

Wärmebehandlung von Mikro bis Makro

Günter Liebmann

Werkstoff-Wärmebehandlungsverfahren werden zum Härten der Oberflächen von vielen metallischen Maschinenelementen eingesetzt; sowohl bei Kleinteilen von wenigen Gramm als auch bei Werkstücken von mehreren Tonnen. Ein Beispiel für hochbeanspruchte Teile sind Zahnräder, deren Oberflächen unter anderem durch Nitrieren oder durch Einsatzhärten veredelt werden.

Die Härtereien Reese bieten eine breite Verfahrenspalette zum Stoffeigenschaftändern von metallischen Werkstoffen an, die auf die Werkstückgröße bezogen von Mikro bis Makro reicht und sowohl die Behandlung von Eisenwerkstoffen als auch von Cu-, Al- und Sonderwerkstoffen umfaßt. Kleinteile mit Stückgewichten von wenigen Gramm bis hin zu Getriebeteilen mit Stückgewichten bis zu 16 t gehören zum Teilesortiment, das nach den unterschiedlichsten Verfahren thermisch oder chemisch-thermisch behandelt wird.

Breiten Raum nimmt u. a. die Wärmebehandlung von Getriebeelementen ein. Hierzu zählen Zahnräder in den verschiedensten Ausführungsformen. Sie gehören im allgemeinen Maschinenbau und in der Automobilindustrie zu den wohl anspruchsvollsten mechanischen Bauelementen. Neben der Biegebelastung im Zahnfußbereich und der Verschleiß- und Freßbeanspruchung ist vor allem die Gleitwälzbeanspruchung der Zahnflanken für die Anforderungen bestimmend, die an den Werkstoff und die Prozeßstufe Wärmebehandlung gestellt werden. Dabei geht es letztlich um eine Minimierung der Randschichtermüdung im Wälzkontakt, d. h., Optimierung der Grübchendauerfestigkeit als Grenzwert der dauernd ertragbaren Flankenpressung.

Bild 1 zeigt nach DIN 39 90 Grübchendauerfestigkeitsbereiche verschiedener Werkstoff-Wärmebehandlungsvarianten in Abhängigkeit von der Oberflächenhärte auf der Zahnflanke. Hieraus kann entnommen werden, daß mit nitrierten und einsatzgehärteten Zahnrädern die höchsten Grübchendauerfestigkeiten zu erreichen sind. In Verbindung mit dem Einsatz entsprechender Stähle können auch alle anderen genannten Beanspruchungsfälle optimiert werden. Hauptgrund dafür dürfte der Verbundcharakter sein, der für beide Verfahren durch Erzeugen einer harten Randschicht bei Aufrechterhaltung eines zähen Kerngefüges charakteristisch ist.

Mehrzweckkammerofenreihe in der Härtereireese, Weimar

Nitrieren

Zahnräder können im Gasstrom, im Salzbad und im Plasma nitriert werden. Bei allen drei Verfahren handelt es sich um Diffusionsverfahren, bei denen atomarer Stickstoff in den Stahl eindringt und mit dem Eisen und den Legierungselementen Nitride bildet. Die Art der entstehenden Nitride sowie die Nitrierhärte tiefe werden vom Legierungstyp des eingesetzten Werkstoffes und von der Art der Nitrierbehandlung bestimmt. Für das Nitrieren von Zahnrädern ist die Behandlung im Ammoniakgasstrom am weitesten verbreitet. Aber auch das Plasmanitrieren und das Nitrieren im Salzbad (TENIFER-Verfahren) finden großtechnische Anwendung.

Als Werkstoffe kommen für das Nitrieren vorzugsweise legierte Vergütungsstähle nach DIN 17 200 und legierte Einsatzstähle nach DIN 17 210 in Frage. Die einzelnen Legierungselemente dieser komplex-legierten Stähle üben auf die Nitrierhärte tiefe und die Oberflächenhärte in nachstehend aufgeführter Reihenfolge folgenden Einfluß aus:

- steigende C-, Si-, V-, Cr- und W-Gehalte erniedrigen die Nht
- steigende Ni-, Mn-, Mo-Gehalte erhöhen die Nht
- Al, Mo, V, Cr, W und Ti erhöhen die Härte
- Mn, Ni, und Si erniedrigen die Härte

Bild 2 zeigt den gesamten Ablauf einer Fertigung gaszunitrierender Bauteile. Ausgehend von der Werkstoffauswahl ist es zur Sicherung der gewünschten Zähigkeit des Matrixgefüges und einer optimalen Ausbildung der Nitrierschicht erforderlich, den ausgewählten Werkstoff als Halbzeug im vergüteten Zustand zu beziehen oder nach dem Zuschnitt eine Vergütung durchzuführen.

In Bild 3 ist die erreichbare Nitrierhärte tiefe für einige ausgewählte Stähle in Abhängigkeit von der Nitrierdauer zusammengestellt.

Das Gasnitrieren von Zahnrädern hat sich bisher dort bewährt, wo auf das kostenintensive Flankenschleifen der Zahnräder oder Getriebeteile verzichtet werden kann. Für die Fertigung nitrierter Zahnräder kommen aus der genannten Werkstoffpa-



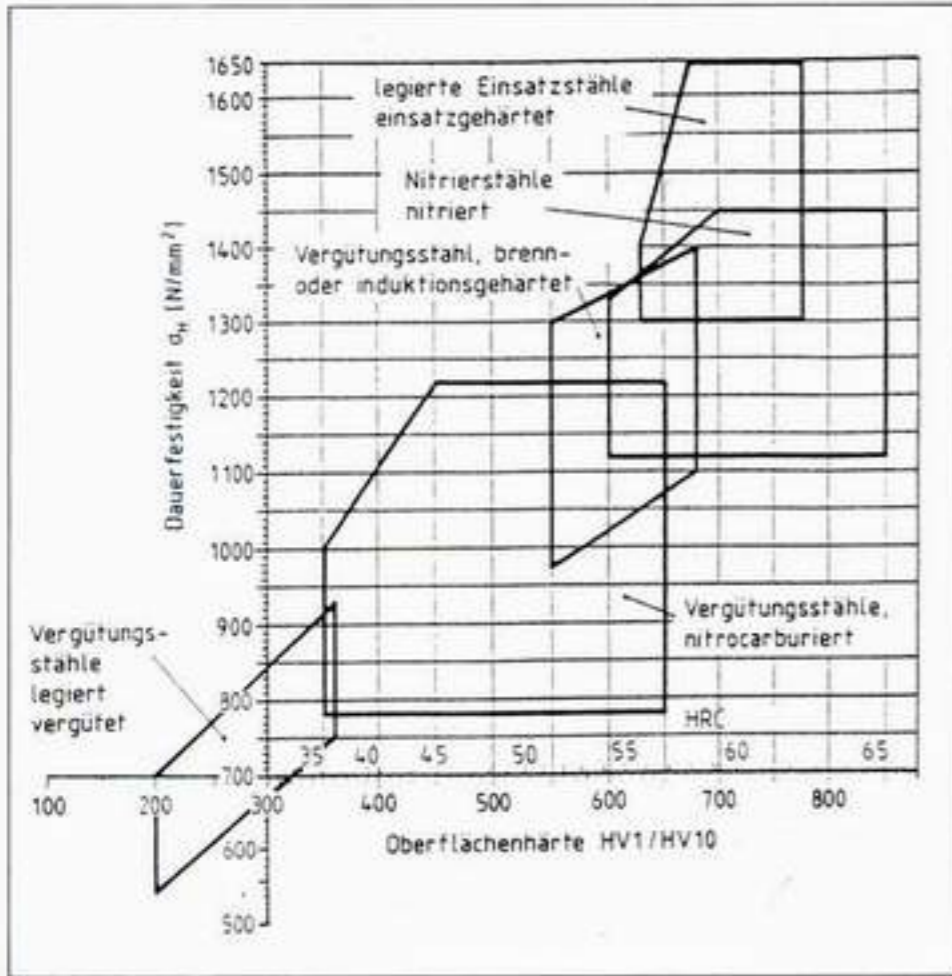


Bild 1: Grubchendauerfestigkeit verschiedener Werkstoff-/Wärmebehandlungsvariationen nach DIN 39 90

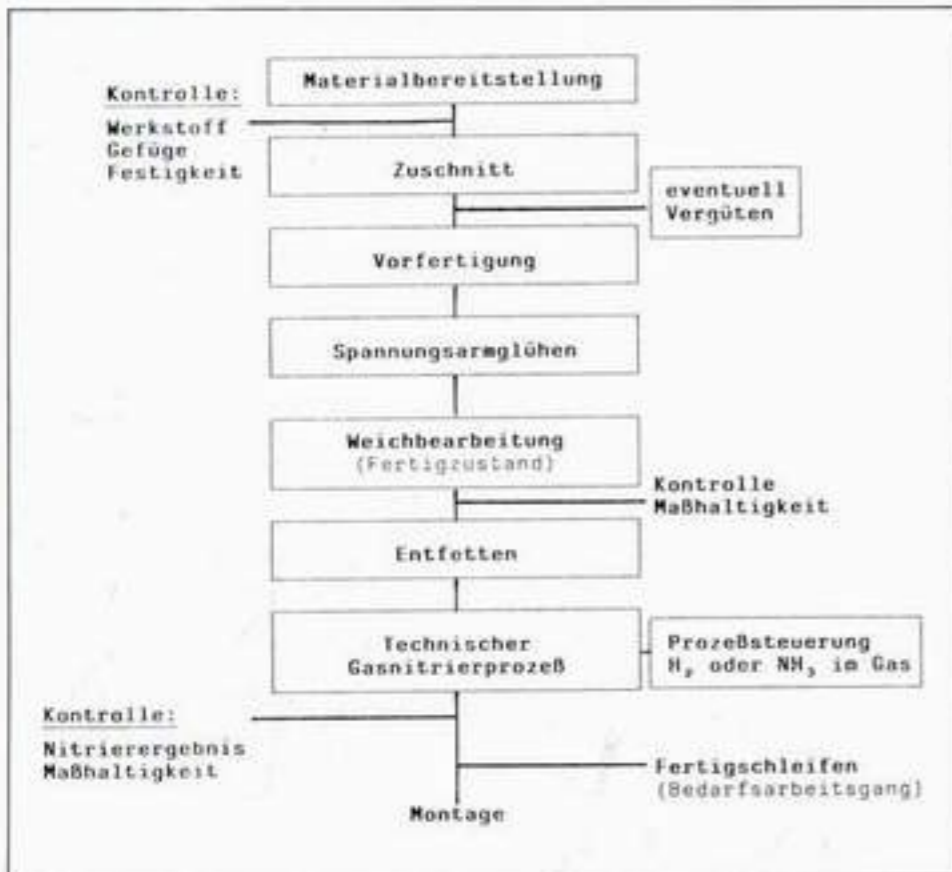


Bild 2: Technologischer Fertigungsablauf für nitrierte Bauteile

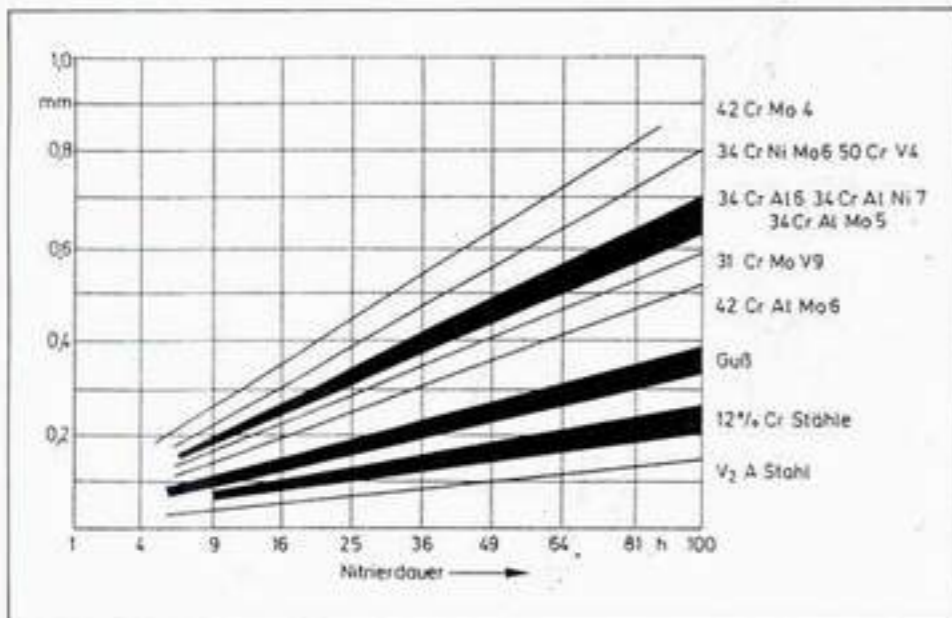


Bild 3: Nitrierhärte tiefe nach dem Gasnitrieren für ausgewählte Werkstoffe (nach Eysell)

lette in der industriellen Praxis hauptsächlich die Werkstoffe 16 MnCr 5, 42 CrMo 4, 30 CrMoV 9 und 14 CrMoV 6 9 zur Anwendung. In der Reihenfolge dieser Aufzählung steigt auch die Flankentragfähigkeit. Bild 4 zeigt für die Werkstoffmarke 30 CrMoV 9 erreichbare Dauerfestigkeiten durch konventionelles Gasnitrieren mit unterschiedlichen Technologien im Vergleich mit einsatzgehärteten Proben aus 20 MoCr 5. Die Ergebnisse resultieren aus Wälzverschleißversuchen (Punktberührung) an Rollen und zeigen, daß die nitrierten Bauteile im günstigsten Fall den einsatzgehärteten gleichwertig sind [1].

Aus anderen Untersuchungen ist bekannt, daß mit nitrierten Stirnrädern mit Oberflächenhärten von 700 bis 850 HV 3 und Kernhärten > 200 HV 10 Zahnflankendauerfestigkeiten von min. 1250 MPa erreicht wurden. Das sind Werte, die sich durchaus mit solchen einsatzgehärteter Stirnräder vergleichen lassen. Beste Ergebnisse wurden mit vergüteten Zahnrädern aus dem Werkstoff 14 CrMoV 6 9, auf eine Nht von 0,8 mm gasnitriert, erreicht [2]. Für Zeichnungsangaben gelten für das Nitrieren von Zahnrädern die Richtwerte in Tabelle 1. Die Nitrierhärte tiefe sollte dabei so ausgewählt werden, daß das unter Belastung auftretende Schubspannungsmaximum jeweils innerhalb der Nitrierschicht liegt und damit ein Abschieben dieser Schicht unter Belastung verhindert wird.

Modul	Nitrierdauer (h)	Nitrierhärte tiefe (mm)
bis 1.5	12 bis 16	0,10 bis 0,15
>1.5 bis 3.0	24 bis 36	0,20 bis 0,30
>3.0	72 bis 96	0,50 bis 0,80

Tabelle 1: Richtwerte für das Nitrieren von Zahnrädern

Einsatzhärten

Nach wie vor ist das Einsatzhärten im Getriebebau das dominierende Verfahren zum Stoffeigenschaftändern in der Randschicht. Es hat heute einen Stand erreicht, der berechtigt, es als wohl das am sichersten beherrschbare chemisch-thermische Oberflächenhärteverfahren in der Wärmebehandlungstechnik einzustufen. Auch im Großgetriebebau wird es als das Wärmebehandlungsverfahren angesehen, das zu einer sicheren Steigerung der Tragfähigkeit von Zahnrädern führt. Dabei spielt der „Verbundcharakter“ zwischen harter Randschicht und zäher Matrix eine entscheidende Rolle. Durch Druckeigenspannungen, die auch in der Oberfläche einsatzgehärteter Bauteile entstehen, werden wesentliche Steigerungen der Biegezugfestigkeit und der Dauerfestigkeit erreicht.

Aufgrund ausgefeilter anlagentechni-

scher Entwicklungen haben Aufkohlungsverfahren in der Gasatmosphäre generell in den Wärmebehandlungsbetrieben Einzug gehalten. Dabei hat nach wie vor das „klassische“ Trägergasverfahren das Primat. Zunehmend geschieht aber auch die Direktbegasung, mit der direkten Umsetzung der Gasatmosphäre im Reaktionsraum der Ofenanlagen selbst. Typische Vertreter sind das Aufkohlen in Erdgas-Luft-, Erdgas-Stickstoff- oder Methanol-Stickstoff-Gemischen. In den Härtereien Reese kommen sowohl das klassische Trägergasverfahren als auch die Direktbegasung zur Anwendung. Eine kostengünstige Aufkohlung wird in der Härterei Reese Weimar GmbH & Co. KG durch Einspritzen von Methanol und Äthylacetat in den Reaktionsraum erzielt.

Kleinere Bauteile werden in der Regel in Mehrzweckkammeröfen einsatzgehärtet. Sie sind oftmals in einer Wärmebehandlungslinie angeordnet, in die Chargier- und Entnahmeplätze, Anlaßöfen und Waschmaschine integriert sind. Der gesamte Prozeßablauf kann damit weitgehend automatisiert werden. Für größere Bauteile und große Durchsatzmengen ist der Einsatz von Schachtofen- oder Durchstoß-Gasaufkohlungsanlagen sinnvoll. Letzteres Anlagenkonzept wird als ein- oder zweibahnige Ausführung angeboten. Generell wird bei allen Verfahrensrealisierungen mit zweistufiger Aufkohlung gearbeitet.

Die richtige Werkstoffauswahl ist auch bei der Einsatzhärtung eine der Hauptvoraussetzungen zur Sicherung der funktionsbedingten Eigenschaften der Getriebeelemente. Maßgebende Kenngrößen sind die geforderten Zahnflanken-, Zahnfußdauer- und Kernfestigkeiten der zu fertigenden Zahnräder. Aus den zu realisierenden Werten ergeben sich unter Berücksichtigung der kennzeichnenden Abmessungen der Zahnräder die zu fordernden konstruktiven und wärmebehandlungstechnologischen Kenngrößen Oberflächenhärte, Einsatzhärte tiefe und Kernfestigkeit als Grundlage für die Werkstoffauswahl. Als Werkstoffe kommen Einsatzstähle nach DIN 17 210 in Frage, wobei für Zahnräder nahezu ausschließlich legierte Stahlmarken eingesetzt werden. Ausgewählte Stahlmarken sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Bei der Auswahl der Stähle sollten Qualitäten mit eingengtem Streuband (HH) bevorzugt werden, die hinsichtlich der chemischen Analyse, der Erschmelzungsart (ESU, HV, CAB), der Korngröße und der erreichbaren Kernhärte Vorteile haben. Für die Stahlmarke 17 CrNiMo 6 ist als Beispiel der Stirnabschreckhärteverlauf mit und ohne eingengtem Streuband aus Bild 5 zu entnehmen. Die untere Streubandgrenze wird durch die HH-Qualität deutlich angehoben. Damit ergibt sich eine verbesserte Kernhärte bei gleichzeitiger Steige-

rung der Ein- und Randhärte, ausgedrückt durch die Einsatzhärte und die Oberflächenhärte.

Das Einsatzhärten selbst besteht aus den drei bekannten Teilprozessen:

- Aufkohlen der Randschicht auf eine bestimmte Aufkohlungstiefe und einem festgelegten Randkohlenstoffgehalt,
- Härten der Kern- und Randzone (mit Martensitbildung in der Randzone),
- Anlassen zur Einstellung der Gebrauchshärte in der Randschicht.

Die wichtigsten Kenngrößen einsatzgehärteter Teile sind im Bild 6 zusammengefaßt. Für Zahnräder sollte ein Randkohlenstoffgehalt von 0,8% angestrebt werden. Die Einsatzhärte ist in Abhängigkeit vom Modul und der Nachbearbeitung der Zahnflanken (nicht zu schleifende oder zu schleifende Flanken) festzulegen. Einsatzhärte von 0,3 mm bei Modul 1,5 bis zu 2,4 mm und tiefer bei Modul 28 sind wärmebehandlungstechnisch realisierbar. Bei ihrer Festlegung muß zwischen höchstmöglicher Flankentragfähigkeit (große ESHT) und dem noch ertragbaren negativen Einfluß zu großer Einsatzhärte auf die Zahnfußfestigkeit abgewogen werden. Die Randschichttiefe sollte nach der Anlaßbehandlung zwischen 58 und 62 HRC liegen.

Bei Großtriebeteilen muß das querschnittsbedingte Umwandlungsverhalten in der Randschicht beachtet werden. Die Zähne kühlen beim Abschrecken am Zahnkopf und auf den Zahnflanken wesentlich schneller ab als im Zahngrundbereich, so daß dort in der Regel ein Randhärte- und Einsatzhärteabfall auftritt.

Der Härteabfall setzt meistens erst unterhalb des Teilkreises ein und ist am Werkstück nur schwer nachzuprüfen. Hier bewegt man sich in einem Grenzbereich und eine exakte Abstimmung aller an der Lösung Beteiligten sollte unbedingt erfolgen. Fehleinschätzungen können hier teuer werden. Mit dem in der DIN 50 190 für den Regelfall festgelegten Grenzhärte von 550 HV 1 für die ESHT kann in solchen Fällen nicht mehr gearbeitet werden [3].

Über den Randkohlenstoffgehalt wird direkt die Flankentragfähigkeit und indirekt über den Restaustenitanteil die Zahnfußtragfähigkeit beeinflusst. Die Flankentragfähigkeit verbessert sich mit steigendem Randkohlenstoffgehalt. Leider kann dieser Effekt nicht voll ausgenutzt werden, da mit steigendem C-Gehalt im Härtegefüge der Restaustenitgehalt wächst und bei einem Anteil > 25% sich bereits nachteilig auf die Zahnfußtragfähigkeit auswirkt. Parallel zum Restaustenitgehalt steigt mit Erhöhung des Randkohlenstoffgehaltes auch der Karbidanteil im Randgefüge an. Hierdurch kann zusätzlich die Zahnfußfestigkeit negativ beeinflusst werden.

Werkstoff	Wst.-Nr.	Kernfestigkeit je nach „s“ in N/mm ²	Kurzcharakteristik
16 MnCr 5	1.7131	800 bis 1100	CrMn-leg. Einsatzstahl für Ritzelwellen bis ca. 100 kg; Zahnräder bis ca. 500 kg. Bei größeren Getriebeteilen ist mit einer Verringerung der ESHT und der Randhärte im Zahngrundbereich zu rechnen.
20 MnCr 5	1.7147	1000 bis 1300	CrMn-leg. Einsatzstahl für Ritzel, Zahnräder und andere Getriebeteile. Leicht verbesserte Härte gegenüber 16 MnCr 5.
15 CrNi 6	1.5919	900 bis 1200	CrNi-leg. Einsatzstahl für stark beanspruchte Bauteile höherer Zähigkeit und größeren Stückgewichten, wie Kegelräder, Ritzelwellen und Zahnräder höherer Beanspruchung.
14 NiCr 18	1.5860	1200 bis 1500	NiCr-leg. Einsatzstahl für hoch beanspruchte Bauteile hoher Zähigkeit; Stückgewichte > 1 t für Schiffs- und Walzwerkgetriebe; auch bei Stückmassen bis 5 t werden am Zahnfuß noch ausreichende Randhärteerwerte erzielt.
18 CrNi 8	1.5920	1200 bis 1400	wie 1.5860
17 CrNiMo 6	1.6587	1050 bis 1350	CrNiMo-leg. Einsatzstahl für schwere Getriebeteile mit höchsten Anforderungen an die Zähigkeitseigenschaften. Heute im Getriebebau der meist verwendete Stahl; selbst bei Stückgewichten > 5 t im Zahnfußbereich ausreichende Härteerwerte; preisgünstiger als 1.5860.

Tabelle 2: Ausgewählte Stahlmarken für einsatzgehärtete Zahnräder

In der Praxis bleibt damit die Gefügeoptimierung immer ein Kompromiß zwischen Verbesserung der Flanken- oder Zahnfußtragfähigkeit. Aus Sicherheitsgründen tendiert man in Richtung optimaler Flankentragfähigkeit, da die Zahnfußfestigkeit weniger stark durch die Gefügeausbildung beeinflusst wird als umgekehrt. Restaustenitgehalte von 25 bis 30% im Randgefüge sind durchaus vertretbar.

Unerwünscht ist eine Randoxidation, die durch Restsauerstoff im Aufkohlungsmedium hervorgerufen wird. Ihre Tiefe sollte 0,02 mm nicht überschreiten. Sie bewirkt einen Verlust an Dauerfestigkeit und fördert ganz besonders die Grübchenbildung auf den Zahnflanken.

Negativ wird die Zahnflankentragfähigkeit auch durch Oberflächenrisse beeinflusst, die sowohl als Folge einer falschen Wärmebehandlung aber auch durch unsachgemäßes Schleifen auftreten können. Schleifbrand auf den Zahnflanken ist unzulässig. Schleifschäden können durch die

Wärmebehandlung präformiert werden. So fördern unzureichendes Anlassen, hohe Restaustenitgehalte und unzulässige Karbidausbildung die Schleifrißempfindlichkeit.

Schlußbemerkung

Abschließend soll noch kurz die Problematik der Maß- und Formänderung angeschnitten werden. Wenn man sich über mögliche Maß- und Formänderungen in Verbindung mit der Wärmebehandlung bewußt ist, kann hier einiges durch eine ausgefeilte Fertigungsplanung in den Griff bekommen werden. Dabei gilt es die Systematik der Maß- und Formänderungen exakt zu erfassen. Das kann nicht allein den Wärmebehandlern überlassen werden, sondern muß eine Teamarbeit von Entwicklung, Fertigung und Wärmebehandlung sein, die bei der Werkstoffauswahl beginnt und über die optimale Bauteilgestaltung

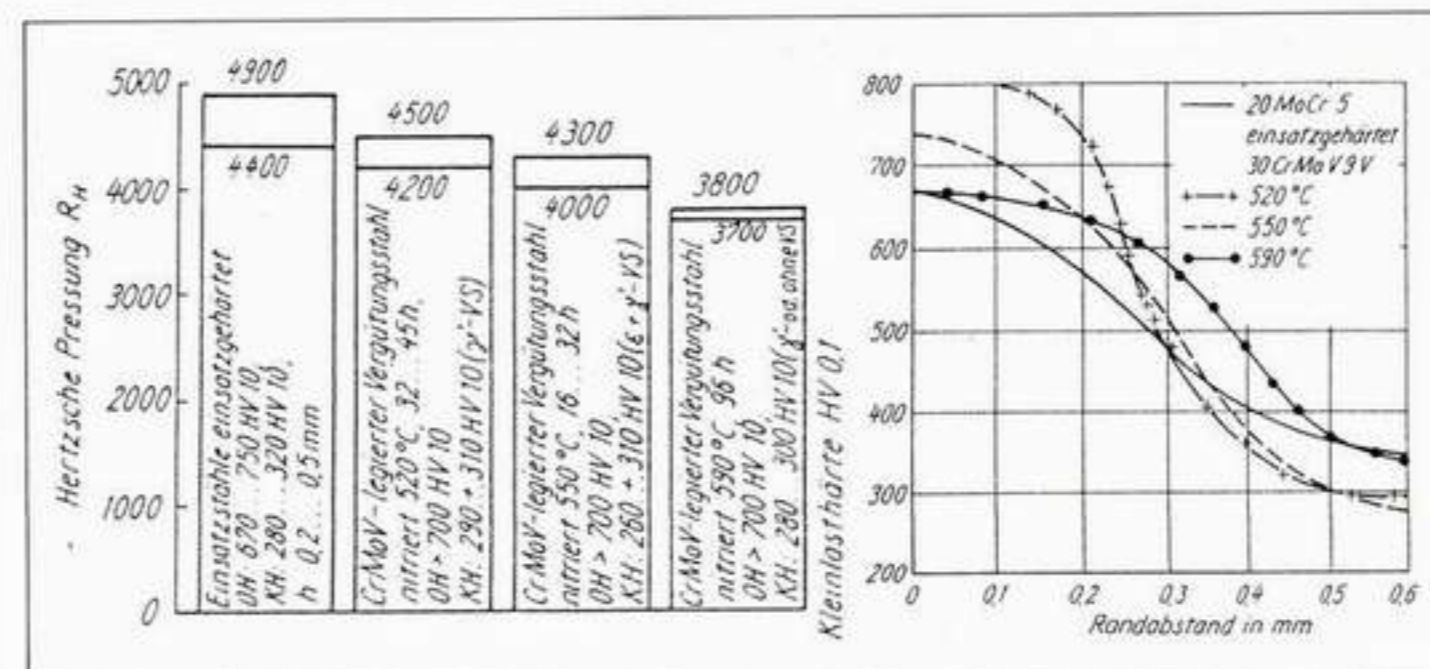


Bild 4: Beispiel für die Erhöhung der Flankendauerfestigkeit von Zahnrädern aus 30 CrMoV 9 durch verschiedene Gasnitriervarianten und Vergleich mit Werten einsatzgehärteter Proben aus 20 MoCr 2 [1].

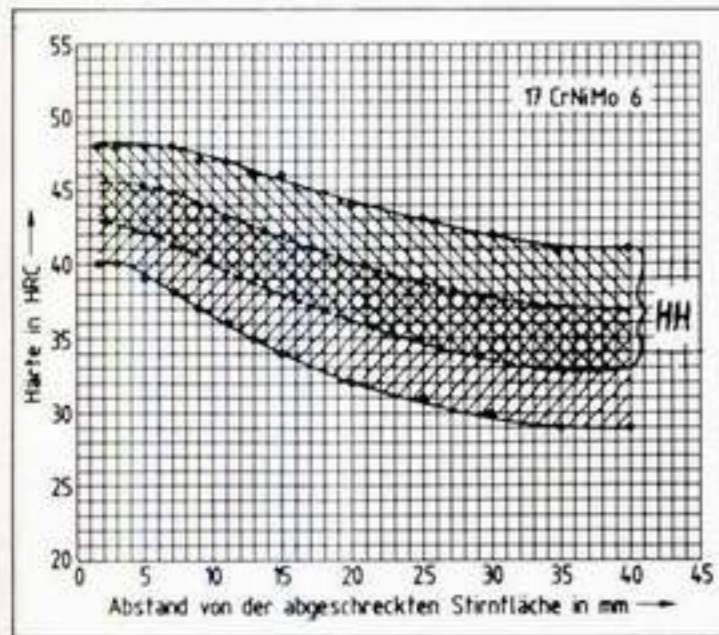


Bild 5: Härteband des Stahles 17CrNiMo 6 nach DIN 17 210

und Teilefertigung bis zur Wärmebehandlung reicht.

Umwandlungsbedingte Maßänderungen durch Einsatzhärten ringförmiger Körper (ESHT 1 bis 1,5 mm; Oberflächenhärte 56 bis 63 HRC) liegen nach Untersuchungen im Firmenverbund Reese für Außendurchmesser bei $-0,03$ bis $+0,23\%$, für Innendurchmesser bei $-0,09$ bis $+0,28\%$ und für die Breite (Dicke) bei $-0,01$ bis $+0,16\%$. Die angegebene Bandbreite ist werkstoff-, prozeß- und bauteilbedingt und wird primär von der Härtebestimmbarkeit bestimmt.

Wenn es die geforderten Festigkeiten erlauben, sollten zur Minimierung des Wachstums und Reduzierung des Verzugs Schmelzen eingesetzt werden, deren C-Gehalte im unteren Grenzbereich des für die Stahlmarke zulässigen Analysenstreubandes liegen.

In diesem Zusammenhang muß auf Wärmebehandlungsschritte zwischen der Vor-

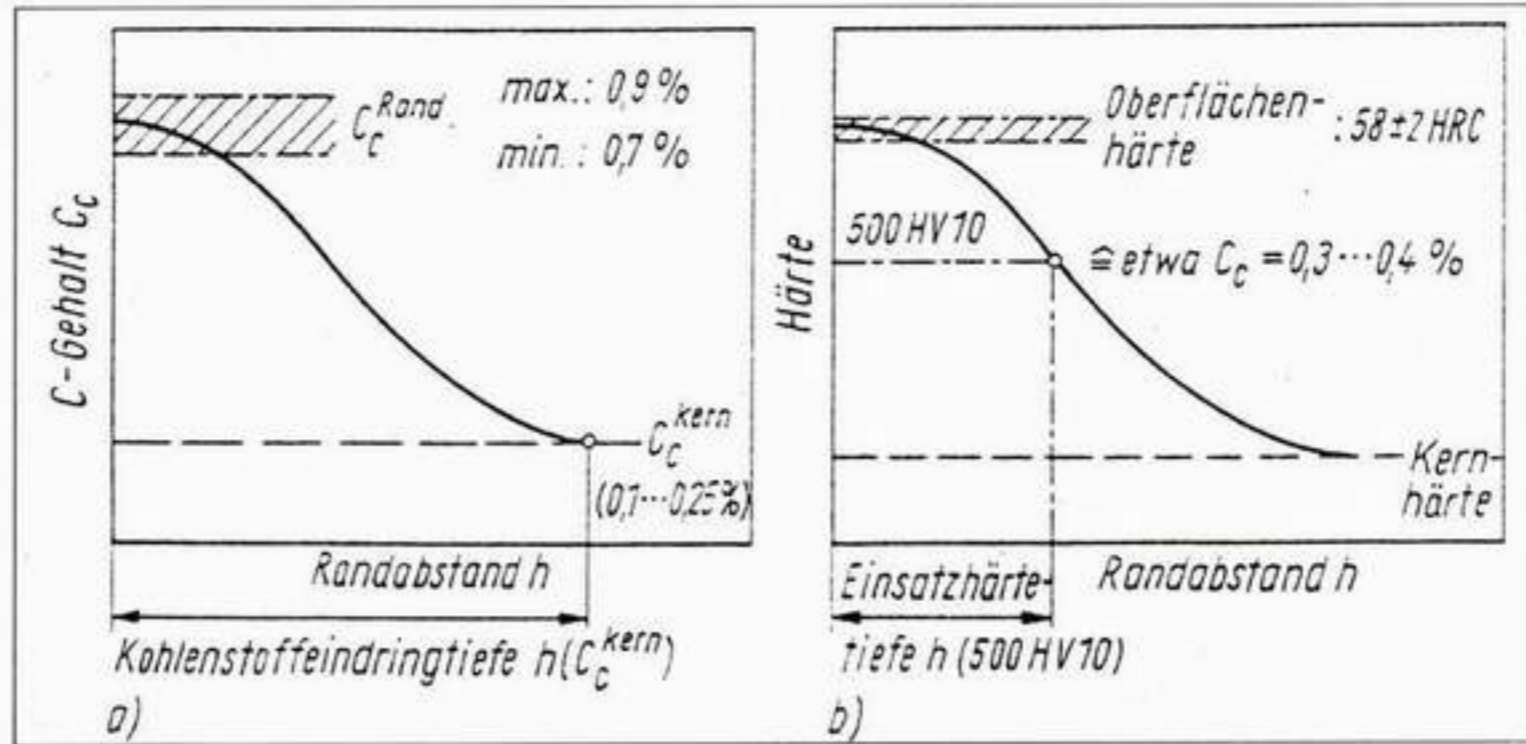


Bild 6: Wichtige Kenngrößen einsatzzuhärtender Bauteile: a) für nur aufgekohlte Teile, b) für einsatzgehärtete Teile

und Zwischenfertigung hingewiesen werden. In der Regel erfolgt ein Spannungsarmglühen. Um das Maßänderungsverhalten noch besser zu beherrschen hat sich eine Sonderbehandlung zur querschnittsoptimierten Neuorientierung des Gefüges bewährt. Dazu wird nach der Grobzerspannung mit bereits vorgearbeiteter Verzahnung eine Blindhärtung mit anschließendem Anlassen auf eine möglichst hohe Festigkeit durchgeführt. Werden solche Zahnräder vor und nach dieser Behandlung meßtechnisch ausgewertet, erhält der Kunde Orientierungswerte für die bei der nachfolgenden Einsatzhärtung auftretende Maßänderungstendenz und kann diese gezielt für eine Vorkorrektur bei der Zwischenbearbeitung verwenden.

Bei sorgfältiger Fertigung lassen sich so qualitätsgerechte einsatzgehärtete Zahnrä-

der herstellen, deren Zahnfußdauerfestigkeit je nach kennzeichnender Abmessung und Werkstoff zwischen 320 und 530 N/mm² und Grübchenfestigkeit zwischen 1300 und 1650 N/mm² liegen.

Literaturhinweise

- [1] Eckstein, H.-J.: Technologie der Wärmebehandlung; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1987
- [2] Huber-Gommann, U.: Nitrieren im Ammoniakgasstrom; ZWF H. 9/1980, S. 407-410
- [3] Reese, G.: unveröffentlichter Versuchsbericht der Härterei Bochum
- [4] Liebmann, G.: Einige Gedanken zur Problematik „Restaustenit“ in gehärteten Werkzeug- und Einsatzstählen; Wiss. Beiträge der TH Wismar, Heft 6/81

Dr.-Ing. G. Liebmann, Härterei Reese Weimar GmbH & Co KG, Weimar

HÄRTEREIEIEN REESE

1. Einsatzhärten: durch Gasaufkohlung und Carbonitrieren von Maschinenteilen aus legierten und unlegierten Stählen, bis zu $\varnothing 2500$ und 4000 mm Länge, wie Zahnrädern, Wälzlageringern, Scheiben, Wellen, Ritzelwellen, Gleitschienen und anderen Maschinenteilen.

2. Randschichthärtung (Flamm- bzw. Induktionshärtung) von:

a) Zahnrädern, Bandagen, Ringen und Rollen bis über $\varnothing 6500$ mm und Achsen, Ritzelwellen, Rollen, Walzen, Zahnstangen und Gleitschienen u. a. Teilen aus legierten und unlegierten Stählen bis zu 10000 mm Länge und einem Stückgewicht von ca. 16000 kg.

b) Umlaufhärten

3. Nitrieren:

a) Gasnitrieren (maximale Ofengröße $\varnothing 2000$ mm x 4000 mm) von: Maschinen- und Getriebeteilen mit gleitender Beanspruchung.

b) Salzbad-Nitrieren: Tiegelgrößen $\varnothing 500$ x 800 mm und $\varnothing 800$ x 1800 mm.

c) Plasmanitrieren $\varnothing 700$ x 1600 mm

4. Härten und Vergüten von: Werkzeugen für Warm- und Kaltarbeit, hochbeanspruchten Austauschteilen, Schmiedestücken und Gußteilen unter Schutzgas oder Vakuum.

5. Vakuumhärten

6. Borieren: unter Pulver und mit Paste unter Inertgas.

7. Sämtliche Glühbehandlungen wie: Diffusionsglühen, Normalglühen, BF-/BG-glühen, Weichglühen, Spannungsarmglühen, Rekristallationsglühen, Lösungsglühen unter Schutzgas.

8. Reinigungsstrahlen

9. Richten

10. Werkstoffberatung, metallographische Untersuchungen und Gutachten

Größere Maße und Gewichte sowie Sonderbehandlungen auf Anfrage

Härterei Bochum

Dr.-Ing. Helmut Reese GmbH
Oberscheidstraße 25
44807 Bochum-Riemke
Tel. (02 34) 5 47 00-0
FAX (02 34) 5 47 00-96

Härterei Reese

Brackenheim GmbH & Cop. KG
Gaswerkstraße 17
74336 Brackenheim
Tel. (0 71 35) 50 27/28
FAX (0 71 35) 1 28 00

Härterei Reese

Chemnitz GmbH & Co. KG
Otto-Schmerbach-Straße 19
09117 Chemnitz
Tel. (03 71) 86 34 65 und 86 35 04
FAX (03 71) 86 35 05

Härterei Reese

Weimar GmbH & Co. KG
Kromsdorfer Straße
99427 Weimar
Tel. (0 36 43) 71 33 16 und 71 25 90
FAX (0 36 43) 71 32 87