

Maß- und Formänderungen von Leichtbauzahnradern

AiF-Nr.: 19875 N

Obmann: Dr.-Ing. Axel Majorek

beteiligte Unternehmen:

Aichelin Holding GmbH, ALD Vacuum-Technologies GmbH; Cenit AG; Daimler AG; Georgsmarienhütte GmbH; Hanomag Lohnhärtereier GmbH; Härtereier Technotherm GmbH & Co. KG; Heess GmbH & Co. KG; MAP GmbH; Renk AG Augsburg; Tandler Zahnrad- und Getriebefabrik GmbH & Co. KG; VTN Witten GmbH; Wittmann Härtereier GmbH & Co. KG; ZF Friedrichshafen AG

Laufzeit:

01.01.2018 – 30.06.2020

Erstelldatum:

23.11.2020

Forschungsstelle:

Leibniz-Institut für werkstofforientierte Technologien - IWT

Projektleiter:

Thomas Lübben

Sachbearbeiter:

Jwalant Kagathara, Thomas Lübben

Forschungsvereinigung:

AWT

Projektbegleitender Fachausschuss

FA 15 (Maß- und Formänderungen)

Zielsetzung und Lösungsweg

Im Rahmen des Projektes sollte die im Vorgängerprojekt (17995 N) entwickelte Methode zur Ableitung der Verkippungs-ISO-Linien bei gewichtsreduzierten Zahnradgrundkörpern anhand eines exemplarischen Beispiels aus der Teilegruppe „Zahnradern mit langer Nabe und Versatz zwischen Zahnkranz und Nabe“ in die Praxis überführt werden (s. Bild 1, links).

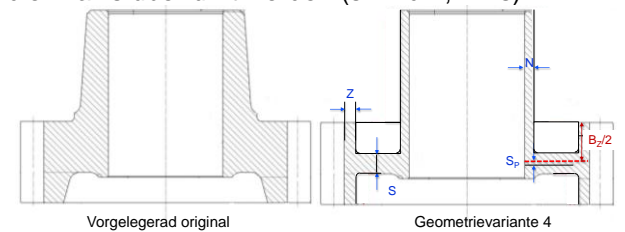


Bild 1: Querschnitt des ausgewählten Zahnrades (links), gewichtsreduzierte Variante mit charakteristischen Abmessungen (rechts)

Im Detail waren folgende Fragestellungen zu beantworten:

1. Können die numerischen Untersuchungen auch bei einem realen Zahnrad unter Vernachlässigung der Verzahnung mit einem 2D-Modell (deutlich geringere Rechenzeit) durchgeführt werden, da die Verzahnung einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Grundkörperverzug hat?
2. Wie sensitiv sind die Verkippungen von Zahnkopf und Zahnrad für Variationen der Härtebarkeit und des Kohlenstoffprofils?

3. Wie muss die Umwandlungsmodellierung modifiziert werden, um mindestens die korrekten Trends der Maß- und Formänderungen vorherzusagen zu können?
4. Können für komplexere Zahnradern mit asymmetrischer Massenverteilung Isolinien-Darstellungen der Verkippungen aus Regressions-Analysen von Simulationen gewonnen werden?
5. Wie groß ist das Kompensationspotential der geometrischen Gestaltung der Querschnittsübergänge für die Verkippungen?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde durch systematische Geometrievariationen untersucht, welche Auswirkungen Gewichtsreduzierungen eines Vorgelegerads auf die Maß- und Formänderungen nach dem Einsatzhärten haben. Diese Arbeiten wurden in enger Verknüpfung von experimentellen und numerischen Untersuchungen durchgeführt. Auf der **experimentellen Seite** wurden neben geometrischen Aspekten auch der Einfluss der Größen Fertigungseigenheiten, Härtebarkeit, C-Profil und Abkühlprozess untersucht. Zur Klärung der Frage, ob auch in diesem Projekt die Simulationen mit axialsymmetrischen 2D-Modellen durchgeführt werden können oder ob hier aufgrund eines expliziten Einflusses der Verzahnung 3D-Simulationen durchgeführt werden müssen, wurden vergleichende Untersuchungen zwischen gewichtsreduzierten Zahnradern mit und ohne Verzahnung durchgeführt.

Zur Vorbereitung der **numerischen Untersuchungen** wurden Arbeiten zur Ermittlung des temperatur- und ortsabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) und des Umwandlungsverhaltens durchgeführt. Ferner wurden umfangreiche Kalibrierungs- und Validierungsarbeiten durchgeführt. Im numerischen Bereich wurden zyklische Randbedingungen zur Modellierung von Schrägverzahnungen programmiert. Nach einer leider nur partiellen Validierung

wurde dieses Modell in enger Kombination mit experimentellen Arbeiten für die Evaluation des Kompensationspotentials von modifizierten Querschnittsübergängen eingesetzt. Letztlich wurde es zur Erlangung eines tieferen Verständnisses der Verzugsentstehung durch die komplexen Wechselspiele von Geometrie und den thermischen und umwandlungsbedingten Dehnungen angewendet.

Ergebnisse

Die **Variationen der Geometrie** (s. Bild 2, Details in [5]) mit einer Massereduzierung von bis zu 43,6 % haben gezeigt, dass die Maß- und Formänderungen der Nabe durch die Wandstärke der Nabe dominiert werden. Die ortsabhängigen Radiusänderungen am Zahnkopf können und müssen durch eine quadratische Gleichung beschrieben werden, aus der Kippwinkel/-amplitude, Balligkeit und mittlere Radiusänderung abgeleitet werden können. Der Kippwinkel des Zahnkopfes wird durch die Nabenwandstärke, Stegbreite und Stegposition beeinflusst, die zugehörige Balligkeit ist unter den gegebenen Bedingungen (Schmelze 1, Ölabschreckung mit Gasaufkohlung) nur für die Variante G1 deutlich von Null verschieden. Der Steg sorgt für vergleichsweise kleine Rundheitsabweichungen. Das Zahnrad (Steg + Zahnkranz + Zahn) verkippt in allen untersuchten Fällen in axialer Richtung. Die zugehörige Änderung der z-Koordinate der Zahnradmittellinie lässt sich durch eine Gerade beschreiben. Die Kippwinkel von Zahnrad und Zahnkopf sind einander in den meisten Fällen betragsmäßig sehr ähnlich (Bild 3).

Die Untersuchungen zum **Einfluss der Verzahnung auf den Grundkörperverzug** (Details s. [3]) haben ergeben, dass er bei Schrägverzahnung hinsichtlich der Maßänderungen von Nabe und Steg vernachlässigt werden kann. Gleiches gilt für die Formänderungen der Nabe. Für die Maß- und Formänderungen des Zahnkopfes (Bild 4) und für das Kippen von Steg + Zahnkranz + Zähnen muss er hingegen berücksichtigt werden. Ferner kommen die unterschiedlichen Wechselwirkungen der Strömung mit der Verzahnung bei unterschiedlichen Zahnorientierungen für den untersuchten Fall nicht zur Erklärung des abweichenden Maß- und Formänderungsverhaltens in Frage. Die erste Forschungsfrage muss daher mit nein beantwortet werden. Die Simulation des Kippverhaltens in axialer und radialer Richtung erfordert **die Verwendung von 3D-Modellen** zur korrekten Beschreibung des Verzahnungseinflusses. Die dafür notwendigen **zyklischen Randbedingungen** konnten erfolgreich programmiert werden.

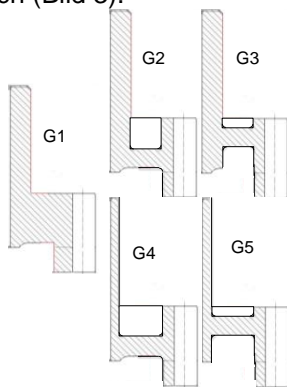


Bild 2: Experimentell untersuchte Geometrievarianten G1 – G5. Massereduzierung für G1: 8,5 %; G2 + G3: 24,6 %; G4 + G5: 43,6 %

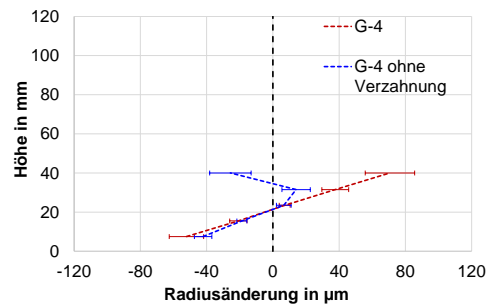


Bild 4: Einfluss der Verzahnung auf die Radiusänderungen des Zahnkopfes

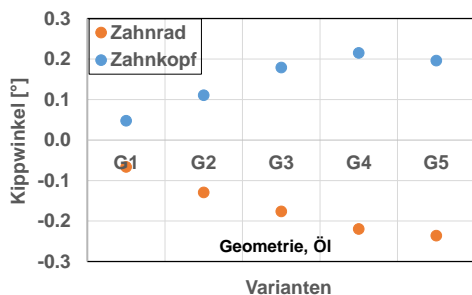


Bild 3: Einfluss der Geometrie auf die Kippwinkel von Zahnrad und Zahnkopf

Fertigungseigenspannungen haben unter den vorliegenden Bedingungen keinen relevanten Einfluss auf die Maß- und Formänderungen der Räder vom Typ G4. Da dieser Typ mit die geringsten Wandstärken hat, kann davon ausgegangen werden, dass diese Aussage auf die anderen Geometrievarianten übertragen werden kann. Bei weiteren Abmessungsreduzierungen wäre obige Aussage zu überprüfen. Für die Simulation kann unter diesen Bedingungen von eigenspannungsfreien Bauteilen ausgegangen werden.

Die Wirkung einer **reduzierten Härtebarkeit** (Details s. [5]) besteht an der Nabe im Wesentlichen auf den

durch den Steg gestützten Bereich. Hier kommt es aufgrund der modifizierten Umwandlungsvorgänge zu deutlich anderen Radiusänderungen. In den Bereichen ober- und unterhalb des Steges gibt es zwar durchaus Veränderungen der Radiusänderungen, die für G5 größer ausfallen als für G4, aber die Breitenänderung der Nabe wird nur um einige μm vergrößert. Dieses Ergebnis ist darauf zurückzuführen, dass die Nabe in diesen Bereichen trotz der reduzierten Härte keine nennenswerte Veränderung der Gefügezusammensetzung erfährt. Für Zahnkopf und Zahnrad führt die reduzierte Härte für beide Geometrien zu deutlich kleineren Kippwinkeln. Am Zahnkopf ist dies für G4 auf eine nichtlineare Radiusänderung zurückzuführen, im Fall von G5 auf eine in weiten Teilen des Zahnkopfs konstante Änderung (Bild 5).

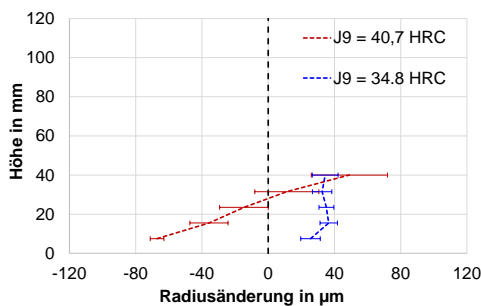


Bild 5: Einfluss der Härte auf die Radiusänderungen des Zahnkopfs (Geometriertyp G5)

Variationen im **Aufkohlungsprozess** (Details s. [5]) führen an der Nabe zu deutlich unterschiedlichen Maß- und Formänderungen, die auf keinen Fall vernachlässigt werden können. Insbesondere kann ein überhöhtes Kohlenstoffprofil im Extremfall zu einer Verdopplung der Rundheitsänderungen führen. Die Wandstärkeänderung der Nabe und die Breitenänderungen von Steg und Zahnkopf wachsen und die Balligkeit des Zahnkopfes sinkt mit steigendem Kohlenstoffeintrag. Die Kippamplitude des Zahnkopfes zeigt keinen einheitlichen Trend. Trotz der vergleichsweise großen Modifikationen des Standard C-Profiles resultieren daraus nur relativ kleine Veränderungen (maximaler Wert: G4, reduzierte Aufkohlung: $+40 \mu\text{m}$), (Bild 6).

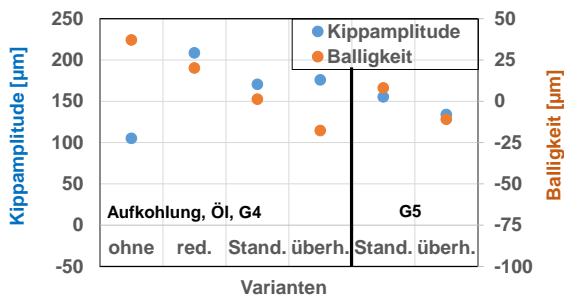


Bild 6: Kippamplitude und Balligkeit des Zahnkopfs in Abhängigkeit von Geometrie und Aufkohlung

Mit den letzten beiden Untersuchungspaketen konnte die zweite Forschungsfrage beantwortet werden.

Die **Abkühlintensität** (Details s. [5]) hat einen deutlichen Einfluss auf die Maß- und Formänderungen der Nabe. Kippamplitude und Balligkeit des Zahnkopfs werden ebenfalls deutlich durch den Abschreckprozess beeinflusst, wobei eine Salzbadabschreckung ähnlich gute Werte wie die Ofenabkühlung ergibt. Die Kippwinkel von Zahnrad und Zahnkopf sind auch für die verschiedenen Abkühlprozesse ähnlich. Ausnahme ist die Hochdruck-Gasabschreckung (HDGA), die deutlich kleinere Kippwinkel des Zahnkopfes produziert (Bild 7).

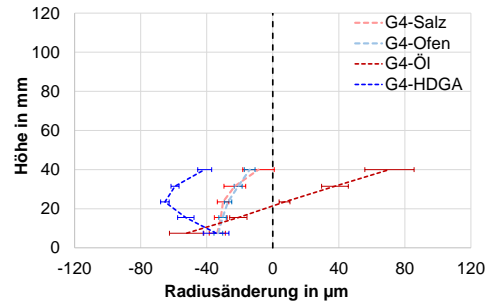


Bild 7: Einfluss des Abkühlprozesses auf die Radiusänderungen des Zahnkopfs (Geometriertyp G4)

Die **Vorarbeiten für die numerischen Untersuchungen** haben bei der Ermittlung des **WÜK** an den Geometriertypen G1 und G4 neben der Temperaturabhängigkeit auch eine deutliche Ortsabhängigkeit ergeben. Unter Berücksichtigung dieser Effekte lassen sich die Abkühlverläufe dieser Bauteiltypen bis auf kurze Ausnahmen zu Beginn der Abschreckung mit maximalen Abweichungen zum Experiment von betragsmäßig unter $60 \text{ }^\circ\text{C}$ berechnen (Details s. [6]).

Zur Erzielung einer besseren **Modellgüte für die Bainitbildung** wurde in diesem Projekt nicht die Längenänderung von Dilatometerproben, sondern ihre Volumenänderung ermittelt. Weiterhin wurde die Kohlenstoffabhängigkeit der **Umwandlung** nicht aus dem Datensatz des SFB 570 verwendet, sondern ebenfalls für die vorliegende Schmelze S1 ermittelt (Details s. [6]). Die Untersuchungen haben ergeben, dass die anisotrope Umwandlungsdehnung für diese Schmelze vernachlässigbar klein ist. Die Martensitbildung, die Härte und die Phasenzusammensetzung können mit dem resultierenden Umwandlungsmodell für die Dilatometerproben gut beschrieben werden. Trotz des deutlich größeren Aufwandes kann die Kinetik der Bainitbildung aber nicht mit ausreichender Genauigkeit modelliert werden. Der derzeitige Erklärungsansatz geht davon aus, dass das Additivitätsgesetz für die Bainitbildung zumindest für die untersuchten Schmelzen in diesem und dem Vorgängerprojekt nicht gilt. Es wurden daher insgesamt drei unterschiedliche Modelle abgeleitet, die im Rahmen der Kalibrierung und Validierung auf Eignung überprüft wurden.

Die Arbeiten zur **Kalibrierung und Validierung der Simulation** haben gezeigt, dass für das 2D-Modell des

Geometrietyp G4 ohne Verzahnung das Kohlenstoffprofil sehr gut berechnet werden kann. Diese Aussage kann auch für die übrigen Geometrien übernommen werden, da der Aufkohlungsprozess über den gesamten Vorhabenszeitraum hervorragend reproduzierbar war. Trotz der Einschränkungen bei der Modellierung der Bainitumwandlung können mit dem Kompromissmodell für die Umwandlung (Kompromiss zwischen genauer Berechnung der Kinetik bzw. der Phasenanteile) in Kombination mit dem orts- und temperaturabhängigen WÜK-Modell für G4 ohne Verzahnung die Phasenzusammensetzung, die Härte, die mittleren Maßänderungen und die orts aufgelösten Maßänderungen mit ausreichender Genauigkeit vorhergesagt werden. Einschränkungen gibt es allerdings bei den Kippwinkeln und der Maßänderungen des Zahnkranzes. Letzteres Manko kann auf die verwendete Wärmeübergangsverteilung zurückgeführt werden, die an einem verzahnten Teil bestimmt wurde. Eine Übertragbarkeit dieser Aussagen auf andere Geometrien scheint fraglich zu sein, da der WÜK auch durch die Geometrie beeinflusst wird und zudem eine Sensitivitätsstudie eine Empfindlichkeit der berechneten Maß- und Formänderungen für Variationen des WÜK gezeigt hat (s. [6]).

Die Untersuchungen mittels 3D-Modellen haben ergeben, dass für die Geometrie G4 mit und ohne Verzahnung 3D- bzw. 2D-Modelle praktisch identische Ergebnisse für Nabe und Steg liefern, also die 3D-Modellierung korrekt erfolgte. Die Anwendung auf die Geometrietypen G1, G2, G3 und G5 hat gezeigt, dass unter den gegebenen Bedingungen akzeptable Ergebnisse für die Verkippung nur resultieren, wenn eine am jeweiligen Bauteiltyp ermittelte Wärmeübergangsbeschreibung vorliegt. Aus Plausibilitätsbetrachtungen abgeleitete Modelle sind nicht ausreichend. Die Balligkeit hingegen wird selbst unter diesen idealisierten Bedingungen nicht korrekt berechnet (s. [6]). Dieses Manko ist sehr wahrscheinlich, wie bereits im Vorgängerprojekt, auf die immer noch unzureichende Modellierung der Bainitumwandlung zurückzuführen. Die dritte Forschungsfrage konnte daher nicht beantwortet werden.

Unterm Strich muss aus diesen Ergebnissen gefolgert werden, dass aufgrund des unerwarteten und sehr spät erkannten großen Einflusses des WÜK auf die Verkippung und der nicht erreichten Verbesserung des Umwandlungsmodells **eine voll umfängliche Validierung des Berechnungsmodells nicht möglich war**. Die vierte Forschungsfrage muss daher zum jetzigen Zeitpunkt mit „nein“ beantwortet werden.

Die daher überwiegend experimentell durchgeführte Analyse des **Einflusses der Querschnittsübergänge** auf die Verkippung hat ergeben, dass sich die Wirkung der Modifikationen an der Nabe im Wesentlichen auf eine Reduzierung der Rundheitsabweichung beim Typ G5 beschränken. Für Zahnkopf und Zahnrad kann für

G5 eine nicht vernachlässigbare Reduzierung des jeweiligen Kippwinkels erzielt werden, wobei die resultierende Reduzierung der Kippamplitude am Zahnkopf bis zu 40 µm beträgt (s. Bild 8). Die Antwort auf die fünfte Forschungsfrage lautet daher: Es wurde ein kleineres Reduzierungspotenzial der Kippwinkel für Geometrien mit stark asymmetrischer Stegposition identifiziert. Es konnten allerdings keine Vorteile für die Querschnittsübergänge nach Mattheck festgestellt werden.

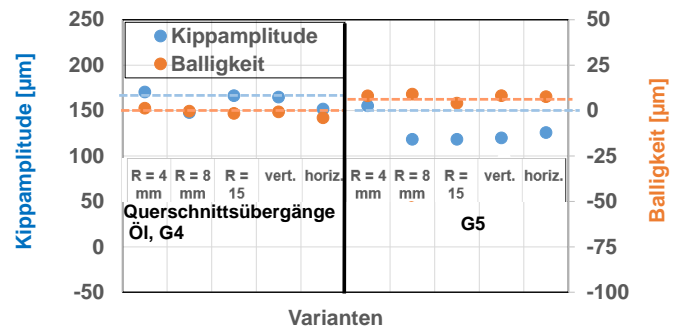


Bild 8: Kippamplitude und Balligkeit des Zahnkopfs in Abhängigkeit von Geometrie und Form der Querschnittsübergänge (Viertelkreise mit Radius 4 mm, 8 mm, 15 mm, bzw. nach Mattheck in vertikaler und horizontaler Ausrichtung)

Die numerischen Analysen konnten im Rahmen des möglichen Untersuchungsumfangs (nur Geometriotyp G4) ebenfalls keine Vorteile für die Übergänge nach Mattheck identifizieren.

Die Studien zur Erlangung eines **grundlegendes Verständnisses der Verkippungsentstehung** haben für die weitestgehend korrekt simulierbare Geometrievariante G4 gezeigt, dass die Verkippung des Zahnkopfes in radialer Richtung und die Verkippungen von Steg und Zahnkranz in axialer Richtung aus dem Wechselspiel der Asymmetrien in den Verzugspotentialträgern Masseverteilung, Temperaturverteilung und Verteilung der Legierungselemente – hier Kohlenstoff – resultieren. Dabei spielt die Masseverteilung erwartungsgemäß eine zentrale Rolle. Je nach Abmessungen von Nabe, Steg und Verzahnung leisten diese Bereiche Beiträge zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Solange keine Phasenumwandlungen stattfinden, wird das Geschehen von der Verteilung der thermischen Dehnungen in diesen Bereichen diktiert. Solange keine ortsabhängige Kohlenstoffverteilung vorliegt, sind diese proportional zu den Temperaturen. Nach einer Aufkohlung gilt dies nicht mehr, da die thermischen Dehnungen auch proportional zum thermischen Ausdehnungskoeffizienten sind, der wiederum vom C-Gehalt abhängt. In dieser Phase kann aber dennoch eine gute Vorstellung des Verkippungsgeschehens aus der Analyse der Asymmetrien dieser drei Bereiche erlangt werden.

Nach Beginn der Phasenumwandlung kommen zusätzliche Volumenvergrößerungen ins Spiel, die den thermischen Schrumpfungen entgegenwirken. Auch für die

Verteilungen der Umwandlungsdehnungen ist eine Beurteilung der Asymmetrien zum Verständnis der Verkipfungsentwicklungen zielführend. Allerdings macht die Überlagerung von thermischen und umwandlungsbedingten Dehnungen die Erlangung von Erkenntnissen zunehmend komplizierter (s. [6]).

Die ursprünglich als mithilfe der Simulation einfach zu beantworten eingeschätzte Frage „Sind die finalen Kippwinkel von Zahnkopf und Zahnrad nur zufällig ähnlich bzw. gleich?“ (vergl. Bild 3) konnte bislang trotz großen Aufwands nicht uneingeschränkt beantwortet werden. Falls es Gründe gibt, die zu dieser Ähnlichkeit führen, konnten sie bislang nicht identifiziert werden. Die derzeitige Antwort auf diese Frage geht aufgrund des extrem komplexen Zusammenspiels von Geometrie, thermischen und umwandlungsbedingten Dehnungen von **zufälliger Gleichheit** aus, da eine feste Kopplung von Verzahnung und Steg nicht beobachtet werden konnte.

Zusammenfassung

Die experimentellen Untersuchungen haben zunächst das prinzipielle Verzugsverhalten des verwendeten Vorgelegerads aufgezeigt und eine adäquate mathematische Beschreibung ermöglicht. Die wesentlichen Formänderungen sind die Verkipfung des Zahnkopfs in radialer Richtung und die daraus resultierende Kippamplitude sowie die Verkipfung von Steg + Zahnkranz + Zahn in axialer Richtung.

Die in der Serienfertigung auftretenden Schwankungen von Härtebarkeit und Aufkohlung sollten für das untersuchte Vorgelegerad eher von untergeordneter Bedeutung für den Verzug sein. Variationen des Abschreck-

prozesses und Geometriemodifikationen zeigen erwartungsgemäß deutliche Einflüsse, die aber bei entsprechender Kombination (gewichtssreduziertes Zahnrad in Kombination mit geringerer Abschreckintensität) zu beherrschbaren Verzügen führen können.

Die Arbeiten zum Einfluss der Querschnittsübergänge haben ein Potenzial zur Reduzierung der Zahnkopfverkipfung für Bauteile mit asymmetrischer Steglage aufgezeigt.

Die vorbereitenden experimentellen Arbeiten zur Simulation konnten zeigen, dass unter den gegebenen Bedingungen die Fertigungseigenheiten keinen Einfluss auf den Verzug haben. Da eine Vernachlässigung der Verzahnung zu deutlich modifizierten Verzügen führen kann, müssen allerdings 3D-Simulationsmodelle verwendet werden.

Die vorliegenden bzw. gewählten Ansätze zur Bestimmung und Beschreibung der Bainitumwandlung bzw. des Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) haben sich als nicht ausreichend herausgestellt. Im Fall der Bainitbildung konnte das auf ein grundsätzliches Problem zurückgeführt werden. Für den Wärmeübergang hätte für jede zu simulierende Geometrie der WÜK bestimmt werden müssen. Eine numerische Bestimmung der Isolinien-Darstellung der Verkipfung war aufgrund dieser beiden Probleme nicht möglich. Entsprechend konnte die im Vorgängerprojekt entwickelte Methode zur Ableitung der Verkipfungs-ISO-Linien bei gewichtsreduzierten Zahnradgrundkörpern nicht in die Praxis überführt werden.

„Das Ziel des Vorhabens wurde teilweise erreicht.“

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 19875 N der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Autoren bedanken sich für die Förderung des Projektes und für die vielfältige Unterstützung durch die Mitglieder des projektbegleitenden Arbeitskreises.

Veröffentlichungen

[1] Lübben, Th., Surm, H.; Zoch, H.-W.: Distortion of gear base bodies in consideration of lightweight construction. Extended Abstract 1st Int. Conference on Quenching and Distortion Engineering, November 2018, Nagoya, Japan (electronical).

[2] Lübben, Th.; Kagathara, J.: Distortion of gears as consequence of lightweight construction – influence of toothing. Proc. European Conference on Heat Treatment, 5-7 June 2019, Bardolino, Italy (electronical).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- [3] Lübben, Th.; Kagathara, J.: Distortion of gears as consequence of lightweight construction – influence of teeth. HTM J. Heat Treatm. Mat. 75 (2020) 3, p. 153 – 162.
- [4] Kagathara, J.; Lübben, Th.: Case Hardening Simulation of a Complex Spur Gear. Proc. ECHT Conf. 2020, Antwerp, Belgium, 30.11.-02.12.2020.
- [5] Lübben, Th.; Kagathara, J.: Einfluss von Einsatzhärteprozess und Härtebarkeit auf das Verzugsverhalten eines gewichtsreduzierten Vorgelegerrads. HTM J. Heat Treatm. Mat. 75 (2020) 6.
- [6] Kagathara, J.; Lübben, Th.: Numerical study to understand the distortion behavior of a weight-reduced counter gear. HTM J. Heat Treatm. Mat. 76 (2021) 1.

Kontakt

Dr.-Ing. Thomas Lübben
Badgasteiner Straße 3
D-28359 Bremen
Tel.: +(49)-421-218-51321
luebben@iwt-bremen.de