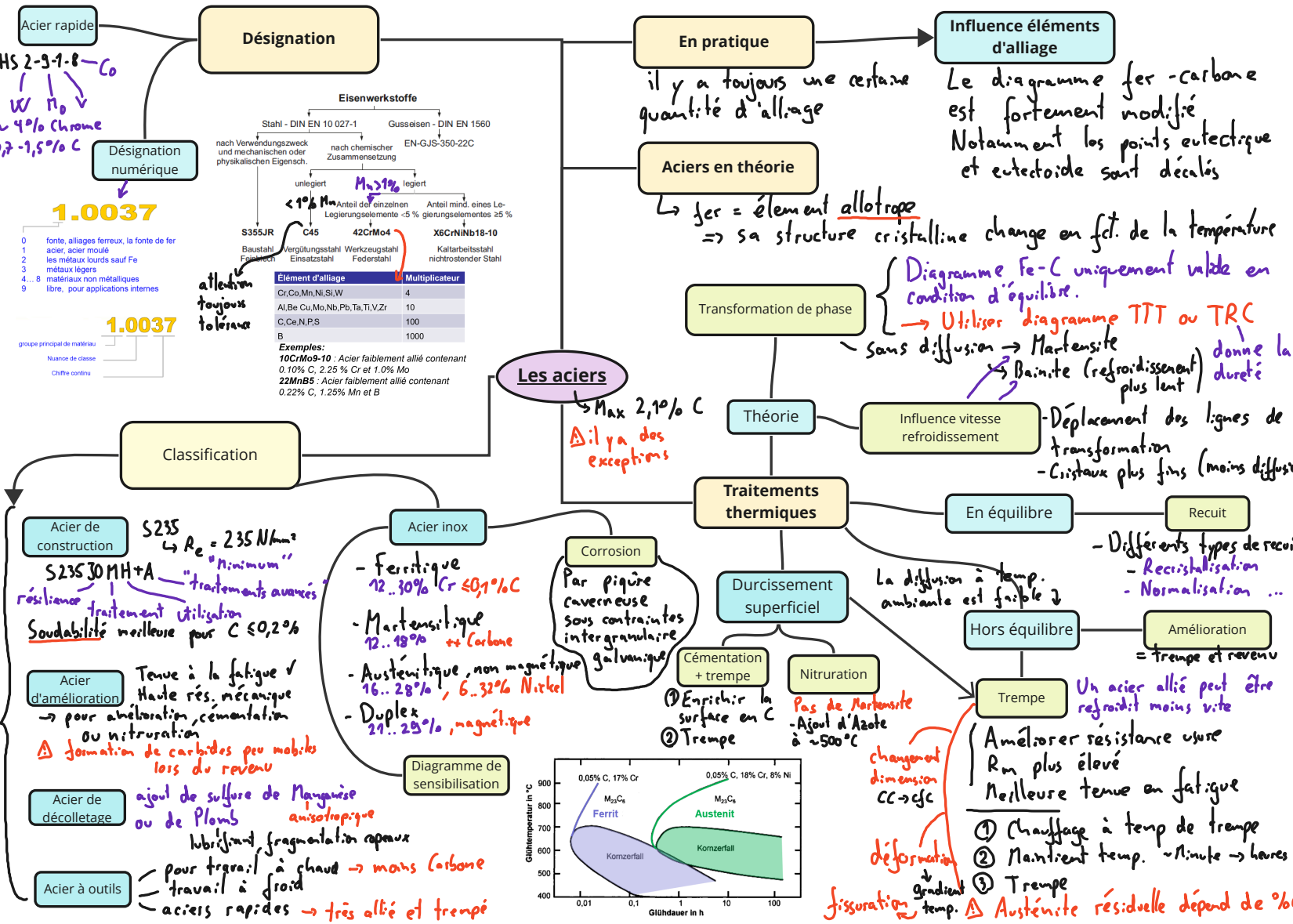
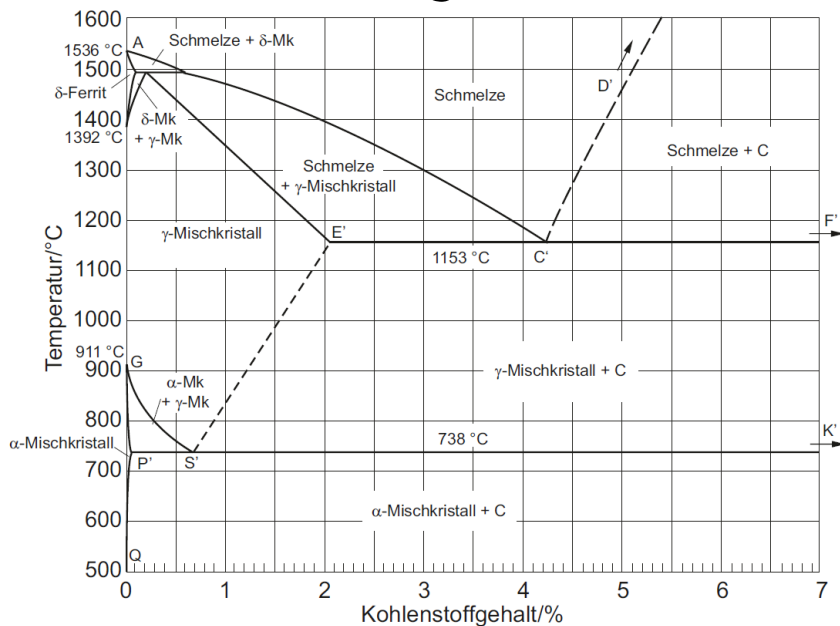




Matériaux 3

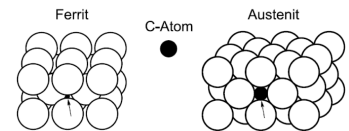
► Diagramme fer-carbone



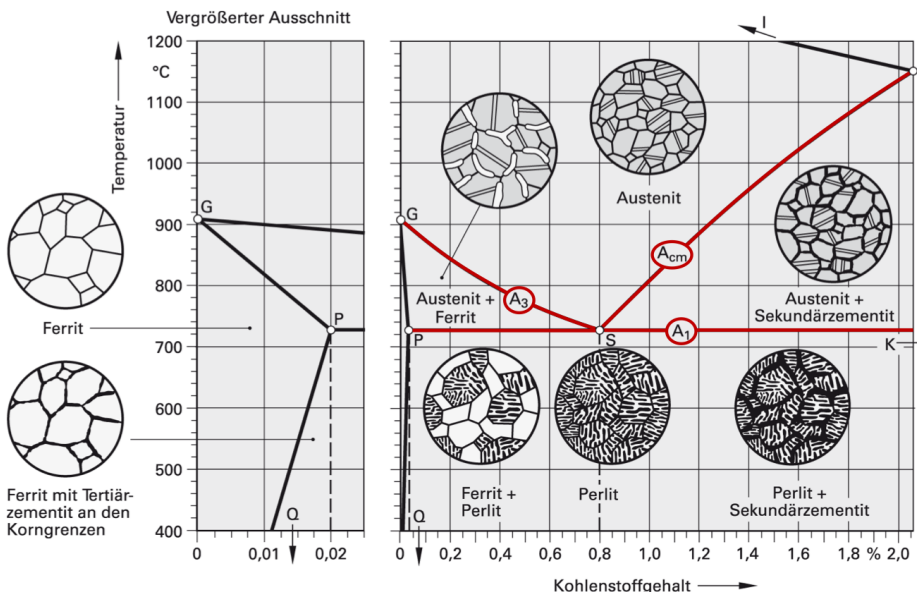
δ : Ferrite
 α : Perlite
 γ : Austénite
 C : Carbide $\rightarrow Fe_3C$

Où va le Carbone?

- ① Forme du graphite (Fontes)
- ② Carbide $\rightarrow Fe_3C$ 6,67% C
- ③ Distribution aléatoire



Le carbone en solution dans l'austénite varie avec la température



Phases et constituants dans le système Fe-Fe₃C

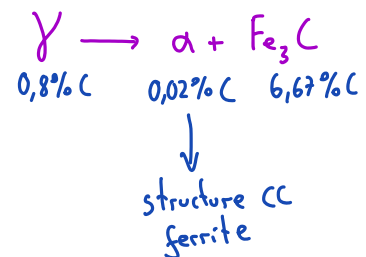
Désignation	Description
Austenite γ	Structure cfc (sol-solide γ) C en solution (max. 2.06% à 1147°C); amagnétique; conduct. Thermique inf. à la ferrite, coeff. de dilatation thermique sup. à la ferrite; n'existe qu'au dessus de la température eutectoïde de 723°C.
Ferrite δ ou α	Structure cc (sol-solide α) peu de C en solution (max. 0.02% à 723°C, <0.001% à 20°C); magnétique (au-dessous de 769°C) $\delta \rightarrow <0,1\% C$
Cémentite Fe_3C	Liaison intermétallique Fe_3C ; structure rhomboédrique; dur et fragile; se décompose en graphite et fer à haute température et des temps très long (métastable)
Perlite $\alpha + Fe_3C$	Eutectoïde constitué de 88.2% de ferrite et 11.8% de cémentite avec une structure lamellaire fine. $\alpha = 0,02\% C$
Lédéburite Perlite + Fe_3C	Eutectique, principalement constituée de 51.5% d'austénite et 48.5% de cémentite (Lédéburite I), de perlite et de cémentite au-dessous de la température eutectoïde (Lédéburite II)

Phases



Microconstituants à plusieurs phases

Formation Perlite



Bainite $\rightarrow$ ferrite + Fe_3C
 Refroidissement trop rapide pour perlite mais trop lent pour martensite
 Martensite $\rightarrow$ ferromagnétique
 Sans diffusion, métastable

▶ Structure cristalline

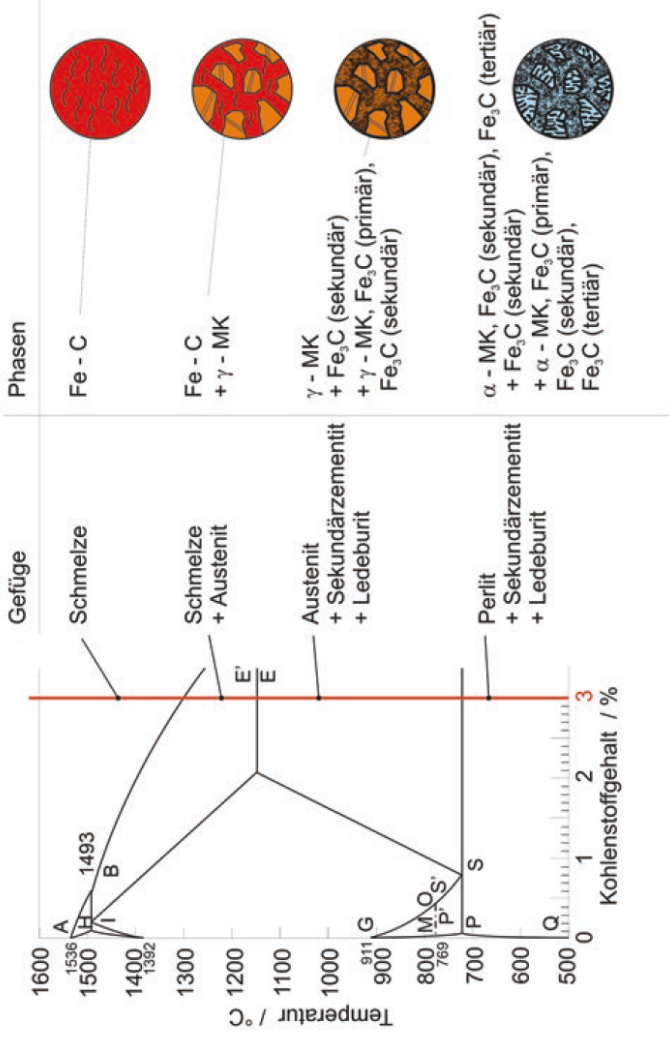


Abb. 6.15 Beispiel 3; C = 3,0 %

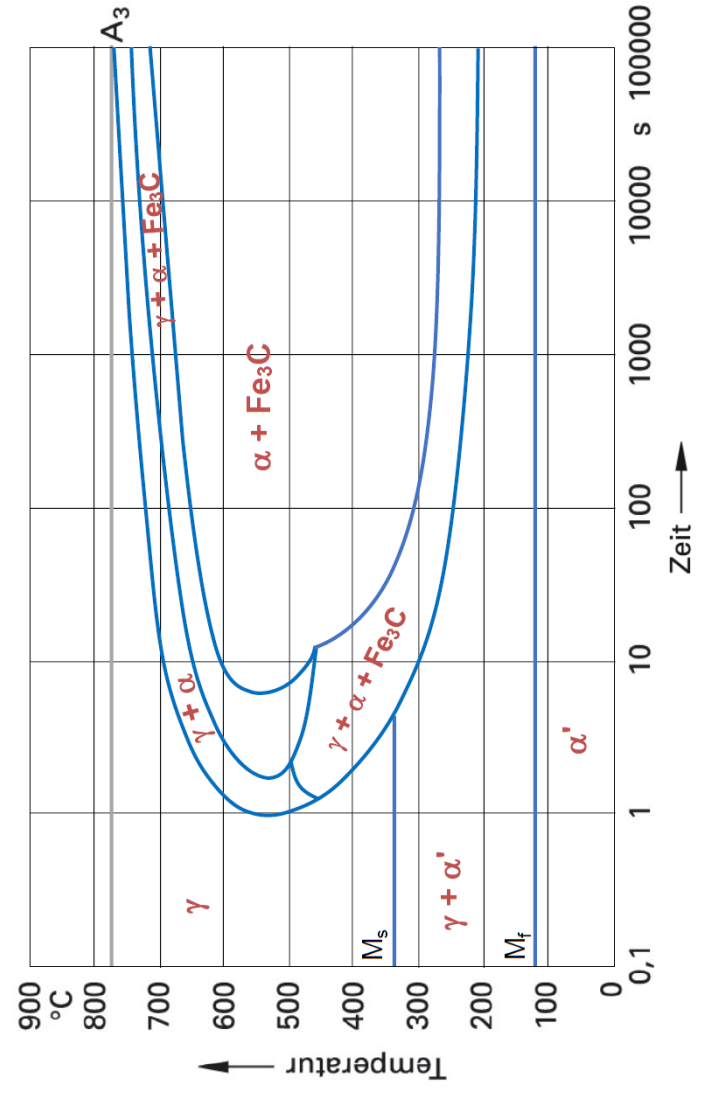


Abb. 6.15 Beispiel 3; C = 3,0 %

La microstructure (microscopie optique)

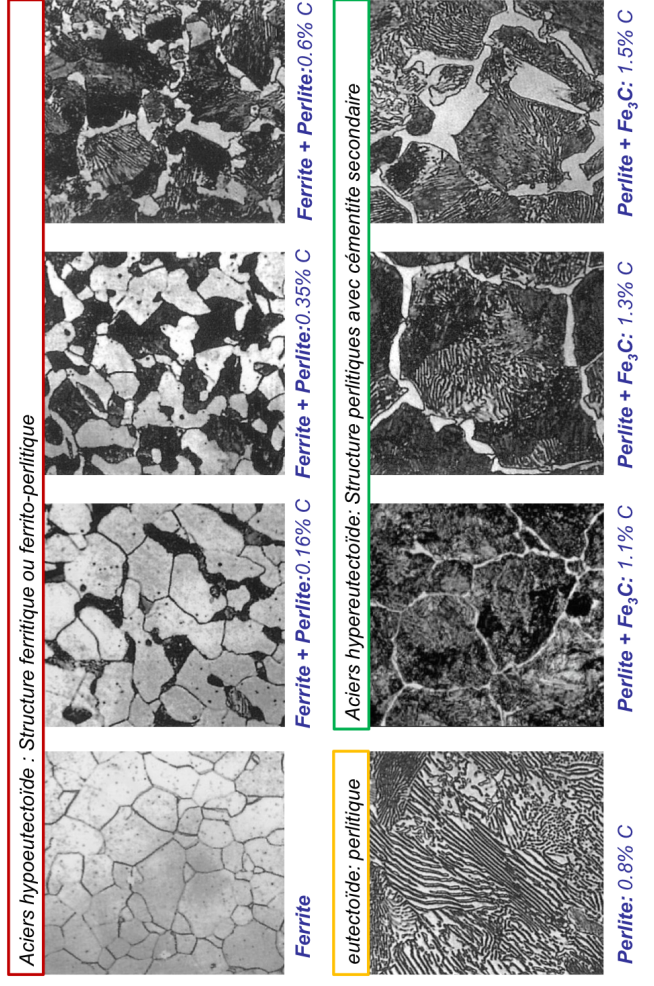
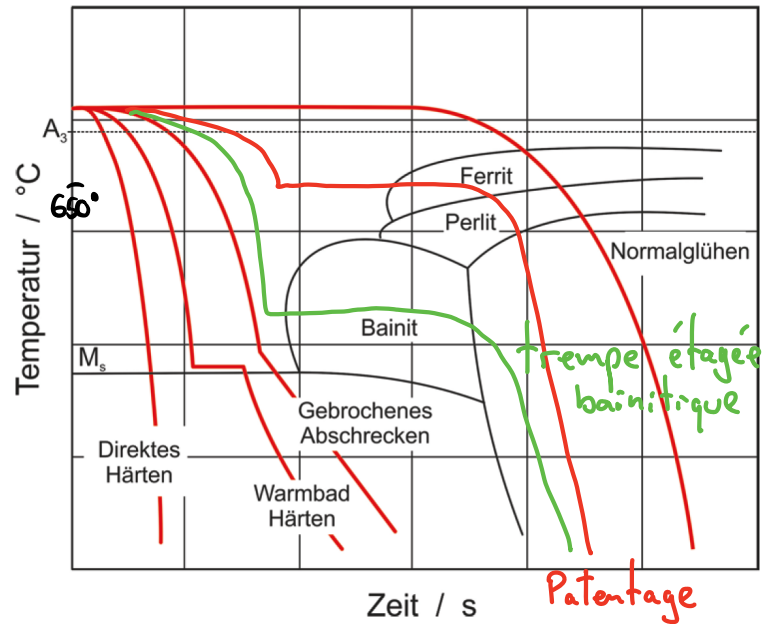
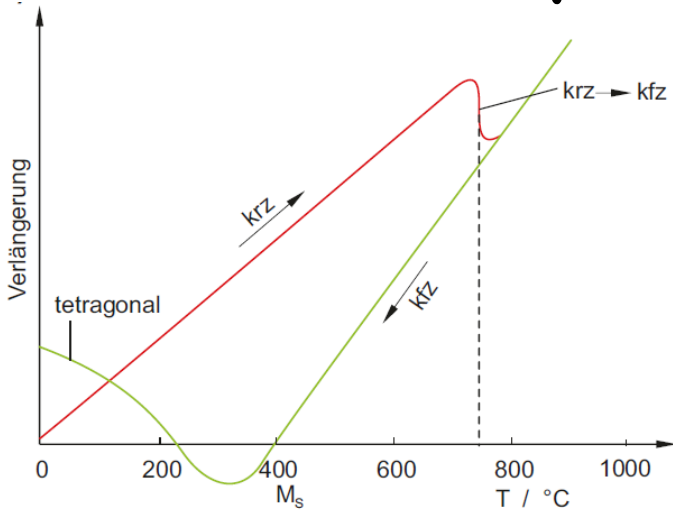


Abb. 6.14 Beispiel 2; C = 0,4 %

Traitements thermique



La transformation martensitique apparaît quand la maille veut passer de cubique face centrée (austénite) à (cubique centrée) mais le passage est trop rapide et il y a un cisaillement du réseau. Les carbones sont piégés dans le réseau distordu tétragonal.

Influence des alliages

→ Formation de Carbides

La plupart des éléments d'addition :

Diminuent la vitesse de diffusion du carbone

→ ce qui ralentit les transformations diffusives

→ ce qui diminue la vitesse critique de trempe

→ ce qui augmente la profondeur de durcissement

→ ce qui permet de durcir aussi des grandes pièces jusqu'au cœur

Einfluss der Legierungselemente auf die Eigenschaften des Stahles									
The effect of alloying elements									
Legierungselement	Mechanische Eigenschaften								Abkühlungsgeschwindigkeit Cooling rate
	Caractéristiques mécaniques								
Elément d'alliage	Mechanical properties								
Alloying element	Härte Dureté Hardness	Festigkeit Résistance Strength	Streckgrenze Limite d'allongement Yield point	Dehnung Allongement Elongation	Einschnürung Reduction of area Striction	Kerbschlagzähigkeit Resilience Impact value	Elastizität Élasticité Elasticity	Wärmebeständigkeit High temp. stability	
Silizium Silicium Silicon	↑	↑	↑↑	↓	~	↓	↑↑↑	↑	↓
Mangan bei perlitischen Stählen Manganèse aux aciers perlitiques Manganese at perlitic steels	↑	↑	↑	~	~	~	↑	~	↓
Mangan bei austenitischen Stählen Manganèse aux aciers austénitiques Manganese at austenitic steels	↓↓↓	↑	↓	↑↑↑	~	-	-	-	↓↓
Chrom Chrome Chromium	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓↓↓
Nickel bei perlitischen Stählen Nickel aux aciers perlitiques Nickel at perlitic steels	↑	↑	↑	~	~	~	-	↑	↓↓
Nickel bei austenitischen Stählen Nickel aux aciers austénitiques Nickel at austenitic steels	↓↓	↑	↓	↑↑↑	↑↑	↑↑↑	-	↑↑↑	↓↓
Aluminium Aluminium Aluminium	-	-	-	-	↓	↓	-	-	-
Wolfram Tungstène Tungsten	↑	↑	↑	↓	↓	~	-	↑↑↑	↓↓
Vanadium Vanadium Vanadium	↑	↑	↑	~	~	↑	↑	↑↑	↓↓
Kobalt Cobalt Cobalt	↑	↑	↑	↓	↓	↓	-	↑↑	↑↑
Molybdän Molybdène Molybdenum	↑	↑	↑	↓	↓	↑	-	↑↑	↓↓
Kupfer Cuivre Copper	↑	↑	↑↑	~	~	~	-	↑	-
Schwefel Soufre Sulphur	-	-	-	↓	↓	↓	-	-	-
Phosphor Phosphore Phosphorus	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓↓	-	-	-
↑ Erhöhung Elevation Increase									
↓ Verminderung Diminution Reduction									
~ ca. gleichbleibend ~ env. constant ~ ca. constant									

L'influence des éléments d'alliage sur les caractéristiques d'aciers on the properties of steel										
Kohlenstoff Formation of carbure Carbon formation	Verschleißfestigkeit Resistance à l'usure Resistance to wear	Schmiedbarkeit Forgeability Forgeability	Zerspanbarkeit Usability Machability	Verzunderung Calamination Scaling	Nitrifizierbarkeit Nitrurability Nitribility	Rostbeständigkeit Resistance to corrosion	Magnetische Eigenschaften Caractéristiques magnétiques Magnetic properties			
							Hysteresis Hysteresis Hysteresis	Permeabilität Perméabilité Permeability	Koerzitivkraft Force coercive Coercive force	Remanenz Remanence Remanence
↓	↓↓↓	↓	↓	↓	↓	-	↓↓	↑↑	↓↓	↓
~	↓↓	↑	↓	~	~	-				
-	-	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	-	-	unmagnetisch not magnetic			
↑↑	↑	↓	-	↓↓↓	↑↑	↑↑↑		↑	↑↑	
-	↓↓		↓	↓	-	-		↑↑	↑↑	
-	-	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	-	↑↑	unmagnetisch not magnetic			
-	-	↓↓	-	↓↓	↑↑↑	-		↑↑	↑↑	
↑↑	↑↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↑	-		↑↑↑	↑↑↑	
↑↑↑	↑↑	↑	-	↓	↑	↑				
-	↑↑↑	↓	~	↓	-	-		↑↑	↑↑↑	↑↑↑
↑↑↑	↑↑	↓	↓	↑↑	↑↑	-		↑		
-	-	↓↓↓	~	~	-	↑				
-	-	↓↓↓	↑↑↑	-	-	↓				
-	-	↓	↑↑	-	-	-				
↑ nicht charakteristisch oder unbekannt non caractéristique ou inconnu not characteristic or unknown							mehrere Pfeile = stärkere Wirkung plusieurs flèches = influence plus marquée several arrows = more intensive effect			

- nicht charakteristisch oder unbekannt
- non caractéristique ou inconnu
- not characteristic or unknown

mehrere Pfeile = stärkere Wirkung
plusieurs flèches = influence plus marquée
several arrows = more intensive effect

Types d'aciers

Aciers à outils

Nuance	Composition	Propriété principale
Aciers à outils non alliés pour travail à froid	0.5 - 1.5% C	Résistance à l'usure
Aciers à outils alliés pour travail à froid	Cr, Mo, V, W	Résistance à l'usure
Aciers à outils pour travail à chaud	W, Mo, V, Cr	Résistance à l'usure aux températures élevées
Aciers rapides	W ≤ 19%, Mo ≤ 10% V, Co, 0.7 - 1.5% C	Résistance à l'usure aux températures élevées

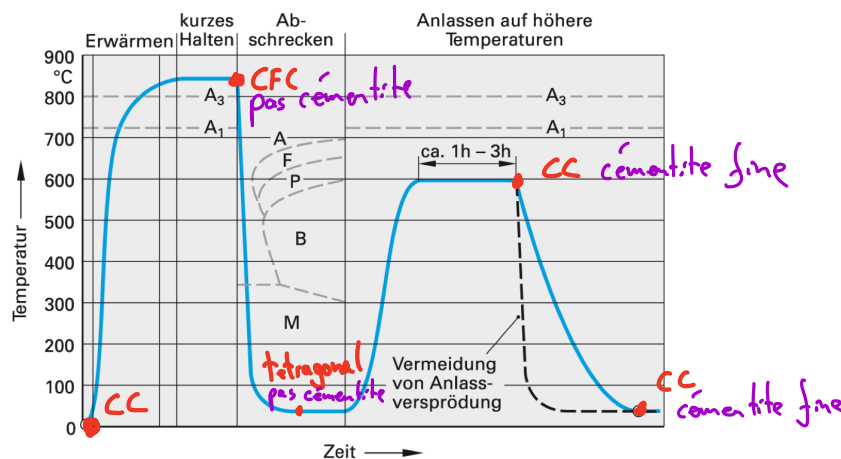
plus d'alliage et trempe plus profonde

teneur élevée en alliage
structure lédéburitique

- il faut chauffer fort pour mettre les carbides en solution

- il faut plusieurs revenus (austénite résiduelle)

Aciers d'amélioration



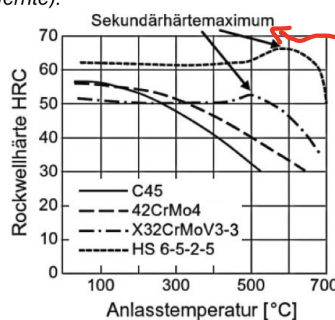
1. Stade à env. 80-200°C : Le carbone commence à précipiter sous la forme du «carbure ε» ($Fe_{2.4}C$), un carbure métastable. Cette précipitation s'accompagne d'une diminution sensible de la sursaturation en carbone, et donc de la distorsion de la maille quadratique de la martensite

2. Stade à env. 200-300°C : Dans le cas des aciers non ou faiblement alliés, l'austénite résiduelle commence à se décomposer en martensite cubique et en carbure ε.

3. Stade à env. 300-400°C : Transformation du carbure ε en cémentite (Fe_3C). La martensite devient de plus en plus pauvre en carbone. La précipitation du carbone est complète et la maille du fer retrouve sa forme cubique centrée d'équilibre (ferrite).

4. Stade à env. 450-600°C : Dans le cas des aciers alliés contenant des éléments carburigènes (formateur de carbures), des carbures spéciaux (p. ex. Mo_2C , V_4C_3 , W_2C , TiC) précipitent, ce qui provoque un durcissement secondaire. L'austénite résiduelle se transforme en Martensite au cours du refroidissement après revenu.

Dans le cas des aciers non ou faiblement alliés, la sphéroidisation, la coalescence et la croissance des particules de cémentite engendrent un adoucissement de l'acier dans cet intervalle de température.



Dureté définie par taux de Carbone

Les carbides migrent et créent une meilleure dureté

Aciers inoxydables

+ Carbone permet la trempe mais nuit à la soudabilité et peut piéger le Chrome en Carbide

→ Le recuit enlève les tensions mécaniques résiduelles du formage

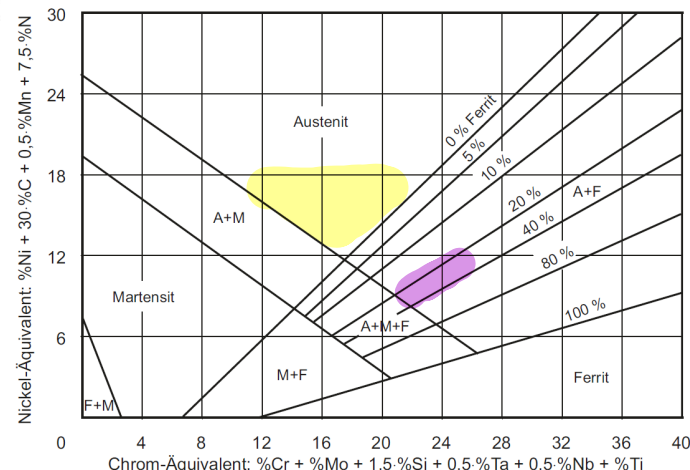


Abb. 6.22 Schaefflerdiagramm

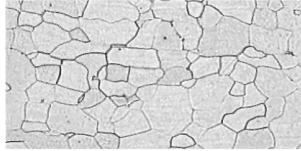
► Aciers inoxydables

La classification principales des acier inoxydables :

Les aciers ferritiques :

- aciers au chrome
- 12%...30% de chrome, $\leq 0.1\%$ de carbone
- magnétique

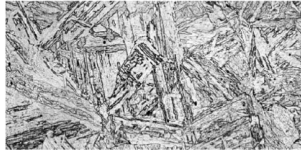
CC



Les aciers martensitiques :

- aciers au chrome
- 12%...18% de chrome, 0.15%...1.2% de carbone
- magnétique
- trempable ($\rightarrow$ résistant à l'usure)

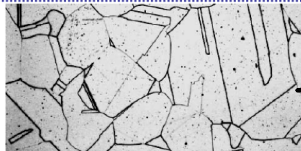
tetragonal



Les aciers austénitiques :

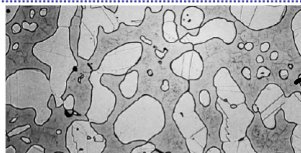
- aciers au Cr-Ni-(Mo)
- 16%...28% de chrome, 6%...32% de nickel, $\leq 0.15\%$ de C
- non-magnétique en état de livraison
- les plus courants (env. 65% du marché mondial)

CFC



Les aciers duplex (austéno-ferritiques) :

- aciers au Cr-Ni avec une structure formée de ferrite et d'austénite
- 21%...29% de chrome, 4%...7% de nickel, $\leq 0.05\%$ de C
- magnétique



L'ajout de Chrome réduit le domaine Austénite

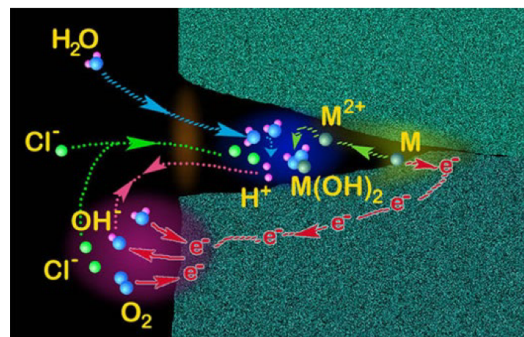
La déformation mécanique peut créer de la martensite magnétique

$\rightarrow$ Bonne soudabilité, ténacité
Re élevé, résistant corrosion sous contrainte

► Corrosion

Le chrome crée une couche de protection passive.

⚠ Formation carbides si C est trop élevé

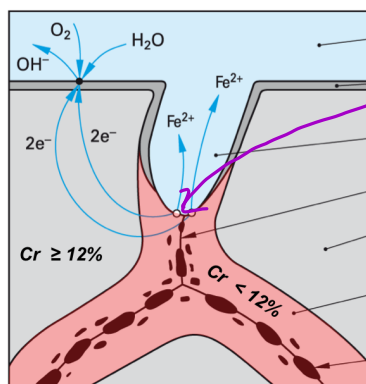


Corrosion sous contrainte

- $\rightarrow$ Contrainte en tension
- $\rightarrow$ Environnement agressif
- $\rightarrow$ acier inox austénitique

Les fissures se propagent de manière invisible

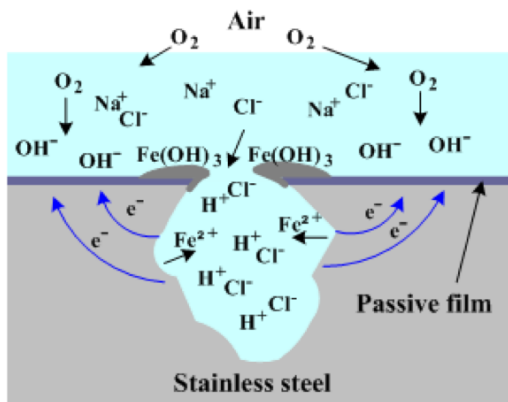
Corrosion caverneuse



Zone appauvrie en Chrome à cause de Chrome Carbide

Corrosion galvanique

- $\rightarrow$ Deux métaux noblesse différente
- $\rightarrow$ Choisir les bon métaux
- $\rightarrow$ Protection cathodique



Mécanisme de la corrosion par piqûres

Les caractéristiques technologiques :

	Ferrite	Martensite	Austenite	Duplex		Ferrite	Martensite	Austenite	Duplex
Résistance à la corrosion / CSC	bonne / non	bonne / non	très bonne / oui	très bonne / peu	Limite élastique $R_{p0.2}$	270 MPa	650 MPa	220 MPa	450 MPa
Usinabilité	bonne	médiocre	mauvaise	mauvaise	Résistance à la traction	500 MPa	900 MPa	600 MPa	750 MPa
Soudabilité	médiocre	mauvaise	(très) bonne	bonne	Allongement à la rupture	20 %	10 %	40 %	25 %
Formabilité	bonne	mauvaise	très bonne	médiocre	Dureté		55-60 HRC (gehärtet)		
trempable	non	oui	non	non	Module d'élasticité	220 GPa	215 GPa	200 GPa	200 GPa
magnétisable	oui	oui	non	oui	Coefficient de dilatation	$10 \cdot 10^{-6} K^{-1}$	$10 \cdot 10^{-6} K^{-1}$	$16 \cdot 10^{-6} K^{-1}$	$13 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
					Conductivité thermique	25 W/mK	25 W/mK	15 W/mK	15 W/mK