der laufenden Produktion eine automatische Prüfung auf „iO“ (in Ordnung) und nicht „niO“ (nicht in Ordnung) erfolgen. Der Bediener erkennt damit frühzeitig, wenn der Fertigungsprozess Zahnräder erzeugt,



#### Analyse Wave Production auf einen Blick:

- Automatische Welligkeitsauswertung von Profil und Flankenlinie einer Standardmessung
- Welligkeitsauswertung der Teilungsmessung
- Bestimmung des Kennwertes  $6s$  und des Welligkeitsindikators  $w$
- Einfache Einstellung des Auswerteumfangs und der Speicher- und Ausgabearten
- Vergleich mit Toleranzkurven und iO/niO-Bewertung
- Weitergabe der Kennwerte an ein Statistikprogramm (qs-STAT)

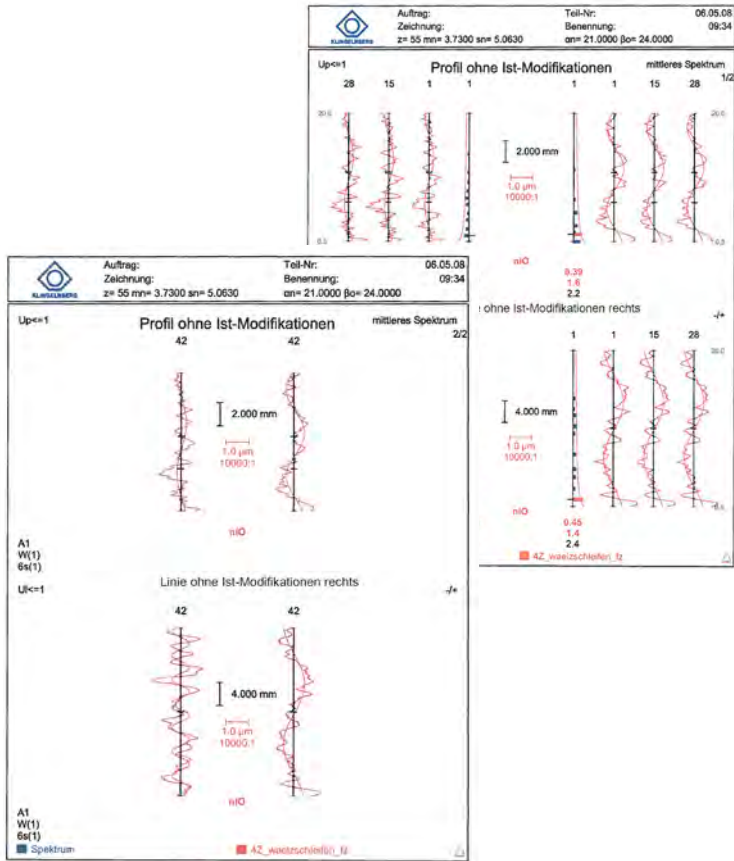
die vermutlich geräuschverursachend sind. Die ermittelten Kennwerte der Welligkeit können für eine statistische Beurteilung und Regelung der Fertigungsprozesse automatisch an die Statistiksoftware qs-STAT® weitergegeben werden.



Welligkeitsauswertung der Teilung.



Analyse des Spektrums.

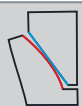


Welligkeitsauswertung an Profil und Flankenlinie.



Festlegung der Toleranzkurve.



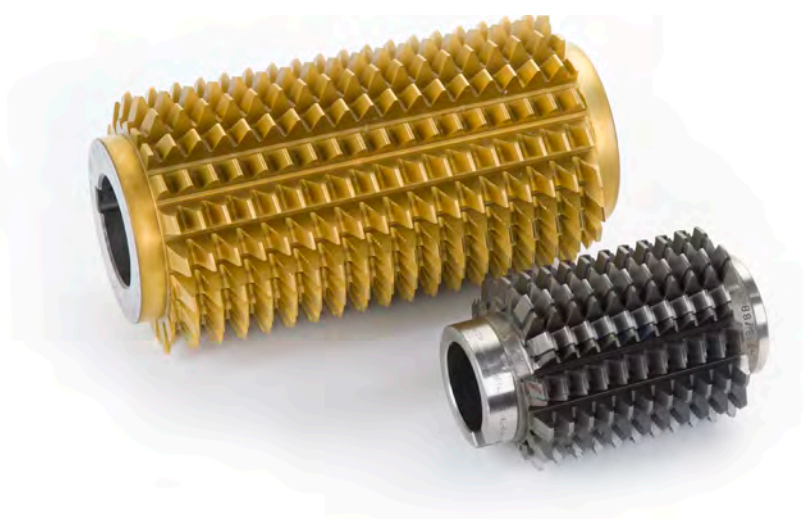


### Ergänzungsmodul zur Simulation von Abweichungen beim Wälzfräsen und Wälzschleifen

Das Software-Ergänzungsmodul Produce ist ein leistungsfähiges Werkzeug zur Fehlersuche, Auslegung und Optimierung von abwälzenden Fertigungsverfahren.

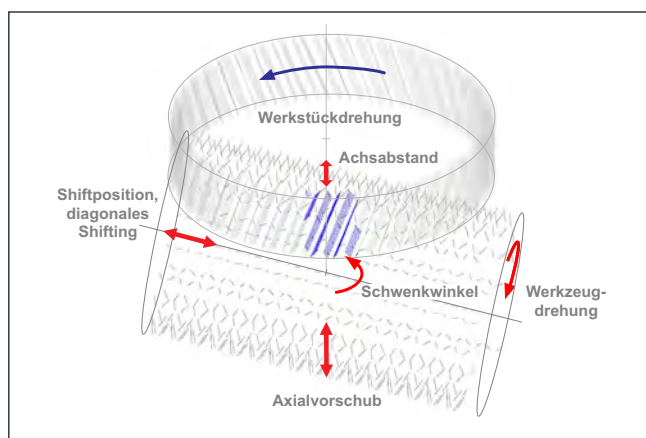
Produce erlaubt es, die durch Wälzfräsen und Wälzschleifen verursachten Abweichungen am Werkstück sehr genau zu simulieren und übersichtlich darzustellen. Dazu werden die Werkzeugschneiden inklusive Protuberanz und Kopfkantenbruch modelliert und entsprechend der Kinematik der Werkzeugmaschine bewegt. Prozessparameter wie der Axialvorschub oder Werkzeugparameter wie die Anzahl der Gänge lassen sich einfach ändern. Die Berechnung erfolgt schnell und exakt, der grafische Vergleich zeigt die Änderungen. Da die Ergebnisse dieser Simulation wie die Ergebnisse einer Messung behandelt werden, stehen alle Funktionen der Darstellung und des Vergleichs aus dem Basismodul View zur Verfügung.

Neben der fehlerfreien Bearbeitung mit einem exakten Werkzeug können typische Werkzeug- und Aufspannfehler simuliert werden: Ein Werkzeug kann Abweichungen der Gangsteigung oder eine axiale Verschiebung der Gänge besitzen und exzentrisch oder taumelnd aufgespannt sein.



#### Analyse Produce auf einen Blick:

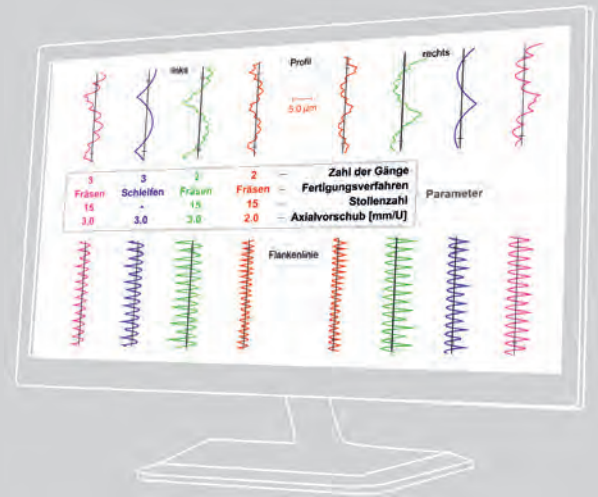
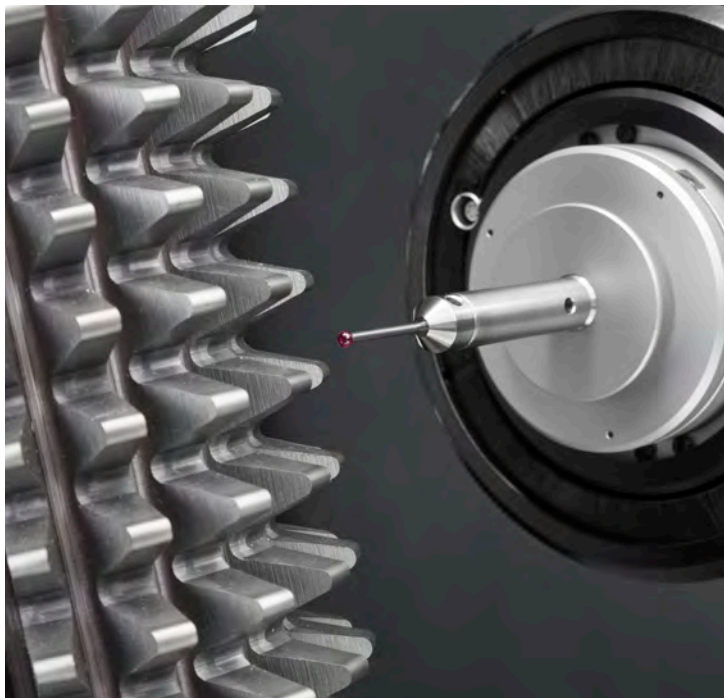
- Simulation typischer Fehler beim Wälzfräsen und Wälzschleifen
- Einfacher Vergleich von Messung und Simulation
- Schnelle Suche nach Abweichungsursachen
- Prozessänderung per Klick
- Optimierung der Fertigungsprozesse



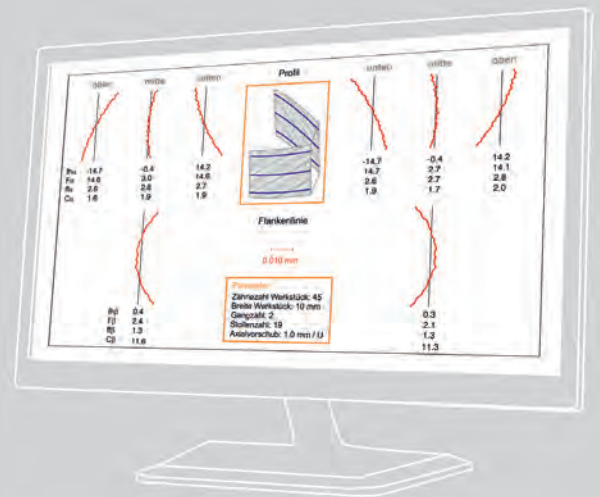
Die Bewegungsmöglichkeiten zwischen Werkzeugschneiden und Werkstückoberfläche in der Simulation.

Ein Highlight ist die Verarbeitung von Messergebnissen einer Wälzfräsmessung. Durch die Nutzung der gemessenen Abweichungen ist der Anwender in der Lage, die Qualität der Werkstücke vorherzusagen, die der gemessene Wälzfräser herstellen kann.

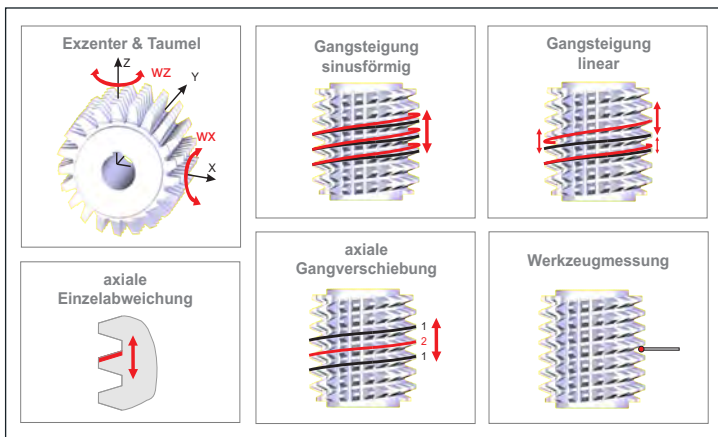
Von der sekundenschnellen Berechnung der Protuberanz im Profilschnitt bis hin zur detaillierten Betrachtung der Topografie eines Zahnes lassen sich die Einflüsse der Fertigung sehr einfach untersuchen. Der Bediener kann dabei durch die Vorgabe der Anzahl der zu berechnenden Schnittkurven und Zähne den Berechnungsumfang steuern. In Verbindung mit dem Ergänzungsmodul Wave ist es möglich, mit den Simulationsergebnissen eine Welligkeitsberechnung durchzuführen, um Hinweise auf die Ursache von Geräuschproblemen zu erhalten.



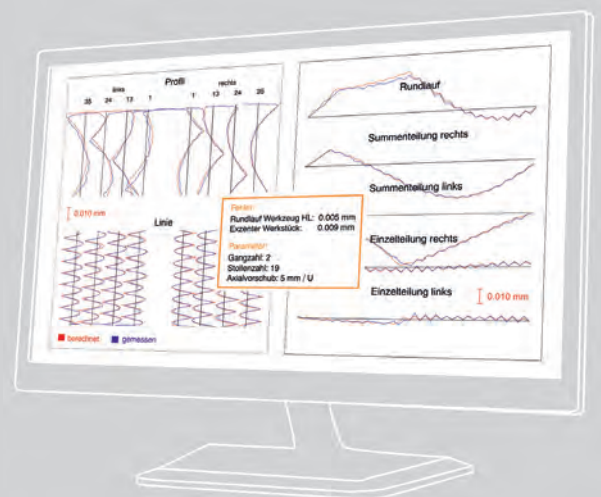
Der Einfluss von Werkzeug- und Prozessparametern ist leicht erkennbar.



Eine Verschränkung kann an einzelnen Schnitten berechnet werden.



Werkzeug- und Aufspannfehler, die in der Simulation verarbeitet werden können.



Ein Vergleich von gemessenem Werkstück mit der Simulation eines taumelnden Wälzfräasers zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.



### Optimale Leistung durch Antriebskomponenten mit höchster Qualität

Seit Jahrhunderten werden weltweit Verzahnungen benötigt. Wurden früher einzig Funktion und Lebensdauer in den Vordergrund gestellt, werden heute von Verzahnungen in allen Bereichen Höchstleistungen erwartet. Geräuschemissionen gewinnen stetig mehr Beachtung und sowohl im Pkw als auch im Lkw sind heute Laufleistungen von mehreren Hunderttausend Kilometern Standard.

Vergleicht man im Pkw- und Lkw-Bereich die zu übertragende Leistung mit der früherer Fahrzeuge, so ist der Zuwachs an Leistung und Drehmoment eklatant. Trotzdem haben sich die Abmaße der Zahnräder kaum geändert. Hier wird der technologische Fortschritt sichtbar. Klingelberg steht für ebendieses technologische Know-how und bietet in der kompletten Verzahnungskette immer eine kompetente Lösung. Das Leistungsportfolio umfasst mit Herstellung, Prozessüberwachung und -optimierung die volle Bandbreite: von der Auslegung bis zur Oberflächenmessung.



#### Automobil



In Automobilen kommen Stirnräder in Schalt- und Automatikgetrieben zum Einsatz. Aufgrund der steigenden Anforderungen müssen die Antriebe teilweise mehr als 300 kW übertragen können. Die Komponenten müssen effizient, laufruhig und wartungsarm sein. Reproduzierbare Qualität in der Serienfertigung bei geringstmöglichen Fertigungszeiten sind die Schlüsselanforderungen dieser Industrie. Zusätzlich werden immer niedrigere Geräuschemissionen erwartet. Mit der Software Wave Production bietet Klingelberg eine Lösung zur Prozesssteuerung.

#### Elektromobilität



Durch die sehr hohe Eingangsrehzahl des Elektromotors wird das dahinter liegende Getriebe anders beansprucht als Getriebe von Verbrennungsmotoren. Zusätzlich erschwert das Fehlen von überdeckenden Geräuschen des Verbrennungsmotors und der Abgasanlage die akustische Auslegung des Getriebes. Die Oberflächenstruktur gerät entsprechend in den Fokus. Klingelberg setzt hier durch vollautomatische Rauheitsmessung und prozessübergreifender Welligkeitsanalyse zum Auffinden von Störfrequenzen und -ordnungen Maßstäbe.

## Verzahnungshersteller/Zulieferer



Insbesondere Lohnverzahner müssen täglich flexibel auf Marktgegebenheiten reagieren und unterschiedlichste Verzahnungskomponenten produzieren können. Von Standardlösungen bis hin zu High-End-Anwendungen – Klingelberg bietet seinen Kunden maßgeschneiderte Maschinenkonzepte, umfassende Engineering- und Serviceleistungen. Klingelberg Lösungen zur Oberflächenmessung und -auswertung sichern die Produktion ab.

## Luftfahrt



Stirnräder, die in Flugzeugen zum Einsatz kommen, müssen den höchsten Qualitäten bezüglich Teilung und Rundlauf (DIN 1–3) entsprechen. Ebenso wichtig sind andere geometrische Merkmale wie Oberflächengüte, Zahnfußgeometrie, Drehfehler, hohe Festigkeit und geringes Gewicht. Hier kommen auch häufig Sonderwerkstoffe zum Einsatz, die extreme Anforderungen an Werkzeuge und Prozesse stellen. Vielfältige Zusatzauswertungen in der Analysesoftware gewährleisten ein sicheres Produkt.

## Bahngetriebe



Im Bereich der Bahngetriebe gibt es eine Reihe unterschiedlicher Anwendungen, bei denen Stirnräder zum Einsatz kommen. Hierzu zählen unter anderem auch die Antriebsstränge bei Schienenfahrzeugen. Spezifische Anforderungen, wie z.B. Geräuschminimierung, maximale Leistungsübertragung und Langlebigkeit werden an diese Spezialgetriebe gestellt. Hohe Geschwindigkeiten und große bewegte Massen setzen robuste Verzahnungen voraus. Die Analysesoftware kann auch bei großen Verzahnungen eingesetzt werden.

## Industriegetriebe



Industriegetriebe stellen hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Zahnräder. Die Verzahnungen für diese Bereiche werden oft von Unternehmen hergestellt, die sich auf kleine Losgrößen und große Variantenvielfalt spezialisiert haben. Diese individuelle Klein- bis Großserienfertigung erlaubt keine zeitaufwändigen Vor- und Testläufe. Prozesse müssen sicher und beherrschbar sein. Klingelberg bietet seinen Kunden mit der Analysesoftware bereits in der Werkzeugauslegungsphase und Prozessgestaltung zahlreiche Hilfestellungen.

## KLINGELNBERG Service

Die Klingelberg Gruppe zählt zu den führenden Unternehmen in der Entwicklung und Fertigung von Maschinen zur Kegelrad- und Stirnrad-Bearbeitung, von Präzisionsmesszentren für Verzahnungen und rotationssymmetrische Bauteile sowie in der Fertigung hochpräziser Antriebskomponenten im Kundenauftrag. Neben dem Hauptsitz in Zürich (Schweiz) zählen zu den weiteren Entwicklungs- und Fertigungsstandorten Hückeswagen und Ettlingen (Deutschland) sowie Győr (Ungarn).

Dazu kommen Vertriebs- und Serviceniederlassungen sowie zahlreiche Handelsvertretungen weltweit. Auf dieser Basis bietet Klingelberg den Anwendern ein umfangreiches Dienstleistungsangebot rund um die Auslegung, das Fertigungsverfahren und die Qualitätsprüfung von Zahnrädern. Das Spektrum umfasst technische Beratungen, Maschinenabnahmen im Werk, Bediener- und Softwareschulungen sowie Wartungsverträge.

## KLINGELNBERG Lösungen

Klingelberg Lösungen kommen neben der Automobil-, Nutzfahrzeug- und Luftfahrtindustrie auch im Schiffbau, der Windkraftindustrie sowie im allgemeinen Getriebebau zum Einsatz. Mit zahlreichen F&E-Ingenieuren rund um den Globus und über 200 erteilten Patenten stellt das Unternehmen seine Innovationskraft stetig unter Beweis.

### KLINGELNBERG AG

Binzmühlestrasse 171  
8050 Zürich, Switzerland  
Fon: +41 44 278 7979  
Fax: +41 44 273 1594

### KLINGELNBERG GmbH

Peterstraße 45  
42499 Hückeswagen, Germany  
Fon: +49 2192 81-0  
Fax: +49 2192 81-200

### KLINGELNBERG GmbH

Industriestraße 19  
76275 Ettlingen, Germany  
Fon: +49 7243 599-0  
Fax: +49 7243 599-165