

Projektvortrag bei der IHK Bochum am 07.07.2004, Dipl.-Ing. Gerhard Reese

I. Das Projekt

Entwicklung eines innovativen Induktionshärteverfahrens für Maschinenbauelemente bis zu 6.000 Millimeter Durchmesser, mit unterschiedlichen Zahngeometrien. Erprobung von neu entwickelten Werkstoffen.

Vorstellung der Härterei Reese Bochum GmbH

Die Härterei Reese Bochum GmbH ist das Stammwerk der 5 Reese Härtereien, gegründet am 24.06.1948. Die weiteren Werke sind:

- die Härterei Reese Brackenheim, gegründet 1988
- Die Härterei Reese Chemnitz, gegründet 1991
- die Härterei Reese Weimar, gegründet 1991 und
- das Werk in Altlussheim zwischen Heidelberg und Speyer, gegründet 2001



1948, als mein Vater Dr.-Ing. Helmut Reese die HÄRTEREI REESE in Bochum gründete, wurden nur wenige Maschinenelemente und Apparateile gehärtet. Heute hingegen sind viele Bereiche der modernen Technik ohne die Anwendung von Härteverfahren undenkbar - es gibt kaum noch wichtige mechanische Teile und Konstruktionselemente, die nicht gehärtet oder vergütet sind. Das hat seinen guten Grund: Durch die Wärmebehandlung werden Werkstücke auf höhere Festigkeit gebracht. Damit sind sie

nicht nur belastbarer, sie können auch leichter und kompakter gebaut werden und erreichen eine wesentlich längere Lebensdauer. Bei der Auswahl der geeigneten Wärmebehandlungsmethoden sind - ausgehend vom Anwendungsfall - folgende Kriterien entscheidend:

- der eingesetzte Werkstoff
- die gewünschte Oberflächenhärte
- Härtetiefe
- Dauerfestigkeit
- Kernzähigkeit
- Verschleißwiderstand
- Minimierung des Verzugs.

Auf dem Gebiet der Härtetechnik wurden in der Zeit seit Gründung der Härterei Reese erhebliche Fortschritte erzielt. Die Härtereien Reese, voran unser Stammwerk in Bochum waren schon traditionell immer aktiv in der Forschung. So sind wir Mitglied der Forschungsvereinigung Antriebstechnik und sind dort in der Lage unsere Kenntnisse in die deutsche Antriebstechnik einzubringen, die trotz widriger wirtschaftlicher Verhältnisse noch immer führend in der Welt ist. Die Härterei Reese ist aber auch aktiv in der Entwicklung neuer Wärmebehandlungstechniken tätig; unsere Forschungsarbeit hat zur Optimierung traditioneller Här-

teverfahren beigetragen. So ist es uns beispielsweise gelungen, den Härteverzug beim Einsatzhärten auch bei großen Teilen auf 0,3mm zu begrenzen; allerdings mit Hilfe aufwendiger technischer Voraussetzungen. Ein weiterer Vorteil ist, daß wir das gesamte Spektrum der Härtetechnik abdecken. So können wir jedem Kunden objektiv das jeweils zweckmäßigste und kostengünstigste Verfahren empfehlen und sind nicht darauf angewiesen, ihnen das anzubieten was wir haben. Das steigert die Wettbewerbsfähigkeit unserer Kunden und stärkt uns mit.

Stand der Technik

Die moderne Härtetechnik bietet eine Vielzahl von Verfahren an, mit denen die Eigenschaften der Werkstücke beeinflusst werden. Ziel der Wärmebehandlung ist es, Werkstücke zu schaffen, die eine erhöhte Lebensdauer bei gleichzeitiger Steigerung der Leistungskennwerte erhalten.

Getriebeteile für große Kraftübertragung werden in der Regel einsatzgehärtet.

Beim Einsatzhärten wird das gesamte Bauteil in einem aufwendigen Prozess stunden- und oft tagelang bei ca. 930 °C in einem Kohlenstoff-aktiven Schutzgas aufgekohlt und anschließend in einem Ölbad abgekühlt. Die



technischen Grenzen sind hier meist bei 2.500 mm Durchmesser gesetzt. Es gibt noch vereinzelt Härtereien in Europa, die bis 4.000 mm Durchmesser einsatzhärten können. Die Kosten dafür sind jedoch sehr hoch. Sie liegen teilweise bei 25.000-50.000 Euro pro Zahnrad.



Dazu kommen die erheblichen Probleme des Härteverzuges und unkontrollierten Wachstums, die zusätzlich erhöhte Schleif- und Nacharbeitskosten bei unseren Kunden verursachen und bei uns einen erheblichen Aufwand zur Minimierung desselben. Weiterhin die Tatsache, daß gerade bei großen Zahnradern beim Einsatzhärten ein Abfall sowohl der Härte, als auch der Härtetiefe zum Zahngrund hin erfolgt. Das führt zu einer erheblichen Verminderung der Tragfähigkeit derartig einsatzgehärteter Zahnradern gegenüber den theoretisch berechneten Werten. Das Verfahren Einsatzhärten stößt somit an seine Grenzen sowohl hinsichtlich der Kosten, der maximalen Größe als auch der technischen Leistungsfähigkeit.

Hier kommt nun das Induktionshärten ins Spiel. Bei diesem Verfahren werden derzeit die gängigen Vergütungsstähle verwendet, die vergleichsweise preisgünstig zu beziehen sind. Es werden jedoch nur die Bereiche erhitzt, die später hart werden müssen.

Die Tragfähigkeit von induktionsgehärteten Zahnradern liegt zwar 20-30 % unter derjenigen einsatzgehärteter Zahnradern, die Versuche zur Ermittlung der Faktoren wurden jedoch seinerzeit unter Laborbedingungen an kleineren Zahnradern mit kleineren Modulen durchgeführt. Dabei wurde nicht berücksichtigt, daß, je größer die Getriebebauteile werden, in der Praxis ein Härte- und Härtetiefenabfall zum Zahngrund beim Einsatzhärten



eintritt. Dieser Härteabfall führt unserer Erkenntnis nach dazu, daß bei einsatzgehärteten Rädern die Zahnfußtragfähigkeit unter das Niveau der Zahnfußtragfähigkeit bei induktionsgehärteten Rädern sinken kann.

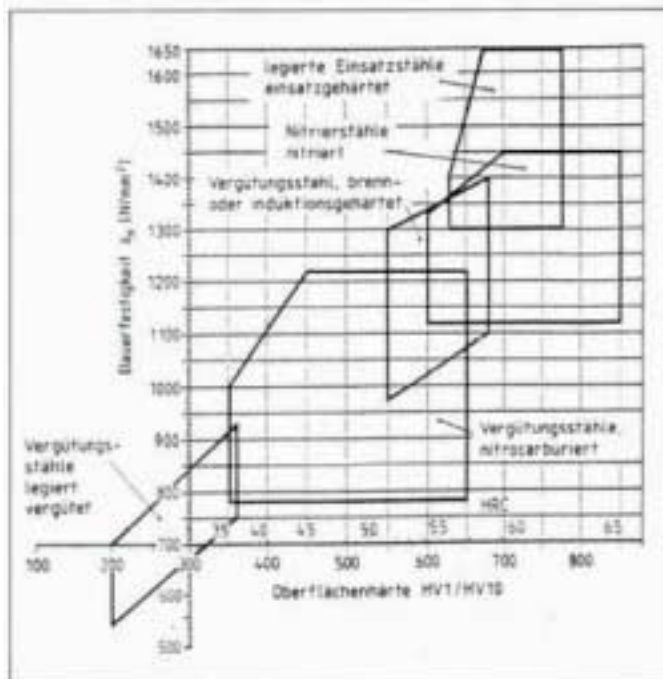


Bild 1: Grübchendauerfestigkeit verschiedener Werkstoff-/Wärmebehandlungsvariationen nach DIN 39 90

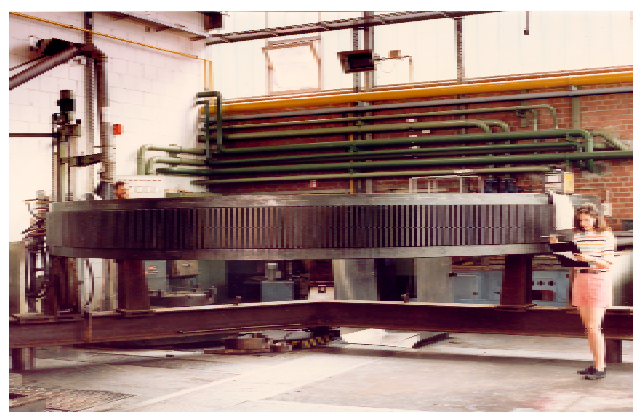
Außerdem wurden in den damaligen Versuchen kugelgestrahlte einsatzgehärtete Räder verwendet, was zu einer Verfälschung zu Gunsten des Einsatzhärtens geführt hat. Neuere Versuche der Universität Newcastle mit kugelgestrahlten induktiv gehärteten Zahnrädern haben gezeigt, daß sich allein mit Kugelstrahlen die Tragfähigkeit induktionsgehärteter Zahnräder über 50% steigern läßt.

Wir sind der Auffassung, daß das Induktionshärteverfahren, wenn es optimiert wird, unabhängig von der Größe des Bauteils, immer die gleiche Sicherheit bietet und bei größeren Getriebebauteilen dem Einsatzhärten zumindest gleichwertig ist.

Ziel des Projektes

Ziel des Projektes ist es, durch Anwendung eines weiterentwickelten Induktionshärteverfahren Werkstücke zu schaffen, die einsatzgehärteten Werkstücken gleichwertig sind.

Sollte dies gelingen und wissenschaftlich abgesichert sein, stellt dies einen enormen technischen und wirtschaftlichen Fortschritt und Wettbewerbsvorteil dar. Dieser wird wesentlich zur Sicherung der vorhandenen Spitzenstellung der deutschen Antriebstechnik beitragen und so auch zur Sicherung und Schaffung neuer Arbeitsplätze hier in Bochum, weil wir mit dieser Technologie die Ersten im Markt sein werden.



Lösungswege

Um beweisen zu können, daß induktiv gehärtete Großräder vergleichbar sind mit einsatzgehärteten Rädern, müssen die vorhandenen Verfahren zusammen mit kompetenten Partnern weiterentwickelt und optimiert werden. Die Ergebnisse müssen wissenschaftlich ausgewertet und als Grundlage für die Berechnung von Getrieben festgeschrieben werden. Die Federführung des Projekts erfolgt durch die Härterei Reese Bochum, da sie im Verbund mit den anderen Härtereien Reese über das härterechnische und werkstofftechnische Know how verfügt.

Zunächst ist der Bau einer induktiven Versuchsanlage durch die Firma Elotherm in Remscheid erfolgt. Die Maschine wurde entsprechend unserem härtetechnischen Know how und den Ergebnissen der Versuchshärtungen von uns, in Zusammenarbeit mit Elotherm modifiziert und optimiert.



Die wissenschaftliche Auswertung wird durch das DESIGN UNIT - GEAR Technology Centre der University of Newcastle durchgeführt. Nach erfolgreichen Ergebnissen soll in einer weiteren Stufe die Stahl herstellende Industrie mit einbezogen werden. Da durch die Verwendung neuer, innovativer Werkstoffe die Ergebnisse noch weiter optimiert werden können.

Das Forschungsprojekt kann überwiegend mit eigenem Personal der Härtereie Reese Bochum abgedeckt werden. Insbesondere ist der Betriebsleiter der Randschichthärtereie, sowie das gesamte Qualitätswesen in das Projekt eingebunden. Die wissenschaftliche Arbeit der University of Newcastle kann durch Herrn Dr. Liebmann, ein Mitarbeiter der Härtereie Reese Weimar und Mitglied der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik (AWT), begleitet werden.

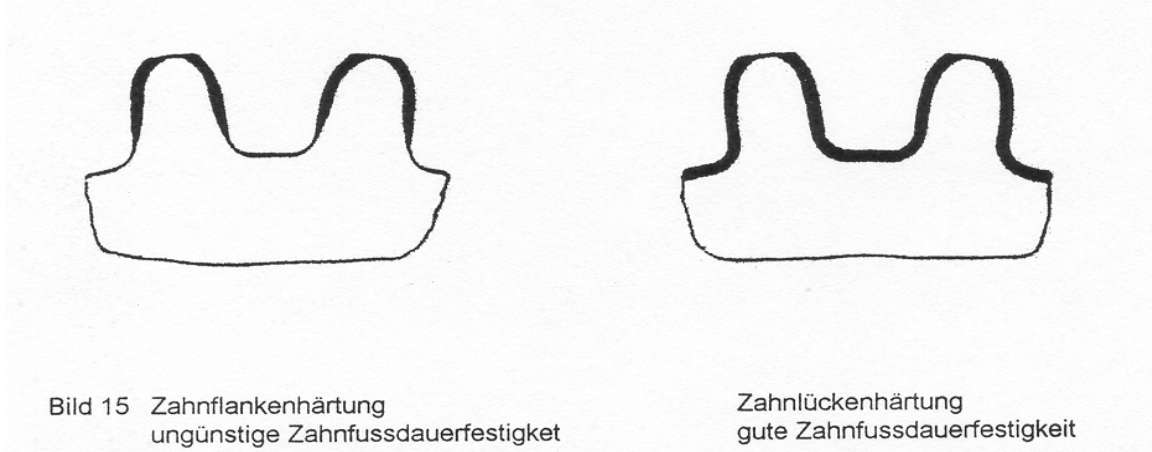
Wir sind sehr zuversichtlich, daß uns die wissenschaftliche Beweisführung gelingen wird. Ich muß aber vorsorglich darauf hinweisen, daß, wie bei jeder Forschungstätigkeit, die Möglichkeit besteht, daß der wissenschaftliche Nachweis nicht gelingt.

Neuheit

Der Unterschied zu dem bisher angewendeten Einsatzhärteverfahren liegt neben den bereits ausgeführten Vorteilen: Verzugsarmut, geringe Nacharbeitskosten, geringe Wärmebehandlungskosten, darin, dass Bauteile in Zukunft größer und dennoch leichter gebaut werden können.

Dies hat auch Einsparungen im Energiebereich und einen höheren Wirkungsgrad zur Folge. Bei größeren Zahnrädern, beispielsweise Zahnräder mit 6 Meter Durchmesser, wäre eine Einsatzhärtung praktisch überhaupt nicht mehr möglich. Die Investition in eine Anlage in der wir 6 Meter Durchmesser Einsatzhärten könnten würde mehrere Millionen Euro betragen ohne den gewünschten Erfolg zu gewährleisten.





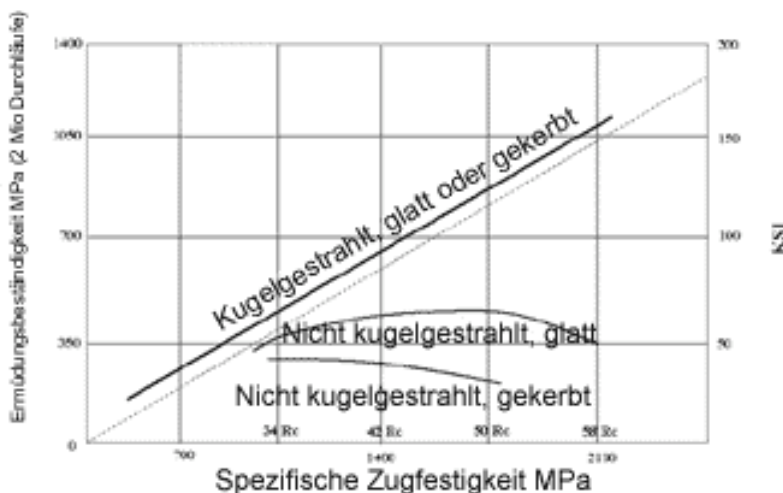
Beim Induktionshärten ist nur eine Erwärmung der Verzahnung im Bereich einiger weniger Millimeter notwendig, wobei die einzelne Erwärmungsphase pro Zahn nur wenige Minuten dauert. Die Abkühlung erfolgt mit einer biologisch abbaubaren Emulsion die in einem Kreislauf recycelt wird. Damit ergeben sich zusammenfassend gegenüber dem Einsatzhärten nachstehenden Vorteile.

- 1.) Es könnten größere Werkstücke wärmebehandelt werden als derzeit weltweit möglich.
- 2.) Geringere Nacharbeitskosten und somit wirtschaftlichere Fertigung.
- 3.) Niedrige Energiekosten.
- 4.) Sehr gute Umweltverträglichkeit.
- 5.) Neue konstruktive Möglichkeiten.
- 6.) Entwicklung und Schaffung neuer innovativer Werkstoffe.
- 7.) Steigerung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit.

Die Weiterentwicklung des Induktionshärtens ist jetzt dringlich, damit unser Standort bei der Härtung von Großzahnradern weiter an führender Stelle steht. Die Verbesserungen des „Prozesses“ werden ermöglicht durch Entwicklungen der Steuerungssysteme des Induktionsaufheizens, sowie der Messung von Restspannung und Härtetiefe. Die Anwendung der nächsten Generation von Werkstoffen muss schnellstens entwickelt werden.

Hochfester Stahl

Vergleich zwischen den Grenzwerten kugelgestrahlter und nicht kugelgestrahlter glatter und gekerbter Probestücke in Abhängigkeit von der spezifischen Zugfestigkeit des Stahls



Wirtschaftliche Erfolgsaussichten, wirtschaftliches Risiko

Führt dieses innovative Projekt in Zusammenarbeit mit der University of Newcastle, 1 oder 2 Getriebe- und Anlagenbauern, im Gespräch sind Janel-Kestermann in Bochum und SMS in Hilchenbach, sowie der Firma SMS Elotherm in Remscheid zum Erfolg, so hat die Härtereie Reese und der deutsche

Getriebe- und Anlagenbaubau einen neuen technologischen Vorsprung.

Die Wettbewerbssituation in den neuen Technologiebereichen Anlagen-, Schiffsgetriebebau und Energieanlagen ist international sehr stark. Bei Verwendung von induktivgehärteten Getriebeteilen, statt einsatzgehärteter Getriebeteile größerer Dimension, lassen sich aufgrund der günstigeren Herstellkosten die Märkte mit neuen Wettbewerbsstrategien besser erschließen.

Der Bedarf für preisgünstige induktivgehärtete Räder, die gleiche Tragfähigkeitseigenschaften wie einsatzgehärtete Räder aufweisen, ist hoch.

Alle Anbieter im Bereich der Energieanlagen, des Getriebe- und des Anlagenbaus könnten ihre Getriebe kostengünstiger und leistungsfähiger gestalten.

Als mittelständisches Unternehmen, das stark von der zyklischen Auftragslage seiner Kunden abhängig ist, war es in diesem Falle für uns nicht möglich, den gesamten Forschungsaufwand in dieser Höhe aus Eigenmitteln zu finanzieren. Dies hätte bei einer schlechten Konjunktur oder Misserfolg des Projektes für unser Unternehmen existenzbedrohend sein können. Wir waren daher darauf angewiesen das technische Risiko durch öffentliche Förderung zu mildern.

II. Der Versuchsablauf

Entwicklungsstufe 1.

1A Vorversuche zur Bestimmung der Zahnfuß- Dauerfestigkeit von OVAKO 677 Stahl

1B Bestimmung der Referenz Zahnfuß - Dauerfestigkeit von induktions- und einsatzgehärteten Zahnradern mit großem Modul (20mm)

Nach Besprechungen am 6. Feb. 2003 zwischen dem Design Unit (DU) der Universität Newcastle und der Härterei Reese Bochum ist das folgende Programm für die erste Entwicklungsstufe beschlossen worden:

1A. Vorversuche, OVAKO 677

Es wird angenommen, daß der neue direkt - lufthärtende Stahl OVAKO 677 sich sehr gut für das Induktionshärten eignet, und daß hiermit eine Verbesserung der Biegedauerfestigkeit von 20% bis 30%, gegenüber herkömmlichen Stählen (wie 42CrMo4 und 50CrVa4), erzielbar ist.

Diese Vorversuche an kleineren Prüflingen sollen Dauerfestigkeit und Überlastbarkeit von Zahnradern aus Induktionsgehärtetem OVAKO 677 bestimmen, sowohl wie die optimale Härtetiefe für diesen Stahl.

i) Prüflinge

Standard DU Prüfräder mit den folgenden Abmessungen:

- Für das Induktionshärten:

Modul	8mm
Zähnezahl	20
Teilkreisdurchmesser	160mm
Kopfdurchmesser	176mm
Zahnbreite	160mm
Härtetiefe	1.0 ^{±0,2} und 2.0 ^{±0,2} mm

- Für Pulsatorversuche

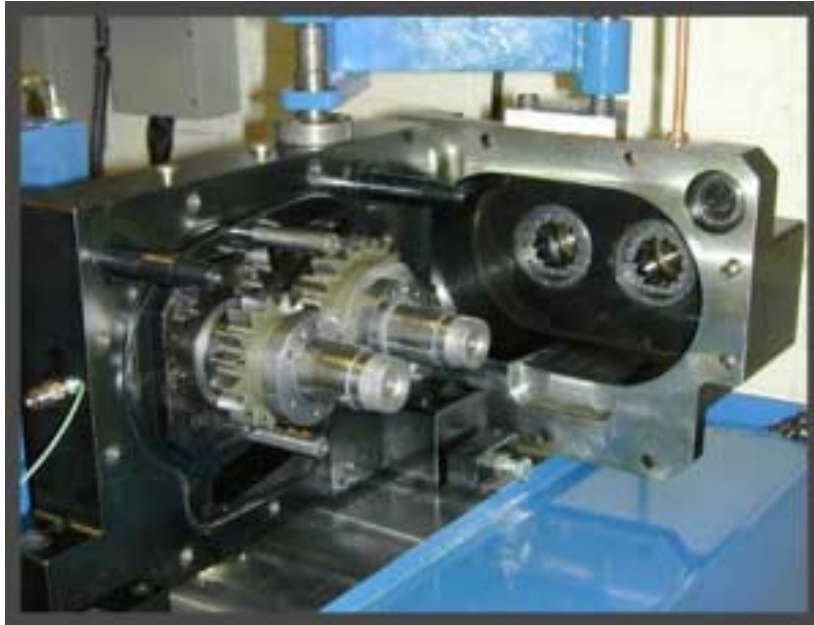


Marine Gearing Research Rig

Hierfür werden Radscheiben von Zahnbreite 25mm aus dem induktionsgehärteten Rad geschnitten. (Wire Spark Erosion). Die nötigen Prüfräder, 2 pro Härtetiefe, mit je 8 Radscheiben pro Härtetiefe für Pulsatorversuche und für die metallurgischen Untersuchungen werden von der DU erstellt. Das Induktionshärten der Verzahnung wird auf der SMS E-lotherm-Anlage in Bochum unternommen, und das Kugelstrahlen von der DU.

ii) Pulsatorversuche

Die Zahnfuß-Dauerfestigkeit wird im Treppenstufenverfahren nach VDI Richtlinie 2227 bestimmt (auch BS 3518 - Methods of Fatigue Testing) Die Festigkeitsprüfung wird auf Instron 1603 Resonanzprüfmaschinen mit einer Frequenz von 120...150 Hz ausgeführt. Für die Dauerfestigkeit werden 20...30 Zähne geprüft, für die Zeitfestigkeit 15...20 Zähne.



iii) Metallurgische Untersuchungen

Die folgenden Messungen werden an jeweils einer Radscheibe jeder Härtetiefe vor und nach dem Kugelstrahlen ausgeführt.

- Härte Profil
- Barkhausen Rauschen
- Restspannungsprofil auf der Zahnflanke und im Zahngrund (X-Ray Diffraction) bis zur Randschichtgrenze
- Restaustenitprofil bis zu einer Tiefe von 1mm.

iv) Verzugsmessungen

Der Härteverzug wird an allen 4 Prüfrädern gemessen.

v) Ergebnisse

Die Arbeit in Stufe 1A wird die Zahnfuß-Dauer und -Zeitfestigkeit für induktionsgehärteten OVA-KO 677. mit 1mm und 2mm Härtetiefe bestimmen. Diese Ergebnisse werden dann mit der Zahnfußfestigkeit von herkömmlichen induktionsgehärteten Verzahnungen aus 42CrMo4, En19 u. SÄE 8620 verglichen, sowie mit der Zahnfußfestigkeit einsatzgehärteter Räder aus 16MnCr5, 20MnCr5 u. 17CrNiMo6.

Zusätzlich wird die Arbeit Erkenntnisse zum:

- Härteverlauf
- Restspannungsverlauf
- Restaustenitverlauf
- Härteverzug

für induktionsgehärtete Zahnräder aus OVAKO 677 liefern.

1B. Zahnfuß-Dauerfestigkeit großmoduliger Verzahnungen

Die Zahnfußfestigkeits-Angaben für einsatz- und induktionsgehärtete Zahnräder in der Norm DIN 3990 Teil 5 beruhen hauptsächlich auf Versuchen mit Verzahnungen von Modul 4. Die DU hat auch Daten für Verzahnungen von 6mm und 8mm Modul, aber nicht für größere Module von 10...30mm. In Teil B von der Entwicklungsstufe 1 sollen zuverlässige Zahnfußfestigkeiten für größere Module in induktions- und einsatzgehärteten Stählen bestimmt werden. Diese werden dann einen realistische Vergleich der Zahnfußfestigkeit von induktions- und einsatzgehärteten Großverzahnungen erlauben.

i) Prüflinge

Der Hauptzweck dieser Arbeit ist ein Vergleich der Zahnfußfestigkeit von Induktionshärten und Einsatzhärten bei großen Verzahnungen. Hierzu werden Zahnräder aus 42CrMo4 and 17CrNiMo6 hergestellt. Wenn Zahnräder aus OVAKO 677 gute Zahnfußfestigkeit aufweisen (Versuch 1A) werden auch Zahnräder aus OVAKO 677 mit 20mm Modul Verzahnung in diesem Versuch geprüft.

Die Versuche werden wie im Teil 1A durchgeführt. In diesem Fall werden die Prüfräder folgende Abmessungen haben:

Modul	20mm	
Zähnezahl	16	
Teilkreisdurchmesser	320mm	
Kopfkreisdurchmess	368mm	
Zahnbreite	250mm	
Härtetiefe:	Induktionshärten	2.5±0,3 und 4.0±0,3mm
	Einsatzhärten	2.5±0,3mm

Für die Pulsatorversuche werden Prüfradscheiben mit einer Zahnbreite von 15mm aus den gehärteten Zahnrädern geschnitten. Je eine Radscheibe pro Material und Härtetiefe wird zur metallurgischen Prüfung zurückgehalten, die restlichen Radscheiben werden kugelgestrahlt, und dann eine Probe jedes Materials und jeder Härtetiefe zur metallurgischen Prüfung benutzt. Gesamtzahl

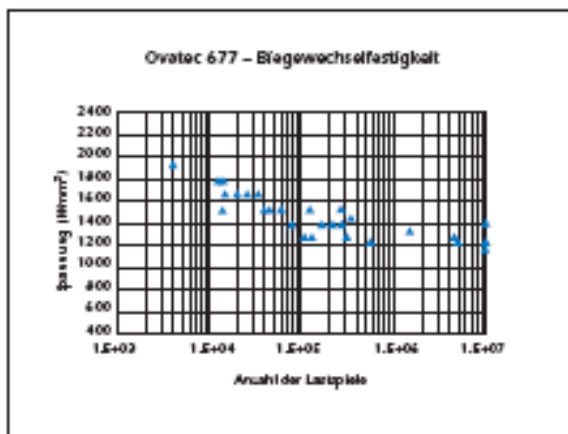


Bild 28 – Wohler-Kurve für Einzelzahnversuche an Ovatoc 677L.

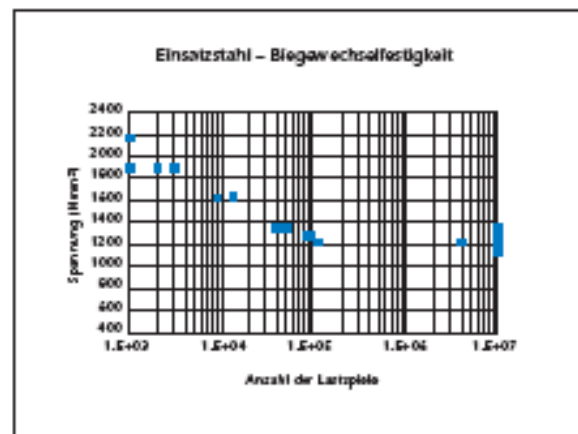


Bild 30 – Wohler-Kurve für Einzelzahnversuche an einem Einsatzstahl.

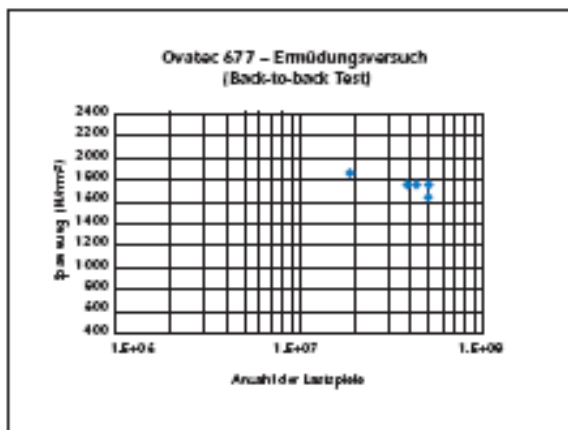


Bild 29 – Ermüdungsversuche an Zahnrädern aus Ovatoc 677L.

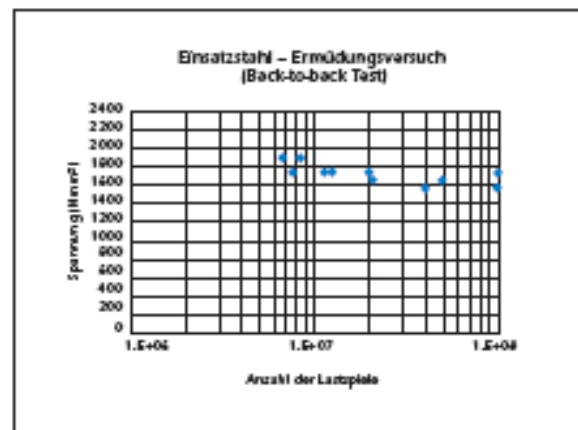


Bild 31 – Ermüdungsversuche an Zahnrädern aus einem Einsatzstahl.

der Zahnräder:

- 2 aus 42CrMo6
- 2 aus OVAKO 677
- 1 aus 17CrNiMo6

Aus jedem Zahnrad werden folgende Prüfradscheiben geschnitten:

- 1 Scheibe vor dem Kugelstrahlen für die Metallurgie
- 1 Scheibe nach dem Kugelstrahlen für die Metallurgie
- 7 Scheiben nach dem Kugelstrahlen für Pulsatorversuche.

ii) Pulsatorversuche

Diese werden nach demselben Verfahren, wie unter 1A - (ii) beschrieben, geprüft. Insgesamt wird die Zeit und Dauerfestigkeit von 5 Varianten bestimmt, also

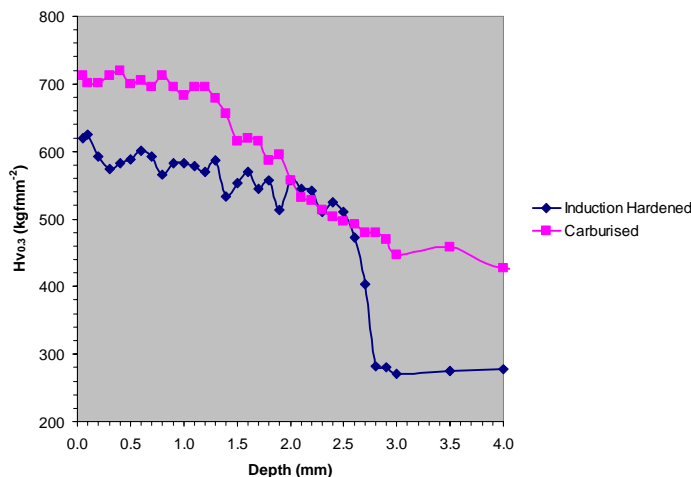
- 42 CrMo4, induktionsgehärtet, 2.5mm Härtetiefe
- 42 CrMo4, induktionsgehärtet, 4.0mm Härtetiefe
- OVAKO 677, induktionsgehärtet, 2.5mm Härtetiefe
- OVAKO 677, induktionsgehärtet, 4.0mm Härtetiefe
- 17 CrNiMo6, einsetzgehärtet, 2.5mm Härtetiefe

iii) Metallurgische Untersuchungen

Von jedem der fünf Prüfräder wird je eine Scheibe vor und nach dem Kugelstrahlen untersucht, und die Messungen wie unter 1A (iii) ausgeführt.

iv) Verzugsmessungen

Der Härteverzug wird an jedem der fünf Zahnräder gemessen.



v) Ergebnisse

Die Arbeit in Teil 1B der Arbeitsstufe 1 wird zuverlässige Zahnfußfestigkeitswerte liefern für Zahnräder von Modul 20mm. Dieses erlaubt dann den Vergleich zwischen den Zahnradern aus den drei Stählen, mit Induktions- und Einsatzhärten, sowie Vergleiche mit den Angaben in DIN 3990 Teil 5. Außerdem wird die Arbeit einige Daten in Bezug auf den Einfluss der Härtetiefe beim Induktionshärten liefern, und Vergleichende Werte für den Härteverzug.

Entwicklungsstufe 2

Optimierung des Induktors, (Geometrie, Abstand etc.) der Frequenz der Aufheizrate und des Abschreckens für höchstmögliche Zahnfuß-Dauerfestigkeit für das Einzelzahn-Lücken-Induktionshärten von Verzahnungen von 6mm Modul bis 40mm Module.

Entwicklungsstufe 3

Die Entwicklung geeigneter Qualitätssicherung für das Induktionshärten, sowohl

- Prozessüberwachung der Aufheizung und des Abschreckens und
- Zerstörungsfreie Messung von Härte, Randschichtdicke und Restspannung.

Entwicklungsstufe 4

Die systematische Bewertung der erzielten Flanken- und Zahnfuß-Dauerfestigkeit mit optimiertem Induktionshärten.

Das Arbeitsprogramm für Stufen 2...4 wird nach Abschluss der Arbeiten in Stufe 1 beschlossen.

HÄRTEREI REESE BOCHUM GmbH

Dipl.-Ing. Gerhard Reese
 Oberscheidstraße 25
 44807 Bochum
 Tel.: +49 (0) 23 4 90 36 - 0
 Fax: +49 (0) 23 4 90 36 - 96
 E-Mail: bochum@haerterei.com