Simulation und Korrektur von Fertigungsabweichungen

Qualitätsregelkreis Zahnradproduktion

Prof. Dr.-Ing. **G. Gravel**, HAW Hamburg;

Kurzfassung

Vorgestellt werden Analyseverfahren, die den Aufbau von Qualitätsregelkreisen in der Zahnradfertigung unterstützen. Neben leistungsfähigen graphischen Darstellungsformen wird eine Methode zur Analyse von Welligkeiten an Verzahnungen beschrieben. Ein neues Softwaretool erlaubt die exakte Simulation von wesentlichen Abweichungen beim Wälzfräsen und Wälzschleifen. Damit wird die Bestimmung von Abweichungsursachen und die Ableitung von Korrekturparametern unterstützt.

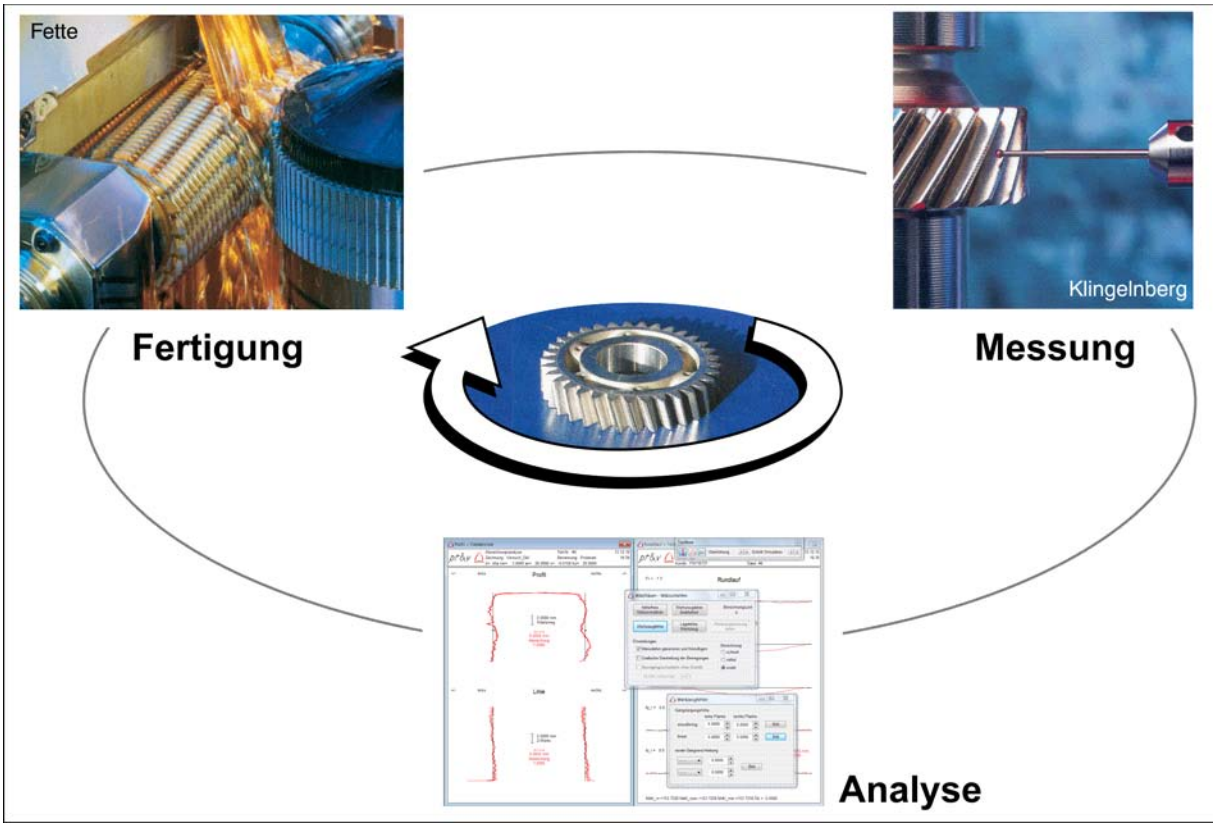


Bild 1: Qualitätsregelkreis Zahnradproduktion

1. Aufbau von Qualitätsregelkreisen

Die Fertigung von Bauteilen mit engen Toleranzen stellt hohe Anforderungen an die Fertigungseinrichtungen. Diese sind idealerweise so robust auszulegen, dass alle auftretenden Störgrößen keinen Einfluss auf die hergestellte Qualität haben. Aus wirtschaftlichen und technischen Gründen ist dieses Ziel oft nicht erreichbar, so dass regelmäßig der Aufbau von Qualitätsregelkreisen z.B. zur Korrektur von Werkzeugverschleiß notwendig wird. Während oder nach der Fertigung erfolgt die Messung des Bauteils und anschließend die Rückführung von Korrekturen in den Fertigungsprozess. Sind die Störgrößen und ihr Einfluss auf das Fertigungsergebnis bekannt, so wird die Korrektur automatisch bestimmt und zurückgeführt. Mindestens in der Aufbauphase dieser Regelkreise, aber auch bei der Prozessoptimierung oder der Suche nach Störgrößen und ihren Auswirkungen ist eine detaillierte Analyse der Messergebnisse notwendig. Die dabei eingesetzten Verfahren sollen vorgestellt werden.

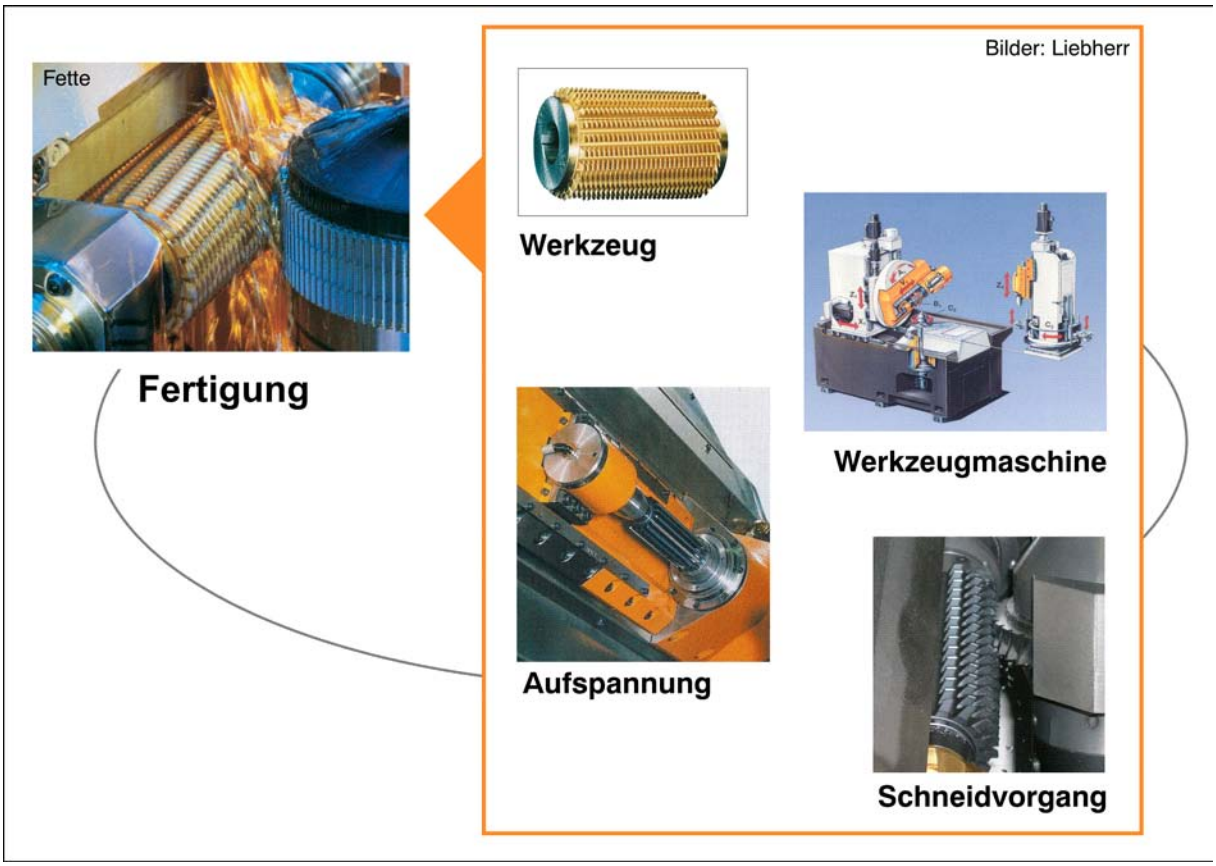


Bild 2: Einflüsse auf die Zahnradfertigung

Beispielhaft sind in Bild 2 für den Wälzfräsprozess grundlegende Kategorien der Einflussgrößen auf das Bearbeitungsergebnis dargestellt. Abweichungen am Werkzeug, wie z.B. ein Steigungsfehler, spiegeln sich in der Profilform wider. Aufspannfehler des Werkzeuges bewirken einen Taumel und damit eine Ungleichförmigkeit des Schneideneingriffs. Eine nicht

gerade axiale Führung des Werkzeugs erzeugt eine entsprechend ungerade Flankenlinie. Schließlich bestimmt der Schneidprozess mit den Einflussgrößen Werkstoffe, Kräfte, Schmierung und Kühlung mit entsprechenden Rückwirkungen auf die anderen Kategorien wesentlich die Genauigkeit des Werkstücks. Bei der Suche nach den Ursachen einer Abweichung ist es sehr günstig, wenn der Fehler einer Kategorie zugeordnet werden kann, denn es ist keine gute Lösung, ein Werkzeug oder sogar eine Werkzeugmachine vollständig zu überprüfen, wenn die Abweichungsursache in einem taumelnden Fräser liegt.

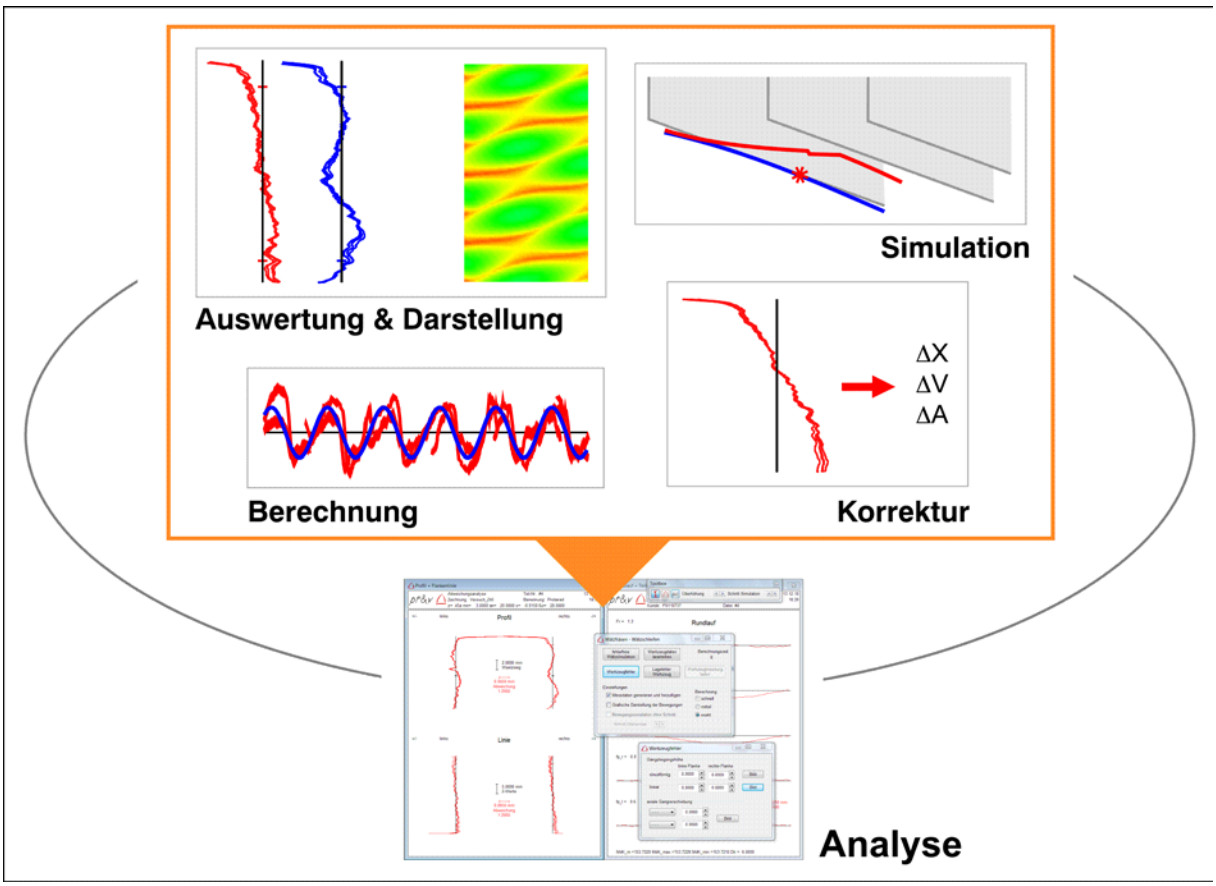


Bild 3: Möglichkeiten der Analyse

In Bild 3 sind einige wesentliche Methoden der Abweichungsanalyse von Messungen an Verzahnungen dargestellt, die im Folgenden anhand von praktischen Beispielen erläutert werden und die auch als Softwarelösungen zur Verfügung stehen.

2. Kennwerte und grafische Darstellung

Üblicherweise werden nach einer Messung die Abweichungen graphisch dargestellt sowie Kennwerte berechnet, die eine Aussage über die Qualität der Verzahnung erlauben. Sollen Veränderungen im Prozess beurteilt werden, ist häufig die statistische Betrachtung der Kennwerte über mehrere Werkstücke ein gutes Mittel, um statistisch abgesicherte Aussagen

abzuleiten. Werden die gesuchten Effekte durch die berechneten Kennwerte weniger gut beschrieben, so kann der graphische Vergleich der Abweichungskurven hilfreich sein [1].

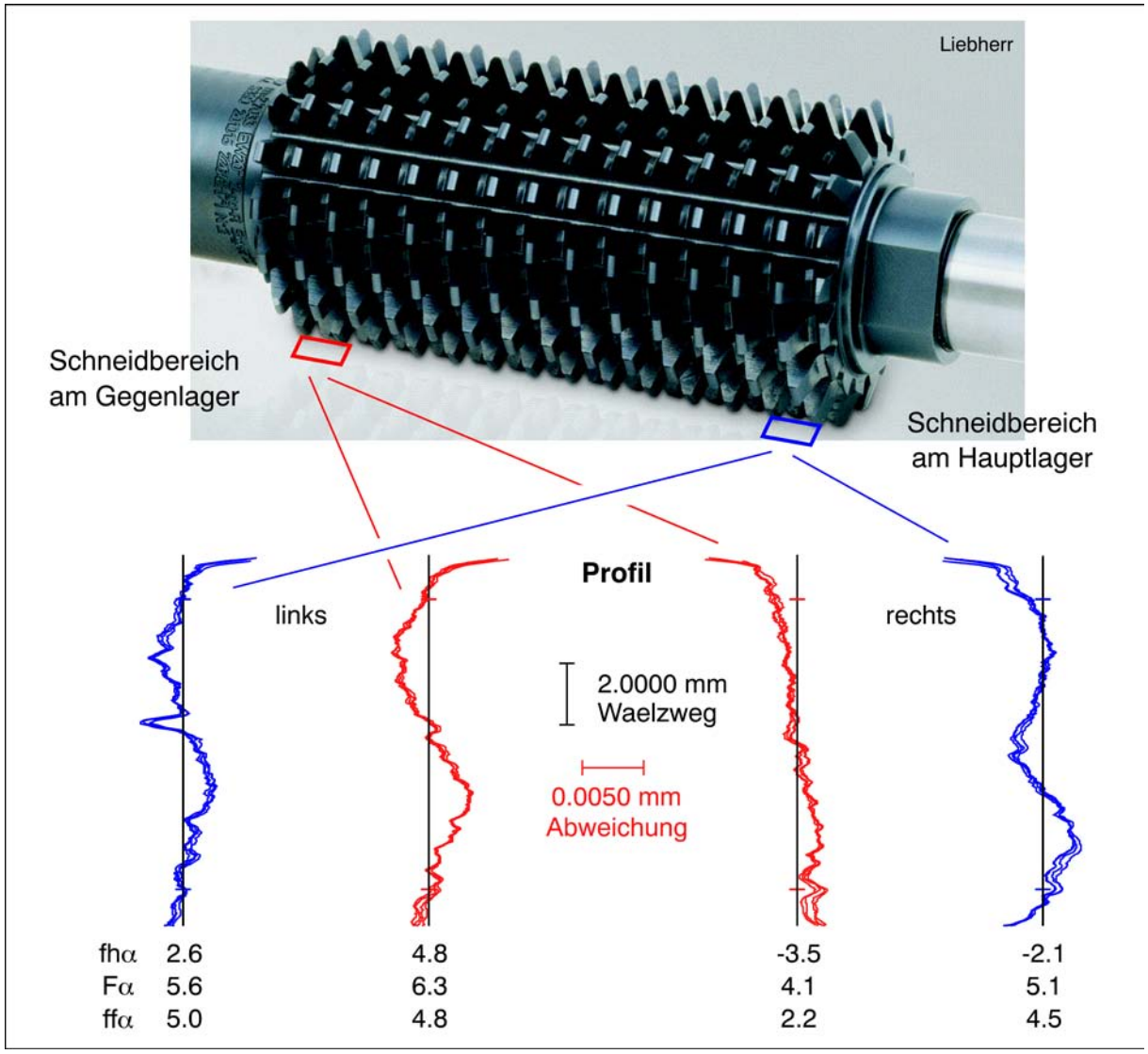


Bild 4: Vergleich von Messergebnissen

In Bild 4 sind die Messergebnisse an zwei Werkstücken gegenübergestellt, die mit einem Werkzeug an zwei verschiedenen Shiftpositionen gefertigt wurden. Die gemeinsame Darstellung aller Zähne eines Zahnrades zeigt, dass die Herstellung der Zähne sehr gut reproduzierbar erfolgt. Je nach Werkzeugposition ergeben sich allerdings sehr unterschiedliche systematische Formabweichungen. Im nächsten Schritt kann nun die Suche der Abweichungsursache erfolgen, auf die später eingegangen wird. Ist die Ursache bekannt und tritt diese Form der Abweichung wiederholt auf, so können andere oder auch neue Kennwerte für eine Charakterisierung oder zur Ableitung von Korrekturparametern bestimmt werden. Damit ist dann auch eine statistische Betrachtung sinnvoll.

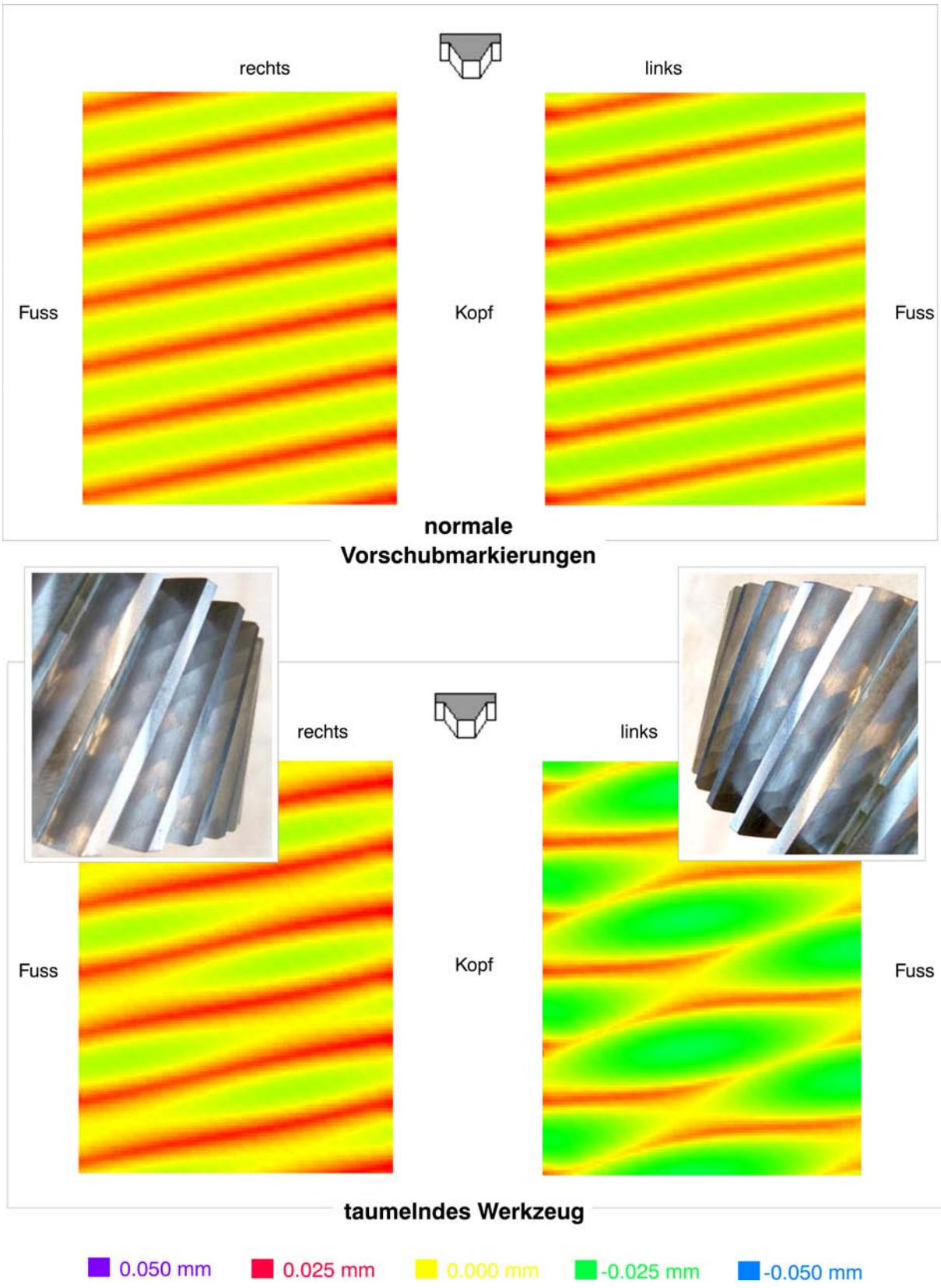


Bild 5: Darstellung topographischer Abweichungsmuster an einer wälzgefrästen Verzahnung

Bei der Prüfung der Verzahnung ist die Messung des Profils und der Flankenlinie in der Mitte der Zahnflanke üblich. Durch eine gewünschte Balligkeit der Flankenlinie kann sich im Fertigungsprozess das Profil über der Zahnradbreite ändern. Dann erfolgt in der Regel zusätzlich die Messung der Verschränkung an den Rändern der Zahnflanke. Treten auf der Zahnflanke komplexere Abweichungsverläufe auf, so kann es hilfreich sein, eine Topografiemessung mit vielen Profilschnitten durchzuführen. Neben der Darstellung der Abweichungen in 3D-Form kann die farbcodierte Darstellung der Flanke die Beurteilung von Abweichungsmustern erleichtern. Bild 5 zeigt dazu oben die Topografie einer wälzgefrästen Verzahnung. Die durch den recht hohen Axialvorschub erzeugten Vorschubmarkierungen sind als periodische Struktur deutlich zu erkennen. Weist das Werkzeug nun einen großen Taumelfehler auf, so ergibt sich auf der linken Flanke der Verzahnung unten im Bild 5 ein komplexeres Abweichungsmuster, dass sich auch optisch auf den Zahnflanken widerspiegelt. Eine reine Flankenlinienmessung wird hier je nach Messdurchmesser einen sehr unterschiedlichen Formverlauf aufweisen. Die flächige Messung und Darstellung erklärt diesen Zusammenhang und erleichtert die Beurteilung komplexer Abweichungsmuster.

3. Berechnung und Simulation

Neben der grafischen Darstellung werden in der Analyse häufig Werkzeuge eingesetzt, die aus den Abweichungen besondere Kennwerte berechnen oder die Abweichungen in funktionaler Weise verdichten und verknüpfen. In der Kegelradoptimierung ist die Zahnkontaktanalyse bekannt [2], die dazu dient, das tatsächliche Tragbild und das Wälzverhalten zweier Kegelräder aus den Messergebnissen vorherzusagen und die Maschineneinstellungen entsprechend zu optimieren.

Im Hinblick auf das Geräuschverhalten von Stirnrädern treten immer wieder sogenannte Geisterfrequenzen auf, deren Ursache oft in Maschinenschwingungen liegt [3]. Diese Schwingungen bilden sich geometrisch auf den Zahnflanken in Form von Welligkeiten mit veränderlicher Phasenlage ab. Durch die Verknüpfung der Abweichungen entsprechend dem Drehwinkel lässt sich eine gemeinsame, geschlossene Abweichungskurve aller Zähne im Profil oder in der Flankenlinie über dem Umfang erzeugen, wie Bild 6 oben aufzeigt [4]. Entsprechend der Profil- oder Sprungüberdeckung überlappen sich die Kurven der einzelnen Zähne. Das Frequenzspektrum dieser Welligkeit lässt sich durch Ausgleichssinusfunktionen berechnen. Die Ergebnisse korrelieren gut mit den auf das Zahnrad bezogenen Geräuschspektren und liefern Hinweise auf Eigenfrequenzen der Maschine oder Schwachstellen in der Werkzeug- oder Werkstückspannung.

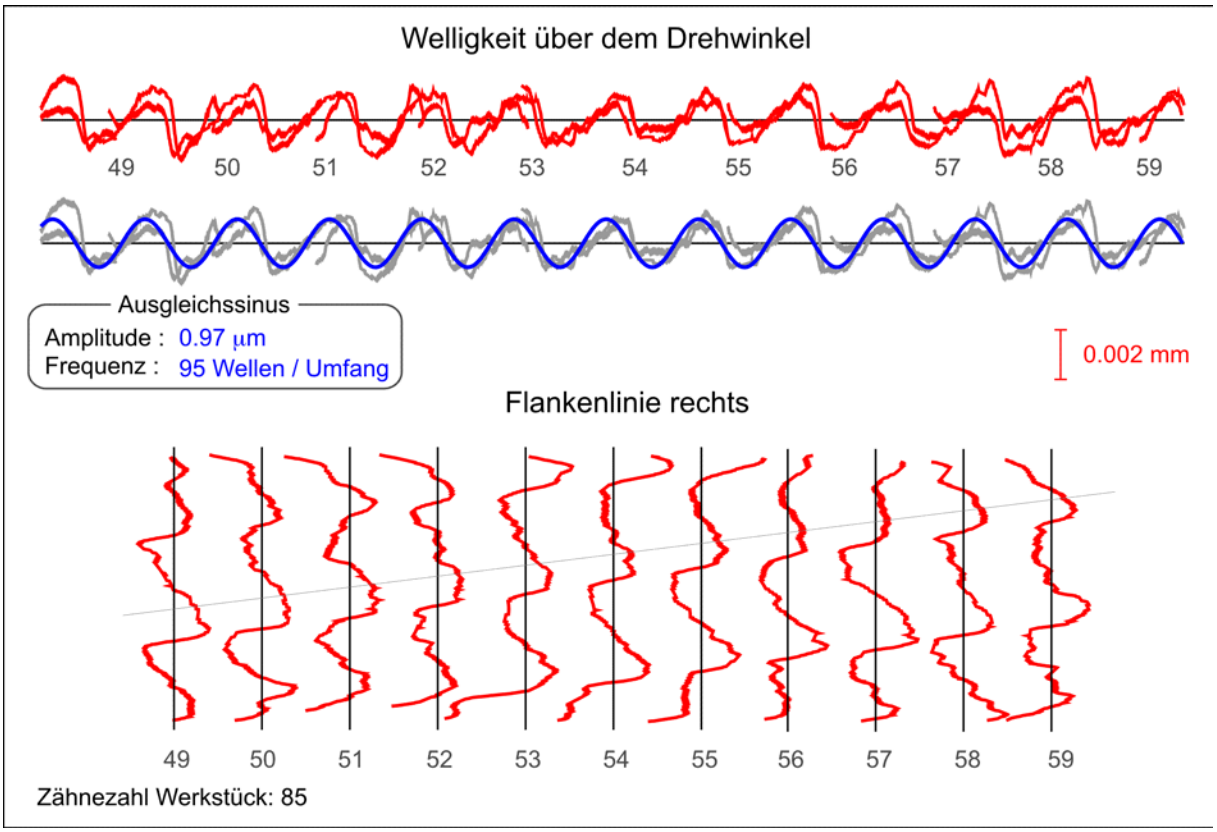


Bild 6: Berechnung von Welligkeitskennwerten

Eine weitere Möglichkeit der Analyse von Abweichungen ist der Vergleich mit Simulationsergebnissen. Für die Fertigungsprozesse Wälzfräsen und Wälzschleifen [5] wurde im SIGMA-Pool ein neues Simulationstool entwickelt, dass es erlaubt, die im Herstellprozess entstehenden Abweichungen zu berechnen. Dazu werden für das Wälzfräsen alle Schneiden des Werkzeuges abgebildet und mit der Kinematik der Werkzeugmaschine bewegt. In der anschließenden Schnittberechnung wird der Berührpunkt von Werkzeugschneide und Werkstück an den simulierten Messpunkten bestimmt. Damit kann die hergestellte Kontur berechnet werden, wie sie auch in Bild 5 dargestellt ist. Am Werkzeug können nun zusätzlich per Mausclick Lagefehler des Werkzeugkörpers verursacht durch Fehler bei der Aufspannung oder systematische Lageabweichungen einzelner Schneiden erzeugt werden. In Bild 7 sind die in der Software umgesetzten systematischen Werkzeugfehler in der Gangsteigung und Gangverschiebung beschrieben.

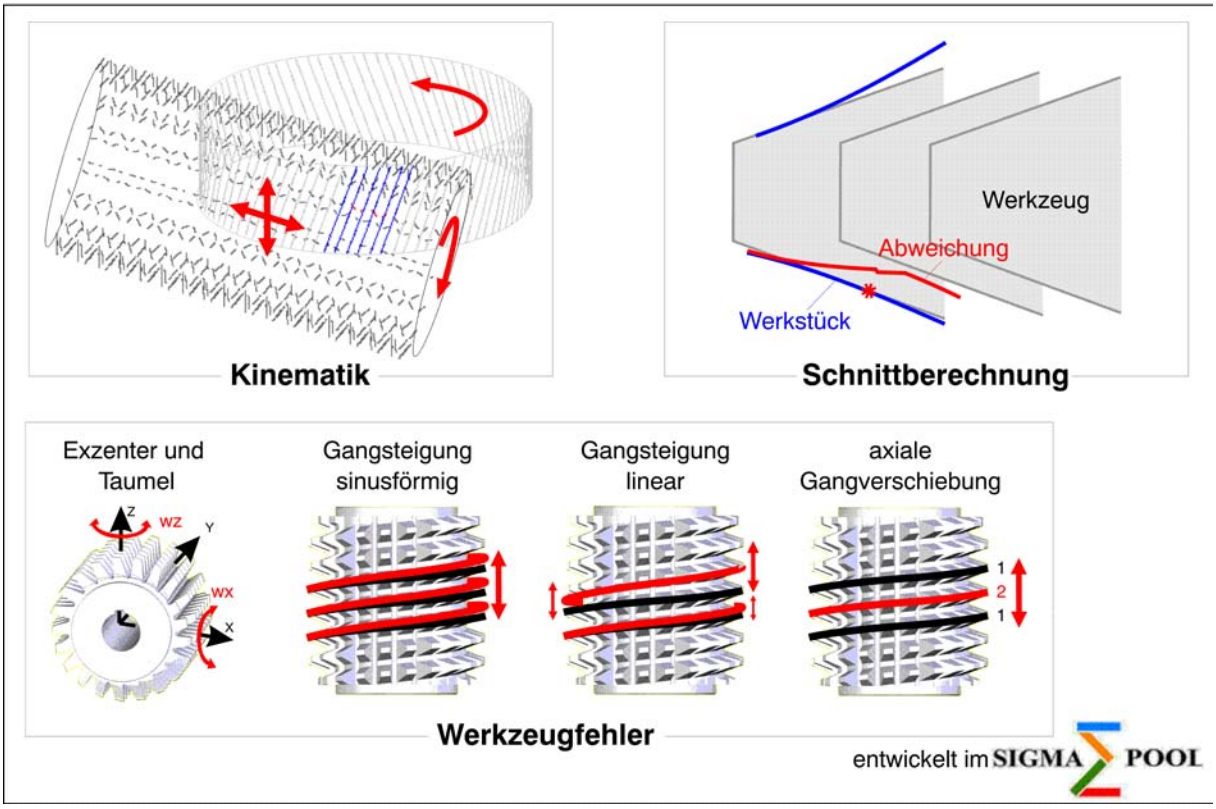


Bild 7: Simulation von Abweichungen beim Wälzfräsen und Wälzschleifen

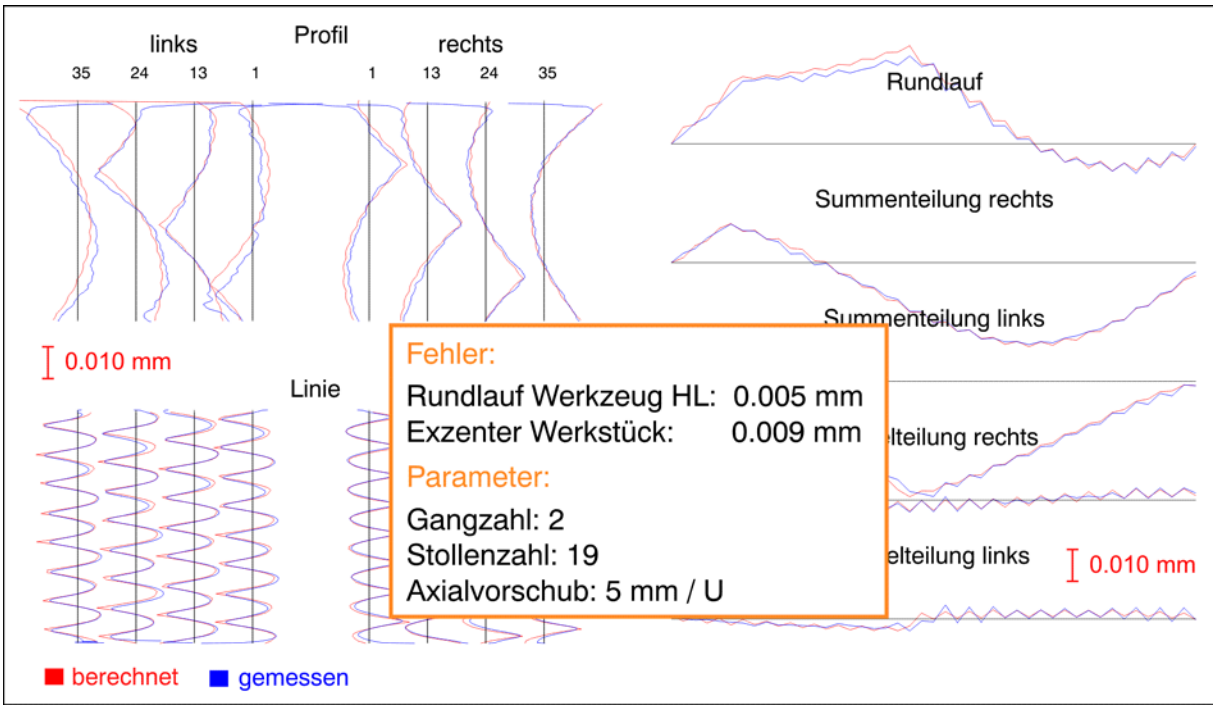


Bild 8: Vergleich von gemessenen und berechneten Abweichungen

Ein Vergleich von berechneten und gemessenen Abweichungen an einer Verzahnung, die große Vorschubmarkierungen aufweist, ist in Bild 8 dargestellt. Zusätzlich wird am Hauptlager des Werkzeugs eine Rundlaufabweichung von 0.005 mm simuliert. Der Werkstückmessung wird ein Exzenter von 0.009 mm überlagert. Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Allerdings erfordern die komplexen Zusammenhänge und vielen Abhängigkeiten für den Vergleich von Messung und Simulation eine einfache und schrittweise Bedienung. Hilfreich ist hier besonders das Einblenden der gemessenen Abweichungen während der Simulation.

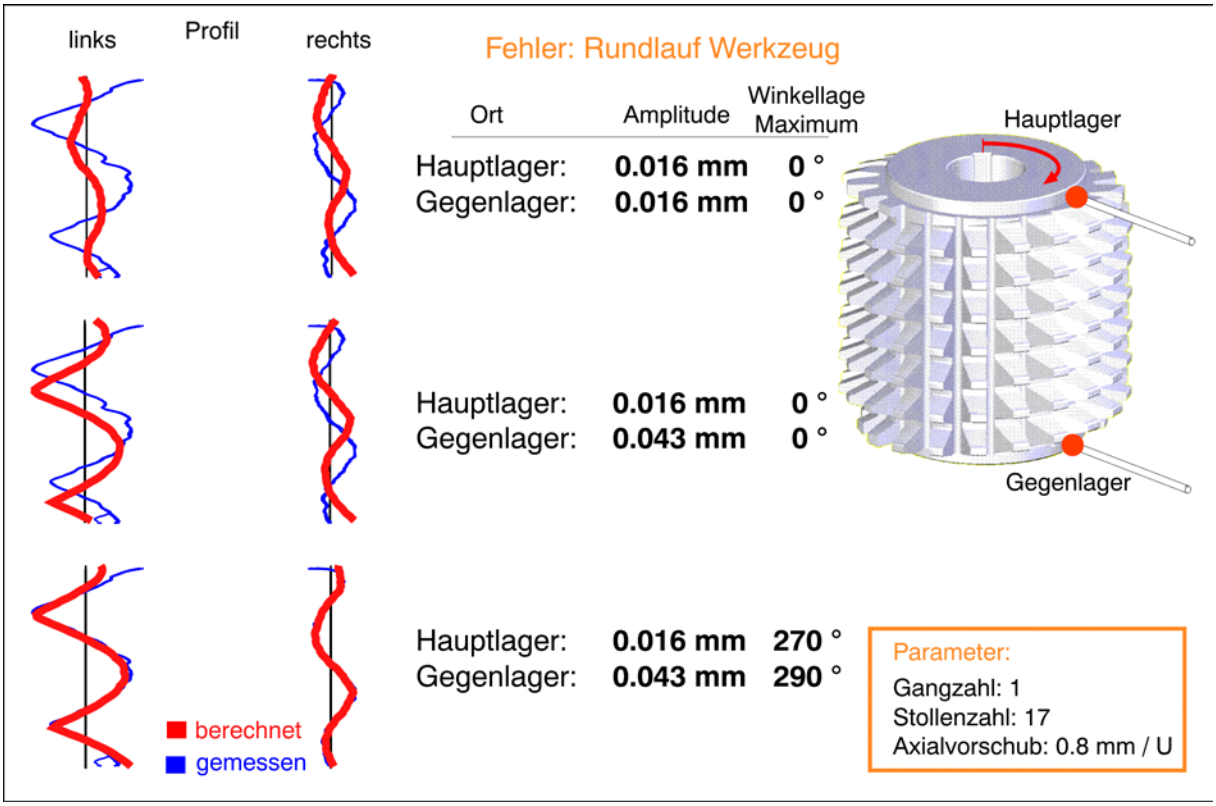


Bild 9: Schrittweise Simulation und direkter Vergleich bei komplexen Abweichungsmustern

In Bild 9 links sind die Abweichungen im Profil dargestellt, die sich beim Taumel des Wälzfräsers ergeben. Durch den geringen Axialvorschub treten nur geringe Vorschubmarkierungen auf, das Zahnrad wird fertiggefräst. Wird ein Rundlauf von 0.016 mm an Haupt- und Gegenlager simuliert, so stimmt die Amplitude auf der rechten Flanke mit den Messergebnissen überein. Ein Rundlauf von 0.043 mm am Gegenlager erzeugt eine passende Amplitude auf der linken Flanke. Über eine schrittweise Veränderung der Winkellage des Rundlaufmaximums an Haupt- und Gegenlager wird schließlich die gleiche Phasenlage der Abweichungen erreicht. Diese Rundlaufabweichungen stimmen mit den Einstellungen im Versuch überein.

Zusammenfassend erlaubt es das neuentwickelte Simulationstool, wesentliche Abweichungen im Wälzfräs- und Wälzschleifprozess mit hoher Genauigkeit zu simulieren und so die Suche nach Abweichungsursachen zu unterstützen.

4. Rückführung von Korrekturwerten

Lassen sich Abweichungsursachen nicht beseitigen oder treten die Abweichungen bei jedem Werkzeug- oder Chargenwechsel verändert auf, so wird man versuchen, automatische, geschlossene Regelkreise mit wenig Bedienereingriff aufzubauen. Bild 10 zeigt einen Regelkreis zur Korrektur der Lage einer Profilschleifscheibe wie er in vielen Schleifprozessen realisiert ist. Das Werkstück wird in der Werkzeugmaschine [6] oder auf einem Verzahnungsmessgerät geprüft. Aus den Winkelabweichungen des Profils und aus der Zahndicke lassen sich Korrekturen für die Lage der Schleifscheíbe bestimmen. Anspruchsvolle Tools können als zusätzlichen Freiheitsgrad auch das Schwenken der Schleifscheibe für die Optimierung nutzen. Die integrierte Messung in der Werkzeugmaschine bietet den Vorteil einer einfachen automatischen Korrektur in der Bearbeitungssoftware. Allerdings werden in dieser Messung Abweichungen durch Temperaturgang oder Fehler der Maschinenachsen nicht erfasst.

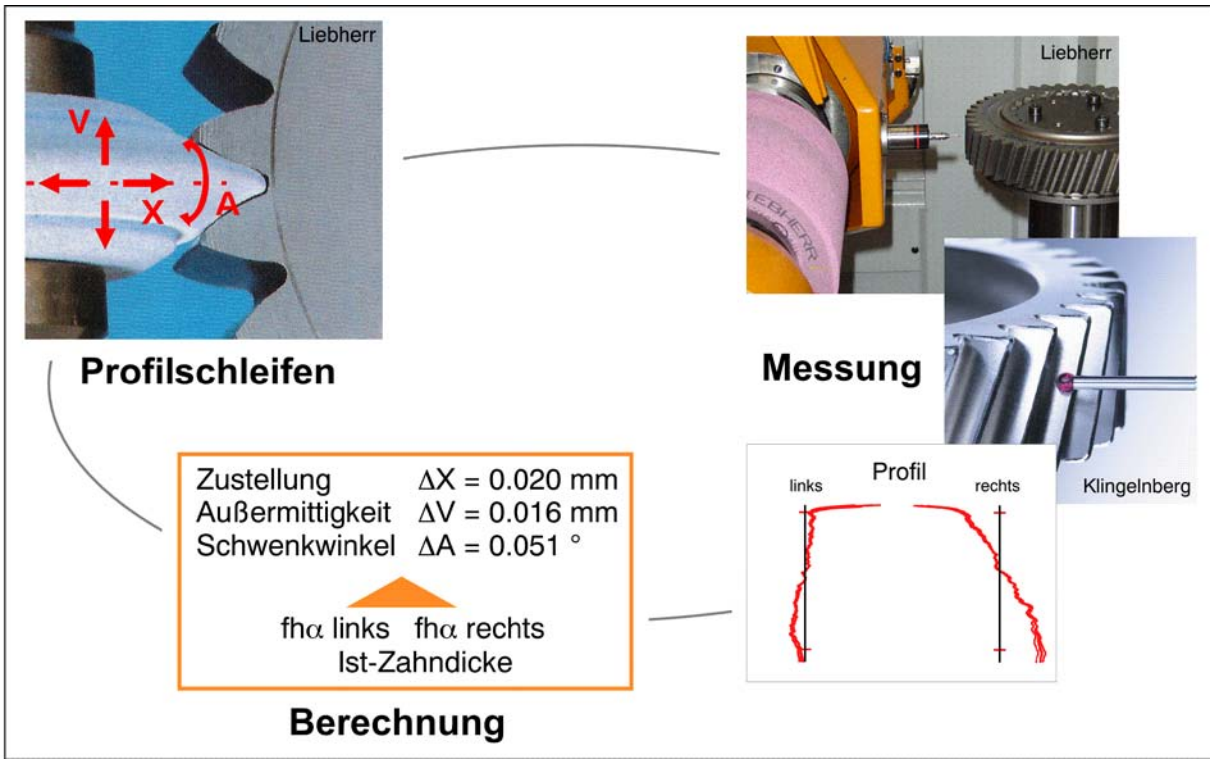


Bild 10: Bestimmung von Korrekturwerten zur Prozessregelung

Ein weiteres Beispiel für den Aufbau geschlossener Regelkreise findet sich in der Fertigung sehr genauer Kegelräder [7]. Durch die vielen Freiheitsgrade der Werkzeugmaschine sind die Zusammenhänge bei der Erzeugung der Zahnflanke sehr komplex, allerdings eröffnen diese Freiheitsgrade auch viele Korrekturmöglichkeiten. Auf der Basis spezieller Softwaretools wird hier seit langem eine erfolgreiche Optimierung der Kegelradfertigung praktiziert.

5. Zusammenfassung

Eine hochgenaue Zahnradfertigung ist vielfältigen Einflüssen ausgesetzt, die sich in Ihrer Wirkung überlagern und gemeinsam mit der Kinematik des Herstellprozesses zu komplexen Abweichungsmustern führen können. Für den Aufbau von Regelkreisen stehen viele Hilfsmittel zur Verfügung, die von der Bestimmung der Abweichungsursachen bis hin zur automatischen Korrektur genutzt werden können. Allgemein werden zur Beschreibung von Abweichungen Kennwerte benutzt, die auch eine statistische Bewertung erlauben. Ein grafischer Vergleich ist sinnvoll, wenn Abweichungskurven sich in der Form unterscheiden oder komplexe Abweichungsmuster auftreten. Durch das Softwaretool Zahnkontaktanalyse lassen sich Abweichungen im Hinblick auf ihre Wirkung beim Abwälzen beurteilen, eine Welligkeitsberechnung erlaubt die Bestimmung von Welligkeiten über dem Umfang einer Verzahnung.

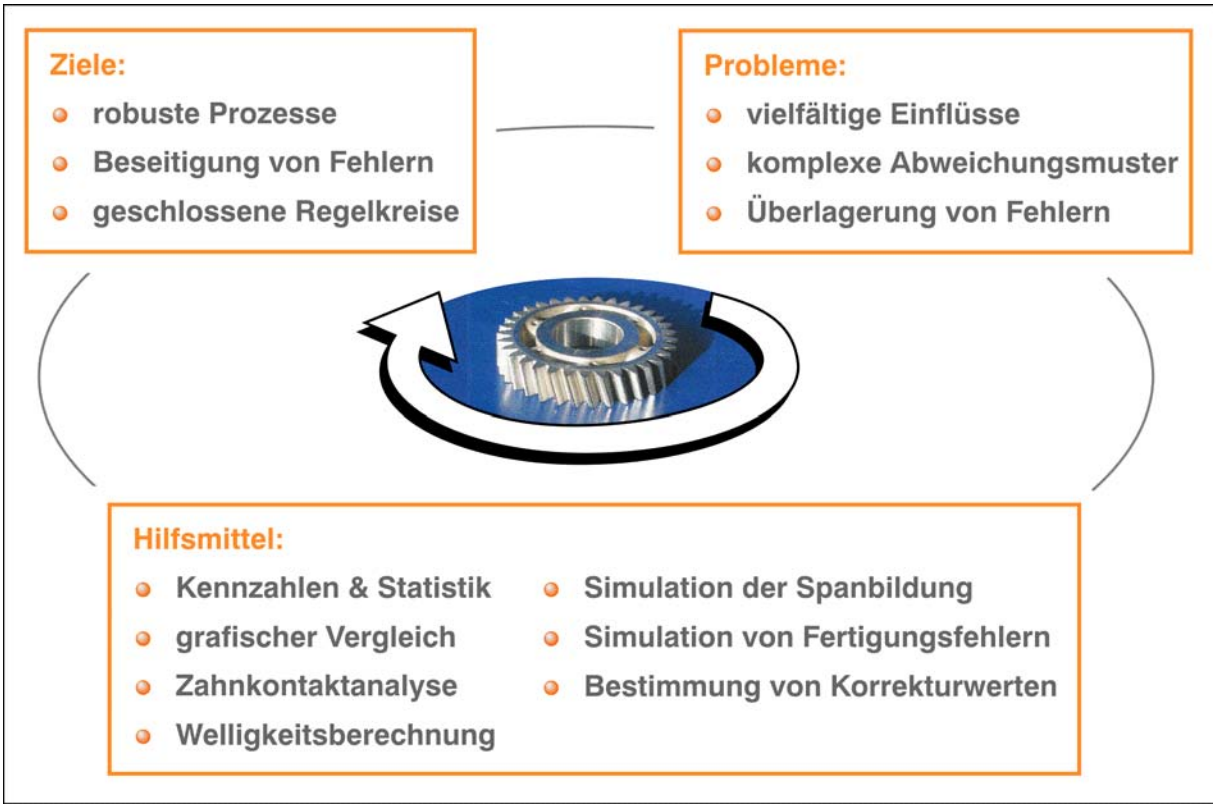


Bild 11: Qualitätsregelkreis Zahnradproduktion

Für eine tiefere Betrachtung und Optimierung der Fertigungsprozesse stehen Softwarepakete zur Verfügung, die den Prozess der Spanbildung simulieren [8]. Ein hier vorgestelltes neues Tool erlaubt für das Wälzfräsen und Wälzschleifen die genaue Simulation von Abweichungen am Werkzeug und seiner Lage in der Werkzeugmaschine.

Ziel der Bemühungen ist es, robuste Prozesse zu realisieren, die von Störgrößen wenig beeinflusst werden. Systematische und grundsätzliche Fehler an Werkzeugen, Spannvorrichtungen oder Werkzeugmaschinen müssen erkannt und behoben werden. Geschlossene Regelkreise sind dann nötig, wenn Fehlerursachen nicht beseitigt, sondern durch Verschleiß oder Werkzeugwechsel immer wieder auftreten können. Die vorgestellten Analysemethoden und -werkzeuge können für den Aufbau dieser Regelkreise einen wesentlichen Beitrag leisten.

Literatur:

[1] Gravel, G.: Abweichungsanalyse an Verzahnungen - ein Werkzeug zur Produkt- und Prozessoptimierung, VDI-Bericht 1880, 2005

[2] Mikoleizig, G.: Aktuelle Tendenzen bei der Einzelfehlerbestimmung an Verzahnungen: Maschinentechnologie, Anwendungsspektrum, Auswertesoftware, VDI-Bericht 1880, 2005

[3] Rank, B.: Verzahnungsmesstechnik aus Anwendersicht – ein Erfahrungsbericht, VDI-Bericht 1880, 2005

[4] Gravel, G.; Seewig, J.: Welligkeitsanalyse von Verzahnungsmessungen, VDI-Bericht 2053, 2008

[5] Winkel, O.: New Developments in Gear Hobbing, Gear Technology, March/April 2010

[6] Lopez, J.: Messen in der Verzahnungsschleifmaschine, VDI-Bericht 2053, 2008.

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

[8] Klocke, F.; Gorgels, C.; Schalaster, R.; Stuckenberg, A.: An innovative Way of Designing Gear Hobbing Processes, International Conference on Gears, VDI-Bericht 2108, 2010