

Getriebe, Schleifen, Schmieden

Verbesserte Hartfeinbearbeitung von Zahnrädern *

Bearbeitungsaufmaß präzisionsgeschmiedeter Zahnräder für den Schleifprozess optimieren

R. Haase, J. Seewig, E. Reithmeier

Inhalt Im Rahmen der Entwicklung kürzerer Prozessketten gewinnt das Präzisionsschmieden von Zahnrädern zunehmend an Bedeutung. Um die geforderte Genauigkeit einzuhalten, ist ein abschließendes Verzahnungsschleifen unerlässlich. Schmiedetechnologisch bedingt schwankt das dafür erforderliche Bearbeitungsaufmaß aber relativ stark, was durch eine Feinpositionierung des Zahnrades korrigiert wird. Die dafür notwendigen Algorithmen werden vorgestellt und auf ihre Genauigkeit und Stabilität hin untersucht.

Improved hard fine machining of gear wheels – Optimizing the material allowance of precision forged gear wheels for the grinding process

Abstract The precision forging of gear wheels is becoming increasingly interesting in the context of developing shorter process chains. Having to guarantee tight accuracies, a hard finishing of the toothing is mandatory. Due to the forging technology the necessary material allowance varies in a comparatively wide range. This is corrected by the fine positioning of the gear wheel. The algorithms required for this procedure are introduced and investigated with respect to their accuracy and stability.

1 Einleitung

Die derzeit übliche Fertigung von Zahnrädern basiert überwiegend auf spanenden Verfahren. Eine mögliche Prozessfolge ist durch Vorverzahnen, Wärmebehandlung (Härten und Anlassen, Abkühlen) und Fertigverzahnen gegeben. Diese Art der Fertigung ist daher durch eine große Zahl an Fertigungsschritten gekennzeichnet. Abhilfe kann hier der Einsatz des gratfreien Präzisionsschmiedens in einem geschlossenen Gesenk schaffen. Die verkürzte Prozessfolge ist damit durch Schmieden einschließlich integrierter Wärmebehandlung und Fertigverzahnen gegeben. Mit der Substitution abtragender durch umformende Fertigungsverfahren können sowohl der

Materialeinsatz als auch die notwendige Energie reduziert sowie eine verkürzte Durchlaufzeit erreicht werden [1, 2]. Ein weiterer Vorteil präzisionsgeschmiedeter Zahnräder ist der ununterbrochene und beanspruchungsgerechte Faserverlauf des Schmiedeteils, der insbesondere die dynamischen Festigkeitseigenschaften positiv beeinflusst [3].

Im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereiches (SFB 489) „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ wird derzeit im Produktionstechnischen Zentrum Hannover (PZH) der Universität Hannover erstmals eine geschlossene Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder aufgebaut.

2 Problemstellung

Die Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder besteht im Wesentlichen aus den Fertigungsschritten

- Schmieden mit integrierter Wärmebehandlung,
- Hartfeinbearbeitung der Nebenformelemente (Bohrung mit Passfedernut) sowie
- Hartfeinbearbeitung der Hauptformelemente, das heißt dem Fertigverzahnen [2].

Als Verfahren zum Fertigverzahnen kommt das kontinuierliche Wälzschleifen zum Einsatz. Für einen sicheren Prozessverlauf ist hier ein eng spezifiziertes Bearbeitungsaufmaß an den Flanken notwendig [1, 2].

Es kann aber zu noch verhältnismäßig großen Schwankungen bei der Verteilung des Bearbeitungsaufmaßes kommen. Diese Schwankungen rühren einerseits von Unsicherheiten des Schmiedeprozesses sowie einem ungleichmäßigen Verschleiß der Schmiedegesenke her. Andererseits sind sie auch auf die kaum zu vermeidenden Wärme- und Härteverzüge während des Schmiedens und der anschließenden Wärmebehandlung zurückzuführen [2, 4]. Werden nun ohne eine weitere Korrektur zunächst die Bohrung und dann die Verzahnung hartfeinbearbeitet, dann wirken sich diese Schwankungen des Bearbeitungsaufmaßes direkt auf die Qualität der Verzahnung aus [5]. Wie in **Bild 1** deutlich zu erkennen ist, können sowohl der Zahngrund als auch die Flanken (vergrößerte Ansicht) nicht vollständig bearbeitet werden.

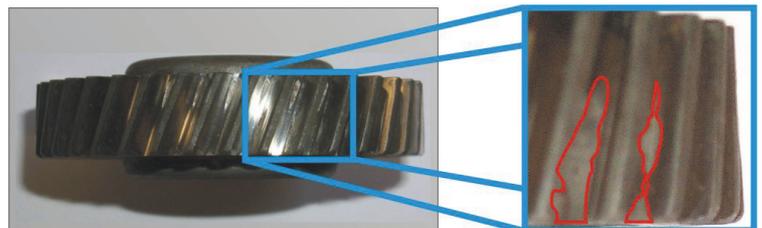


Bild 1. Ohne vorherige Feinpositionierung geschliffenes präzisionsgeschmiedetes Zahnrad

Dipl.-Ing. Rainer Haase M.Sc., Dr.-Ing. Jörg Seewig,
 Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier
 Institut für Mess- und Regelungstechnik (imr)
 Universität Hannover
 Nienburger Str. 17, D-30167 Hannover
 Tel. +49 (0)511 / 762-4284 oder -4286
 Fax +49 (0)511 / 762-3234
 E-Mail: rainer.haase@imr.uni-hannover.de
 oder joerg.seewig@imr.uni-hannover.de
 Internet: www.imr.uni-hannover.de

Info

* Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen „reviewten“ Fachaufsatz: Autoren-unabhängig von Experten auf diesem Fachgebiet wissenschaftlich begutachtet und freigegeben.

3 Lösungsansatz

Abhilfe schafft hier eine vor der Hartfeinbearbeitung durchgeführte Prozessoptimierung mittels Feinpositionierung des präzisionsgeschmiedeten Zahnrades [4], wie sie in **Bild 2** dargestellt ist. Die Bohrung des Zahnrades wird zunächst nur vorgeschmiedet und ist daher als Bezug ungeeignet. Stattdessen wird die Verzahnung als Bezug verwendet [4]. Das Rohteil weicht damit vom Fertigteil durch ein ungleichmäßiges Bearbeitungsaufmaß und eine exzentrische Bohrung ab. Es wird in seiner Verzahnung in der Werkzeugmaschine gespannt. Der erste Schritt ist die schnelle berührungslose Erfassung der Geometrie in einem Stirnschnitt mittels eines optischen Sensors (Punktsensor basierend auf dem Prinzip konoskopischer Holographie). Ausgehend von der Geometrie wird in einem zweiten Schritt unter Berücksichtigung des normal-äquidistanten Bearbeitungsaufmaßes mittels Optimierungsalgorithmen ein Korrekturvektor berechnet, der als Parameter zur Verbesserung nachfolgender Fertigungsschritte dient. Der Korrekturvektor wird von den Aktoren der Werkzeugmaschine (Piezostapelaktoren) verwendet, um das Rohteil in der Rotationsebene auszurichten. Die anschließende Hartfeinbearbeitung der exzentrischen oder unrunder Bohrung ist aus technologischer Sicht problemlos durchführbar. Das Rohteil weist nun die gewünschte gleichmäßige Verteilung des Bearbeitungsaufmaßes für den abschließenden Schleifprozess auf [1, 6].

3.1 Funktionselemente

Im Bereich der Paarungslehre ist in zahlreichen Veröffentlichungen insbesondere rotationssymmetrischen Bauteilen wie Welle-Nabe-Verbindungen Beachtung geschenkt worden. Die Funktionselemente lassen sich in einem solchen Fall einfach durch Kreise beschreiben.

Ungleich komplizierter verhält es sich bei Zahnrädern. Diese lassen sich im Bereich des Zahnkopfes durch Kreissegmente, an den Flanken oft durch Evolventen und im Bereich des Zahnfußes hinab bis zum Fußkreis mit dem Radius r_f beispielsweise durch Ellipsen beschreiben. Zusätzlich ist bei modernen Zahnrädern einerseits noch eine Profilmodifikation der Flanke möglich, zum Beispiel in Form von Balligkeit oder eines kommaförmigen Aufmaßes. Andererseits sind auch Kopf- und Fußbrücknahmen keineswegs ungewöhnlich [1, 7, 8].

Im Folgenden werden der Einfachheit halber nur die Funktionsflächen des Zahnrades ohne Modifikation betrachtet. Sie lassen sich im Bereich zwischen dem Kopfkreis mit dem Radius r_a und dem Fuß-Formkreis mit dem Radius r_{ff} durch Evolventen beschreiben. Jeweils zwei nebeneinander liegende Evolventen lassen sich zu einem Zahn beziehungsweise einer Lücke als Funktionselement zusammenfassen [5]. Im vorliegenden Fall wird eine Lücke als Funktionselement angenommen; das entspricht den Verhältnissen

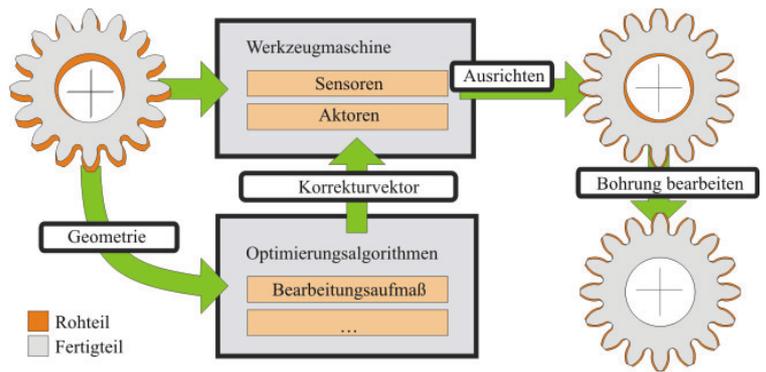


Bild 2. Prozessoptimierung mittels Feinpositionierung [1, 4]

beim Schleifen außenverzahnter Zylinderräder.

Für die Evolventen können aber auch Profilmodifikationen in einfacher Weise berücksichtigt werden. Weiterhin lassen sich die Funktionselemente auch leicht auf die Nebenformelemente wie den Zahngrund oder den Zahnkopf ausweiten oder als Zähne zusammenfassen; das wiederum entspricht den Verhältnissen beim Schleifen innenverzahnter Zylinderräder. Das Verfahren ist ferner auch auf andere Verzahnungen (wie Kreisbogen- oder S-Verzahnungen) einfach übertragbar [9].

3.2 Geometrieerfassung

Bei der Herstellung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder ergeben sich besonders im Hinblick auf das Schleifen der Verzahnung einige wesentliche Randbedingungen. Die geometrischen Verhältnisse am Stirnschnitt einer Lücke sind in **Bild 3** dargestellt. Das Rohteil unterscheidet sich vom Fertigteil um das für das Schleifen der Verzahnung notwendige normal-äquidistante Aufmaß. Dieses Aufmaß darf sich in einer spezifizierten Toleranzzone bewegen. Hieraus resultieren ein minimales und ein maximales Aufmaß, die eine sichere Prozessführung beim Verzahnungsschleifen garantieren. Das durch das Aufmaß beschriebene Volumen zwischen Rohteil und Fertigteil ist das in Bild 3 dargestellte Spannungsvolumen. Es wird später beim Schleifen der Verzahnung entfernt.

Während die Geometrie des Fertigteils durch die Parameter des Zahnrades Modul (m), Zähnezah (z), Eingriffswinkel (α), Schrägungswinkel (β), Profilverschiebungsfaktor (x) und Kopfspielfaktor (c^*) spezifiziert und im Rechner hinterlegt

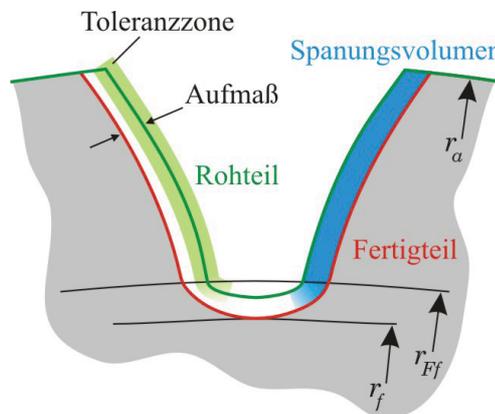


Bild 3. Geometrie von Rohteil und Fertigteil

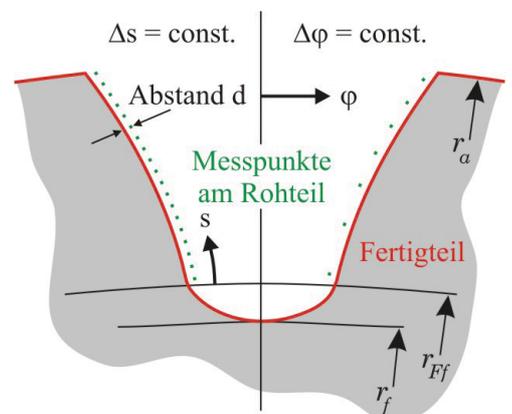


Bild 4. Verteilung der Messdaten

ist, muss die Geometrie des Rohteils messtechnisch erfasst werden. Dazu wird mit einem optischen Sensor ein Stirnschnitt des Rohteils in Zylinderkoordinaten aufgenommen [6, 9].

Die Verhältnisse zweier unterschiedlicher Arten der Messdatenaufnahme zeigt **Bild 4**. Auf der linken Seite sind die Messpunkte längs der Flanke des Rohteils mit hinreichend kleiner konstanter Schrittweite Δs entlang der Koordinate s aufgenommen. Für diesen Fall ist das Spannungsvolumen V einer Flanke direkt proportional zur Summe der normalen Abstände d_i der Messpunkte i zum Fertigteil. Als Proportionalitätsfaktoren müssen hier nur noch die Schrittweite Δs sowie die Breite b des Zahnrades berücksichtigt werden:

$$V = b \cdot \Delta s \cdot \sum_i d_i \quad .$$

Wird das Zahnrad aber wie beschrieben auf einer Drehachse gespannt und mit einem optischen Sensor in radialer Richtung gemessen, um den Stirnschnitt des Zahnrades in Zylinderkoordinaten zu erhalten, so resultiert daraus eine abweichende Verteilung der Messpunkte. Ausgehend von einer konstanten Drehzahl der Drehachse und einer ebenfalls konstanten Messfrequenz des optischen Sensors werden die auf der rechten Seite in **Bild 4** dargestellten Messpunkte auf der Flanke des Rohteils mit einem konstanten Winkel $\Delta\varphi$ entgegen der Drehrichtung φ der Drehachse aufgenommen. Wie in **Bild 4** rechts und in **Bild 5** dargestellt, ist festzustellen, dass die Schrittweite der Messpunkte längs der Flanke vom Zahnkopf zum Zahnfuß zunimmt.

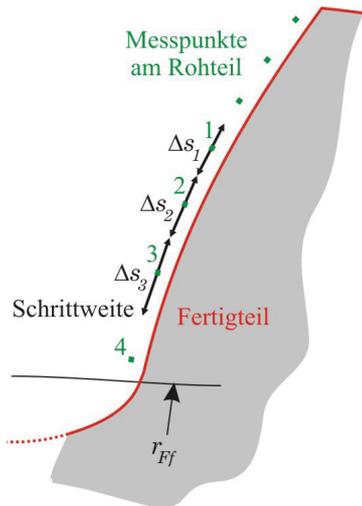


Bild 5. Berechnung des Spannungsvolumens

Um in diesem Fall das Spannungsvolumen V einer Flanke zu berechnen, müssen die Abstände d_i der Messpunkte i zum Fertigteil noch wie im **Bild 5** gezeigt mit ihrer jeweiligen Schrittweite Δs_i , das heißt mit der jeweils halben Entfernung zum rechten und linken benachbarten Messpunkt, gewichtet werden:

$$V = b \cdot \sum_i \Delta s_i \cdot d_i \quad .$$

3.3 Optimierungskriterien

Beim Berechnen des Korrekturvektors aus **Bild 2** handelt es sich um eine Optimierungsaufgabe, die unter technologisch sinnvollen Gesichtspunkten zu lösen ist [4]. Neben dem MC (Minimum Circumscribed)- oder Hüll-Element sowie dem MI (Maximum Inscribed)- oder Pferch-Element sind in der Literatur insbesondere die Ausgleichselemente nach Gauß und Tschebyscheff häufig erwähnt. In beiden Fällen ist die Zielfunktion $Q(\underline{a})$ eine vom Parameter \underline{a} abhängige Norm L bezüglich der Abstände d_i der Messpunkte zum Ausgleichselement, die auf eine geeignete Weise minimiert werden muss [5].

Im Fall des MZ (Minimum Zone)- oder Tschebyscheff-Elements bedient man sich der L_∞ -Norm. Für die Zielfunktion $Q(\underline{a})$ gilt

$$Q(\underline{a}) = \max_i |d_i| \xrightarrow{!} \min_{\underline{a}} \quad .$$

Im Fall des LS (Least Squares)- oder Gauß-Elements bedient man sich der L_2 -Norm. Für die Zielfunktion $Q(\underline{a})$ gilt

$$Q(\underline{a}) = \sum_i d_i^2 \xrightarrow{!} \min_{\underline{a}} \quad .$$

Analog kann man sich im Fall des L1- oder Betrags-Elements der L_1 -Norm bedienen. Für die Zielfunktion $Q(\underline{a})$ gilt dann

$$Q(\underline{a}) = \sum_i |d_i| \xrightarrow{!} \min_{\underline{a}} \quad .$$

Im vorliegenden Fall setzt sich der Parameter \underline{a} aus mehreren Komponenten zusammen. Dies sind die Position und Orientierung des Zahnrades in der Rotationsebene sowie die Größe des Zahnrades. Letztere kann entweder durch das Modul oder das normal-äquidistante Aufmaß beschrieben werden [5, 6]. Die Position umfasst dabei zwei Freiheitsgrade. Aus ihr kann später mit Kenntnis der Lage der Drehachse der Korrekturvektor abgeleitet werden. Da es sich bei dem vorliegenden Zahnrad um ein gedrucktes Bauteil handelt, können weitere Parameter (zum Beispiel Taumel) vernachlässigt werden.

Eine Gewichtung der Abstände d_i mit ihrer jeweiligen Schrittweite Δs_i stellt den Übergang zum Volumen V der Flanke dar. Die Differenz zwischen dem Volumen $V_{l,i}$ der linken Flanke und dem Volumen $V_{r,i}$ der rechten Flanke ergibt das Differenz-Spannungsvolumen ΔV_i eines Funktionselementes i (hier einer Lücke) mit $i = 1 \dots z$:

$$\Delta V_i = V_{l,i} - V_{r,i} \quad .$$

Für $\Delta V_i > 0$ muss also an der linken Flanke und für $\Delta V_i < 0$ an der rechten Flanke einer Lücke während des nachfolgenden Schleifprozesses mehr Material abgespannt werden. Das Differenz-Spannungsvolumen eines Funktionselementes ist damit ein Maß für die Asymmetrie der Aufmaßverteilung an seinen Flanken.

Bedingt durch die Herstellung des Schmiedegesenkens mittels Drahterosion kommt es beim Präzisionsschmieden von Zahnrädern häufig zu Teilungsfehlern an wenigen einzelnen Zähnen. In **Bild 6** ist die Optimierung eines Zahnrades schematisch dargestellt – links vor und rechts nach der Optimie-

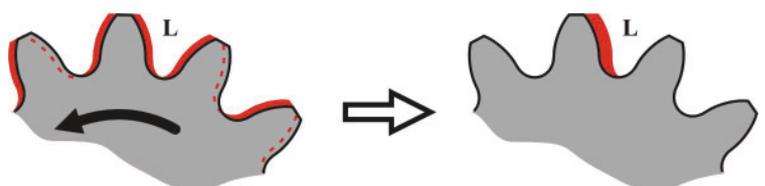


Bild 6. Optimierung eines Zahnrades

zung. Der zweite Zahn des dargestellten Ausschnittes weist dabei einen Teilungsfehler auf. Vor der Optimierung ist das Zahnrad so ausgerichtet, dass an beiden Flanken der Lücke L genau gleich viel Material ($\Delta V_L = 0$) während bei allen übrigen Lücken an den jeweils rechten Flanken mehr Material abgespannt werden müsste, das heißt $\Delta V_i < 0$ für $i = 1 \dots z$ mit $i \neq L$.

Es erfolgt nun die Optimierung, für die das L1-Element mit Hilfe der Zielfunktion

$$Q(\underline{a}) = \sum_i |\Delta V_i| \xrightarrow{!} \min_{\underline{a}}$$

bestimmt wird. Die Zielfunktion $Q(\underline{a})$ ist damit gleich dem gesamten Differenz-Spannungsvolumen aller Funktionselemente und kann auf diese Weise auch geometrisch anschaulichedeutet werden.

In der schematischen Darstellung in Bild 6 entspricht diese Optimierung einer mathematisch positiven Rotation des Zahnrades (Pfeil). Nach der Optimierung ist das Zahnrad damit so ausgerichtet, dass an der linken Flanke der Lücke L mehr Material ($\Delta V_L > 0$) während bei allen übrigen Lücken an beiden Flanken jeweils genau gleich viel Material abgespannt werden muss, also $\Delta V_i = 0$ für $i = 1 \dots z$ mit $i \neq L$. Dieser Sachverhalt ist auch in **Bild 7** (L1) anhand einer Simulation dargestellt.

Um eine sichere Prozessführung beim Verzahnungsschleifen zu gewährleisten, muss die Einhaltung des minimalen und maximalen Aufmaßes garantiert werden. Dazu werden für die Optimierung zwei Randbedingungen formuliert, in die die Abstände d_i der Messpunkte i vom Fertigteil eingehen. Es gilt daher, dass der minimale Abstand $\min\{d_i\}$ größer oder gleich dem minimalen Aufmaß und der maximale Abstand $\max\{d_i\}$ kleiner oder gleich dem maximalen Aufmaß sein muss.

Auf die Optimierung mittels LS-Element wird im folgenden Abschnitt kurz eingegangen. Eine Optimierung mittels MZ-Element ist aus technologischer Sicht nicht sinnvoll, da in diesem Fall nur Extrema betrachtet und übrige Werte in hier unzulässiger Weise übergangen werden. Das Ergebnis der Optimierung ist in Bild 7 (MZ) dargestellt. In diesem Fall weisen alle Funktionselemente ein Differenz-Spannungsvolumen auf, das heißt, bei allen Funktionselementen ist an einer Flanke mehr Material abzutragen als an der anderen. Das „Optimum“ ist in dem Moment erreicht, in dem an mindestens zwei Funktionselementen das dem Betrag nach gleiche Differenz-Spannungsvolumen auftritt. Der Materialüberschuss ist aber an jeweils entgegengesetzten Flanken (rechts, links) zu finden.

4 Simulation

Um die Optimierung zu validieren, wird eine Simulation durchgeführt. Grundlage dieser Simulation ist die ideale Geometrie des Stirnschnittes eines Zahnrades, das durch die Parameter Modul $m = 2$ mm, Zähnezahl $z = 37$, Eingriffswinkel $\alpha = 20^\circ$, Schrägungswinkel $\beta = 20^\circ$, Profilverschiebungsfaktor $x = 0$ sowie Kopfspielfaktor $c^* = 0,37$ beschrieben werden kann. Das normal-äquidistante Aufmaß im Stirnschnitt beträgt $125 \mu\text{m}$ und liegt damit in der Toleranzzone von $50 \mu\text{m}$ bis $200 \mu\text{m}$. Weiterhin weist ein Zahn, wie in Bild 6 dargestellt, wegen eines um weitere $50 \mu\text{m}$ größeren Aufmaßes einen Teilungsfehler auf. Im Rahmen der Simulation werden nur die durch Evolventen beschreibbaren Flanken betrachtet. Als untere Grenze der Evolvente wird der Fuß-Formkreis mit

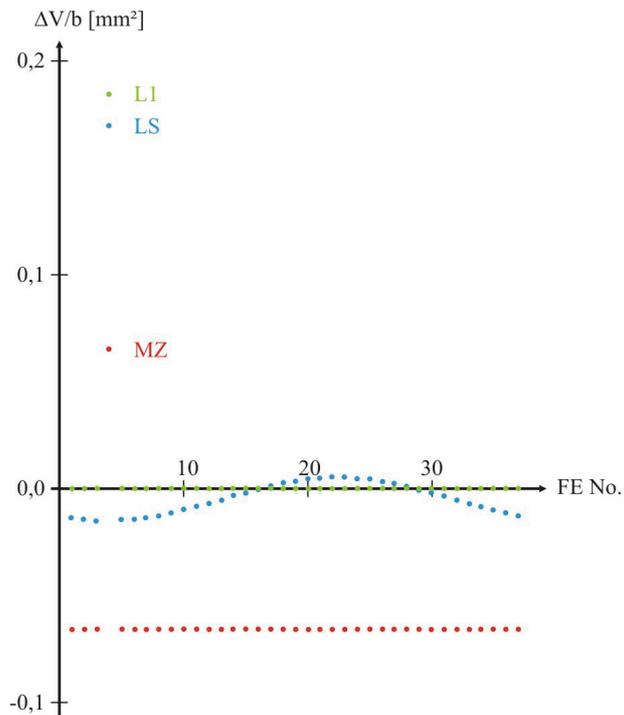


Bild 7. Differenz-Spannungsvolumina

dem Radius $r_{ff} = 37,730$ mm zuzüglich $50 \mu\text{m}$ angenommen. Als obere Grenze der Evolvente wird der Kopf-Formkreis mit dem Radius $r_{fa} = 41,325$ mm abzüglich $50 \mu\text{m}$ angenommen. Der Bereich der durch die Evolvente beschreibbaren Flanke wird um jeweils $50 \mu\text{m}$ eingeschränkt, um Unsicherheiten beim Startwert der Optimierung zu berücksichtigen. Damit ergibt sich für die Lücke mit Teilungsfehler rechnerisch ein auf die Breite b des Zahnrades bezogenes Differenz-Spannungsvolumen $\Delta V/b = 0,188 \text{ mm}^2$. Abweichungen von diesem Wert sind dadurch zu erwarten, dass der erste und letzte „Messpunkt“ wie in Bild 5 gezeigt nicht direkt am Anfang und am Ende der Flanke liegen, sondern etwas innerhalb des zulässigen Bereiches. Dadurch reduziert sich das Spannungsvolumen an den Flanken. Die Messpunktverteilung basiert auf einer konstanten Drehzahl der Drehachse von $60^\circ/\text{s}$ und einer ebenfalls konstanten Messfrequenz des optischen Sensors von 850 Hz .

4.1 Optimierungskriterien im Vergleich

In Bild 7 sind die Differenz-Spannungsvolumina für die Optimierungen gemäß L1 und LS gegen die Nummer des Funktionselementes (FE No.) aufgetragen. Als Funktionselement wird hier eine Lücke angenommen. Die Zuordnung der ersten Lücke erfolgt willkürlich. Alle weiteren Lücken werden mathematisch positiv durchnummeriert.

In beiden Fällen ist die Lücke mit Teilungsfehler (FE No. 4) anhand des Differenz-Spannungsvolumens im Diagramm deutlich zu erkennen. Für die Optimierung gemäß L1 ergibt sich ein breitenbezogenes Differenz-Spannungsvolumen $\Delta V_4/b = 0,185 \text{ mm}^2$, das wie erwartet etwas unterhalb der Abschätzung ($0,188 \text{ mm}^2$) liegt. Die übrigen breitenbezogenen Differenz-Spannungsvolumina $\Delta V_i/b = 0 \text{ mm}^2$ für $i = 1 \dots 37$ mit $i \neq 4$ ergeben sich ebenfalls erwartungsgemäß.

Prinzipiell liefert die Optimierung gemäß LS ähnliche Ergebnisse wie die Optimierung gemäß L1. Allerdings lässt sich die Quadrierung der Differenz-Spannungsvolumina nicht geometrisch deuten. Das Resultat sind ein etwas vermindertes breitenbezogenes Differenz-Spannungsvolumen $\Delta V_{ii}/b = 0,170 \text{ mm}^2$ sowie ein leicht sinusförmiger Verlauf der übrigen breitenbezogenen Differenz-Spannungsvolumina $\Delta V_i/b$ für $i = 1 \dots 37$ mit $i \neq 4$. Damit stellt sich aus technologischer Sicht in diesem Fall also ein suboptimales Ergebnis ein.

Wegen der besseren Resultate und der geometrisch anschaulichen Deutung wird die Optimierung gemäß L1 der Optimierung gemäß LS vorgezogen.

4.2 Stabilität und Genauigkeit

Um das Verfahren auf seine Stabilität und Genauigkeit hin zu prüfen, werden Messdaten simuliert und anschließend mittels der beschriebenen Optimierung gemäß L1 ausgewertet.

4.2.1 Verfahren

Als Grundlage dienen die idealen Daten des Stirnschnittes des bereits beschriebenen Zahnrades einschließlich Aufmaß und Teilungsfehler. Zunächst werden diese Daten um eine drittel Teilung ($3,243^\circ$) mathematisch positiv rotiert und dann in der Rotationsebene verschoben.

Nach [4] treten Exzentrizitäten bis zu $80 \mu\text{m}$ auf. Die simulierten Verschiebungen in der Rotationsebene betragen daher $8 \mu\text{m}$, $32 \mu\text{m}$, $56 \mu\text{m}$ und $80 \mu\text{m}$ jeweils mit $y = 0$ (das heißt in Richtung der x-Achse) beziehungsweise $y = x$ (das heißt in Richtung der Ursprungsgeraden). Sie liegen damit also im Bereich der tatsächlich auftretenden Exzentrizitäten. In allen Fällen liefert die Simulation die gleichen Ergebnisse, sodass im Folgenden im Hinblick auf Betrag und Richtung der Verschiebungen nicht weiter differenziert wird.

Das verwendete Messsystem liefert reale Messdaten in Form von Zylinderkoordinaten. Diese bestehen aus dem Winkel und dem Radius des Messpunktes, die beide mit unterschiedlichen Fehlern behaftet sind. Der Winkel kann bei einer Drehzahl der Drehachse von $60^\circ/\text{s}$ auf $\pm 8,5''$ genau bestimmt werden, was bei einem mittleren Radius von 40 mm $\pm 1,65 \mu\text{m}$ entspricht. Für die Unsicherheit wird eine Gleichverteilung angenommen, deren äquivalente Streuung $\sigma = 0,95 \mu\text{m}$ entspricht. Demgegenüber wird die Genauigkeit des optischen Sensors vom Hersteller mit $\pm 6 \mu\text{m}$ (3σ) angegeben. Hinzu kommt noch die Unsicherheit beim Einmessen des optischen Sensors. Die bereits gedrehten und verschobenen Daten werden daher noch in rotatorischer Richtung mit einem gleichverteilten und in radialer Richtung mit einem normalverteilten Rauschen entsprechender Größenordnungen überlagert, um so eine Messung zu simulieren.

Die simulierten Messdaten werden im vorliegenden Fall der Untersuchung von Stabilität und Genauigkeit der Berechnungsverfahren nicht gefiltert, damit der Einfluss des Rauschens besonders deutlich wird. Es besteht aber prinzipiell die Möglichkeit, die Messdaten auch vor der weiteren Verarbeitung beispielsweise mit dem in [10] beschriebenen robusten Gaußfilter vorzubereiten; das lässt ein gesteigertes Leistungsverhalten der Algorithmen erwarten [4].

4.2.2 Ergebnisse

Bei vorgegebener Größe des Zahnrades sowie einer genau spezifizierten Toleranzzone des Bearbeitungsaufmaßes ver-

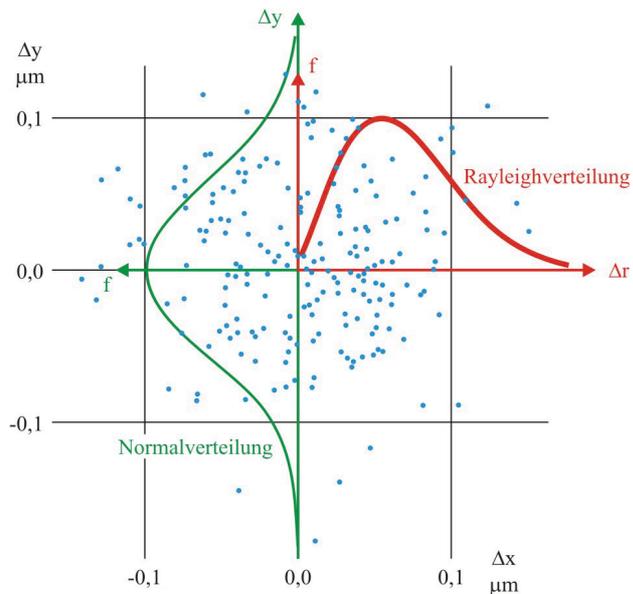


Bild 8. Scatterplot mit Verteilungen

bleiben für die Optimierung des Differenz-Spannungsvolumens gemäß L1 nur noch drei freie Parameter. Hierbei handelt es sich um die Orientierung und die Position in x/y-Richtung des Zahnrades in der Rotationsebene. Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse werden für jede Einstellung 200 Simulationen durchgeführt.

Die Optimierung liefert für die Orientierung des Zahnrades in der Rotationsebene sehr genaue Ergebnisse. Sie liegen mit $\pm 2,1''$ im Bereich der eingestellten Rechengenauigkeit. Die mittels Optimierung geschätzte Position des Zahnrades in der x/y-Ebene weicht von der Referenzposition ab. Diese Abweichungen Δx und Δy sind in einem Scatterplot in **Bild 8** dargestellt. Die Verteilungen der Abweichungen entsprechen einer Normalverteilung mit einer Streuung $\sigma \approx 0,05 \mu\text{m}$. Für die Abweichung Δy ist die Normalverteilung beispielhaft in **Bild 8** eingezeichnet. Der Nachweis, dass die Abweichungen annähernd normalverteilt sind, kann mit dem χ^2 -Test (95 %) erbracht werden. Somit ergibt sich aus den normalverteilten Abweichungen Δx und Δy die Restexzentrizität Δr als Rayleighverteilung

$$f = \frac{\Delta r}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{\Delta r^2}{2\sigma^2}}$$

mit einer Streuung $\sigma \approx 0,05 \mu\text{m}$. Sie ist ebenfalls beispielhaft in **Bild 8** eingezeichnet. Für einen Vertrauensbereich von 95 % ist die nach der Optimierung verbleibende Exzentrizität kleiner als $1/8 \mu\text{m}$.

Die so ermittelte Restexzentrizität entspricht folglich der Genauigkeit des zur Feinpositionierung zu berechnenden Korrekturvektors aus **Bild 2**. Sie stellt gegenüber der bisherigen Exzentrizität von bis zu $80 \mu\text{m}$ eine erhebliche Verbesserung dar. Im Hinblick auf den nachfolgenden Schleifprozess ist festzuhalten, dass durch bereits erwähnte Randbedingungen das Einhalten der Toleranzzone des Aufmaßes gewährleistet ist. Eine eventuell auftretende Restexzentrizität kann problemlos durch den Schleifprozess kompensiert werden.

Es ist somit gezeigt, dass der zur Feinpositionierung notwendige Korrekturvektor durch Optimierung des Differenz-

Spannungsvolumens gemäß L1 mit einer mehr als ausreichenden Stabilität und Genauigkeit ermittelt wird. Das Verfahren ist infolgedessen für die Umsetzung in der Praxis geeignet.

5 Ausblick

5.1 Implementierung in der Prozesskette

Der Nachweis der Stabilität und Genauigkeit des Verfahrens ist mit simulierten Daten erbracht. Der nächste Schritt ist die messtechnische Umsetzung in einem Laboraufbau mit anschließender Auswertung der Messdaten. Danach kann die Kopplung mit der Aktorik zur Feinpositionierung erfolgen und die Bohrung des präzisionsgeschmiedeten Zahnrades hartfeinbearbeitet werden. Die mittels Feinpositionierung realer Zahnräder erzielten Resultate lassen sich dann beispielsweise mit optischen oder taktilen Koordinatenmessgeräten (KMG) überprüfen.

Als letzter Schritt erfolgt die Integration des gesamten Verfahrens der Feinpositionierung in die Prozesskette. Da es sich hierbei um eine integrierte Prüfung handelt, die zur Steuerung nachfolgender Prozesse zwingend erforderlich ist, muss die gesamte Anwendung im Prozesstakt laufen. Hierzu ist es unumgänglich, die Echtzeitfähigkeit des gesamten Systems von der Messtechnik über die zur Optimierung verwendeten Algorithmen bis hin zur tatsächlichen Positionierung des Zahnrades in der Werkzeugmaschine mittels Piezostapelaktoren sicherzustellen.

5.2 Schnittstelle zum nachfolgenden Prozess

An die Feinpositionierung und Hartfeinbearbeitung der Bohrung des Zahnrades schließt sich in der Prozesskette unmittelbar die Hartfeinbearbeitung der Verzahnung mittels kontinuierlichem Wälzschleifen an. Dazu wird zunächst das präzisionsgeschmiedete Zahnrad in der im vorherigen Prozessschritt hartfeinbearbeiteten Bohrung in der Wälzschleifmaschine gespannt. Danach wird das Zahnrad „eingefuttert“, das heißt automatisch oder manuell zum Schleifwerkzeug ausgerichtet. Als letztes erfolgt die kontinuierliche Bearbeitung der Verzahnung mit dem Schleifwerkzeug gemäß einer vorgegebenen Kinematik.

Bei genauerer Betrachtung dieser Vorgehensweise wird die Möglichkeit einer bisher nicht bestehenden zusätzlichen Schnittstelle zwischen vorangegangener Feinpositionierung und nachfolgendem Wälzschleifen ersichtlich. Das automatische „Einfuttern“ des Zahnrades erfordert eine erneute Messung mit einem induktiv arbeitenden Sensor über wenige Zähne des Zahnrades. Dabei werden eventuelle Teilungsfehler nur unzureichend berücksichtigt. Weiterhin ist diese Vorgehensweise mit einer entsprechend längeren Prozesszeit verbunden.

Abhilfe kann hier die Nutzung der aus dem vorangegangenen Prozessschritt bekannten Orientierung des Zahnrades

schaffen. Demnach ist also zwischen beiden Prozessschritten lediglich eine entsprechend gesteuerte Handhabung notwendig. Die Aufgabe dieser Handhabung ist es, das Werkstück aus der Werkzeugmaschine für die Feinpositionierung und Hartfeinbearbeitung der Bohrung des Zahnrades zu entnehmen und in die Wälzschleifmaschine einzulegen. Das Einlegen erfolgt dann mit der bekannten Orientierung des Zahnrades so, dass im Anschluss sofort die Verzahnung geschliffen wird. Durch dieses Vorgehen kann noch einmal eine Steigerung der Leistungsfähigkeit der hier beschriebenen Prozesse erreicht werden.

Literatur

- [1] Haase, R.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: Ausschuss erkennen – Zahnräder prüfbar entwerfen und fertigen. QZ 49 (2004) H. 9, S. 58–61
- [2] Bach, F.-W. u.a.: Integrierte Prozessketten – eine Notwendigkeit zum Präzisionsgeschmieden. Internetadresse: www.utfscience.de, II / 2003, S. 1–8
- [3] Dittmann, J.: Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften von präzisionsgeschmiedeten Bauteilen. Dissertation. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 608. Düsseldorf: VDI-Verlag 2002
- [4] Bach, F.-W. u.a.: SFB 489 – Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile – Fortsetzungsantrag 2003-2004-2005. Universität Hannover, 2002
- [5] Haase, R.: Besser und schneller fertigen – Numerische Korrektur von Zahnradern. QZ 49 (2004) H. 4, S. 50–54
- [6] Haase, R.: Obtaining and Processing of CMM Data from Gear Wheel Measurements. VIth International Scientific Conference - Coordinate Measuring Technique, Bielsko-Biala, 2004, pp. 63-72
- [7] Goch, G.; Günther, A.: Future Gear Metrology - Superficial Description and Inspection of Flanks. International Conference on Gears, VDI-Berichte 1665, Vol. 2. Düsseldorf: VDI-Verlag 2002, S. 751–768
- [8] Türich, A.: Werkzeug-Profilherzeugung für das Verzahnungsschleifen. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 610. Düsseldorf: VDI-Verlag 2002
- [9] Haase, R.: In-Process Quality Control in Gear Wheel Manufacturing by the means of Best-Fit Gear Wheels. 8th International Symposium on Measurement and Quality Control in Production. VDI-Berichte 1860, S. 401–408. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004
- [10] Seewig, J.: Praxisgerechte Signalverarbeitung zur Trennung der Gestaltabweichungen technischer Oberflächen. Dissertation, Berichte aus dem Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover. Aachen: Shaker-Verlag 2000

Anmerkung – Kommentar

Der Bericht beschreibt auf sehr hohem Niveau eine wissenschaftliche Arbeit.