

Titel des Vortrages
Verzahnungsabweichungen sicher beurteilen und korrigieren

Vortragender	
Name	**Prof. Dr.-Ing. Günther Gravel**
Firma	**Hochschule für Angewandte Wissenschaften**
Anschrift	**Berliner Tor 21**
	20099 Hamburg
Telefonnummer	**040 42875 8625**
E-Mailadresse	**gravel@rzbt.haw-hamburg.de**

Weitere Autoren	
Name	
Firma	
Anschrift	
Name	
Firma	
Anschrift	

1. Einleitung

Steigende Anforderungen an die Laufruhe und die immer höhere Belastung von Getrieben bei gleichzeitiger Reduzierung des Gewichts erfordern enge Verzahnungstoleranzen, eine saubere Auslegung und eine genaue Prozessüberwachung. Für die Prüfung der Verzahnungen stehen hochgenaue Verzahnungsmessgeräte zur Verfügung, die im Hinblick auf die Qualitätsbeurteilung keine Wünsche offenlassen. Für die schnelle und sichere Ermittlung von Abweichungsursachen und die Bestimmung von Korrekturwerten benötigen allerdings auch geschulte Anwender Hilfsmittel zur Interpretation der Messergebnisse.



Bild 1: Modernes Verzahnungsmessgerät

Für diese Aufgabe wurde ein Software-Tool entwickelt, das die Analyse von Verzahnungsabweichungen erlaubt. Diese Software ist charakterisiert durch die im Bild 2 dargestellten Grundaufgaben. Im Folgenden wird an Beispielen aus der Praxis gezeigt, wie sich damit typische Fragestellungen an Lauf- und Passverzahnungen schnell und einfach beantworten lassen.

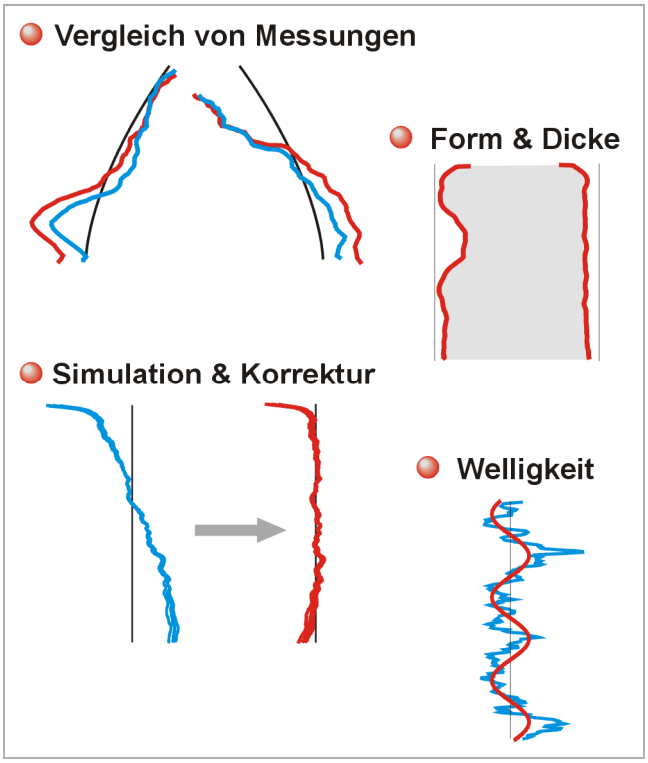


Bild 2: Grundaufgaben der Abweichungsanalyse

2. Der Vergleich von Messungen

Bei der Prüfung einer Verzahnung wird die Lage aller Zähne durch die Teilungs- und Rundlaufmessung erfasst, die Form der Zähne durch die Profil- und Flankenlinienmessung an 4 Zähnen. Sind Erfahrungen zu dieser Verzahnung und dem Herstellungsprozess vorhanden, so ist eine Bewertung und Regelung über numerische Kennwerte, die aus den Abweichungen berechnet werden, sicher und einfach möglich. Treten Probleme auf, so ist eine Beurteilung der Abweichungskurven notwendig.

Für eine neuentwickelte Verzahnung sind im Bild 3 die Messungen von drei Werkstücken gegenübergestellt, die im Einbau unterschiedliches Geräuschverhalten zeigen. Vereinfacht ist nur

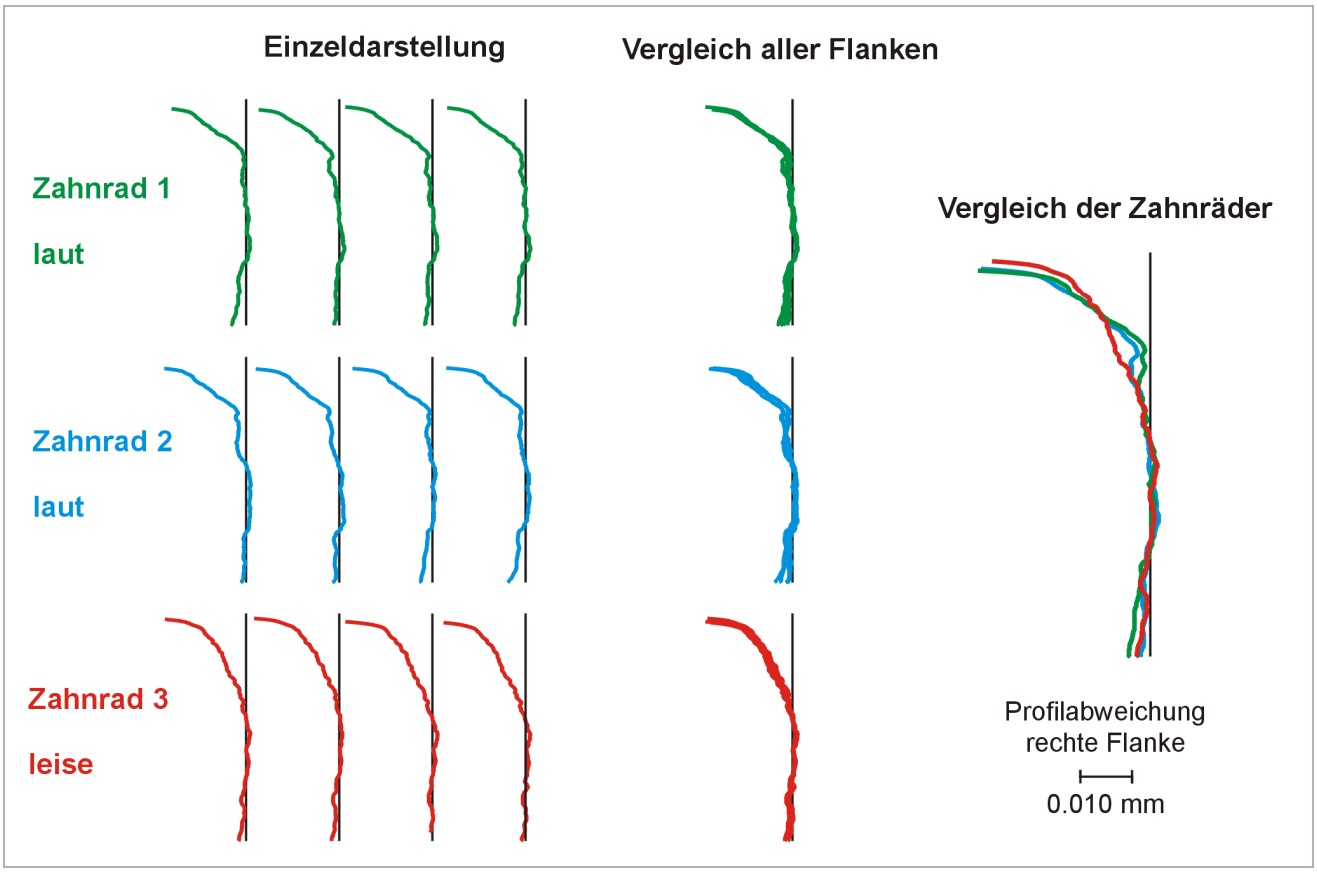


Bild 3: Vergleich der Messungen an 3 Zahnrädern

das Profil der rechten Zahnflanke an 4 Zähnen dargestellt. Zunächst ist es sinnvoll, zu prüfen, ob alle Kurven eines Werkstückes einen systematischen Charakter aufweisen oder ob sie streuen. Dies wird durch eine gemeinsame Darstellung der Kurven erreicht, die sofort deutlich macht, dass die Ursache zwischen laut und leise nicht in einer Streuung der Kurven zu suchen ist. Im nächsten Schritt wird nun jeweils ein Zahn der drei Werkstücke verglichen. Hier ist zu erkennen das die leise Verzahnung eine größere Kopfrücknahme oder Balligkeit aufweist. Das Beispiel macht deutlich, wie hilfreich eine geeignete grafische Darstellung für die Beurteilung ist, dies um so mehr, wenn Abweichungsmuster nicht so klar wie hier, sondern nur unscharf mit der Funktion korelieren.

In einem weiteren Beispiel sind in Bild 4 die Messergebnisse des Profils von zwei Werkstücken dargestellt, die durch abrichtbares Profilschleifen hergestellt wurden. Das obere Werkstück wurde auf einer alten mechanischen, das untere auf einer neuen CNC-gesteuerten Schleifmaschine gefertigt. Die Profilkurven weisen ähnliche Verläufe auf, die auch in den berechneten Kennwerten gleich sind. Erst in der gemeinsamen Darstellung wird deutlich, dass die mechanische Maschine durch Spiel in den Führungen eine Streuung der Form erzeugt, die sich dem systematischen Fehler durch das Abrichten deutlich überlagert. Eine Verbesserung dieser Maschine ist nur durch Überholung zu erreichen. Demgegenüber zeigt die gemeinsame Darstellung der Kurven des Werkstückes der CNC-

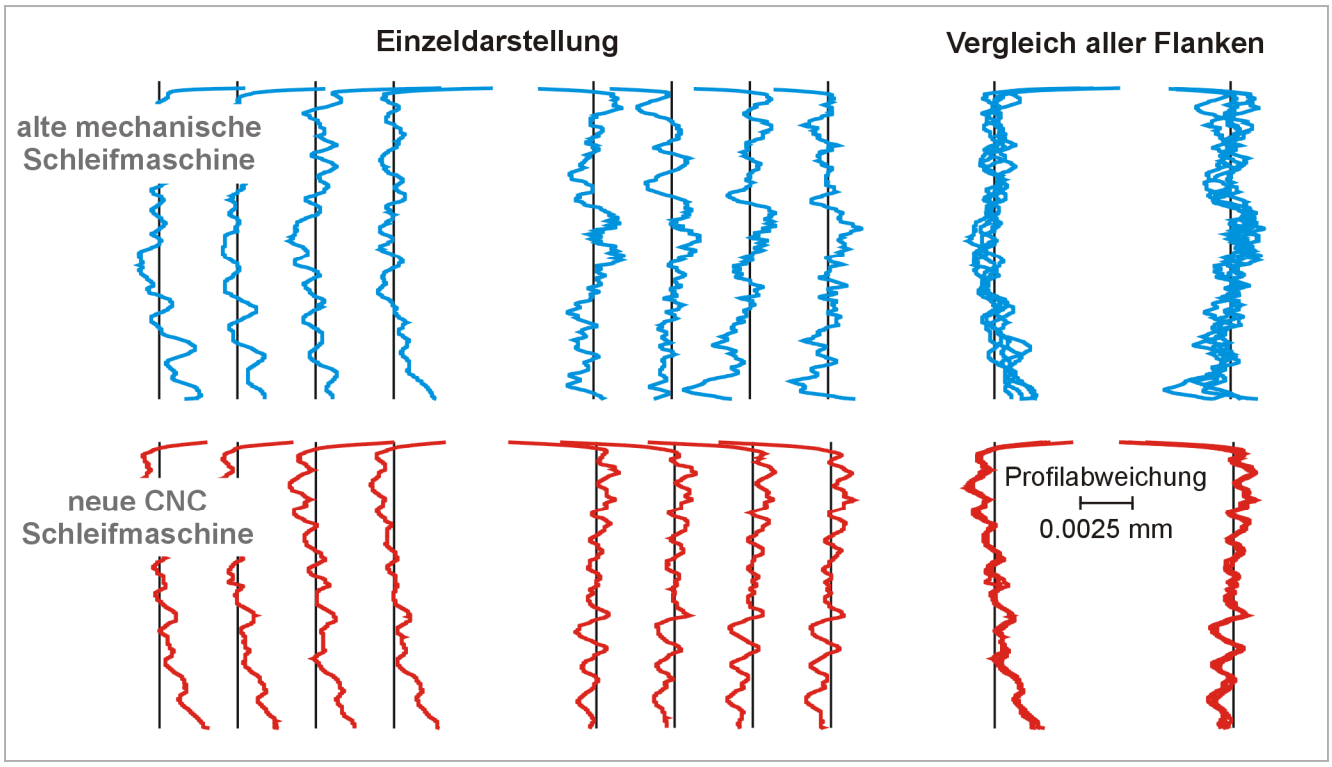


Bild 4: Beurteilung von Schleifmaschinen

Maschine, wie genau und scharf das Profil reproduziert wird. Hier ist ein verbesserungsfähiger Abrichtprozess der Schleifscheibe Ursache für die Welligkeit. Dieses Beispiel macht auch deutlich, dass die gemeinsame Darstellung der Kurven sehr gut geeignet ist, periodische Anteile in den Kurven zu erkennen. Zu ergänzen ist, dass die Qualität beider Verzahnungen hoch ist, und dass die Verzahnung der mechanischen Maschine aufgrund der Streuungen vermutlich sogar die geringere Geräuschanregung erzeugt.

Durch die vielfältigen Darstellungsformen des Programms zur Abweichungsanalyse lassen sich viele Fragestellungen in der Entwicklung, Fertigung und Prüfung schnell und einfach beantworten (Bild 5). Sie erleichtern Aussagen über den Fertigungsprozess, die Werkzeugmaschine und erlauben auch eine Beurteilung der Reproduzierbarkeit des Messgerätes.



Bild 5: Anwendungsmöglichkeiten des Vergleichs von Messungen

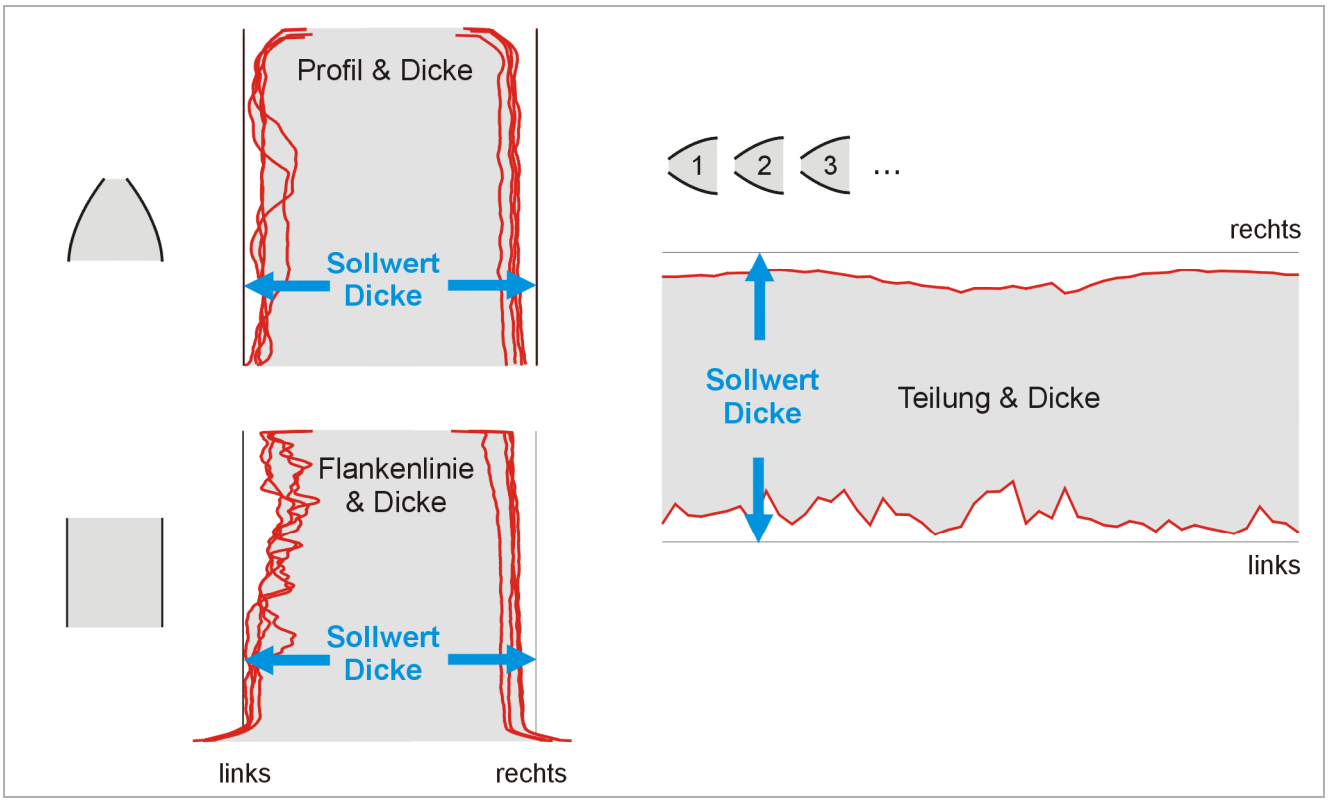


Bild 6: Darstellung der Form- und Zahndickenabweichungen

3. Die Beurteilung der Zahndicke

An einer Laufverzahnung beschreibt die Zahndicke aus Sicht der Funktion das Spiel im Einbauzustand oder das Aufmaß für eine Nachbearbeitung. An einer Steckverzahnung definiert die Zahndicke als entscheidende Größe die Verbaubarkeit und das Spiel zwischen Innen- und Außenverzahnung. Aus geometrischer Sicht stellt die Zahndicke an einer Verzahnung eine Messgröße dar, die sich über dem Durchmesser ändert. Sie ist damit als direktes Maß nur auf Verzahnungs- oder Koordinatenmessgeräten zu ermitteln. In der Praxis wird die Zahndicke indirekt über die Zahnweite oder über das 2-Kugelmaß oder 2-Rollenmaß gemessen. Relativ einfache Handmessmittel erlauben damit die Bestimmung und Regelung dieses Zahndickenmaßes in der Fertigung.

Auf Verzahnungsmessgeräten werden die Profil- und Flankenlinienabweichungen erfasst und als Formabweichungen so dargestellt, dass alle Kurven einzeln eingepasst werden und die Kurven damit keinen Bezug zueinander besitzen. Auch die Teilungsabweichungen besitzen keinen Bezug zur Zahndicke. Die Analysesoftware erlaubt es nun, alle Abweichungskurven lagerichtig zueinander darzustellen. Die Abweichungskurven des Profils und der Flankenlinie (Bild 6) verschieben sich horizontal entsprechend der vorhandenen Teilungsabweichungen und liegen zur Solllinie um die Zahndickenabweichung verschoben. Die Teilungsabweichungen sind ebenfalls vertikal um die Abweichungen der Zahndicke von der Solllinie verschoben. Insgesamt ist auf einen Blick zu erkennen, wie die Formabweichungen zum Nennmaß liegen und dass die Verzahnung im Bild 6 in fast allen Bereichen ein Untermaß

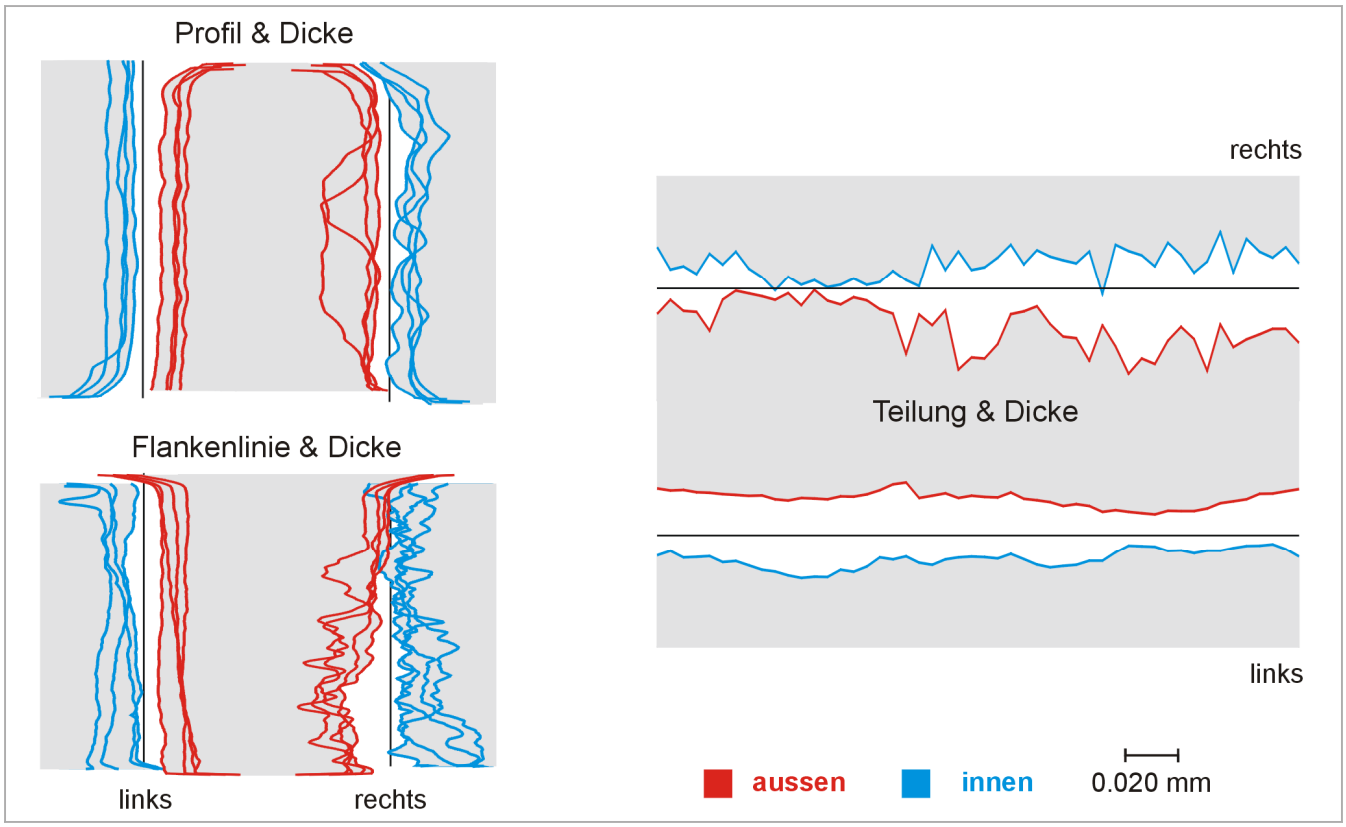


Bild 7: Beurteilung einer Steckverzahnung mit Spielpassung

besitzt. Durch die Möglichkeit des Programms, gleichzeitig mehrere Messungen darzustellen, ist es nun möglich, eine Innen- und eine Außenverzahnung unter Beachtung der Zahndicke miteinander zu vergleichen. Zur besseren Anschauung wird die Materialseite grau dargestellt. Bild 7 zeigt eine Steckverzahnung, die eine Spielpassung aufweist. Diese Werkstücke waren bereits in einer Anwendung verbaut und zeigen auf der rechten Flanke (Lastseite) erhebliche Verschleißerscheinungen, die in dieser Darstellung 'inclusive Zahndicke' sehr einfach als Materialabtrag zu interpretieren sind. Das Beispiel macht deutlich, wie sich durch eine lagerichtige Darstellung von Form- und Dickenabweichungen viele Fragen zum Zusammenbau, aber auch zur Nacharbeit oder zum Vergleich von Werkzeug und Werkstück schnell und einfach beantworten lassen. Diese Art der Auswertung ist sicher kein Ersatz für die Prüfung mit einer Lehre, die eine Steckverzahnung schnell, genau und vollständig auf Verbaubarkeit prüft.

Darstellung Form & Dicke

Möglichkeiten:

- Lagerichtige Darstellung von Form- und Dickenabweichungen
- Darstellung der Materialseite
- Darstellung der Zahndickentoleranzen

Anwendungen:

- Beuteilung des Zusammenbaus
- Prüfung der Nachbearbeitbarkeit
- Vergleich von Werkzeug und Werkstück

Bild 8: Anwendungsmöglichkeiten der gemeinsamen Darstellung von Form und Dicke

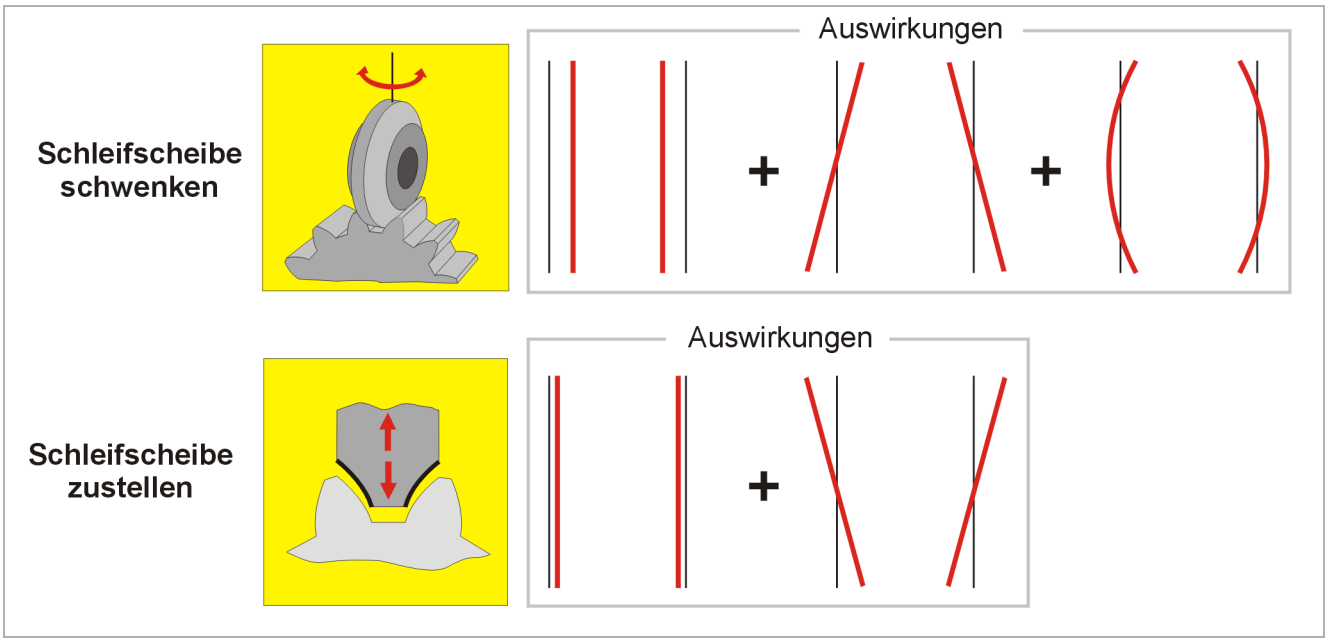


Bild 9: Zahndickeneinstellung beim Profilschleifen mit CBN-Schleifscheiben

Die Abweichungsanalyse kann aber in Verbindung mit einem präzisen Verzahnungsmessgerät besonders in der Entwicklungs- und Erprobungsphase aus den Messergebnissen wichtige Aussagen zur Auslegung von Verzahnungen und zu ihrer Herstellung ableiten.

4. Simulation von Abweichungsursachen und Korrektur von Fertigungsprozessen

Verzahnungen besitzen eine sehr komplexe Geometrie, die mit hoher Genauigkeit herzustellen ist. Treten im Fertigungsprozess Störungen auf, so wirken sich diese auf die Profil-, Flankenlinien- und Teilungsabweichungen aus, allerdings in sehr unterschiedlicher Form und Größe. Um bei einem Qualitätsproblem aus den gemessenen Abweichungen auf die Fehlerursachen schließen zu können, braucht es sehr viel Erfahrung, besonders dann, wenn sich Einflüsse überlagern. In der Praxis beginnt in dieser Situation ein zeit- und kostenintensiver Prozess des Trial-and-Error, der unter hohem Zeitdruck abläuft und häufig nicht zu dauerhafter Verbesserung führt. Eine sichere Korrektur ermöglicht hier das Analyseprogramm, das es zunächst erlaubt, Abweichungsursachen sehr einfach in ihrem Einfluss auf die Messkurven zu simulieren und die entstehenden Abweichungsmuster mit den Messergebnissen zu vergleichen. Sind die Ursachen einer Abweichung identifiziert, so können die Simulationswerte für die Korrektur der Prozessparameter genutzt werden.

In Bild 9 ist dargestellt, wie die Zahndicke beim Schleifen mit CBN-Scheiben eingestellt werden kann. Da diese Schleifscheiben nicht abrichtbar sind, ist der Verschleiß oder eine Veränderung der Schleifmaschine nur durch Schwenken oder Zustellen der Schleifscheibe zu kompensieren. Beim Schwenken stellt sich neben der gewünschten Zahndickenänderung eine unerwünschte Winkelabweichung und eine manchmal gewünschte Balligkeit ein. Durch Zustellung der Schleifscheibe kann die Winkelabweichung kom-

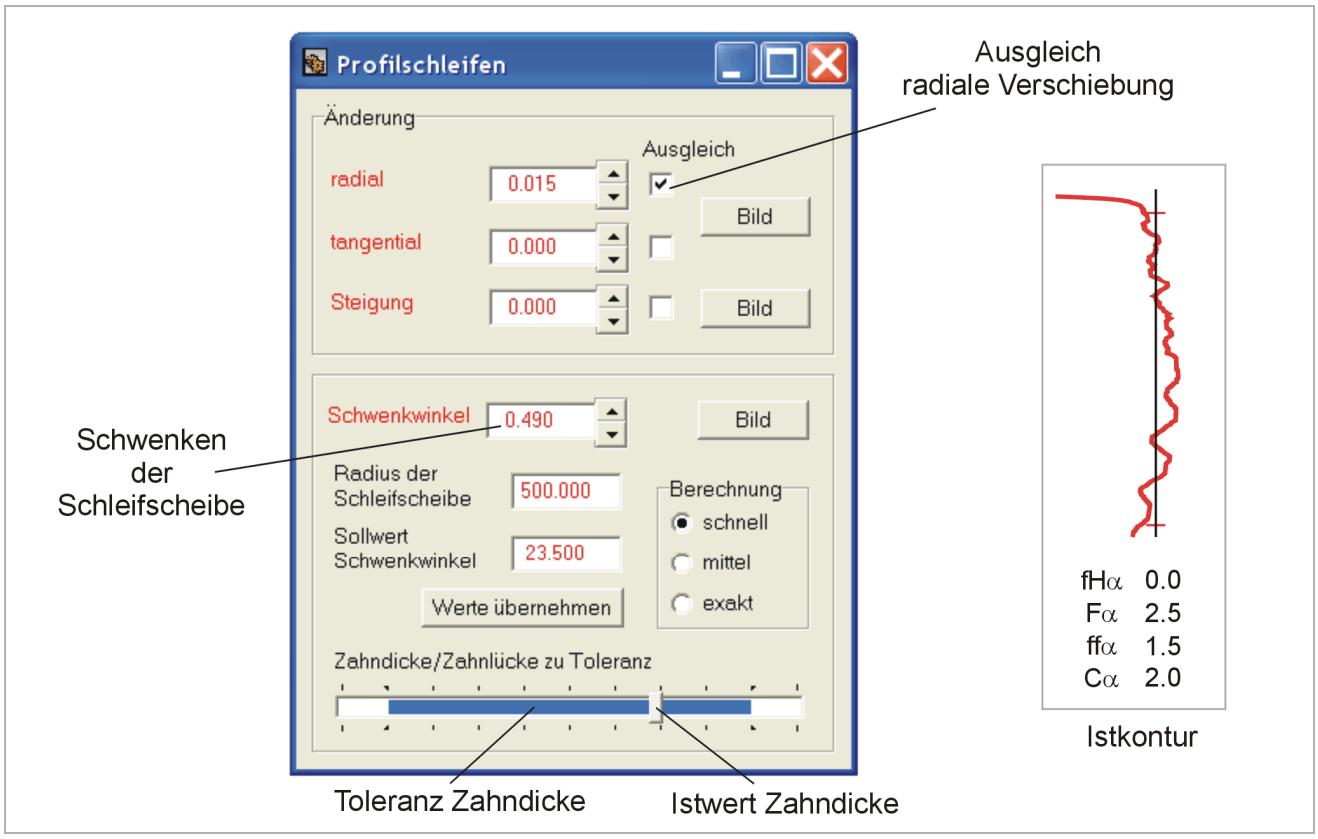


Bild 10: Menüoberfläche zur Simulation des Profilschleifens

pensiert werden, wobei ein Teil der Zahndickenänderung wieder verloren geht.

In Bild 10 ist die Menüoberfläche zur Änderung der Lage der Schleifscheibe gezeigt. Unten wird grafisch die Toleranz der Zahndicke und der aktuelle Istwert der Zahndicke dargestellt. Dieser wird nach jedem Simulationsschritt neu berechnet. Links kann die Schleifscheibe per Mausclick geschwenkt werden. Rechts oben kann die radiale Zustellung der Schleifscheibe manuell oder durch einen automatischen Ausgleich so nachgeführt werden, dass die Winkelabweichung null ist. Alle diese Änderungen spiegeln sich sofort in der Istkontur und den Kennwerten wider. Insbesondere die entstehende Balligkeit kann mit diesem Verfahren erstmals genau vorhergesagt werden. Ist das Optimum erreicht, so stehen die Werte direkt für die Korrektur der Schleifmaschine zur Verfügung.

Eine Laufverzahnung wird in ihrer Funktion wesentlich durch die Lage der Verzahnung zur Drehachse beim Einbau bestimmt. Die Ursache von Lageabweichungen liegt im Herstellungsprozess, unter Umständen aber auch in einer mangelhaften Aufrichtung der Verzahnung beim Messen. Geometrisch werden Lageabweichungen, wie im Bild 11 oben dargestellt, als Exzenter oder Taumel der Verzahnung beschrieben, in den Messergebnissen erzeugen Sie eine Schwankung der Profil- und Flankenlinienkurven und phasenversetzte, sinusförmige Rundlauf- und Teilungsabweichungen (Bild 11 links). Ist ein Lagefehler vorhanden, wird die weitere Beurteilung der Verzahnung sehr erschwert. In dieser

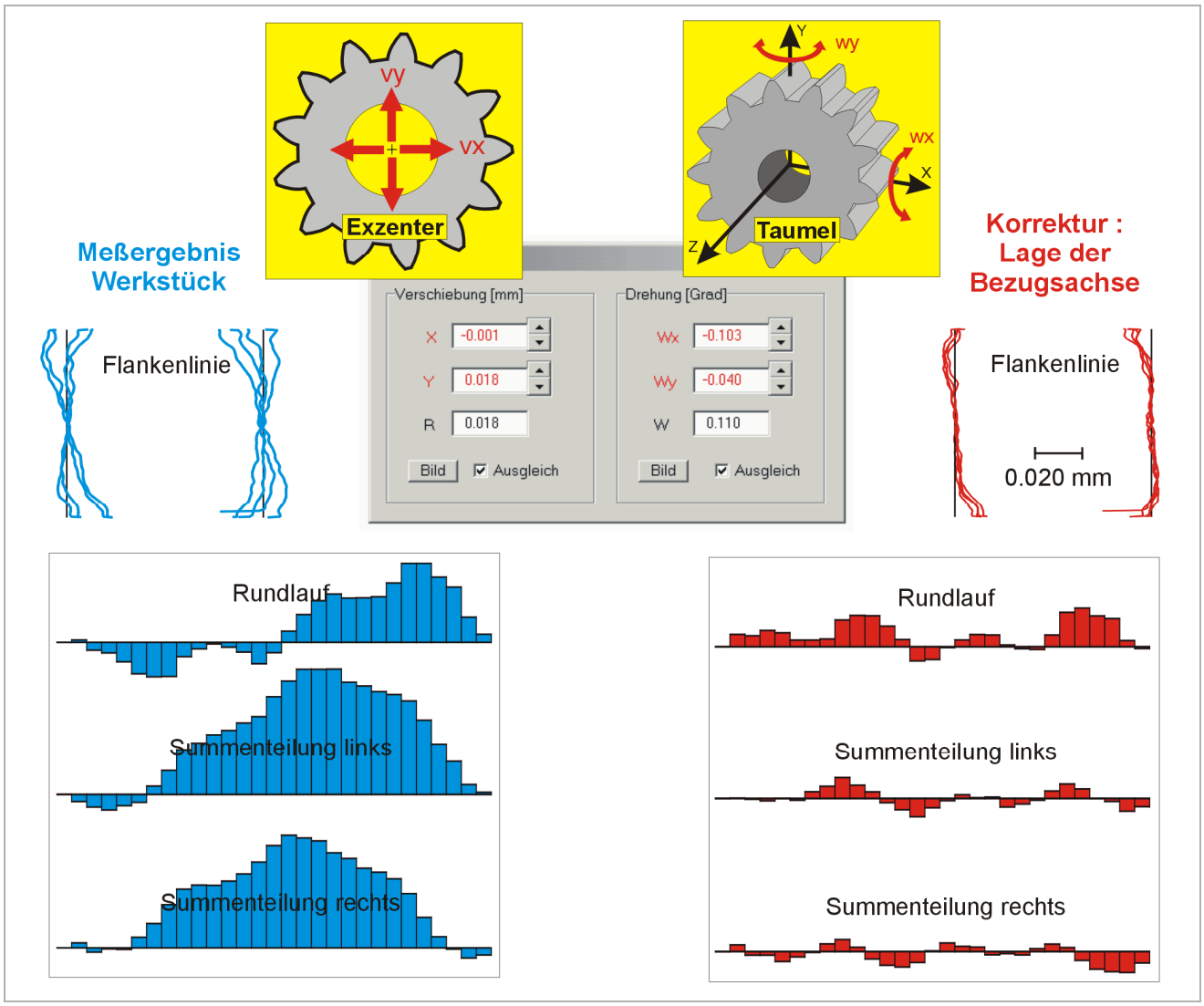


Bild 11: Korrektur Lageabweichung der Bezugsachse

Situation erlaubt das Analyseprogramm eine interaktive Änderung der Lage der Bezugsachse und vor allem die Berechnung einer optimalen Lage (Bild 11 rechts). In dieser optimalen Lage werden nun die weiteren Fehler der Verzahnung deutlich sichtbar und können analysiert und verbessert werden. Gelegentlich zeigt sich auch, dass Schwankungen in den Kurven und sinusförmige Teilungsverläufe auftreten, die in der Praxis einfach, aber fälschlicherweise als Lageabweichung interpretiert werden. Eine Ausrichtung durch das Analyseprogramm kann diese Abweichungen nicht beseitigen, so dass dann deutlich wird, dass im Herstellungsprozess tatsächlich andere Abweichungsursachen wirksam sind.

Zusammenfassend besitzt das Analyseprogramm eine Vielzahl von Möglichkeiten, Abweichungsursachen zu simulieren und Korrekturen für verschiedene Fertigungsverfahren abzuleiten. Die Simulationen lassen sich frei überlagern und erlauben so die Beurteilung komplexer Szenarien mit mehreren Abweichungsursachen.

Simulation & Korrektur

interaktive Änderung:

- Lage der Achse (Taumel + Exzenter)
- Nenngeometrie der Evolvente
- Lage der Schleifscheibe
- Ausdehnung durch Temperatur
- Schrumpfung durch Ur- und Umformen

Ziel:

- Simulation von Ursachen und Einflüssen
- Korrekturwerte für die Fertigung

Bild 12: Anwendungsmöglichkeiten der Simulation und Korrektur

5. Welligkeitsauswertung

Ein neues Feature des Analyseprogramms ist die Welligkeitsauswertung. Ausgehend von den berechneten Abweichungskurven des Profils und der Flankenlinie wird dabei für jede Kurve ein Frequenzspektrum berechnet und dargestellt. Innerhalb eines einstellbaren Frequenzauswertebereiches wird das größte lokale Maximum gekennzeichnet. Diese Frequenz wird in die Abweichungskurve eingezeichnet und als Kennwert in Amplitude und Wellenzahl ausgegeben. Per Mausclick können schrittweise die nächsten Frequenzen bestimmt werden. Dazu wird jeweils die Ausgangskurve um die Maximalfrequenz redu-

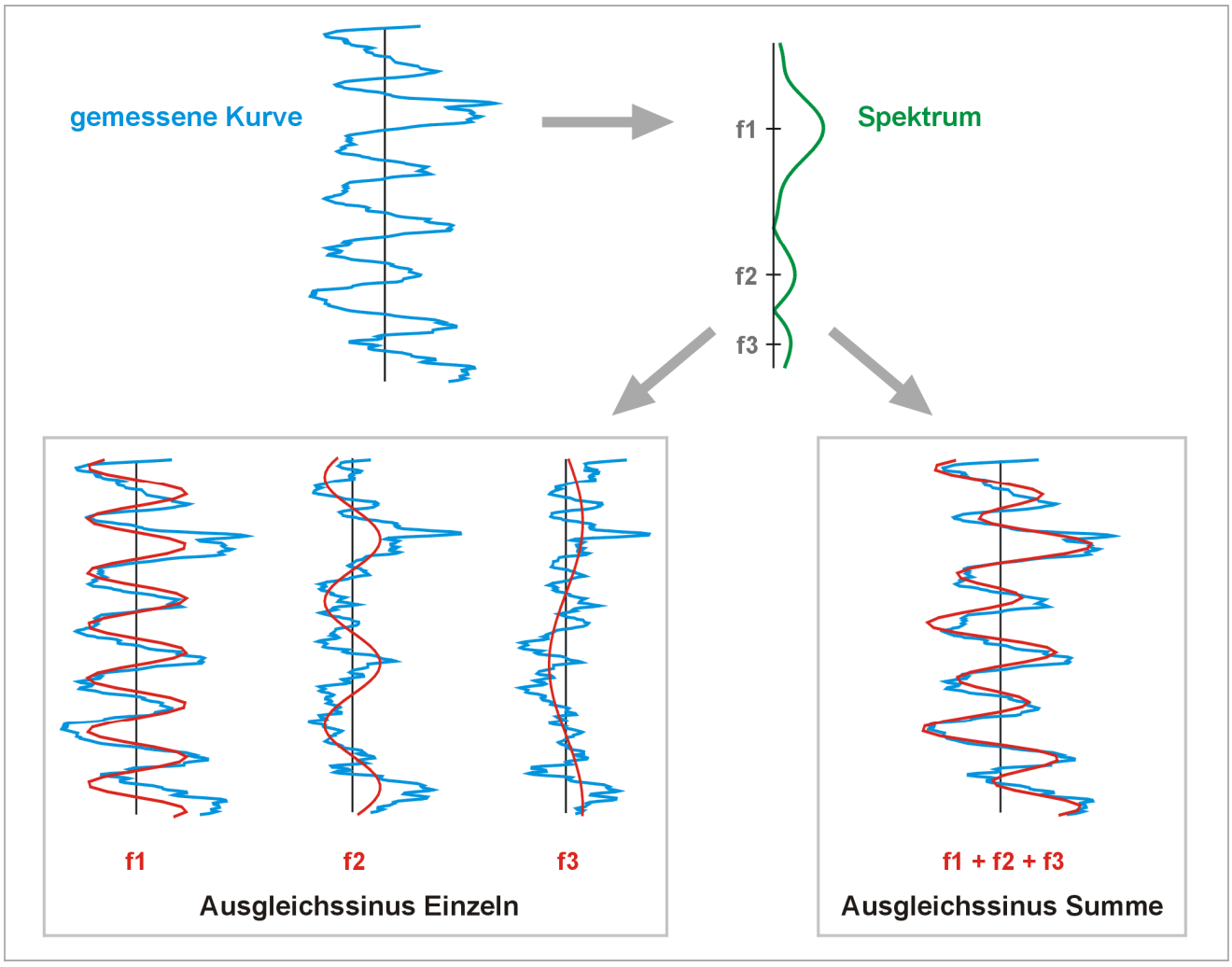


Bild 13: Welligkeitsanalyse einer Profilkurve

ziert. Aus den verbleibenden Abweichungen wird ein neues Spektrum berechnet und eine neue maximale Frequenz bestimmt. Wie Bild 13 zeigt, können die berechneten Frequenzen nicht nur einzeln, sondern als Summenkurve gezeichnet werden, um zu sehen, wie gut die Sinuskurven die tatsächliche Abweichungskurve annähern. Die Welligkeitsanalyse ist dabei voll in das Programm integriert, so dass sich z.B. durch die Funktion der gemeinsamen Darstellung auch die Spektren vergleichen lassen. Als Berechnungsverfahren für das Spektrum kann wahlweise die Fast-Fourier-Transformation (FFT) oder ein Ausgleichsinus gewählt werden. Dabei liefert der Ausgleichsinus gerade bei niedrigen Frequenzen genauere Amplituden. Die Welligkeitsanalyse erlaubt damit auch die Untersuchung und Beschreibung von S-förmigen Kurvenverläufen.

Eine erste Anwendung dieser neuen Auswertemöglichkeit ist in Bild 14 dargestellt. Die Getriebe eines Automobilherstellers erzeugten nach Montage einer neuen Charge geschliffener Zahnräder eines Zulieferers unerwünscht hohe Geräusche. Der Vergleich der Messergebnisse einer neuen und einer alten, 'leisen' Verzahnung zeigt, bedingt durch die Abrichtung der Schleifscheibe, gleiche Frequenzen im Profil, allerdings höhere Amplituden. Die Flankenlinie weist eine deutliche Veränderung von Frequenz und Amplitude auf, verursacht durch eine Vorschuberhöhung beim Schleifen. Ausgehend von diesen Ergebnissen werden nun Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, für diese Verzahnung Grenzwerte für Amplitude und Frequenz festzulegen.

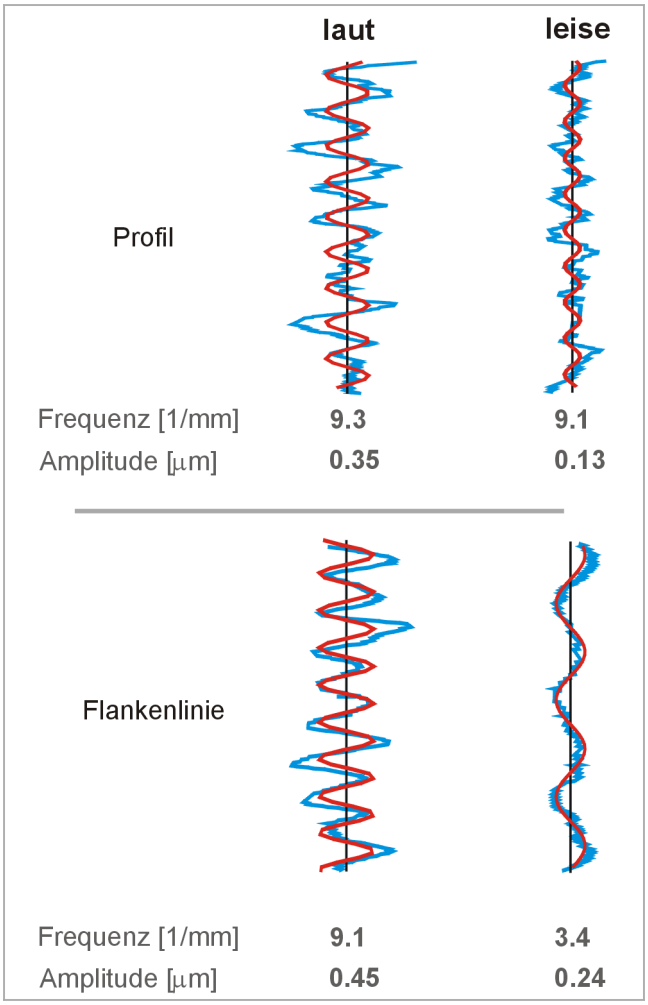


Bild 14: Welligkeit an einer lauten und einer leisen Verzahnung

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die moderne Verzahnungsmesstechnik hat nicht nur die Aufgabe Verzahnungen möglichst schnell und sicher zu prüfen, sie muss zunehmend die Fertigung bei der Suche nach Abweichungsursachen und bei der Bestimmung von Korrekturparametern unterstützen. Das vorgestellte Programm zur Abweichungsanalyse erfüllt diese Aufgabe in vielfältiger Form so, wie auch in der Praxis die Ursachen und Fragestellungen vielfältig sind. Dabei kann dieses Programm ein Verständnis der komplexen geometrischen und fertigungstechnischen Zusammenhänge an einer

Verzahnung nicht ersetzen. Es kann aber durch seine einfache Bedienung und die schnelle Darstellung von Parameteränderungen diese Zusammenhänge sehr gut verdeutlichen und dem helfen, der Fragen hat.

Besonders hervorzuheben ist die neue und einzigartige Möglichkeit, eine Welligkeitsanalyse an den Messkurven durchzuführen. Der Anwender kann damit bei Geräuschproblemen eine periodische Oberflächenstruktur der Verzahnung erkennen und durch Kennwerte beschreiben.

Die weitere Entwicklung wird darin bestehen, die Abweichungsmuster anderer Fertigungsprozesse abzubilden und für Simulation und Korrektur zur Verfügung zu stellen. Dabei sind aufgrund des flexiblen Programmaufbaus auch kundenspezifische Fragestellungen sehr gut zu integrieren. Das größte Potential liegt allerdings im Vergleich von Messungen. Moderne Datenbanktechniken erlauben es, alle Messungen strukturiert zu speichern und durch leistungsfähige Abfragetools schnell und gezielt für eine nachträgliche Analyse bereitzustellen. Die Tansparenz der gefertigten Qualität und die Fähigkeit zur schnellen Problemlösung können sich damit noch einmal deutlich erhöhen.

7. Literatur

[1] DIN 3960: Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder und Stirnradpaare mit Evolventenverzahnung, 1987.

[2] VDI/VDE-Richtlinie 2607: Rechnergestützte Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil, 2000

[3] Gravel, G.: Beurteilung abbildend hergestellter Stirnräder mit Hilfe der Koordinatenmeßtechnik, Dissertation Universität Hannover, 1996.

[4] Gravel, G.: Qualitätssicherung von Zahnwellenverbindungen, VDI-Seminar Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen, Chemnitz, 2001.

[5] Liebherr Verzahntechnik: Verzahntechnik, Kempten, 2004

[6] Mikoleizig, G.: Aktuelle Tendenzen bei der Einzelfehlerbestimmung an Verzahnungen, VDI-Bericht 1880, 2005

[7] Trapp, H.-J.: Meß- und Korrekturstrategien für den Closed Loop in der Zahnradfertigung, VDI-Bericht 1673, 2002