

Was ich schon immer wissen wollte ...

#3

Wärmebehandlung/Härten von Stählen/Metallen

-

Vergüten

Einsatzhärten

Aufkohlen

Nitrieren

Borieren

Kolsterieren

Bainitisieren

Induktivhärten

Flammhärten

Laserstrahlhärten

Elektronenstrahlhärten



mem

meier eMOTION

Bächlegatterweg 13
Postfach 207
FL-9495 Triesen
Liechtenstein
+41 79 742 75 46
alex@meier-emotion.li
www.meier-emotion.com
www.MEM3.li

Einleitung — Härten von Stählen und Metallen

Was bedeutet „Härten“?

Unter **Härten** versteht man wärme- oder thermochemische Behandlungsverfahren, bei denen durch **gezielte Gefügeänderungen** die **Härte und Festigkeit** eines metallischen Werkstoffs — insbesondere von **Stählen** — erhöht werden.

Beim klassischen Stahlhärten erfolgt dies durch **Austenitisieren** und **anschließendes schnelles Abkühlen**, wodurch ein **martensitisches Gefüge** entsteht.

Welche Ziele werden mit dem Härten verfolgt?

- Erhöhung von **Härte und Festigkeit**
 - Verbesserung der **Verschleiß- und Kontaktfestigkeit**
 - Erhöhung der **Dauer- und Ermüdungsfestigkeit**
 - Gezielte Anpassung von **Rand- und Kerneigenschaften**
 - Funktionale Optimierung mechanisch beanspruchter Bauteile
-

Vorteile und Nachteile des Härtens

Vorteile

- Deutlich höhere Härte und Festigkeit
- Verbesserte Verschleißbeständigkeit
- Anpassbare Eigenschaften (lokal oder volumig)
- Grundlage für leistungsfähige Maschinenelemente

Nachteile

- Erhöhte **Sprödigkeit** (insb. unangelassen)
 - Entstehung von **Eigenspannungen**
 - Risiko von **Verzug und Rissbildung**
 - Zusätzlicher Prozess- und Kostenaufwand
-

Gefügeveränderungen beim Härten

Beim Härten von Stahl treten charakteristische **kristallographische und mechanische Veränderungen** auf:

- **Austenit** (kubisch flächenzentriert, kfz)
→ entsteht beim Erwärmen über A_{c1}/A_{c3}
- **Martensit** (kubisch raumzentriert / tetragonal verzerzt, krz/krt)
→ entsteht durch diffusionslose Umwandlung beim Abschrecken
- **Verspannungen im Kristallgitter** durch:
 - eingelagerten Kohlenstoff
 - Gitterverzerrung
- Ausbildung von **Eigenspannungen**:
 - Rand: häufig Druckspannungen
 - Kern: häufig Zugspannungen

Diese Gitterverzerrungen sind zentral für die Härtesteigerung.

Warum steigt Härte und Festigkeit messbar an?

Die Härte- und Festigkeitssteigerung beruht im Wesentlichen auf:

- Behinderung der Versetzungsbewegung
- Gitterverzerrung durch interstitiell gelösten Kohlenstoff
- Fehlordnung im Martensitgitter
- Feiner Gefügebildung (hohe Versetzungsdichte)

☞ Je stärker die Versetzungsbewegung behindert ist, desto höher sind Härte und Festigkeit.

Welche chemischen Elemente sind für das Härten verantwortlich?

Primär entscheidend:

- Kohlenstoff (C)
→ maßgeblich für Martensitbildung und erreichbare Härte

Unterstützende Legierungselemente:

- Mn, Cr, Mo, Ni → erhöhen Härtebarkeit
- V, Nb, Ti → Karbidbildung, Kornfeinung
- B (in Spuren) → stark erhöhter Härtekeitseffekt

! Ohne ausreichenden Kohlenstoffgehalt ist klassisches Härten nicht möglich.

Allgemeine Formel für die Ansprungshärte (ohne Anlassen)

Die **Ansprungshärte** beschreibt die maximale Härte des frisch gehärteten, **unangelasenen Martensits**.

Eine praxisnahe Näherung lautet:

$$HV_{\text{Martensit}} \approx 170 + 940 \cdot C$$

mit

- HV = Vickershärte
- C = Kohlenstoffgehalt in Massen-%

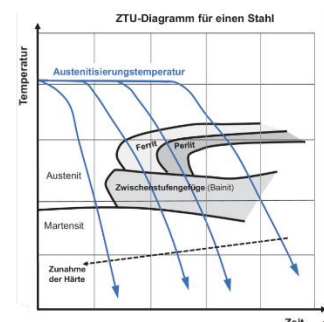
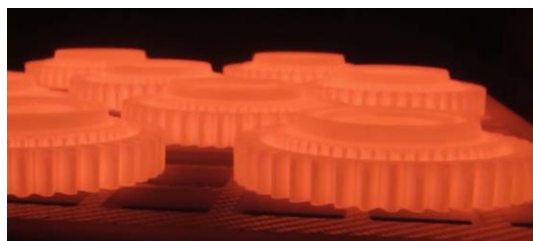
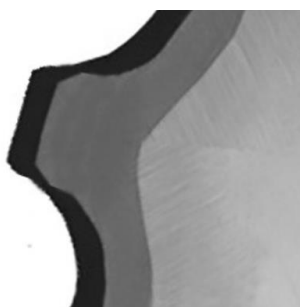
Beispiel:

$$0,45 \% C \rightarrow HV \approx 170 + 940 \cdot 0,45 \approx 593 HV$$

→ zeigt den dominanten Einfluss des Kohlenstoffgehalts auf die erreichbare Härte.

Kurz-Zusammenfassung

Härten bezeichnet wärme- oder thermochemische Verfahren zur gezielten Erhöhung von Härte und Festigkeit metallischer Werkstoffe, insbesondere von Stählen. Die Härtesteigerung beruht primär auf der martensitischen Gefügeumwandlung, ausgelöst durch schnelles Abkühlen aus dem Austenitbereich. Maßgeblich verantwortlich sind Kohlenstoff sowie härtebarkeitssteigernde Legierungselemente, die durch Gitterverzerrung und Versetzungshemmung die mechanischen Eigenschaften verbessern, jedoch auch Eigenspannungen und Sprödigkeit erzeugen.



Übersichtstabelle – Härteverfahren (inkl. Kostenbewertung)

[1 = preiswert ... 5 = sehr kostenintensiv]

Verfahren	Wirkprinzip	Gehärteter Bereich	Typische Härte	Schicht-/Einhärtetiefe	Abschrecken	Verzug	Dauerhaltbarkeit	Kosten	Typische Anwendungen
Vergüten	Martensit + hohes Anlassen	Gesamtquerschnitt	28–45 HRC	durchgehend	Öl / Wasser	3	1–2	1–2	Wellen, Bolzen, Strukturbauteile
Einsatzhärten	Aufkohlen + Härten + Anlassen	Rand + zäher Kern	58–64 HRC (Rand)	0,3–2,5 mm	Öl / Gas	4	1	3–4	Zahnräder, Nocken
Aufkohlen	C-Diffusion (Vorstufe)	Rand (chemisch)	–	0,3–3,0 mm	–	2	2	2–3	Vorprozess Einsatzhärten
Nitrieren	N-Diffusion (< Ac1)	Rand	900–1200 HV	0,1–0,7 mm	nein	1	1	3	Präzisionsteile
Borieren	Boridbildung	Rand	1400–2000 HV	20–200 µm	nein	3–4	3–4	4	Extreme Verschleißfälle
Kolsterisieren	Niedertemp.-Aufkohlen (S-Phase)	Rand	900–1200 HV	10–40 µm	nein	1	1	4	Edelstahl-Bauteile
Bainitisieren	Isotherme Bainitbildung	Gesamtquerschnitt	30–55 HRC	durchgehend	ja (zweistufig)	2	1–2	2–3	Federn, dynamische Teile
Induktionshärten	Lokales Austenitisieren + Abschrecken	Rand (lokal)	50–62 HRC	0,5–5 mm	Wasser / Polymer	2	1–2	2	Wellen, Laufflächen
Flammhärten	Flammen-Austenitisieren + Abschrecken	Rand (lokal)	50–60 HRC	1–5 mm	Wasser	3	2–3	1–2	Große Bauteile
Laserhärten	Laser + Selbstabschrecken	Rand (präzise)	50–62 HRC	0,3–1,5 mm	nein	1	1	4	Präzision, Formen
Elektronenstrahlhärten	EB + Selbstabschrecken (Vakuum)	Rand (hochpräzise)	50–65 HRC	0,2–1,0 mm	nein	1	1	5	Hochpräzisionsbauteile

Vergüten

(Härten + hohes Anlassen zur Einstellung definierter Festigkeits-/Zähigkeitseigenschaften)

(1) Ziel des Härteverfahrens

- Kombination aus **hoher Festigkeit** und **guter Zähigkeit**
- Reduktion der Sprödigkeit des Martensits
- Einstellung reproduzierbarer mechanischer Kennwerte ($R_{p0,2}$, R_m , A, Kerbschlag)

(2) Geeignete Stähle

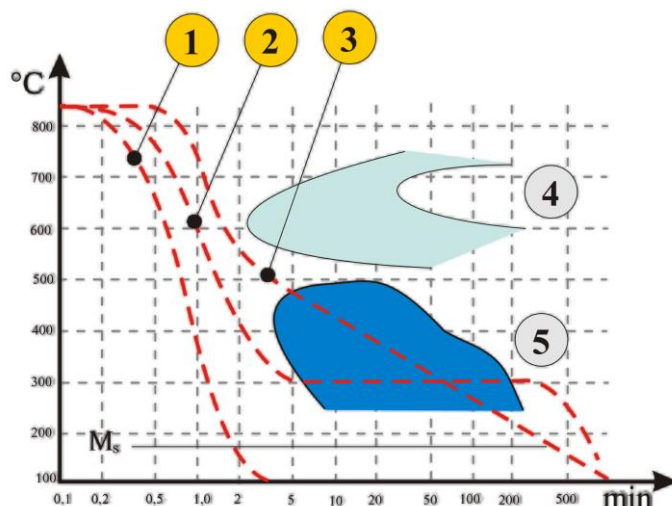
- **Vergütungsstähle** nach EN 10083:
 - Unlegiert: C35, C45, C60
 - Legiert: 42CrMo4, 34CrNiMo6, 30CrNiMo8
- Typischer C-Gehalt: **0,25–0,6 % C**
- Gute Härtebarkeit erforderlich (abhängig von Bauteildicke)

(3) Gefügeumwandlungen

- **Austenitisieren:** Ferrit/Perlit → Austenit (homogen)
- **Abschrecken:**
 - Rand & Kern → überwiegend **Martensit**
 - Bei dicken Querschnitten evtl. Bainit/Perlit im Kern
- **Anlassen:**
 - Martensit → **angelassener Martensit**
 - Karbidausscheidung, Spannungsabbau

(4) ZTU-Diagramm & Abschreckkurven

- Relevante Abschreckkurven:
 1. **Wasser** → sehr hohe Abkühlgeschwindigkeit
 2. **Öl** → Standard für Vergüten
 3. **Luft** → nur bei hochlegierten Stählen ausreichend
- Ziel: **vollständiges Umgehen der Perlit-/Bainitnase**



(5) Prozesse / Öfen / Atmosphäre

- Öfen:
 - Kammeröfen
 - Durchstoßöfen
 - Schutzgasöfen
- Atmosphären:
 - Luft (einfach)
 - Schutzgas (Endogas, Stickstoff)
 - Vakuum (hochwertige Bauteile)
- Ziel: Oxidation & Entkohlung minimieren

(6) Standard-Prozessparameter

- Austenitisieren:
 - Temperatur: $Ac3 + 30—50\text{ K}$
 - Typisch: $820—880\text{ °C}$
 - Haltezeit: $\sim 1\text{ min/mm}$ Wanddicke
- Anlassen:
 - Temperatur: $450—680\text{ °C}$
 - Haltezeit: $1—2\text{ h}$ (abhängig von Dicke)

(7) Abschreckmedium

- Öl → Standard (geringere Rissgefahr)
- Wasser → nur bei einfachen, kleinen Geometrien
- Polymer → einstellbare Abschreckintensität
- Luft → nur hochlegierte Stähle

(8) Anlassprozess

- Zwingend erforderlich
- Ziel:
 - Spannungsabbau
 - Zähigkeit ↑
 - Härte gezielt ↓
- Ort:
 - Separater Anlassofen
 - Oft unmittelbar nach dem Abschrecken
- Typische Parameter:
 - 2-stufiges Anlassen bei sicherheitsrelevanten Bauteilen

(9) Spannungszustände im Bauteil

- Nach Abschrecken:
 - Rand: **Druckspannungen**
 - Kern: **Zugspannungen**
 - Nach Anlassen:
 - Stark reduzierte Eigenspannungen
 - Homogener Spannungszustand
-

(10) Verzug (1 = sehr gering ... 5 = sehr stark)

- **Bewertung: 3**
 - Einflussgrößen:
 - Geometrie
 - Abschreckintensität
 - Symmetrie des Bauteils
-

(11) Verzunderung

- Möglich bei:
 - Luftatmosphäre
 - Langen Haltezeiten
 - Vermeidbar durch:
 - Schutzgas
 - Vakuum
 - Nachträgliches Strahlen
-

(12) Randentkohlung / Randaufkohlung

- **Randentkohlung möglich** bei Luftöfen
 - Keine Randaufkohlung (kein C-Eintrag)
 - Kritisch für:
 - Ermüdungsfestigkeit
 - Zahnflanken
 - Schutzgas/Vakuum empfohlen
-

(13) Erzielbare Eigenschaften

- **Härte (nach Anlassen):**
 - ca. 28—45 HRC
 - **Festigkeit:**
 - R_m: 800—1400 MPa
 - **Einhärtetiefe:**
 - Theoretisch **durchgehärtet**
 - Praktisch abhängig von:
 - Härbarkeit
 - Querschnitt
-

(14) Einfluss auf Dauerhaltbarkeit

(1 = optimal ... 5 = stark schädlich)

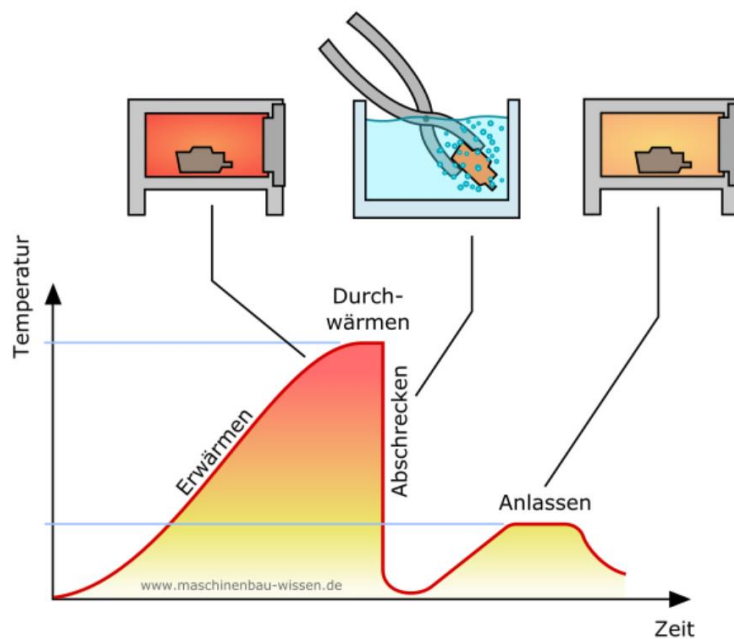
- **Bewertung: 1—2**
- Sehr günstiges Verhältnis:
 - Festigkeit ↔ Duktilität
- Geringe Spröbruchneigung bei korrekt gewählter Anlasstemperatur
- Standardverfahren für hochdynamisch belastete Bauteile

Kurzfazit:

- Durchgehende Wärmebehandlung des gesamten Querschnitts
- Ziel: definiertes Optimum aus Festigkeit und Zähigkeit
- Homogenes Gefüge: **angelassener Martensit**
- Gute Reproduzierbarkeit mechanischer Kennwerte
- **Moderater Verzug**, beherrschbar durch Prozessführung
- Keine gezielte Randschichtfunktion (Verschleißschutz begrenzt)

Typische Anwendung:

Dynamisch hochbelastete Bauteile mit überwiegender Volumenbeanspruchung
(z. B. Wellen, Bolzen, Pleuel, Strukturbauteile)



Verfahren Vergüten – Härten, Abschrecken & Anlassen

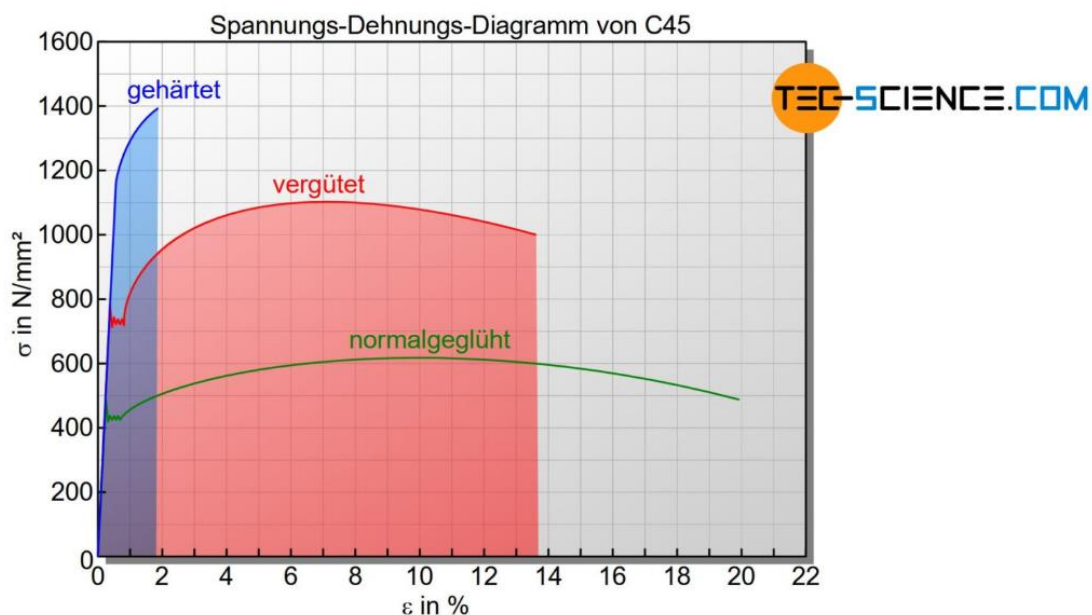


Abbildung: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von C45 im gehärteten, vergüteten und normalgeglühtem Zustand

Einsatzhärten

(Thermochemisches Aufkohlen + Härten + Anlassen → harter Rand, zäher Kern)

(1) Ziel des Härteverfahrens

- **Sehr hohe Randschichthärte** bei gleichzeitig **zähem, duktilen Kern**
- Optimierung der:
 - Verschleißfestigkeit
 - Ermüdungsfestigkeit
 - Kontaktfestigkeit (Pitting, Graufleckigkeit)
- Klassisches Verfahren für hochbelastete Maschinenelemente

(2) Geeignete Stähle

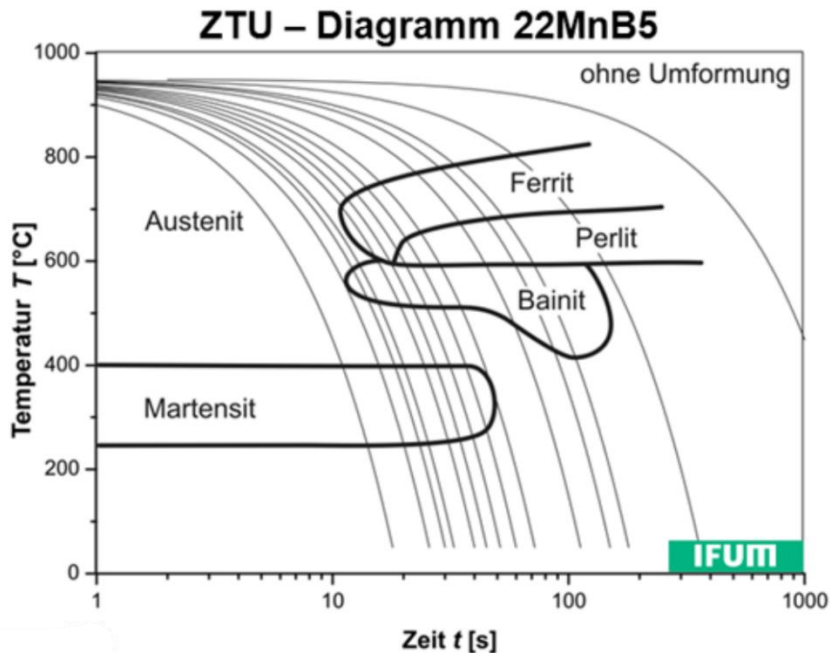
- **Einsatzstähle** nach EN 10084:
 - Unlegiert: C10, C15, C20
 - Legiert: 16MnCr5, 20MnCr5, 18CrNiMo7-6
- Niedriger C-Gehalt im Grundzustand:
 - **0,1—0,25 % C**
- Gute Aufkohlbarkeit & Härbarkeit der Randschicht erforderlich

(3) Gefügeumwandlungen

- **Aufkohlen (Randzone):**
 - C-Anreicherung auf **0,6—0,9 % C**
- **Austenitisieren:**
 - Rand & Kern vollständig austenitisch
- **Abschrecken:**
 - Rand → **hochgekohelter Martensit**
 - Kern → niedriggekohelter Martensit / Bainit
- **Anlassen:**
 - Rand → angelassener Martensit
 - Kern → hohe Zähigkeit

(4) ZTU-Diagramm & Abschreckkurven

- Zwei relevante ZTU-Bereiche:
 - **Rand (hoch C)** → hohe Martensitstarttemperatur
 - **Kern (niedrig C)** → geringere Härbarkeit
- Abschreckkurven:
 1. Wasser (selten, hohes Risiko)
 2. Öl (Standard)
 3. Gas (Vakuum-Einsatzhärten)



(5) Prozesse / Öfen / Atmosphäre

- **Aufkohlungsverfahren:**
 - Gasaufkohlen ($\text{Endogas} + \text{CH}_4 / \text{C}_3\text{H}_8$)
 - Niederdruckaufkohlen (Vakuum)
 - Salzbad (historisch, heute selten)
- **Öfen:**
 - Schutzgasöfen
 - Vakuumöfen mit Hochdruck-Gasabschreckung
- **Atmosphären:**
 - Kohlenstoffaktive Atmosphäre (CO/CH_4)
 - Sauerstofffrei

(6) Standard-Prozessparameter

- **Aufkohlen:**
 - Temperatur: 880—950 °C
 - Kohlenstoffpotenzial: 0,8—1,2 %
 - Zeit: abhängig von gewünschter Einsatzhärtetiefe
- **Diffusion:**
 - 840—880 °C
- **Austenitisieren vor Abschrecken:**
 - 820—860 °C

(7) Abschreckmedium

- Öl → Standard
- Gas (N_2 , He) → Vakuumprozess
- Polymer → Sonderanwendungen
- Ziel: Rissfreiheit bei vollständiger Randschichthärtung

(8) Anlassprozess

- **Immer erforderlich**
- Ziel:
 - Spannungsabbau
 - Einstellung der Gebrauchshärte
- Typisch:
 - 150—220 °C
 - 1—2 h
- Kein Hochanlassen → Randschichthärte bleibt erhalten

(9) Spannungszustände im Bauteil

- Nach dem Härten:
 - Randzone: **Druckeigenspannungen (sehr günstig!)**
 - Kern: Zugspannungen
- Ergebnis:
 - Hohe Dauerfestigkeit
 - Verzögerte Rissinitiierung

(10) Verzug (1 = sehr gering ... 5 = sehr stark)

- **Bewertung: 4**
- Gründe:
 - Lange Hochtemperaturhaltezeiten
 - Starker Gradientenunterschied Rand/Kern
- Vakuum + Gasabschreckung → Verzug ↓

(11) Verzunderung

- Klassisches Gasaufkohlen:
 - Geringe Verzunderung möglich
- Vakuum-Einsatzhärten:
 - **Nahezu verzunderungsfrei**
- Mechanische Nacharbeit oft minimal

(12) Randentkohlung / Randaufkohlung

- **Randaufkohlung ist gewollt**
- Gefahr:
 - Überaufkohlung → Rissbildung, Restaustenit ↑
- Randentkohlung:
 - Bei Prozessfehlern möglich (falsches C-Potenzial)

(13) Erzielbare Eigenschaften

- **Randschichthärte:**
 - 58—64 HRC

- **Kernfestigkeit:**
 - R_m : 800—1100 MPa
- **Einsatzhärtetiefe (Eht):**
 - Typisch 0,3—2,5 mm
 - Definiert bei 550 HV

(14) Einfluss auf Dauerhaltbarkeit

(1 = optimal ... 5 = stark schädlich)

- **Bewertung: 1**
- Hervorragend für:
 - Wechsel- & Kontaktbeanspruchung
 - Getriebe-, Wellen-, Zahnradanwendungen
- Optimales Spannungs- & Gefügedesign bei korrekter Prozessführung

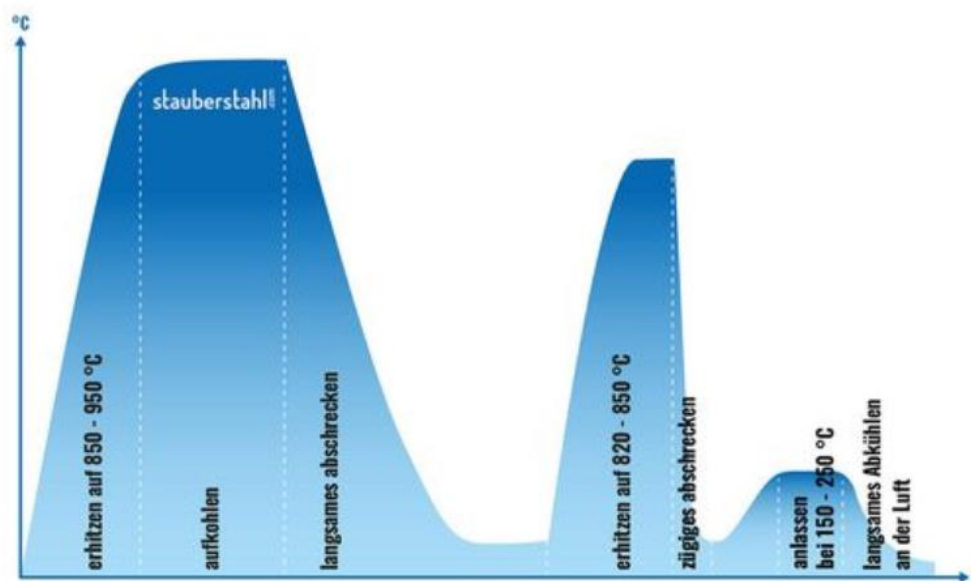
Kurzfazit:

- **Randschichtorientiertes Härteverfahren** (Aufkohlen + Härten + Anlassen)
- Kombination aus:
 - **sehr harter, verschleißfester Randschicht**
 - **zähem, duktilen Kern**
- Günstige **Druckeigenstressen** im Rand
- **Hervorragende Dauer- und Kontaktfestigkeit**
- Höherer Prozessaufwand und **erhöhter Verzug**

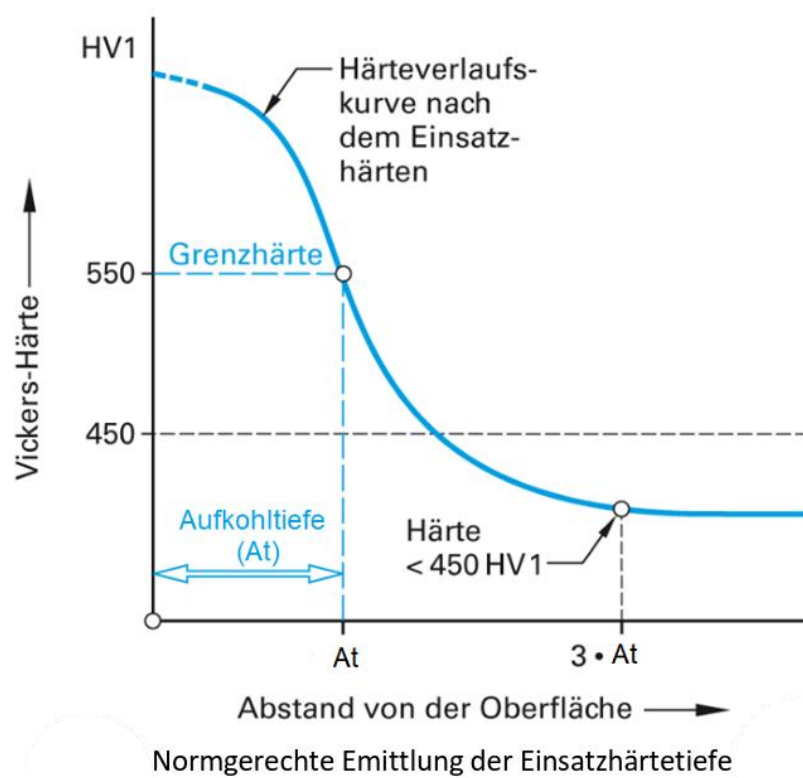
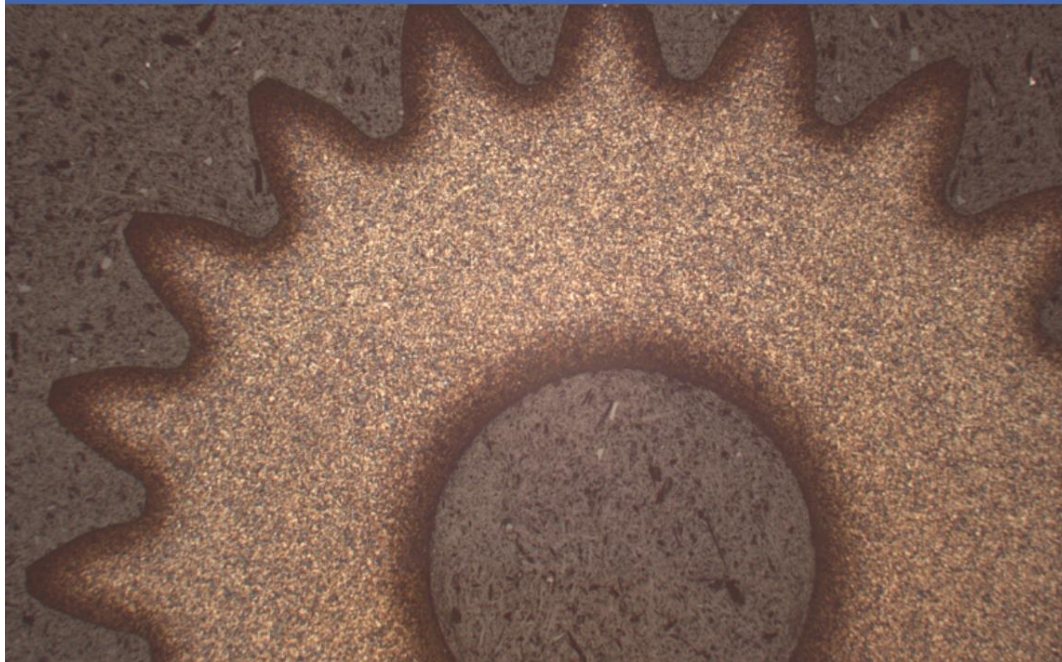
Typische Anwendung:

Kontakt- und wechselbeanspruchte Bauteile

(z. B. Zahnräder, Nocken, Lagerstellen, Getriebekomponenten)



Ablaufskizze beim Einsatzhärten



Härte-/Randschichtverfahren: AUFKOHLEN

(Thermochemische Kohlenstoffanreicherung der Randschicht — ohne Härten)

(1) Ziel des Verfahrens

- **Erhöhung des Kohlenstoffgehalts in der Randschicht**
- Schaffung der **Voraussetzung für hohe Randschichthärte nach dem Härten**
- Beeinflussung von:
 - Härbarkeit
 - erreichbarer Martensithärte
 - späterer Druckeigenspannung

(2) Geeignete Stähle

- **Niedriggekohlte Stähle:**
 - C-Gehalt: **0,05—0,25 %**
- Typische Einsatzstähle:
 - C10, C15
 - 16MnCr5, 20MnCr5
 - 18CrNiMo7-6
- Gute Diffusionsfähigkeit erforderlich

(3) Gefügeumwandlungen

- **Kein Härtegefüge!**
- Austenitisches Gefüge während der Behandlung
- Randschicht:
 - Kohlenstoffgradient (Rand → Kern)
- Nach Abkühlen (ohne Abschrecken):
 - Ferrit/Perlit mit erhöhtem C-Gehalt im Rand
- Martensit entsteht **erst beim nachfolgenden Härten**

(4) ZTU-Diagramm & Abschreckkurven

- Während des Aufkohlens:
 - **keine Abschreckung**
- Bedeutung des ZTU-Diagramms:
 - zeigt erhöhte Härbarkeit der Randschicht
 - Verschiebung der Umwandlungskurven nach rechts
- Abschreckkurven sind **prozessfremd**, aber vorbereitend relevant

(5) Prozesse / Öfen / Atmosphäre

- **Aufkohlungsverfahren:**
 - Gasaufkohlen (Endogas + CH₄ / C₃H₈)
 - Niederdruckaufkohlen (Vakuum)

- Salzbadaufkohlen (heute selten)
- **Atmosphäre:**
 - Kohlenstoffaktiv
 - Sauerstofffrei
- **Öfen:**
 - Schutzgas-Kammer- & Durchstoßöfen
 - Vakuumöfen

(6) Standard-Prozessparameter

- Temperatur:
 - 880—950 °C
- Kohlenstoffpotenzial (Cp):
 - 0,8—1,2 %
- Prozessdauer:
 - Minuten bis viele Stunden
 - Abhängig von gewünschter Einsatzhärtetiefe
- Diffusionsphase:
 - Cp-Absenkung zur Profilhomogenisierung

(7) Abschrecken

- **Nicht Bestandteil des Aufkohlens**
- Bauteil wird:
 - langsam abgekühlt
 - oder direkt in Härteofen überführt (integrierter Prozess)
- Abschrecken erfolgt **erst beim Einsatzhärten**

(8) Anlassprozess

- **Nicht relevant**
- Anlassen erst nach:
 - Härten der aufgekohlten Randschicht

(9) Spannungszustände im Bauteil

- Während Aufkohlen:
 - Geringe thermische Spannungen
- Kohlenstoffgradient erzeugt:
 - leichtes Eigenverzugspotenzial
- Kritische Spannungen entstehen **erst beim Abschrecken**

(10) Verzug (1 = sehr gering ... 5 = sehr stark)

- **Bewertung: 2**
- Ursachen:
 - Lange Haltezeiten
 - Temperaturgradienten

- Deutlich geringer als beim anschließenden Härten
-

(11) Verzunderung

- Gasaufkohlen:
 - geringe bis moderate Verzunderung möglich
 - Vakuumaufkohlen:
 - **praktisch verzunderungsfrei**
 - Abhängig von Sauerstoffpartialdruck
-

(12) Randentkohlung / Randaufkohlung

- **Randaufkohlung ist der Zweck**
 - Risiken:
 - Überaufkohlung (>1,0 % C)
 - Rissanfälligkeit
 - Restaustenit ↑
 - Randentkohlung:
 - nur bei Fehlsteuerung des Cp
-

(13) Erzielbare Eigenschaften (nach Aufkohlen, ohne Härten)

- **Keine relevante Härtesteigerung**
 - Randschicht:
 - erhöhter C-Gehalt (typ. 0,6—0,9 %)
 - Einsatzhärtetiefe:
 - **0,3—3,0 mm** (diffusionsgesteuert)
 - Mechanische Eigenschaften entstehen **erst nach Härten**
-

(14) Einfluss auf Dauerhaltbarkeit

(1 = optimal ... 5 = stark schädlich)

- **Bewertung: 2**
 - Positiv:
 - Ermöglicht optimale Randschichthärtung
 - Negativ bei Fehlprozess:
 - Überaufkohlung → Sprödigkeit
 - Grobkornbildung
 - Dauerhaltbarkeit hängt **stark vom Folgeprozess** ab
-

Kurzfazit für das Memo

- Aufkohlen ≠ Härten
- Aufkohlen = **chemische Vorbereitung**
- Mechanische Eigenschaften entstehen **erst durch anschließendes Härten + Anlassen**

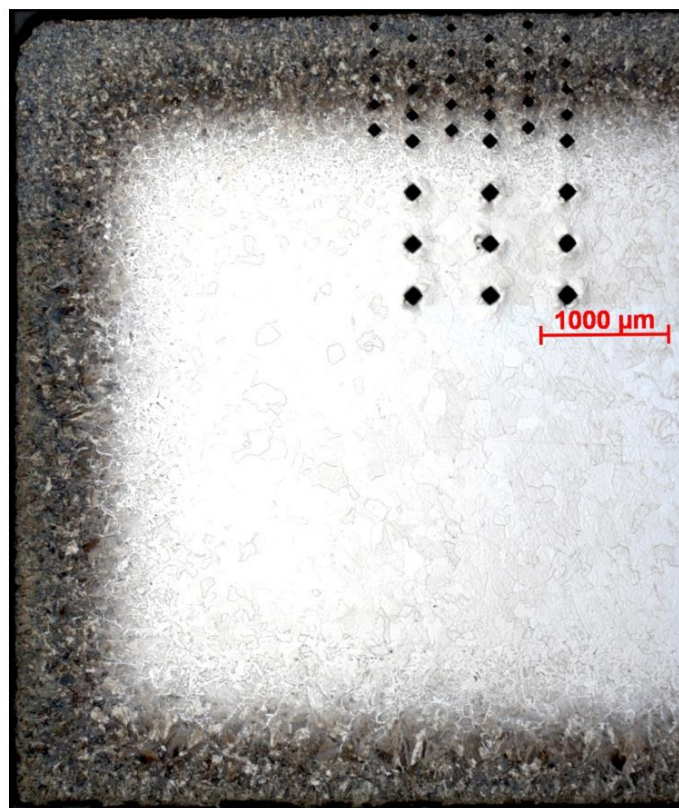
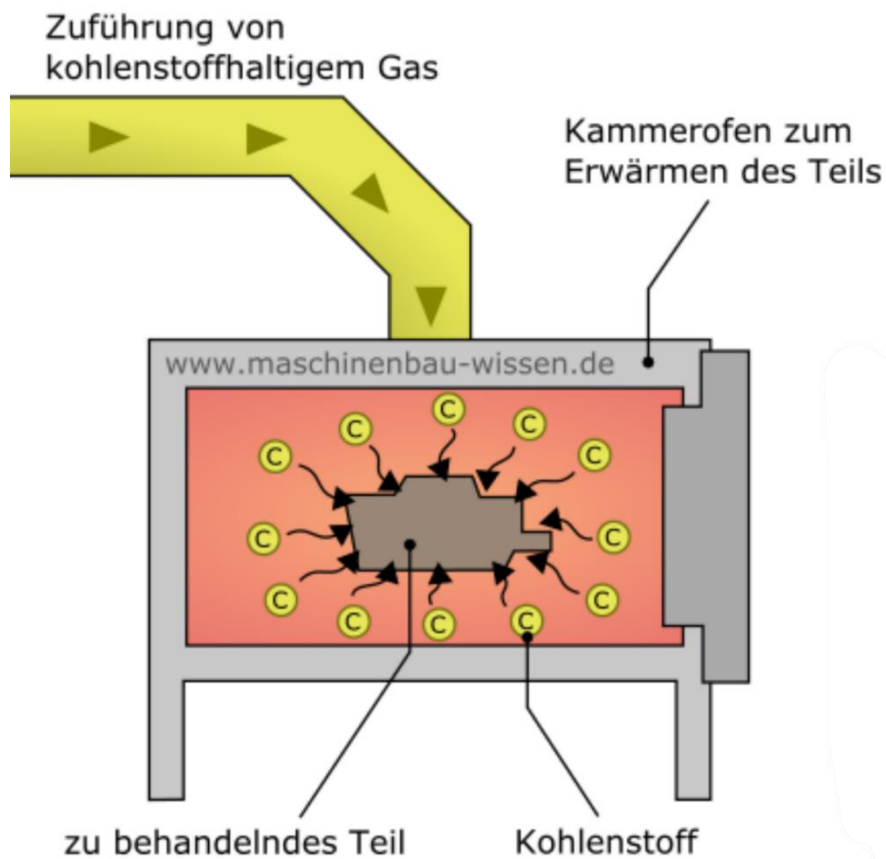


Abbildung 79: Profilquerschliff (Nital, 25x) einer für 3h bei 980°C aufgekohlten Fe-Probe; Eindrücke aus Härtemessung

Randschichthärteverfahren: NITRIEREN

(Thermochemische Stickstoffdiffusion → harte Randschicht ohne Abschrecken)

(1) Ziel des Verfahrens

- **Sehr harte, verschleiß- und ermüdungsfeste Randschicht**
 - **Kein Härten / kein Abschrecken**
 - Erzeugung von:
 - Druckeigenstressen im Rand
 - hoher Verschleiß-, Reib- und Korrosionsbeständigkeit
 - Maß- und formtreue Wärmebehandlung
-

(2) Geeignete Stähle

- **Nitrierstähle** mit Nitridbildnern:
 - Al, Cr, Mo, V
 - Typische Werkstoffe:
 - 31CrMoV9
 - 34CrAlNi7
 - 42CrMo4 (eingeschränkt)
 - Auch möglich:
 - Vergütete Stähle (vorvergütet!)
-

(3) Gefügeumwandlungen

- **Keine Austenitbildung**
 - Temperaturen < A_{c1}
 - Randschicht:
 - **Verbindungsschicht** (ϵ -, γ' -Nitride, „Weiße Schicht“)
 - **Diffusionszone** (Stickstoff in Mischkristall)
 - Kern:
 - Gefüge bleibt unverändert
-

(4) ZTU-Diagramm & Abschreckkurven

- **Nicht relevant**
 - Kein Austenit → kein Martensit
 - Härtesteigerung durch:
 - Ausscheidungshärtung
 - Mischkristallverfestigung
 - Abschreckkurven entfallen vollständig
-

(5) Prozesse / Öfen / Atmosphäre

- **Verfahren:**
 - Gasnitrieren (NH_3)
 - Plasmanitrieren (Ionen-/Plasmanitrieren)
 - Salzbadnitrieren
 - **Atmosphäre:**
 - Stickstoffaktiv
 - Sauerstofffrei
 - **Öfen:**
 - Kammeröfen
 - Plasmaanlagen
-

(6) Standard-Prozessparameter

- **Temperatur:**
 - 480—580 °C
 - **Dauer:**
 - 10—80 h
 - **Stickstoffpotenzial:**
 - prozessabhängig gesteuert
 - **Wachstum:**
 - diffusionsgesteuert ($\text{Zeit} \sim \text{Tiefe}^2$)
-

(7) Abschrecken

- **Nicht erforderlich**
 - **Abkühlung:**
 - Ofen
 - Luft
 - **Kein thermischer Schock**
-

(8) Anlassprozess

- **Nicht erforderlich**
 - **Werkstoffzustand vor Nitrieren:**
 - i. d. R. **vergütet**
 - **Optional:**
 - Spannungsarmglühen **vor** dem Nitrieren
-

(9) Spannungszustände im Bauteil

- **Randschicht:**
 - **Hohe Druckeigenstressungen (sehr günstig!)**
- **Kern:**
 - Spannungsarm
- **Ergebnis:**
 - Sehr hohe Dauerfestigkeit

- Verzögerte Rissinitiierung

(10) Verzug (1 = sehr gering ... 5 = sehr stark)

- **Bewertung: 1**
- Einer der größten Vorteile des Nitrierens
- Ideal für:
 - Präzisionsbauteile
 - Endbearbeitete Komponenten

(11) Verzunderung

- **Keine Verzunderung**
- Oberfläche bleibt metallisch sauber
- Plasmanitrieren:
 - besonders saubere Oberflächen

(12) Randentkohlung / Randaufkohlung

- **Keine Randentkohlung**
- Kohlenstoffgehalt bleibt unverändert
- Achtung:
 - zu dicke Verbindungsschicht → spröde

(13) Erzielbare Eigenschaften

- **Oberflächenhärte:**
 - 900—1200 HV
- **Nitriertiefe:**
 - 0,1—0,7 mm
- Sehr gute:
 - Verschleißfestigkeit
 - Reibwertreduktion
- Begrenzte Tragfähigkeit der Randschicht

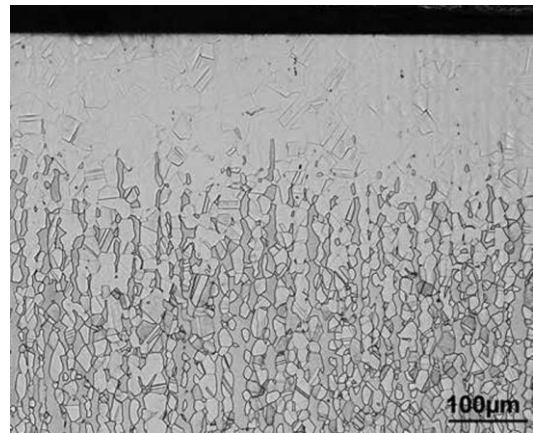
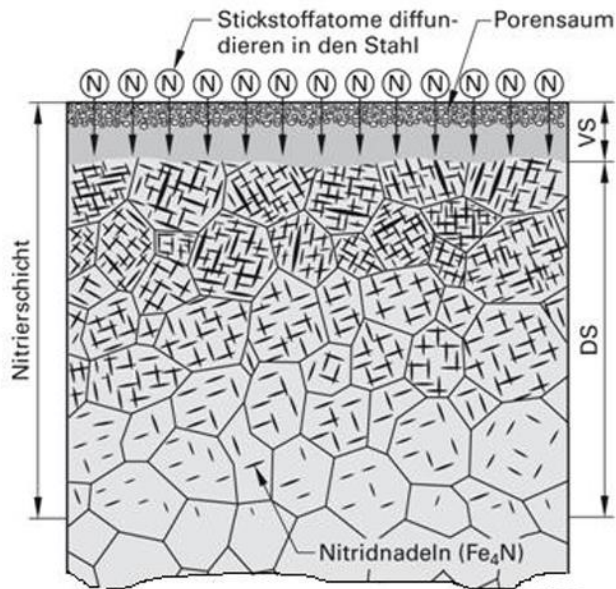
(14) Einfluss auf Dauerhaltbarkeit

(1 = optimal ... 5 = stark schädlich)

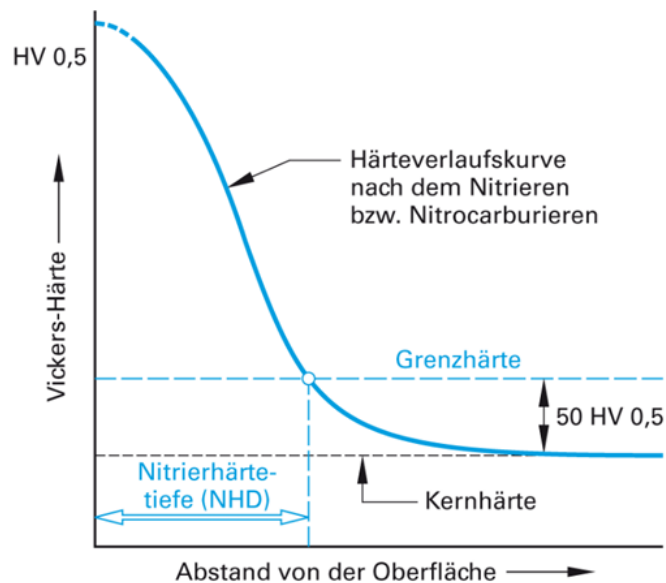
- **Bewertung: 1**
 - Sehr positiv für:
 - Wechselbeanspruchung
 - Ermüdung
 - Einschränkung:
 - Stoßbeanspruchung (dünne, harte Schicht)
-

Kurzfazit:

Nitrieren erzeugt eine extrem harte, verschleiß- und ermüdungsfeste Randschicht bei minimalem Verzug und ohne Abschrecken. Es ist ideal für maßkritische Bauteile, ersetzt jedoch kein Einsatzhärten bei hoher Kontakt- oder Stoßbelastung.



Aufbau einer Nitrierschicht



Normgerechte Ermittlung der Nitrierhärte-tiefe

Randschichthärteverfahren: BORIEREN

(Thermochemische Bor-Diffusion → extrem harte Boridschicht)

(1) Ziel des Verfahrens

- Erzeugung einer **extrem harten, hochverschleißfesten Randschicht**
- Maximale Beständigkeit gegen:
 - abrasiven Verschleiß
 - adhäsiven Verschleiß
 - Erosion
- Einsatz dort, wo konventionelle Härteverfahren nicht ausreichen

(2) Geeignete Stähle / Metalle

- **Stähle:**
 - Un- und niedriglegierte Stähle
 - Werkzeugstähle
- **Nicht-Eisen-Metalle:**
 - Nickel-, Kobalt-, Titanlegierungen
- **Einschränkungen:**
 - Hoher C-Gehalt und Legierungselemente beeinflussen Schichtwachstum
 - Maßkritische Bauteile nur bedingt geeignet

(3) Gefügeumwandlungen

- **Keine klassische Gefügeumwandlung**
- **Randschicht:**
 - Bildung harter **Boride**
 - FeB (äußere Zone, sehr hart, spröde)
 - Fe₂B (darunter, bevorzugt)
- **Kern:**
 - Gefüge bleibt weitgehend unverändert
- **Schichtaufbau:**
 - scharf abgegrenzt, sägezahnartig

(4) ZTU-Diagramm & Abschreckkurven

- **Nicht relevant**
- Kein Austenitisieren zwingend erforderlich
- Härtesteigerung erfolgt durch:
 - intermetallische Boridbildung
- Abschreckkurven entfallen

(5) Prozesse / Öfen / Atmosphäre

- **Borierverfahren:**
 - Pulverborieren
 - Pastenborieren
 - Salzbadborieren
 - Gasborieren (selten)
 - **Atmosphäre:**
 - Boraktiv
 - Sauerstoffarm
 - **Öfen:**
 - Kammeröfen
 - Retortenöfen
-

(6) Standard-Prozessparameter

- Temperatur:
 - 800—1000 °C
 - Dauer:
 - 1—10 h
 - Schichtwachstum:
 - diffusionsgesteuert
 - Schichtdicke:
 - stark temperatur- und zeitabhängig
-

(7) Abschrecken

- **Nicht erforderlich**
 - Abkühlung:
 - Ofen
 - Luft
 - Abschrecken wird i. d. R. vermieden (Rissgefahr)
-

(8) Anlassprozess

- **Nicht erforderlich**
 - Optional:
 - nachgeschaltete Wärmebehandlung zur Kernanpassung
 - Boridschicht selbst **nicht anlassbar**
-

(9) Spannungszustände im Bauteil

- Randschicht:
 - hohe Eigenspannungen
 - sprödes Verhalten
 - Übergangszone kritisch bei:
 - Stoß- und Biegebeanspruchung
-

(10) Verzug (1 = sehr gering ... 5 = sehr stark)

- **Bewertung: 3—4**
- Ursachen:
 - Hohe Prozesstemperaturen
 - Lange Haltezeiten
- Schlechter als Nitrieren, besser als Einsatzhärten bei gleicher Tiefe

(11) Verzunderung

- Möglich, abhängig vom Verfahren
- Pulver-/Pastenborieren:
 - Oberflächenrauigkeit ↑
- Mechanische Nacharbeit häufig erforderlich

(12) Randentkohlung / Randaufkohlung

- **Keine gezielte Beeinflussung des C-Gehalts**
- Randentkohlung möglich:
 - bei ungünstiger Ofenatmosphäre
- Kohlenstoff hat geringen Einfluss auf Boridschicht

(13) Erzielbare Eigenschaften

- **Oberflächenhärte:**
 - 1400—2000 HV (sehr hoch)
- **Schichtdicke:**
 - 20—200 µm
- Eigenschaften:
 - Extrem verschleißfest
 - Sehr geringe Duktilität der Schicht
- Tragfähigkeit der Schicht begrenzt

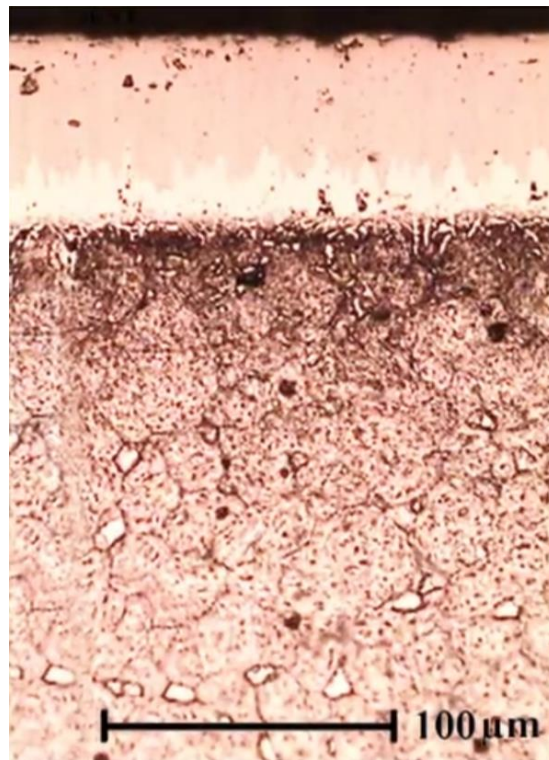
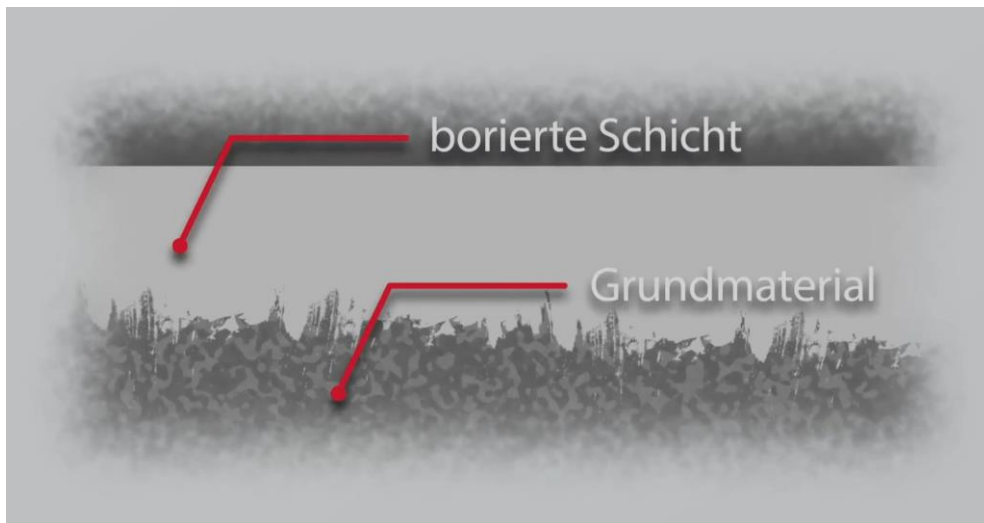
(14) Einfluss auf Dauerhaltbarkeit

(1 = optimal ... 5 = stark schädlich)

- **Bewertung: 3—4**
- Positiv:
 - Abrasiver Verschleiß ↓ ↓ ↓
- Negativ:
 - Sprödigkeit
 - Rissgefahr bei Stoß- oder Biegebeanspruchung
- Nicht geeignet für hochdynamische Lastkollektive

Kurzfazit:

Borieren erzeugt die härteste bekannte Randschicht auf Stahl, mit außergewöhnlicher Verschleißbeständigkeit, jedoch ausgeprägter Sprödigkeit. Es ist ein Spezialverfahren für extreme tribologische Beanspruchung und ersetzt kein Einsatzhärten oder Nitrieren bei dynamisch belasteten Bauteilen.



Randschichtverfahren: KOLSTERISIEREN

(Niedertemperatur-Aufkohlen austenitischer Edelstähle → „expanded austenite“ / S-Phase)

(1) Ziel des Verfahrens

- **Massive Erhöhung der Oberflächenhärte** bei **vollständigem Erhalt der Korrosionsbeständigkeit**
- **Kein Martensit, keine Karbide**
- Erzeugung sehr hoher **Druckeigenspannungen**
- Verschleiß- und Ermüdungsfestigkeit ↑ bei minimalem Verzug

(2) Geeignete Stähle / Metalle

- **Austenitische nichtrostende Stähle:**
 - 1.4301 (AISI 304)
 - 1.4404 (AISI 316L)
 - 1.4571
- Auch:
 - Duplexstähle (eingeschränkt)
- **Nicht geeignet:**
 - Ferritische / martensitische Stähle
- Industriell als proprietärer Prozess (z. B. von Bodycote)

(3) Gefügeumwandlungen

- **Keine Austenit-Martensit-Umwandlung**
- Kohlenstoff wird **übersättigt im Austenitgitter gelöst**
- Bildung der S-Phase (expanded austenite)
- Kern:
 - vollständig unverändert
- Keine Chromkarbide → Korrosionsbeständigkeit bleibt erhalten

(4) ZTU-Diagramm & Abschreckkurven

- **Nicht relevant**
- Prozess findet **unterhalb der Karbidbildungsgrenze**
- Keine zeit-temperaturabhängigen Phasenumwandlungen
- Abschreckkurven entfallen

(5) Prozesse / Öfen / Atmosphäre

- **Spezieller Niedertemperatur-Thermochemieprozess**
- Atmosphäre:
 - kohlenstoffaktiv
 - sauerstofffrei

- Öfen:
 - geschlossene Spezialanlagen
 - Vakuum-/Schutzgasumgebung
 - Prozessparameter sind **herstellerspezifisch**
-

(6) Standard-Prozessparameter

- Temperatur:
 - $< 450\text{ °C}$ (typ. $380\text{—}420\text{ °C}$)
 - Dauer:
 - $10\text{—}50\text{ h}$
 - Diffusionsgesteuertes Schichtwachstum
 - Kritisch:
 - Überschreitung der Temperatur $\rightarrow$ Karbidausfällung!
-

(7) Abschrecken

- **Nicht erforderlich**
 - Langsame Abkühlung im Ofen oder in Luft
 - Kein thermischer Schock
-

(8) Anlassprozess

- **Nicht erforderlich**
 - Schicht ist **nicht anlassbar**
 - Anlassbehandlung würde Wirkung zerstören
-

(9) Spannungszustände im Bauteil

- Randschicht:
 - **sehr hohe Druckeigenspannungen (extrem günstig)**
 - Kern:
 - spannungsfrei
 - Ergebnis:
 - stark erhöhte Dauerfestigkeit
 - sehr hohe Rissinitiierungsresistenz
-

(10) Verzug (1 = sehr gering ... 5 = sehr stark)

- **Bewertung: 1**
 - Einer der größten Vorteile des Kolsterisierens
 - Ideal für:
 - endbearbeitete Präzisionsteile
-

(11) Verzunderung

- **Keine**
- Oberfläche bleibt metallisch blank
- Keine Nacharbeit erforderlich

(12) Randentkohlung / Randaufkohlung

- Gezielte Randaufkohlen (übersättigt)
- Keine Entkohlung
- Kein Karbidwachstum → Korrosionsschutz bleibt erhalten

(13) Erzielbare Eigenschaften

- Oberflächenhärte:
 - 900—1200 HV
- Schichttiefe:
 - 10—40 μm
- Eigenschaften:
 - Verschleißfestigkeit $\uparrow \uparrow$
 - Reibwert $\downarrow$
 - Korrosionsbeständigkeit $\approx$ Grundwerkstoff

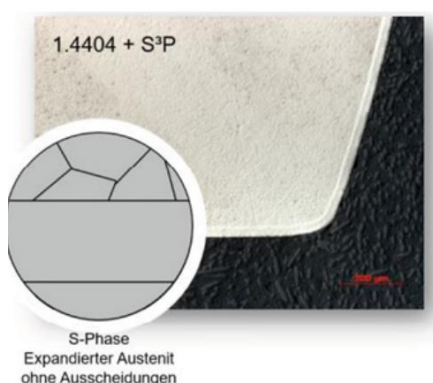
(14) Einfluss auf Dauerhaltbarkeit

(1 = optimal ... 5 = stark schädlich)

- Bewertung: 1
- Sehr positiv:
 - Ermüdung
 - Gleit- & Rollkontakt
- Einschränkung:
 - begrenzte Schichttiefe → keine hohe Flächenpressung wie beim Einsatzhärten

Kurzfazit:

Kolsterisieren ist ein Niedertemperatur-Aufkohlverfahren für austenitische Edelstähle, das extrem hohe Oberflächenhärten bei vollem Erhalt der Korrosionsbeständigkeit und minimalem Verzug ermöglicht. Es schließt die Lücke zwischen Nitrieren und Beschichten, ist jedoch auf dünne Randschichten begrenzt.



Beim Niedertemperatur-Diffusionsverfahren S3P Kolsterisieren® bildet sich eine helle, ausscheidungs-freie und harte Diffusionszone aus

Bainitisieren

(Isotherme Umwandlung des Austenits zu Bainit — Abschrecken + Halten)

(1) Ziel des Härteverfahrens

- Erzeugung eines **bainitischen Gefüges** mit
 - hoher Festigkeit
 - sehr guter Zähigkeit
 - geringer Sprödigkeit
 - **Reduzierter Verzug und geringere Rissgefahr** gegenüber Martensithärten
 - Gute Dauerfestigkeit bei dynamischer Beanspruchung
-

(2) Geeignete Stähle

- Un- und niedriglegierte Stähle mit ausreichender Härbarkeit
 - Typisch:
 - C-Stähle $\sim 0,3\text{—}0,6\ \% \text{ C}$
 - Mn-, Cr-, Mo-legierte Stähle
 - Gute Eignung für:
 - Federstähle
 - Wellen
 - Strukturbauteile
-

(3) Gefügeumwandlungen

- **Austenitisieren:** Ferrit/Perlit $\rightarrow$ Austenit
 - **Abschrecken** auf Bainittemperatur:
 - oberer Bainit: $\sim 400\text{—}550\ ^\circ\text{C}$
 - unterer Bainit: $\sim 250\text{—}400\ ^\circ\text{C}$
 - **Isothermes Halten:**
 - Austenit $\rightarrow$ Bainit
 - Kein Martensit (bei vollständiger Umwandlung)
-

(4) ZTU-Diagramm & Abschreckkurven

- Zentrale Bedeutung des **TTT-/ZTU-Diagramms**
 - Abschreckstrategie:
 1. Rasches Abschrecken unter die Perlitnase
 2. Halten im Bainitbereich
 3. Abkühlen auf RT
 - Abschreckkurven:
 - Wasser/Öl bis Halttemperatur
 - anschließend isotherm
-

(5) Prozesse / Öfen / Atmosphäre

- **Salzbäder** (klassisch, sehr gute Wärmeübertragung)
 - Alternativ:
 - Schutzgasöfen mit isothermem Halten
 - Atmosphäre:
 - neutral
 - oxidationsarm
-

(6) Standard-Prozessparameter

- Austenitisieren:
 - 820—900 °C
 - Bainitisieren:
 - 250—550 °C
 - Haltezeit:
 - **30 min — mehrere Stunden**
 - abhängig von Temperatur & Bauteildicke
-

(7) Abschrecken

- **Zweistufig**
 - Schnellabschrecken auf Bainittemperatur
 - Isothermes Halten
 - Medien:
 - Salzbad (Standard)
 - Öl + Ofenhalten (alternativ)
-

(8) Anlassprozess

- **Nicht zwingend erforderlich**
 - Optional:
 - Spannungsarmglühen
 - niedriges Anlassen zur Feineinstellung
 - Bainit ist deutlich **weniger spröde** als Martensit
-

(9) Spannungszustände im Bauteil

- Geringe Eigenspannungen
 - Keine extremen Zug-/Druckgradienten
 - Sehr günstiger Spannungszustand für Dauerbeanspruchung
-

(10) Verzug (1 = sehr gering ... 5 = sehr stark)

- **Bewertung: 2**
 - Deutlich geringer als:
 - Martensithärten
 - Einsatzhärten
 - Sehr gut beherrschbar
-

(11) Verzunderung

- Möglich bei:
 - Luftatmosphäre
 - Gering bei:
 - Salzbad
 - Schutzgas
 - Meist geringer als beim klassischen Härten
-

(12) Randentkohlung / Randaufkohlung

- **Nicht prozessbedingt**
 - Randentkohlung nur bei:
 - schlechter Ofenatmosphäre
 - Kein Kohlenstoffeintrag
-

(13) Erzielbare Eigenschaften

- **Härte:**
 - oberer Bainit: ~30—40 HRC
 - unterer Bainit: ~40—55 HRC
 - **Festigkeit:**
 - sehr hoch bei guter Zähigkeit
 - **Einhärtung:**
 - durchgehend im Bauteil
-

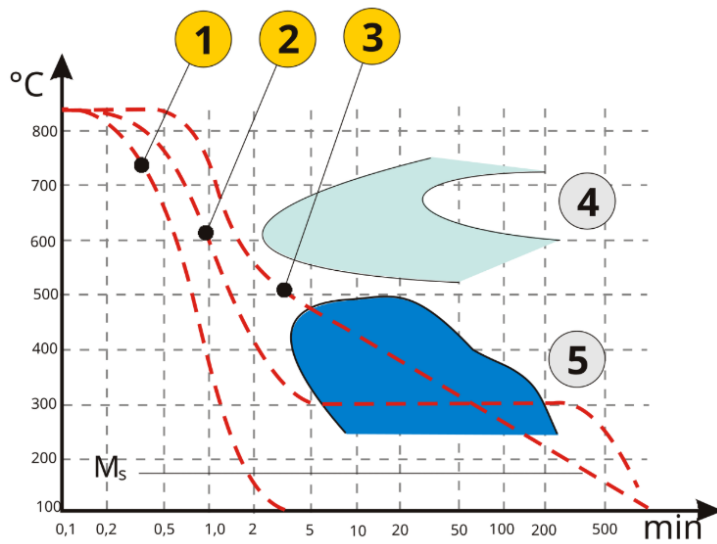
(14) Einfluss auf Dauerhaltbarkeit

(1 = *optimal* ... 5 = *stark schädlich*)

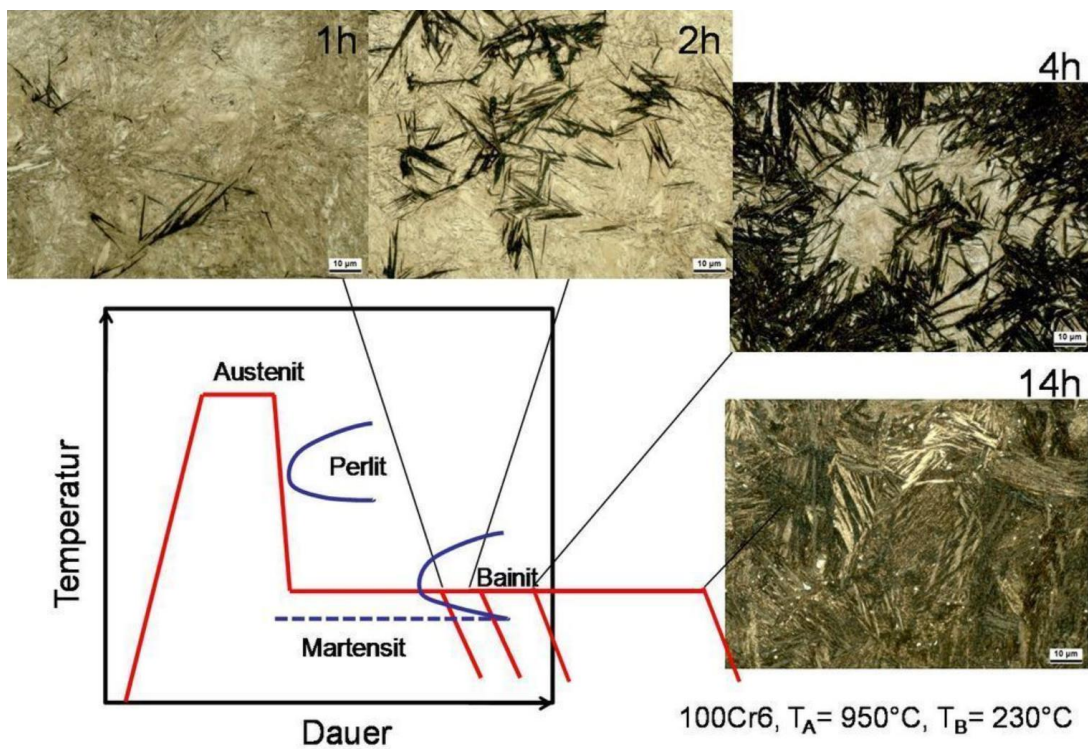
- **Bewertung: 1—2**
 - Sehr günstig für:
 - Wechselbeanspruchung
 - Stoßbelastung
 - Bainit = **exzellenter Kompromiss** zwischen Festigkeit und Duktilität
-

Kurzfazit:

Bainitisieren erzeugt ein zäh-festes Gefüge mit geringer Sprödigkeit, moderater Härte und sehr gut beherrschbarem Verzug. Es ist eine hervorragende Alternative zum Martensithärten, wenn Dauerfestigkeit und Maßhaltigkeit im Vordergrund stehen.



- (1) Abschrecken auf Martensit
- (2) Zwischenstufenvergüten
- (3) Abkühlen auf Bainit
- (4) Perlitbereich
- (5) Bainitbereich



Beim Bainitisieren von 100Cr6 (T_A 950 °C, T_B 230 °C) werden feine Nadelstrukturen ausgeschieden, bis die Gefügeumwandlung abgeschlossen ist. a

Induktivhärten

(Lokales, schnelles Austenitisieren durch Induktion + Abschrecken → martensitische Randschicht)

(1) Ziel des Härteverfahrens

- **Gezielte Randschichthärtung** hochbeanspruchter Funktionsflächen
 - Kombination aus:
 - **harter, verschleißfester Oberfläche**
 - **zähem, unverändertem Kern**
 - Minimale Wärmebeeinflussung des Gesamtbauteils
 - Hohe Produktivität & gute Automatisierbarkeit
-

(2) Geeignete Stähle

- **Vergütungs- und unlegierte Stähle**
 - Erforderlich:
 - **ausreichender C-Gehalt $\geq \sim 0,35 \%$**
 - Typisch:
 - C45
 - 42CrMo4
 - 50CrV4
 - Niedriggekohlte Einsatzstähle **nicht geeignet** (ohne Voraufkohlen)
-

(3) Gefügeumwandlungen

- **Lokales Austenitisieren** der Randschicht (kurzzeitig)
 - **Abschrecken:**
 - Rand → **Martensit**
 - Übergangszone → Martensit/Bainit
 - Kern:
 - bleibt ferritisch-perlitisch oder vergütet
 - Sehr steiler Gefüge- und Härtegradient
-

(4) ZTU-Diagramm & Abschreckkurven

- ZTU relevant für:
 - erforderliche Abkühlgeschwindigkeit
 - Prozesscharakter:
 - extrem kurze Austenitisierzeit
 - sehr hohe Aufheizrate
 - Abschreckkurve:
 - meist zwischen Wasser und Öl (sehr intensiv)
 - Ziel: **vollständige Martensitbildung im Rand**
-

(5) Prozesse / Öfen / Atmosphäre

- **Induktionsanlagen** mit:
 - HF / MF / NF-Generatoren
 - Bauteilspezifischen Induktoren
 - **Atmosphäre:**
 - Umgebungsluft (kurze Zeit → geringe Oxidation)
 - Keine klassischen Öfen erforderlich
-

(6) Standard-Prozessparameter

- **Austenitisieren:**
 - 850—1000 °C (Randzone)
 - **Frequenz:**
 - hoch (kHz) → flache Härtung
 - niedrig (kHz-Bereich) → tiefere Härtung
 - **Aufheizzeit:**
 - **Sekundenbruchteile bis wenige Sekunden**
-

(7) Abschrecken

- **Unmittelbar integriert**
 - **Medien:**
 - Wasser
 - Polymer
 - Emulsion
 - **Abschreckung oft:**
 - direkt im Induktor (Sprühabschrecken)
-

(8) Anlassprozess

- **Empfohlen**
 - **Ziel:**
 - Spannungsabbau
 - Reduktion der Sprödigkeit
 - **Typisch:**
 - 150—250 °C
 - kurze Zeiten
 - Teilweise inline realisiert
-

(9) Spannungszustände im Bauteil

- **Randschicht:**
 - **Druckeigenspannungen** (sehr günstig)
- **Kern:**
 - gering belastet
- **Insgesamt:**
 - günstiger Spannungszustand für Ermüdung

(10) Verzug (1 = sehr gering ... 5 = sehr stark)

- **Bewertung:** 2
- Gründe:
 - lokale Erwärmung
 - kurze Prozesszeiten
- Deutlich geringer als beim Einsatzhärten

(11) Verzunderung

- **Gering**
- Möglich bei:
 - fehlender Prozessoptimierung
- Meist tolerierbar oder leicht entfernbar

(12) Randentkohlung / Randaufkohlung

- **Nicht prozessbedingt**
- Aufgrund kurzer Zeiten:
 - praktisch keine Diffusion
- Randentkohlung nur bei Vorprozessen relevant

(13) Erzielbare Eigenschaften

- **Oberflächenhärte:**
 - 50—62 HRC (werkstoffabhängig)
- **Einhärtetiefe:**
 - 0,5—5 mm
- **Sehr gute:**
 - Verschleißfestigkeit
 - Biege- & Dauerfestigkeit

(14) Einfluss auf Dauerhaltbarkeit

(1 = optimal ... 5 = stark schädlich)

- **Bewertung:** 1—2
- Sehr positiv für:
 - lokal hochbeanspruchte Zonen
- Einschränkung:
 - nur dort wirksam, wo gezielt gehärtet wird

Kurzfazit:

Induktionshärten ist ein hochproduktives, lokales Randschichthärteverfahren mit sehr guter Maßhaltigkeit, hoher Oberflächenhärte und günstigen Druckeigenspannungen. Es ist ideal für funktional belastete Bereiche, ersetzt jedoch kein Einsatzhärten bei tiefen, tragfähigen Randschichten.

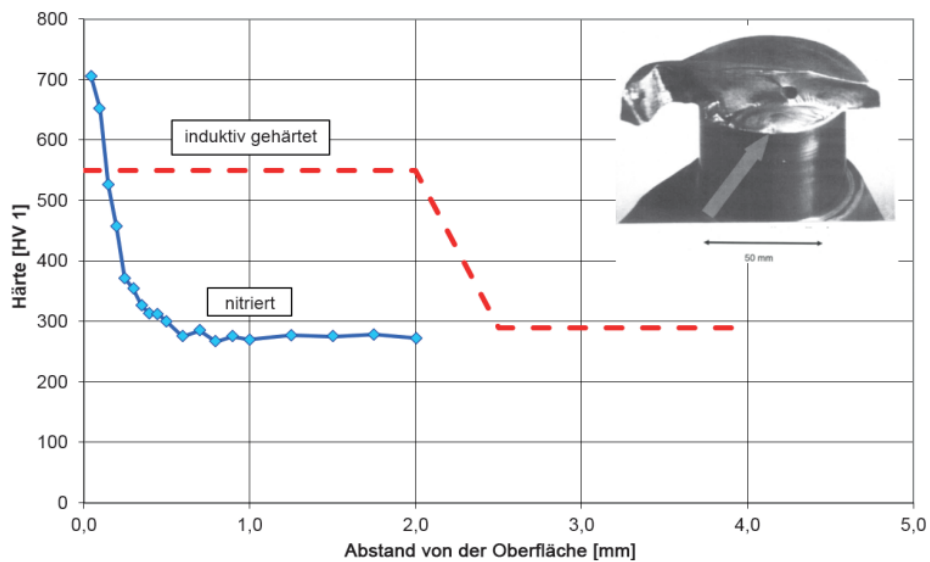
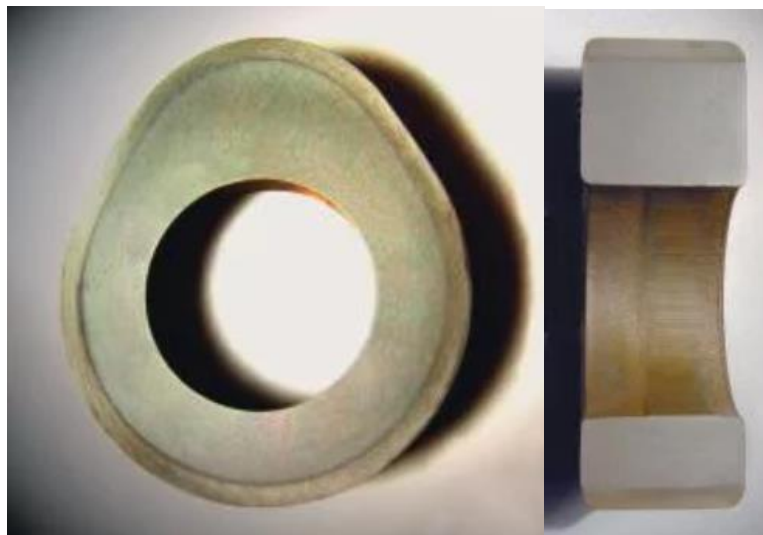
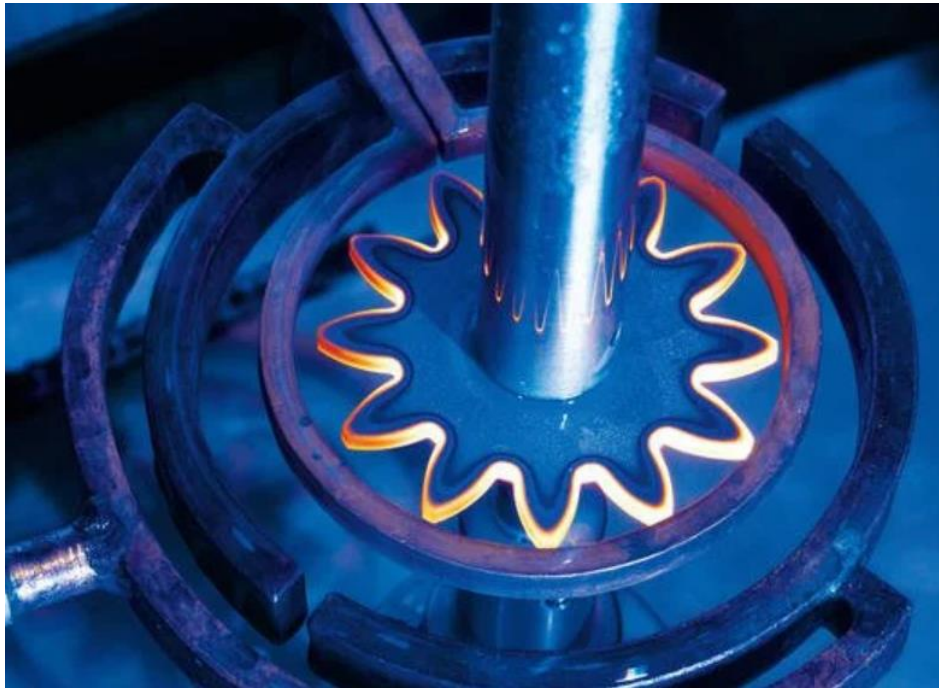


Bild 3. Schematische Härteprofile nach dem Induktivhärten und Nitrieren

Fig. 3. Schematic hardness profiles after induction hardening and nitriding

DIN-Bezeichnung	Stoff- nummer	HRC- Werte	Analyse									
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	C
			%	≤ %	≤ %	≤ %	≤ %	%	%	%	%	%
Vergütungsstähle												
C 35	1.0501	51 – 57	0,35	0,35	0,80	0,045	0,045					
35 S 20 ¹⁾	1.0726	50 – 55	0,35	0,40	0,90	0,060	0,250					
Ck 35	1.1181	51 – 57	0,35	0,35	0,80	0,035	0,035					
Cf 35	1.1183	51 – 57	0,35	0,35	0,80	0,025	0,035					
C 45	1.0503	56 – 61	0,45	0,35	0,80	0,045	0,045					
45 S 20 ¹⁾	1.0727	55 – 60	0,45	0,40	0,90	0,060	0,250					
Ck 45	1.1191	56 – 61	0,45	0,35	0,80	0,035	0,035					
Cf 45	1.1193	56 – 61	0,45	0,35	0,80	0,025	0,035					
Cf 53	1.1213	58 – 63	0,53	0,35	0,70	0,025	0,035					
60 S 20 ¹⁾	1.0728	58 – 62	0,60	0,40	0,90	0,060	0,250					
Ck 60	1.1221	59 – 64	0,60	0,35	0,90	0,035	0,035					
Cf 70	1.1249	60 – 64	0,70	0,35	0,35	0,025	0,035					
79 Ni 1	1.6971	60 – 64	0,79	0,30	0,55	0,025	0,025	0,15		0,15	0,05	
36 Mn 5	1.5067	52 – 56	0,36	0,35	1,50	0,035	0,035					
40 Mn 4	1.5038	53 – 58	0,40	0,50	1,10	0,035	0,035					
37 MnSi 5 ²⁾	1.5122	55 – 58	0,37	1,40	1,40	0,035	0,035					
38 MnSi 4 ²⁾	1.5120	54 – 58	0,38	0,90	1,20	0,035	0,035					
46 MnSi 4 ²⁾	1.5121	57 – 60	0,46	0,90	1,20	0,035	0,035					
53 MnSi 4 ²⁾	1.5141	58 – 62	0,53	1,00	1,20	0,035	0,035					
45 Cr 2	1.7005	56 – 60	0,45	0,40	0,80	0,025	0,035	0,50				
34 Cr 4	1.7033	51 – 55	0,34	0,40	0,90	0,035	0,035	1,05				
37 Cr 4	1.7034	53 – 58	0,37	0,40	0,90	0,035	0,035	1,05				
38 Cr 4	1.7043	53 – 58	0,38	0,40	0,90	0,025	0,035	1,05				
41 Cr 4	1.7035	54 – 58	0,41	0,40	0,80	0,035	0,035	1,05				
42 Cr 4	1.7045	54 – 58	0,42	0,40	0,80	0,025	0,035	1,05				
34 CrMo 4	1.7220	52 – 56	0,34	0,40	0,80	0,035	0,035	1,05	0,25			
41 CrMo 4	1.7223	54 – 58	0,41	0,40	0,80	0,025	0,035	1,05	0,25			
42 CrMo 4	1.7225	54 – 58	0,42	0,40	0,80	0,035	0,035	1,05	0,25			
49 CrMo 4	1.7238	57 – 62	0,49	0,40	0,80	0,025	0,035	1,05	0,25			
50 CrMo 4	1.7228	57 – 62	0,50	0,40	0,80	0,035	0,035	1,05	0,25			
50 Cr V 4	1.8159	57 – 62	0,50	0,40	1,10	0,035	0,035	1,05			0,15	
58 Cr V 4	1.8161	58 – 63	0,58	0,35	1,10	0,035	0,035	1,05			0,09	
30 CrNiMo 8	1.6580	50 – 54	0,30	0,40	0,60	0,035	0,035	2,00	0,35	2,00		
34 CrNiMo 6	1.6582	53 – 56	0,34	0,40	0,70	0,035	0,035	1,55	0,25	1,55		
36 CrNiMo 4	1.6511	54 – 57	0,36	0,40	0,80	0,035	0,035	1,05	0,25	1,05		
Werkzeugstähle												
X 41 CrMo V 5,1	1.2344	55 – 59	0,41	1,00	0,40	0,015	0,010	5,00	1,30		0,50	
86 CrMo V 7	1.2327	60 – 64	0,86	0,35	0,45	0,030	0,030	1,75	0,30	0,10		
X 20 Cr 13	1.2082	48 – 53	0,20	0,50	0,40	0,035	0,035	13,00				
X 40 Cr 13	1.2083	55 – 58	0,40	0,50	0,40	0,030	0,030	13,00				
Rostfreie Stähle												
X 90 CrMo V 18	1.4112	55 – 58	0,90	1,00	1,00	0,045	0,030	18,00	1,15			
X 90 CrCoMo V 17	1.4535	55 – 58	0,90	1,00	1,00	0,045	0,030	16,50	0,50	0,25	0,25	ca. 1,5
X 105 CrMo 17	1.4125	56 – 60	1,05	1,00	1,00	0,045	0,030	17,00	0,60		0,10	
Wälzlagerstähle												
100 Cr 6	1.3505	62 – 65	1,00	0,35	0,40	0,030	0,025	1,55				
Ventilstähle												
X 45 CrSi 9-3	1.4718	56 – 60	0,45	3,50	0,50	0,030	0,025	9,50				
X 80 CrNiSi 20	1.4747	52 –55	0,80	2,75	1,00	0,030	0,030	20,00		1,50		
Gusswerkstoffe												
GG-25	0.6025	48 – 52	} bitte separates Merkblatt anfordern									
GTS-45		51 – 57										
GTS-65		56 – 59										
GGG-60	0.7060	53 – 59										
GGG-70	0.7070	56 – 62										
1) größere Härteschwankungen möglich 2) umwandlungsfreundlich, jedoch rissempfindlich bei stark polierten Teilen												
Einsatzstähle geeignet für partielle Härtungen, z.B. Ck 15, 16 MnCr 5, 20 MnCr 5, 15 CrNi 6, 20 MoCr 4 etc.												
Sinterwerkstoffe bei Grundlage Eisen-Kohlenstoff sind Härtungen möglich												
Legende Härtetiefen: max. 2 mm max. 4 mm max. 6 mm über 6 mm												
Nachdruck oder anderweitige Vervielfältigung dieser Tabelle nur gestattet mit schriftlicher Genehmigung der Firma INDUCTOHEAT Europe GmbH. www.inductoheat.eu												

Flammhärten

(Lokales Austenitisieren durch Gasflamme + Abschrecken → martensitische Randschicht)

(1) Ziel des Härteverfahrens

- **Gezielte Randschichthärtung** einzelner Funktionsflächen
- Erzeugung einer **harten, verschleißfesten Oberfläche** bei zähem Kern
- Flexible, auch manuell realisierbare Lösung für große Bauteile
- Geringer Anlagenaufwand im Vergleich zur Induktion

(2) Geeignete Stähle

- Un- und niedriglegierte Stähle
- Erforderlich:
 - C-Gehalt $\geq \sim 0,35 \%$
- Typisch:
 - C45
 - C60
 - 42CrMo4
- Einsatzstähle (niedriger C-Gehalt) **nicht geeignet**

(3) Gefügeumwandlungen

- **Lokales Austenitisieren** der Oberfläche durch Flammenbeaufschlagung
- **Abschrecken:**
 - Rand → **Martensit**
 - Übergangszone → Martensit/Bainit
- Kern:
 - bleibt ferritisch-perlitisch oder vergütet
- Größerer Wärmeübergangsbereich als beim Induktionshärten

(4) ZTU-Diagramm & Abschreckkurven

- ZTU relevant für:
 - erforderliche Mindestabkühlgeschwindigkeit
- Abschreckkurve:
 - sehr steil (Wasser)
 - alternativ Polymer
- Ziel:
 - vollständige Martensitbildung im Rand

(5) Prozesse / Anlagen / Atmosphäre

- **Flammhärteanlagen** oder manuelle Brenner
- Brenngase:

- Acetylen-Sauerstoff
 - Propan-Sauerstoff
 - Atmosphäre:
 - Umgebungsluft
 - Keine Öfen erforderlich
-

(6) Standard-Prozessparameter

- Austenitisieren (Rand):
 - 850—950 °C
 - Aufheizdauer:
 - Sekunden bis wenige Minuten
 - Prozesssteuerung:
 - Flammenleistung
 - Vorschubgeschwindigkeit
 - Brennerabstand
-

(7) Abschrecken

- **Unmittelbar nach Erwärmung**
 - Medien:
 - Wasser (Standard)
 - Polymer
 - Oft:
 - integrierte Sprühabschreckung
 - Abschreckintensität hoch
-

(8) Anlassprozess

- **Empfohlen**
 - Ziel:
 - Spannungsabbau
 - Reduktion der Sprödigkeit
 - Typisch:
 - 150—250 °C
 - kurze Zeiten
 - Besonders wichtig bei Wasserabschreckung
-

(9) Spannungszustände im Bauteil

- Randschicht:
 - **Druckeigenspannungen**
 - Übergangszone:
 - erhöhte Spannungsgradienten
 - Insgesamt:
 - ungünstiger als Induktionshärten, aber beherrschbar
-

(10) Verzug (1 = sehr gering ... 5 = sehr stark)

- **Bewertung: 3**
 - Ursachen:
 - größere Wärmeeinflusszone
 - weniger präzise Energieeinbringung
 - Höher als Induktionshärten, niedriger als Einsatzhärten
-

(11) Verzunderung

- **Deutlich möglich**
 - Ursache:
 - offene Flamme
 - Luftatmosphäre
 - Mechanische Nacharbeit oft erforderlich
-

(12) Randentkohlung / Randaufkohlung

- **Randentkohlung möglich**
 - Ursache:
 - oxidierende Flammenführung
 - Durch korrekte Flammeneinstellung reduzierbar
 - Keine gezielte Randaufkohlung
-

(13) Erzielbare Eigenschaften

- **Oberflächenhärte:**
 - 50—60 HRC
 - **Einhärtetiefe:**
 - 1—5 mm
 - Gute:
 - Verschleißfestigkeit
 - Biegefestigkeit
 - Geringere Reproduzierbarkeit als Induktion
-

(14) Einfluss auf Dauerhaltbarkeit

(1 = optimal ... 5 = stark schädlich)

- **Bewertung: 2—3**
 - Positiv:
 - lokal erhöhte Ermüdungsfestigkeit
 - Negativ bei schlechter Prozessführung:
 - Randentkohlung
 - Zugspannungen
 - Stark anwenderabhängig
-

Kurzfazit:

Flammhärten ist ein flexibles, vergleichsweise einfaches Randschichthärteverfahren zur lokalen Martensitbildung, insbesondere für große oder geometrisch komplexe Bauteile. Es ist kostengünstig, jedoch weniger präzise und reproduzierbar als das Induktionshärten und erfordert erfahrene Prozessführung.

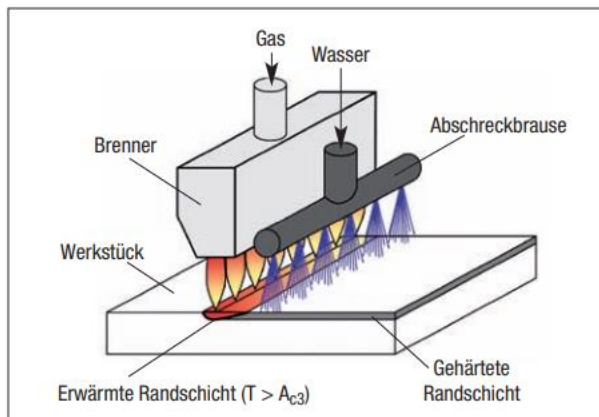


Bild 17 (links):
Flammhärten –
Prinzip des Vor-
schubverfahrens

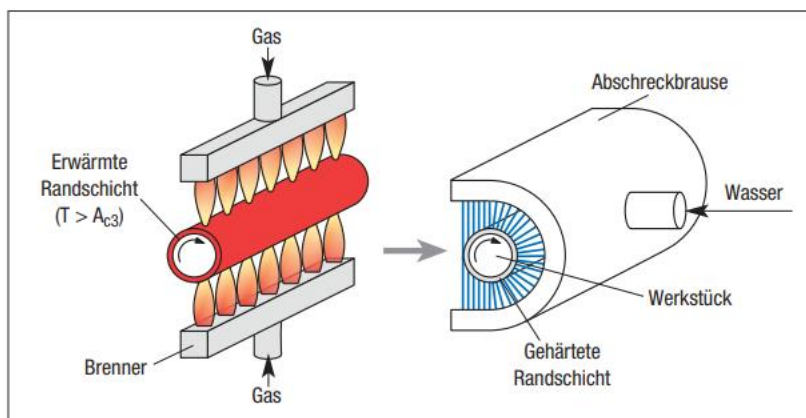


Bild 18 (unten):
Flammhärten –
Prinzip des
Umlaufverfahrens



Bild 21: Flammhärten einer Kolbenstange
für einen Schiffdieselmotor

Laserstrahlhärten

(Lokales Austenitisieren durch Laserstrahl + Selbstabschrecken → martensitische Randschicht)

(1) Ziel des Härteverfahrens

- **Hochpräzise, lokal begrenzte Randschichthärtung**
- Erzeugung einer **harten, verschleißfesten Oberfläche** bei unverändert zähem Kern
- **Minimaler Wärmeeintrag**, höchste Maß- und Formgenauigkeit
- Ideal für komplexe Geometrien und endbearbeitete Bauteile

(2) Geeignete Stähle

- Un- und niedriglegierte Stähle
- Erforderlich:
 - C-Gehalt $\geq \sim 0,35 \%$
- Typisch:
 - C45
 - 42CrMo4
 - 50CrV4
- Einsatzstähle ohne Voraufkohlen **nicht geeignet**

(3) Gefügeumwandlungen

- **Sehr lokales Austenitisieren** der Oberfläche
- **Selbstabschrecken** durch Wärmeableitung in den kalten Kern
- Ergebnis:
 - Rand → **feiner Martensit**
 - Übergangszone → Martensit/Bainit
- Kern:
 - vollständig unverändert
- Sehr steiler Härte- und Gefügegradient

(4) ZTU-Diagramm & Abschreckkurven

- ZTU relevant zur Beurteilung der **kritischen Abkühlgeschwindigkeit**
- Abschreckcharakter:
 - extrem hoch (vergleichbar Wasserabschreckung)
- Klassische Abschreckkurven:
 - **nicht extern**, sondern werkstoffintern (Selbstabschrecken)

(5) Prozesse / Anlagen / Atmosphäre

- **Laseranlagen:**
 - Diodenlaser

- Faserlaser
 - CO₂-Laser
 - Atmosphäre:
 - Umgebungsluft
 - optional Schutzgas (Oxidationsreduktion)
 - Kein Ofen, kein Abschreckbad
-

(6) Standard-Prozessparameter

- Austenitisierungstemperatur (Rand):
 - 850—1100 °C
 - Laserleistung:
 - werkstück- und geometrieabhängig
 - Vorschubgeschwindigkeit:
 - mm/s bis cm/s
 - Prozesssteuerung:
 - Spotgröße
 - Leistungsprofil
 - Scanstrategie
-

(7) Abschrecken

- **Kein externes Abschreckmedium**
 - Abschreckung erfolgt:
 - durch Wärmeabfuhr in den kalten Kern
 - Vorteil:
 - keine Abschreckrisse
 - keine Medienrückstände
-

(8) Anlassprozess

- **Empfohlen**
 - Ziel:
 - Spannungsabbau
 - Reduktion der Rand-Sprödigkeit
 - Typisch:
 - 150—250 °C
 - kurze Zeiten
 - Teilweise inline realisierbar
-

(9) Spannungszustände im Bauteil

- Randschicht:
 - **ausgeprägte Druckeigenspannungen (sehr günstig)**
- Kern:
 - spannungsarm
- Ergebnis:

- sehr hohe Ermüdungsfestigkeit
- geringe Rissneigung

(10) Verzug (1 = sehr gering ... 5 = sehr stark)

- **Bewertung: 1**
- Einer der größten Vorteile des Laserhärtens
- Ideal für:
 - Maß- und formkritische Präzisionsbauteile

(11) Verzunderung

- **Sehr gering**
- Kurzzeitige Erwärmung
- Optional Schutzgas → nahezu oxidfrei
- In vielen Fällen keine Nacharbeit erforderlich

(12) Randentkohlung / Randaufkohlung

- **Nicht relevant**
- Prozesszeiten extrem kurz
- Keine nennenswerte Diffusion

(13) Erzielbare Eigenschaften

- **Oberflächenhärte:**
 - 50—62 HRC
- **Einhärtetiefe:**
 - 0,3—1,5 mm
- Sehr feines Martensitgefüge
- Hervorragende Verschleiß- und Ermüdungseigenschaften

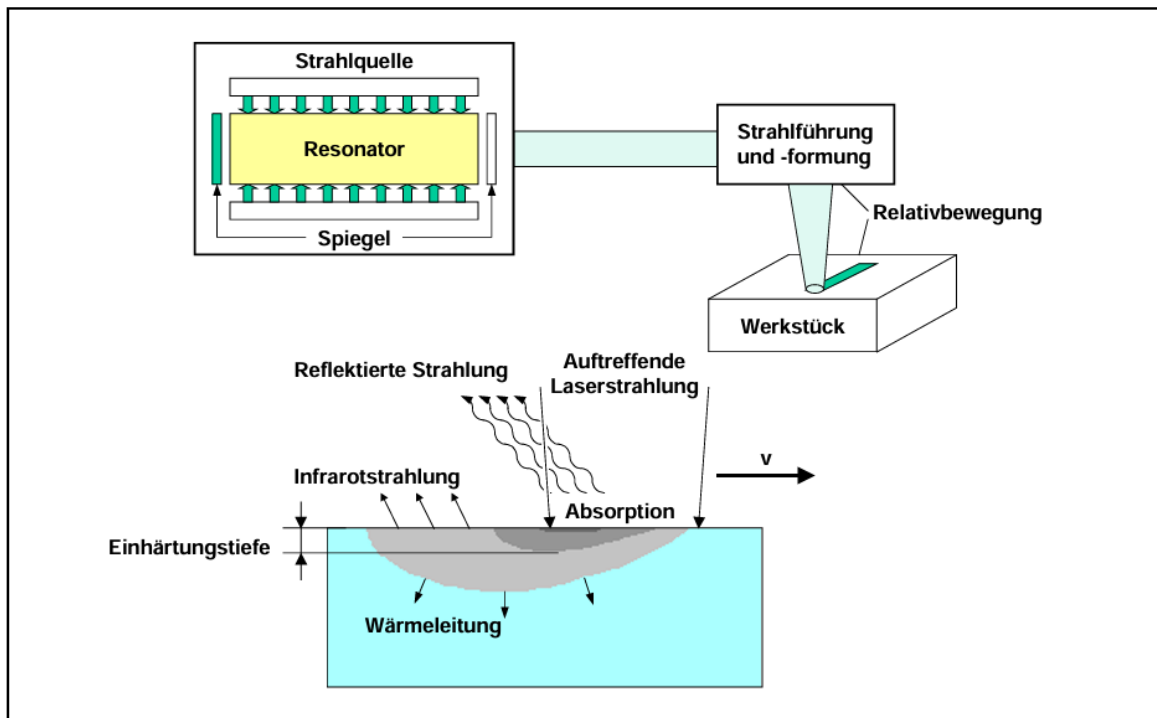
(14) Einfluss auf Dauerhaltbarkeit

(1 = optimal ... 5 = stark schädlich)

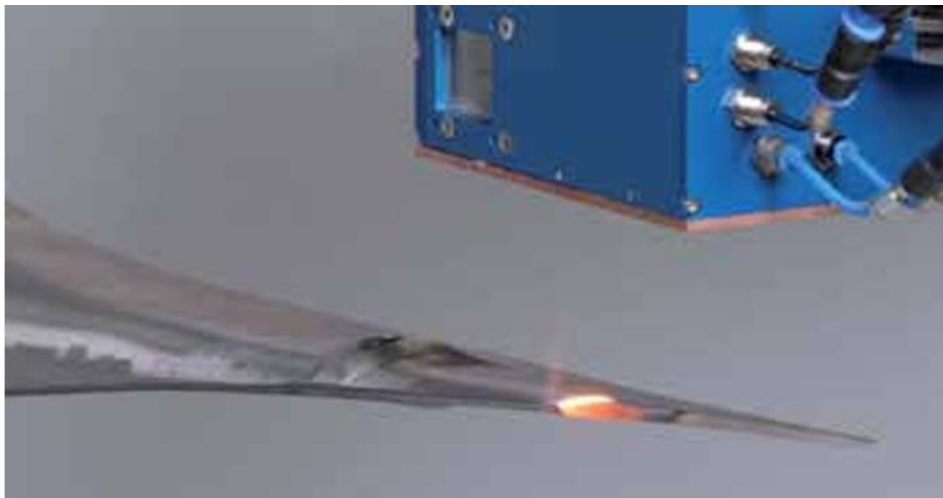
- **Bewertung: 1**
- Sehr positiv:
 - Ermüdung
 - Roll- und Gleitkontakt
- Einschränkung:
 - begrenzte Härtetiefe
 - hohe Anlagenkosten

Kurzfazit:

Laserhärten ist ein hochpräzises, verzugsarmes Randschichthärteverfahren mit extrem lokalem Wärmeeintrag und sehr guter Reproduzierbarkeit. Es eignet sich ideal für maßkritische Funktionsflächen, ersetzt jedoch kein Einsatzhärten bei tiefen, tragfähigen Randschichten.



Prinzip der Laserstrahlerwärmung



Elektronenstrahlhärten (EB-HÄRTEN)

(Hochpräzises, lokales Austenitisieren durch Elektronenstrahl im Vakuum + Selbstabschrecken)

(1) Ziel des Härteverfahrens

- **Extrem präzise, lokal begrenzte Randschichthärtung**
- Erzeugung einer **martensitischen Oberfläche** bei unverändertem Kern
- **Minimalster Wärmeeintrag**, höchste Maß- und Formgenauigkeit
- Einsatz für hochpräzise Funktionsflächen mit engsten Toleranzen

(2) Geeignete Stähle

- Un- und niedriglegierte Stähle
- Voraussetzung:
 - C-Gehalt $\geq \sim 0,35 \%$
- Typisch:
 - C45
 - 42CrMo4
 - Werkzeugstähle (geeignet, werkstoffabhängig)
- Einsatzstähle ohne Voraufkohlen **nicht geeignet**

(3) Gefügeumwandlungen

- **Sehr lokales Austenitisieren** der Oberfläche
- **Selbstabschrecken** durch Wärmeleitung in den kalten Kern
- Ergebnis:
 - Rand $\rightarrow$ **sehr feiner Martensit**
 - Übergangszone $\rightarrow$ Martensit/Bainit
- Kern:
 - vollständig unverändert
- Extrem steiler Härte- und Gefügegradient

(4) ZTU-Diagramm & Abschreckkurven

- ZTU relevant zur Bewertung der **kritischen Abkühlgeschwindigkeit**
- Abschreckcharakter:
 - extrem hoch (vergleichbar oder höher als Wasser)
- Keine externe Abschreckkurve:
 - **Selbstabschreckung** ist prozessimmanent

(5) Prozesse / Anlagen / Atmosphäre

- **Elektronenstrahlanlagen**
- Prozessumgebung:
 - **Hochvakuum**

- Atmosphäre:
 - vollständig oxidationsfrei
 - Sehr präzise Strahlführung (magnetisch)
-

(6) Standard-Prozessparameter

- Austenitisierungstemperatur (Rand):
 - 900—1200 °C
 - Elektronenenergie:
 - typ. 60—150 keV
 - Prozesszeiten:
 - **Millisekunden bis Sekunden**
 - Strahlparameter:
 - Leistung
 - Fokus
 - Scanstrategie
-

(7) Abschrecken

- **Kein externes Abschreckmedium**
 - Abschreckung erfolgt ausschließlich durch:
 - Wärmeabfuhr in den kalten Grundwerkstoff
 - Vorteil:
 - kein Rissrisiko durch Medien
 - keine Rückstände
-

(8) Anlassprozess

- **Empfohlen**
 - Ziel:
 - Abbau von Eigenspannungen
 - Reduktion der Rand-Sprödigkeit
 - Typisch:
 - 150—250 °C
 - kurze Haltezeiten
 - Optional je nach Bauteilanforderung
-

(9) Spannungszustände im Bauteil

- Randschicht:
 - **sehr hohe Druckeigenspannungen**
 - Kern:
 - spannungsarm
 - Insgesamt:
 - äußerst günstiger Zustand für Ermüdungsbeanspruchung
-

(10) Verzug (1 = sehr gering ... 5 = sehr stark)

- **Bewertung: 1**
 - Geringster Verzug aller Härteverfahren
 - Ideal für:
 - endbearbeitete
 - geometrisch komplexe
 - hochpräzise Bauteile
-

(11) Verzunderung

- **Keine**
 - Prozess im Hochvakuum
 - Oberfläche bleibt metallisch sauber
 - Keine Nacharbeit erforderlich
-

(12) Randentkohlung / Randaufkohlung

- **Nicht relevant**
 - Extrem kurze Prozesszeiten
 - Keine Diffusionseffekte
-

(13) Erzielbare Eigenschaften

- **Oberflächenhärte:**
 - 50—65 HRC
 - **Einhärtetiefe:**
 - 0,2—1,0 mm
 - Sehr feines Martensitgefüge
 - Exzellente Verschleiß- und Ermüdungseigenschaften bei dünner Schicht
-

(14) Einfluss auf Dauerhaltbarkeit

(1 = optimal ... 5 = stark schädlich)

- **Bewertung: 1**
 - Sehr positiv für:
 - hochbeanspruchte Funktionsflächen
 - Einschränkung:
 - begrenzte Härtetiefe
 - sehr hoher Anlagen- und Prozessaufwand
-

Kurzfazit:

Elektronenstrahlhärten ist das präziseste und verzugsärmste Randschichthärteverfahren. Es ermöglicht extrem lokal begrenzte, hochharte Martensitschichten ohne Oxidation, ist jedoch aufgrund von Vakuumtechnik und Anlagenkosten ein reines Hochtechnologie-Spezialverfahren.

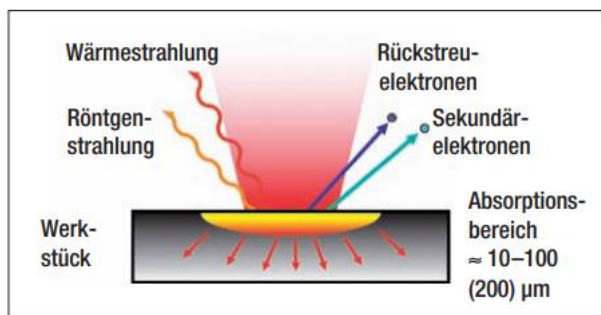
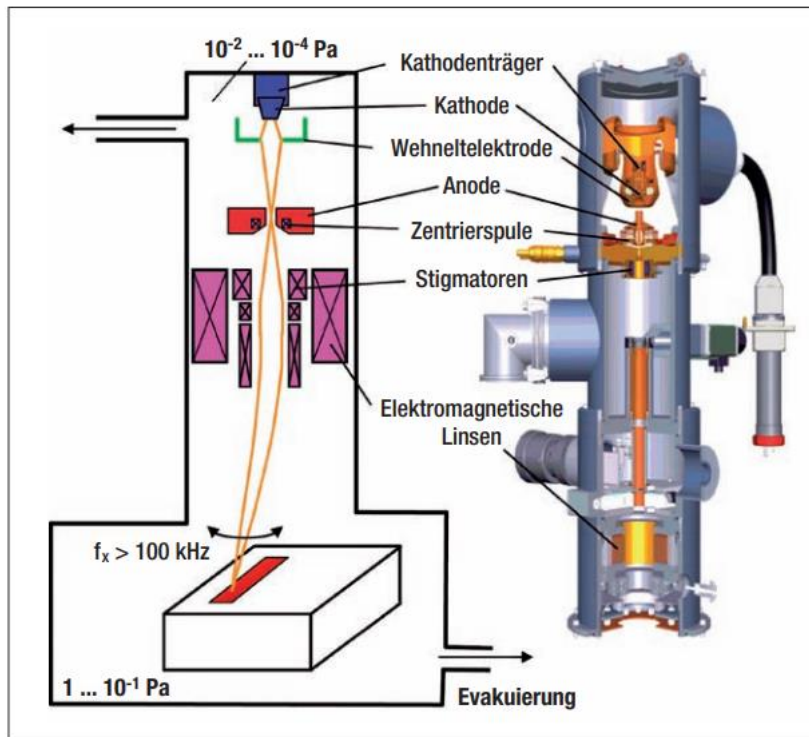


Bild 56 (oben):
Aufbau einer
Elektronenstrahl-
kanone

Bild 57 (links):
Durch den Elektro-
nenstrahl am
Werkstück aus-
gelöste Vorgänge



Partielles Härten oder Umschmelzen

Branche: Automotive
Bauteil: Nockenstück

Allg. Informationen zur Terminologie HÄRTEN

Gefügeumwandlung

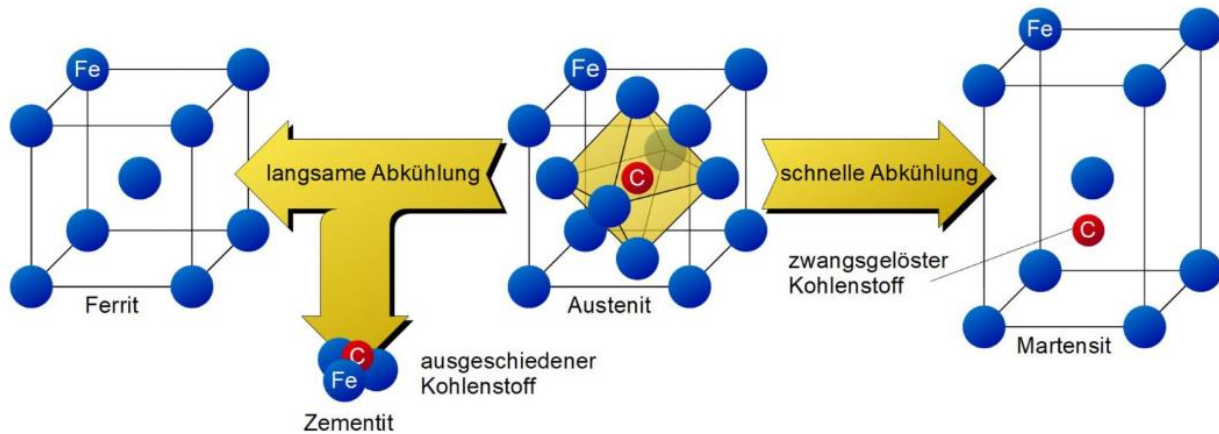


Abbildung: Gefügeänderung beim Abschrecken

Dauerschwingfestigkeit

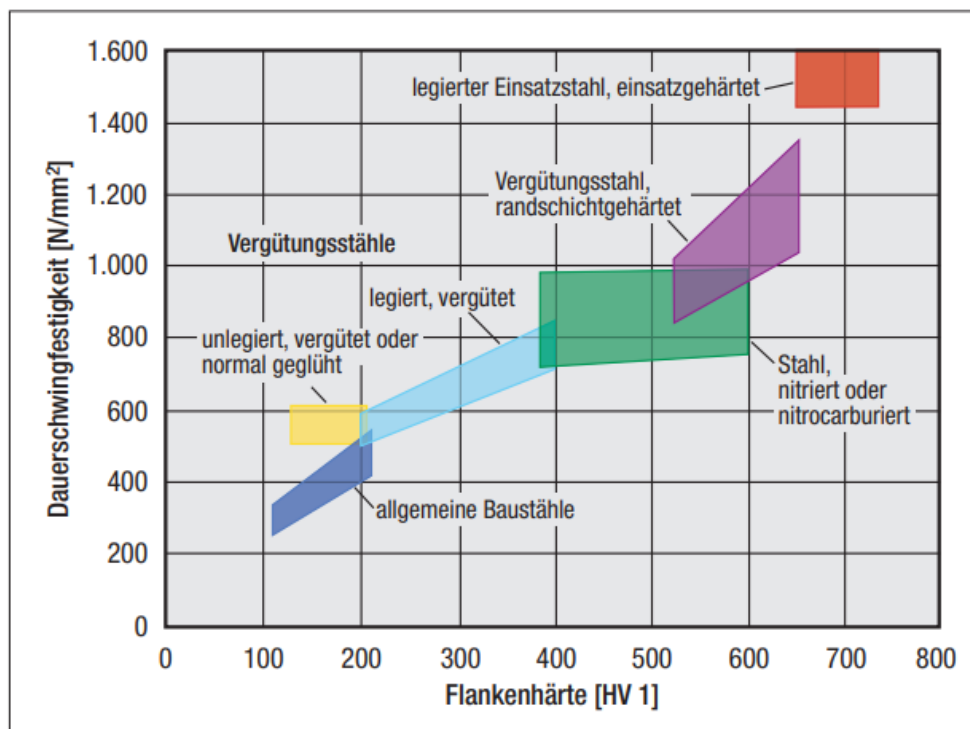


Bild 15: Dauerschwingfestigkeit von geradzahnnten Stirnrädern in Abhängigkeit von der Flankenhärte nach unterschiedlicher Wärmebehandlung

Tabelle der Härtbaren Stähle

Stahlgruppe	Stahl Nr.	Bezeichnung	Härteverfahren	Übliche max.Härte HRC	Eigenschaften
Einsatzstahl	1.0401	C15	Einsatzhärten	58-62	Gut zerspanbar
	1.2162	21MnCr5	Einsatzhärten	58-62	Sehr gut zerspanbar
	1.2764	X19NiCrMo4	Einsatzhärten	58-62	Hohe Kernfestigkeit, gute Zähigkeit, gut zerspanbar
	1.5752	15NiCr14	Einsatzhärten	58-62	Gute Zähigkeit
	1.6587	18CrNiMo7-6	Einsatzhärten	58-62	Erhöhte Zähigkeit und Kernfestigkeit
	1.7131	16MnCrS5	Einsatzhärten	58-62	Sehr gut zerspanbar
Federstahl	1.2101	62SiMnCr4	Härten/Vergüten	58-64 40-46*	Gute Zähigkeit, Vorzügliche Federungseigenschaften*
	1.7792	58CrMoV4	Härten/ Randschichthärten	58-62	Alte Bezeichnung: 58CVZ, ähnliche Eigenschaften wie 1.8561
	1.8561	58CrV4	Härten/ Randschichthärten	58-62	Hochschlagfest, sehr gut zum Randschicht- Induktionshärten
Wälzlagerstahl	1.3505	100Cr6	Härten/ Randschichthärten	60-64	Wird auch Randschichtgehärtet
Kaltarbeitsstahl	1.2363	X100CrMoV5	Vakuumhärten	60-63	gute Verschleissfestigkeit, zäher als 1.2379
	1.2379	X153CrMoV12	Vakuumhärten	59-63	hohe Verschleissfestigkeit, zäher als 1.2436
	1.2436	X210CrW12	Härten aus dem Salzbad	60-64	sehr hohe Verschleissfestigkeit
	1.2721	50NiCr13	Härten	55-59	Gute Schlag- und Druckbelastbarkeit
	1.2767	45NiCrMo16	Härten	52-56	Höchste Widerstandsfestigkeit gegen Schlag und Druck
	1.2842	90MnCrV8	Härten	60-64	Sehr gut zerspanbar, Verschleissfest & Zäh (gut)
	1.2210	115CrV3	Härten	60-64	Gut zerspanbar, Verschleissfest & Zäh (gut)
	1.2510	100MnCrW4	Härten	59-63	Sehr gut zerspanbar, Verschleissfest & Zäh (gut)
	1.2550	60WCrV8	Härten	58-62	Schlagzäh
Vergütungsstahl	1.1191	C45E	Randschichthärten Induktion	56-60	Gut zerspanbar, nur bedingt schweisbar
	1.2312	40CrMnMoS8-6	Härten (Vergüten)	51-55 (34-40)	Gut zerspanbar
	1.2738	40CrMnNiMo8-6-4	Härten (Vergüten)	51-55 (34-40)	Hohe Zähigkeit
	1.6582	34CrNiMo6	Härten (Vergüten)	50-54 (34-40)	Gute Zähigkeit, wird oft induktiv Randschichtgehärtet
	1.7225	42CrMo4	Härten (Vergüten)	53-57 (34-40)	Gut zerspanbar, wird oft induktiv Randschichtgehärtet
	1.7792	58CrMoV4	Härten/ Randschichthärten	58-62	Alte Bezeichnung: 58CVZ, ähnliche Eigenschaften wie 1.8561
	1.8561	58CrV4	Härten/ Randschichthärten	58-62	Hochschlagfest, sehr gut zum Randschichthärten, vergütet +QT
Warmarbeitsstahl	1.2343	X37CrMoV5-1	Vakuumhärten	50-54	Hohe Zähigkeit, gute Warmfestigkeitseigenschaften
	1.2344	X40CrMoV5-1	Vakuumhärten	50-55	Hohe Zähigkeit, gute Warmverschleissfestigkeit
Rostfrei härbar	1.2083	X40Cr14	Vakuumhärten	52-56	Korrosionsbeständig gegen Wasser
	1.2085	X33CrS16	Vakuumhärten	46-50	Gut zerspanbar, gute korrosionsbeständigkeit
	1.2316	X38CrMo16+S	Vakuumhärten	46-50	Gut zerspanbar, gute korrosionsbeständigkeit
	1.4034	X46Cr13	Vakuumhärten	52-56	Korrosionsbeständig gegen Wasser
	1.4112	X90CrMoV18	Vakuumhärten	55-59	Hohe Härte und Verschleissfestigkeit, sehr gute Korrosionsbeständigkeit
Maraging Stahl	1.2709	X3NiCoMoTi18-9-5	Ausscheidungshärten	53-58	Hohes Streckgrenzenverhältnis, hohe Zugfestigkeit, geringe Massänderung
	1.6358	X2NiCoMo18-9-5	Ausscheidungshärten	53-58	Hohes Streckgrenzenverhältnis, hohe Zugfestigkeit, geringe Massänderung

Stähle für Randschichthärtung, erreichbare Härten und Einhärtetiefen

Stähle für das Randschichthärten

DIN Kurz- bezeichnung	DIN Werk- stoff	Analyse										erreichbare Härte in Rockwell HRC									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	50556065										
			≤ %	± %	≤ %	≤ %	≤ %	%	%	%	%										
Vergütungsstähle																					
20 MnB4	1,5525																				
C 35	1,0501	0,35	0,35	0,8	0,045	0,045															
35 S 20 ¹	1,0726	0,35	0,4	0,9	0,06	0,25															
Ck 35	1,1181	0,35	0,35	0,8	0,035	0,035															
Cf 35	1,1183	0,35	0,35	0,8	0,025	0,035															
C 45	1,1191	0,45	0,35	0,8	0,045	0,045															
45 S 20 ¹	1,0727	0,45	0,4	0,9	0,06	0,25															
Ck 45	1,1191	0,45	0,35	0,8	0,035	0,035															
Cf 45	1,1193	0,45	0,35	0,8	0,025	0,035															
Cf 53	1,1213	0,53	0,35	0,7	0,025	0,035															
60 S 20 ¹	1,0728	0,6	0,4	0,9	0,06	0,25															
C60	1,1221																				
Ck 60	1,1221	0,06	0,35	0,9	0,035	0,035															
C 67 S	1,1231																				
Cf 70	1,1249	0,7	0,35	0,35	0,025	0,035															
79 Ni 1	1,6971	0,79	0,3	0,55	0,025	0,025	0,15			0,15	0,05										
36 Mn 5	1,5067	0,36	0,35	1,5	0,035	0,035															
40 Mn 4	1,5038	0,4	0,5	1,1	0,035	0,035															
37 MnSi 5 ²	1,5122	0,37	1,4	1,4	0,035	0,035															
38 MnSi 4 ²	1,512	0,38	0,9	1,2	0,035	0,035															
46 MnSi 4 ²	1,5121	0,46	0,9	1,2	0,035	0,035															
53 MnSi 4 ²	1,5141	0,53	1	1,2	0,035	0,035															
45 Cr 2	1,7005	0,45	0,4	0,8	0,025	0,035	0,5														
34 Cr 4	1,7033	0,34	0,4	0,9	0,035	0,035	1,05														
37 Cr 4	1,7034	0,37	0,4	0,9	0,035	0,035	1,05														
38 Cr 4	1,7043	0,38	0,4	0,9	0,025	0,035	1,05														
41 Cr 4	1,7035	0,41	0,4	0,8	0,035	0,035	1,05														
42 Cr 4	1,7045	0,42	0,42	0,8	0,025	0,035	1,05														
34 CrMo 4	1,722	0,34	0,4	0,8	0,035	0,035	1,05	0,25													
41 CrMo 4	1,7223	0,41	0,4	0,8	0,025	0,035	1,05	0,25													
42 CrMo 4	1,7225	0,42	0,4	0,8	0,035	0,035	1,05	0,25													
42 CrMoS 4	1,7227																				
49 CrMo 4	1,7238	0,49	0,4	0,8	0,025	0,035	1,05	0,25													
50 CrMo 4	1,7228	0,5	0,4	0,8	0,035	0,035	1,05	0,25													
50 Cr V 4	1,8159	0,5	0,4	1,1	0,035	0,035	1,05				0,15										
51 Cr V 4	1,8161																				
58 Cr V 4	1,8161	0,58	0,35	1,1	0,035	0,035	1,05				0,09										
58 CrMo V 4	1,7792																				
30 CrNiMo 8	1,658	0,3	0,4	0,6	0,035	0,035	2	0,35	2												
34 CrNiMo 6	1,6582	0,34	0,4	0,7	0,035	0,035	1,55	0,25	1,55												
36 CrNiMo 4	1,6511	0,36	0,4	0,8	0,035	0,035	1,05	0,25	1,05												
Werkzeugstähle																					
X 41 CrMo V 5,1	1,2344	0,41	1	0,4	0,015	0,01	5	1,3		0,5											
86 CrMo V 7	1,2327	0,86	0,35	0,45	0,03	0,03	1,75	0,3	0,1												
Nichtrostende Stähle																					
X 20 Cr 13	1,2082	0,2	0,5	0,4	0,035	0,035	13														
X 39 CrMo 17-1	1,4122																				
X 40 Cr 13	1,2083	0,4	0,5	0,4	0,03	0,03	13														
X 40 CrMo V 5-1	1,2344																				
X 46 Cr 13	1,4034																				
X 90 CrMo V 18	1,4112	0,9	1	1	0,045	0,03	18	1,15													
X 90 CrCoMo V 17	1,4535	0,9	1	1	0,045	0,03	16,5	0,5	0,25	0,25 ³											
X 105 CrMo 17	1,4125	1,05	1	1	0,045	0,03	17	0,6			0,1										
X 153 CrMo V 12	1,2379																				
ETG 88																					
ETG 100																					
EN-GJS-600-3	0,706																				
Kugellagerstahl																					
100 Cr 6	1,3505	1	0,35	0,4	0,03	0,025	1,55														
Ventilstähle																					
X 17 CrNi 16-2	1,4057																				
X 45 CrSi 9 3	1,4718	0,45	3,5	0,5	0,03	0,25	9,5														
X 80 CrNiSi 20	1,4747	0,8	2,75	1	0,03	0,03	20			1,5											
Gusswerkstoffe																					
GG - 25	1,6025																				
GTS - 45																					
GTS - 65																					
GGG - 60	1,706																				
GGG - 70	1,707																				
Qst 34.3	1,0213																				
St 52-3	1,057																				

Bemerkungen

- Härteschwankungen möglich
- rissempfindlich bei stark polierten Teilen
- + ca. 1,5% Co

Härtetiefen

- max. 2 mm
- max. 4 mm
- max. 6 mm
- über 6 mm

Härtetiefen bei Randschichthärten

Definition

Härtetiefen bei Randschichthärten, Einsatzhärten,
Nitrieren und Hard-Inox®-P

SHD Einhärtungstiefe nach Randschichthärten.

(surface-hardening hardness depth) alt: *Rht*

Senkrechter Abstand von der Oberfläche bis zu der Stelle, die eine
Grenzhärte = 80% der min. Oberflächenhärte aufweist

CHD Einsatzhärtungs-Härtetiefe. (case-hardening hardness depth) alt: *Eht*

Senkrechter Abstand von der Oberfläche bis zu der Stelle, die eine
Grenzhärte = 550 HV 1 aufweist

NHD Nitrierhärtetiefe. (nitriding hardness depth) alt: *Nht*

Senkrechter Abstand von der Oberfläche bis zu der Stelle, die eine
Grenzhärte = (Kernhärte + 50 HV) aufweist

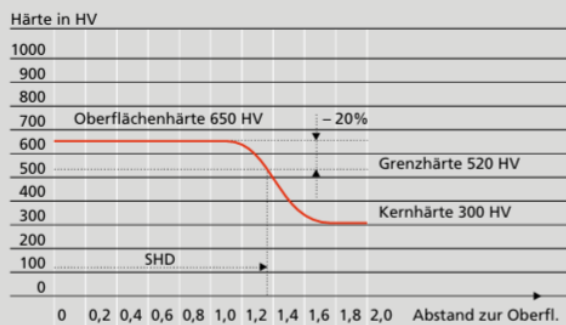
NCHD Stickstoff-Einsatzhärtungs-Härtetiefe nach HARD-INOX®-P.

(nitrogen case-hardening hardness depth) alt: *Aht*

Senkrechter Abstand von der Oberfläche bis zu der Stelle, die eine
Grenzhärte = (Kernhärte + 20 HV) aufweist

Typische Härteverlaufskurven (Beispiele)

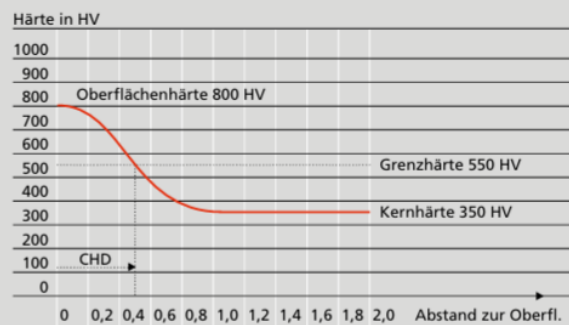
Randschichthärten



Material: 1.7225 (42CrMo4)

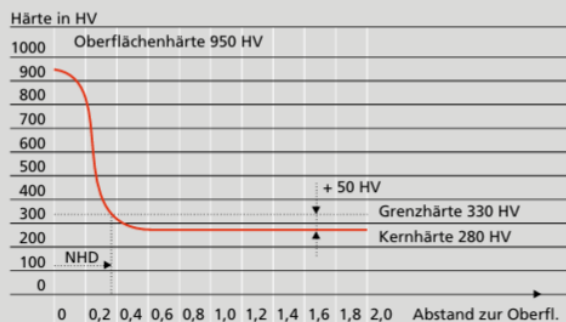
Für das Randschichthärten eignen sich üblicherweise
Werkstoffe mit normalisiertem oder vergütetem Gefüge
(Festigkeit max. 850 N/mm²) sowie Feinkornstähle.

Einsatzhärten



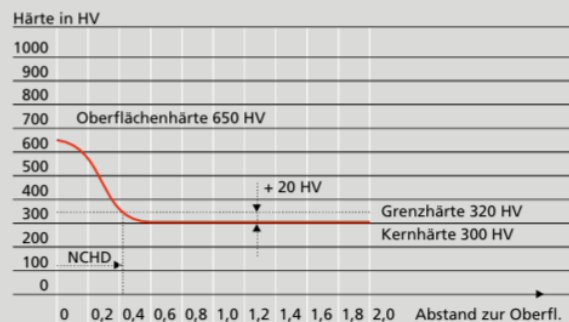
Material: legierte Einsatzstähle z.B. 1.7131, 1.5752, 1.6587

Nitrieren



Material: 1.8550 (34CrAlNi7)

HARD-INOX®-P

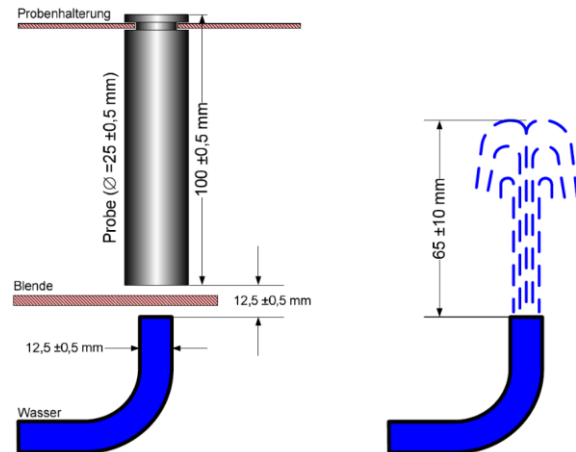


Material: 1.4104 (X14CrMoS17)

Stirnabschreckversuch nach Jominy (Jominy-Test)



Stirnabschreckversuch nach Jominy: DIN EN ISO 642



Zweck des Jominy-Versuchs

Der Stirnabschreckversuch nach Jominy dient zur Bestimmung der Härtbarkeit eines Stahls, also der Fähigkeit, bei gegebener Abkühlung über den Querschnitt Martensit auszubilden.

☞ Nicht die maximale Härte, sondern deren Abnahme mit der Abkühlgeschwindigkeit steht im Fokus.

Prinzip des Versuchs

- Zylindrische Normprobe ($\varnothing$ 25 mm, Länge 100 mm)
- Austenitisieren (werkstoffspezifisch)
- Einseitiges Abschrecken der Stirnfläche mit Wasserstrahl
- Entlang der Probenlänge stellt sich ein kontinuierlicher Abkühlgradient ein:
 - Stirn → sehr schnelle Abkühlung
 - entfernt → zunehmend langsamere Abkühlung

Ergebnis & Auswertung

- Nach dem Härten:
 - Längsflächen angeschliffen
 - Härtemessung (HRC/HV) in definierten Abständen von der Stirn
- Darstellung als Jominy-Kurve:
 - Härte vs. Abstand von der Abschreckstirn

Diese Kurve ist charakteristisch für jeden Stahl.

Was sagt der Jominy-Versuch aus?

- Härtbarkeit des Stahls
- Einfluss von:
 - Legierungselementen (Cr, Mn, Mo, Ni, B)

- Kohlenstoffgehalt
- Abschätzung:
 - erreichbare Einhärtetiefe
 - Durchhärthbarkeit realer Bauteile

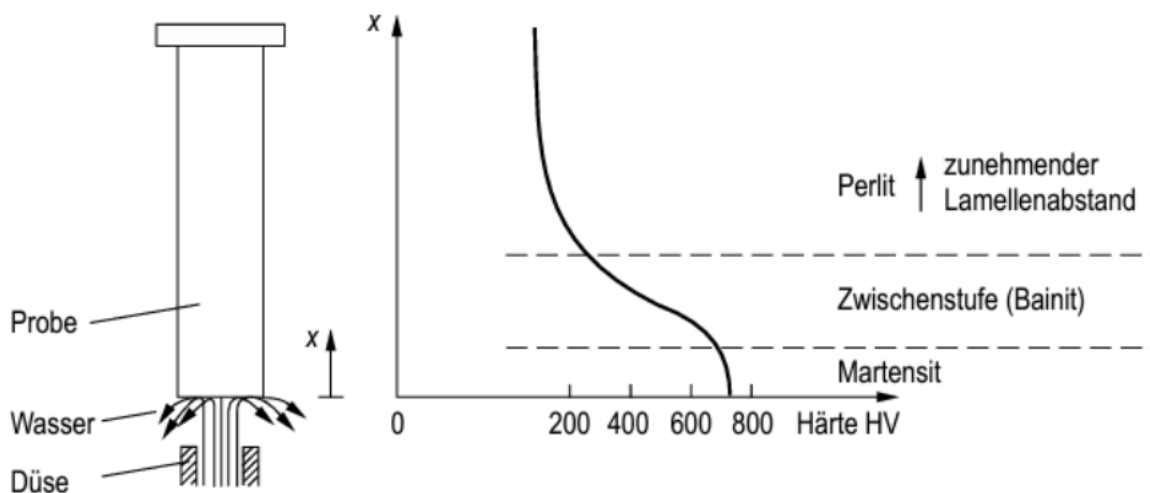
! Zwei Stähle können gleiche Maximalhärte, aber sehr unterschiedliche Härtbarkeit besitzen.

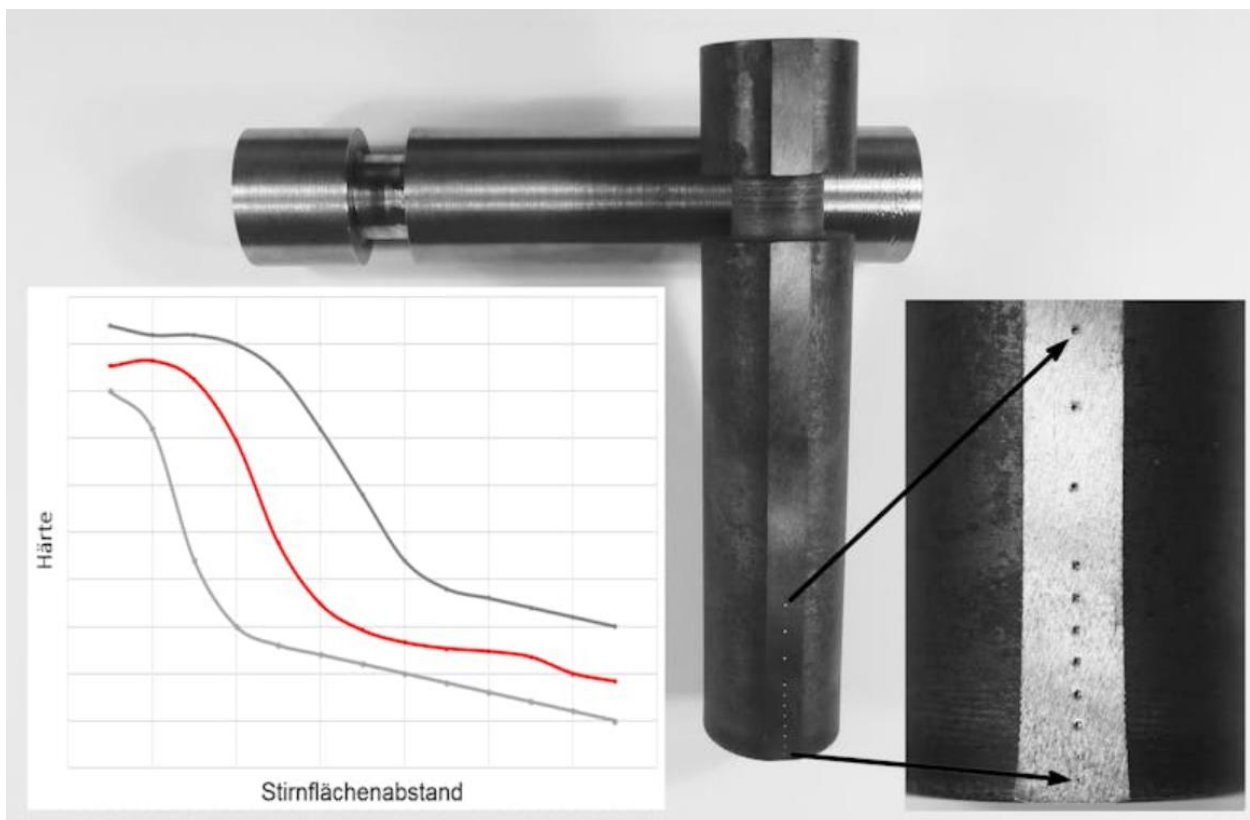
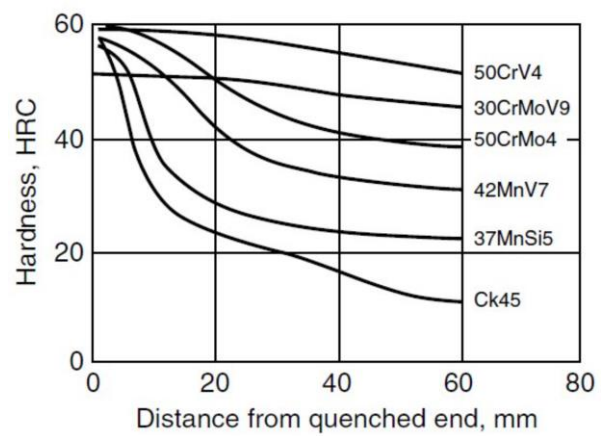
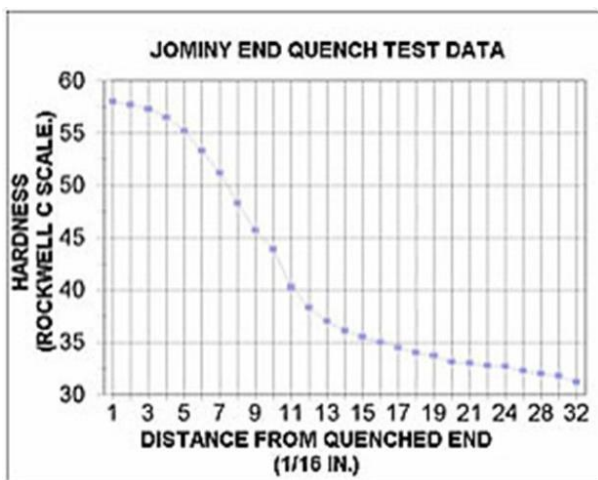
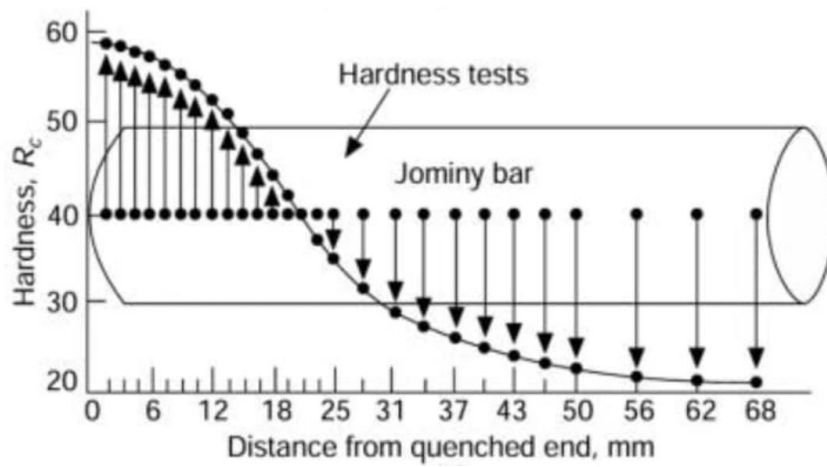
Bedeutung für die Praxis

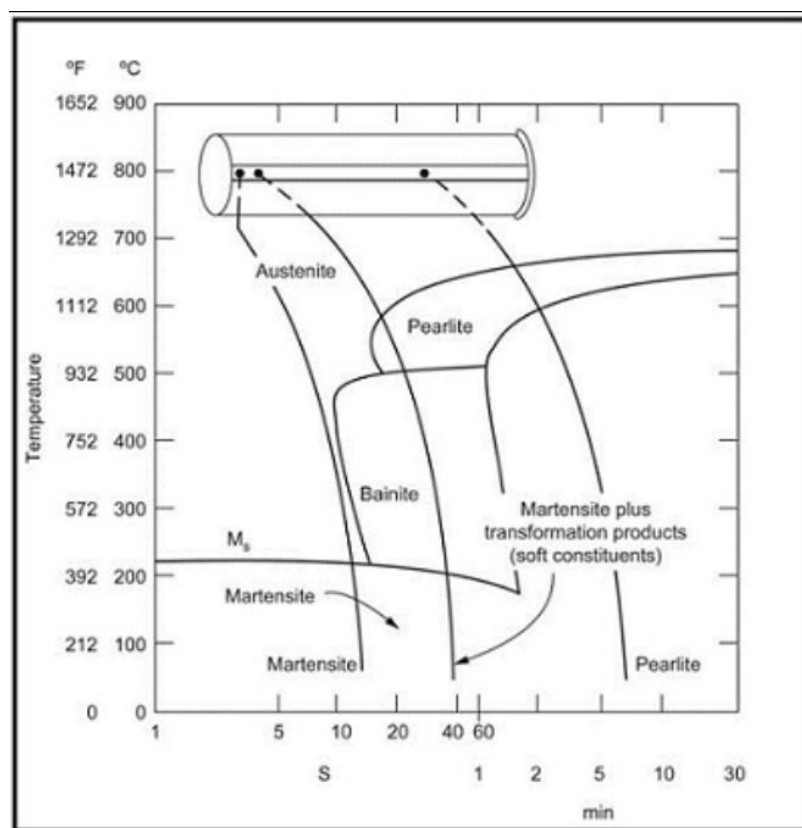
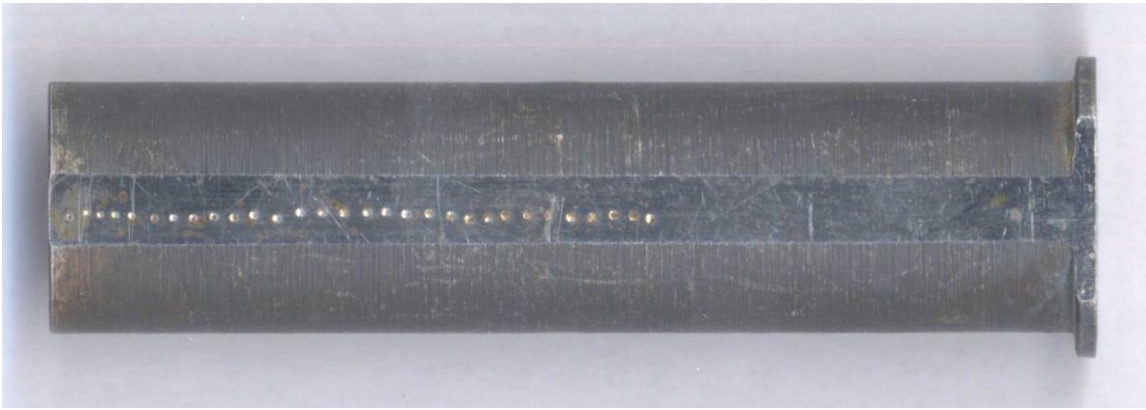
- Auswahl geeigneter Stähle für:
 - dicke Querschnitte
 - hohe Kernfestigkeit
 - Auslegung von:
 - Abschreckmedium
 - Bauteilgeometrie
 - Grundlage für:
 - Einsatzhärten
 - Vergüten
 - Induktiv- und Flammhärten
-

Kurzfazit:

Der Stirnabschreckversuch nach Jominy ist ein genormtes Verfahren zur Bewertung der Härtbarkeit von Stählen. Er zeigt, wie stark die Härte eines Stahls mit abnehmender Abkühlgeschwindigkeit abfällt und erlaubt damit Rückschlüsse auf die Einhärtetiefe und die Eignung für unterschiedliche Bauteilgeometrien.







Theoretisch erreichbare Höchsthärt

Anwendbar bei einem C-Gehalt von 0,1 bis 0,6 %

Härte in HRC = $0,5 \cdot C \cdot 100 + 35$

C = Kohlenstoffgehalt in %

Härtefehler

FEHLER BEIM HÄRTEN

FOLGEN

LÖSUNG

Konstruktionsfehler. Scharfe Kanten, Werkstück hat keine Entlastungslöcher.	Risse und Kantenausbrüche	Konstruktion muss gemäß DIN erfolgen.
Werkzeug wurde nicht auf die richtige Härtetemperatur gebracht o. Haltezeit zu kurz.	Keine oder nur mäßige Härteannahme	Unter Luftabschluss weichglühen und Härtung bei richtiger Temperatur wiederholen.
Werkzeug wurde zu hoch gehärtet, evtl. überhitzt oder zu lange auf der Härtetemperatur gehalten.	Härterisse, starker Verzug, Ausbrüche	Unter Luftabschluss weichglühen und Härtung bei richtiger Temperatur wiederholen. Verbranntes Werkzeug kann nicht mehr verwendet werden.
Werkzeug wurde während des Härtens an der Oberfläche entkohl.	Keine Härteannahme an der Oberfläche	Abschleifen der Oberfläche, weichglühen und erneut in Vakuum oder Schutzgas härten.
Korn grenzbelegung im Härtegefüge durch zu volle Charge beim Abschrecken.	Risse und Ausbrüche	Härtecharge nicht zu voll packen.
Einseitiges Abkühlen.	Spannungsrisse	Gleichmäßig abkühlen.
Ungenügend angelassen.	Spannungsrisse	Mindestens 2 Mal anlassen.
Zu frühes Waschen (1.2510) von Teilen die noch über 100° C Kerntemperatur aufweisen.	Risse	Teile erst handwarm waschen.
Fehlende Entlastungsschlitze beim Drahterodieren.	Risse	Die Konstruktion ändern.

HÄRTEFEHLER

Fehler	mögliche Ursache
Werkstück nicht genügend hart	Härtetemperatur war zu niedrig Abschreckmittel war zu warm Abschreckmittel war falsch, Öl statt Wasser Anlasstemperatur war zu hoch
Werkstück ungleichmäßig hart	Werkstück wurde zu schnell, deshalb ungleichmäßig erwärmt Beim Abschrecken haben Dampfblasenbildung oder sonstige Verunreinigungen den Zutritt des Wassers beeinträchtigt
Werkstück zu hart und spröde	Härtetemperatur zu hoch Abschreckmittel wirkte zu schroff, Wasser anstatt Öl Werkstück wurde nicht oder zu wenig angelassen
Werkstück verzogen	Werkstück wurde falsch in das Abschreckbad getaucht Werkstück besaß bereits vor dem Härten Spannungen, die von der vorherigen Bearbeitung herrührten. Durch die Wärmebehandlung wurden sie frei und haben das Werkstück verzogen
Werkstück hat Härterisse	Werkstück wurde zu hoch erwärmt, zu schroff abgeschreckt, nicht oder zu wenig angelassen

Kennzeichnung & Abkürzungen

Stahl Kennzeichnung (Buchstabenschlüssel) des Wärmebehandlungszustandes, bei Anlieferung ab Stahlwerk (Händler), siehe nachfolgende Tabelle, nur Auszug es gibt weitere Behandlungszustände.

Kurzzeichen	Altes Kurzzeichen	Bedeutung
+A		weichgeglüht
+AC	GKZ	Geglüht auf globularen Zementit
+AR		gewalzt ohne besondere Bedingungen
+AT		lösungsgeglüht
+BC		HW (warmgeformt) + gestrahlt
+C	K	kaltverfestigt
+CC		unverformter Strangguss
+Cnnn		kaltverfestigt mit Rm >= nnn MPA
+CR		kaltgewalzt
+DC		dem Hersteller überlassen
+FP	BG	auf Ferrit-Perlit Gefüge behandelt
+HC		warm-kalt geformt
+H		Grenzwerte der Härte für Stahlsorten mit (normaler) Härthbarkeit +H-Sorten ^[12]
+HH		Grenzwerte der Härte für Stähle mit eingeeigten Härthbarkeitsstreubändern +HH Sorten ^[12]
+HL		Grenzwerte der Härte für Stähle mit eingeeigten Härthbarkeitsstreubändern +HL-Sorten ^[12]
+HW ^a		warmgeformt ^a Der Begriff „warmgeformt“ schließt auch den Stranggusszustand (+CC) im Falle der Halbzeuge ein
+I		isothermisch behandelt
+LC		leicht kalt nachgezogen / nachgewalzt
+M		thermomechanisch umgeformt
+N	N	normalgeglüht
+NT		normalgeglüht und angelassen
+P		ausscheidungsgehärtet
+PI		HW (warmgeformt) + gebeizt
+Q		abgeschreckt
+QA		luftgehärtet
+QO		ölgehärtet
+QT	V	vergütet (gehärtet + angelassen auf Zähigkeit)
+QW		wassergehärtet
+RA		rekristallisationsgeglüht
+RM ^b		HW (warmgeformt) + vorbearbeitet ^b Solange der Begriff „vorbearbeitet“ nicht näher definiert ist, z. B.: durch Toleranzklassen, sind die Einzelheiten bei der Anfrage und Bestellung zu vereinbaren.
+S		auf Scherbarkeit behandelt
+SH		geschält
+T		angelassen
+TH		auf Härtespanne behandelt
+U	unbehandelt	unbehandelt
+WW		warmverfestigt

Begriffe und Abkürzungen aus der DIN ISO 15787^[2]

Kurzzeichen	Altes Kurzzeichen	Beschreibung Deutsch	Description English
DIN ISO 15787 ^[2]	DIN 6773		
CD	AT	Aufkohlungstiefe ergänzt um den Kohlenstoffgrenzwert CD _{0,35}	Carburization depth
CH*		Kernhärte	core hardness
CHD	Eht	Einsatzhärtungs-Härtetiefe	Case hardening depth
CLT	VS	Verbindungsschichtdicke	Compound layer thickness
HTO	WBA	Wärmebehandlungsanweisung	Heat-treatment order
HTD	WBP	Wärmebehandlungsplan	Heat-treatment document)
IGO**		Randoxidationstiefe	Intergranulare Oxidation
MP*		Stelle an der eine Prüfung durchgeführt werden muss	measuring point
NDE*		Nitritiefe ermittelt durch Ätzung	nitriding depth determined by etching
NHD	Nht	Nitrier-Härtetiefe	Nitriding hardness depth
OLT		Oxidschichtdicke	oxide layer thickness
SH*		Oberflächenhärte	surface hardness
SHD	DS - Rht	Einhärtungs-Härtetiefe (Synonym: Randschichthärtungs-Härtetiefe)	Surface hardening depth
		*noch nicht genormte Begriffe, diese werden aber in einer neuen Norm die zur Zeit in der Erarbeitung ist erscheinen. ** Begriff aus der ISO 6331-5	