

4.1 Wärmebehandlung von Großzahnradern – Minimierung von Härteverzügen

von Gerhard Reese

Einleitung

Großzahnradern können in vielen Bereichen angewendet werden, wie z. B. bei Schiffsgetrieben, Windkraft-, Stahlwalzwerken, Kraftwerken, Verkehr, Bahn, Zementmühlen, Bergbau, Ölindustrie.

Es stehen drei wichtige Oberflächenhärteverfahren zur Verfügung, um die technischen Eigenschaften von Getriebeteilen zu verbessern und so den technischen Nutzen zu erhöhen: Einsatzhärten, Nitrieren und Induktions-/ Flammenhärten (**Bild 1 a-c**).

Diese drei Härteverfahren werden vorgestellt und dann wird auf das Einsatzhärten von großen Getriebekomponenten bis zu 50 t Gewicht und 5.000 mm Durchmesser eingegangen. Es wird die Auswahl der Materialien, der Vorbehandlung und der Designs für diese Verfahren diskutiert, um sicher zu gehen, dass die Werkstücke gut und preiswert werden.

Der Härteverzug wird immer wichtiger, abhängig von der Größe einer Komponente. Ein Härteverzug von 1 Promille bei einem Zahnrad mit einem Durchmesser von 100 mm beträgt nur 0,1 mm. Ein Verzug von 1 Promille bei einem Zahnrad mit einem Durchmesser von 5.000 mm bedeutet jedoch schon 5 mm. Aber 5 mm sind oft schon die gesamte Härtetiefe (CHD). Das würde bedeuten, dass die gesamte Härteschicht wieder weggeschliffen werden muss, um die Geometrie zu halten. Das Ziel ist es daher, den Härteverzug zu minimieren und zusätzlich Maßänderungen zu antizipieren. In dem Beitrag werden daher auch Maßnahmen vorgestellt, die es ermöglichen, den Härteverzug unter Kontrolle zu halten. Durch die vertikale Chargierung von Zahnradern können sowohl der Planverzug als auch die Konizität, welche bei horizontaler Chargierung regelmäßig zu Problemen führen, nahezu ausgeschlossen werden. Auch kann eine mögliche Ovalität mit besonderen Maßnahmen minimiert werden.

Zudem werden technische Studien vorgestellt, um den Härteverzug für große Bauteile zu minimieren. Weiterhin werden Design-Beispiele für große Zahnradern als Schweißkonstruktionen und Schmiedeteile gezeigt. Die verschiedenen Werkstoffe werden ebenso vorgestellt und diskutiert wie die Vorbehandlung und erforderliche Maßnahmen, um eine ordnungsgemäße Chargierung für die Behandlung im Härteofen zu gewährleisten. Am Ende wird die derzeit größte Schutzgashärteanlage für das vertikale Einsatzhärten von Großzahnradern bei der Härterei Reese in Bochum vorgestellt.

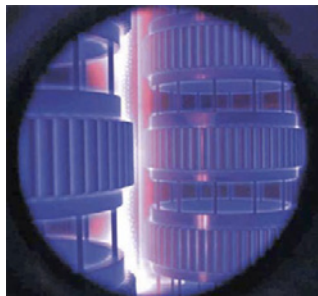
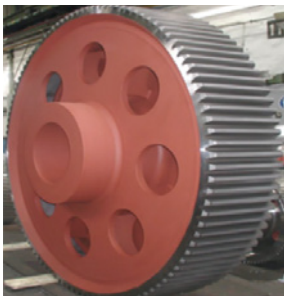


Bild 1: Einsatzhärten (a), Nitrieren (b), Randschichthärten (c)

4.1.1 Drei Methoden im Vergleich

Einsatzhärten wird normalerweise bei Temperaturen zwischen 880 und 980 °C zum Aufkohlen und 780–860 °C zur Härtung durchgeführt. Das Standardverfahren ist die Gasaufkohlung. Durch die Diffusion von Kohlenstoff in die Oberfläche und anschließendes Abschreckhärten erzeugt das Verfahren eine starke, harte Oberflächenschicht aus Martensit mit bis zu 10 mm Einsatzhärte-tiefe. Bei dieser thermochemischen Methode wird die Randschicht der Werkstücke mit definierten Mengen von Kohlenstoff angereichert. Es werden dazu kohlenstoffhaltige Gase wie Methan (CH₄) oder Propan (C₃H₈) verwendet. Im Anschluss an die Aufkohlung werden die Bauteile gehärtet und anschließend angelassen, um innere Spannungen abzubauen. Zusätzlich zu einer hohen Oberflächenhärte von 650–700 HV und einer hohen Abriebfestigkeit weisen die wärmebehandelten Werkstücke eine gute Biegewechsel- und Dauerfestigkeit aufgrund von Druckeigen-spannungen auf. Spezielle Zeit- und Temperaturverläufe während des Aufkohlungs-, Härte- und Anlassprozesses, verbunden mit ausgefeilten Chargiertechniken, können angewendet werden, um die Materialeigenschaften zu optimieren und den Härteverzug, also Maß- und Formänderungen zu minimieren – hierin liegt die Kunst des Härtens.

Nitrieren wird bei Behandlungstemperaturen von 500–580 °C für Gasnitrieren und Nitrocarburieren bis herunter zu 400 °C beim Plasmanitrieren und Plasma-Nitrocarburieren durchgeführt. Nitrieren ist ein Verfahren zum Anreichern der Oberflächenschicht von Eisenmaterialien mit definierten Mengen von Stickstoff oder im Fall von Nitrocarburieren, Stickstoff und Kohlenstoff. Dies verbessert nicht nur die Härte, sondern auch den Abriebwiderstand, den Ermüdungswiderstand, den Korrosionswiderstand und die Gleiteigenschaften. Darüber hinaus gibt es keine martensitische Gefügeumwandlung, sodass hohe Maßhaltigkeit gewährleistet ist.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der drei Härteverfahren

	Einsatzhärten	Randschichthärten	Nitrieren
Pros	<ul style="list-style-type: none"> • Große Einsatzhärte-tiefen (CHD) bis zu 10 mm, die innerhalb von Behandlungszeiten von 10 bis 200 h erreicht werden • sehr hoch belastbare Oberflächenschicht • zäher Kern • exzellente Ermüdungseigenschaften durch Druckeigen-spannungen • hohe Schlag- und Wälzfestigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Oberflächenhärte-tiefen (SHD) von 2 - >30 mm möglich, erreichbar in relativ kurzer Zeit und mit vergleichsweise geringem Energieaufwand. • Harte Oberfläche je nach Material • zäher Kern • gute Ermüdungseigenschaften • hoher Biege- und Torsionswiderstand 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Behandlungstemperaturen begünstigen minimalen Verzug und minimale Nacharbeitskosten • schlecht zugängliche Bereiche können gehärtet werden • je nach Material sehr hohe Oberflächenhärten möglich • zäher Kern • gute Ermüdungseigenschaften • hoher Korrosionswiderstand • sehr temperaturstabil • verbesserte Fress- und Gleiteigenschaften
Cons	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgrund langer und hoher Prozesstemperaturen, martensitischer Umwandlung und schneller Abkühlung können erhebliche Maßänderungen und Verzüge auftreten • Einsatz maximal 50 °C unter Anlass-temperatur • geringer Korrosionswiderstand 	<ul style="list-style-type: none"> • Härte-tiefen unter 2 mm schwierig • nur leicht per Induktor oder Flamme zugängliche Bereiche härtbar • erhöhtes Rissrisiko • aufwendige Probehärtungen und Auswertungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Nitriertiefen bei vergleichsweise langen Behandlungszeiten • NHD definitionsgemäß nur 50 HV über Kernhärte => 1 mm NHD ist bedeutend weniger als 1mm CHD • Bei hohen Oberflächenhärten und unter hoher Belastung steigt das Riss- und Bruchrisiko

Normalerweise liegen die maximalen Nitriertiefen bei 0,8 mm. Beim „Profundinieren“, einer von dem Unternehmensgründer Dr.-Ing. Helmut Reese entwickelt Tiefnitrierermethode, werden Nitriertiefen von mehr als 1,0 mm abhängig von dem Material erreicht. Sofern geeignete Stähle verwendet werden, ist das verzugsarme Nitrieren in vielen Fällen eine sinnvolle Alternative zum Einsatz- und Randschichthärten. Spezielle Nitrierstähle sind unter DIN 17211 und EN 10085 aufgeführt. Bei einem FVA Forschungsvorhaben wird derzeit auch ein Stahl nach französischer Luftfahrtnorm mit vielversprechenden Zwischenergebnissen untersucht: 32CDV13. Der Stahl weist als Besonderheit einen besonders hohen Cr-Gehalt von 3 % und einen Mo-Gehalt von 1 % auf. Für größere Bauteile, um die es hier geht, dürften aber zumindest der Preis und die Lieferbarkeit den Einsatz behindern.

Randschichthärten wird bei Temperaturen von 50–100 °C über der materialspezifischen Härtetemperatur durchgeführt. Die Erwärmung wird lokal per Flamme, Induktion, Laser- oder Elektronenstrahl durchgeführt und es wird beim unmittelbar anschließenden Abschrecken eine harte martensitische Oberflächenschicht erzeugt. Die Methode kann auch verwendet werden, um große Bauteile oder komplexe Geometrien zu härten. Die Induktions- oder Flammenhärtung wird dort in der Regel lokal an den stark belasteten Bereichen des Werkstücks angewendet. Die Bereiche werden erhitzt, bis die jeweilige Härtetemperatur erreicht ist und unmittelbar im selben Arbeitsgang anschließend abgeschreckt. Es ist viel Erfahrung, handwerkliches Geschick und Können für die Optimierung und Sicherung der jeweiligen Härteparameter und komponentenbasierte Lösungen sowohl für Flamm- als auch Induktionshärten notwendig. Dabei ist für die Sicherstellung der geforderten Eigenschaften die Anfertigung und Untersuchung von Teststücken wesentlich, wenn die Härtetiefe nachgewiesen werden soll. Zusammenfassend ist die Oberflächenhärtung in vielen Fällen eine technische und wirtschaftliche Alternative zur Einsatzhärtung. **Tabelle 1** stellt die drei Härteverfahren noch einmal gegenüber.

4.1.2 Die Wahl des Härteverfahrens

Für die Belastbarkeit einer Zahnradkomponente sind Härte, Härtetiefe und Kernfestigkeit die entscheidenden Faktoren. Wenn die Belastbarkeit ausschlaggebend ist, ist das Einsatzhärten erste Wahl, auch wenn beim Nitrieren geringere Verzüge und Maßänderungen auftreten. Stehen eher Gleiteigenschaften, niedrige Hertzische Pressungen und geringer Verzug im Vordergrund ist das Nitrieren erste Wahl. Große Härtetiefen in kurzer Zeit, partielle Behandlung großer Bauteile und Flexibilität sind die Stärken der Randschichthärtung. Aufgrund der höchsten Belastbarkeit ist das Einsatzhärten erste Wahl für die Härtung großer Zahnräder.

Die Hauptgesichtspunkte beim Einsatzhärten großer Zahnräder lauten:

- Härbarkeit (Materialauswahl und Geometrie)
- Gewicht (so viel wie nötig, so wenig wie möglich)
- Maßänderung und Verzug.

Das Standardabkühlmittel für große Zahnräder ist Öl. Die Zeit für das Abkühlen unter die Martensit-Start-Temperatur (M_s) beträgt oftmals länger als eine Stunde je nach Materialquerschnitt. Während dieser Zeit wird die Hitze aus dem Kern an die Oberfläche geleitet und von dort an das Abkühlmedium abgegeben. Aus diesem Grund muss ein Stahl gewählt werden, dessen „Ferritnase“ im Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm (ZTU-Diagramm) möglichst weit rechts anfängt. Andernfalls kommt es zu unerwünschten Härte- und Härtetiefenabfällen. Je höher die Materialquerschnitte desto notwendiger sind hoch legierte Stahlgüten. Für große Zahnräder ist ein 18CrNiMo7-6 in HH-Qualität Mindeststand der Technik. Bei höheren Anforderungen werden gerade bei der FVA weitere Werkstoffe untersucht. Der Stahl 26MnCrNiMo6-5-4 mit einem Mo-Gehalt von immerhin 0,6 % zeigt vielversprechende Zwischenergebnisse. Es dürften aber noch Jahre vergehen, bis die Kaufleute davon überzeugt werden können und der Stahl sich durchsetzt (**Bild 2** und **Bild 3**).

Bild 2: ZTU-Diagramm für den Stahl 18CrNiMo7-6 (F = Ferrit, nach ca. 200 s setzt Ferritbildung ein)

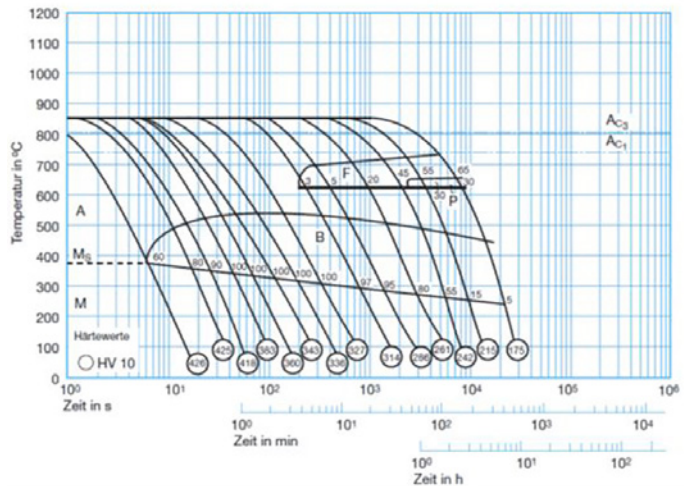
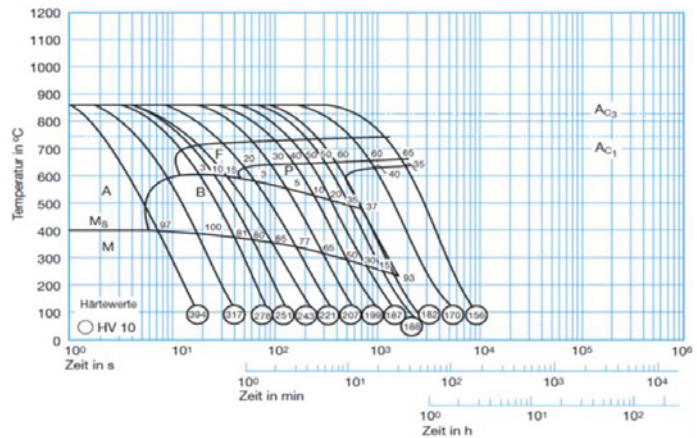


Bild 3: ZTU-Diagramm für niedriglegierten Einsatzstahl 16MnCr5 für Getriebeteile bis ca. 80 mm Materialquerschnitt (nach ca. 10 s setzt Ferritbildung ein)



Reese empfiehlt aufgrund seiner Erfahrungen für große Bauteile über 100 mm Materialquerschnitt mindestens den Stahl 18CrNiMo7-6 oder 18CrNi8 oder bessere Qualitäten bei großen Bauteilen mit HH- bzw. HH-Plus-Streuband.

Die Legierungselemente Cr, Ni, Mn, und V erhöhen die Härtebarkeit. V-, Ni- und insbesondere Mo-Zugaben erhöhen die Zähigkeit. Es kommt zudem auf das richtige Verhältnis der Legierungselemente an, die alle ihre ganz spezifischen Wechselwirkungen zueinander haben, sodass nicht einfach ein Element zugunsten eines preisgünstigeren reduziert werden darf. Ein ungenügend oder unausgewogen zusammengesetzter Stahl wird keine ausreichenden Härteeigenschaften entwickeln, egal wie intensiv und gleichmäßig die Abkühlung durchgeführt wird. Unerwünschte Härte- und Härtetiefenabfälle sind die Folge und weitere negative Begleiterscheinungen, auf die noch eingegangen wird, kommen dazu. Ein Härteabfall unter 52 HRC unterhalb des Teilkreises führt oft zu frühen Ausfällen aufgrund Pittingbildung, Flankenbruch oder Zahnfußbruch. **Bild 4** zeigt einen

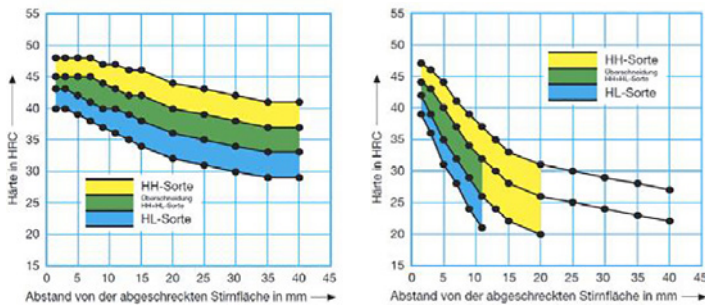


Bild 4: Jominy-Härtbarkeitstest durchgeföhrt bei 18CrNiMo7-6 (a) und 16MnCr5 (b)

Härteabfall bei unterschiedlichen Stahlsorten von der Oberfläche zum Kern ermittelt anhand eines Jominy-Härtbarkeitsversuchs.

Der Bereich des Härteabfalls zum Zahnfuß hin kann aufgrund einer kleinen zylindrischen Begleitprobe nur ungenau ermittelt werden, insbesondere bei großen Zahnrädern mit großen Querschnitten und unterschiedlichen Geometrien. Wer hier sichergehen will, sollte Couponproben verwenden, die den maßgeblichen Querschnitten und Zahngeometrien möglichst nahe kommen. **Tabelle 2** zeigt einen Vergleich verschiedener Härtetiefen an einem Referenzteil (**Bild 5**).

Eine Einengung des Härtebarkeitsstrebands zieht auch eine Einengung des Maßänderungsstrebands nach sich (**Bild 6**).

Bei der Materialauswahl für große Zahnräder müssen die geometrischen Einflüsse berücksichtigt werden und es müssen folgende Eigenschaften gewährleistet sein:

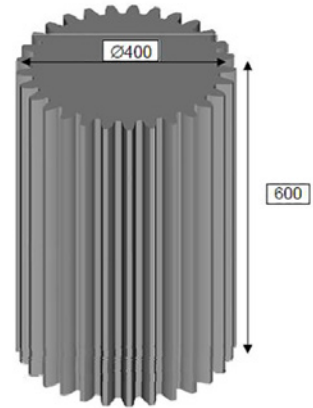
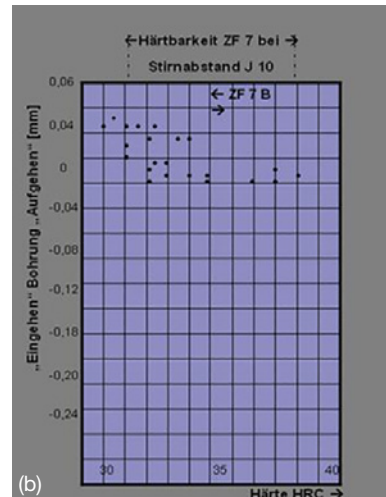
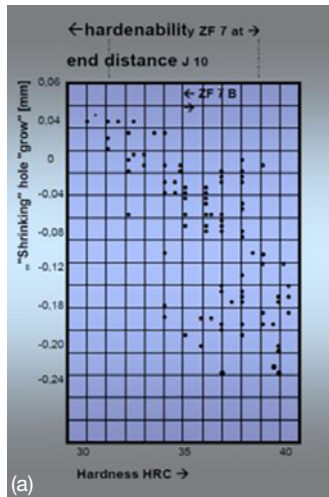
1. Ausreichende Härtebarkeit
2. Wanddicken so gering wie möglich, aber so groß wie nötig
3. Konstruktion muss geometrische Stabilität gewährleisten.

Außerdem:

- Edelstahl (nicht "Qualitätsstahl") gemäß EN 10020
- Elektromagnetisch geröhrt
- Feinkornstahl
- Vorvergüten in Öl zur Verringerung und Abschätzung des Verzugs beim späteren Einsatzhärten.

Tabelle 2: Vergleich der Härtetiefe an Zahnflanke, Zahnfuß und zylindrischer Begleitprobe \varnothing 35 mm bei verschiedenen Härtereien mit unterschiedlichen Abkühlparametern

	A Flanke / 30° [mm]	B Flanke / 30° [mm]	C Flanke / 30° [mm]	D Flanke / 30° [mm]	E Flanke / 30° [mm]	F Flanke / 30° [mm]
$E_{ht_{min}}$	2,75 / 2,03	3,14 / 2,20	3,35 / 2,4	3,05 / 2,06	3,35 / 2,28	2,97 / 2,28
$E_{ht_{\varnothing 35 Coupon}}$	4,32	3,43	3,45	3,19	3,5	3,53
$E_{ht_{Fu\beta}}/E_{ht_{Flanke}}$	0,74	0,70	0,72	0,68	0,68	0,77
$E_{ht_{Flanke}}/E_{ht_{35}}$	0,57	0,91	0,97	0,95	0,96	0,84
$E_{ht_{Fu\beta}}/E_{ht_{35}}$	0,47	0,64	0,69	0,65	0,65	0,65

Bild 5: Referenzteil aus 18CrNiMo7-6HH, Modul 12, 30 Zähne**Bild 6:** Härtebarkeitsstreuband, (a) nicht eingengt, (b) eingengt

4

Gewicht: Das Gewicht ist in erster Linie wichtig für die Wirtschaftlichkeit. Daher sollte das Gewicht möglichst gering sein, jedoch nicht zulasten der Maß- und Formstabilität. Für große Zahnräder ab etwa 2 m Durchmesser haben sich Schweißkonstruktionen als maßstabil und wirtschaftlich erwiesen und sind daher jetzt Standard.

Maßänderung und Verzug: Wie bereits dargelegt, wird der Härteverzug mit zunehmender Komponentengröße immer wichtiger. Mit zunehmendem Durchmesser steigt auch der Härteverzug. So kann es passieren, dass die Werte von Härteverzug und Härtetiefe (CHD) identisch sind, was im Umkehrschluss bedeuten würde, dass die gesamte Härteschicht wieder weggeschliffen werden muss, um die gewünschte Geometrie wiederherzustellen. Daher es das Ziel, den Härteverzug zu minimieren und gleichzeitig die unvermeidbaren Maßänderungen zu antizipieren.

Es wird unterschieden zwischen Maßänderungen:

- Wachsen oder Schrumpfen

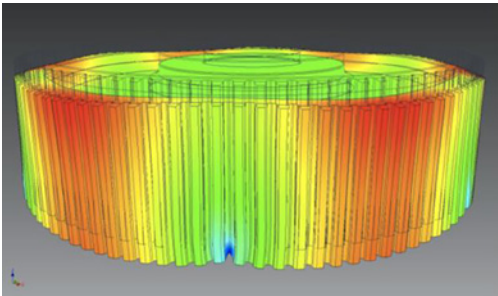


Bild 7: Simulation von Verzug und Formänderung eines Zahnrad bei der Einsatzhärtung

und Verzug bzw. Formänderungen (**Bild 7**):

- Konizität
- Ovalität und Rundlauf
- Planverzug (Planschlag)
- Chargiereindrücke aufgrund des Eigengewichts.

Maßänderungen (Wachsen und Schrumpfen) beim Härten sind bedingt durch die martensitische Umwandlung und thermische Spannungen während des Prozesses. Maßänderungen sind unvermeidlich, sind aber bei gleichen Bedingungen reproduzierbar und daher relativ leicht beherrschbar.

Verzüge bzw. Formänderungen beim Härten haben verschiedene Ursachen (**Bild 8**):

Eigen- und Bearbeitungsspannungen, Seigerungen, Zeiligkeit, Mischkorn und sonstige ungleichmäßige Legierungsverteilung, weiterhin Spannungen aufgrund geometrischer Asymmetrien, ungleichmäßige Temperaturverteilung in der gesamten Prozesskette vor der Einsatzhärtung, Chargierung und Temperaturführung während der Einsatzhärtung.

Maß- und Formänderung

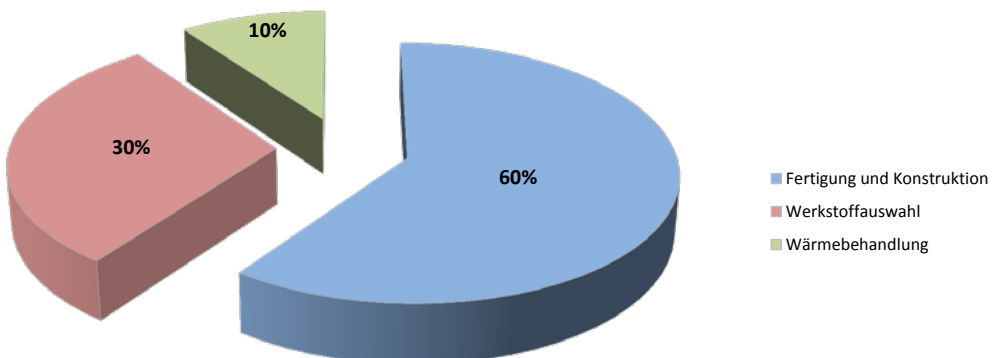


Bild 8: Anteilig dargestellte Ursachen für Maß- und Formänderungen

Erfahrungsgemäß haben sich folgende Vorbehandlungen vor der eigentlichen Einsatzhärtung als wirksam gegen Verzug erwiesen:

- 3-D-Schmieden (durchgreifendes Recken und Stauchen) → hohe Gleichmäßigkeit, geringe Segregationen, Verringerung von Poren und feines Gefüge
- Vermeidung von Mikrorissen, Poren, Dendriten und sonstigen Unreinheiten → Reduzierung von Wasserstofffallen und in der Folge Wasserstoffversprödung mit unerwünschten späten Brüchen
- Schmiedestück nicht BG-geglüht, also nach dem Schmieden nicht an Luft abkühlen lassen, sondern vergüten: Bei 840 °C ausgleichen, in Öl härten und innerhalb 24 Stunden bei 650 °C anlassen
- Spannungsarmglühen nach dem Schweißen
- Vorvergüten des vorgearbeiteten Bauteils zur späteren Einsatzhärtung bei mindestens 840 °C, Ölabkühlung, Anlassen 650 °C zur Steigerung der Zähigkeit und zur Abschätzung des Verzugsverhaltens nach dem späteren Einsatzhärten
- Den Bereich der irreversiblen Anlassversprödung von 250–400 °C in allen Prozessschritten schnellstmöglich durchfahren.

Es gibt drei Schlüsselfaktoren bei der Einsatzhärtung:

- Anlagentechnik
- Prozessführung
- Chargierung.

Diese Faktoren können alle anderen Einflussfaktoren überwiegen wobei der Härteverzug dabei eine entscheidende Bedeutung für den Erfolg des gesamten Herstellungsprozesses eines großen Zahnrades bekommt; wir sind nun bei der Härterei angekommen.

Anlagentechnik

Die Einflüsse der Anlagentechnik sind in **Bild 9** dargestellt. Die Schlüsselfaktoren der Anlagentechnik sind:

- Atmosphärenkontrolle,

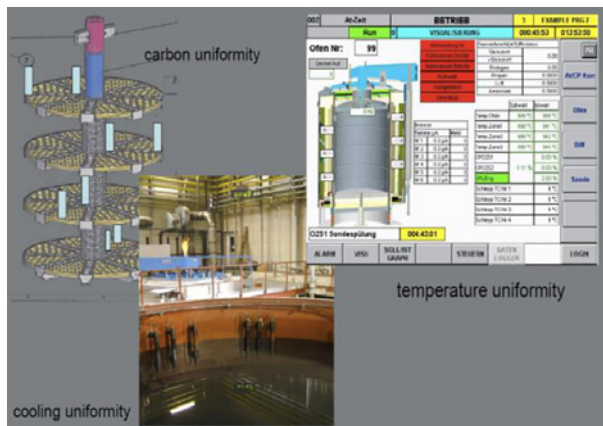


Bild 9: Einflüsse der Anlagentechnik

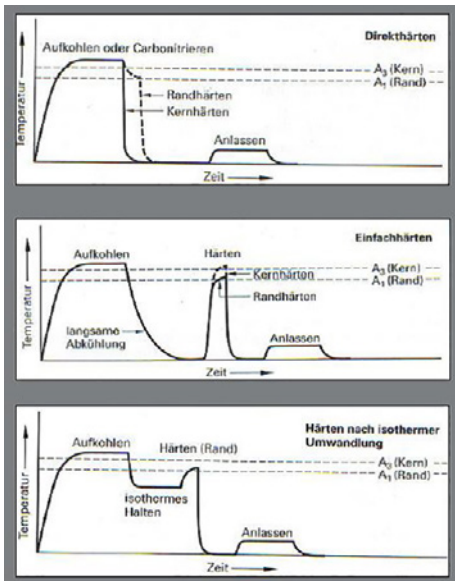


Bild 10: Gegenüberstellung verschiedener Härteverfahren

- Temperaturkontrolle
- Ölbad-/Abkühlkontrolle.

Härteverfahren

Direkthärten, Einfachhärten oder Härten nach isothermer Umwandlung? **Bild 10** zeigt eine Gegenüberstellung der verschiedenen Verfahren.

Folgende Daten wurden beim FVA-Forschungsvorhaben Nr. 373 „Wärmebehandlung Großzahnrad“ ermittelt:

- bei Prüfzählern ($m_n = 8$ mm und $m_n = 14$ mm, 18CrNiMo7-6) kein signifikanter Einfluss des Härteverfahrens auf die Zahnfußfestigkeit, insbesondere bei Pulsatorversuchen keine Minderung der Zahnfußtragfähigkeit gegenüber einfach- und nach isothermischem Umwandeln gehärteten Varianten.
- Verzahnungsmessungen an einer 3D-Koordinatenmessmaschine zeigen bei den direktgehärteten Prüfzählervarianten ein deutlich besseres Verzugsverhalten.

Das Direkthärten ist daher das Standardverfahren auch für große Zahnräder.

Chargierung

Es gibt unterschiedliche Chargierungsmöglichkeiten:

- horizontal
- vertikal
- hängend

Bild 11: Horizontale Chargierung; links: Zahnrad mit Stützplatten, rechts: Kegelräder mit Stützplatten



- stehend
- mit Spezialvorrichtungen und Systemen
- mit Chargierhilfsmitteln.

Unterschiedliche Arten der Chargierung sind in **Bild 11**, **Bild 12** und **Bild 13** zu sehen.

4.1.3 Betriebserfahrungen

Seinerzeit hat ein kanadischer Kunde angerufen und den Betriebsleiter über Zahnkränze mit 30 mm Maßabweichungen, hauptsächlich in Form von Ovalität, informiert. Seine Frage war, was man tun könne, um solche Maßabweichungen zu verbessern. Der Betriebsleiter bat um einen Auftrag, der letztlich mit Maßabweichungen unter 0,30 mm in Bezug auf Planschlag und Ovalität endete.

Bei einem großen französischen Getriebehersteller erhielt die Härterei in der Anfangsphase lediglich Ritzelwellen. Der Betriebsleiter behauptete daraufhin, dass sein Betrieb die Räder deutlich besser als der Wettbewerb einsatzhärten könne. Die ersten Räder waren nicht sehr gut, aber dennoch deutlich besser als die, die der Wettbewerb gehärtet hat. Das Wachstum streute sehr und

4



Bild 12: Vertikale Chargierung eines Schmiederads mit Nabenstützplatten



Bild 13: Vertikale Entnahme eines geschweißten Zahnrad zur Härtung

Konizität, Ovalität und Planschlag waren nicht so, wie vergleichbare Räder anderer Kunden. Der Betriebsleiter gab umfangreiche Materialempfehlungen bzw. Empfehlungen für die Vorbehandlungen und auch in einem persönlichen Gespräch mitgeteilt, dass man die besonderen Räder von rund 2 m Durchmesser nicht mehr horizontal, sondern vertikal härten werde. Daraufhin legte der Kunde Maße von Zahnrädern vor, die der Wettbewerb mit 5 mm Konizität gehärtet hatte. Obwohl die Optimierungsmöglichkeiten bei dem Werkstoff noch nicht vollständig umgesetzt wurden, hat Reese Planschlag, Konizität und Ovalität $< \pm 0,5$ mm erreicht. Vereinzelt liegen auch Werte von 0,7 mm vor. Der Kunde ist außerordentlich zufrieden. Die Zeiligkeiten verursachen aber noch Ovalitäten und Konizitäten bis zu 0,7 mm. Das Wachstum ist durch Einengung des Härtebarkeitsstreubands reduziert und liegt nun in engeren Grenzen vor.

Die hängende (vertikale) Variante, die in der Härtereie Reese im großen Umfang mit speziellen Chargersystemen schon seit Jahren umgesetzt wird, ist i. d. R. besser als die horizontale Variante. Räder, die aufgrund der Geometrie nur horizontal chargiert werden können, seien aufgrund der Spezialhilfsmittel auch deutlich besser als beim Wettbewerb. In anderen Härtereien werde eine vertikale Einsatzhärtung, abgesehen von Kammeröfen, so gut wie gar nicht angewendet.

Erfahrungen hinsichtlich Maßänderungen

Vollräder wachsen im Allgemeinen und zwar umso mehr, je höher die Zahnbreite. Ist die Zahnbreite im Verhältnis zum Durchmesser eher klein, so wachsen die Räder um etwa 1-1,5 mm. Wird die Zahnbreite größer steigt das Wachstum auf 2-2,5 mm. Bei sehr großen Zahnbreiten, wie bei den Zahnrädern von Turbogetriebeherstellern, sind Wachstumstendenzen bis 3-3,5 mm und mehr zu verzeichnen.

Schweißkonstruktionen bleiben in aller Regel stehen bzw. wachsen bis zu 1 mm.

Werkstoffe aus 16/20MnCr5 (Vollräder als auch Schweißkonstruktionen) weitestgehend frei von Zeiligkeiten wachsen ohne Zeiligkeit nur geringfügig um < 1 mm. Bei Vorliegen von Zeiligkeit oder

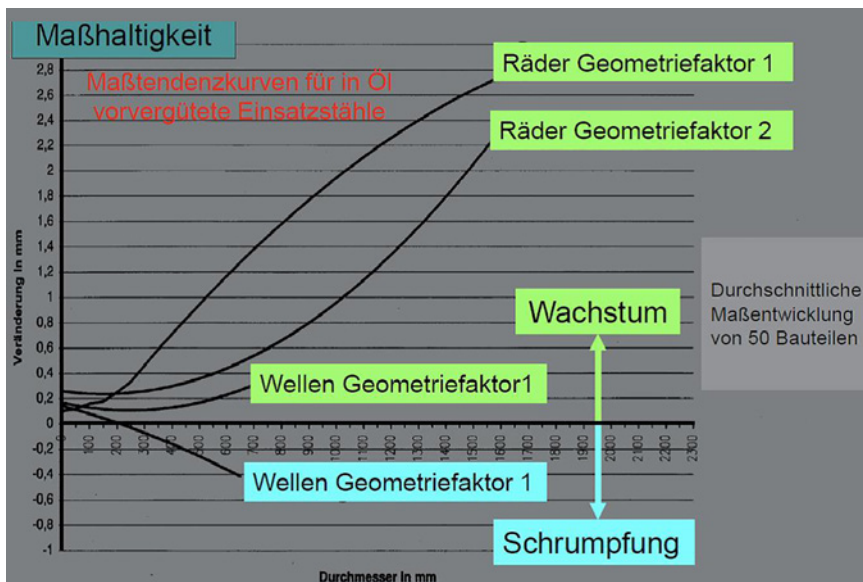


Bild 14: Maßtendenzkurven für Schmiedestücke aus vorvergüteten Einsatzstählen

gar Mischkorn findet mal ein Wachsen mal ein Schrumpfen (gerichtetes Wachsen) statt. Eine sichere Voraussage ist nicht möglich und bedeutet häufig Ausschuss. Das gerichtete Wachsen kann so aussehen, dass der Außendurchmesser kleiner, die Bohrung auch kleiner und die Zahnbreite größer wird.

Bei der Verwendung eines 18CrNiMo7-6 im vergüteten Zustand (also weitestgehend frei von Zeiligkeit und Mischkorn), in der Ausführung als HH-Qualität, ist bei einer vertikalen Chargierung mit Planschlag, Ovalität und Konizität von deutlich < 1 mm zu rechnen (Zeiligkeiten im Werkstoff können zu Konizitäten und Ovalitäten führen).

Eine Winkelabweichung der Verzahnung ist auch bei einem zeiligen Gefüge zu verzeichnen und/oder wenn die zu stützende Fläche unterhalb der Verzahnung zu gering ist. Auch wenn die Zahnbreite im Verhältnis zum Durchmesser sehr gering ist, können Winkelabweichungen in der Verzahnung auftreten. Auch der Bohrungsdurchmesser und die Nabenstärke haben einen Einfluss auf die Winkelabweichung der Verzahnung.

Sichere Voraussagen über maßliche Entwicklungen lassen sich dann sehr genau treffen, wenn der Werkstoff gut und unter reproduzierbaren Bedingungen bestellt, vor und nach der Wärmebehandlung vermessen als auch von einer guten Härterei wiederkehrend unter gleichen Bedingungen gehärtet wird (**Bild 14**). Die Einflussfaktoren sind sehr vielseitig. Mit sehr guten und außergewöhnlichen Chargiermethoden als auch der Wärmebehandlungsführungen (Temperaturführung im Ofen hinsichtlich Gleichmäßigkeit) kann man in Zusammenarbeit mit den Kunden bei der Fertigung und Materialbestellung eine optimale Qualität erreichen. Dies bedeutet aber eine intensive und enge Zusammenarbeit.

4.1.4 Zusammenfassung

Aufgrund der höchsten Belastbarkeit ist das Einsatzhärten bei der Wärmebehandlung großer Getriebeteile erste Wahl. Härtebarkeit, Gewicht, Maß- und Formänderungen sind die wesentlichen Faktoren, die optimiert werden müssen, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Werden diese Faktoren harmonisiert, können die bisherigen technischen Grenzen überschritten werden, was den Getriebeherstellern ganz neue Möglichkeiten eröffnet.

In diesem Beitrag geht es speziell um das Problem, den Härteverzug bei großen Getriebeteilen unter Kontrolle zu bringen. Härteverzug hat bisher viele Getriebehersteller von der Fertigung einsatzgehärteter großer Zahnräder abgehalten.

Die Härterei Reese in Bochum hat mit der derzeit größten Schutzgashärteanlage die Möglichkeit, große Zahnräder bis zu einem Durchmesser von 5.000 mm und 50 t Gewicht vertikal aufzukohlen und in einem Härteölbad mit einem Volumen von 320.000 Litern und einer Kühlkapazität von 8.900 kW/h zu härten. Diese Anlage ist derzeit weltweit einzigartig und ermöglicht eine bisher nicht erreichbare Härtequalität bei Großzahnradern.

Danksagung

Ich danke an dieser Stelle meinen Mitarbeitern, Lieferanten und allen, die am Gelingen des Projekts und an diesem Beitrag mitgewirkt haben. Namentlich nennen möchte ich an dieser Stelle unseren ehemaligen Betriebs- und Technologieleiter der Schutzgasabteilung, Klaus Hölken, unseren jetzigen Leiter der Schutzgasabteilung und QM-Leiter Zaim Alili. Bill Andreski jun. danke ich für die Mitarbeit an diesem Beitrag, den ich als Vortrag in einer vorausgegangenen englischen Fassung bereits auf dem Herbsttreffen der AGMA 2013 in Indianapolis und in Deutsch auf dem GETPRO-Kongress zur Getriebeproduktion der FVA am 25./26. März 2015 in Würzburg gehalten habe.