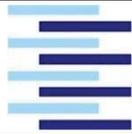




GETPRO Kongress 05./06. März 2013 in Würzburg

Simulation von Abweichungen beim Wälzfräsen und Wälzschleifen

Vortragender	Prof. Dr.-Ing. Günther Gravel Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Berliner Tor 21, 20099 Hamburg	
Weitere Autoren		

Kurzfassung

Die Fertigungsprozesse Wälzfräsen und Wälzschleifen sind aufgrund der Werkzeuggeometrie und der Kinematik komplex. Treten Abweichungen auf, so ist manchmal schon nicht klar zuzuordnen, ob die Ursache im Werkzeug, in seiner Aufspannung oder in der Werkzeugmaschine liegt. Ein neu entwickeltes Softwaretool erlaubt es, den Schneidvorgang des Werkzeuges zu simulieren und ihm systematische Abweichungen zu überlagern. So lassen sich die Auswirkungen von Fehlern am Werkzeug und von Fehlern seiner Aufspannung auf das Werkstück einfach vorhersagen und wie in einem Verzahnungs-Messschrieb darstellen.

Die Simulation umfasst die wesentlichen Profil- und Flankenlinienmodifikationen und beinhaltet die Messung der Verschränkung, der Topografie und die Messung in der Vorschubspirale. Schließlich können auch die Messdaten einer Wälzfräsermessung geladen und zur Simulation genutzt werden. Damit lässt sich vorhersagen, welche Werkstückqualität mit dem betrachteten Wälzfräser unter optimalen Bedingungen erreichbar ist.

An praktischen Beispielen wird die Leistungsfähigkeit der Simulationssoftware aufgezeigt. Dazu wurden Werkstücke mit definierten Abweichungen gefertigt und auf einem Verzahnungsmessgerät gemessen. Der Vergleich von Messung und Simulation zeigt die Genauigkeit der Berechnungen.



1. Einleitung

Die kontinuierliche Bearbeitung von Zahnflanken durch eine Abwälzbewegung ist ein seit langem eingesetztes Verfahren, um wirtschaftlich Verzahnungen mit hoher Genauigkeit herzustellen. Angewendet wird es bei der Weich- und Hartbearbeitung durch Wälzfräsen und Wälzschleifen. Das Werkzeug weist die Form einer Schnecke auf, die beim Wälzfräser durch Spannuten unterbrochen ist. Werkzeug und Werkstück arbeiten in einer kinematischen Kopplung mit vielfältigen Bewegungsmöglichkeiten. In Bild 1 sind die möglichen Einflusskategorien dargestellt, in denen die Ursache liegen kann, wenn im Rahmen einer Werkstückmessung Abweichungen ermittelt werden.

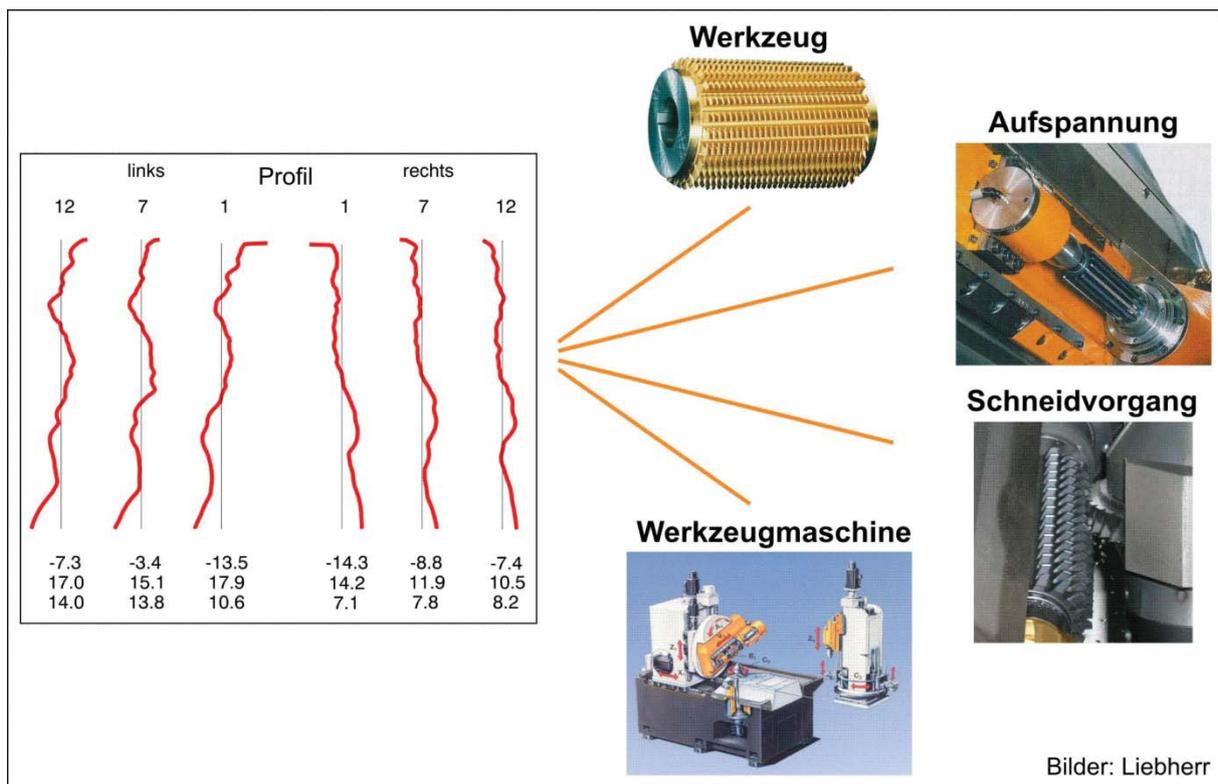


Bild 1: Abweichungsursachen

Das Werkzeug kann im Neuzustand und durch Verschleiß oder Beschädigungen Abweichungen aufweisen. Es kann fehlerhaft in der Maschine aufgespannt sein und damit Rundlaufabweichungen zeigen. Der Schneidvorgang an der Zahnflanke wird durch Technologieparameter wie Vorschübe und Zustellung gesteuert. Daraus ergeben sich vorhersehbare Abweichungen als Vorschubmarkierungen, aber auch Abweichungen in der Spanformbildung. Schließlich muss die Werkzeugmaschine die verschiedenen Bewegungen hochgenau realisieren und synchronisieren. Auch hier ergeben sich Abweichungen durch Regelungsvorgänge, Verformung oder Lagefehler der Achsen. Der Anwender hat es im Ergebnis mit einem komplexen Szenario von Fehlermöglichkeiten zu tun und ist schon froh, wenn er die Fehlerursache einer Kategorie zuordnen kann, um dann dort weitere Überprüfungen oder Parameteränderungen vorzunehmen.



Vor diesem Hintergrund wurde eine Simulationssoftware entwickelt, die typische Fehler beim Wälzfräsen und Wälzschleifen in Ihrer Wirkung auf das Werkstück simuliert und den Anwender bei der Suche nach den Ursachen unterstützt. Diese Software soll im Folgenden in Aufbau und Funktion an praktischen Beispielen vorgestellt werden. Wesentliche Anforderungen für die Umsetzung sind eine einfache Bedienbarkeit und eine schnelle und genaue Berechnung. Um eine leichte Interpretation der Ergebnisse zu unterstützen, wurde die Simulation in ein Analysewerkzeug für Verzahnungsmessungen integriert. Die Simulationsergebnisse werden damit wie die Ergebnisse eine Verzahnungsmessung dargestellt. Gleichzeitig wurde der Entwicklungsaufwand durch die Nutzung der vielfältigen Berechnungs- und Ausgaberroutinen der Analysesoftware deutlich reduziert.

2. Aufbau der Simulationssoftware

Die Simulationssoftware erlaubt die Abbildung einer abwälzenden Fertigung durch schneckenförmige Werkzeuge. Der Unterschied in der Betrachtung von Wälzfräsern und Schleifschnecken liegt nur darin, dass bei Wälzfräsern die Schneidenzahl eindeutig bestimmt ist, während sie bei Schleifschnecken theoretisch unendlich groß ist, aber durch eine geeignete Anzahl in ihrer Wirkung gut angenähert werden kann. Da einige Abweichungen - wie die Hüllschnittmarkierungen - nur beim Wälzfräsen auftreten und im Gegensatz zu Schleifschnecken Wälzfräser relativ einfach auf Verzahnungsmessgeräten gemessen werden können, werden im Folgenden nur Beispiele des Wälzfräsens betrachtet. Alle hier beschriebenen Möglichkeiten der Software gelten auch für das Wälzschleifen.

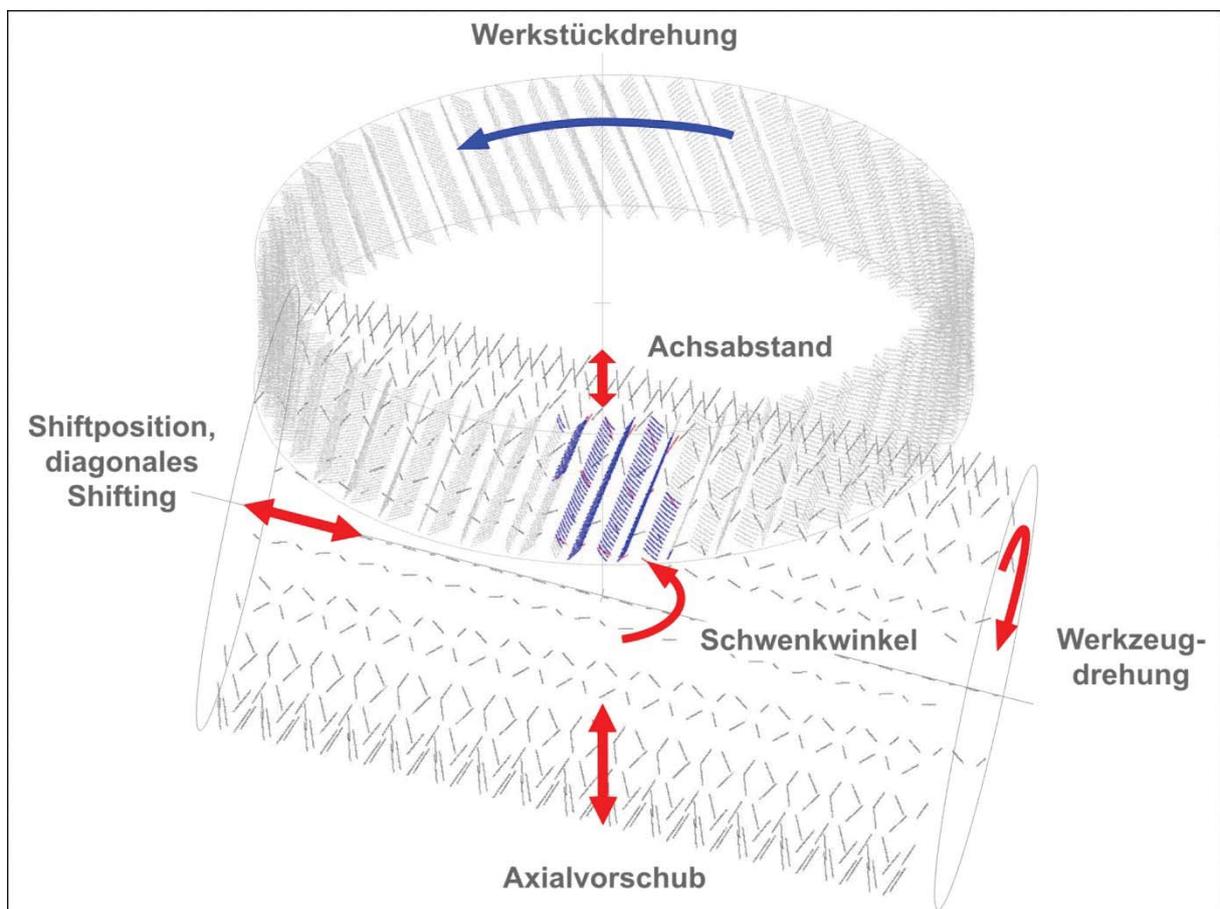
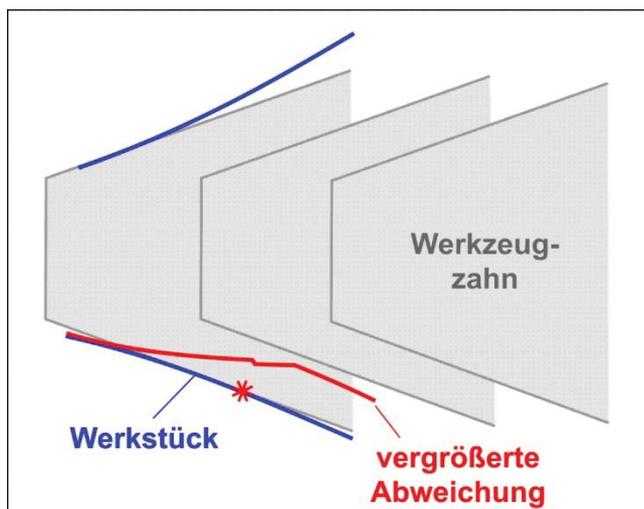


Bild 2: Beschreibung der Kinematik



Die wesentliche Grundlage der Berechnungen ist die Betrachtung von Punkten auf der Werkstückoberfläche und die Beschreibung der Werkzeugschneiden als Punktfolge. Diese Punkte werden mit Bewegungsmöglichkeiten ausgestattet, die definierten Abhängigkeiten gehorchen. Die Werkstückpunkte werden wie Messpunkte einer Verzahnungsmessung behandelt, aus denen dann mit den üblichen Verfahren der Messtechnik Abweichungen berechnet werden können. Die Werkzeugschneiden besitzen jeweils eine Schneidenkontur und eine Beschreibung der Lage dieser Kontur. Im Grundzustand definieren diese Lageparameter die Position der Schneide auf dem schneckenförmigen Werkzeugkörper. Alle Bewegungen werden nur durch eine Änderung dieser Lageparameter realisiert. Auch viele Werkzeugfehler sind so einfach als Lageänderungen abbildbar.

Das Werkstück besitzt als Bewegungsmöglichkeit nur die Drehung um die Z-Achse, die mit der Werkzeugdrehung gekoppelt ist. Das Werkzeug führt einen axialen Vorschub pro Umdrehung in Richtung der Werkstückachse durch. Die Lage des Werkzeuges in Richtung der Werkzeugachse ist durch die Shiftposition festgelegt. Ein diagonales Shifting erlaubt in dieser Hinsicht eine Bewegung während der Bearbeitung. Die radiale Lage des Werkzeuges zur Werkstückachse ist durch die Profilverschiebung bestimmt. Auch hier ist eine Bewegung während der Bearbeitung möglich, um z.B. eine Flankenlinienmodifikation zu erzeugen. Schließlich ist das Werkzeug aus der horizontalen Lage um den Schwenkwinkel gedreht, der sich aus dem Schrägungswinkel der Werkstückverzahnung und dem Steigungswinkel der Werkzeugschnecke bestimmt.



Im Ablauf der Simulation wird nun jeder einzelne Werkstückpunkt mit einem Aufmaß versehen und dahingehend betrachtet, welche Werkzeugschneide mit ihm in welcher Position in Kontakt tritt. Beim Schnitt wird das Aufmaß entsprechend auf den Abstand zur Werkzeugschneide reduziert, wie dies im Bild 3 illustriert wird. Die vergrößerte Abweichungskurve aller Messpunkte wird hier am betrachteten Messpunkt wie bei einer Spanabnahme sprunghaft reduziert.

Bild 3: Schnittberechnung

Die Realisierung der hier beschriebenen Vorgehensweise ist für eine exakte Simulation hinreichend, führt aber auf nicht praktikable Antwortzeiten, wenn jeder Punkt der Werkzeugkontur eines jeden Werkzeugzahnes mit jedem Werkstückpunkt in jeder möglichen Position in Beziehung tritt. Für eine gute Performance sind eine Fülle von Regeln implementiert, die die zu betrachtenden Werkzeugzähne und Schneidenbereiche auf die tatsächlich wirksamen beschränken. Diese Regeln berücksichtigen dabei auch die möglichen Werkzeugfehler.

3. Simulationsergebnisse bei fehlerfreier Bearbeitung

Bild 4 zeigt die Ergebnisse der Wälzfrässimulation eines Werkstückes. Es erfolgt eine fehlerfreie Bearbeitung mit einem relativ hohen Axialvorschub. Als Messpunkte sind Profilschnitte und Kurven der Flankenlinie auf der rechten und linken Flanke sowie Teilungspunkte an allen Zähnen vorgegeben, entsprechend einer Standardmessung an 3 verteilten Zähnen.



In der Flankenlinie zeigen sich die Markierungen des Axialvorschubs, der Abstand der Spitzen entspricht dem Vorschubwert. Die Balligkeit der Flankenlinie entsteht durch die Sollvorgabe einer balligen Flankenlinienmodifikation.

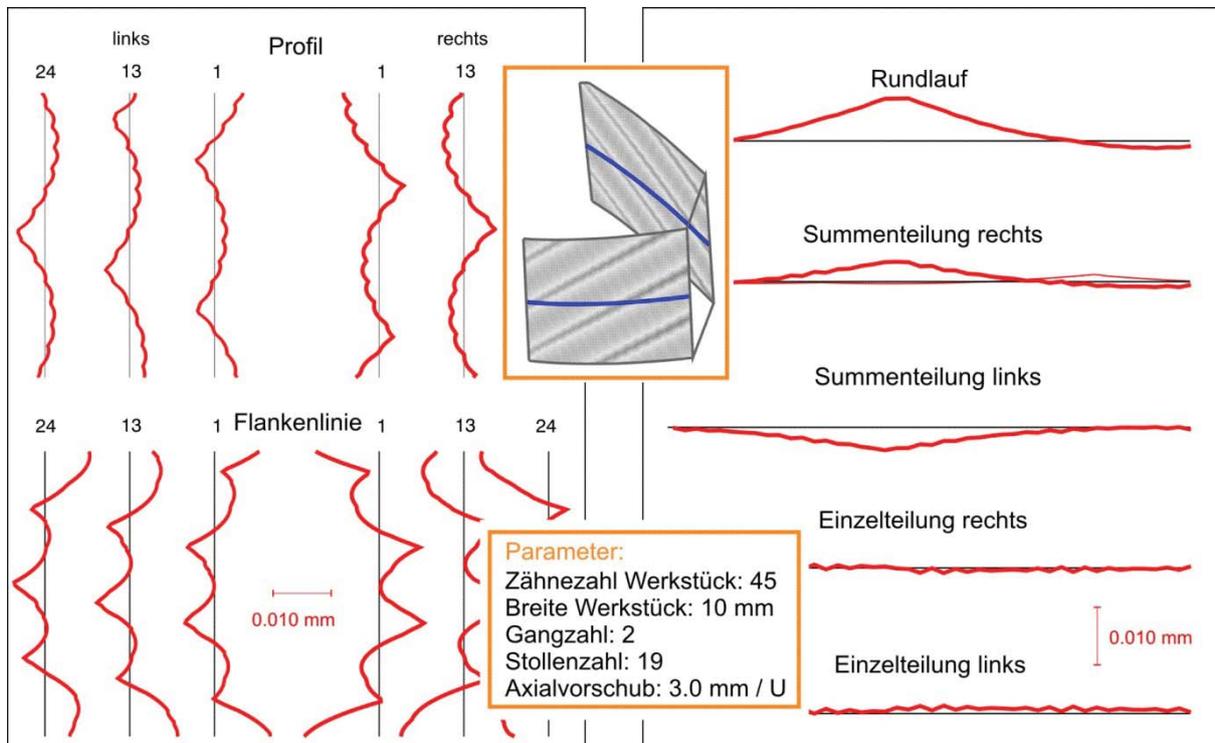


Bild 4: Standardmessung

In der Mitte des Bildes ist die 3D-Topographie eines Zahnes dargestellt. Durch den Axialvorschub ergibt sich eine schräg verlaufende Welligkeit über der Flanke. Eine übliche Profilmessung (blaue Linie) erfolgt im Stirnschnitt und schneidet diese Welligkeit. Damit ergibt sich auch im Profil eine Welligkeit mit gleicher Amplitude. Weiterhin weist das Profil eine feinere und höherfrequente Welligkeit auf. Diese Formabweichungen sind Ergebnisse des Hüllschnittes, der sich aus der Schnittfolge der einzelnen Schneiden ergibt. Aufgrund der relativ kleinen Stollenzahl pro Gang dieses Werkzeuges sind sie deutlich sichtbar. Da sich die Welligkeit durch den Axialvorschub auch von Zahn zu Zahn verschiebt, zeigen auch die Teilungsabweichungen Ungleichförmigkeiten je nachdem, wo der Teilungspunkt zwischen Tal und Spitze liegt.

Die durch den Axialvorschub erzeugten Formabweichungen spiegeln die Qualität des Werkstücks wieder, erlauben aber im Hinblick auf eine Fertigungsbeurteilung keine Aussagen über die Genauigkeit der Profilerzeugung oder über Lageabweichungen der Verzahnung (Rundlauf- und Teilungsabweichungen). Daher ist es auf Verzahnungsmessgeräten üblich, eine Messung in der Vorschubspirale durchzuführen. Der Messtaster tastet dann bei der Profil- und Teilungsmessung immer im Tal der Welligkeit an, wie im Bild 5 in der Mitte illustriert. Auch in der Simulation können die Messpunkte in dieser Art verteilt werden, so dass im Ergebnis die Abweichungen aus dem Axialvorschub vollständig verschwinden und im Profil nur die Hüllschnittabweichungen bleiben.

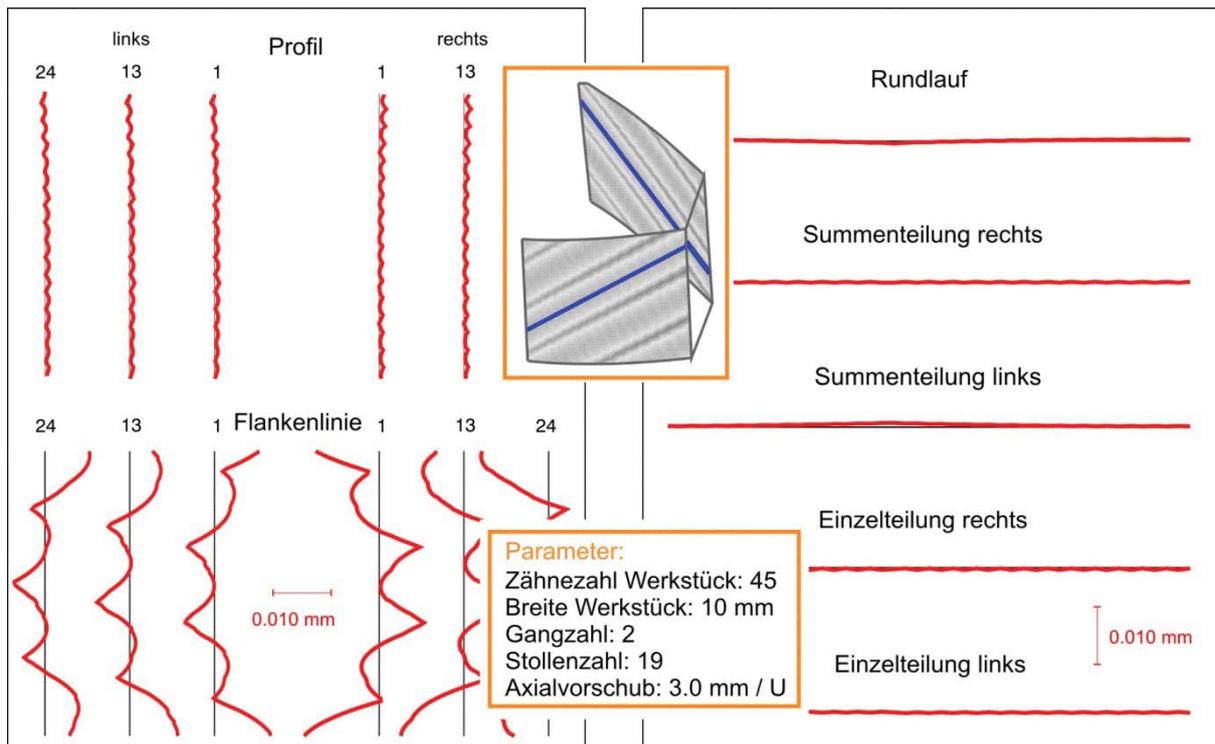


Bild 5: Messung in der Vorschubspirale

Da die Lage der Messpunkte auf der Zahnflanke frei gewählt werden kann, ist es auch möglich, drei Profilschnitte zu erzeugen, wie dies bei der Messung der Verschränkung üblich ist. In Bild 6 sind die Abweichungen dargestellt, die sich bei Simulation mit einem deutlich kleineren Axialvorschub ergebenden.

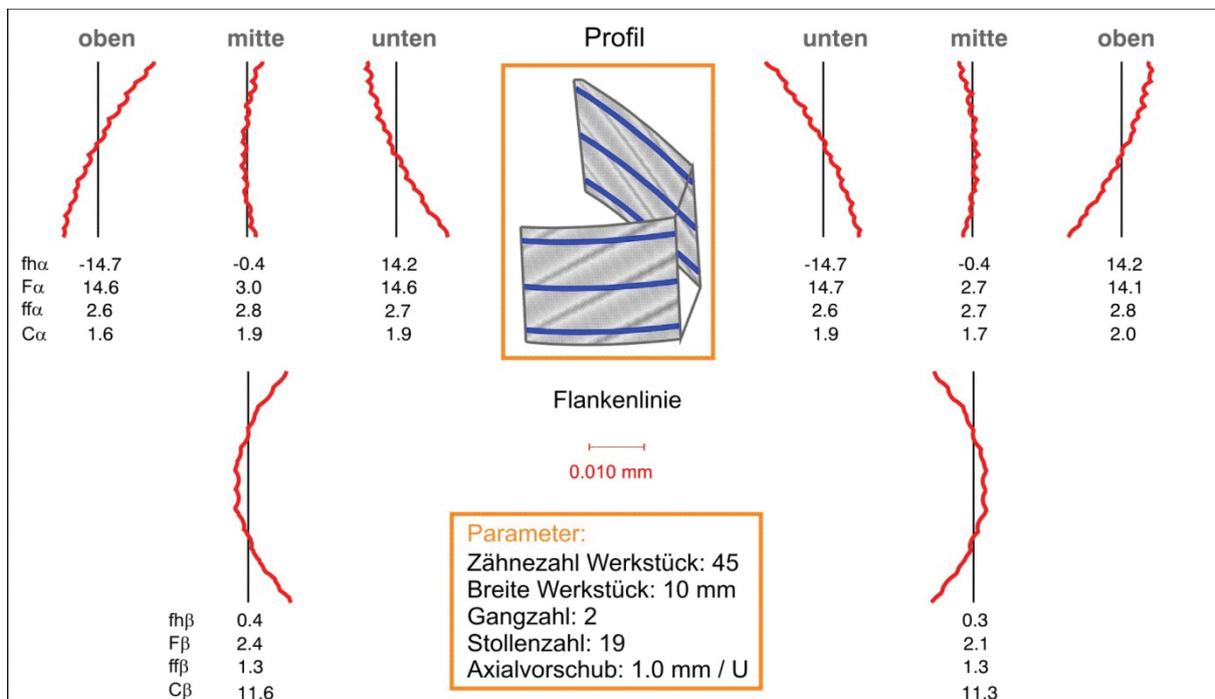


Bild 6: Messung der Verschränkung



Die ballige Kontur der Flankenlinie wird durch eine Korrektur des Achsabstandes während der Bearbeitung erzeugt. Da das Werkzeug um den Schwenkwinkel geneigt ist und damit nicht nur in der jeweils betrachteten Stirnschnittebene des Werkstücks schneidet, ergibt sich oben und unten eine Profilverkipfung mit wechselndem Vorzeichen, die als Verschränkung bezeichnet wird. Durch die Berechnung der Standard-Verzahnungskennwerte, kann die Verschränkung auch zahlenmäßig ausgegeben werden. In praktischen Versuchen ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten.

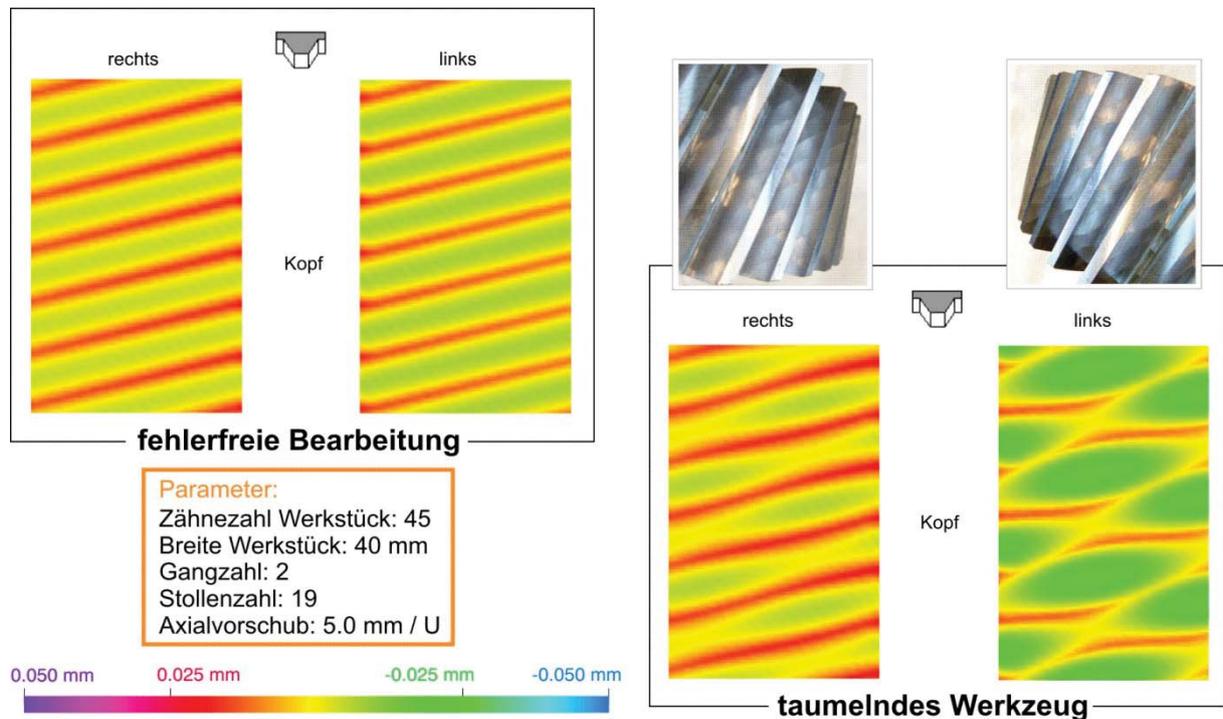


Bild 7: Simulation vieler Schnitte und Darstellung als Topographie

Bild 7 zeigt die Ergebnisse der Simulation sehr vieler Profilschnitte als farblich codierte Darstellung der Abweichungen. Links wurde eine fehlerfreie Bearbeitung mit großem Axialvorschub und ohne Flankenlinienballigkeit berechnet. Rechts im Bild wurde dem Werkzeug zusätzlich eine Lageabweichung in Form eines Taumels vorgegeben. Während die rechte Flanke des Werkstückes fast keine Veränderung aufweist, zeigt die linke Flanke deutlich andere Abweichungsmuster, die auch optisch auf den Zahnflanken des gefertigten Rades zu erkennen sind. Wenn hier der Messdurchmesser einer Flankenlinienmessung verändert wird (Verschiebung einer senkrechten Schnittlinie nach aussen oder innen), so können sich die Abweichungskurven deutlich in Ihrer Form verändern. Dieser Effekt wird erst durch eine topographische Darstellung verständlich. Der Anwender der Simulationssoftware ist somit auch in der Lage, flächige Effekte der Bearbeitung zu beurteilen.



4. Berücksichtigung von Werkzeug- und Aufspannfehlern

Neben einer fehlerfreien Bearbeitung kann die Zerspanung mit einem fehlerhaften Werkzeug simuliert werden. In Bild 8 sind die möglichen Werkzeugfehler dargestellt, die durch einfache Mausklicks erzeugt und auch überlagert werden können. Entsprechend einem Aufspannfehler in der Fräs- oder Schleifmaschine kann das Werkzeug taumeln oder exzentrisch laufen. Beschrieben wird dies durch Rundlauf- und Planaufabweichungen an den Prüfbunden. Das Werkzeug kann eine sinusförmige Gangsteigung aufweisen, wenn die Fräser- oder Schleifschnecke nicht zu den Prüfbunden läuft, und einen linearen Gangsteigungsfehler, wenn eine Temperaturdehnung auftritt. Bei mehrgängigen Werkzeugen kann ein Gang axial gegenüber den anderen verschoben werden. Schließlich kann durch die Vorgabe einer Abweichung an einem einzelnen Zahn sehr schön die Wirkung einer Aufschweißung oder von Verschleiß oder Ausbrüchen auf die Qualität des so gefertigten Zahnrades beurteilt werden.

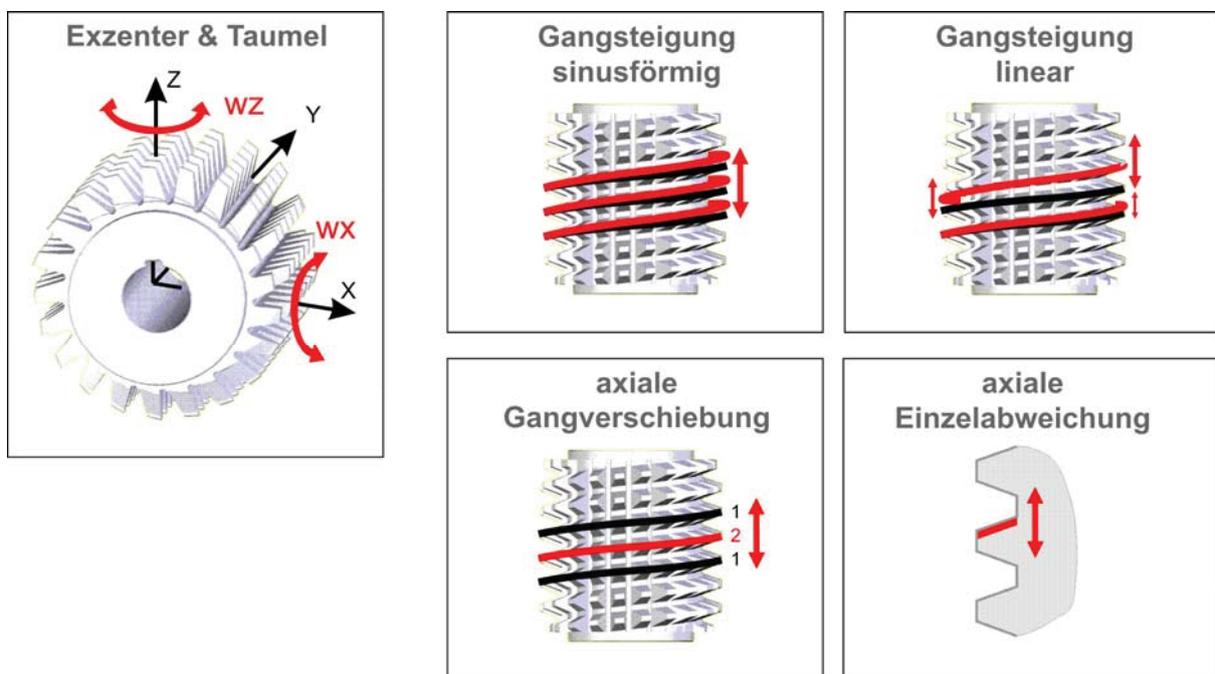


Bild 8: Simulation von Werkzeug- und Aufspannfehlern

Zur Überprüfung der Genauigkeit der Simulation wurde ein Wälzfräser bewusst exzentrisch eingespannt und damit ein Zahnrad gefertigt. Bild 9 zeigt in blauer Farbe die gemessenen Ergebnisse, denen rot die Ergebnisse der Simulation gegenübergestellt sind. Schrittweise wurden die Rundlaufabweichungen an Haupt- und Gegenlager und ihre Winkellage zu den Maschinenachsen verändert, bis die mit einer Messuhr bestimmten Versuchseinstellungen erreicht wurden. Die Formabweichungen von Messung und Berechnung stimmen sehr gut überein.

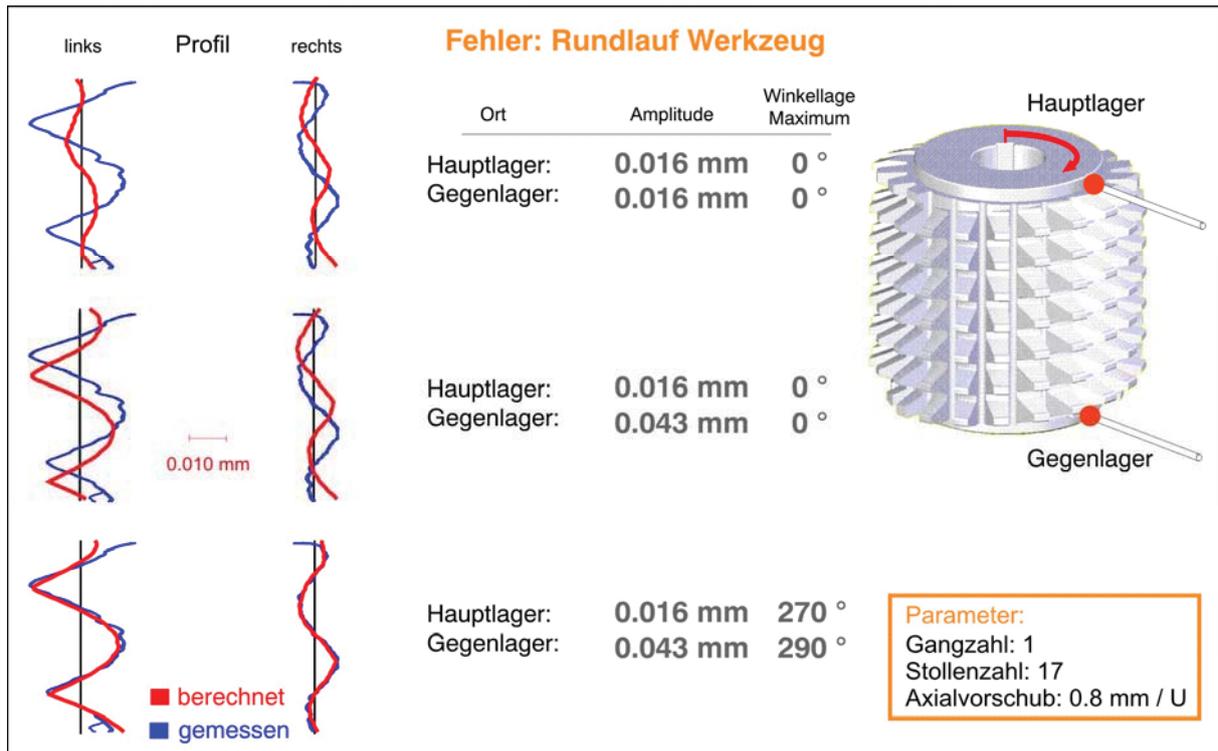


Bild 9: Vergleich von gemessenen und berechneten Profilabweichungen

Es ist naheliegend, an einem Werkzeug in der Simulation nicht nur typische, systematische Fehler zu erzeugen, sondern für jeden einzelnen Zahn die tatsächlichen Fehler zu berücksichtigen, wie sie durch eine Messung des Werkzeuges auf einem Verzahnungsmessgerät ermittelt werden können.

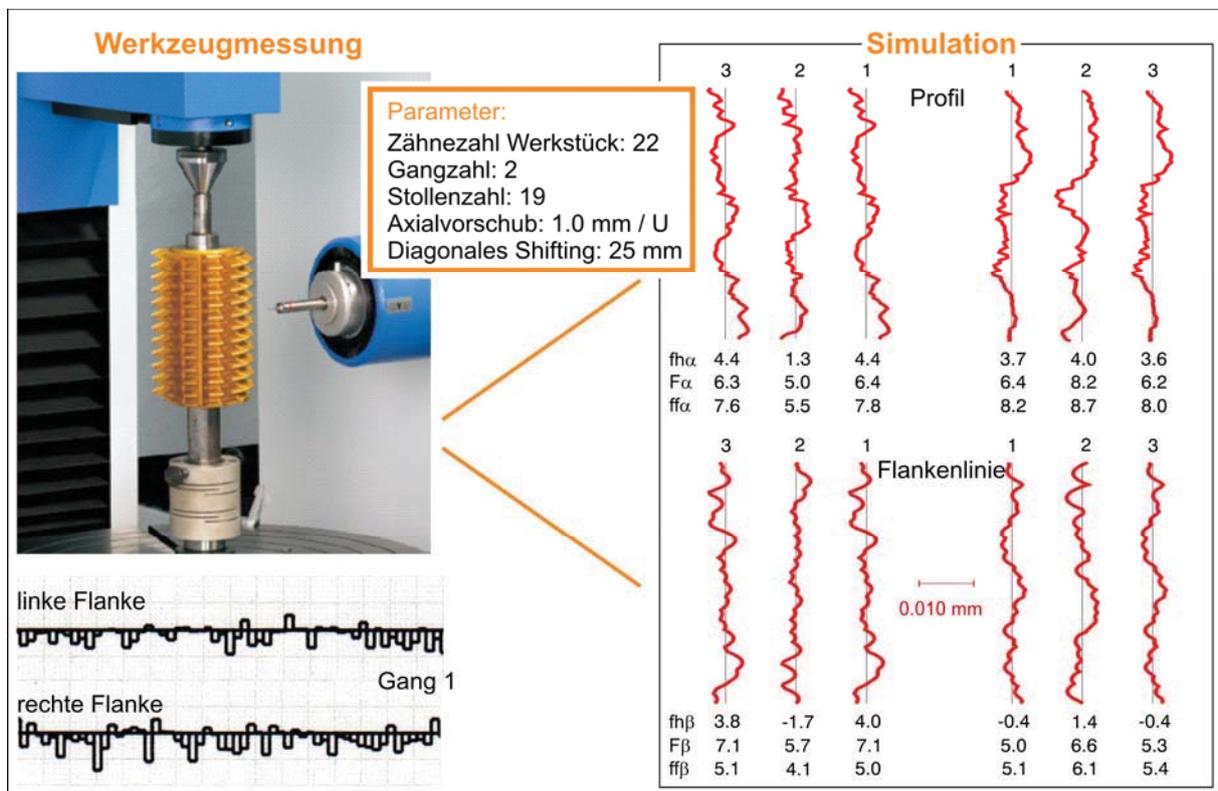


Bild 10: Vorhersage der Werkstückqualität aus einer Werkzeugmessung



Bild 10 zeigt die Messung eines 2-gängigen Wälzfräasers. Die Profilabweichungen der Schneide und die axiale Abweichung jedes Zahnes werden über eine Schnittstelle übertragen und zur Simulation genutzt. Durch die Unterschiede der Abweichungen an der linken und rechten Werkzeugflanke und der Gänge untereinander ergeben sich auch am Werkstück unterschiedliche Profil- und Flankenlinienabweichungen, die bei diesem Verhältnis von Werkstückzähnezahl zur Werkzeuggangzahl jeweils an jedem zweiten Zahn gleich sind. In dieser Berechnung wurde ein diagonaler Vorschub des Werkzeugs eingegeben, der dazu führt, dass in der Flankenlinie nicht immer die gleichen Werkzeugzähne aktiv sind. Damit ergeben sich auch dort größere Formabweichungen entsprechend den Abweichungen am Wälzfräser. Die Kombination der Simulation mit einer Wälzfräsermessung eröffnet die Möglichkeit, mit hoher Präzision und im Detail vorherzusagen, welche Qualität das mit dem Wälzfräser gefertigte Werkstück im günstigsten Falle haben kann. Aufspannfehler können auch hier dann in der Simulation noch überlagert werden.

5. Zusammenfassung

Vorgelegt wurde ein neues Softwaretool, das es erlaubt, typische Fehler in der Fertigung von Zahnrädern durch Wälzfräsen und Wälzschleifen mit hoher Genauigkeit zu simulieren. Die Software erlaubt die Betrachtung beliebiger Punkte auf den Zahnflanken und stellt alle Ergebnisse in der für den Anwender bekannten Form einer Verzahnungsmessung dar. Eine 3D-Betrachtung der Verschränkung und von topographischen Abweichungsmustern ist möglich. Der Vergleich von gemessenen Abweichungen an fehlerhaften Bauteilen mit den Simulationsergebnissen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

Damit steht den Anwendern und Planern von Wälzfräs- und Wälzschleifprozessen in Konstruktion und Produktion ein leistungsfähiges Werkzeug zur Verfügung, das sie in der Auslegung von Prozessen und Werkzeugen und bei der Suche nach Abweichungsursachen unterstützt. Durch die Möglichkeit, Prozessparameter schnell und einfach zu ändern, wird das Verständnis für diese komplexen Bearbeitungsverfahren und ihre Einflussgrößen deutlich verbessert.

6. Literatur

- [1] Pfauter, H.: Pfauter - Wälzfräsen, Springer Verlag, 1976
- [2] Abler, J.; Felten, K.; Kobialka, C.; Lierse, T.; Mundt, A.; Pomp, J.; Sulzer, G.: Verzahnungstechnik - Informationen für die Praxis, Liebherr Verzahnungstechnik, 2004
- [3] N., N.: Seminarunterlagen Wälzfräsen, LMT Fette
- [4] Mikoleizig, G.: Aktuelle Tendenzen bei der Einzelfehlerbestimmung an Verzahnungen: Maschinentechnologie, Anwendungsspektrum, Auswertesoftware, VDI-Bericht 1880, 2005
- [5] Trapp, H.J.: Mess- und Korrekturstrategien für den Closed Loop in der Zahnräderfertigung, VDI-Bericht 1673, 2002
- [6] Gravel, G.: Simulation und Korrektur von Verzahnungsabweichungen - Qualitätsregelkreis Zahnradproduktion, VDI-Bericht 2148, 2011



- [7] Mehr, A.: Möglichkeiten und Grenzen beim Wälz- und Profilschleifen, GETPRO Kongress zur Getriebeproduktion, 2009
- [8] Türich, A.: Producing profile and lead modifications in threaded wheel and profile grinding, Gear Technology, January/February 2010
- [9] Winkel, O.: New developments in gear hobbing, Gear Technology, March/April 2010
- [10] Klocke, F.; Gorgels, C.; Schalaster, R.; Stuckenberg, A.: An innovative way of designing gear hobbing processes, International Conference on Gears, VDI-Bericht 2108, 2010
- [11] VDI/VDE 2606: Messen von Verzahnungswerkzeugen - Messen von Wälzfräsern, 2010
- [12] Kotlyar, Y.: Computerized hob inspection & applications of inspection results, Part I and II, Gear Technology, May/June, July/August 1994
- [13] Cluff, B. W.: Effects of hob quality and resharping errors on generating quality, Gear Technology, September/October 1987