

M. Vidoni, S. Sarkar, H. Farivar, J. Sims, M. Jordan, D. Münter

Simulation of Fixture Hardening for Tool and Process Design Optimization

Simulation des Fixturhärtens zur Optimierung von Werkzeug- und Prozessdesign

Abstract/Kurzfassung

Fixture hardening is the process of choice when thin-walled, carburized gears need to be heat treated with minimal distortion. Only a few publications have studied and described the phenomena taking place in carburized gears during a fixture hardening process. An integrated approach is proposed to improve the design of hardening fixtures and introduce new strategies and instrumentation to better understand and control the process. The proposed approach is to tightly integrate the knowledge in metallurgy, numerical simulation, process control, and machine design areas to mutually compensate and overcome the current limitations in each single area. An instrumented fixture is designed for a reference gear and tested on an industrial quenching press. The signals from the fixture are combined directly with the signals from the quenching press, recorded, and used to validate and improve the numerical simulation models. Metallurgical simulations are used to predict temperature distribution, phase transformations, distortion, and to identify new process strategies.

Keywords: Fixture hardening, simulation, distortion, aerospace gears, carburization, quenching, phase transformation, 16NCD17, AIR9160

Fixturhärten ist das Verfahren der Wahl, wenn dünnwandige, aufgekohlte Zahnräder mit minimalem Verzug wärmebehandelt werden sollen. Nur wenige Veröffentlichungen haben die Phänomene untersucht und beschrieben, die in aufgekohlten Zahnrädern während eines Fixturhärteprozesses auftreten. Es wird ein integrierter Ansatz vorgeschlagen, um das Design von Härtevorrichtungen zu verbessern und neue Strategien und Instrumente einzuführen, um den Prozess besser zu verstehen und zu kontrollieren. Der vorgeschlagene Ansatz besteht darin, das Wissen in den Bereichen Metallurgie, numerische Simulation, Prozesssteuerung und Maschinenkonstruktion eng miteinander zu verknüpfen, um die derzeitigen Einschränkungen in jedem einzelnen Bereich auszugleichen und zu überwinden. Eine instrumentierte Vorrichtung wird für ein Referenzzahnrad entworfen und auf einer industriellen Härtepresse getestet. Die Signale der Vorrichtung werden direkt mit den Signalen der Härtepresse kombiniert, aufgezeichnet und zur Validierung und Verbesserung der numerischen Simulationsmodelle verwendet. Metallurgische Simulationen werden zur Vorhersage von Temperaturverteilung, Phasenumwandlungen und Verzug sowie zur Ermittlung neuer Prozessstrategien verwendet.

Schlüsselwörter: Fixturhärten, Simulation, Verzug, Luft- und Raumfahrtzahnräder, Aufkohlung, Abschrecken, Phasenumwandlung, 16NCD17, AIR9160

Authors/Autoren: Dr.-Ing. Michele Vidoni, Dr.-Ing. Daniel Münter, Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH, Pfänderstrasse 50-52 88161 Lindenberg, Michele.vidoni@liebherr.com (corresponding author/Kontakt)

Marc Jordan, Wickert Maschinenbau GmbH, Wollmesheimer Höhe 2, 76829 Landau

M. Sc. Justin Sims, DANTE Solutions Inc., 7261 Engle Road, Suite 10 Cleveland, OH 44130, USA

M. Sc. Sayantan Sarkar, Dr.-Ing. Hamidreza Farivar, IEHK – Institut für Eisenhüttenkunde – RWTH Aachen, Intzestrasse 1, 52072 Aachen

HOW TO CITE THIS ARTICLE: M. Vidoni et al.: Simulation of Fixture Hardening for Tool and Process Design Optimization. HTM J. Heat Treatm. Mat. 76 (2021) 5, pp. 356-369, DOI:10.1515/htm-2021-0013

1 Introduction and State of the Art

The combination of carburizing and fixture hardening is frequently used to achieve the necessary material properties and target geometrical tolerances for gears in the aerospace and automotive industries. In fixture hardening, the component is austenitized and then positioned in a press. The press is equipped with a fixture which has two main functions: 1) deliver, in a predefined and controlled manner, the quenching media to the part surface and 2) constrain the dimensional change of the part during quenching. After inserting the hot part, the fixture is closed and the quenchant flow activated. After a given amount of time, the flow of quenchant is stopped, the fixture is opened, and the component is removed from the fixture for further processing.

Compared to batch heat treatment processes, fixture hardening is considerably more expensive because only one, or eventually a few parts, can be heat treated in each cycle and because part-specific quenching tools are necessary for each component to be heat treated [1]. The cost of fixture hardening is also high because the fixtures and process parameters need to be calibrated with a series of experiments where the processed components cannot be used and need to be scrapped. According to the publicly available information sources and to the experience of Liebherr-Aerospace, there is presently no alternative quenching process for carburized gears that can achieve the small geometrical tolerances that fixture hardening can achieve. Direct gas quenching after low-pressure carburizing shows good potential [2], but it is unlikely to deliver the same geometrical control and robustness in relation to the previous manufacturing steps as fixture hardening.

Distortion after heat treatment is a problem with an important economic impact on the production costs in several industries, including in the production of transmission gears [3]. The economic loss due to non-conformities, scrapped parts or rework has been the driving force for the development of new heat treatment processes, quenching media, quality monitoring tools, and numerical simulation tools [4–6].

In the past, government-funded research projects have been initiated worldwide with the aim of promoting and establishing the use of heat treatment simulation in industry. Among those in Germany, the SFB570 “Distortion Engineering” (2001–2011) [7] and the “Computer Aided Simulation of Heat Treatment” (C. A. S. H.) project (2002–2005) [8] are two notable projects. These projects were dedicated to systematically analyzing distortion and opened the way for the industrial application of numerical heat treatment simulation. As many studies on distortion show, there is a large number of factors affecting distortion which makes simulation difficult, and consequently, also expensive [9]. These adverse factors are harming the widespread diffusion of heat treatment simulation in industrial context.

1 Einführung und Stand der Technik

Die Kombination von Aufkohlen und Fixturhärten wird häufig eingesetzt, um die erforderlichen Werkstoffeigenschaften und die angestrebten geometrischen Toleranzen für Zahnräder in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Automobilindustrie zu erreichen. Beim Fixturhärten wird das Bauteil austenitisiert und anschließend in einer Presse positioniert. Die Presse ist mit einer Vorrichtung ausgestattet, die zwei Hauptfunktionen hat: 1) das Abschreckmedium in einer vordefinierten und kontrollierten Weise auf die Oberfläche des Teils zu bringen und 2) die Maßänderung des Teils während des Abschreckens zu begrenzen. Nach dem Einlegen des heißen Teils wird die Vorrichtung geschlossen und der Durchfluss des Abschreckmittels aktiviert. Nach einer bestimmten Zeit wird der Durchfluss des Abschreckmittels gestoppt, die Vorrichtung geöffnet und das Bauteil zur weiteren Bearbeitung aus der Vorrichtung genommen.

Im Vergleich zu Chargen-Wärmebehandlungsverfahren ist das Fixturhärten erheblich teurer, weil in jedem Zyklus nur ein oder eventuell einige wenige Teile wärmebehandelt werden können und weil für jedes zu wärmebehandelnde Bauteil teilespezifische Abschreckwerkzeuge erforderlich sind [1]. Die Kosten für das Härten in Vorrichtungen sind auch deshalb hoch, weil die Vorrichtungen und Prozessparameter mit einer Reihe von Versuchen kalibriert werden müssen, bei denen die bearbeiteten Bauteile nicht verwendet werden können und verschrottet werden müssen. Nach den öffentlich zugänglichen Informationsquellen und den Erfahrungen von Liebherr-Aerospace gibt es derzeit kein alternatives Abschreckverfahren für aufgekohlte Zahnräder, mit dem die geringen geometrischen Toleranzen erreicht werden können, die durch das Fixturhärten möglich sind. Das direkte Gasabschrecken nach der Niederdruckaufkohlung zeigt ein gutes Potenzial [2], aber es ist unwahrscheinlich, dass es die gleiche geometrische Kontrolle und Robustheit in Bezug auf die vorhergehenden Fertigungsschritte bietet wie das Fixturhärten.

Verzug nach der Wärmebehandlung ist ein Problem mit erheblichen wirtschaftlichen Auswirkungen auf die Produktionskosten in verschiedenen Industriezweigen, unter anderem bei der Herstellung von Getrieberädern [3]. Der wirtschaftliche Verlust aufgrund von Abweichungen, Ausschuss oder Nacharbeit war die treibende Kraft für die Entwicklung neuer Wärmebehandlungsverfahren, Abschreckmedien, Qualitätsüberwachungswerkzeuge und numerischer Simulationswerkzeuge [4–6].

In der Vergangenheit wurden weltweit staatlich geförderte Forschungsprojekte mit dem Ziel initiiert, den Einsatz der Wärmebehandlungssimulation in der Industrie zu fördern und zu etablieren. In Deutschland sind der SFB570 „Distortion Engineering – Verzugsbeherrschung in der Fertigung“ (2001–2011) [7] und das Projekt „Computergestützte Simulation der Wärmebehandlung“ (C. A. S. H.) (2002–2005) [8] zu nennen. Diese Projekte widmeten sich der systematischen Analyse von Verzug und ebneten den Weg für die industrielle Anwendung der numerischen Wärmebehandlungssimulation. Wie viele Studien über Verzug zeigen, gibt es eine große Anzahl von Faktoren, die den Verzug beeinflussen, was die Simulation schwierig und folglich auch teuer macht [9]. Diese ungünstigen Faktoren beeinträchtigen die weite Verbreitung der Wärmebehandlungssimulation im industriellen Kontext.

At present, alternative implementation approaches are applied to simulate heat treatment. Research institutions and universities typically develop their own material and transformation models [10]. These are typically user subroutines for generic commercial FEA packages such as ABAQUS, ANSYS or MSC.MARC and are typically not commercialized and often focused on specific application cases. Some privately owned companies such as DANTE, HEARTS, SYSWELD, Deform-HT, SIMUFACT, and FORGE provide capabilities for heat treatment simulation, both as stand-alone solutions or as extension for generic commercial FEA software [10]. For this work, the simulations have been performed with the finite-element software ANSYS and the heat treatment simulation software DANTE.

Fixture hardening has been in use since the 1930s; however, minimal scientific work has been published in peer-reviewed journals on the subject, and an even smaller number of these regard simulation. Among these are the works by *Wagner* [11] and *Banka et al.* [12]. Metallurgical simulations have been also performed by *Stormvinter et al.* [13], *Li* [14] and *Kagathara et al.* [15]. An extended review on heat treatment simulation in general can be found in the work of *Simsir et al.* [16]. Recently, in the work of *Birkhofer et al.* [17], a 2D finite element simulation is performed to optimize the mandrel dimensions in a fixture hardening process along with the distortion analysis.

2 Targets and Methods

The targets of the investigation are to achieve an understanding of the thermo-physical, metallurgical, and dimensional changes occurring inside the hardening fixture and apply numerical simulation to efficiently design fixtures and process parameters for future gears. The target components are ring gears used in flight control systems for passenger aircraft. In this article, the focus is on a reference part, illustrated in Figure 1, made of 16NCD17 according to AIR9160. The material is a nickel chrome molybdenum carburizing grade of steel used for aerospace applications. The target component has an external diameter of 158 mm, a weight of 600 grams, a minimum cross section of 5 mm, and a maximum cross section of 8 mm. The reference chemical composition is reported in Table 1. The complete heat treatment cycle for this component is illustrated in Figure 2, and the simulation tools can integrally handle the cycle. This work is focused on the fixture hardening process. Therefore, the results from simulations and experiments are compared at the end of quenching and before deep freezing and tempering. A good understanding of the process from the physical and metallurgical perspective would allow the number of pre-production tests and scrapped parts currently required to calibrate a fixture hardening process for a given geometry to be significantly reduced, and further increase the robustness of the process.

Gegenwärtig werden alternative Implementierungsansätze für die Simulation der Wärmebehandlung verwendet. Forschungseinrichtungen und Universitäten entwickeln in der Regel ihre eigenen Material- und Umwandlungsmodelle [10]. Dabei handelt es sich in der Regel um Benutzerunterprogramme für generische kommerzielle FEM-Pakete wie ABAQUS, ANSYS oder MSC.MARC, die in der Regel nicht kommerziell genutzt werden und oft auf spezifische Anwendungsfälle ausgerichtet sind. Einige private Unternehmen wie DANTE, HEARTS, SYSWELD, Deform-HT, SIMUFACT und FORGE bieten Funktionen für die Wärmebehandlungssimulation, sowohl als eigenständige Lösungen als auch als Erweiterung für allgemeine kommerzielle FEA-Software [10]. Für diese Arbeit wurden die Simulationen mit der Finite-Elemente-Software ANSYS und der Wärmebehandlungssimulationssoftware DANTE durchgeführt.

Das Härten in Vorrichtungen wird seit den 1930er Jahren angewandt; es wurden jedoch nur wenige wissenschaftliche Arbeiten zu diesem Thema in Fachzeitschriften mit Peer-Review veröffentlicht und noch weniger davon betreffen die Simulation. Dazu gehören die Arbeiten von *Wagner* [11] und *Banka et al.* [12]. Metallurgische Simulationen wurden auch von *Stormvinter et al.* [13], *Li* [14] und *Kagathara et al.* [15] durchgeführt. Eine ausführliche Übersicht über Wärmebehandlungssimulationen im Allgemeinen findet sich in der Arbeit von *Simsir et al.* [16]. Kürzlich wurde in der Arbeit von *Birkhofer et al.* [17] eine 2D-Finite-Elemente-Simulation zur Optimierung der Dornabmessungen in einem Fixturhärteprozess zusammen mit der Verzugsanalyse durchgeführt.

2 Ziele und Methoden

Ziel der Untersuchung ist es, ein Verständnis für die thermophysikalischen, metallurgischen und Maßveränderungen zu erlangen, die in der Härtevorrichtung auftreten und die numerische Simulation anzuwenden, um Vorrichtungen und Prozessparameter für künftige Zahnräder effizient zu gestalten. Bei den Zielkomponenten handelt es sich um Hohlräder, die in Flugsteuersystemen für Passagierflugzeuge verwendet werden. In diesem Artikel liegt der Schwerpunkt auf einem Referenzteil, das in Bild 1 dargestellt ist und aus 16NCD17 gemäß AIR9160 hergestellt wird. Bei dem Werkstoff handelt es sich um eine Nickel-Chrom-Molybdän-Aufkohlungsstahlsorte, die in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt wird. Das Zielbauteil hat einen Außendurchmesser von 158 mm, ein Gewicht von 600 Gramm, einen kleinsten Querschnitt von 5 mm und einen größten Querschnitt von 8 mm. Die chemische Referenzzusammensetzung ist in Tabelle 1 angegeben. Der vollständige Wärmebehandlungszyklus für dieses Bauteil ist in Bild 2 dargestellt und die Simulationswerkzeuge können diesen Zyklus vollständig verarbeiten. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf dem Härteprozess in Vorrichtungen. Daher werden die Ergebnisse aus Simulationen und Experimenten am Ende des Abschreckens und vor dem Tiefkühlen und Anlassen verglichen. Ein gutes Verständnis des Prozesses aus physikalischer und metallurgischer Sicht würde es ermöglichen, die An-

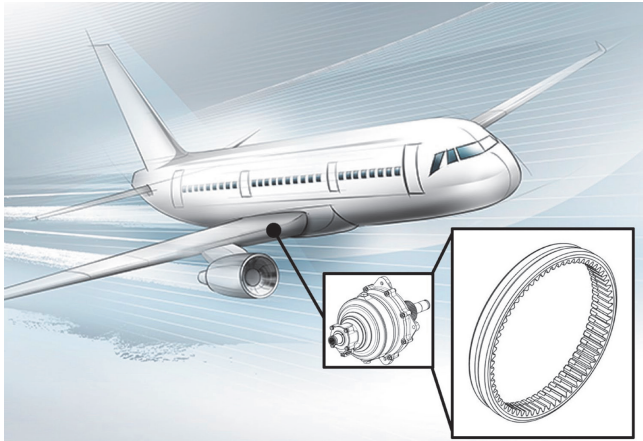


Fig. 1. Ring gear considered in the study and its application in the flight control system

Bild 1. Das in der Studie betrachtete Hohlrund und seine Anwendung im Flugsteuerungssystem

In the present work, the effort is directed in particular to exploit simulation as a practical tool for industrial application. The performance of fixture and fixture hardening processes can be evaluated from several points of view; such as process setup cost, cycle times, repeatability, final mechanical properties, and distortion reduction. The integrated approach proposed allows improvements in all of these aspects. A multidisciplinary approach is used in this work. The knowledge from metallurgical, numerical simulation, process control, and machine design areas were combined to mutually compensate and overcome the current limitations in each single area. While process instrumentation allows the precise local knowledge of physical variables, it does not provide a global description of the process. This data can be difficult to interpret and can even be misinterpreted. Without a comprehensive process model, measurement errors may remain undetected. Although simulation results may not offer exact accuracy, they are a powerful tool to help understand the physical interactions and tendencies within the system under investigation and allow alternative options to be explored quickly and cost effectively. Finally, to veri-

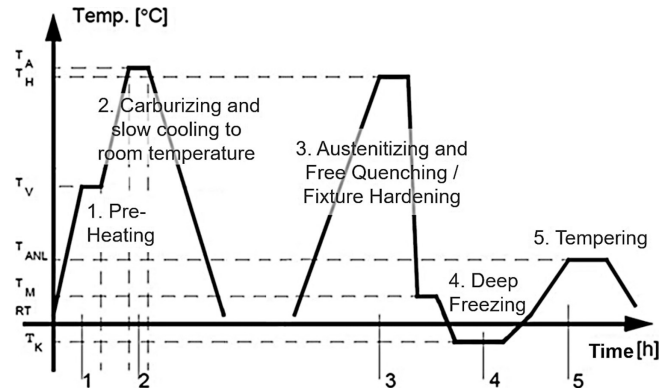


Fig. 2. Heat treatment cycle for the gear under investigation

Bild 2. Wärmebehandlungszyklus für das untersuchte Zahnrad

zahl der Vorproduktionsversuche und der Ausschussteile, die derzeit zur Kalibrierung eines Fixturhärteprozesses für eine bestimmte Geometrie erforderlich sind, erheblich zu reduzieren und die Robustheit des Prozesses weiter zu erhöhen.

In der vorliegenden Arbeit wird vor allem versucht, die Simulation als praktisches Werkzeug für die industrielle Anwendung zu nutzen. Die Leistung von Fixturhärteprozessen kann unter verschiedenen Gesichtspunkten bewertet werden, wie z. B. Prozesseinrichtungskosten, Zykluszeiten, Wiederholbarkeit, endgültige mechanische Eigenschaften und Verzugsreduzierung. Der vorgeschlagene integrierte Ansatz ermöglicht Verbesserungen in all diesen Bereichen. In dieser Arbeit wird ein multidisziplinärer Ansatz verfolgt. Das Wissen aus den Bereichen Metallurgie, numerische Simulation, Prozesssteuerung und Maschinenkonstruktion wurde kombiniert, um die derzeitigen Beschränkungen in jedem einzelnen Bereich auszugleichen und zu überwinden. Die Prozessinstrumentierung ermöglicht zwar eine genaue lokale Kenntnis der physikalischen Variablen, liefert aber keine globale Beschreibung des Prozesses. Diese Daten können schwer zu interpretieren sein oder sogar falsch interpretiert werden. Ohne ein umfassendes Prozessmodell können Messfehler unentdeckt bleiben. Auch wenn die Simulationsergebnisse keine exakte Genauigkeit bieten, sind sie ein leistungsfähiges Instrument, um die

16NCD17 according to AIR9160					
wt.	C%	Si%	Mn%	P%	S%
Min	0.14	-	0.25	-	-
Max	0.18	0.35	0.55	0.015	0.010
wt.	Cr%	Mo%	Ni%	Cu%	Al%
Min	1.00	0.2	3.8	-	-
Max	1.40	0.3	4.3	0.2	0.055

Table 1. Reference chemical composition for the carburizing steel 16NCD17 according to AIR9160

Tabelle 1. Chemische Referenzzusammensetzung für den Aufkohlungsstahl 16NCD17 gemäß AIR9160

fy, and ensure as soon as possible, the practical industrial applicability of the process options considered, experiments conducted with industrial scale equipment and industrial components are fundamental.

Accurate metallurgical simulations require accurate material data. Steel samples from the same melt as the studied target gears, as well as a set of ring gears, were delivered to the Institute of Eisenhüttenkunde (IEHK) by Liebherr-Aerospace for precise metallurgical and dilatometric characterization. The results were shared with DANTE Solutions Inc., which fine-tuned the phase transformation models for the specific steel composition. The transformation model parameters were then shared with IEHK and Liebherr-Aerospace. The target components were carburized using LPC at IEHK and provided to Wickert Maschinenbau GmbH for testing. Wickert Maschinenbau GmbH prepared an industrial quenching press and the ancillary test equipment to perform the complete heat treatment cycle and geometrical measurements. Liebherr-Aerospace and Wickert Maschinenbau cooperated to design the quenching fixture and process instrumentation, as well as for the execution of the experiments.

2.1 Experimental Methods

The phase transformation kinetics of the material 16NCD17 was evaluated using dilatometry tests. As the carburization process produces a gradient of carbon from the surface to the core of the specimen, it is important to identify the transformation kinetics for different carbon contents. With this objective, along with the base material, two additional steel melts were forged at IEHK with carbon concentrations of 0.5 % C and 0.8 % C by weight, which represent the transition and surface carbon content of the post-carburized specimens. These melts were produced using a vacuum induction furnace and cast in an ingot with a square section of 80 mm by 80 mm and a length of 60 mm. The ingot was homogenized for 2.5 hours at 1200 °C and, using a multi-step forging process, processed into a bar with a 40 mm × 40 mm section. Flat dilatometry samples, having dimensions of 7 mm × 4 mm × 1.3 mm were machined from the forged bars containing different carbon concentrations. The DANTE software contains phase transformation kinetics data at these three carbon levels for 16NCD17 and interpolates between them to calculate the behavior of other carbon levels.

A Bähr dilatometer of type DIL 805 A/D (Fig. 3) was used to simulate the actual heat treatment process. To avoid oxidation, all experiments were performed in a protective atmosphere of Helium gas. The dimensional changes in the longitudinal direction were

physikalischen Wechselwirkungen und Tendenzen innerhalb des zu untersuchenden Systems zu verstehen und alternative Optionen schnell und kostengünstig zu erkunden. Um schließlich die praktische industrielle Anwendbarkeit der in Betracht gezogenen Prozessoptionen zu überprüfen und so schnell wie möglich sicherzustellen, sind Experimente mit Anlagen im industriellen Maßstab und industriellen Komponenten von grundlegender Bedeutung.

Genau metallurgische Simulationen erfordern genaue Materialdaten. Liebherr-Aerospace hat dem Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) Stahlproben aus derselben Schmelze wie die untersuchten Zielzahnräder sowie einen Satz Ringzahnräder zur genauen metallurgischen und dilatometrischen Charakterisierung geliefert. Die Ergebnisse wurden an DANTE Solutions Inc. weitergegeben, das die Phasenumwandlungsmodelle für die spezifische Stahlsammensetzung feinabgestimmt hat. Die Parameter des Umwandlungsmodells wurden dann mit IEHK und Liebherr-Aerospace ausgetauscht. Die Zielkomponenten wurden mit LPC beim IEHK aufgekühlt und der Wickert Maschinenbau GmbH zur Prüfung zur Verfügung gestellt. Wickert Maschinenbau GmbH bereitete eine industrielle Fixturhärtepresse und die dazugehörige Prüfausrüstung vor, um den kompletten Wärmebehandlungszyklus und die geometrischen Messungen durchzuführen. Liebherr-Aerospace und Wickert Maschinenbau arbeiteten bei der Konstruktion der Abschreckvorrichtung und der Prozessinstrumentierung sowie bei der Durchführung der Versuche zusammen.

2.1 Experimentelle Methoden

Die Phasenumwandlungskinetik des Werkstoffs 16NCD17 wurde anhand von Dilatometrietests bewertet. Da der Aufkohlungsprozess einen Gradienten des Kohlenstoffs von der Oberfläche zum Kern der Probe erzeugt, ist es wichtig, die Umwandlungskinetik für unterschiedliche Kohlenstoffgehalte zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden am IEHK neben dem Grundmaterial zwei weitere Stahlschmelzen mit Kohlenstoffkonzentrationen von 0,5 und 0,8 Gewichtsprozent geschmiedet, die den Übergangs- und Oberflächenkohlenstoffgehalt nach dem Aufkohlen der Proben repräsentieren. Diese Schmelzen wurden in einem Vakuum-Induktionsofen hergestellt und zu einem Block mit einem quadratischen Querschnitt von 80 mm × 80 mm und einer Länge von 60 mm gegossen. Der Barren wurde 2,5 Stunden lang bei 1200 °C homogenisiert und in einem mehrstufigen Schmiedeverfahren zu einem Stab mit einem Querschnitt von 40 mm × 40 mm verarbeitet. Aus den geschmiedeten Stangen mit unterschiedlichen Kohlenstoffkonzentrationen wurden flache Dilatometrieproben mit den Abmessungen 7 mm × 4 mm × 1,3 mm hergestellt. Die DANTE-Software enthält Daten zur Phasenumwandlungskinetik bei diesen drei Kohlenstoffkonzentrationen für 16NCD17 und interpoliert zwischen ihnen, um das Verhalten bei anderen Kohlenstoffkonzentrationen zu berechnen.

Ein Bähr-Dilatometer des Typs DIL 805 A/D (Bild 3) wurde zur Simulation des tatsächlichen Wärmebehandlungsprozesses verwendet. Um Oxidation zu vermeiden, wurden alle Versuche unter einer Schutzgasatmosphäre aus Helium durchgeführt. Die

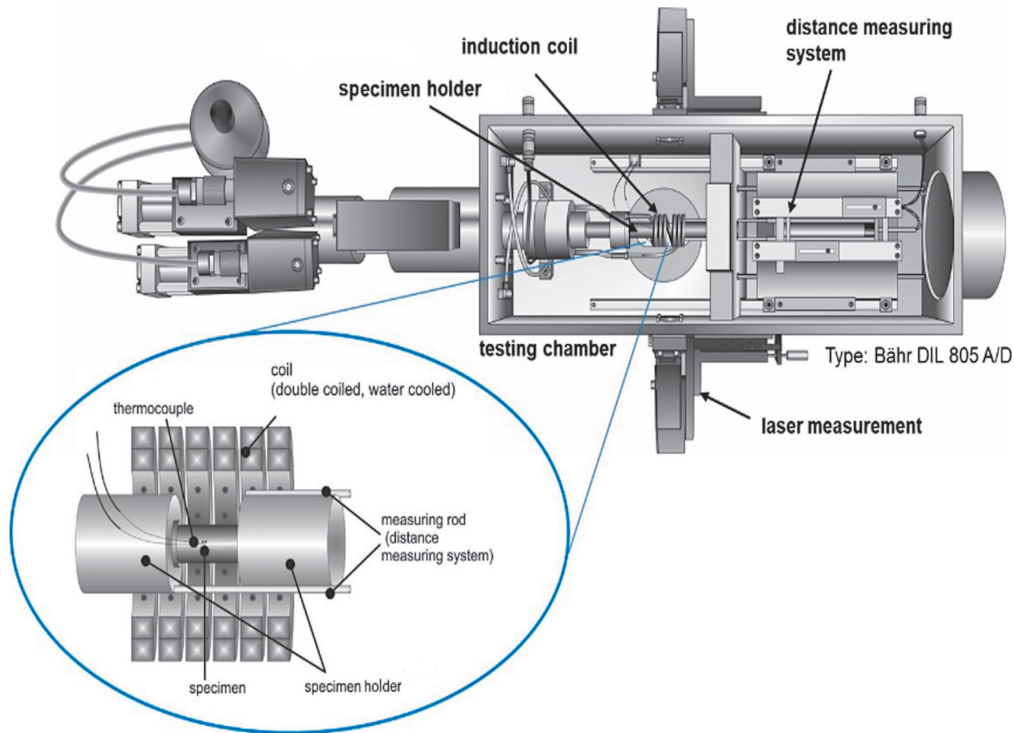


Fig. 3. Dilatometer used for the material characterization at the IEHK

Bild 3. Dilatometer für die Materialcharakterisierung am IEHK

measured with a contact measurement system. No deformation force was applied during quenching.

There are mainly two different heat treatment cycles simulated with dilatometry i) continuous linear cooling and ii) isothermal holding. The specimens tested with a continuous cooling cycle were heated to 840 °C at a rate of 5 °C/s for austenitization and held for 10 minutes before quenching. The specimens were then quenched using different cooling rates, ranging from 10 °C/s to 200 °C/s. The cooling rate range was chosen based on the martensitic and bainitic formation behavior shown in published CCT diagrams. The rates chosen were used to explore the formation behavior throughout the cooling rate range for martensite, bainite, and retained austenite. The material with 0.17 % carbon content represents the core of the gear component, whereas 0.8 % C represents the surface of the component. During the quenching process, the outer surface of the component experiences a higher cooling rate. Due to the higher carbon content, untransformed austenite is visible in this region. The dilatometric specimens were further analyzed by X-ray diffraction (XRD) to evaluate the relationship between retained austenite (RA) and the quenching rate. Therefore, to construct the RA versus quenching rate relationship, different cooling rates were chosen. As is shown in the plot of dilatation curves (Fig. 4), with an increase in carbon content, the martensite start temperature is reduced considerably.

Maßänderungen in Längsrichtung wurden mit einem berührenden Messsystem gemessen. Beim Abschrecken wurde keine Verformungskraft angewendet.

Es wurden hauptsächlich zwei verschiedene Wärmebehandlungszyklen mit Dilatometrie simuliert: i) kontinuierliche lineare Abkühlung und ii) isothermes Halten. Die mit einem kontinuierlichen Kühlzyklus geprüften Proben wurden zur Austenitisierung mit einer Geschwindigkeit von 5 °C/s auf 840 °C erwärmt und vor dem Abschrecken 10 Minuten lang gehalten. Die Proben wurden dann mit unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten zwischen 10 °C/s und 200 °C/s abgeschreckt. Der Bereich der Abkühlgeschwindigkeit wurde auf der Grundlage des in den veröffentlichten CCT-Diagrammen gezeigten martensitischen und bainitischen Bildungsverhaltens gewählt. Die gewählten Raten wurden verwendet, um das Bildungsverhalten von Martensit, Bainit und Restaustenit im gesamten Abkühlungsbereich zu untersuchen. Das Material mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,17 % repräsentiert den Kern des Getriebeteils, während 0,8 % C die Oberfläche des Bauteils darstellt. Während des Abschreckens erfährt die Außenfläche des Bauteils eine höhere Abkühlungsrate. Aufgrund des höheren Kohlenstoffgehalts ist in diesem Bereich nicht umgewandelter Austenit sichtbar. Die dilatometrischen Proben wurden mittels Röntgenbeugung (XRD) weiter analysiert, um die Beziehung zwischen Restaustenit (RA) und der Abschreckgeschwindigkeit zu bewerten. Zur Erstellung der Beziehung zwischen RA und Abschreckgeschwindigkeit wurden verschiedene Abkühlgeschwindigkeiten gewählt. Wie aus der Darstellung der Dilatationskurven (Bild 4) hervorgeht, wird die Martensit-Starttemperatur mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt erheblich gesenkt.

To investigate the bainitic transformation, isothermal holding tests were performed on the specimens. Similarly, the specimens were heated to 840 °C, with a heating rate of 5 °C/s, and held for 10 min. to ensure the complete transformation to austenite and the dissolution of all carbon. During the quenching process, the cooling rate was kept constant at 10 °C/s, since this cooling rate showed a fully martensitic microstructure in the continuously cooled specimens and offered the most uniform cooling in the specimen. The specimens were cooled down to the corresponding M_s temperatures and held isothermally for a fixed time (1 hr., 2 hrs. and 3 hrs. for 0.17 % C, 0.5 % C, and 0.8 % C, respectively). The isothermal holding test was repeated by holding the specimens at different temperatures above the M_s temperature and the bainite transformation kinetics were analyzed. The heat treated specimens were finally analyzed by XRD to determine the phase fractions of retained austenite. The experiments showed that the bainite transformation is very slow for the steel compositions, temperatures, and cooling rates considered in this study, which are representative of actual processing conditions. The samples formed a substantial amount of martensite upon cooling to room temperature since the bainite transformation did not complete at the given hold times and temperatures.

The Wickert test equipment is comprised of a fixture hardening press, depicted in Figure 5, an atmospheric chamber furnace with a muffle box equipped with inert gas feed, a deep-freezer, a tempering furnace, and a coordinate measuring machine (ZEISS Duramax). The hardening fixture was equipped with more than 24 thermoelements, a pyrometer, and an optical micrometer to measure the part diameter at high temperature directly in the quenching press. The quenching media was quenching oil (Durixol, Burgdorf GmbH). For the experiments, a target case hardness depth (CHD) of 0.6 mm (610 HV) was used for all of the ring gears. The target surface hardness for the gears after quenching was 720 HV. In addition, a ring gear was equipped with type K thermoelements

Zur Untersuchung der bainitischen Umwandlung wurden isotherme Halteversuche an den Proben durchgeführt. Dabei wurden die Proben mit einer Aufheizrate von 5 °C/s auf 840 °C erwärmt und 10 Minuten lang gehalten, um die vollständige Umwandlung in Austenit und die Auflösung des gesamten Kohlenstoffs sicherzustellen. Während des Abschreckens wurde die Abkühlungsgeschwindigkeit konstant bei 10 °C/s gehalten, da diese Abkühlungsgeschwindigkeit bei den kontinuierlich abgekühlten Proben ein vollständig martensitisches Gefüge ergab und die gleichmäßigste Abkühlung in der Probe bot. Die Proben wurden auf die entsprechenden M_s -Temperaturen abgekühlt und für eine festgelegte Zeit isotherm gehalten (1 Std., 2 Std. und 3 Std. für 0,17 % C, 0,5 % C bzw. 0,8 % C). Der isotherme Haltetest wurde wiederholt, indem die Proben bei verschiedenen Temperaturen oberhalb der M_s -Temperatur gehalten wurden. Zusätzlich wurde die Kinetik der Bainitumwandlung analysiert. Die wärmebehandelten Proben wurden schließlich mittels XRD analysiert, um die Phasenanteile des Restaustenits zu bestimmen. Die Experimente zeigten, dass die Bainitumwandlung bei den in dieser Studie betrachteten Stahlzusammensetzungen, Temperaturen und Abkühlungsraten, die für die tatsächlichen Verarbeitungsbedingungen repräsentativ sind, sehr langsam verläuft. Die Proben bildeten beim Abkühlen auf Raumtemperatur eine beträchtliche Menge an Martensit, da die Bainitumwandlung bei den gegebenen Haltezeiten und Temperaturen nicht abgeschlossen war.

Die Wickert-Versuchsanlage besteht aus einer Härtepresse, die in Bild 5 dargestellt ist, einem atmosphärischen Kammerofen mit Muffelkasten mit Inertgaszufuhr, einer Tiefkühltruhe, einem Anlassenofen und einem Koordinatenmessgerät (ZEISS Duramax). Die Härtevorrichtung war mit mehr als 24 Thermoelementen, einem Pyrometer und einem optischen Mikrometer ausgestattet, um den Teildurchmesser bei hoher Temperatur direkt in der Fixturhärtepresse zu messen. Als Abschreckmedium diente Abschrecköl (Durixol, Burgdorf GmbH). Für die Versuche wurde für alle Hohlräder eine Soll-Einsatzhärte (CHD) von 0,6 mm (610 HV) verwendet. Die Soll-Oberflächenhärte für die Zahnräder nach dem Abschrecken betrug 720 HV. Außerdem wurde ein Zahnrad mit

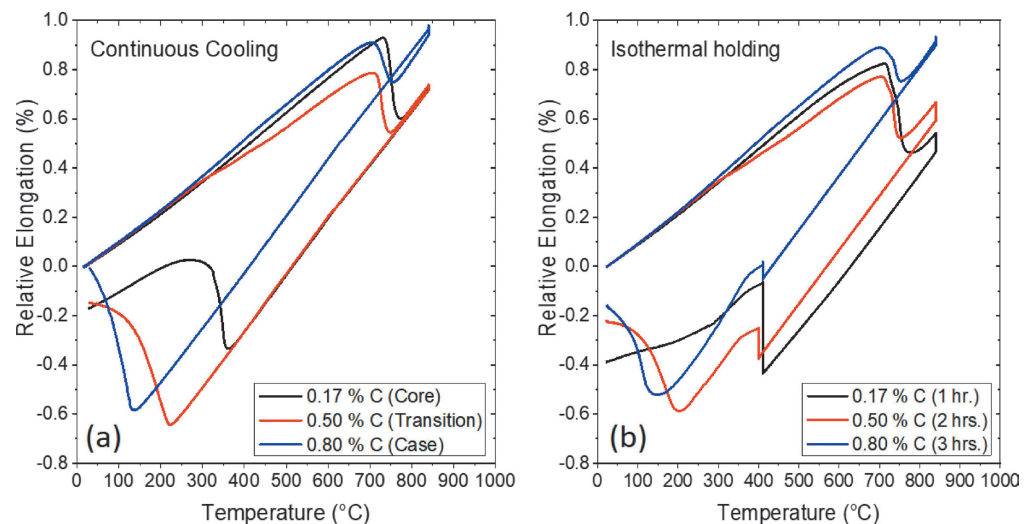


Fig. 4. Example of dilatometer curves for different carbon contents

Bild 4. Beispiel von Dilatometerkurven für verschiedene Kohlenstoffgehalte



Fig. 5. Hardening press used for the experiments (Wickert Maschinenbau GmbH)

Bild 5. Die für die Versuche verwendete Härtepresse (Wickert Maschinenbau GmbH)

(tmg type MQ0008, class 1) for model validation and for fine-tuning the heat transfer coefficient (HTC) values necessary to perform the simulations. The hardening fixture is specifically designed to allow the operation of the press with an instrumented ring, by means of a flexible sealing system. Obtaining direct access to the measurement signals from the industrial quenching press allowed the synchronization of the sensor recordings from the furnace, fixture, test gear, and quenching press. The equipment recorded the data with a time resolution of 0.001 seconds. For this purpose, a signal recording and processing system was deployed (Gantner Systems, Q.bloxx). The collected data was used to study the process directly, as well as to adjust the mechanical and thermal boundary conditions for the simulations.

2.2 Numerical Methods

The numerical model was implemented in ANSYS Workbench and DANTE. The latter is installed as a software extension and provides the multi-phase material model, temperature dependent thermo-physical properties, and carburizing and phase transformation models. Figure 6 illustrates the modelling and simulation steps performed.

From the 3D models of the gear and hardening fixture prototype, the geometry of a half tooth is extracted, and the tooling is modelled as additional rigid bodies. This simplification assumes symmetry and circumferentially uniform thermal boundary conditions. The mesh is generated using an inflation algorithm to obtain smaller elements near the component's surface, with the aim of accurately predicting the carbon, thermal, microstructural phase, and stress gradients. The flexibility of the model allows the comparison of different tooling designs and loads with minimal

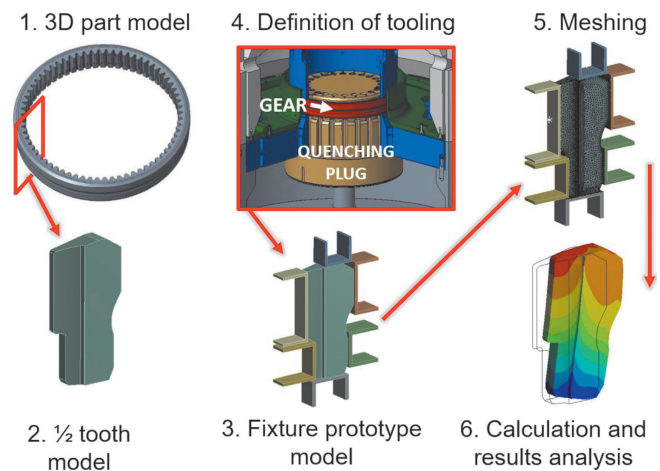


Fig. 6. Phases of the modelling and simulation work

Bild 6. Phasen der Modellierungs- und Simulationsarbeiten

Thermoelementen vom Typ K (tmg Typ MQ0008, Klasse 1) zur Modellvalidierung und zur Feinabstimmung der für die Simulationen erforderlichen Wärmeübergangskoeffizienten (HTC) ausgestattet. Die Härtevorrichtung ist speziell so konzipiert, dass die Presse mit einem instrumentierten Ring betrieben werden kann. Der direkte Zugang zu den Messsignalen der industriellen Abschreckpresse ermöglichte die Synchronisierung der Sensoraufzeichnungen von Ofen, Vorrichtung, Prüfeinrichtung, instrumentiertem Hohlrad und Abschreckpresse. Die Geräte zeichneten die Daten mit einer Zeitauflösung von 0,001 Sekunden auf. Zu diesem Zweck wurde ein System zur Signalaufzeichnung und -verarbeitung eingesetzt (Gantner Systems, Q.bloxx). Die gesammelten Daten wurden zur direkten Untersuchung des Prozesses sowie zur Anpassung der mechanischen und thermischen Randbedingungen für die Simulationen verwendet.

2.2 Numerische Methoden

Das numerische Modell wurde in ANSYS Workbench und DANTE implementiert. Letzteres ist als Softwareerweiterung installiert und bietet das Mehrphasenmaterialmodell, temperaturabhängige thermophysikalische Eigenschaften sowie Aufkohlungs- und Phasenumwandlungsmodelle. Bild 6 veranschaulicht die durchgeführten Modellierungs- und Simulationsschritte.

Aus den 3D-Modellen des Zahnrad- und des Härtevorrichtungstypen werden die Geometrie eines halben Zahns extrahiert und die Werkzeuge als zusätzliche starre Körper modelliert. Diese Vereinfachung setzt Symmetrie und in Umfangsrichtung gleichmäßige thermische Randbedingungen voraus. Das Netz wird mithilfe eines Aufblasalgorithmus erzeugt, um kleinere Elemente in der Nähe der Bauteiloberfläche zu erhalten, mit dem Ziel, die Kohlenstoff-, thermischen und mikrostrukturellen Phasen sowie die Spannungsgradienten genau vorherzusagen. Die

effort and cost. It is possible, using the model, to compare different cooling conditions, different quenching plug diameters and shapes, alternative forces and pressures applied, and changes in their application times. The number of possible alternative fixture set-ups and process parameter combinations is practically unlimited. In this article, the focus is on the effect of plug diameter variation. To demonstrate how the model can effectively predict the plug diameter's effect on the dimensional change of the target component, the plug diameter is varied, with all other parameters held constant, and the dimensional change of the gear evaluated. For the purpose of this study, the simulations are performed until the end of the quenching step, and do not include the deep freezing and tempering steps. In this work, numerical and experimental results are compared at the end of the quenching step.

All the relevant material properties for the steel alloy 16NCD17 are formulated as microstructural phase, carbon, and temperature dependent values and are provided in the DANTE material database. The phase transformation models have been prepared as described above. The thermal boundary conditions, and especially the heat transfer coefficient at the boundary between the gear and quenching oil, are especially important to achieve good simulation predictions. Figure 7 reports the HTC used for the simulations. The values are based on the time-temperature data gathered during hardening tests performed with the instrumented ring. Because the HTC depends on the oil flow in the quenching fixture, this boundary condition is valid only for the fixture setup and oil flow rate for which the temperature measurements were made. In this study, the oil type, flow rate, and oil temperature were not changed. The same boundary condition determination strategy was applied for austenitization and transfer from the furnace to the fixture.

Figure 8 illustrates the simulation results at an arbitrary time during the quenching step. Four variables are plotted on the gear section for the same time; from left to right, there are: carbon con-

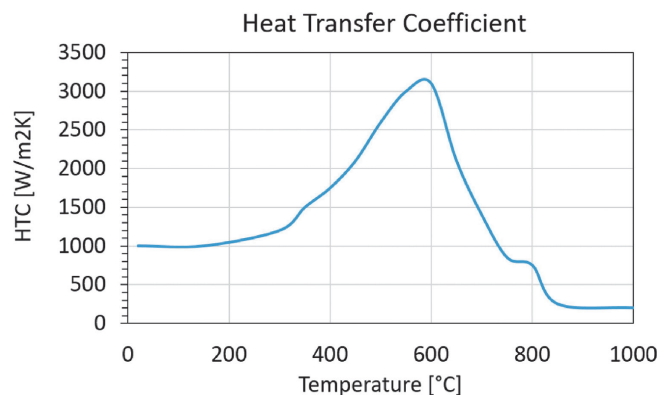
Flexibilität des Modells ermöglicht den Vergleich verschiedener Werkzeugausführungen und Belastungen mit minimalem Aufwand und geringen Kosten. Mithilfe des Modells ist es möglich, verschiedene Kühlbedingungen, unterschiedliche Abschreckdorndurchmesser und -formen, alternative Kräfte und Drücke sowie Änderungen der Anwendungszeiten zu vergleichen. Die Anzahl der möglichen alternativen Vorrichtungsaufbauten und Prozessparameterkombinationen ist praktisch unbegrenzt. In diesem Artikel liegt der Schwerpunkt auf den Auswirkungen der Variation des Dorndurchmessers. Um zu demonstrieren, wie das Modell die Auswirkung des Dorndurchmessers auf die Maßänderung des Zielbauteils effektiv vorhersagen kann, wird der Dorndurchmesser variiert, wobei alle anderen Parameter konstant gehalten werden, und die Maßänderung des Zahnrads bewertet. Für die Zwecke dieser Studie werden die Simulationen bis zum Ende des Abschreckens durchgeführt und schließen die Schritte des Tiefkühlens und Anlassens nicht ein. In dieser Arbeit werden die numerischen und experimentellen Ergebnisse am Ende des Abschreckschritts verglichen.

Alle relevanten Materialeigenschaften für die Stahllegierung 16NCD17 sind als mikrostrukturelle phasen-, kohlenstoff- und temperaturabhängige Werte formuliert und in der DANTE-Materialdatenbank enthalten. Die Phasenumwandlungsmodelle wurden wie oben beschrieben erstellt. Die thermischen Randbedingungen, insbesondere der Wärmeübergangskoeffizient an der Grenze zwischen der Bauteiloberfläche und dem Abschrecköl, sind besonders wichtig, um gute Simulationsvorhersagen zu erzielen. In Bild 7 ist der für die Simulationen verwendete HTC angegeben. Die Werte basieren auf den Zeit-Temperatur-Daten, die während der Härtetests mit dem instrumentierten Ring gesammelt wurden. Da der HTC von der Ölströmung in der Abschreckvorrichtung abhängt, gilt diese Randbedingung nur für den Aufbau der Vorrichtung und die Ölströmungsrate, für die die Temperaturmessungen durchgeführt wurden. In dieser Studie wurden der Öltyp, die Durchflussmenge und die Öltemperatur nicht verändert. Die gleiche Strategie zur Bestimmung der Randbedingungen wurde für die Austenitisierung und den Transfer vom Ofen zur Vorrichtung angewendet.

Bild 8 veranschaulicht die Simulationsergebnisse zu einem beliebigen Zeitpunkt während des Abschreckvorgangs. Auf dem Zahnradabschnitt sind vier Variablen für den gleichen Zeitpunkt aufge-

Fig. 7. Temperature dependent heat transfer coefficient for the quenching oil

Bild 7. Temperaturabhängiger Wärmeübergangskoeffizient für das Abschrecköl



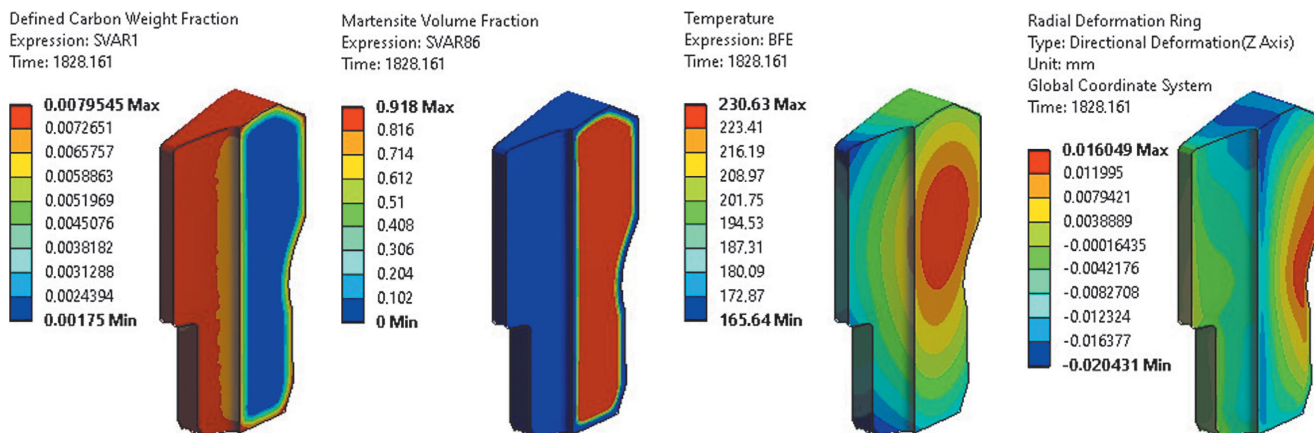


Fig. 8. Example of model output used for process comparisons

Bild 8. Beispiel für eine Modellausgabe, die für Prozessvergleiche verwendet wird

tent, temperature, radial change, and martensite volume fraction. The plots show how the carbon concentration at the surface can influence the amount of martensite formed locally.

3 Results and Discussion

The first step in the simulation is the carburization of the gear. DANTE allows the simulation of both low pressure and atmospheric carburization. Both process alternatives have been tested by Liebherr-Aerospace for this target alloy and gear. The corresponding low pressure carburization (LPC) process parameters were available for his work, but the requirements on mesh size and time steps in the model are sensibly more stringent for low pressure carburizing than atmospheric carburizing. This is due to the need to simulate several pulses and diffusion stages during LPC, instead of a constant carbon potential used for gas carburization. The surface carbon is also generally higher for LPC, creating steep carbon gradients over small distances. For this reason, only the atmospheric carburization process was simulated. Micrographic investigation proved the absence of carbides near the surface for both processes, though the model indicated that carbides were forming and dissolving during the process and significantly contributed to the final surface carbon and CHD. The simulated and measured carbon profiles match well, as illustrated in Figure 9.

The thermal model reveals the temperature evolution in the component during the process. Figure 10 compares the temperature evolution of the actual component to the simulation at the core of the component during the transfer from the austenitization furnace to the quenching fixture and during the quenching process.

tragen. Von Links nach Rechts sind dies: Kohlenstoffgehalt, Temperatur, radiale Änderung und Martensitvolumenanteil. Die Diagramme zeigen, wie die Kohlenstoffkonzentration an der Oberfläche die Menge des lokal gebildeten Martensits beeinflussen kann.

3 Ergebnisse und Diskussion

Der erste Schritt in der Simulation ist die Aufkohlung des Zahnrads. DANTE ermöglicht die Simulation sowohl der Niederdruck- als auch der atmosphärischen Aufkohlung. Beide Prozessalternativen wurden von Liebherr-Aerospace für diese Legierung und dieses Zahnrad getestet. Die entsprechenden Prozessparameter für die Niederdruckaufkohlung (LPC) standen für die Simulation zur Verfügung, aber die Anforderungen an die Maschengröße und die Zeitschritte im Modell sind für die Niederdruckaufkohlung deutlich strenger als für die atmosphärische Aufkohlung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Niederdruckaufkohlung mehrere Impulse und Diffusionsstufen simuliert werden müssen, während bei der Gasaufkohlung ein konstantes Kohlenstoffpotential verwendet wird. Auch der Oberflächenkohlenstoff ist beim LPC im Allgemeinen höher, was zu steilen Kohlenstoffgradienten über kleine Entfernungen führt. Aus diesem Grund wurde nur der atmosphärische Aufkohlungsprozess simuliert. Die mikrografische Untersuchung ergab, dass es bei beiden Verfahren keine oberflächennahen Karbide gab, obwohl das Modell darauf hindeutete, dass sich Karbide während des Prozesses bildeten und auflösten und wesentlich zum endgültigen Oberflächenkohlenstoff und zur CHD beitrugen. Die simulierten und gemessenen Kohlenstoffprofile stimmen gut überein, wie in Bild 9 dargestellt.

Das thermische Modell zeigt die Temperaturentwicklung im Bauteil während des Prozesses. Bild 10 vergleicht die Temperaturentwicklung des tatsächlichen Bauteils mit der Simulation am Kern des Bauteils während des Transfers vom Austenitisierungsofen zur Abschreckvorrichtung und während des Abschreckpro-

The figure shows the core temperature over time. This region is responsible for the most relevant contribution to the final component distortion, since the higher carbon case transforms much later than the base carbon in the core and contributes very little to the total amount of distortion. The core of the gear cools from the austenitization temperature to the martensite start temperature in approximately 50 seconds, including the transfer time in air from the furnace to the hardening fixture.

The phase transformation model predicts the phase changes during the process and the final phase distribution in the simulated part. Figure 11 shows the comparison of simulated and measured residual austenite at the component core and surface after quenching. The model predicts that 0.5 % bainite will form in the core of the component at the end of quenching. This is in agreement with micrographic analysis performed on the gear section, as well as agreeing with the dilatometric investigations. However, a quantitative experimental measurement of the bainite fraction for these limited amounts is difficult. Figure 12 compares the hardness profile predicted by simulation to experimental results, to a depth of 1.4 mm from the surface. Hardness profiles and retained austenite amounts are important for this application because they are needed as validation criteria for the industrial process and are also a good indication of the final part performance. These results show a good match between the simulated and measured values. For the studied component section and steel alloy, quenching with oil provides a large safety margin with regards to the minimum hardness requirements of 330 HV for the core and 700 HV for the surface. The deep freezing step, which follows quenching, acts to lower the residual austenite fraction and increase the hardness. The maximal residual austenite requirement after quenching of 20 % is safely achieved before deep freezing, so the model performance for this application is satisfactory.

Das Bild zeigt die Kerntemperatur im Zeitverlauf. Dieser Bereich ist für den größten Beitrag zum endgültigen Bauteilverzug verantwortlich, da sich der höhere Kohlenstoffanteil im Kern erst viel später umwandelt als der Basiskohlenstoff und nur wenig zum Gesamtverzug beiträgt. Der Kern des Zahnrad kühlt in etwa 50 Sekunden von der Austenitisierungstemperatur auf die Martensit-Starttemperatur ab, einschließlich der Zeit für den Lufttransport vom Ofen zur Härtevorrichtung.

Das Phasenumwandlungsmodell prognostiziert die Phasenänderungen während des Prozesses und die endgültige Phasenverteilung im simulierten Teil. Bild 11 zeigt den Vergleich von simuliertem und gemessenem Restaustenit im Kern und an der Oberfläche des Bauteils nach dem Abschrecken. Das Modell sagt voraus, dass sich am Ende des Abschreckens 0,5 % Bainit im Kern des Bauteils bilden werden. Dies stimmt mit der mikrografischen Analyse des Zahnradabschnitts sowie mit den dilatometrischen Untersuchungen überein. Eine quantitative experimentelle Messung des Bainitanteils für diese begrenzten Mengen ist jedoch schwierig. In Bild 12 wird das durch die Simulation vorhergesagte Härteprofil mit den experimentellen Ergebnissen verglichen, und zwar bis zu einer Tiefe von 1,4 mm von der Oberfläche. Härteprofile und Restaustenitmengen sind für diese Anwendung wichtig, da sie als Validierungskriterien für den industriellen Prozess benötigt werden und auch einen guten Hinweis auf die endgültige Leistung des Teils geben. Diese Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und gemessenen Werten. Für den untersuchten Bauteilabschnitt und die Stahllegierung bietet das Abschrecken mit Öl eine große Sicherheitsmarge im Hinblick auf die Mindesthärteanforderungen von 330 HV für den Kern und 700 HV für die Oberfläche. Das auf das Abschrecken folgende Tiefkühlen bewirkt eine Verringerung des Restaustenitanteils und eine Erhöhung der Härte. Die maximale Restaustenitanforderung nach dem Abschrecken von 20 % wird vor dem Tiefkühlen sicher erreicht, sodass die Modelleistung für diese Anwendung zufriedenstellend ist.

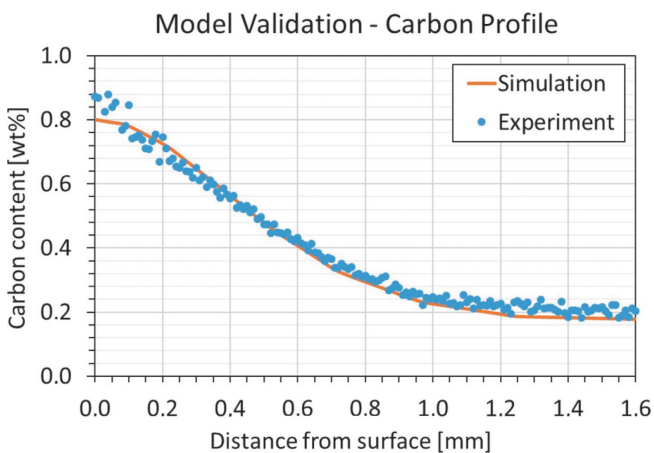


Fig. 9. Simulated and measured carbon profiles

Bild 9. Simulierte und gemessene Kohlenstoffprofile

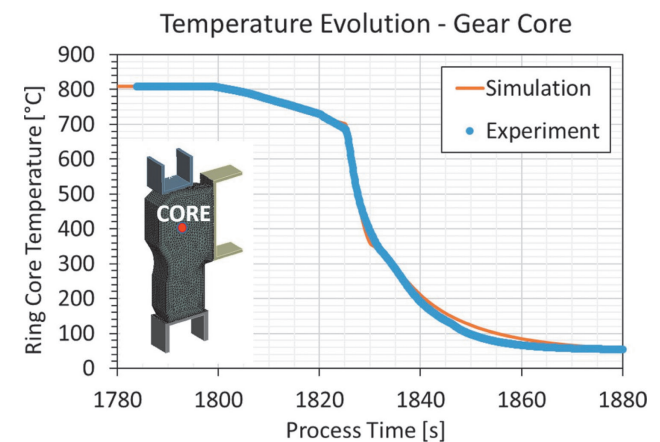


Fig. 10. Measured and simulated temperature at the core of the gear

Bild 10. Gemessene und simulierte Temperatur am Kern des Getriebes

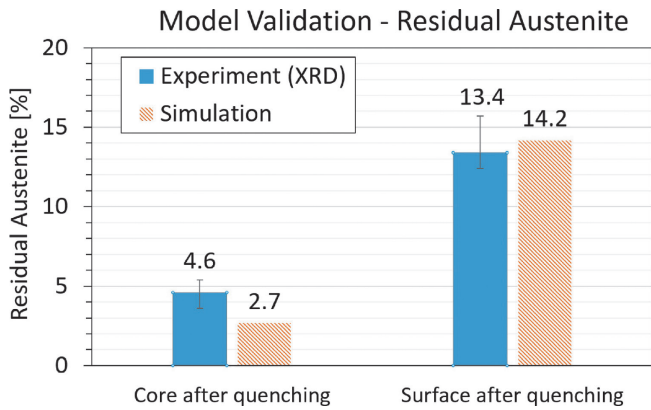


Fig. 11. Residual austenite at component core and surface

Bild 11. Restaustenit am Bauteilkern und an der Oberfläche

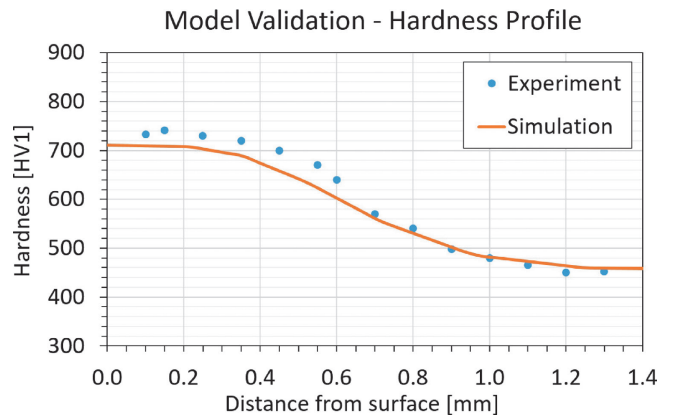


Fig. 12. Hardness profile after quenching

Bild 12. Härteprofil nach dem Abschrecken

Figure 13 illustrates the final tooth shape predicted by the DANTE model at the end of the quenching process, magnified 50X. The colors represent the dimensional change in the radial direction. Figure 14 is a plot of the local radius at the gear root along the axis of the gear. The simulated values and the values measured at three different circumferential positions on a fixture hardened ring are displayed. According to the simulation, the ring should show a smaller internal diameter in the lower region compared to the upper one after quenching. The conicity is predicted by the model to be 0.053 mm, with the average measured value being 0.075 mm.

Bild 13 zeigt die vom DANTE-Modell vorhergesagte endgültige Zahnform am Ende des Abschreckprozesses in 50-facher Vergrößerung. Die Farben stellen die Maßänderung in radialer Richtung dar. Bild 14 ist eine Darstellung des lokalen Radius am Zahnfuß entlang der Zahnradachse. Dargestellt sind die simulierten Werte und die an drei verschiedenen Umfangspositionen an einem fixturgehärteten Ring gemessenen Werte. Nach der Simulation sollte der Ring nach dem Abschrecken im unteren Bereich einen kleineren Innendurchmesser aufweisen als im oberen. Die Konizität wird vom Modell mit 0,053 mm vorhergesagt, wobei der

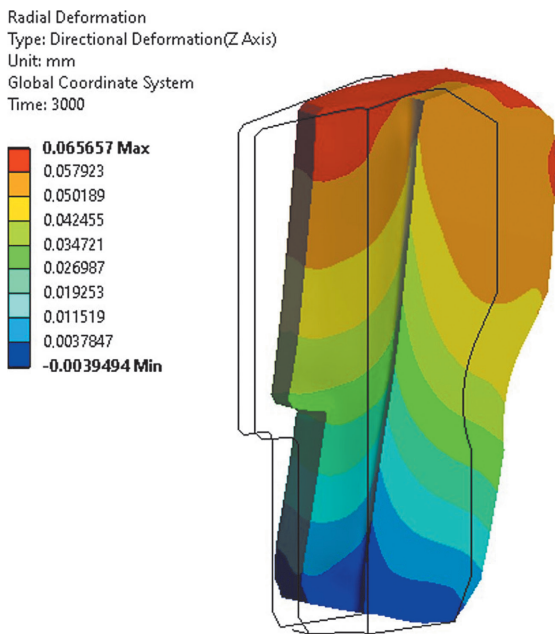


Fig. 13. Simulated final shape of the gear (50x magnification)

Bild 13. Simulierte endgültige Form des Zahnrad (50-fache Vergrößerung)

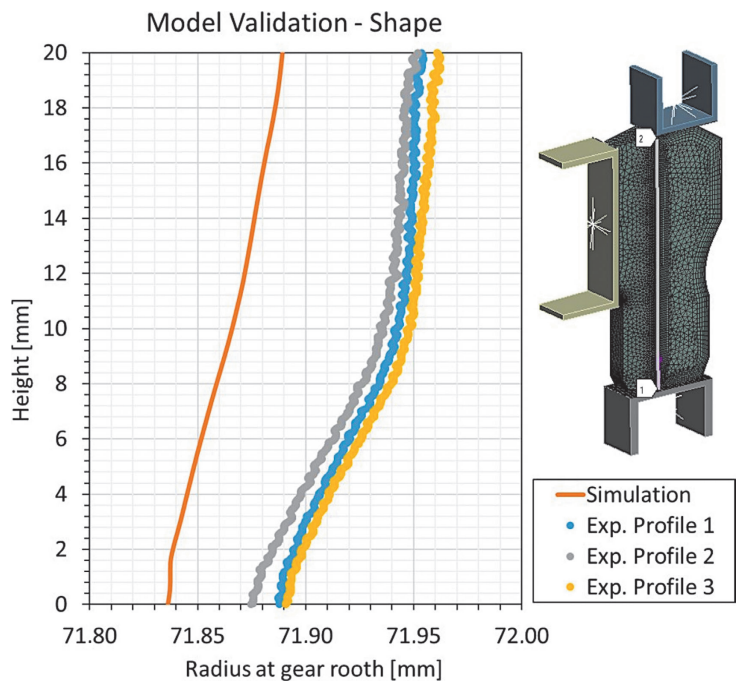
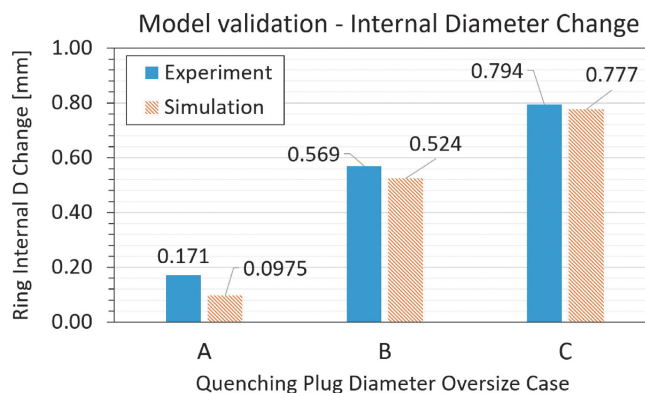


Fig. 14. Shape change due to fixture hardening compared at the gear root

Bild 14. Formänderung durch Fixturhärtens im Vergleich zum Zahnfuß

Fig. 15. Diameter changes using different plug diameters

Bild 15. Änderungen des Durchmessers bei unterschiedlichen Dorndurchmessern



The model correctly predicts the orientation of the conicity but underestimates its absolute value slightly. Many factors can contribute to this difference, and the difference is not indicative of an inaccurate model.

Figure 15 illustrates the dimensional change in diameter, from green part to quenched part, resulting from different quenching plug diameters. The different plug diameters are identified in the figure by the letters A, B, and C. The difference between simulation and experiment decreases with increasing quenching plug diameter, but is always less than 0.075 mm. It should be noted that deviations of up to 0.100 mm were detected around the circumference of the measured gears. The model is therefore within the precision of the process in the studied cases. From Figure 14, it is possible to note that with increasing quenching plug diameter, the difference between experiment and simulation decreases. For case C, in Figure 15, the prediction accuracy is 0.017 mm. The change in prediction accuracy can be attributed to the change in heat transfer between the component and the plug associated with a change in quenching plug diameter. The authors believe that by addressing this effect with further modelling work, the model prediction can be further improved for the other cases. Another recommended improvement would be to differentiate the heat transfer coefficients for different surfaces of the gear. However, due to the model geometry and the modelling assumptions employed, a comparison of predicted and simulated diameters to improve the modelling accuracy will be useful only for the cases where the deviations of measured values around the circumference of the gear are also smaller.

4 Summary

This paper describes an integrated approach to improve the geometrical accuracy and reduce the set-up costs of fixture hardening for aerospace gears in an industrial context. The joint use of simulation and physical experiments, together with a detailed material characterization campaign for the specific steel alloy used, allowed

durchschnittliche gemessene Wert 0,075 mm beträgt. Das Modell sagt die Ausrichtung der Konizität korrekt voraus, verfehlt aber ihren absoluten Wert leicht. Viele Faktoren können zu diesem Unterschied beitragen und der Unterschied ist kein Anzeichen für ein ungenaues Modell.

Bild 15 veranschaulicht die Änderung des Durchmessers vom grünen zum abgeschreckten Teil, die sich aus den unterschiedlichen Durchmessern des Dorns ergibt. Die verschiedenen Dorndurchmesser sind im Bild mit den Buchstaben A, B und C gekennzeichnet. Der Unterschied zwischen Simulation und Experiment nimmt mit zunehmendem Dorndurchmesser ab, ist aber immer kleiner als 0,075 mm. Es ist zu beachten, dass am Umfang der gemessenen Zahnräder Abweichungen von bis zu 0,100 mm festgestellt wurden. Das Modell liegt also in den untersuchten Fällen innerhalb der Genauigkeit des Prozesses. Aus Bild 14 ist ersichtlich, dass mit zunehmendem Durchmesser des Dorns die Differenz zwischen Experiment und Simulation abnimmt. Für den Fall C in Bild 15 beträgt die Vorhersagegenauigkeit 0,017 mm. Die Änderung der Vorhersagegenauigkeit kann auf die Änderung des Wärmeübergangs zwischen dem Bauteil und dem Dorn in Verbindung mit einer Änderung des Durchmessers des Dorns zurückgeführt werden. Die Autoren sind der Ansicht, dass die Modellvorhersage für die anderen Fälle weiter verbessert werden kann, wenn dieser Effekt durch weitere Modellierungsarbeiten berücksichtigt wird. Eine weitere empfohlene Verbesserung wäre eine Differenzierung der Wärmeübergangskoeffizienten für die verschiedenen Oberflächen des Zahnrads. Aufgrund der Modellgeometrie und der verwendeten Modellierungsannahmen ist ein Vergleich von vorhergesagten und simulierten Durchmessern zur Verbesserung der Modellierungsgenauigkeit jedoch nur für die Fälle sinnvoll, in denen die Abweichungen der gemessenen Werte um den Umfang des Zahnrads herum ebenfalls geringer sind.

4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein integrierter Ansatz zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit und zur Verringerung der Einrichtungskosten beim Härten von Zahnrädern in Fixtur-Härtevorrichtungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie beschrieben. Der gemeinsame Einsatz von Simulation und physikalischen Experi-

for a fundamental understanding of the thermal, microstructural, and dimensional evolution of the treated gear. The numerical model was validated with the experiments. Thanks to the numerical models, alternative fixture designs and process strategies will be compared by simulation before expensive experiments are conducted to improve the process. New process options to reduce distortion can be identified and tested. Hardening tests are still necessary to finalize the process set-up, but their number and cost can be significantly reduced with the help of simulation.

Acknowledgement

The work presented in this article has been supported by the Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, LuFo Call V under the PeCoGear Project. The Authors are thankful for the financial support that made this work possible. The Authors would like to thank Roland Kasper, Johannes Sonnenburg and all the involved colleagues from Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH, from the Institute für Eisenhüttenkunde of the RWTH Aachen, DANTE Solutions inc. and Wickert Maschinenbau GmbH.

References

1. *Dossett, J. L.; Totten, G. E.*: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes. ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 2013. – ISBN: 978-1-62708-165-8
2. *Schüler, A.; Kleff, J.; Heuer, V.; Schmitt, G.; Leist, T.*: Distortion of gears and sliding sleeves for truck gear boxes—a systematical analysis of different heat treatment concepts. *HTM J. Heat Treatm. Mat.* 71 (2016) 2, pp. 90–98, DOI:10.3139/105.110285
3. *Heuer, V.; Löser, K.; Faron, D. R.; Bolton, D.*: Low distortion heat treatment of transmission components. AGMA Technical Paper, Alexandria, Virginia, USA, 2010. – ISBN: 978-1-55589-979-0
4. *Atraszkiewicz, R.; Januszewicz, B.; Kaczmarek, L.; Stachurski, W.; Dybowski, K.; Rzepkowski, A.*: High pressure gas quenching: Distortion analysis in gears after heat treatment. *Mater. Sci Eng. A* 558 (2012) 3, pp. 550–557, DOI:10.1016/j.msea.2012.08.047
5. *Li, Z.; Ferguson, B. L.*: Gas quenching process optimization to minimize distortion of a thin-wall ring gear by simulation. *HTM J. Heat Treatm. Mat.* 68 (2013) 1, pp. 35–41, DOI:10.3139/105.110173
6. *Mgbokwere, C.; Callabresi, M.*: Numerical Simulation of a Heat-Treated Ring Gear Blank. *J. Eng. Mater. Techn.* 122 (2000) 3, pp. 305–314, DOI:10.1115/1.482802
7. *Zoch, H.-W.*: Distortion engineering: vision or ready to application? *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 40 (2009) 5–6, pp. 342–348, DOI:10.1002/mawe.200900457
8. *Ehlers, M.; Güttler, J.; Schwarzer, J.*: Computer Aided Simulation of Heat Treatment (CASH). *HTM J. Heat Treatm. Mat.* 61 (2006) 1, pp. 5–9, DOI:10.3139/105.100358
9. *MacKenzie, D. S.; Ferguson, B. L.; Li, Z.*: Effect of quenching variables on the residual stress and distortion of a heat treated disk. *Proc. of the 23rd ASM Heat Treating Society Conference*. 25.-28.09.2005, Pittsburgh, PA, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 2006, pp. 232–238. – ISBN: 9780871708328
10. *Schmitz, G. J.; Prahl, U.*: Handbook of software solutions for ICME. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2016. – ISBN: 9783527693566
11. *Wagner, S.; Luebben, T.*: Fixture Hardening without Quenching Oil. *HTM J. Heat Treatm. Mat.* 72 (2017) 5, pp. 260–277, DOI:10.3139/105.110330

menten zusammen mit einer detaillierten Materialcharakterisierungskampagne für die verwendete Stahllegierung ermöglichte ein grundlegendes Verständnis der thermischen, mikrostrukturellen und Maßentwicklung des behandelten Zahnrads. Das numerische Modell wurde anhand der Experimente validiert. Dank der numerischen Modelle können alternative Vorrichtungsdesigns und Prozessstrategien durch Simulation verglichen werden, bevor teure Experimente zur Verbesserung des Prozesses durchgeführt werden. Neue Prozessoptionen zur Verringerung des Verzugs können ermittelt und getestet werden. Härtetests sind nach wie vor notwendig, um den Prozessaufbau abzuschließen, aber ihre Anzahl und Kosten können mithilfe der Simulation erheblich reduziert werden.

Danksagung

Die in diesem Artikel vorgestellten Arbeiten wurden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, LuFo Call V im Rahmen des PeCoGear-Projekts gefördert. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung, die diese Arbeit ermöglicht hat. Die Autoren danken Roland Kasper, Johannes Sonnenburg und allen beteiligten Kollegen der Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH, des Instituts für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen, DANTE Solutions inc. und Wickert Maschinenbau GmbH.

12. *Banka, J. F.; Li, Z.; Ferguson, B. L.; Aronov, M.*: CFD and FEA used to improve the quenching process. *Heat treating progress* 8 (2008), pp. 50–56
13. *Stormvinter, A.; Kristoffersen, H.; Olofsson, A.; Biwersi, K.; Haglund, S.*: Effect of Hardenability and Press Quenching on Distortion of Crown Wheels. *Proc. 5th Int. Conf. Thermal Process Modeling and Computer Simulation*, 16.-18.06.2014, Orlando, FL, USA, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 2014, p. 149. – ISBN: 9781627080682
14. *Li, Z.; Freborg, A. M.; Hansen, B. D.; Srivatsan, T. S.*: Modeling the effect of carburization and quenching on the development of residual stresses and bending fatigue resistance of steel gears. *J. Mater. Eng. Perform.* 22 (2013) 3, pp. 664–672, DOI:10.1007/s11665-012-0306-0
15. *Kagathara, J.; Lübben, T.*: Numerical Study to Understand the Distortion Behavior of a Weight-Reduced Counter Gear. *HTM J. Heat Treatm. Mat.* 76 (2021) 2, pp. 132–154, DOI:10.1515/htm-2020-0009
16. *Simsir, C.*: Modeling and simulation of steel heat treatment: prediction of microstructure, distortion, residual stresses and cracking. *ASM Handbook* 4. J. L. Dosett, G. E. Totten (eds.), ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 2014, pp. 409–466, DOI:10.31399/asm.hb.v04b.a0005950
17. *Birkhofer, H.; Lübben, T.; Taylor, B.*: Optimizing Mandrel Dimensions for a Fixture Hardening Process of High-Strength Steel Aerospace Parts by Finite Element Simulation. *Metals* 10 (2020) 3, p. 303, DOI:10.3390/met10030303

Bibliography

DOI:10.1515/htm-2021-0013

HTM J. Heat Treatm. Mat.

76 (2021) 5; page 356-369

© 2021 Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, Germany

ISSN 1867-2493, e-ISSN 2194-1831