

Institut für Fertigungstechnik / Lehrstuhl für Laser- und Oberflächentechnik

VORLESUNG FERTIGUNGSTECHNIK I

Prof. Dr. Frank Brückner,
Dresden, 18. Januar 2019

Prof. Dr. Eckhard Beyer

Vorlesungsplan FT I / Oberflächen- und Schichttechnik

14.12. Einführung

11.01. Oberflächenvorbehandlung
- Zusammenfassung / Einführung
- Verschleiß
- Reinigung

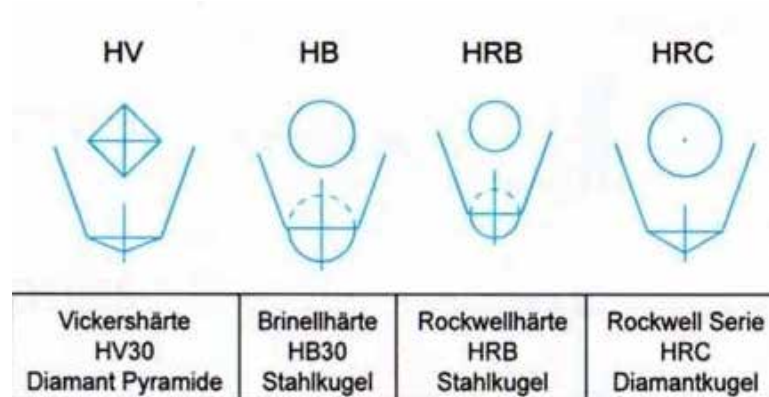
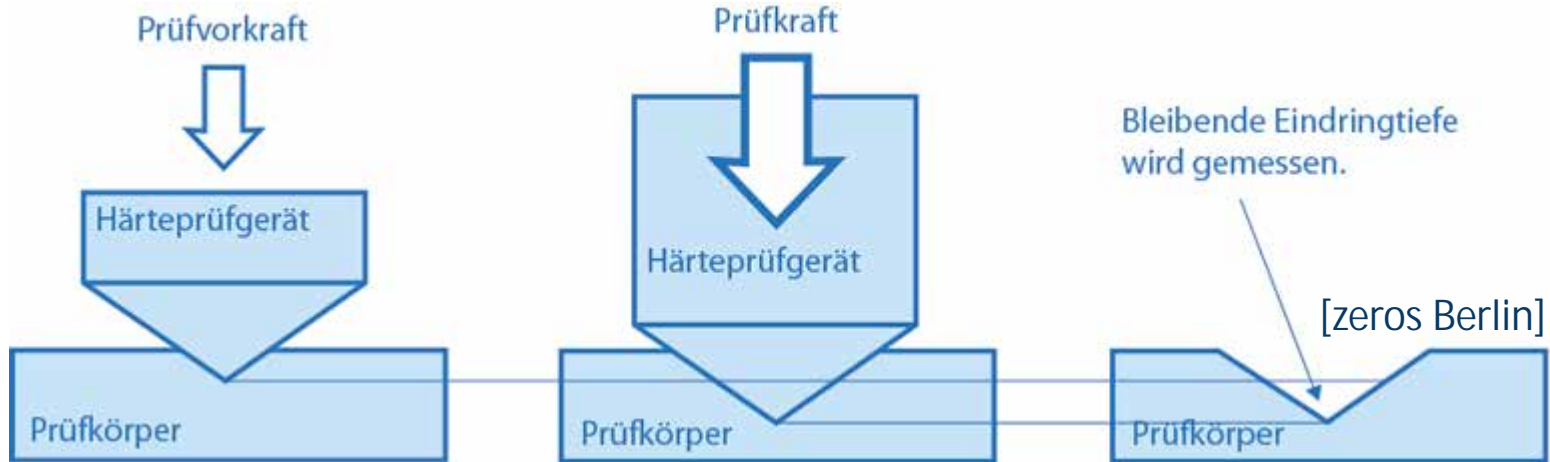
18.01. Härten/Nitrieren

25.01. chemische Verfahren/Galvanik

01.02. Ausblick

- Härte → Widerstand gegen Eindringen eines Gegenkörpers
 - Umso größer die Härte, desto größer der Widerstand
 - Messung:
Eindringen eines Probekörpers mit definierter Kraft über definierte Zeitdauer
→ Härteberechnung aus der Größe der verbleibenden Markierung an der Oberfläche
- Ziel des Härtens:
 - Erhöhte Festigkeit und Ermüdungsfestigkeit des Werkstoffs
 - Erhöhte Verschleißbeständigkeit
 - Erhöhte Lebensdauer des Bauteils

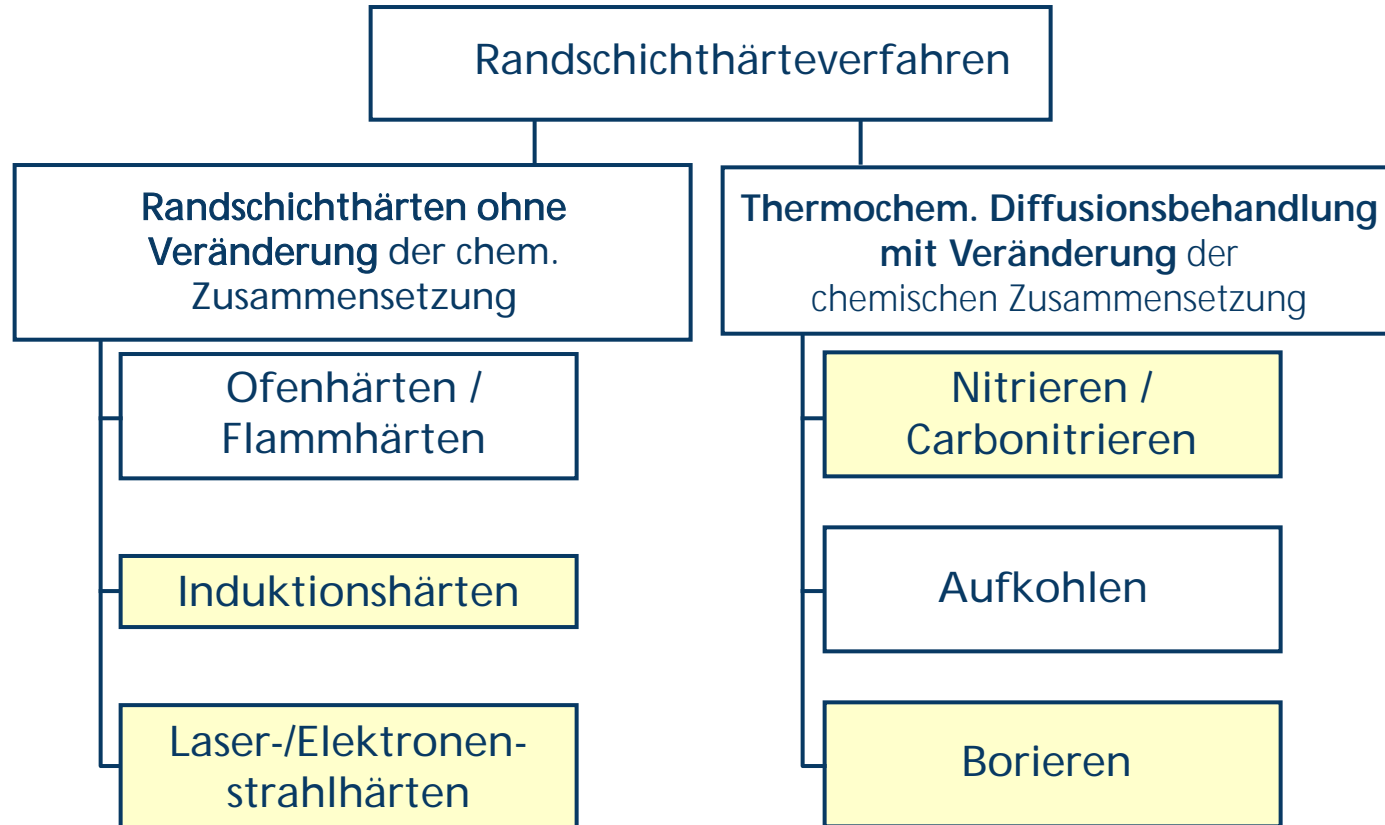
Härtemessung



Härtemechanismen

Umwandlungshärtung	Erzeugung harten Gefüges durch Wärmebehandlung
Ausscheidungshärtung	Zulegieren von Elementen, die zum Ausscheiden von metastabilen Phasen in fein verteilter Form führen
Kaltverfestigung	Erhöhung der Versetzungsdichte durch plastische Verformung unterhalb der Rekristallisationstemperatur
Kornfeinung	Erzeugung eines feineren, kleineren Korns im Gefüge durch geeignete Wärmebehandlung
Mischkristallverfestigung	Zulegieren von Elementen, die zum Einbau von Zwischengitter- oder Substitutionsatomen führen

Randschichthärten von Metallen



Diffusion: Konzentrationsausgleich durch molekularen Massetransport zwischen verschiedenen Teilvolumina eines makroskopischen Systems

1. Ficksches Gesetz:

$$\frac{dN}{dt} = - D A \frac{dc}{dx}$$

dN/dt

Teilchenstromdichte (J/m^2s^{-1})

dc/dx

Konzentrationsänderung ($N\ cm^{-4}$)

A

Querschnittsfläche (cm^2)

D

Diffusionskoeffizient ($cm^2\ s^{-1}$)

Maß für die Häufigkeit der Zusammenstöße der Partikel, also für die mittlere freie Weglänge l und die Geschwindigkeit v_T der Partikel

$$D = l \cdot v_T \cdot \frac{e}{e} \cdot \frac{cm^2}{s} \cdot \frac{\ddot{o}}{\emptyset}$$

Aggregatzustand	D_0 (cm ² s ⁻¹)
Gase	1 - 10 ⁻¹
Flüssigkeiten	10 ⁻⁵
Festkörper	10 ⁻⁵ - 10 ⁻²⁰

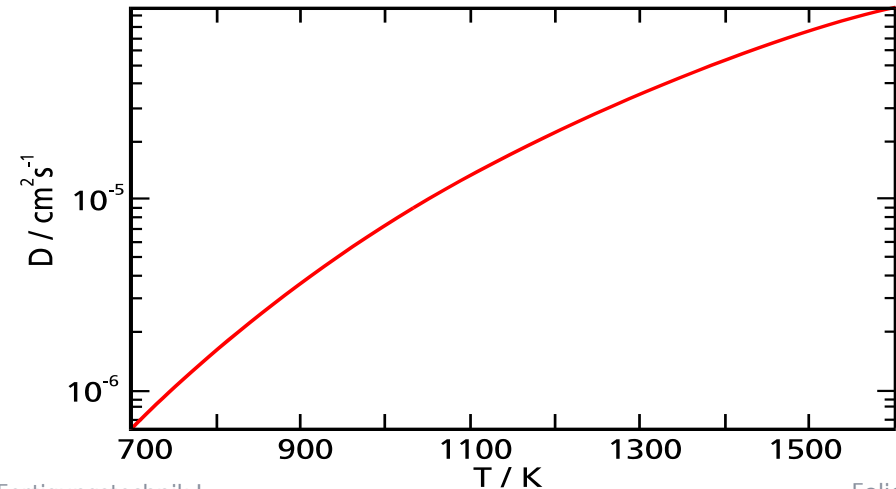
im Festkörper wird unterschieden in

- § **Selbstdiffusion**
- § **Zwischengitterdiffusion**
- § **Leerstellendiffusion**
- § **Korngrenzendiffusion**
- § **Oberflächendiffusion**

Abhängigkeit von T

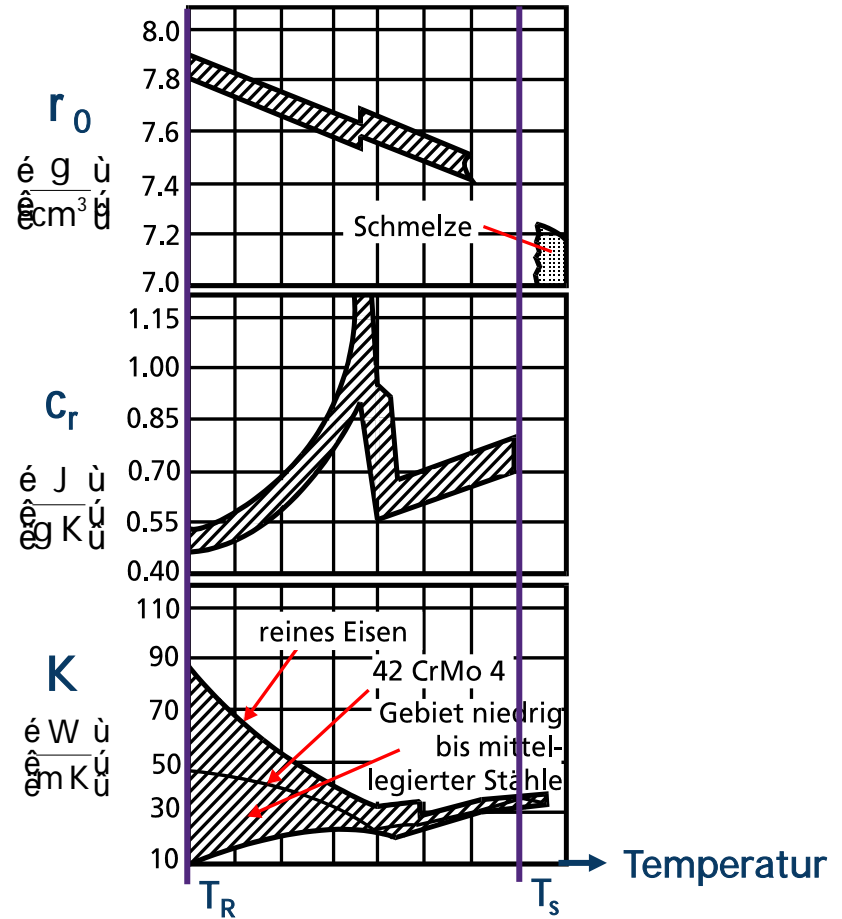
$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right)$$

Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten D für die Diffusion des Kohlenstoffs in α -Eisen, mit $D_0 = 0,02 \text{ cm}^2/\text{s}$

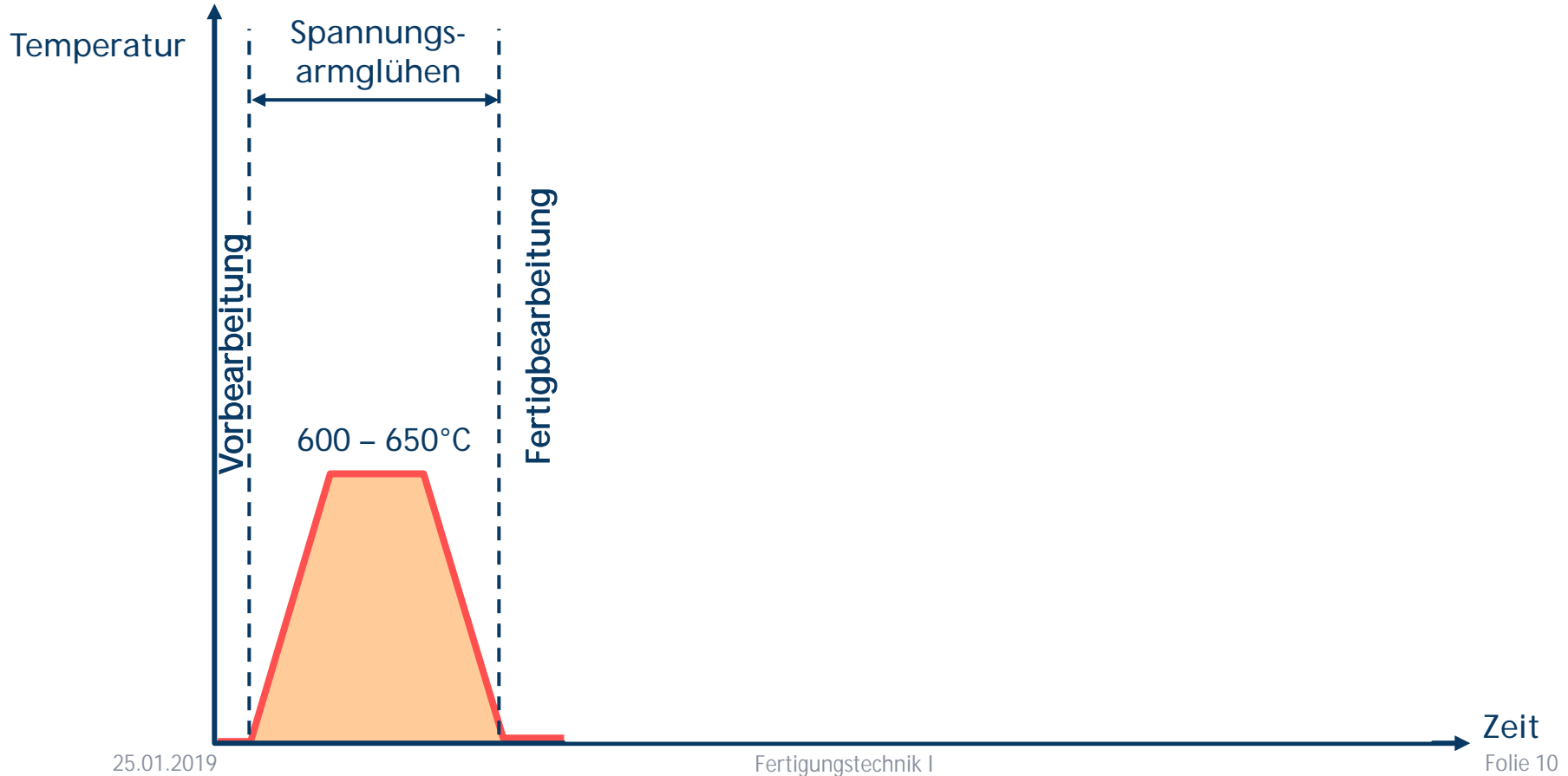


Temperaturabhängigkeit der Materialparameter von Eisen

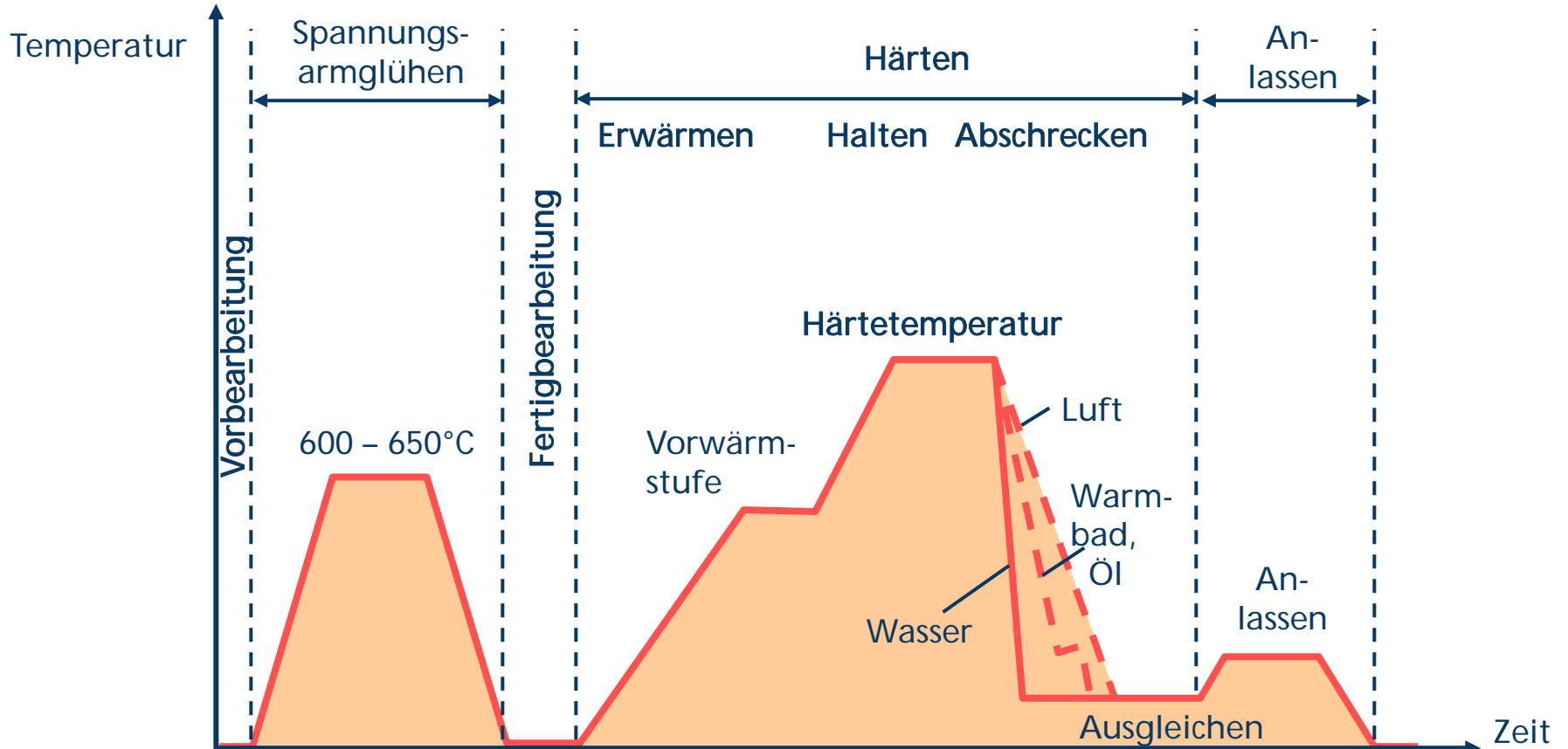
Dichte ρ
spezif. Wärmekapazität c
Wärmeleitfähigkeit K



Einordnung des Härtens in die Wärmebehandlungsverfahren

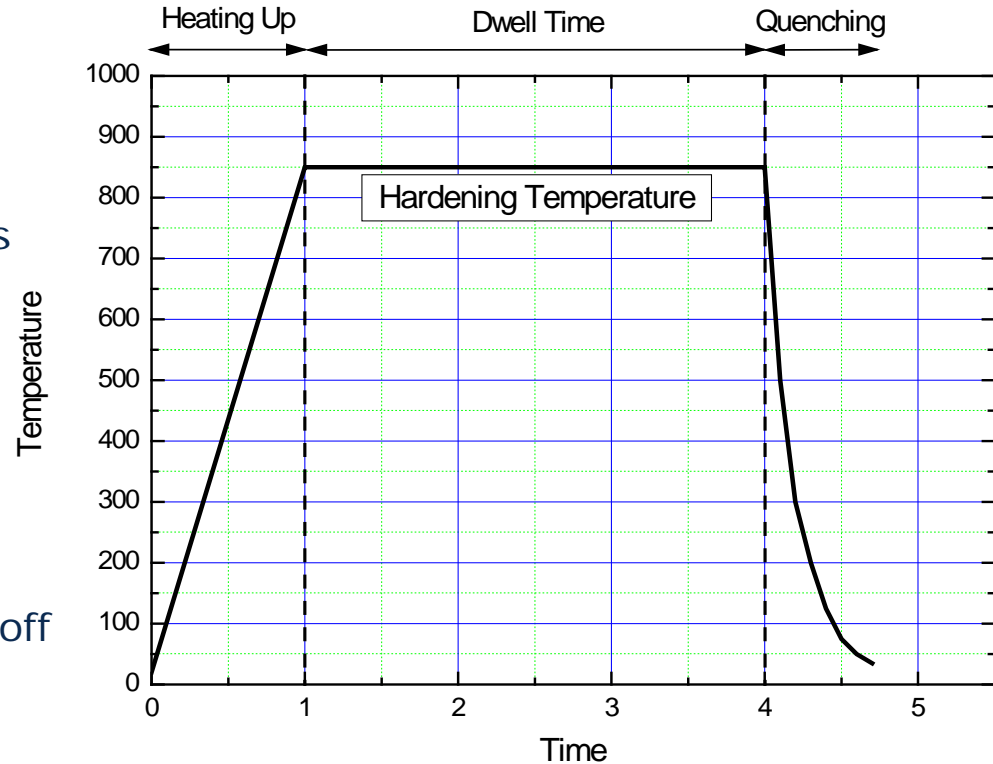


Einordnung des Härten in die Wärmebehandlungsverfahren



- Härten

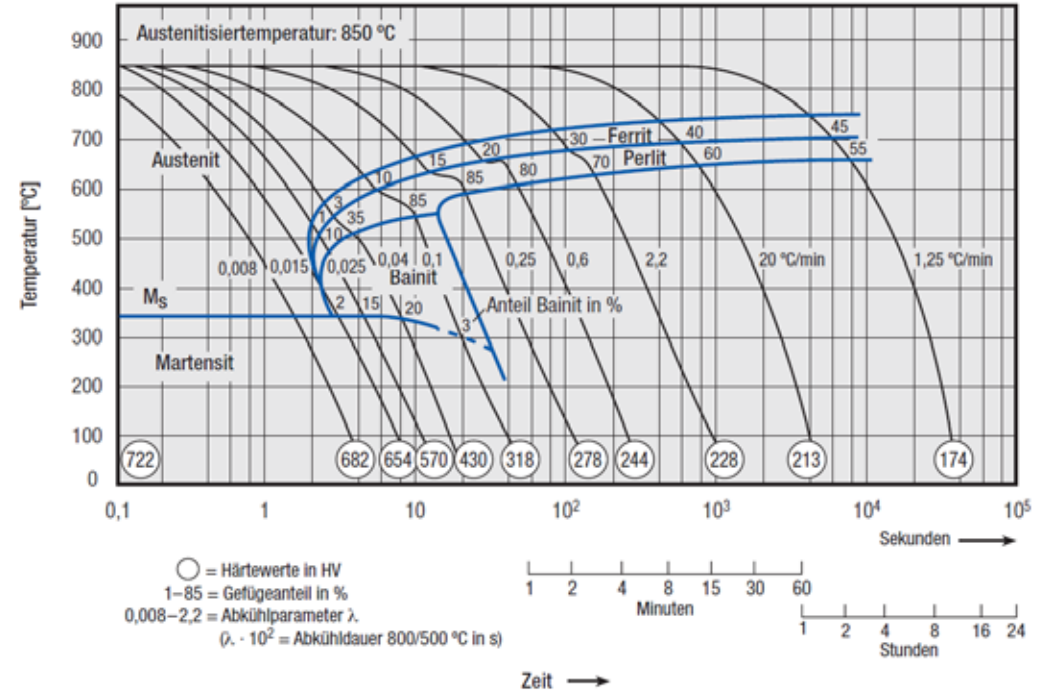
- dreistufiger Vorgang
- **Erwärmen** des Bauteils
(im Fall des Oberflächenhärtens
nur lokales Erwärmen eines
Bauteilbereiches)
- **Halten** bei der
Härtetemperatur
zum Erreichen einer
homogenen austenitischen
Struktur und gelösten Kohlenstoff
- **Abschrecken**



- 1. Stufe: Erwärmen
 - Umwandlung von Ferrit zu Austenit beginnt bei Temperaturen oberhalb A_{c1} (in Abhängigkeit der Zusammensetzung und Zustand des Werkstoffs)
 - freie Kohlenstoffatome von der Karbidauflösung (z. B. Zementit)
 - Umwandlung
 - Diffusion (langsam, Umwandlungsgeschwindigkeit abhängig von Temperatur)

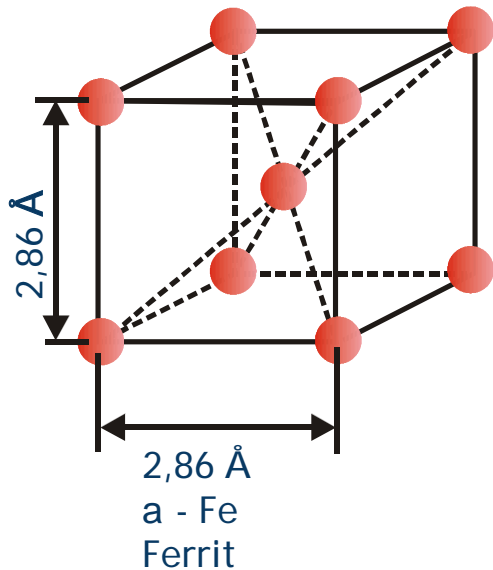
- 2. Stufe: Halten bei Härtetemperatur
 - Umwandlung zum Austenit
 - Ziel 1: Umwandlung von 100% des Werkstoffs zu Austenit
 - Ziel 2: homogene Verteilung des Kohlenstoffs und weiterer Elemente
 - Ziel 3: reduzierte Größe der Austenitkörner (resultiert in feine Martensitstruktur)

- 3. Stufe:
Abschrecken (Abkühlen)
 - Umwandlung stark von Abkühlrate abhängig
 - höhere Abkühlrate
à größere Härte
 - Umwandlung zu Martensit erfordert meist sehr große Abkühlraten
 - Umwandlung zu Martensit
à startet unterhalb der M_s -Temperatur
à beendet unterhalb M_f -Temperatur



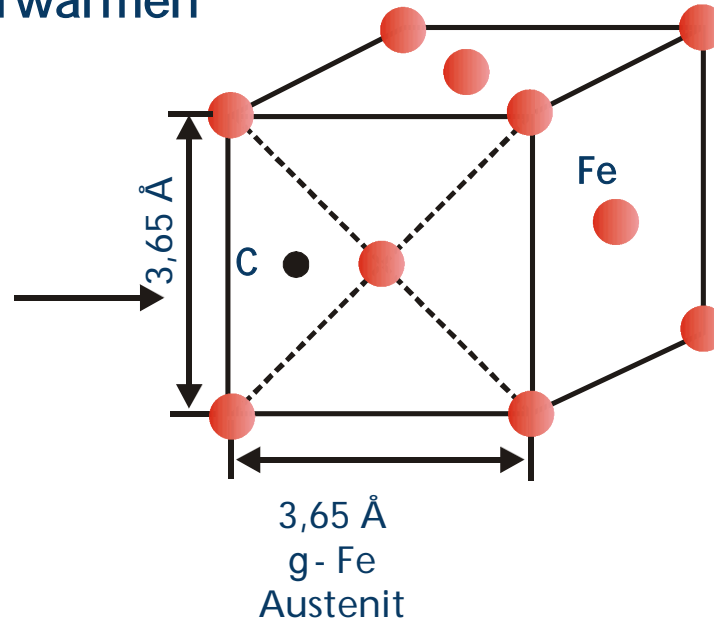
Pictures from „Markblatt 236“, Stahlinformationszentrum

schematische Darstellung des
kubisch-raum-zentrierten
Ferrits (α -Eisen)



Erwärmen

und des kubisch-flächen-
zentrierten Austenits
(γ -Eisen) mit Atomen auf
Zwischengitterplätzen

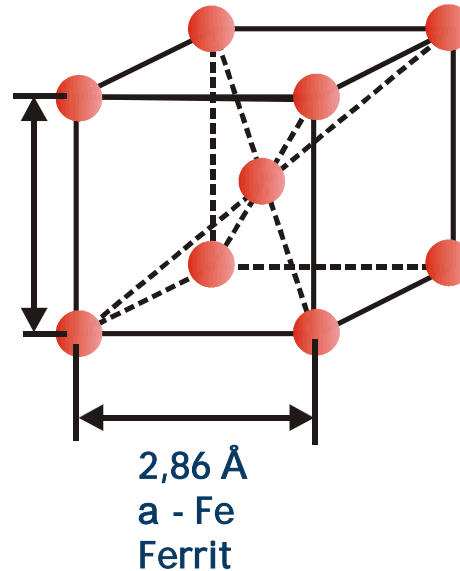
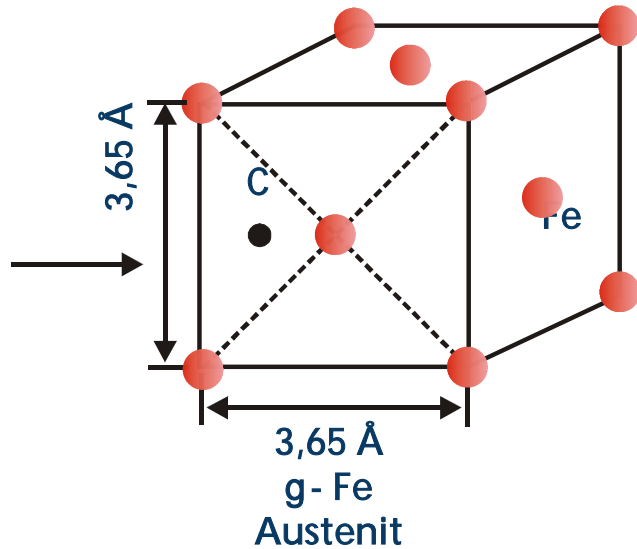


Hinweis:

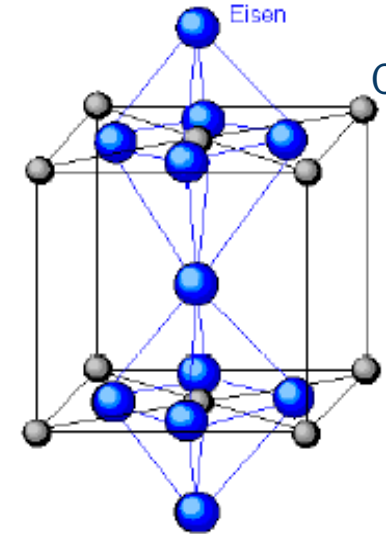
- Struktur lässt sich beschreiben als flächenzentrierte Packung von Fe-Atomen, in der jede 12. Oktaederlücke durch C-Atom besetzt ist
- bei Darstellung durch Elementarwürfel würde auf etwa jeden dritten Würfel ein C-Atom entfallen

- Erwärmung: Umwandlung krz \rightarrow kfz mit größerem Gitter, in frei werdenden Platz diffundiert C-Atom (bis zu 2%)
- Abkühlung: a) langsam: Ferrit kann nur 0,02%C lösen, C aus Austenit scheidet sich als Fe_3C aus (weit verteilte Atome müssen sich sammeln können)
 \rightarrow Mischkristall aus Ferrit + Fe_3C = Perlit

Abkühlen



+



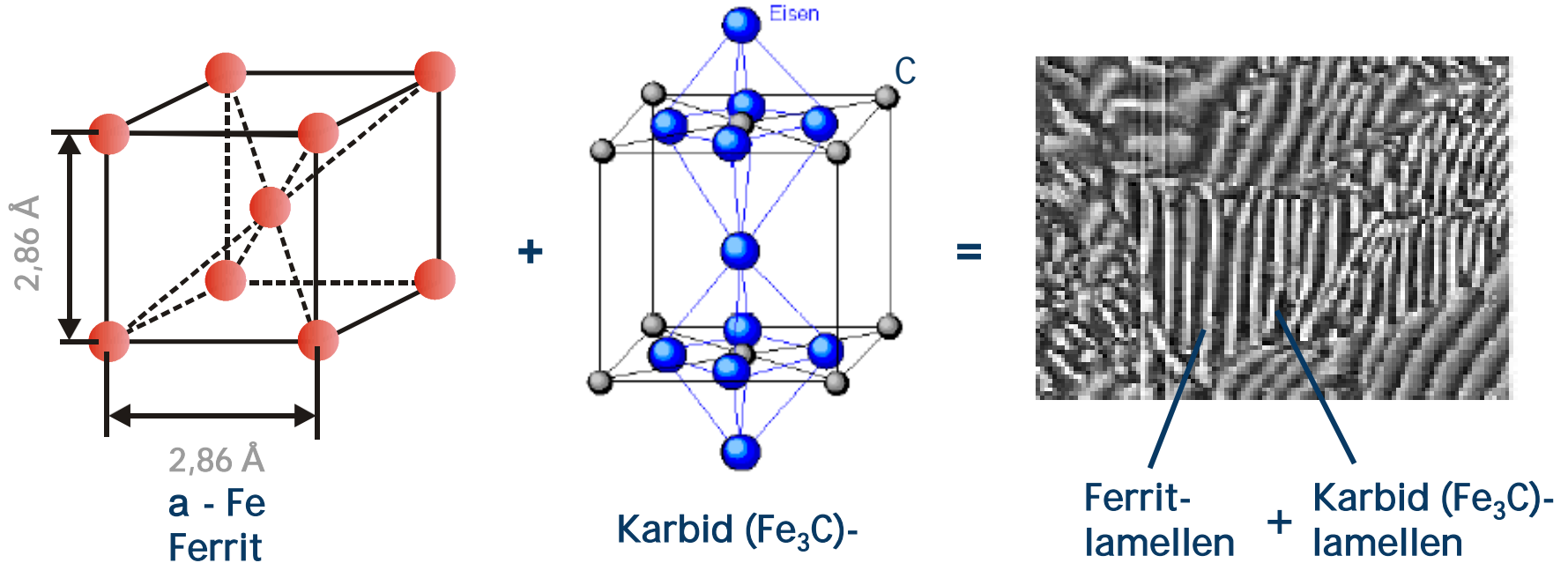
kubisch-flächenzentrierter Austenit (g-Eisen) mit Atomen auf den Zwischengitterplätzen.

kubisch-raum-zentriertes Ferrit (a-Eisen)

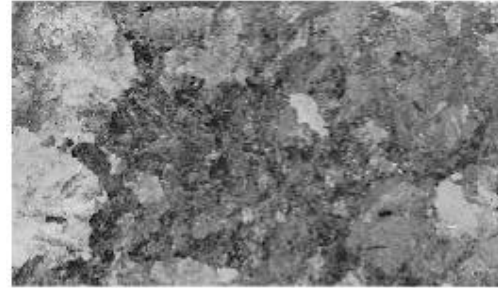
Zementit Fe_3C
(Eisenkarbid)

Ferrit + Zementit = Perlit

Schematische Darstellung des Gefüges von Eisen bzw. Stahl



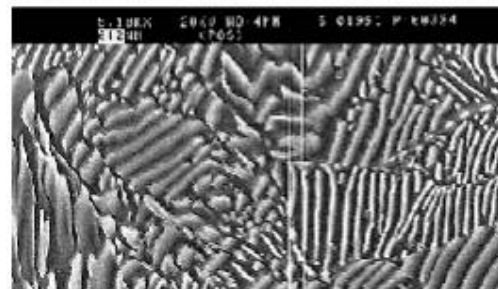
Schliffbild eines Perlits



100 μm
100 μm

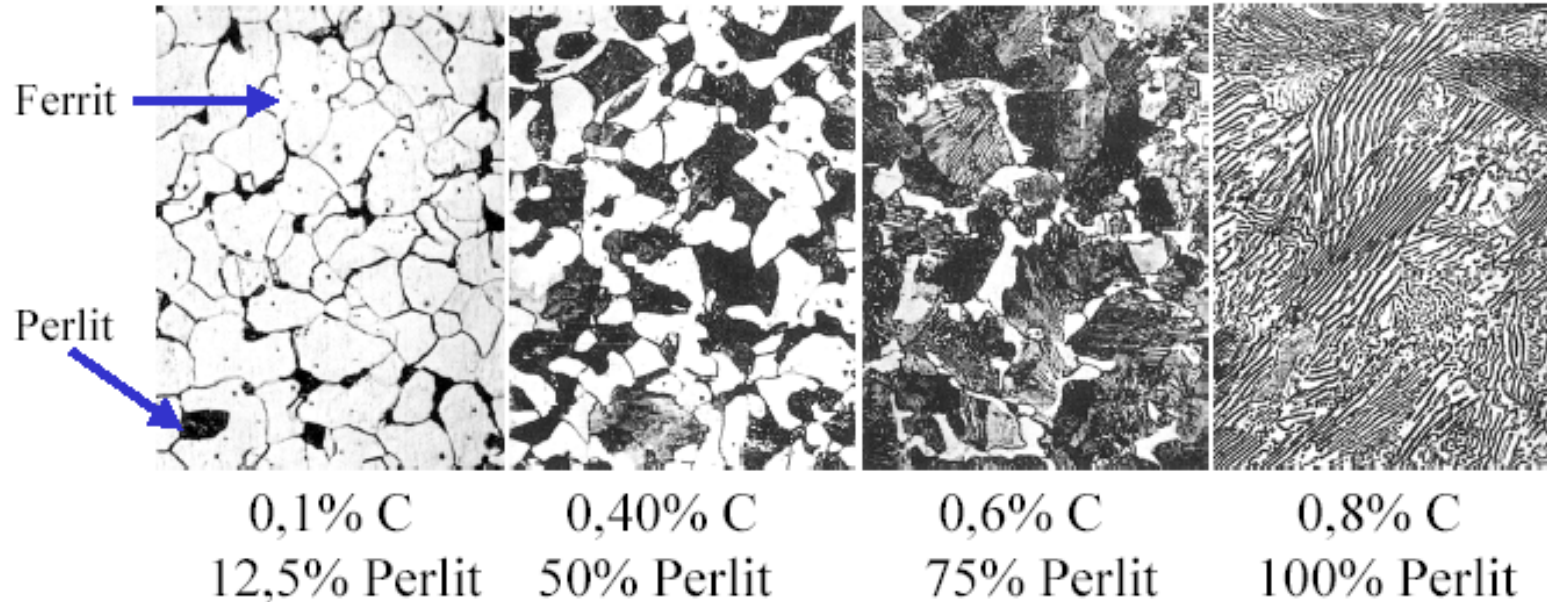


10 μm
10 μm



4 μm
4 μm

Erscheinungsformen des Perlits in Abhängigkeit vom C-Gehalt



Stärke der Fe_3C -Lamellen ist entscheidend für die **Auflösung der Lamellen**

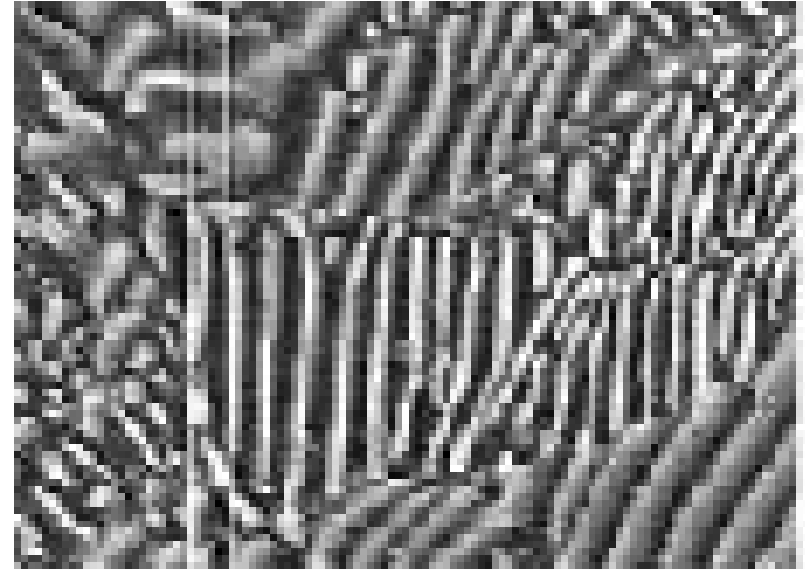
Erwärmung: $t_{h,\min} @ 3 \times \frac{z_{\text{Karbonid}}^2}{D}$

§ typische Dicken von Karbid-Lamellen und Mindesthaltezeiten bei Austenitisierungstemperatur ($T @ 1000 \text{ K}$) sind:

$$0,5 \text{ mm} < z_{\text{Karbonid}} < 3 \text{ mm}$$

$$4 \cdot 10^{-4} \text{ s} < t_{h,\min} < 3 \cdot 10^{-2} \text{ s}$$

§ Diffusionskoeffizient des Kohlenstoffs im Stahl hängt von verwendeter Stahlsorte und Temperatur ab



z_{Karbonid}
 $t_{h,\min}$

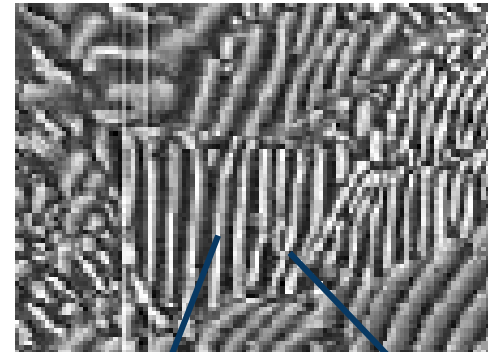
Abmessung der Lamelle in μm
Mindesthaltezeit

Erwärmung:

Umwandlung krz \rightarrow kfz mit größerem Gitter
in frei werdenden Platz diffundiert C-Atom - bis zu 2%

Abkühlung:

- a) *langsam*: Ferrit kann nur 0,02%C lösen,
C aus Austenit scheidet sich als Fe_3C aus
(weit verteilte Atome müssen sich sammeln können)
 \rightarrow Mischkristall aus Ferrit + Fe_3C = Perlit



b) *schnell*: ??

Ferrit-
lamellen

Karbid (Fe_3C)-
lamellen

Erwärmung:

Umwandlung $krz \rightarrow kfz$ mit größerem Gitter in frei werdenden Platz diffundiert C-Atom (bis zu 2%)

Abkühlung:

a) *langsam*: Ferrit kann nur 0,02%C lösen, C aus Austenit scheidet sich als Fe_3C aus (weit verteilte Atome müssen sich sammeln können)

\rightarrow Mischkristall aus Ferrit und Fe_3C = Perlit

b) *schnell*: C kann sich nicht zu Kristallen fügen, **kfz klappt ohne Diffusion zu krz um**, wobei C-Verteilung erhalten bleibt

\rightarrow der im kfz gelöste C wird im krz zwangsgelöst

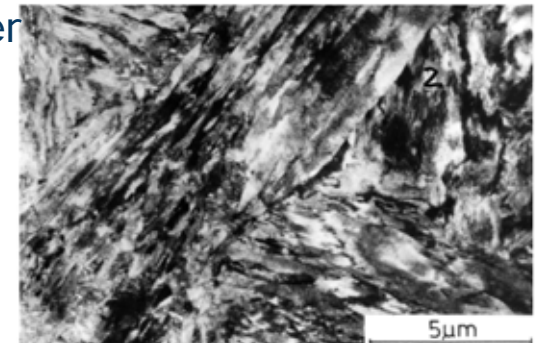
\rightarrow tetragonal verzerstes raumzentriertes Gitter

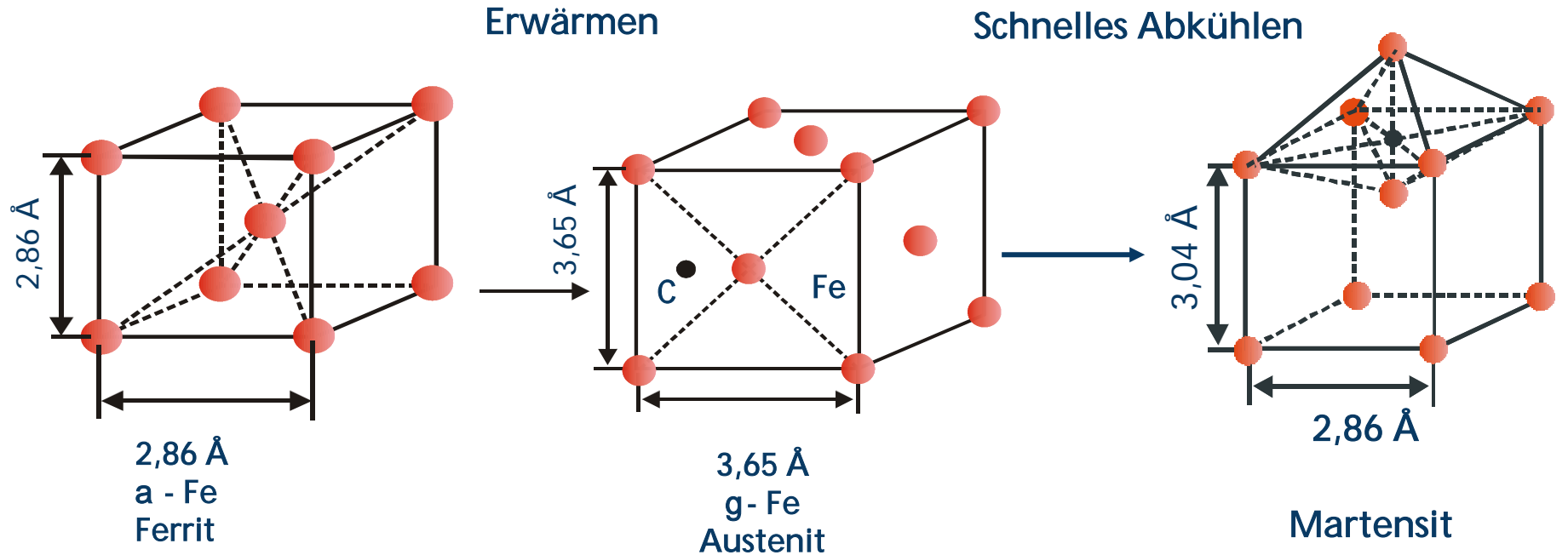
\rightarrow Spannungen \rightarrow Härte

Martensit:

plattenförmig bei niedrigem C-Gehalt

nadelförmig bei hohem C-Gehalt





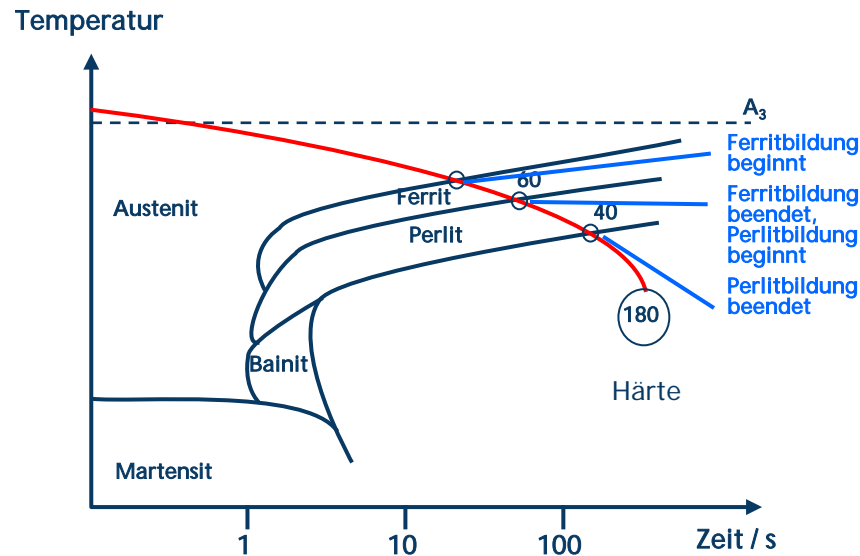
Schematische Darstellung
des kubisch-raum-
zentrierten Ferrits (a-Eisen)

und des kubisch-flächen-
zentrierten Austenits
(γ -Eisen) mit C-Atomen auf den
Zwischengitterplätzen.

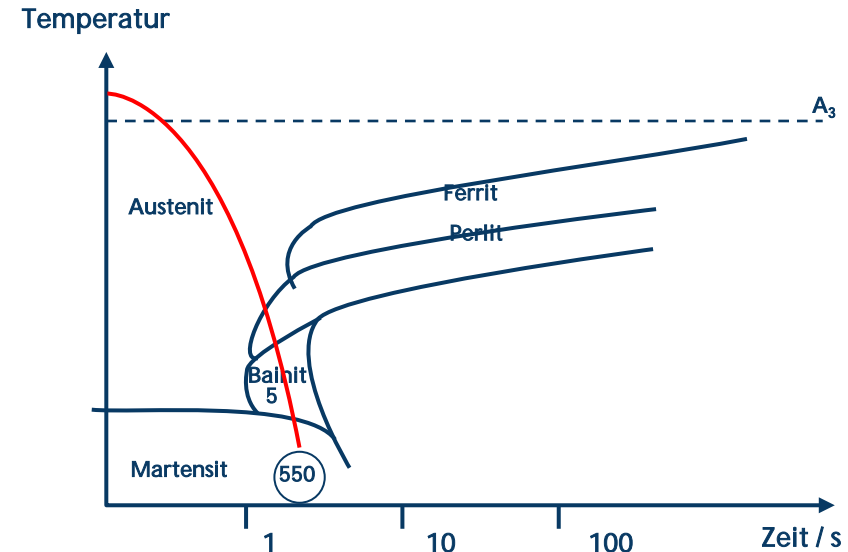
Schematische Darstellung
des tetragonal verzerrten
Martensits

kritische Abkühlgeschwindigkeit

- § muss für die Martensitbildung überschritten werden
- § am höchsten bei C-Stählen
- § Legierungselemente z. B. Mn, Ni reduzieren die kritische Abkühlgeschwindigkeit, da die Diffusion erschwert wird und der Umwandlungsbeginn zu tieferen Temperaturen verschoben wird.



25.01.2019

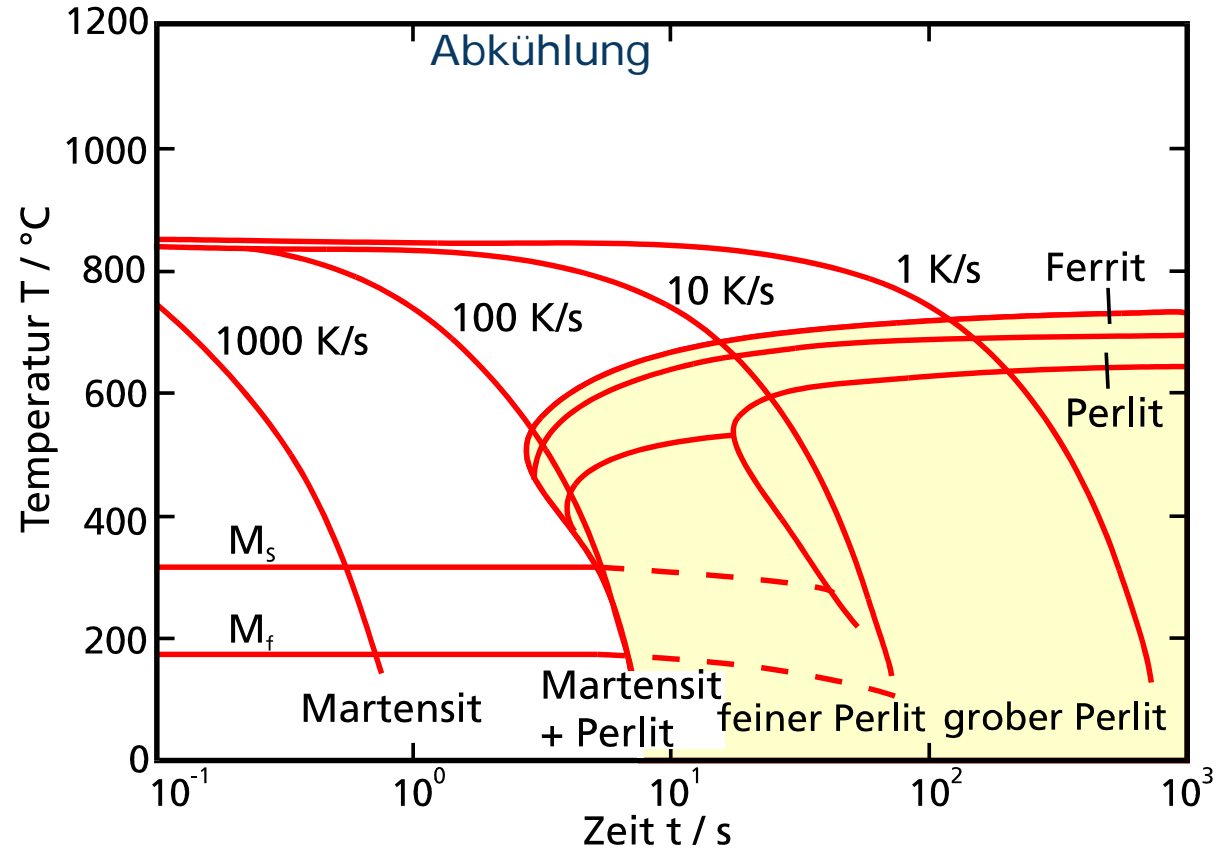


Fertigungstechnik I

Folie 25

ZTU- (Zeit-Temperatur-
Umwandlungs-) Schaubild
für den Stahl Cf 53

- § eingezeichnet sind Kurven mit verschiedenen Abkühlgeschwindigkeiten
- § mit einer Abschreckgeschwindigkeit von 1000 K/s wird das Austenitgefüge vollständig in Martensit umgewandelt

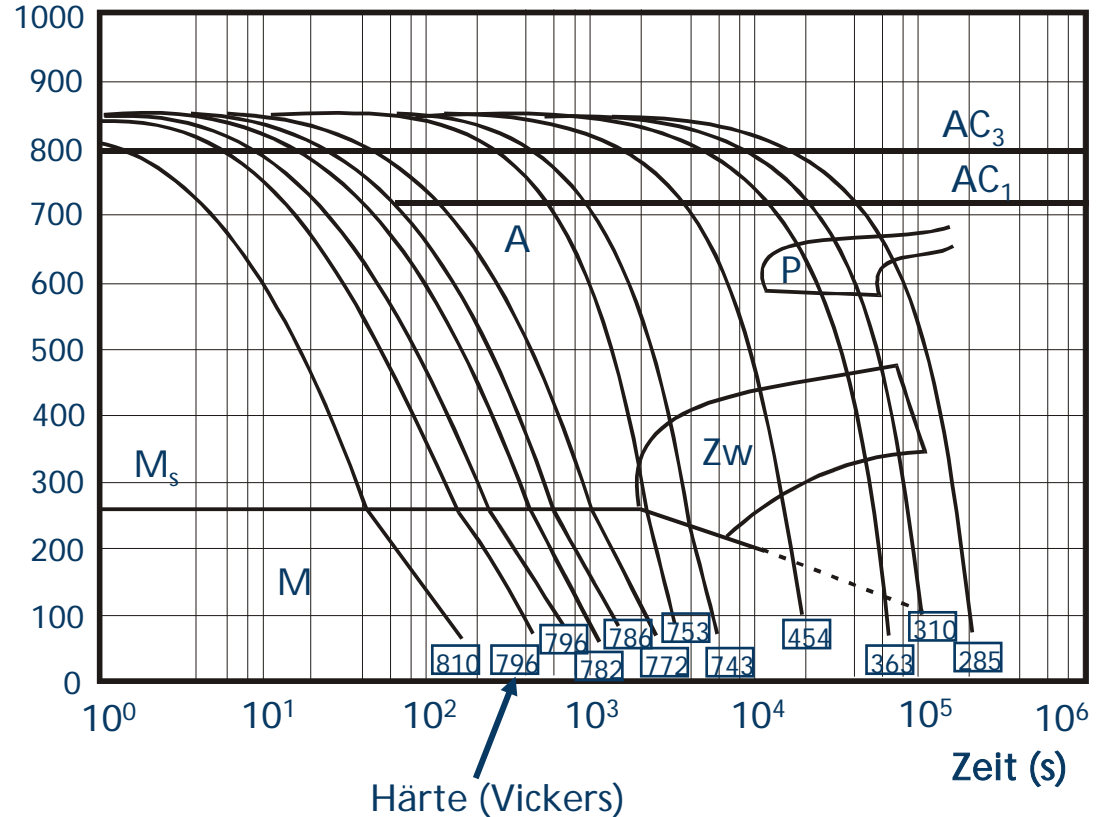


Kontinuierliche ZTU- (Zeit-Temperatur-Umwandlungs-) Schaubilder des Stahls 55NiCrMoV6, Austenitisierungstemperatur 850°C, Aufheizzeit 5 min, Haltezeit 15 min

Stahl 55NiCrMoV6

- A Bereich des Austenits
- P Bereich der Perlitbildung
- O Härtewerte in HV
- ZW Bereich der Zwischenstufen-Gefügebildung
- M Bereich der Martensitbildung

Bestimmungsverfahren:
Dilatometrisch und
metallographisch an Proben von
4,5 mm Dmr. und 15 mm Länge



Abschrecken und Entspannen

Abschreckmedium je nach Werkstoff:

- Wasser
- Aquatenside
- Abschrecköle
- Druckluft

↓
*von oben nach unten
sinkende Wirkung*

Abschreckeinrichtung

- Brausen: - Lochbrausen
- Schlitzbrausen
- Bad: - Wasserbad
- Ölbad

Entspannen

erzeugter Martensit verursacht durch größeres Volumen
à Maßänderungen à innere Spannungen à Härteverzug

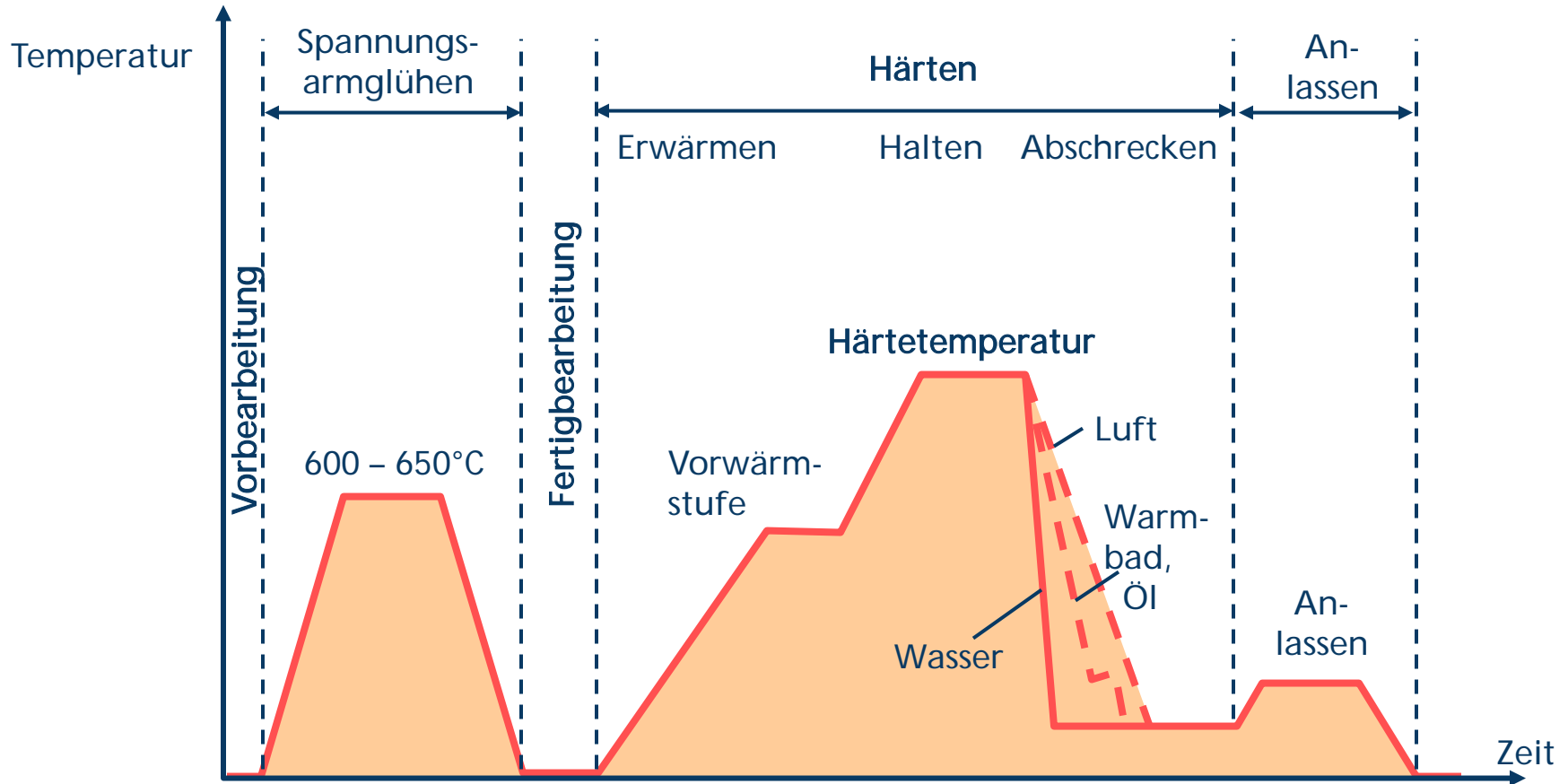
Anlassen zur Entspannung **ohne Härteminderung**

à Werkstück weniger schlagempfindlich, Rissgefahr sinkt
- im Ofen oder aus der Restwärme

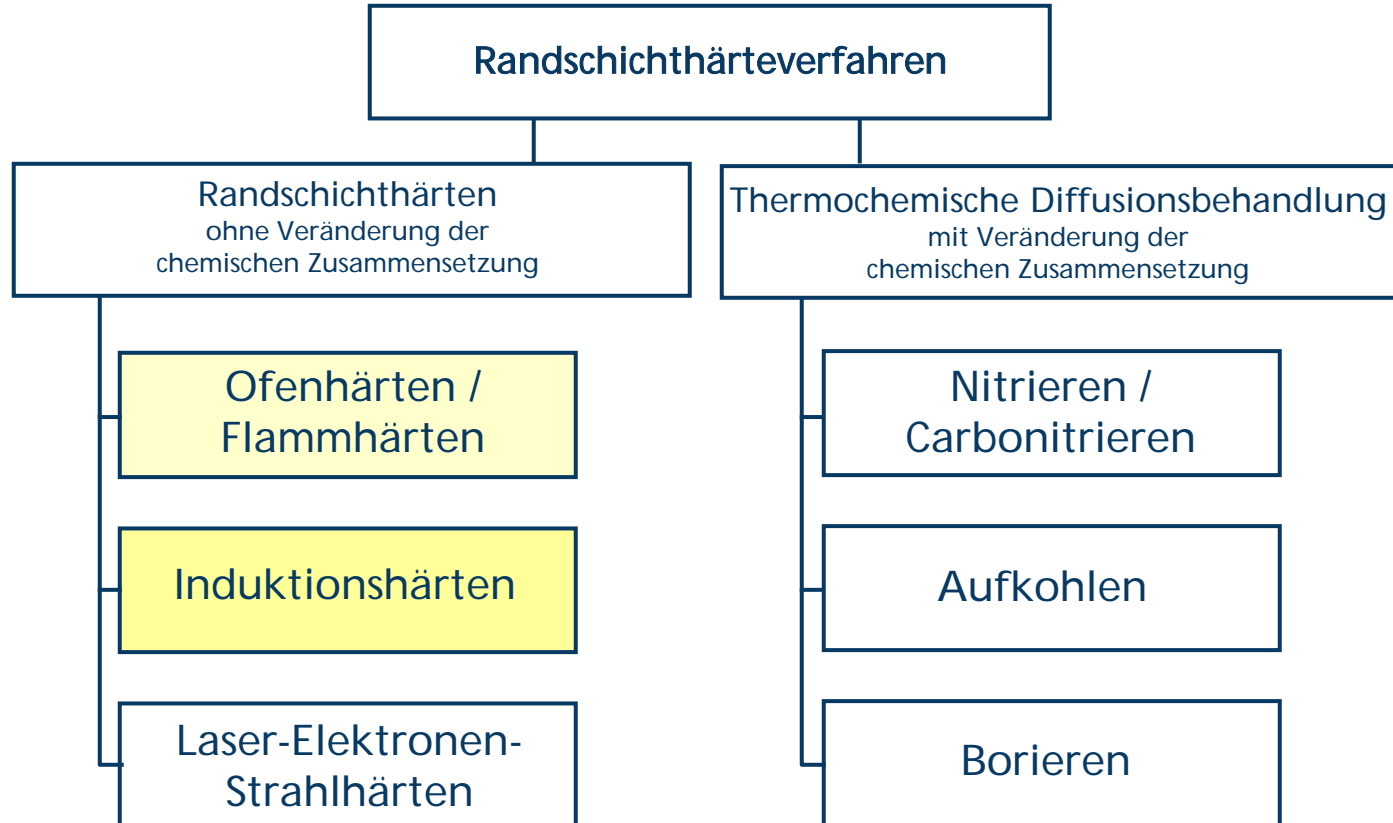
Anlasstemperatur: abhängig von zu erreichender Oberflächenhärte

Beispiel: Vergütungsstahl 42 CrMo 4 - für 58 HRC 180°C
- für 50 HRC 360°C

Einordnung des Härten in die Wärmebehandlungsverfahren



Randschichthärten von Metallen





Verfahren

- § Erwärmung der Oberfläche mit einem gekühlten **Acetylenbrenner**
- § Austenitisierung mittels **Flamme**, anschließend schroffes Abkühlen mittels **gekoppelter Wasserbrause**
- § chemische Zusammensetzung des zu härtenden Werkstoffes dabei nicht verändert
- § **Form** des Brenners und der Brause der Geometrie des **Bauteils** angepasst
- § erzielbare Härtetiefen im Bereich von mehreren mm (2-10)
 - à entspr. große Werkstücke



Werkstoffe

- § gleiche Werkstoffe wie zum Induktionshärten sowie perlitischer Grauguss, Temperguss und Kugelgraphitguss

Vorteile

- § rel. geringe Anlagenkosten
- § viele Verfahrensvarianten durch Optimierung von zeitlicher Folge und Art der Bewegung von Teil, Brenner und Brause

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Flammhärten	geringe Investitionskosten, Erwärmung kurz, Verzug gering, partielle Härtung möglich, Prozessintegrierbarkeit gut, Platzbedarf gering, Bedienung einfach, automatisierbar	Stadtgas: Gasdruck und -zusammensetzung schwanken, die Flammentemperatur → Härtungstiefe schwankend. Härten von Bohrungen schwierig. Verschiedene Werkstücke → verschiedene Brenner, Vergütete Stähle, Weichzone
Tauchhärten	geringe Kosten, kurze Behandlungszeiten, geringer Verzug	partielle Härtung nur beschränkt möglich, gesamte Werkstück wird oberflächengehärtet, Querschnittsübergängen und Kerben nicht einwandfrei, zentrale Härterei nötig → Transportkosten, Dämpfe gesundheitsschädlich, Nacharbeit nötig
Einsatzhärten	dünne, aber gleichmäßige Härteschicht, partielle Härtung möglich, Kernfestigkeit erhöht sich gleichzeitig, hohe Wirtschaftlichkeit bei Teilen, deren Gesamtoberfläche zu härten ist	hohe Betriebskosten, lange Glühzeiten, evtl. stärkerer Verzug Abdeckung nicht zu härtender Stellen, zentrale Härterei ist erforderlich → Transportkosten, Nacharbeit (säubern) nötig
Nitrieren	immer gleichmäßige Härteschicht, Verzug gering, Abschrecken nicht nötig, erreichbare Härte ist sehr hoch → Verschleißfestigkeit sehr groß, Nacharbeit nicht erforderlich	hohe Betriebskosten, Sonderstähle nötig, Glühzeiten lang (1 bis 4 Tage), gesamtes Werkstück wird durchgeheizt, Härteschichten dünn, Härte sinkt nach 0,2 mm stark ab; Oberflächen halten keinen starken Flächendruck aus → brechen ein; nicht zu härtende Stellen müssen durch Verzinnen oder Vernickeln abgedeckt werden; Oberfläche der Werkstücke muss vor Nitrieren einwandfrei sauber sein

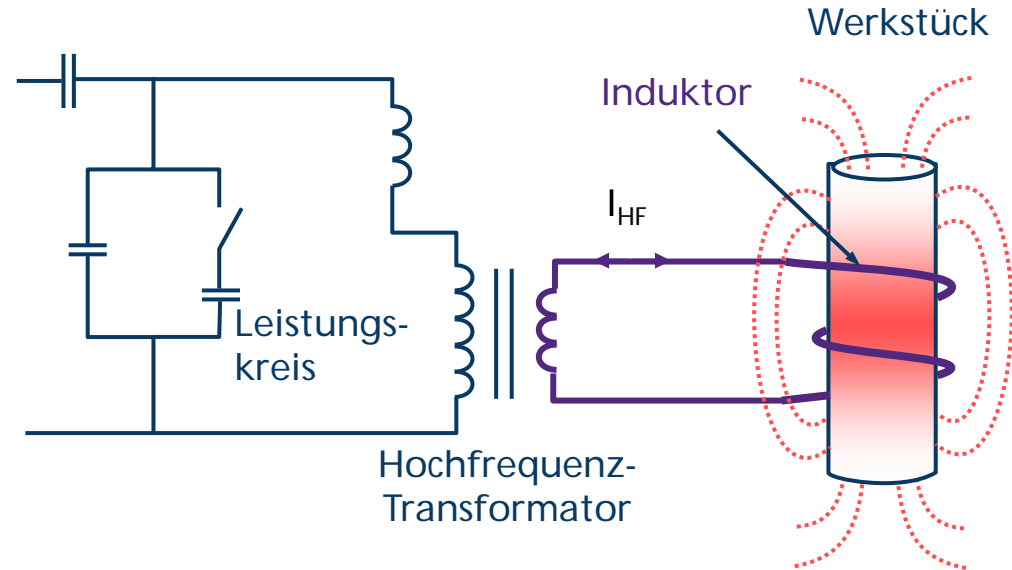
Induktionshärten: Prinzip

- § Stahl wird lokal erhitzt (austenitisiert)
- § durch anschließendes Abschrecken wird das vorher austenitisierte Volumen in Martensit umgewandelt



Video

Induktionserwärmung: Prinzip



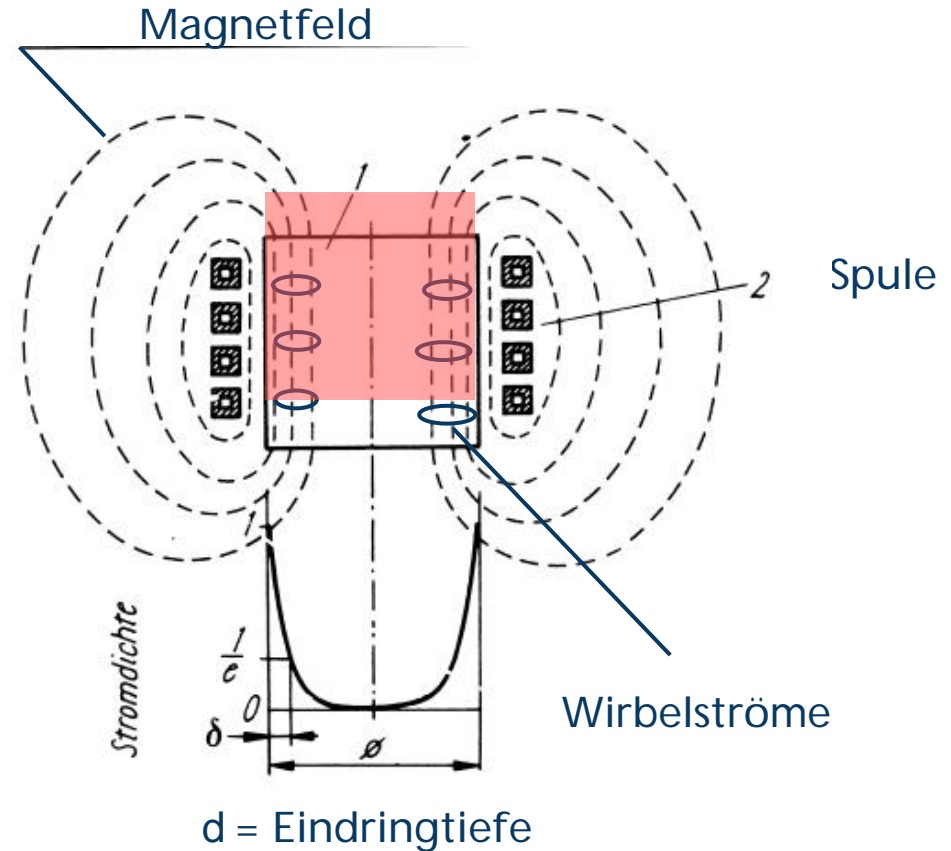
1. Wechselstrom erzeugt **elektromagnetisches Wechselfeld** um Leiter (Induktor) herum
2. in einem leitenden Werkstück wird durch Induktor Spannung und damit **Wechselstrom in umgekehrter Richtung** induziert
3. auf Grund des elektrischen Widerstandes wird nach **Jouleschen** Gesetz im Werkstück Wärme erzeugt: $Q = I^2 R t$
 - Q: Wärmemenge
 - I: Strom
 - R: Widerstand
 - t: Zeit

Wärmeentwicklung:

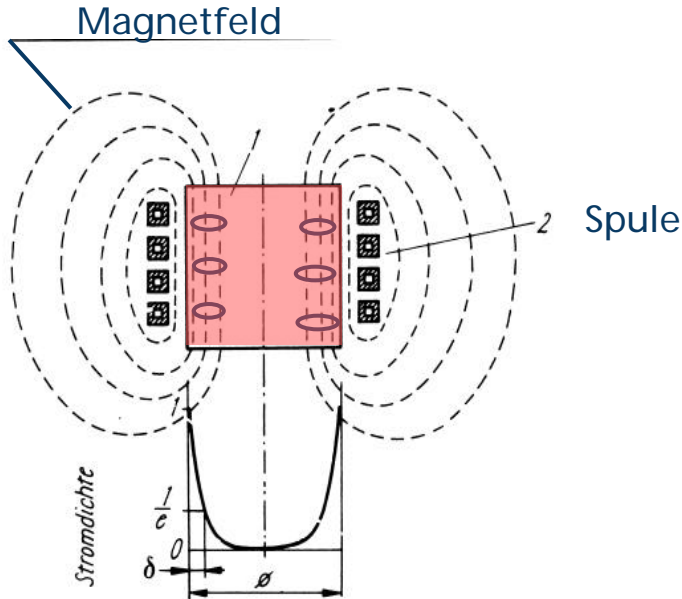
- § Joule'sche Verluste am elektrischen Widerstand
- § Hystereseverluste bei ferromagnetischen Stoffen

Stromdichte nimmt im Werkstück von außen nach innen ab (Skin-Effekt)

Wirkungsgrad der Induktionserwärmung hängt von Ankopplung (Spalt) ab → je kleiner der Spalt, umso besser die Einkopplung



induzierte Stromdichte nimmt im Werkstück von der Oberfläche nach innen ab



d = Eindringtiefe

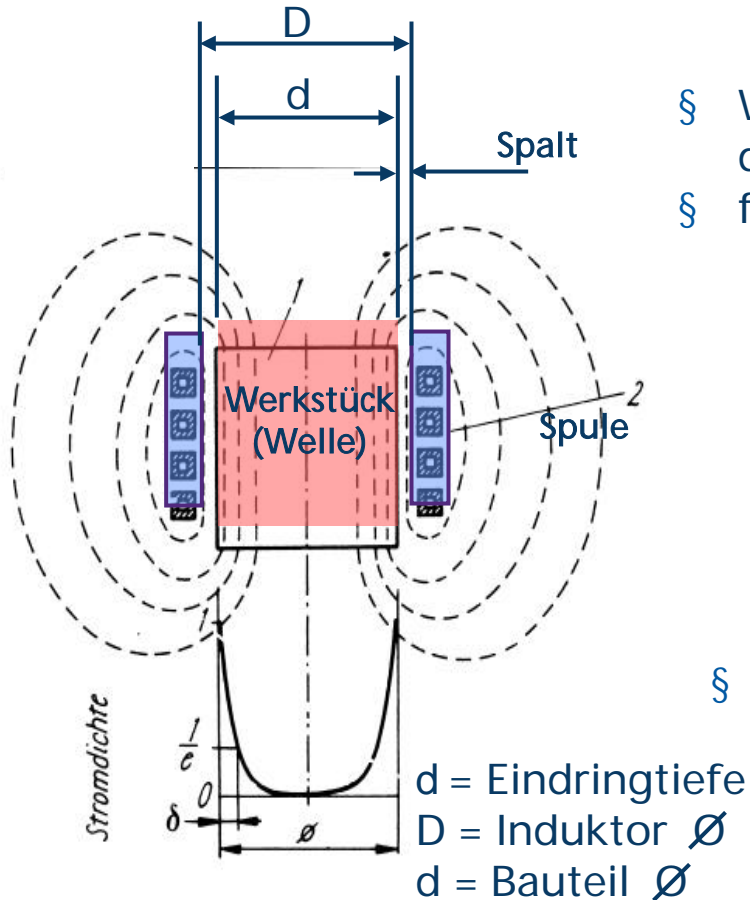
$$I_x = I_0 \exp(-x 2\pi \sqrt{mn / r 10^7}) \quad [A]$$

I_x = Stromdichte in der Tiefe x
 I_0 = Stromdichte an der Oberfläche
 x = Abstand vom Rand
 m = Permeabilität
 n = Frequenz
 r = spez. Widerstand

Eindringtiefe d ist definiert $I_x/I_0 = 1/e = 0,368$
 (Tiefe, bei der die Stromdichte auf $1/e = 0,37$ abgefallen ist)

$$d = 1 / 2\pi \sqrt{r 10^7 / mn} \approx 503 \sqrt{r / mn} \quad [mm]$$

spez. Widerstand r und die Permeabilität μ ändern sich mit der Temperatur



- § Wirkungsgrad der Induktionserwärmung hängt von der Ankopplung (Spalt) ab
- § für runde Induktoren und Bauteile gilt:

$$h_{th} = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} \frac{\alpha}{\epsilon} + 6,25 \frac{d^2}{d^2 \phi} \frac{\alpha}{\sqrt{mr_2}}}$$

$r_1 =$ spez. Widerstand Induktor
 $r_2 =$ spez. Widerstand Werkstück

- § je kleiner der Spalt, umso besser die Einkopplung

Eindringtiefe = f (Frequenz)

§ Betriebsfrequenz der Induktionsanlage abhängig von erforderlicher Stromeindringtiefe

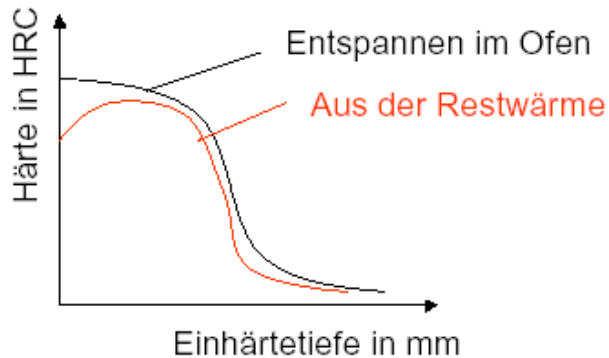
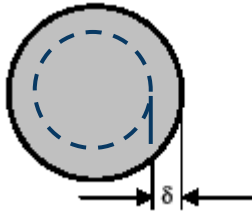
§ Bereich der anwendbaren Frequenzen Netzfrequenz (50 Hz) bis Kurzwellenbereich (3 MHz)

Teilbereiche:	Niederfrequenz	50 Hz - 500 Hz
	Mittelfrequenz	500 Hz - 50 kHz
	Hochfrequenz	50 kHz - 3 MHz

bei Stahl gilt:	Mittelfrequenz (3 bis 10 kHz):	$d = 8$ bis 5 mm
	Hochfrequenz (400 bis 2500 kHz):	$d = 1$ bis $0,4$ mm
	Hochfrequenzimpuls (27 MHz):	$d = \text{ca. } 0,1$ mm

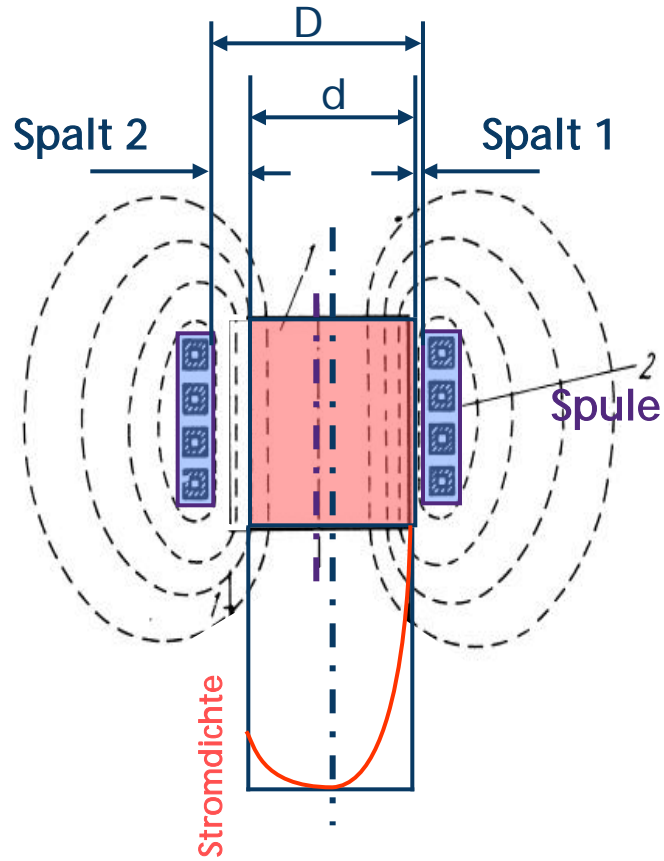
- § Mikrowellenbereich 13MHz bis 27MHz weist in der Regel hohe Übertragungsverluste auf und ist sehr justierempfindlich
- § Mikrowellen werden aufgrund geringer Eindringtiefe als Oberflächenwärmequellen bei sehr dünnen Bauteilen eingesetzt

Eindringtiefen d (mm) bei verschiedenen Werkstoffen in Abhängigkeit von Frequenz und Temperatur



Werkstoff Freq.	Kupfer 20°C	Kupfer 1100°C	Stahl 20°C 60-80	Stahl 600°C 40	Stahl 800°C 1	Stahl 1500°C 1	Ni-Cr	Graphit	Alu 20°C
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50 Hz	10	32							
500 Hz	2,97		1,38		22,50				3,89
600 Hz	2,91	9,4	3,78	7,75	22,50	26	20,6	65	
1000 Hz	2,2	7	2,9	5,8	17,5	20	16	50	
1800 Hz	1,68	5,44	2,18	4,31	13	15	11,87	37,6	-
2000 Hz	1,59	5,14	2,06	4,12	12,3	14,4	11,25	35,6	-
3600 Hz	1,19	3,86	1,55	3,1	9,22	10,65	8,4	26,7	-
4000 Hz	1,13	3,65	1,46	2,93	8,73	10	8,0	25,3	1,38
10 kHz	0,7	2,22	0,82	1,83	5,53	6,32	5,05	15,8	0,87
12 kHz	0,65	2,1	0,84	1,68	5,03	5,88	4,6	14,5	-
500 kHz	0,1	0,32	0,13	0,26	0,78	0,9	0,7	2,25	-
700 kHz	0,08		0,037		0,600				0,104
2500 kHz	0,043		0,020		0,320				0,055

Quelle: HWG Inductoheat



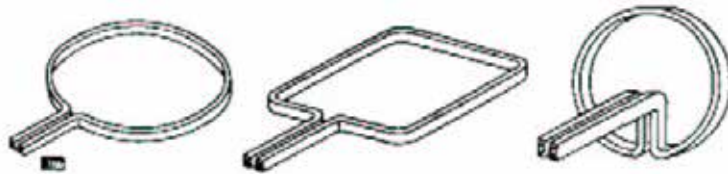
- § Dejustierung von Bauteil und Induktor führt zu ungleichmäßiger Erwärmung
- § je größer Frequenz, desto kritischer wird Justierung
- § Abhilfe: Bauteil justieren lassen

Induktoren

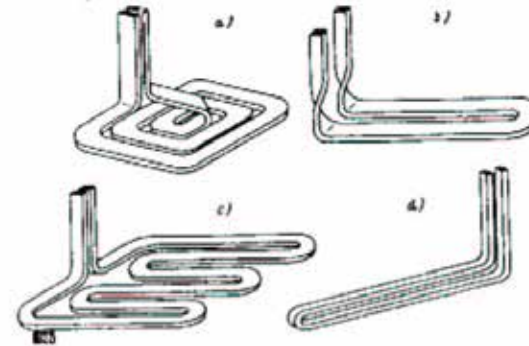
Größe und Form der Induktorspule sowie des Leistungsumsatzes werden immer Erwärmungsgut und Technologie angepasst

Material: Elektrolytkupfer

Ringinduktoren



Flächeninduktoren



Quelle: hwg-Inductoheat.de

Induktionsgeräte



Vorteile

- § **gleichmäßiges Aufheizen** der zu härtenden Stellen
- § **kurze Erwärmungszeiten** → geringe Zunderbildung
→ keine Grobkornbildung
- § **kaum Nacharbeit** nötig; geringer Verzug
- § sichere Beherrschung der Wärmezufuhr, **Temperatureinhaltung**
- § **partielle** Härtung auch bei schwierigsten Formen
- § einfach in Fertigungslinie **integrierbar**, Automatisierung
- § geringer Platzbedarf, einfache Bedienung, betriebssicher
- § nicht umwelt- oder gesundheitsschädigend

Nachteile

- § hohe **Anschaffungskosten** erfordern sehr gute Auslastung
- § **verschiedene** Induktoren für einzelne Verfahren
- § zw. Kern und Randschicht vergüteter Stähle mitunter **Weichzone**
- § große **Einrichtkosten** bei häufig wechselnden Werkstücken
- § Mithärten von **Querschnittsübergängen** teilweise schwierig

Werkstoffe zum Induktionshärten

Vergütungsstähle:

- § Hauptanteil der eingesetzten Werkstoffe z.B. 42CrMo4, 34CrNiMo 6
- § Erwärmung auf 900-950°C (im Austenitgebiet)

Mikrolegierte Stähle: 38MnSiVS 6, 38MnS 6

- § Entspannen aus der Restwärme, aber anderer Härteverlauf

Stahlguss: GS-Ck 45

Kugelgraphitguss: GGG 70, GGG 80

- § Erwärmung unter 900°C
- § manchmal Angabe des Perlitanteils (mind. 75%)

Baustähle:

- § Einsatz nur in größeren Bauteilen mit weniger genauem Härteverlauf
z.B. bei gezogenen Halbzeugen Randentkohlung

Baustähle:

- § Einsatz nur in größeren Bauteilen mit weniger genauem Härteverlauf
z. B. bei gezogenen Halbzeugen Randentkohlung
- § Erwärmung auf 900-950°C

erreichbare Härtewerte:

Werkstoffbezeichnung	HRC-Werte
Ck 45	53-60
38 Mn Si V S 5	mind. 52
34 Cr Ni Mo 6	48-56
42 Cr Mo 4	51-59
50 Cr Mo 4	56-63
GGG 70	45-55

Quelle: FH Aalen

Einsatz des Induktionshärtens

- § Ofen- und Flammhärten werden durch das Induktionshärtenshärten **ergänzt**
- § zusätzliches Härteverfahren, Einsatz nur bei technischem und ökonomischem Vorteil
- § vorteilhafter, je kleiner zu härtende Oberfläche im Vergleich zur Gesamtoberfläche

Einsatzbeispiele

- § an Kurbelwellen ® Umlauf-Standhärten
- § an Zahnrädern ® Standhärtung
- § an Nockenwellen ® Standhärtung, Umfangsvorschubhärten
- § Maschinenführungen ® Flächeninduktionshärten

Verfahren

Impulsenergie wird einem Kondensator entnommen und mit einer Impulsfolgefrequenz von 3 - 5 Hz mittels eines Induktors auf das Werkstück übertragen

- § steuerbare **Rechteckimpulse von 1 - 100 ms** Dauer,
- § Leistungsdichte: 5 und 30 kWcm⁻²
- § Frequenz: 27,12 MHz
- § **Einhärtetiefen 50 bis 500 mm**

Besonderheit

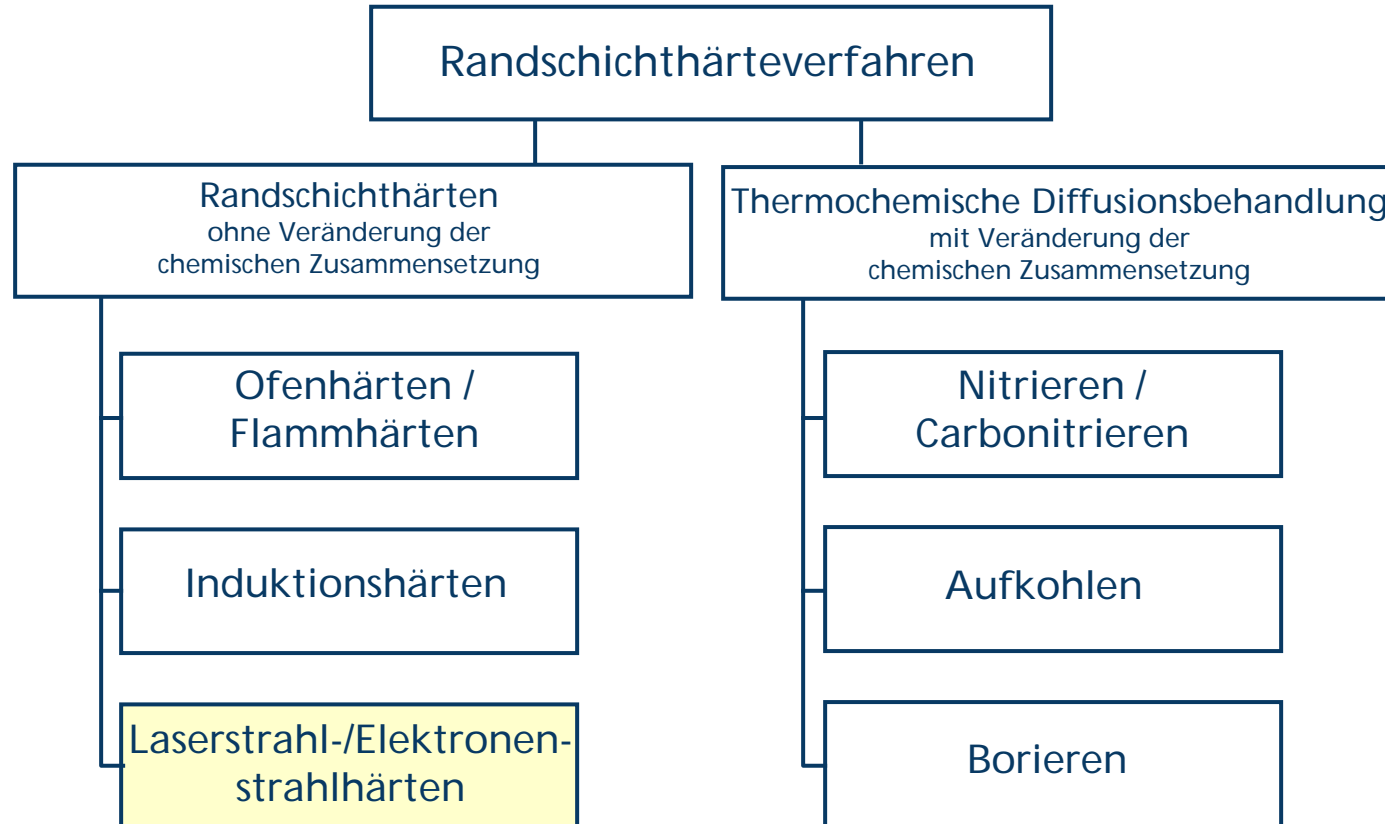
Selbstabschreckung

hinreichend schnelle Abkühlung durch Wärmeleitung in das kalte Werkstoffinnere (auch beim E- und Laserstrahlhärten)
Voraussetzung: Einhärttiefe \leq 1mm

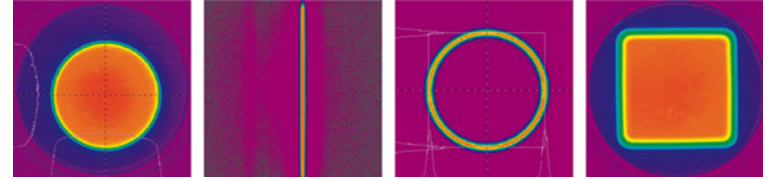
Anwendungen

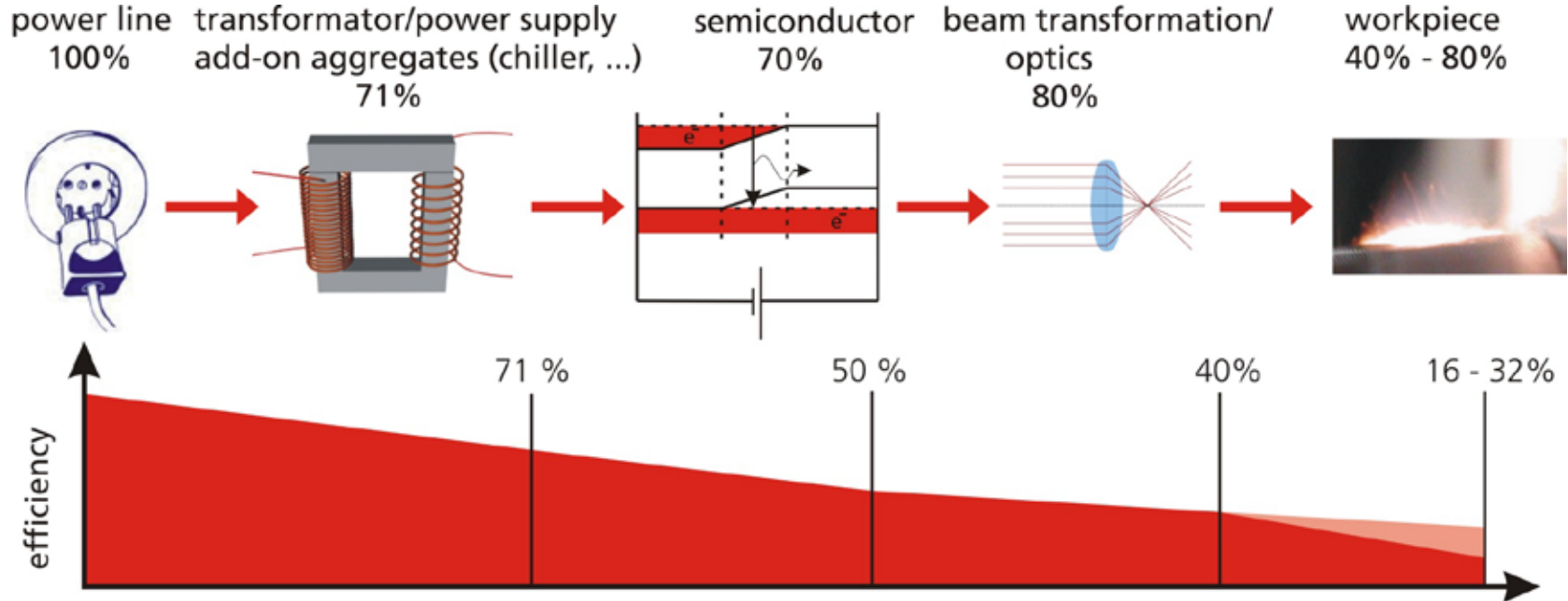
Feinwerktechnik zum Härten von Kleinteilen
z. B. von feinen Sägeblättern, Schneid- und Stanzwerkzeugen,
Kameraverschlüssen und Nadeln

Randschichthärten von Metallen



- aktuell beste Laserquelle:
 - Hochleistungsdiodelaser
 - direkt oder fasergekoppelt
- Wellenlängen:
 - 808 nm, 914 nm, 940 nm, 980 nm, 1023 nm
- Investment einsatzfähiges Gerät:
 - < 50 T€/kW
- kommerziell verfügbare Geräte zur Wärmebehandlung:
 - 100 W bis 10 kW

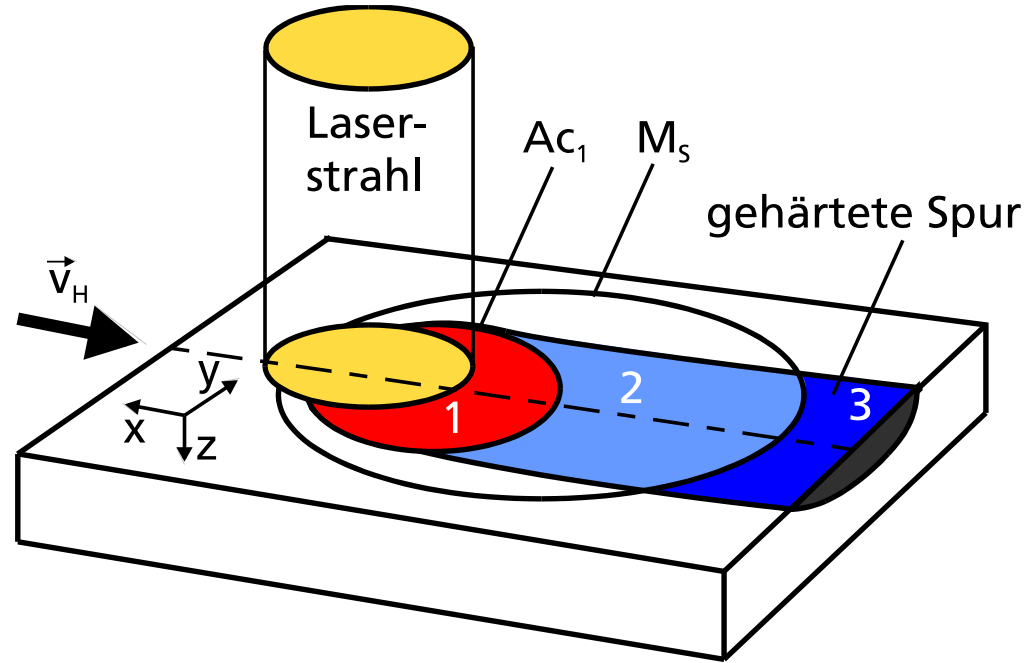




- hocheffizienter, fasergekoppelter Hochleistungsdiodenlaser
- energetische Einkopplung ins Bauteil: 40% in Schutzgas, 80% in Luft
- Vergleich: **Laser 16-32% ↔ Induktion 10-63%**

Schematische Darstellung einer Laserstrahlhärtung

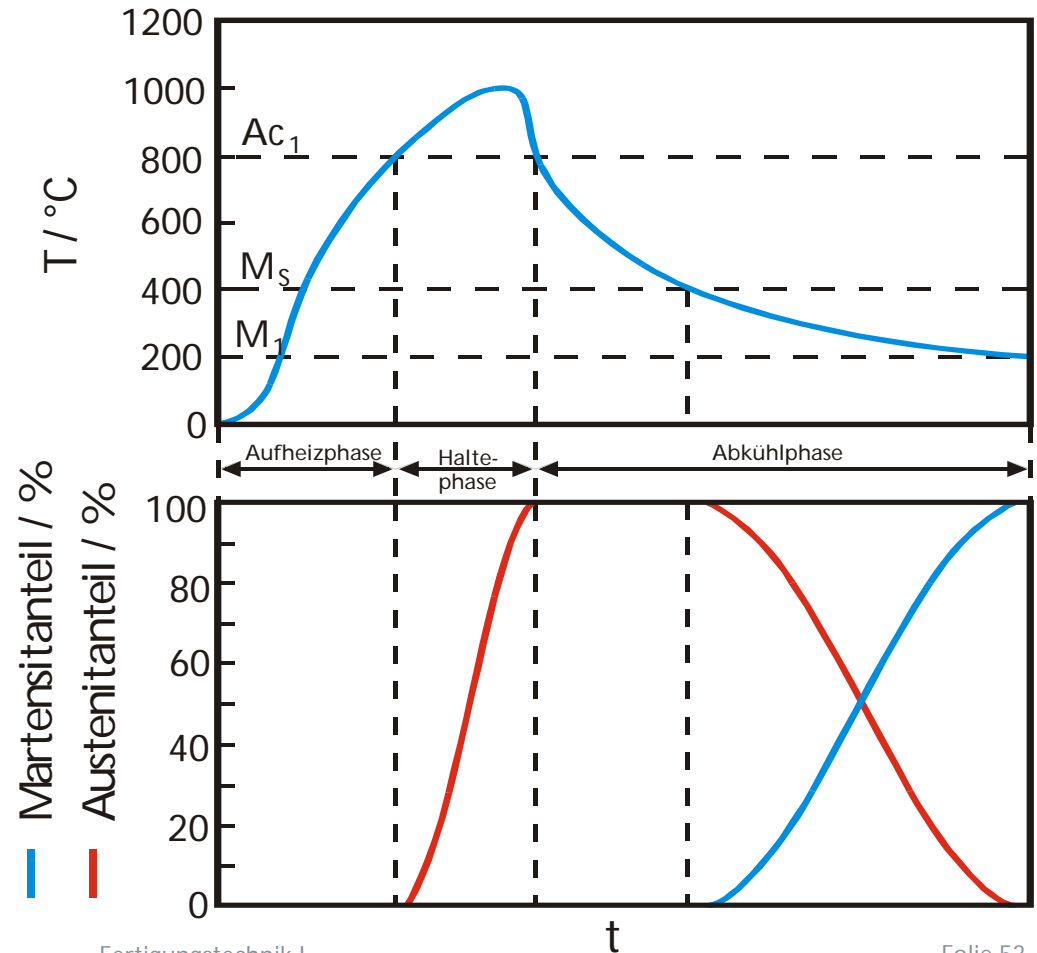
- § Werkstück und Laserstrahl werden relativ zueinander mit der Geschwindigkeit v_H bewegt
- § im von A_{c_1} -Isothermen umrandeten Bereich (1) wandelt sich Gefüge in Austenit um
- § im daran angrenzenden Bereich (2) innerhalb der Martensit-Start-Isotherme wird der Austenit unterkühlt, bis nach Passieren der M_S -Linie die Martensitbildung einsetzt (3)



Kein Schmelzprozess !

- Form und Größe des Laserstrahlbrennflecks auf der Bauteiloberfläche
 - à Breite und Größe der Prozesszone
- Intensitätsverteilung des Laserstrahlbrennflecks
 - à Anpassung an lokalen Wärmeeintrag
 - à Beeinflussung des lokalen Temperaturfelds und lokaler Eindringtiefe
- Laserleistung
 - à maximal verfügbare Laserleistung reduziert die Vorschubgeschwindigkeit (Aufheizrate bei $v=0$) oder Maximaltemperatur
- Vorschubgeschwindigkeit (oder Haltedauer im Fall keiner Bewegung)
 - à Tiefe Wechselwirkung
 - à geringe Vorschübe können geringere Härten zur Folge haben wegen reduzierten Abkühlraten

Schematische Darstellung des Temperatur-Zeit-Verlaufs und der korrespondierenden Gefügeumwandlung bei einer Härtung mit Laserstrahlung



Stärke der Fe_3C -Lamellen

Erwärmung:

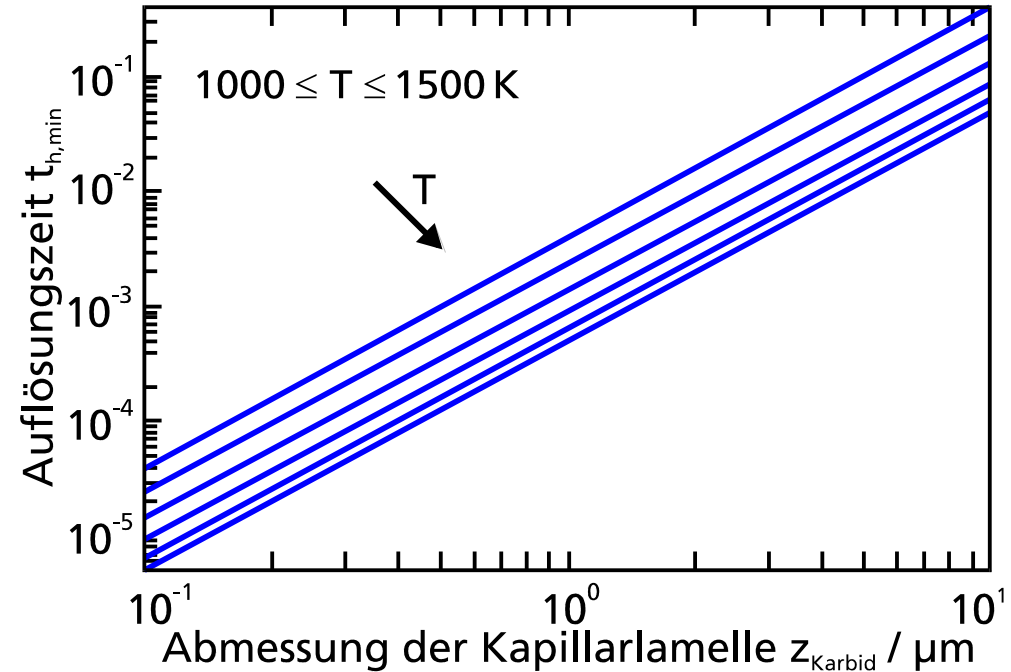
$$t_{h,\min} \propto 3 \times \frac{z_{\text{Karbonid}}^2}{D}$$

typische Dicken von Karbid-Lamellen und Mindesthaltezeiten bei Austenitisierungstemperatur ($T @ 1000 \text{ K}$) sind:

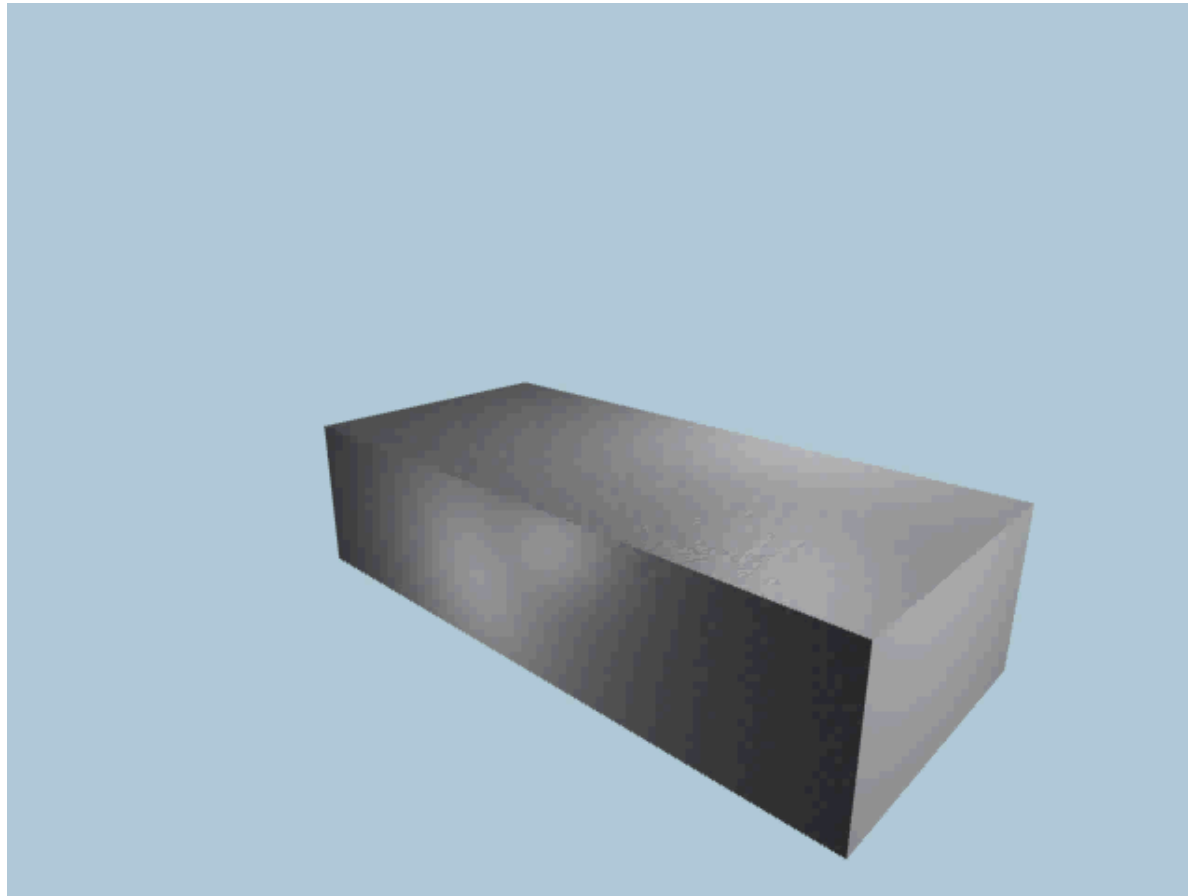
$$0,5 \text{ mm} < z_{\text{Karbonid}} < 3 \text{ mm}$$

$$4 \cdot 10^{-4} \text{ s} < t_{h,\min} < 3 \cdot 10^{-2} \text{ s}$$

Diffusionskoeffizient des Kohlenstoffs im Stahl hängt von verwendeter Stahlsorte und Temperatur ab



Mindesthaltezeiten $t_{h,\min}$ für die vollständige Auflösung von Karbid-Lamellen in Abhängigkeit von der halben Dicke der Lamelle z_{Karbonid} für verschiedene Temperaturen.

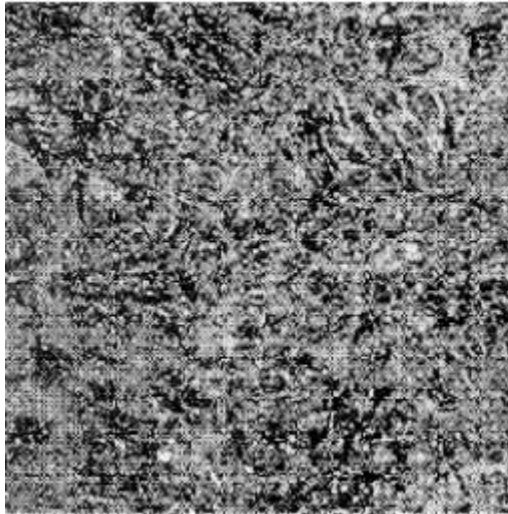


Video

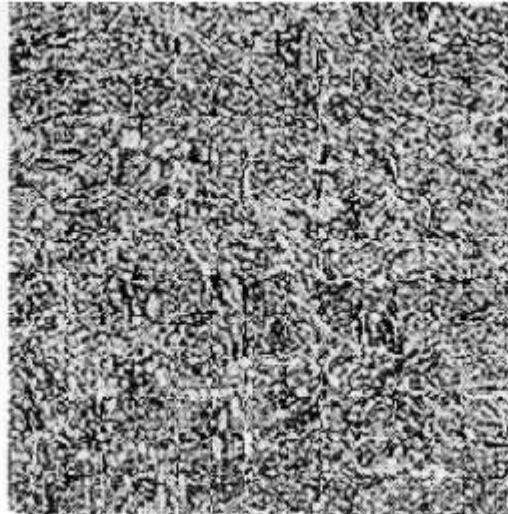
Verfahrensmerkmale

- § noch höhere Erwärmungsgeschwindigkeit als beim Induktionshärten
- § Tiefe der Härtezone abhängig von: Strahlleistung, Leistungsdichte, Wellenlänge des Laserlichts, Vorschubgeschwindigkeit = technologische Parameter
- § **typische Einhärtetiefen: 0,3-2 mm**
- § Flächen durch **paralleles Abfahren** von Bahnen gehärtet
- § **Selbstabschreckung** – keine zusätzliche Kühlung nötig
- § **genau lokalisierbar und präzise steuerbar;**
automatisierbar
- § **hohe Anlagenkosten** (CO₂-Laser, Hochleistungs-Diodenlaser)
- § **werkstoffabhängig:** Auftragen einer **Absorptionsschicht**



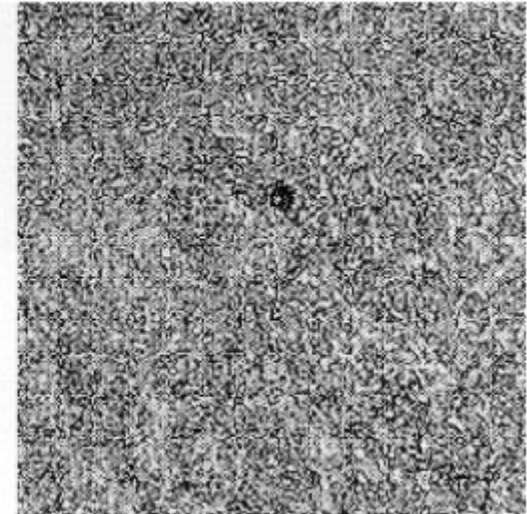


Ofen



induktiv

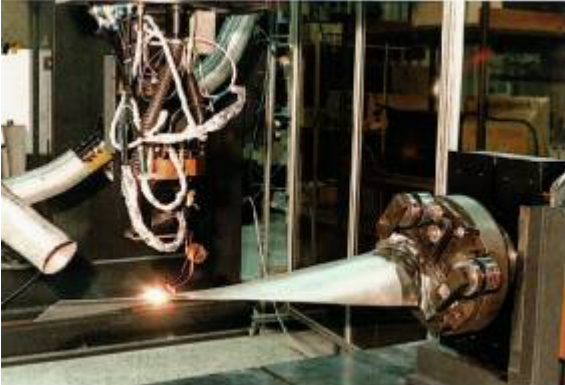
10 mm



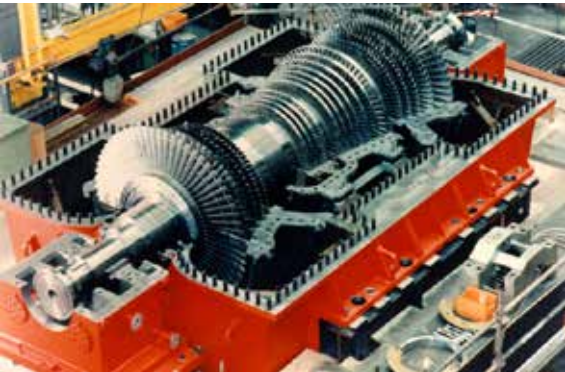
Laser

typische Gefügaufnahmen für Ofenhärtung, Induktions- und Laserstrahlhärtung

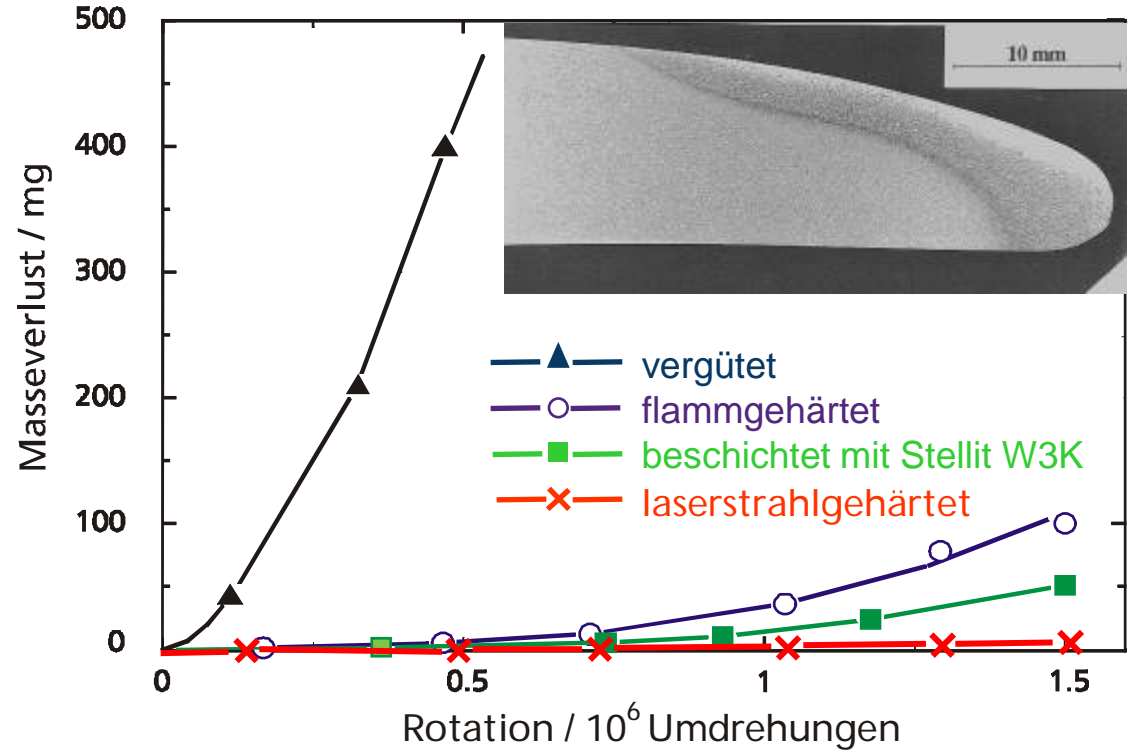
Laserstrahlhärten von Turbinenschaufeln



Härtungsprozess 1300 MW-Schaufel



ND-Stufe 80 MW-Turbine

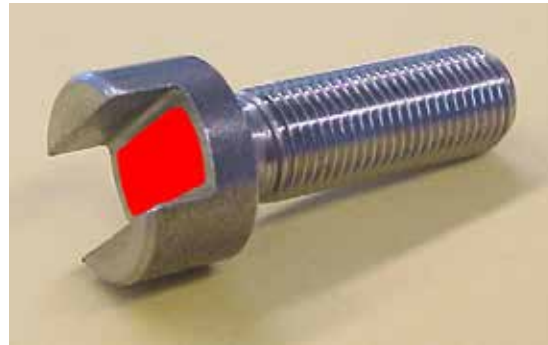


Tröpfchenschlagverschleißtest

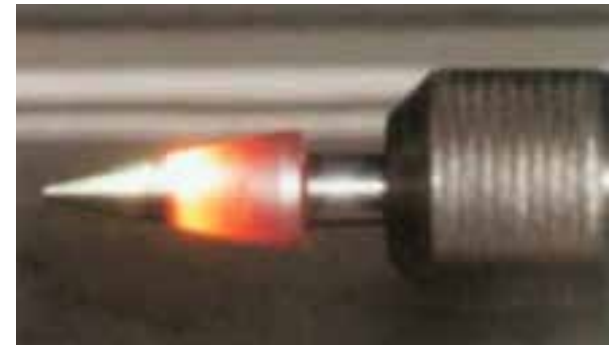
- Härten mit Vorschub



- Härten durch
einen
Laserschuss



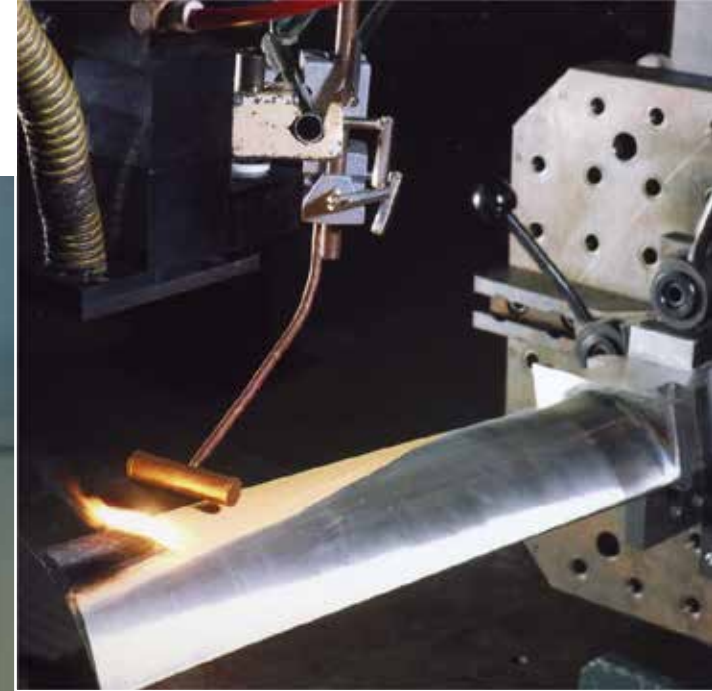
- Härten durch
Rotation



- § Laserstrahlhärten mit unterschiedlichen Lasertypen: CO₂-, Scheiben-, Faser-, Diodenlaser
- § Strahlformung durch reflektive Optiken
- § Strahloszillationen mit Frequenzen > 200 Hz
 - à quasi-stationäre Temperaturfelder
- § Typische Scanwinkel < 8 °



- § Laserstrahlhärten mit unterschiedlichen Lasertypen: CO₂-, Scheiben-, Faser-, Diodenlaser
- § Strahlformung durch reflektive Optiken
- § Strahloszillationen mit Frequenzen > 200 Hz
 - à quasi-stationäre Temperaturfelder
- § Typische Scanwinkel < 8 °



Laserstrahlhärten von Dampfturbinenschaufeln / ausscheidungshärtbare Stähle

Hintergrund

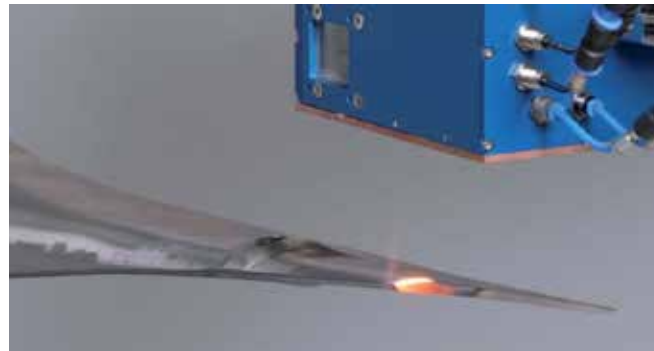
Steigerung des energet. Wirkungsgrades von Dampfturbinen

- § Realisierung **strömungsgünstigerer, stärker verwundener Profile**
- § Entwicklung **freistehender, sehr langer Endstufenschaufeln** ohne Dämpferelemente, die den Strömungswiderstand vergrößern
- § Einsatz von **Deckplattenschaufeln mit geringeren Spaltverlusten**
 - à mechanische Eigenschaften der martensitischen Stähle unzureichend
 - à werkstofftechnische Grenzen verschieben

Lösung

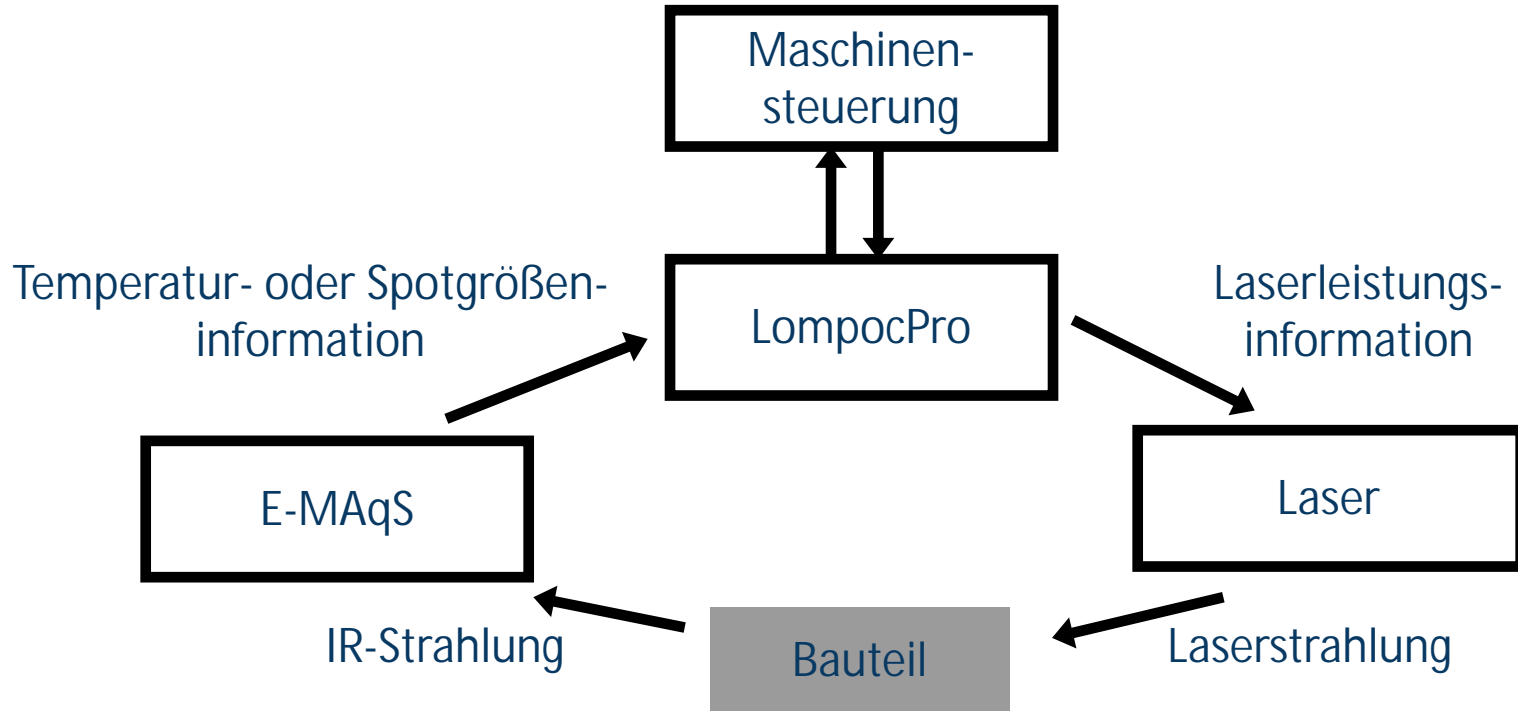
Ausscheidungshärtbare Cr-Ni-Stähle

IWS + Siemens AG entwickelten Technologie: nutzt altbekanntes Prinzip „harte Randschicht – zäher Kern“



[Fraunhofer IWS]

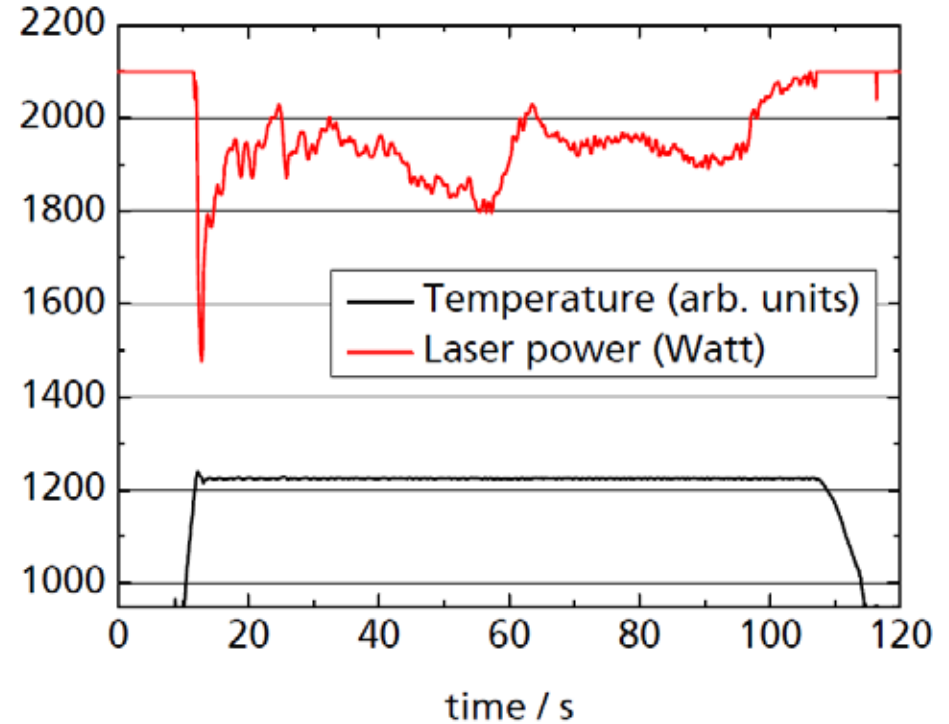
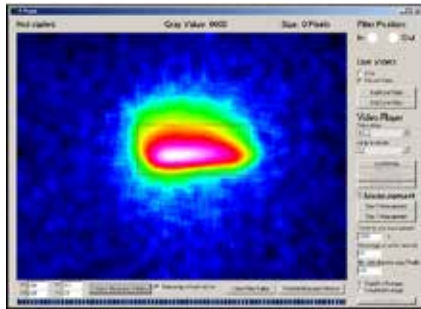
Laserstrahlhärten von Dampfturbinenschaufeln / ausscheidungshärtbare Stähle



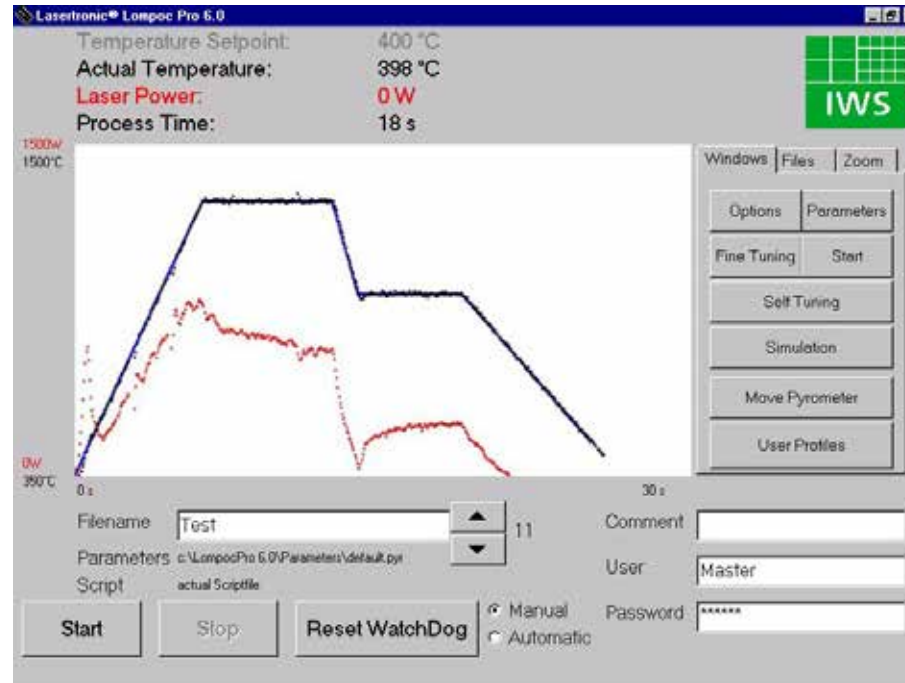
Warum eine Steuerung des Laserhärteprozesses?

- große Abhängigkeit: Härte β \rightarrow Härtetemperatur
- Härtetemperatur nah an der Schmelztemperatur \rightarrow Risiko Schmelzen an Oberfläche
- Veränderte Wärmeleitungsbedingungen (z. B. Kanten, Bohrungen)
- Anstieg der Bauteiltemperatur während der Bearbeitung
- definierte Größe des Laserstrahls während des Prozesses
- hoch sensitiv bzgl. Prozessabweichungen

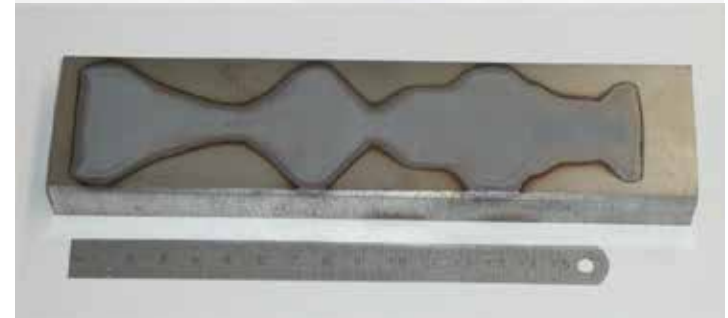
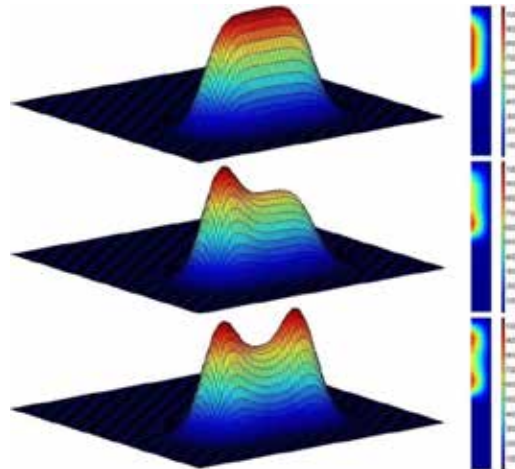
Laserstrahlhärten von Dampfturbinschaufeln / ausscheidungshärtbare Stähle



Laserstrahlhärten von Dampfturbinenschaufeln / ausscheidungshärtbare Stähle



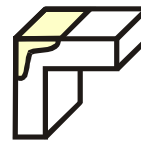
- flexible und programmierbare Laserstrahlgröße
 - $\leq 10\text{kW}$ Laserleistung
 - $\leq 100\text{mm}$ Scanbreiten
 - $\leq 200\text{Hz}$
- angepasstes Intensitätsprofil



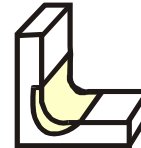
Klassifizierung von Bauteil-
geometrien für die Rand-
schichtbehandlung mit
Laserstrahlung

Typische Formelemente

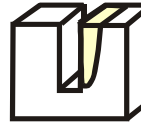
Kanten



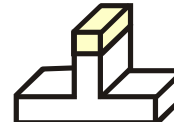
Radien



Nuten



Stege



Zähne



Schneiden



Nadeln



Innenkonturen



Gestalt des Gesamtbauteils

eben



rotationssymmetrisch
(Innen-, Außenzylinder)



konvex



konkav



Werkzeuge

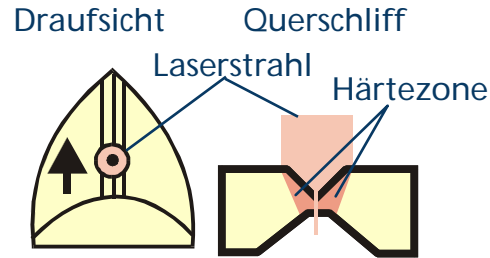


Randschichthärten von Zangenschneiden mit Nd:YAG-Laserstrahlung

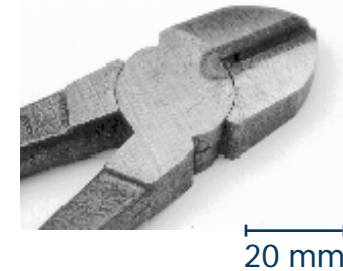
Bearbeitungsbeispiel: Härten von Zangenschneiden

a) Problem: Festigkeitsprobleme im Bereich der Schneidenspitze durch induktives Härten

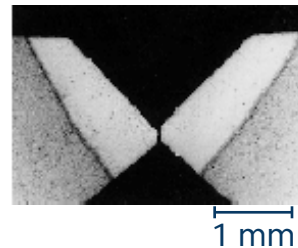
b) Schematische Darstellung



c) Anwendungsbeispiel (Seitenschneider)



d) Querschliff

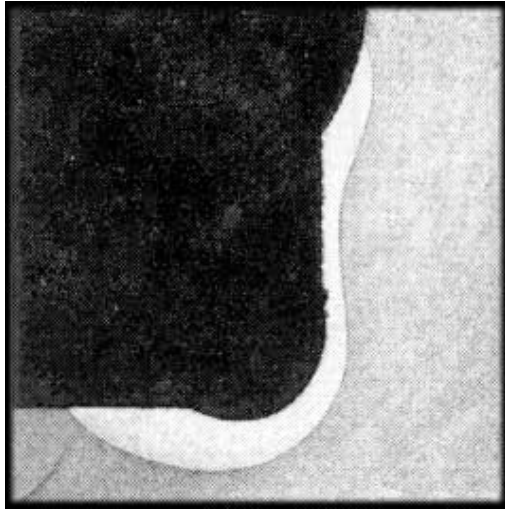


C 45
cw - Betrieb
 $P_w = 800 \text{ W}$
 $f_{\text{Aufw}} = 100 \text{ mm}$

e) Beurteilung

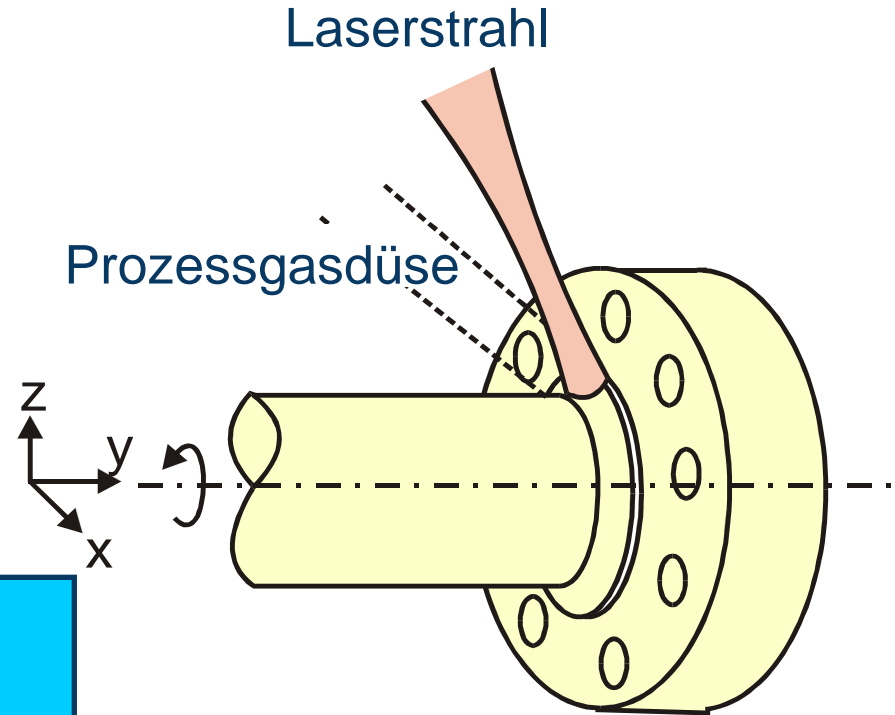
- Härtetiefe LHT³ 1mm
- Härte » 750 - 800 HV 0,3

Einbringung von Druckspannungen durch Radienhärtung



1 mm

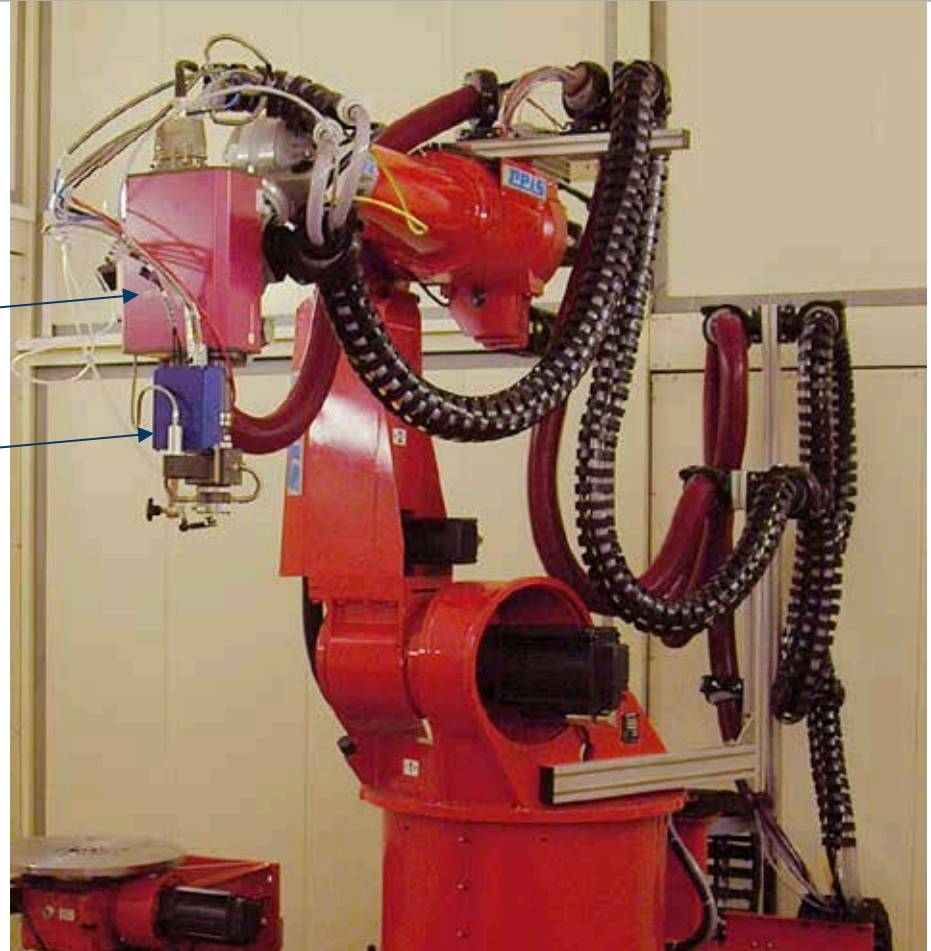
42 CrMoS 4
 $P_W = 1350 \text{ W}$
 $v = 150 \text{ mm/min}$



Diodenlaserhärten mit Robotern

Diodenlaser

Härtoptik



Integrierte Wärmebehandlung

- § Drehfräsmaschine
- § 2.2 kW Diodenlaser an
Werkzeugrevolver
- § Härten integriert in Dreh-
und Drehfräsprozesse
- § Ablauf: Drehen → Härten
→ Hartbearbeitung
ohne Ausspannen des Teiles
→ hohe Präzision
→ schnellere Bearbeitung



Integrierte Wärmebehandlung

- § Dreh-Fräs-Maschine N20 von NILES-Simmons
- § Rofin DL022 an Werkzeugrevolver
- § Laserhärten integriert in Dreh- und Fräsprozesse
- § mechanische Bearbeitung
 - à Härten
 - à mechanische Bearbeitung ohne Ausspannen des Teils
- è höhere Genauigkeit
- è schnellere Bearbeitung



Automatisiertes Laserhärten

GEOPT : Programm zur
Parameterermittlung

LompocPro: Postprocessor zur
Bahnsteuerung

PrOFeT:
Temperaturregelung

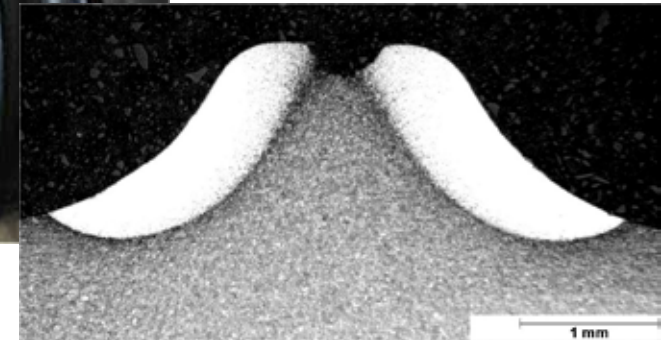
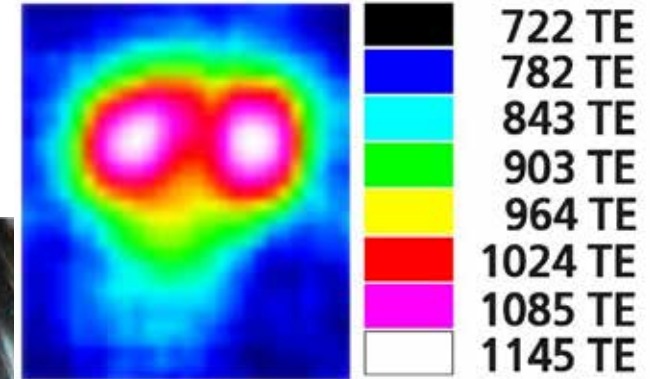
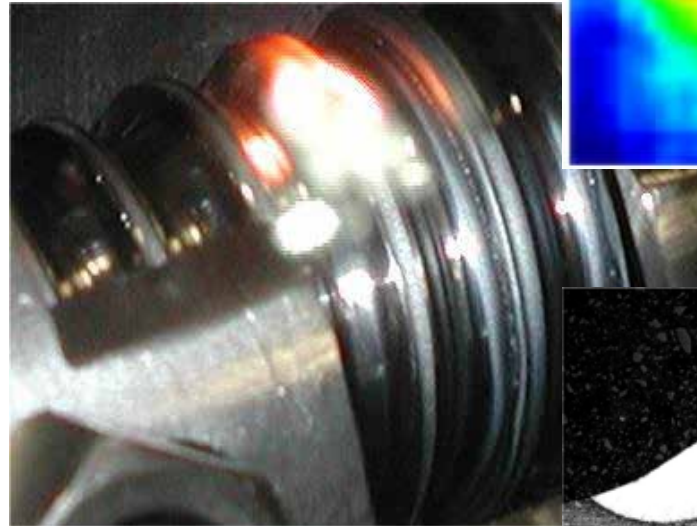


Systemintegriertes Laserhärten



Beispiel Laserhärten

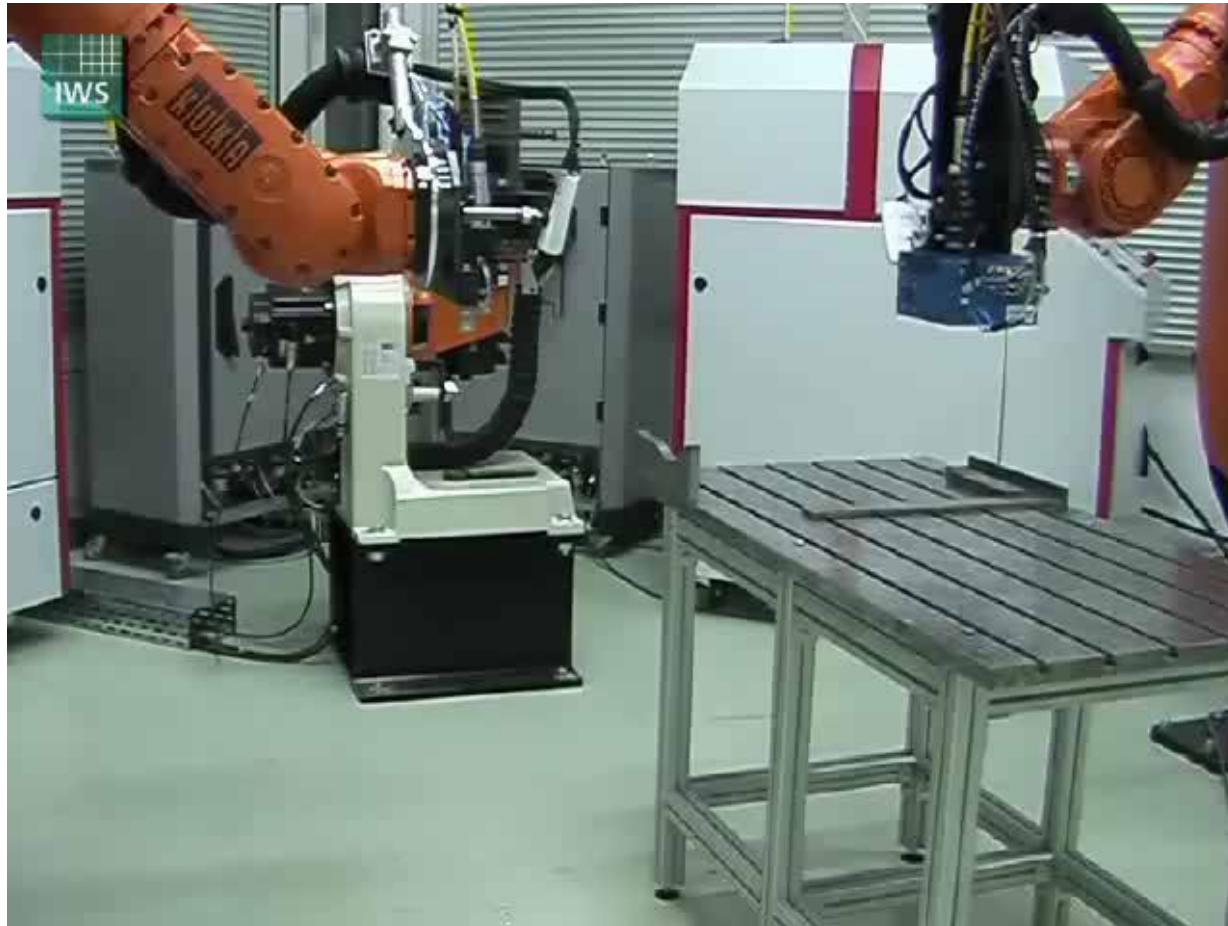
- § Kugellagerschrauben
- § Dual-Laser-Spots
 - à simultan über Splitting-Optik
 - à zwei separate Umwandlungsgebiete
- § konst. Oberflächentemperatur
 - à Software LompocPro
- § Vermeidung erneuten Aufschmelzens



Beispiel Laserhärten - Doppelrobotersystem

- n Robotersystem mit fasergekoppeltem Laser
 - n 3D- Härten komplexer Geometrien
- n Zwei Roboter in Kooperation
 - n simultane Wärmebehandlung von Kanten ohne Anlassgebiete
 - n ausreichende Härtebreite auf beiden Seiten der Kante ohne Durchhärten

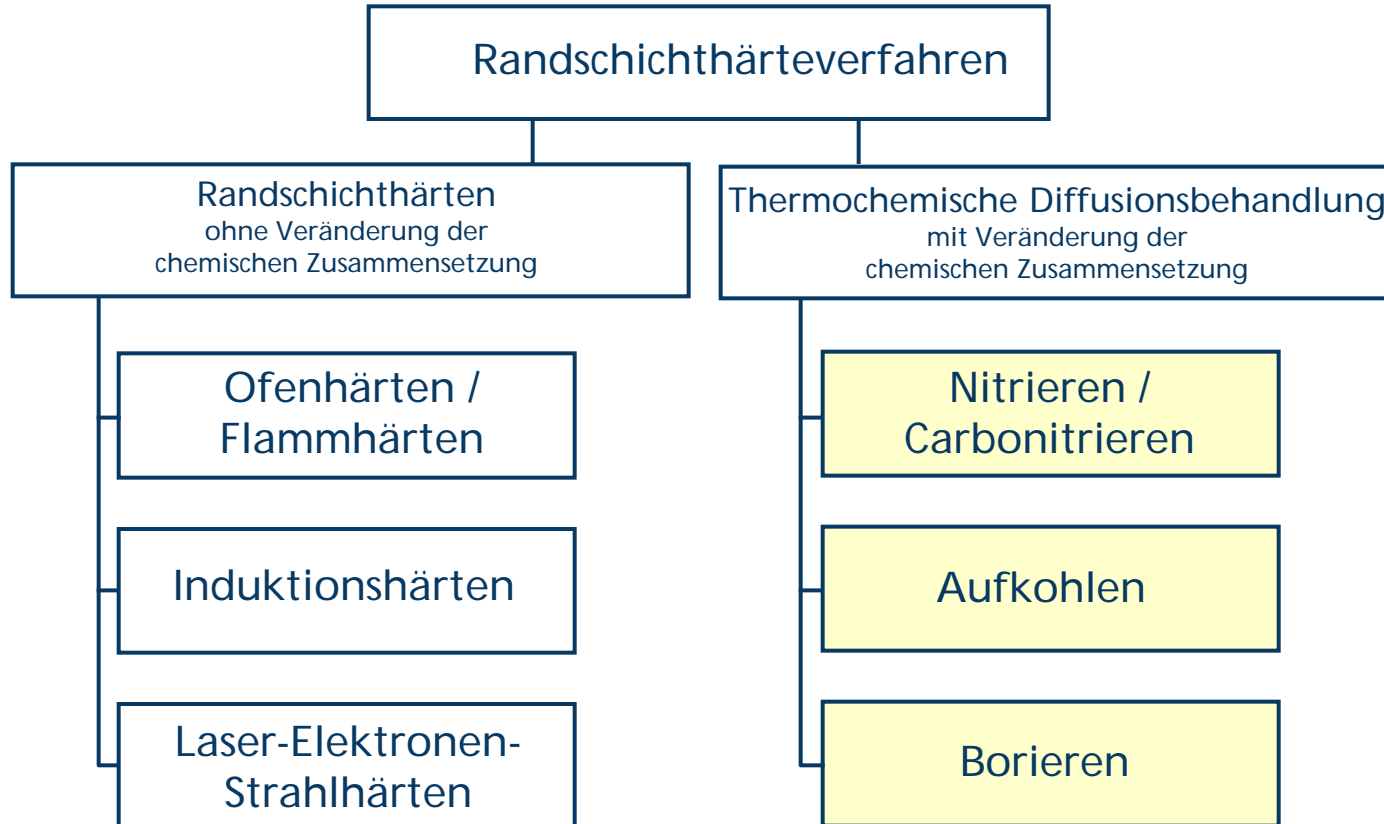


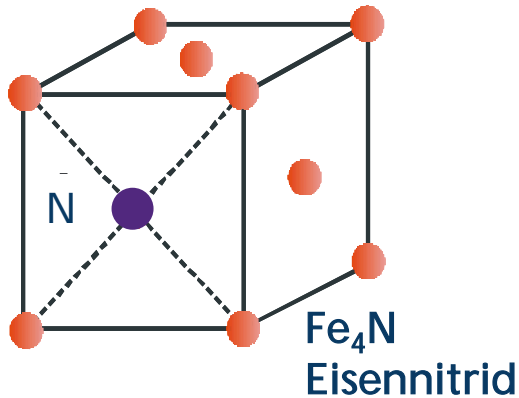
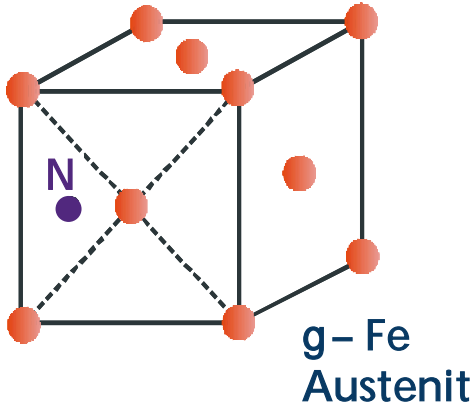


- sehr gute Integrierbarkeit in Produktionslinien
- verschiedene Integrationsmöglichkeiten
 - Linienintegration, zeitparallele Behandlung
 - Maschinenintegration, Serienfertigung
- Prozessrobustheit und Genauigkeit durch Prozesssteuerung
- Laser → teuer

Induktion	Elektronenstrahl	Laserstrahl
Vorteile		
<ul style="list-style-type: none"> · partielle Härtung · hoher Automatisierungsgrad · geringe Investitionskosten · hohe Einhärtetiefe (0.5 - 10 mm) 	<ul style="list-style-type: none"> · präzise örtliche und zeitliche Steuerbarkeit des Energieeintrags · geringer Verzug · keine Vorbehandlung (z. B. Absorptionsschichten) der zu härtenden Fläche nötig · keine externen Abschreckmedien · geringe Einhärtetiefen möglich · geeignet für kleine Losgrößen 	<ul style="list-style-type: none"> · präzise örtliche und zeitliche Steuerbarkeit des Energieeintrags · geringer Verzug · kein Vakuum notwendig · Härten von geometrisch schwierigen Bauteilbereichen · geringe Einhärtetiefen möglich · geeignet für kleine Losgrößen
Nachteile		
<ul style="list-style-type: none"> · hohe Kosten für Induktoren · Anpassung der Induktoren an die Härtaufgabe · externe Abschreckmedien erforderlich · Verzug · hohe Rüstzeiten · geringe Flexibilität 	<ul style="list-style-type: none"> · hohe Investitionskosten · Anlaßzone im Stoßbereich · geringe Einhärtetiefen · Vakuum notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> · hohe Investitionskosten · Anlaßzone im Stoßbereich · geringe Einhärtetiefen · nur für Werkstücke ab einem bestimmten Volumen geeignet · Absorptionsschicht der zu härtenden Flächen erforderlich (nur CO₂-Laser)

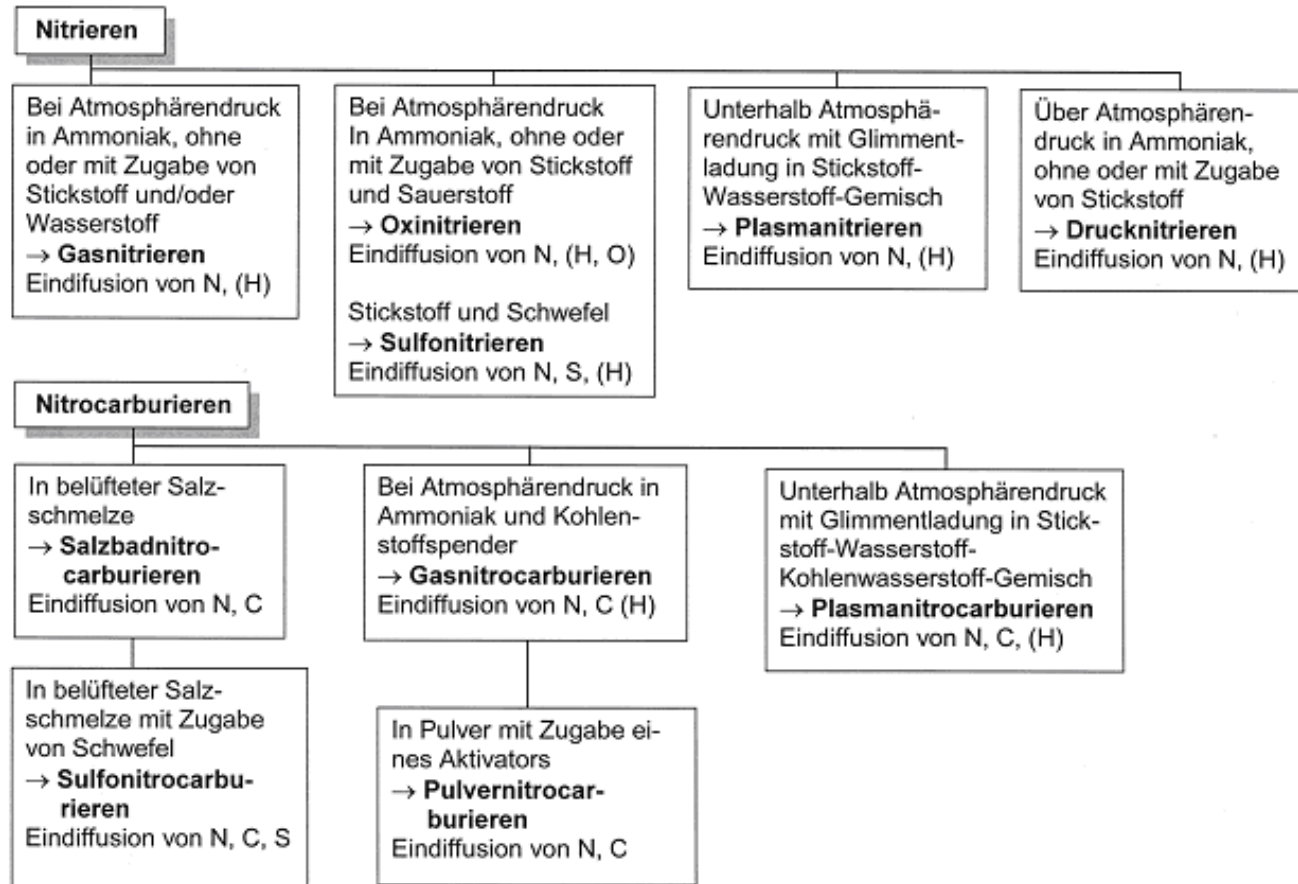
Randschichthärten von Metallen





Diffusionsprozess

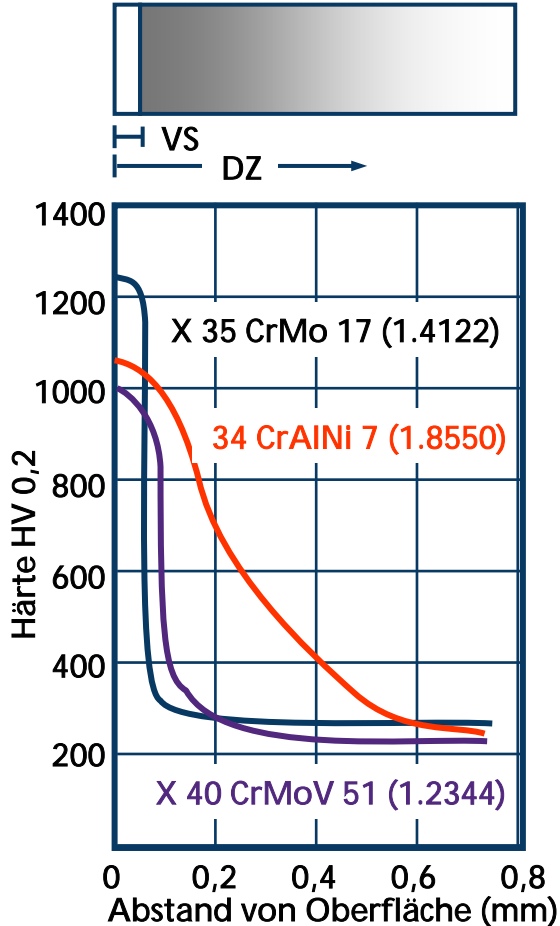
- § atomarer Stickstoff diffundiert in die Oberfläche über Zwischengitterplätze, Fehlstellen oder Korngrenzen
- § Diffusionsprozess ist temperaturabhängig und vergleichbar dem Carburieren und dem Borieren
- § atomarer Stickstoff kann entsprechend dem Kohlenstoff beim Eisenkarbid Fe_3C ins Eisengitter eingebunden werden und bildet dann das kfz-Eisennitrid Fe_4N
- § dieses besitzt **extreme Härte**
- § außerdem kann versprödende ϵ -Nitrid $\text{Fe}_{2,5}\text{N}$ entstehen



Plasmanitrieren

- § Nitriergut in eine **Vakuumkammer** bei 10 bis 1000 Pa (0,1 bis 10 mbar)
- § in einer aus NH₃, CH₄ und N₂ bestehenden Gasmischung über 0,5 bis 20 Stunden
- § **Behälterwandung zur Anode**, das **Werkstück zur Kathode** geschaltet und Gleichspannung von 300 bis 700 V angelegt
- § im entstehenden Plasma chemische Reaktion wie beim Gasnitrieren, jedoch: entstehende **Temperatur zwischen 350 und 600 °C**
- § Chemische Reaktion:





Glimmnitrieren = Ionennitrieren = Ionitrieren

Modifizierung der Bauteiloberfläche durch plasmaunterstützte Eindiffusion von Stickstoff

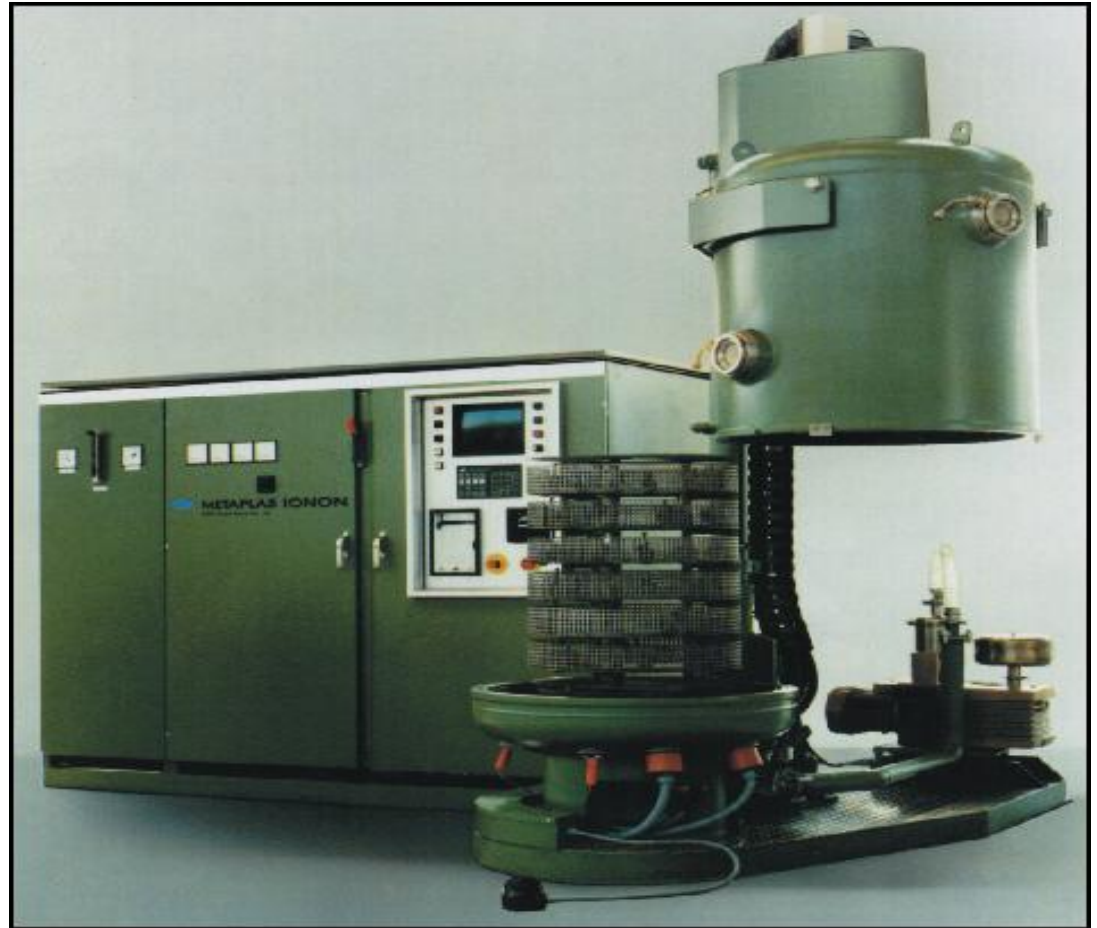
Stahl: 500 - 580 °C, 4 - 20 h

Verbindungsschicht £ 30 µm Eisennitride
6 bis 10 % N (beim Nitrocarburieren
bis 2 % C)
oft mit Porensaum

Diffusionsschicht 100 - 1000 µm
0,2 bis 5 % N, N gelöst in Ferrit und als
feindisperse Nitride und Carbonitride
der Legierungselemente (Cr, Ti, Al, B,..)
ausgeschieden

Haubenofenanlage

alternativ: Schachtofen



 METAPLAS IONON

Bauteile in einer gepulsten DC-Glimmentladung

Druck: 600 Pa
Spannung: 500 V
Puls/Pulspause: 100/200 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$
Gasgemisch N_2/H_2 : 80/20

- § deutlich erkennbar: eng anliegender **Glimmsaum**, der die **gleichmäßige, konturgetreue** Behandlung der Bauteile gewährleistet
- § anomale Glimmentladung: die **gesamte** Kathode ist vom Glimmsaum bedeckt



§ Stähle:

- ∅ im Prinzip alle Stähle nitrierbar
- ∅ mit steigendem Gehalt nitridbildender Legierungselemente nimmt erreichbare Randhärte durch Bildung von Sondernitriden zu
- ∅ da dann weniger Stickstoff für die Diffusion zur Verfügung steht, nimmt die Nht ab
- ∅ mit bestimmten Verfahrensparametern (niedrige Temperatur) auch Austenite ohne Verlust der Korrosionsbeständigkeit nitrierbar

§ Aluminiumlegierungen:

- ∅ Stickstoff unlöslich in Al, daher nur Bildung einer bis zu 15 µm dicken VS aus AlN, keine DZ, Nitrieren nur möglich nach Absputtern der dichten Oxidschicht, dadurch aber große Rauheitszunahme +
- ∅ besseres Verfahren: PI3

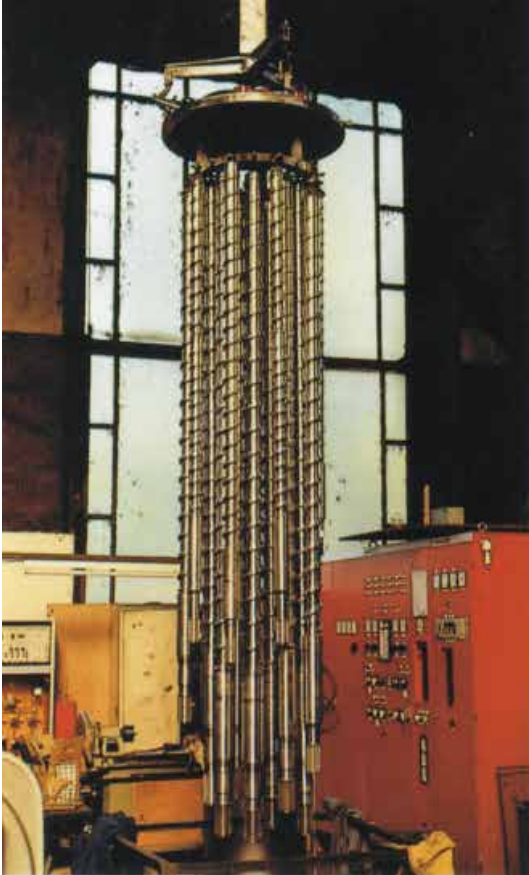
§ Titan und Ti-Legierungen:

Bildung einer VS aus TiN, Ti₂N (und Ti₂AlN), Dicke 3 µm bis 5 µm bei 900 °C

- ∅ Diffusionszone: Nht maximal 60 µm bei 900 °C (TiN Diffusionsbarriere für Stickstoff)

§ Kobaltbasislegierungen, Spritzschichten, Chromschichten

Plasmanitrierte Bauteile



Ende der Vorlesung „Härten“