

Randschichtvergüten von Ritzelwellen mittels Wasser-Luft-Spraykühlung

C. Krause, T. Hassel, T. Gretzky, I. Frolov, , F. Nürnberger, Fr.-W. Bach

1. Zusammenfassung (max. 12 Zeilen deutsch und Englisch)

Durch den Einsatz der integrierten Wärmebehandlung aus der Schmiedehitze wird, durch die signifikante Verkürzung der Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Bauteile, eine deutliche Zeit- und Energieersparnis erreicht. Mit Hilfe einer Wasser- Luft- Spraykühlung kann eine Randschichtvergütung durchgeführt werden ohne das Bauteil erneut zu erwärmen. In dieser Arbeit wurden Modellgeometrien und Zahnwellen mit einem eigens dafür Konstruierten Sprayfeld randschichtvergütet. Die erreichte Härte und das entstehende Gefüge wurde untersucht. Bei beiden Bauteilen konnte mit diesem Verfahren eine erfolgreiche Randschichtvergütung durchgeführt werden. Diese Arbeit zeigt erste Ergebnisse, die noch in Dauerfestigkeitsprüfungen bestätigt werden müssen.

2. Einleitung

Innerhalb der Produktionstechnik spielen die umformenden Fertigungsverfahren traditionell eine große Rolle. Die Bandbreite reicht von Verfahren der ersten Verarbeitungsstufe, wie dem Walzen, Freiformen und Ziehen zur Herstellung von Halbzeugen bis zur Fertigung von Werkstücken unterschiedlichsten Fertigbearbeitungszustandes. Betrachtet man das Gebiet der Massivformgebung, so ist seit geraumer Zeit ein starker Trend zur Herstellung endkonturnaher Werkstücke unverkennbar [1]. Das Gesenkschmieden gehört seit Jahrzehnten zu einer am Markt erfolgreich eingeführten Technologie der Produktionstechnik. Gute mechanische Eigenschaften der Schmiedestücke bei optimierter Werkstoffausnutzung zeichnen das Gesenkschmieden gegenüber anderer Fertigungsverfahren aus. Es gibt deutliche Bestrebungen, den oftmals hohen Gratanteil beim konventionellen Gesenkschmieden und damit den Einsatz von Material und Energie zu vermeiden. Dieses führte zur Entwicklung von neuen Schmiedeverfahren mit dem Ziel, die Schmiedeteilkontur möglichst nah der Fertigteilkontur anzunähern.

Diese unter den Begriffen Präzisionsumformung oder auch Near-Net-Shape Forming bekannten Technologien haben die Zielsetzung auf umformtechnischen Wege Funktionsflächen an Bauteilen entweder fertig zu stellen oder aber, wenn dieses anforderungsbedingt nicht möglich ist, die Fertigbearbeitung auf ein Minimum zu reduzieren. [Doe96].

Der Umformvorgang des endkonturnahen Bauteils findet nach einer Erwärmung in den austenitischen Bereich statt. Dies ermöglicht eine anschließende Wärmebehandlung der Randschicht mittels Spraykühlung direkt unter Ausnutzung der Schmiedewärme. Die energie- und kostenintensiven Aufheiz- und Abkühlzyklen können damit eingespart werden.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 489 „Prozesskette Präzisionsschmieden“ werden im Forschungsprojekt B3 „Integrierte Wärmebehandlung“ grundlegende Untersuchungen zur Wärmebehandlung mittels Spraykühlung durchgeführt. Die bisher durchgeführten Untersuchungen wurden an schräg verzahnten Zahnrädern durchgeführt [Lit.]. Im Fokus des Interesses steht nun im Weiteren die Übertragung der am rotationssymmetrischen Bauteil erprobten Technologie auf die Anwendung an Langteilen wie Zahn- und Kurbelwellen. Hierzu wurde eine spanend hergestellte Modellgeometrie in Anlehnung an eine Zahnwelle und anschließend die Zahnwelle selbst untersucht.

3. Material und Methoden (Bauteil, Werkstoff, Anlage, Auswertung)

Das Sprayfeld

Um die Technologie der Spraykühlung auf Langteile zu übertragen mussten neue Konzepte zur Anordnung der Düsen sowie zum Einlegen und Spannen der Langteile entwickelt werden. Für zukünftig in die Anlagentechnik zu integrierende asymmetrische Bauteilgeometrien, wie z.B. Kurbelwellen wurde das Konzept des Zahnradsprayfeldes grundsätzlich überarbeitet. Das Konzept des drehbar im Sprayfeld gelagerten Schmiedeteils, wie es bei [Lit] beschreiben ist wurde aufgegeben.

Ein neuer Ansatz zur Realisierung der Sprayfeldtechnik ist die Rotation des Düsenfeldes um das statisch gelagerte Bauteil. Damit können alle relevanten, zu vergütenden Bereiche erreicht werden, ohne dass ein Mechanismus zum Greifen der Bauteile das anströmende Luft-Wassergemisch behindert. Das neue Konzept der rotierenden Düsenfelder bietet im Hinblick auf die Langteilanforderungen einen Erfolg versprechenden Ansatz. **Abbildung 1** zeigt die Seitenansicht des neu erarbeiteten Anlage zur Randschichtvergütung.

Die wichtigsten Parameter der Spraykühlung, durch welche die Abkühlgeschwindigkeit geregelt werden kann, sind der Wasser- und Luftdruck sowie die Abschreckdauer. Für die definierte Einstellung der gehärteten Randzone bzw. deren Eigenspannungen müssen folgende Randbedingungen erfüllt werden:

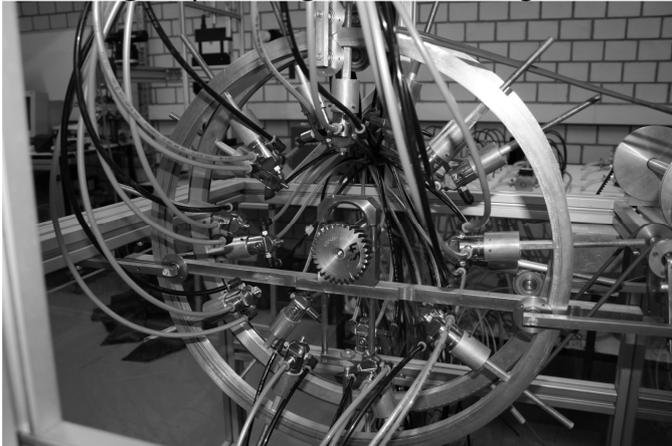


Abbildung 1 Sprayfeld für Langteile

- stufenlose Regelung des Luftdruckes
- stufenlose Regelung des Wasserdruckes
- Regelung des Luft- und Wasserdruckes auch während des Versuches

Eine flexible Steuerung der Drücke wird durch Proportional-Druck-Regelventile realisiert.

Um die durch die Wärmebehandlung auftretenden Eigenspannungen und den resultierenden Verzug beeinflussen zu können, muss gesichert sein, dass innerhalb eines Trägerringes einzelne bzw. auch mehrere Zweistoff-Düsen mit unterschiedlichen Parametern angesteuert werden können. Aus diesem Grund wurden sechs verschiedene Kreisläufe angelegt, mit denen einzelne oder auch mehrer Düsen unabhängig betrieben werden können.

Untersuchtes Bauteil und dessen Anforderungen

Bei den untersuchten Bauteilen handelte es sich um eine Ritzelwelle (**Abbildung 2b**) und eine Modellgeometrie (**Abbildung 2a**) in Ahnlehnung an die

Ritzelwellenmorphologie. Bei der Vergütung von Verzahnungen sind bestimmte Härte­werte anzustreben, welche unter anderem vom Werkstoff abhängig sind. Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Bauteile bestehen aus dem Vergütungs­stahl 42CrMo4 (1.7225). Ziel der Vergütung war eine Oberflächen­härte im Verzahnungsbereich von 550-650 HV. In früheren Untersuchungen an Zahn­rädern aus dem gleichen Werkstoff sind mit diesen Werten die besten Ergebnisse erzielt worden [Lit Sevastopol]. Der Kern sollte entsprechend des Anforderungs­profils an verzahnte Bauteile duktil sein, also eine Härte unter 450 HV aufweisen (siehe Abbildung 2b). Der Schaft der Ritzelwelle ist, gegenüber der Verzahnung, einer einem anderen Belastungs­profil ausgesetzt. Daraus resultiert eine andere Oberflächen­härte, die entsprechend geringer ausfällt. Ziel der Arbeiten war es mit der oben beschriebenen Anlage eine Randschicht­vergütung durchzuführen das geforderte Härte­profil zu erreichen.

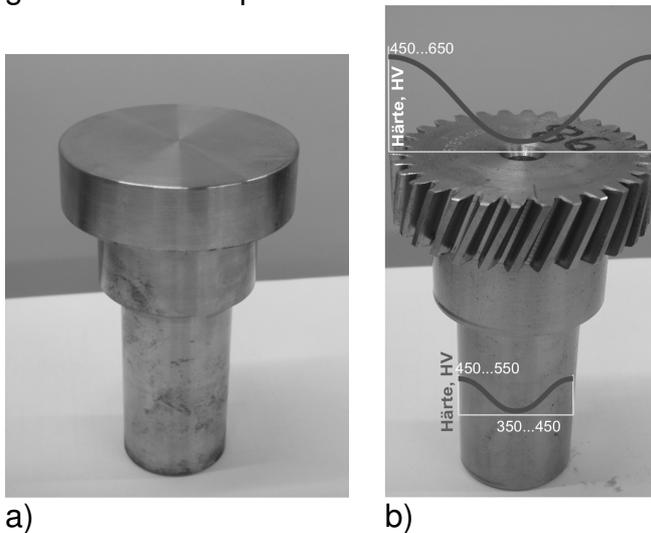


Abbildung 2 a) Modellbauteil b) Zahnwelle mit Anforderungsprofil

Wärmebehandlung / Versuchsmethodik

Die Bauteile wurden in einem Warmhalteofen auf 950 °C erwärmt. Die Temperatur ergab sich aus Voruntersuchungen am Zahnrad [Lit]. Die geschmiedeten Bauteile weisen diese Temperatur nach dem Umformprozess auf. Anschließend wurden die Bauteile im Sprayfeld fixiert und Abgeschreckt [Abbildung3]. Dabei wird die äußere Randschicht auf eine Temperatur unter 300 °C (die Martensitstarttemperatur liegt bei ca. 370 °C) abgekühlt. Während des Prozesses ist darauf zu achten, dass die Temperatur im Kern nicht unter 370 °C fällt, da sonst das Bauteil durchgehärtet wäre. Andererseits darf die Temperatur auch nicht sehr viel darüber liegen, da die Restwärme zum Anlassen der Randschicht genutzt wird. Ist die Anlasstemperatur zu hoch kann die erforderliche Härte nicht erreicht werden. Aus den vorangegangenen Untersuchungen hat sich eine Kerntemperatur von 400-450 °C als vorteilhaft erwiesen. Zur Ermittlung der Temperaturen wurden Thermo­elementmessungen und thermographische Aufnahmen durchgeführt. Erwartungsgemäß unterliegt der Verzahnungsbereich der schnellsten Abkühlung während das Bauteilinnere vergleichsweise langsam erkaltet.

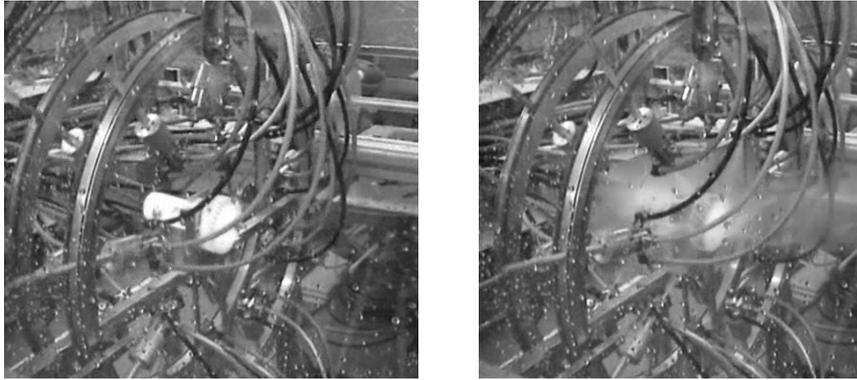


Abbildung 3 Abschrecken einer Zahnwelle im Sprayfeld

Verzugsmessung

Zur optischen und flächenhaften Erfassung der Ritzelwellengeometrie wird ein Streifenprojektionssystem der Fa. GFM eingesetzt, welches in ein optotaktilen Koordinatenmessgerät der Fa. Werth integriert ist. Hierdurch wird eine hochgenaue Positionierung des Sensors im Messvolumen des Koordinatenmessgerätes ermöglicht. Das Messsystem verfügt über einen lichtstarken digitalen Mikrospiegelprojektor zur strukturierten Beleuchtung des Messobjekts und erlaubt eine Erfassung von ca. 10^6 Messpunkten in einer Belichtungssequenz. Zur rotatorischen Positionierung der Ritzelwelle im Messvolumen wird ein Langteilpositioniersystem auf Basis einer luftgelagerten Präzisionsdrehachse verwendet. Zur Minimierung abgeschatteter Bereiche bei der Verzahnungsmessung wird das Langteilpositioniersystem im Bezug zum Streifenprojektionssensor um den Schrägungswinkel gedreht.

Zur flächenhaften Geometrieerfassung der Ritzelwelle wird der Streifenprojektionssensor zunächst in die Messposition zur Aufnahme der Lagersitzgeometrie gefahren. Bei der Lagersitzmessung wird die Ritzelwelle mit Hilfe des Langteilpositioniersystems in 16 gleichmäßig über den Vollkreis verteilte Winkelpositionen gedreht, wobei in jeder Winkelstellung eine Messung mit dem Streifenprojektionssensor durchgeführt wird. Die hierdurch erlangten Messdaten werden anschließend zur Geometrieprüfung des Lagersitzes und zur Berechnung der Bauteilachse herangezogen. Auf Grundlage der auf diese Weise bestimmten Bauteilachse wird der Streifenprojektionssensor in die Position zur Messung der Verzahnungsgeometrie gefahren. Zur vollständigen Aufnahme der Verzahnungsgeometrie ist eine Aufnahmenanzahl gleich der Zähnezahls der jeweiligen Verzahnung sinnvoll, wodurch insbesondere die Zahnflankenbereiche redundant erfasst werden [Meeß05]. Die Erzeugung der Gesamtgeometrie des Lagersitzes und der Verzahnung erfolgt anschließend durch rein geometrische Transformationen der Messpunkte. Die Bauteilgeometrie wird durch Rotation und Translation der Einzeldatensätze, bezogen auf ein vorläufiges Werkstückkoordinatensystem, welches auf der zuvor gemessenen Bauteilachse basiert, rekombiniert.

Zur Durchführung der Auswertung müssen zunächst die mit Hilfe des Streifenprojektionssensors vor und nach der Wärmebehandlung aufgenommenen Geometriedaten der jeweiligen Ritzelwelle aufeinander eingepasst werden. Die Differenz dieser Messdaten gibt Aufschluss über die während der Wärmebehandlung entstandenen Geometrieänderungen. Für eine erste qualitative Bewertung bietet sich die Visualisierung der Abweichungen in Form eines farbkodierten dreidimensionalen Differenzbildes bzw. in Form eines farbkodierten Stirnschnittes an (Abbildung 7

Mitte). Auf diese Weise können auch die durch die Wärmebehandlung induzierten vornehmlich systematischen Geometrieabweichungen schnell und sicher erkannt werden. Anhand der Verteilung und Ausprägung der Abweichungen auf der Verzahnung und dem Lagersitz können zudem bereits Rückschlüsse auf die Ursachen der Härteverzüge gezogen werden. Zur Quantifizierung der Härteverzüge werden unterschiedliche Verfahren angewandt. Eine Möglichkeit ist an die in der taktilen Verzahnungsmesstechnik standardmäßig eingesetzten Methoden zur Analyse von Verzahnungsfehlern anhand der Abweichungen entlang der Profil- und Flankenlinie angelehnt [ISO 1328-1]. Neben den Profil- und Flankenlinienabweichungen können mit diesem Verfahren insbesondere Teilungsfehler detektiert werden, welche Aufschluss über die Lageabweichungen der einzelnen Zähne der Verzahnung geben. Bei dieser Vorgehensweise werden allerdings nur die Geometrieabweichungen der Verzahnung untersucht. Ein weiteres Verfahren befasst sich mit der Auswertung der Lage und Richtung der Verzahnungs- und der Lagersitzachse zueinander. Hierbei werden die Achsen dieser beiden Ritzelwellengeometrieelemente vor und nach dem Härten bestimmt und deren Koaxialität geprüft. Die Koaxialitätsänderung gibt Aufschluss über das Ausmaß der Härteverzüge.

Auswertung der Ergebnisse

Die Härteprüfung erfolgte mit einem Härteprüfgerät der Firma „Amsler Otto Wolpert-Werke GmbH“. Die Härtewerte sind in HV 30 bzw. HV 10 angegeben.

Die metallographische Präparation erfolgte durch Schleifen und anschließendes Polieren auf 1µm Rauheit. Die hergestellten Schliche wurden mit 2%iger Salpetersäure angeätzt.

4 Ergebnisse

Nach dem Vergütungsprozess wurden die Bauteile wärmeinflussfrei aufgetrennt und der Härteverlauf an unterschiedlichen Stellen gemessen. Es wurden unterschiedliche Parametersätze auf die Modellgeometrie und auf die Zahnwelle angewendet. Erwartungsgemäß wurden unterschiedliche Härteverläufe im Bauteil erzeugt. In **Abbildung 4** sind makroskopische Aufnahmen nach der Wärmebehandlung von Modellgeometrien zu sehen. Man kann deutlich den vergüteten Bereich durch die dunkle Anätzung erkennen. Die Randhärte liegt bei ca 550 HV 30. Die Einhärtungstiefe im Bereich, der den verzahnten Bereich abbilden soll, beträgt bei einer Grenzhärte von 475 HV nach DIN 50190 ca. 9mm. Beim Schaft konnten diese Betrachtungen nicht angeführt werden, da hier die Härte nicht unter die Grenzhärte sinkt. Der Gefügegradient, und damit auch der Härtegradient ist im Verhältniss nicht so stark ausgebildet. Die Sprayparameter, die bei der Anwendung auf die Modellgeometrie die besten Ergebnisse geliefert haben wurden anschließend auf die Zahnwelle angewendet.

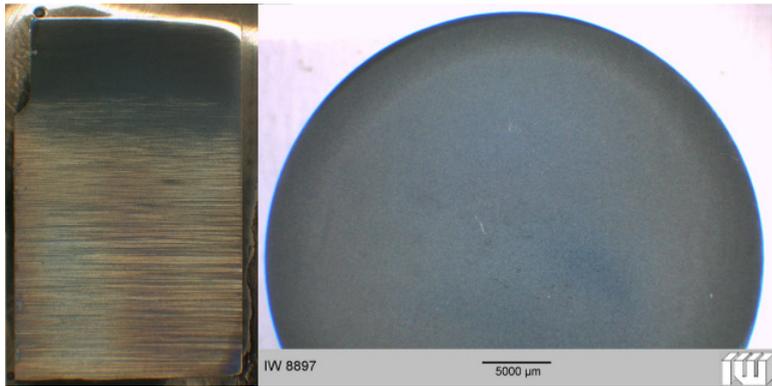
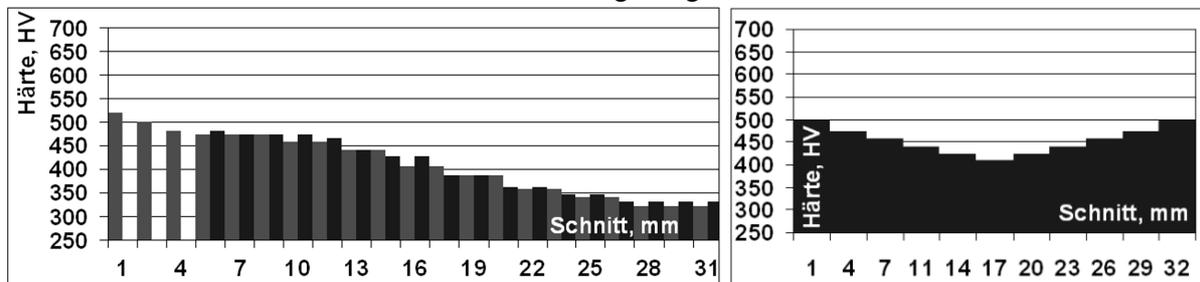


Abbildung 4 Makroskopischer Aspekt nach Polieren und Ätzen

Abbildung 5 zeigt die Härteverläufe einer im Sprayfeld vergüteten Zahnwelle. Die Grenzhärte im verzahnten Bereich liegt nach DIN 50190 bei 425 HV in der Verzahnung und bei 400 HV im mittleren Schaftbereich. Die resultierende Einhärtungstiefe im Zahn ist ca 15 mm. Im Bereich des Schaftes wird auch bei der Ritzelwelle die Grenzhärte durch den eher geringen Gradient nicht erreicht.



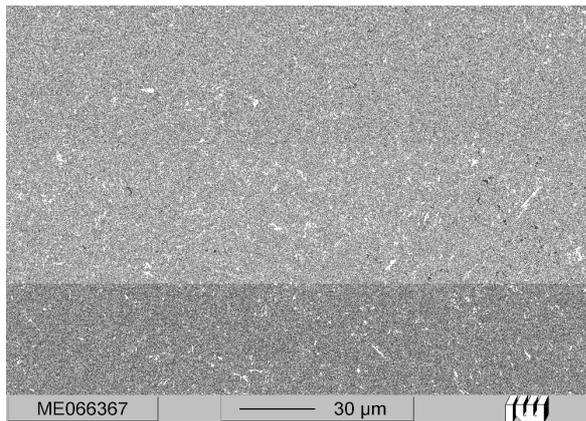
a)

b)

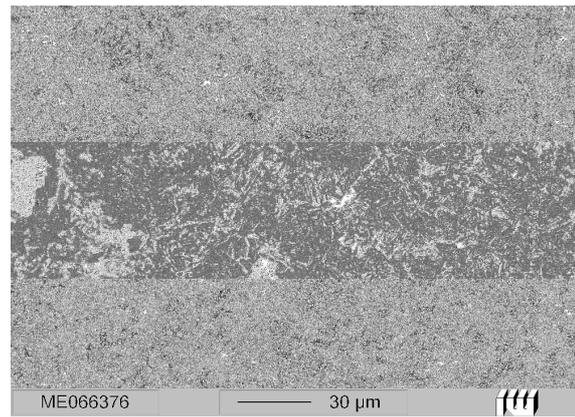
Abbildung 5 a) Härteverlauf in der Verzahnung (HV10), Härteverlauf Schaftquerschnitt (HV30) mitte

Im Bereich des Schaftes variiert der Härteverlauf in Längsrichtung durch eine inhomogene Temperaturverteilung im Bauteil. Der Temperaturgradient entsteht durch den nicht gekühlten Absatz zwischen Schaft und Verzahnungsbereich. Der Absatz stellt ein Wärmenest dar, welches nicht kontinuierlich abgekühlt werden kann. Im Verzahnungsbereich ist der Effekt vergleichsweise gering und kann vernachlässigt werden. Im Gebiet nahe des Absatzes wurden geringere Härten erreicht, als am Schaftende. Ob diese Abweichung vernachlässigbar ist, muss noch geprüft werden. Dennoch ist davon auszugehen, dass die Belastung auf der Schaftoberfläche geringer ausfällt als bei der Verzahnung und damit die Abweichung nicht extrem ins Gewicht fällt. Im Bereich der Oberfläche liegen die Abweichungen von einem Ende zum Anderen bei maximal 130 HV 30.

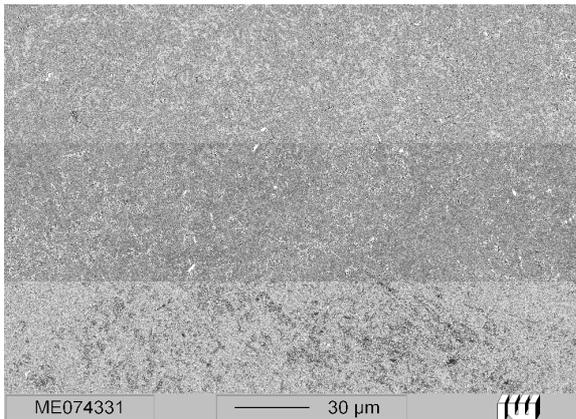
Abbildung 6 zeigt die entstandene Mikrostruktur nach der Wärmebehandlung. Im Zahn zeigt sich ein typisches Vergütungsgefüge mit den charakteristisch fein verteilten Karbiden. Die gleiche Mikrostruktur zeigte sich im Randbereich des Schaftes. Im Inneren hat sich im Verzahnungsbereich wie auch im Schaft eine größtenteils bainitisches Gefüge gebildet.



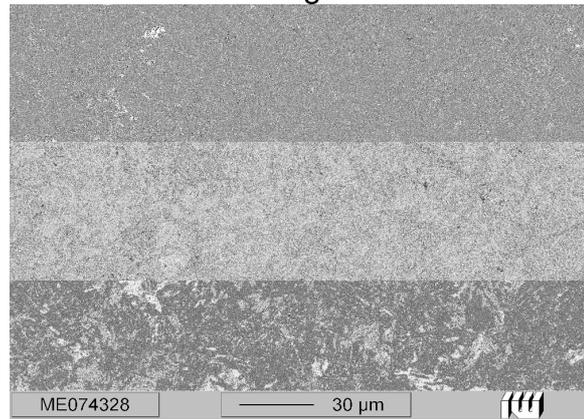
Zahn



Kern des Verzahnungsbereiches



Außen Schaft



Innen Schaft

Abbildung 6 Gefüge nach der Wärmebehandlung im Sprayfeld

Abbildung 7 zeigt eine Differenzdarstellung des Schaftes und der Verzahnung. Links dargestellt ist der Verzug des Schaftes, rechts der Verzug der Verzahnung hervorgerufen durch die Wärmebehandlung im Sprayfeld. Der dargestellte Verzug wurde bei der oben untersuchten Zahnwelle ermittelt.

Es zeigt sich eine Maßänderungen von ca. $\pm 100 \mu\text{m}$. Beim Schaft, wie bei der Verzahnung fällt auf, dass sie in eine Richtung gekrümmt wurden. Ansonsten verhält sich der Verzahnungsbereich ähnlich zu den Zahnrädern [\[Lit.\]](#).

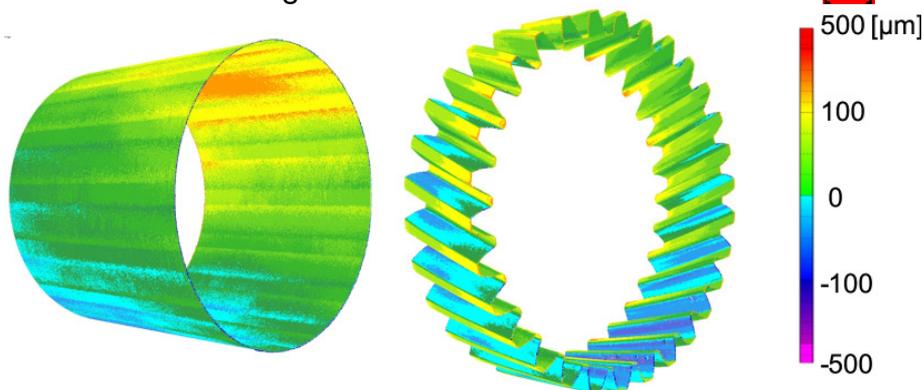


Abbildung 7 Gefüge nach der Wärmebehandlung im Sprayfeld

5. Diskussion

Ziel der Arbeiten dieses Projektes ist es die Eignung der Wasser-Luft-Spraykühlung als potentielles Wärmebehandlungsverfahren für Gesenkschmiedebauteile zu untersuchen. In der vorliegenden Arbeit wurden Modellgeometrien und Ritzelwellen in einem eigens dafür entwickelten Sprayfeld wärmebehandelt und anschließend

untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass prinzipiell eine Randschichtvergütung mit diesem Verfahren möglich ist. Bisher war es aufgrund der bei der Wärmebehandlung auftretenden Temperaturgradienten im Bereich des Schaftes nicht möglich dort eine gleichmäßige Härteverteilung zu erzielen. Um dieses Problem zu lösen, ist es vorstellbar die Abkühlung mit unterschiedlichen Beaufschlagungsdichten entlang des Schaftes durchzuführen um damit die Unregelmäßigkeiten in der Temperaturverteilung auszugleichen.

Der erreichbare Härteverlauf in der Verzahnung ist nicht in der Weise ausgeprägt wie er zum Beispiel beim Induktionshärten vorliegt. Das heißt er folgt nicht optimal der Außenkontur des Bauteils. Dennoch reicht dieser Härteverlauf aus, um eine adäquate Dauerfestigkeit zu erzielen [Lit Sevastopol]. Die sich ausbildende Mikrostruktur fällt bei Berücksichtigung der ZTU-Schaubilder erwartungsgemäß aus.

6. Schlussfolgerungen

Die Spraykühlung mit einem Wasser-Luft-Spraygemisch eignet sich um eine Randschichtvergütung an verzahnten Gesenkschmiedebauteilen durchzuführen. Beim Vergütungsprozess des Schaftes entstehen allerdings Inhomogenitäten in der Härteverteilung, die durch zusätzliche Düsen ausgeglichen werden können. Zukünftige Arbeiten müssen sich weiterhin mit der Verbesserung des Härte-Tiefenverlaufes im Verzahnungs- und Schaftbereich auseinandersetzen. Desweiteren sind Untersuchungen der Eigenspannungen speziell im Verzahnungsbereich durchzuführen.

Literatur

[1] ?????

[2] Krause, Chr.; Scheer, Chr.; Nürnberger, F.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Annealing of the edge-layer of precision forged gears of 42CrMo4 by a two- phase spray cooling. Wissenschaftliche Nachrichten der Nationalen Technischen Universität der Ukraine (KPI) Nr.84, S 33-36, 2006

M. Kästner, Chr. Krause, Bach, Fr.-W., J. Seewig, E. Reithmeier,: Optische Verzugsmessung bei der integrierten Wärmebehandlung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder. 8. Werkstofftechnisches Kolloquium, Chemnitz, 9, 2005, S. 358-365

M. Bernhard, Chr. Krause, W. Reimche, Bach, Fr.-W.,: Verkürzung der Prozesskette präzisionsgeschmiedeter Zahnräder durch integrierte Wärmebehandlung und zerstörungsfreie Bauteilprüfung, Härtereitechnische Mitteilungen HTM 60 2005 (5), S. 284-292

Bach, Fr.-W.; B.-A. Behrens; H. Dähndel; Chr. Krause; A. Huskic: Integration of heat treatment in precision forging of gear wheels. The Arabian Journal of Science and Engineering, 06, 2005, volume 30, p. 103-112

Bach, Fr.-W.; M. Schaper, Chr. Krause, F. Nürnberger: Heat treatment of precision forged steel gears by usage of the forging heat. Conference proceedings: Suchasn problemy metalurgi. Naukov vst. Tom 8. Plastychna deformacija metal v. Dnpropetrovsk: "Systemn tehnologi", 04, 2005 , p. 489-493

Meeß, K.: Flächenhafte Messung optisch kooperativer Stirnräder am Beispiel präzisionsgeschmiedeter Verzahnungen, Dissertation, Universität Hannover (2005)

ISO 1328-1: Stirnräder (Zylinderräder) – ISO-Toleranzsystem – Teil 1: Definitionen und zulässige Werte für Abweichungen an gleichnamigen Zahnflanken, Ausgabe 1995-02