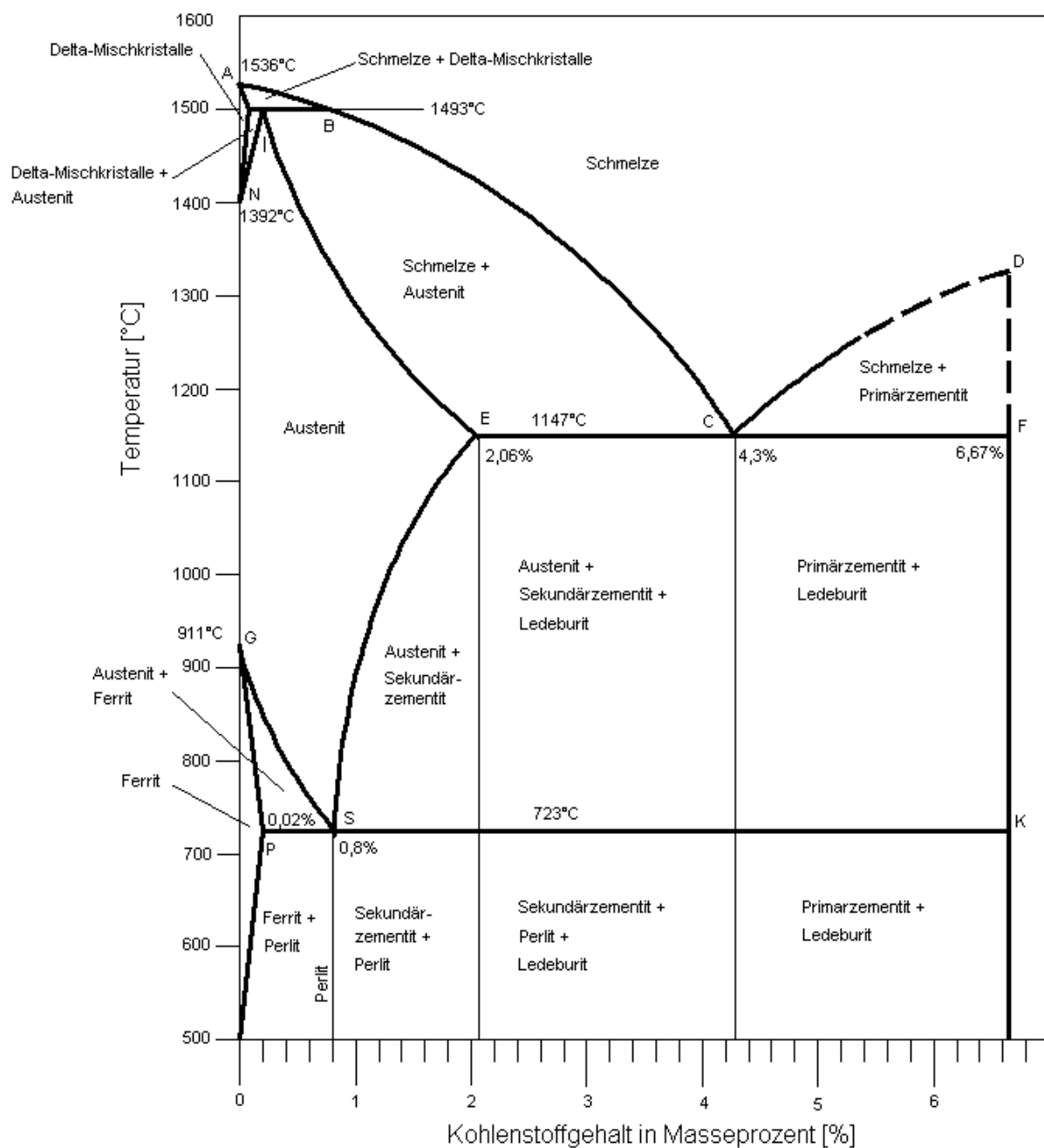


2. Stähle und ihre Eigenschaften

2.1. Abgrenzung Stahl - Gusseisen

Die Eigenschaften der Eisenwerkstoffe lassen sich durch Legierungsbildung und Wärmebehandlung in weiten Grenzen verändern. Ständiges und wichtigstes Begleitelement der Eisenwerkstoffe ist der Kohlenstoff.

Eisen-Kohlenstoff-Diagramm



Die wichtigsten Kurvenzüge im Zustandsdiagramm bedeuten:

Linie A-B-C-D: Liquiduslinie; Oberhalb dieser Linie liegt nur Schmelze vor.

Linie A-H-I-E-C-F: Soliduslinie; Unterhalb dieser Linie liegen nur feste Kristalle vor.
Zwischen Solidus- und Liquiduslinie stehen Schmelze und Kristalle miteinander im Gleichgewicht.

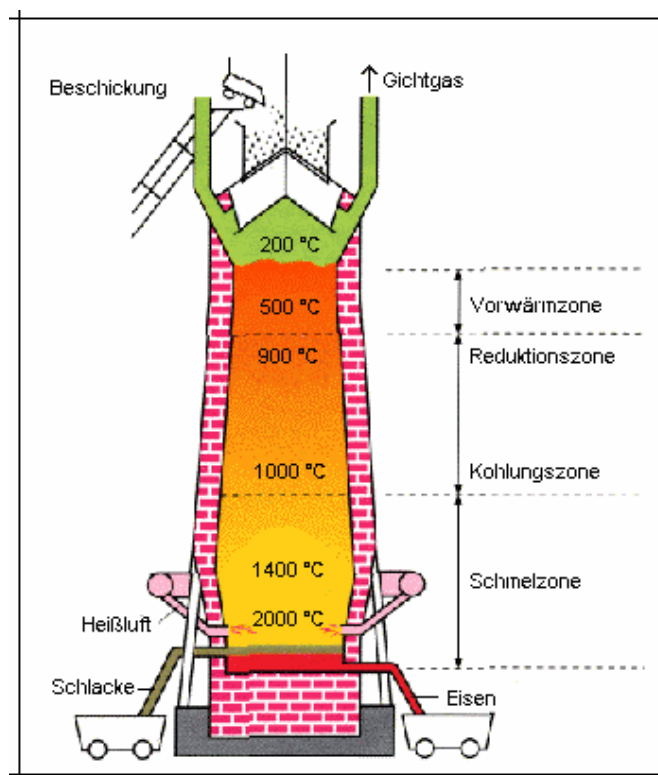
Eisenwerkstoffe, bei denen die Schmelze bzw. die Restsschmelze entlang der Linie E-C-F (1.147 °C) kristallisiert, werden als Gusseisen bezeichnet. Die untere Grenze des Kohlenstoffgehaltes beträgt bei Gusseisen etwa 2,06 Masse-% Kohlenstoff.

Stähle sind Eisenwerkstoffe mit einem Kohlenstoffgehalt < 2,06 Masse-% Kohlenstoff. Im Gegensatz zum Gusseisen werden die Stähle entsprechend ihres C-Gehaltes weiter unterteilt. Bei den technisch gebräuchlichen Stählen liegt die Obergrenze des Kohlenstoffgehaltes bei ca. 1,5 Masse-%.

2.2. Stahlherstellung

- im Hochofen aus Erz erschmolzenen Roheisen hat hohe Gehalte an Kohlenstoff, Phosphor und Silizium → nicht walz- und schmiedbar
- Weiterverarbeitung erfordert Reduzierung dieser und anderer Bestandteile, besonders vom C und P → „Frischen“ → Entkohlung $C + O \rightarrow CO$, wobei Kohlenmonoxid größtenteils gasförmig entweicht

Der Hochofenprozess



- Es werden zwei Hauptverfahren unterschieden:
 - Blasverfahren, Frischen durch Luft- bzw. Sauerstoffzufuhr
 - Bessemer-Verfahren (1855): Luftfrischen, nur seltene Phosphorarme Erze
 - Thomas-Verfahren (1878): Luftfrischen, geeignet für Phosphorhaltige Erze
 - Sauerstoffblas-Verfahren: Aufblasen (LD-Verfahren) oder Durchblasen von reinem Sauerstoff

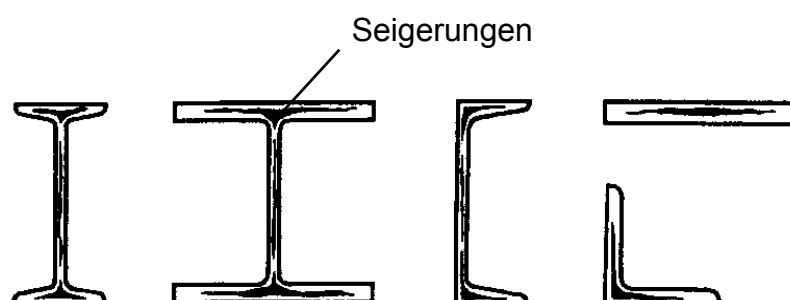
- Herdfrischverfahren, Frischen durch Direktreduktion Sauerstoff aus dem zuge-setzten Schrott oder oxidiertem Erz
 - Siemens-Martin-Verfahren (1864): Roheisen + Schrott wird im Herdofen erschmolzen (Gasverbrennung)
 - Elektrostahl-Verfahren (1904): Schrott + stückiges Feinerz + Roheisen (Wärme durch Lichtbogen)

Heutzutage werden hauptsächlich das Sauerstoffblasverfahren und das Elektro-stahlverfahren verwendet.

Beim Sauerstoffblasverfahren beträgt der Anteil an der Stahlproduktion ca. 70 % und liefert einen sehr reinen Stahl. Durch seine hohe Konverterkapazität ist dieses Verfahren besonders wirtschaftlich.

Die Vorteile beim Elektrostahlverfahren sind der niedrige Energieverbrauch, frei von den sonst üblichen Verunreinigungen, Legierungszusätze können genau dosiert zugegeben werden und in Verbindung mit der Stranggußtechnik können auch so genannte Massenstähle wirtschaftlich hergestellt werden.

- Desoxidation: hoher Gehalt der Stahlschmelze an O und O-Verbindungen wird reduziert → Zugabe von Si, Al und Mg (→ hohe Affinität zu O) „beruhigt ver-gossener Stahl“. Verzichtet man darauf, steigt gasförmiges Kohlenmonoxid im flüssigem Stahl auf → Oberfläche brodelte → „unberuhigt vergossener Stahl“ → durch Erstarren kann Kohlenmonoxid nicht vollständig entweichen und wird teilweise eingeschlossen → Gasblasen (Seigerungen [Entmischungen]) mit erhöhten Gehalten u. a. an P und S → negative Beeinflussung der Werkstoff-eigenschaften (Rotbruch, Zähigkeit, Ermüdung).

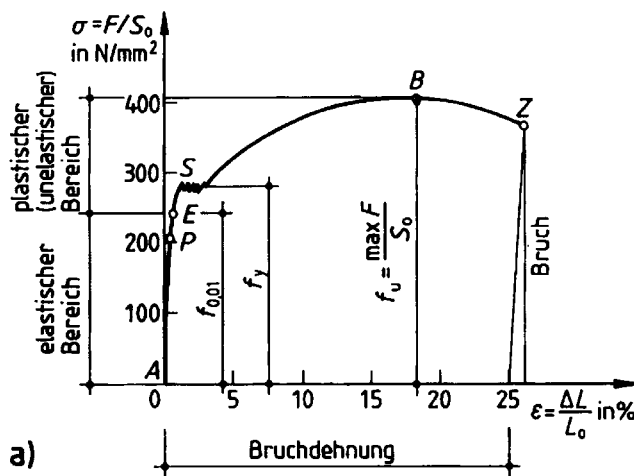


2.3. Mechanische Eigenschaften bei statischer Beanspruchung

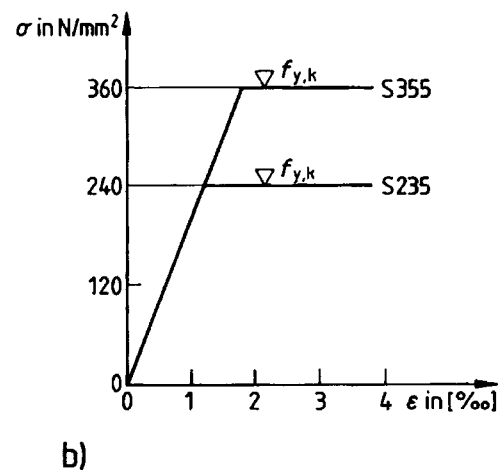
- Spannungs-Dehnungskurve: „genormter Zugversuch“

Die Werkstoffkennwerte für den Stahl werden dem Spannungs-Dehnungsdiagramm des einachsigen Zugversuches mit dem genormten Prüfstab entnommen. In diesem Diagramm ist die σ - ϵ -Linie des Baustahles S 235 (St 37) dargestellt. Bis zur Streckgrenze (Punkt E) hat der Baustahl ein lineares Verhalten und es gilt das Hookesche Gesetz $\sigma = E \cdot \epsilon$. Ab der Streckgrenze tritt bei Baustählen ein ausgeprägtes Fließen bis zur plastischen Grenzdehnung ein. Im weiteren Verlauf steigt die Spannungs-Dehnungslinie im Verfestigungsbereich bis zur Zugfestigkeit (Pkt. B) an. Danach verkleinert sich der Querschnitt, bis der Bruch (Pkt. Z) des Zugstabes eintritt. Die Spannung fällt nur scheinbar ab, da diese auf den Anfangsquerschnitt bezogen wird.

Spannungs-Dehnungsdiagramme



a) tatsächliches Diagramm für S235



b) idealisierte Diagramme

σ ... Spannung $\sigma = \frac{N}{A_0}$

$E \cdot I$... Biegesteifigkeit

ϵ ... Dehnung $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$

f_y ... Streck- oder Fließgrenze (R_e)

E ... Elastizitätsmodul $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$

f_u ... Zugfestigkeit (R_m)

α ... elastische Dehnzahl $\alpha = \frac{1}{E}$

Index k ... charakteristischer Wert

z. B.: S 235


$$f_{y,k} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (t \leq 40 \text{ mm})$$

$$f_{u,k} = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

S 355

$$f_{y,k} = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (t \leq 40 \text{ mm})$$

$$f_{u,k} = 510 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

-  $l_0/d_0 = 5$: kurzer Proportionalstab
 $l_0/d_0 = 10$: langer Proportionalstab

- Bruchdehnung: $Z = \frac{A_0 - A_B}{A_0}$

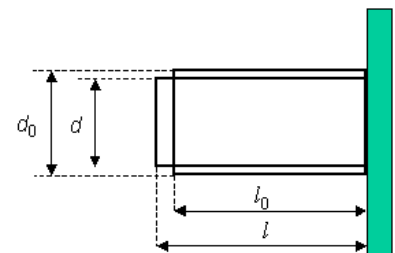
A_0 ... Ausgangsquerschnittsfläche

A_B ... kleinste Querschnittsfläche im gebrochenem Stab

- für alle Baustähle gelten folgende gemeinsame Eigenschaften

- Dichte (Rechenwert) = $7,85 \text{ kg/dm}^3$
- Elastizitätsmodul $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$
- Querdehnzahl $\mu = 0,3$

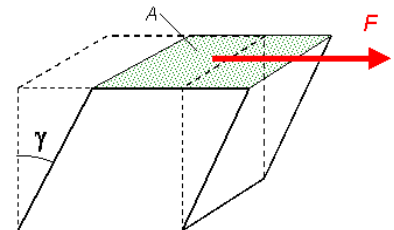
$$\mu = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \quad \Delta d = d - d_0$$



- Schubmodul $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = 81.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$$\text{Schubspannung: } \tau = \frac{F}{A}$$

$$\text{Scherwinkel: } \gamma = \frac{\tau}{G}$$

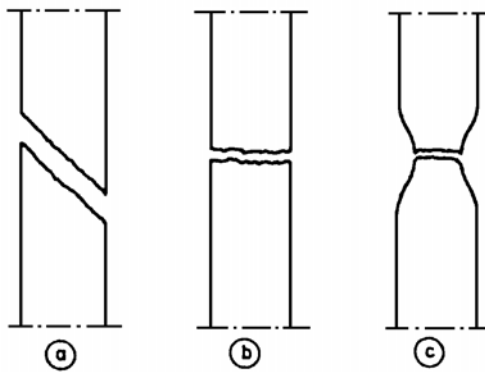


- lineare Wärmedehnzahl $\alpha_T = 10 \cdot 10^{-6}/\text{K}$

- Bruchdehnung wird größer bei kleiner werdenden l_0/d_0

- die Streckgrenze steigt an (und Formänderungsvermögen wird kleiner) bei:
 - zunehmender Belastungsgeschwindigkeit
(bei Schlagartiger Beanspruchung tritt ein Trennbruch ohne plastische Verformung auf → gefährlich)
 - tiefere Temperaturen
 - Mehrachsigkeit des Spannungszustandes, z. B. Kerben

- Bruchformen



- a) Gleitbruch: In duktilen Idealkristallen nach größerer Gleitung (Versetzungen) tritt Scherbruch unter der Wirkung der Schubspannungen ein.
Bruchfläche meist fasrig

- b) Trennbruch: Spröder Werkstoff bricht, sobald die Normalspannung die Trennfestigkeit erreicht (z. B. Beton auf Zug).
Bruchfläche mit kristallinem Aussehen

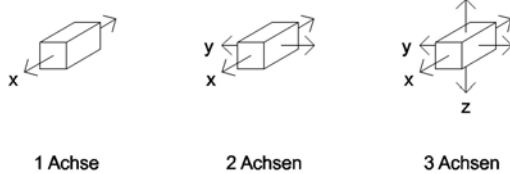
- c) Mischbruch: Plastisch verformbarer, zäher Werkstoff schnürt sich vor dem Bruch ein (Wirkung von Schubspannungen) und zeigt einen gemischten Bruch, d. h. am Außenrand einen Krater (Gleiten unter 45°), in der Mitte eine Trennung (Normalspannungen).

- Zähigkeit:

Neben den Festigkeitseigenschaften ist für den Einsatz eines Baustahls auch seine Spröbruchempfindlichkeit von besonderer Bedeutung. Sie wird durch Bruchdehnung, Brucheinschnürung und die Kerbschlagzähigkeit bestimmt.

Spröbruchempfindlichkeit steigt bei:

- mehrachsigen Spannungszuständen



- tiefen Temperaturen
- höheren Belastungsgeschwindigkeiten
- wachsender Kerbtiefe
- Kaltverformung
- größeren Abmessungen

2.4. Einfluss der chemischen Zusammensetzung (Legierung)

Hier werden nur die wichtigsten Begleitelemente aufgeführt.

Kohlenstoff C

C ist ein notwendiger Bestandteil eines jeden Stahls, steigender C-Gehalt erhöht Festigkeit und Härte und verringert Bruchdehnung und Kerbschlagzähigkeit → erhöhte Sprödbbruchneigung, schlechtere Schweißseignung.

Gute Schweißbarkeit bis $\approx 0,25\%$ C

Mangan Mn

Bis ca. 2 % bewirkt wachsender Mn-Gehalt eine Erhöhung der Festigkeit und Streckgrenze sowie der Kerbschlagzähigkeit bei nur unwesentlicher Verringerung der Bruchdehnung

Phosphor P

P macht Stahl Kaltbrüchig und grobkörnig, starker Abfall der Kerbschlagzähigkeit, bei $P > 0,06\%$ spröde, Schlagempfindlich, trennbruchempfindlich und zum Schweißen ungeeignet

Schwefel S

Bei $S > 0,06\%$ Rotbrüchigkeit (800 °C) → Achtung: Schweißnahttrisse!

Kupfer Cu

Bis 1 % Cu-Gehalt Erhöhung der Festigkeit bei gleichzeitiger Verringerung des Formänderungsvermögens.

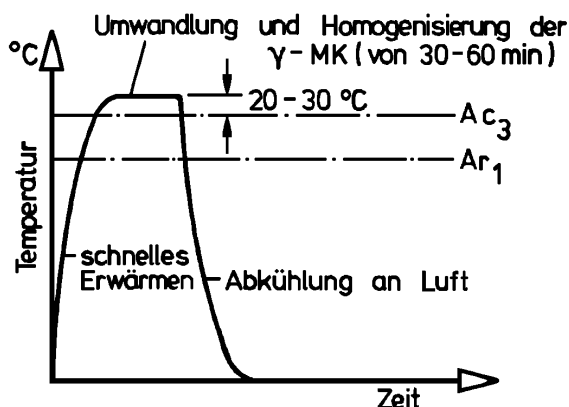
Bei 0,3 % Cu + 0,5 % Ni + (0,5 ... 1 %) Cr + 0,1 % P beträchtliche Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit.

Nickel Ni, Chrom Cr

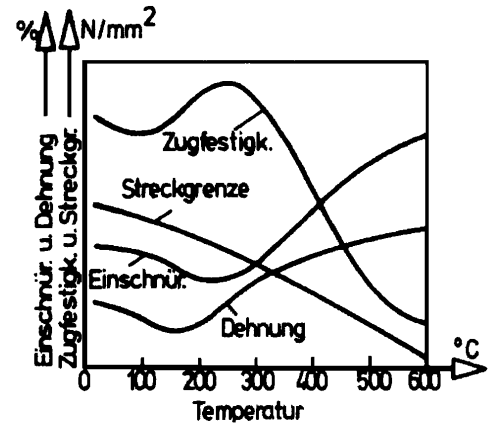
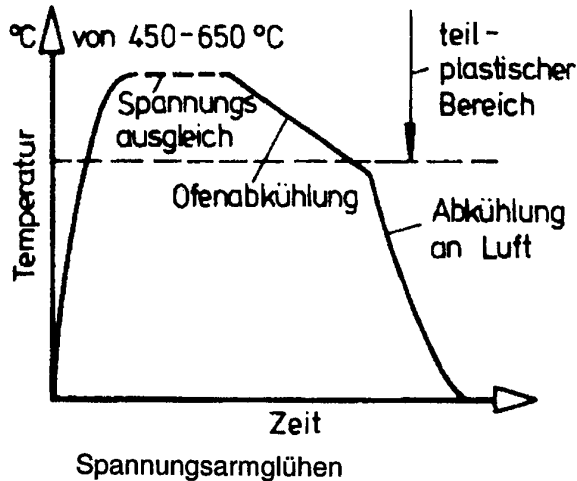
Ni und Cr erhöhen Festigkeit und Härte, ohne Verringerung des Formänderungsvermögens, wirken Kornverfeinernd und verringern Korrosionsempfindlichkeit

2.5. Wärmeverhalten, Brandverhalten und Brandschutz

- in Abhängigkeit vom C-Gehalt und der Temperatur kommt es sprunghaft zu Modifikationen der Kristallinen Struktur (Anordnung der Eisenatome im festen Aggregatzustand: kubisch-raumkonzentriertes Form [α -, δ -Ferrit], Kubischflächenkonzentrierte Struktur [γ -Austenit]).
- diese Gefügeänderungen sind auch stark von der Geschwindigkeit der Abkühlung abhängig
- bei langsamer Abkühlung tritt die „Naturhärte“ auf. Die Modifikationen der Kristallstruktur können sich ausbilden
- bei schneller Abkühlung ($> 250 \text{ °C/s}$) und Temperaturen $< 400 \text{ °C}$ entsteht eine tetragonal raumzentriertes Gitter, nadlige Struktur \rightarrow (Martensit) \rightarrow es kommt zu einer Versprödung \rightarrow Härten
- für manche Zwecke sind gehärtete Stähle erwünscht \rightarrow Werkzeugstähle, im Bauwesen sind sie jedoch unerwünscht \rightarrow größere Härte führt zu Sprödbrüchen \rightarrow Gefährdung der Sicherheit
- durch Glühen kann die Härte herabgesetzt und die Zähigkeit erhöht werden (Anlassen!). Dabei wird das Werkstück auf eine bestimmte Temperatur erwärmt, die Temperatur wird eine bestimmte Zeit gehalten und nachfolgend abgekühlt.



- bei Erwärmung auf 450 °C bis 650 °C kommt es zu einem Abfall der Streckgrenze, wodurch mechanische und thermische Spannungszustände abgebaut werden
→ Spannungsarmglühen. Dabei tritt keine Gefügeänderung ein.



Abhängigkeit der Stahleigenschaften von der Temperatur

- beim Normalglühen (> 800 °C) wird eine vollkommene γ -Umwandlung erreicht, wodurch Gefügeveränderungen infolge Bearbeitung, z. B. Aufhärtung bei Kaltverformungen mit erheblichen Reckgraden oberhalb der Fließgrenze, wieder rückgängig gemacht werden.
- Stahl als Baustoff ist selbst nicht brennbar, jedoch ändern sich seine mechanischen Eigenschaften mit zunehmender Temperatur.
 - bis ca. 300 °C ändert sich die Zugfestigkeit kaum gegenüber der bei Zimmertemperatur, bei > 300 °C sinkt sie rasch ab
 - bei 270 °C fällt die Streckgrenze auf ca. 65 - 70 % des Wertes bei Zimmertemp.
 - bei 550 °C ist die Zugfestigkeit 40 bis 50 % und bei 750 °C nur noch bei 10 %
 - ab 1000 °C ist die Zugfestigkeit gleich 0
 - bei 450 bis 650 °C versagen im allgem. die Stahlkonstruktionen (das ist von der Auslastung abhängig)
- da solche Temperaturen bei Brandfällen vorkommen, müssen Stahlkonstruktionen vor hohen Temperaturen geschützt werden → Brandschutz

- ungeschützte Stahlkonstruktionen besitzen je nach Querschnittsausbildung einen Feuerwiderstand $f_w = 0,2 \dots 0,4$, d. h. während 0,2 bis 0,4 h bleibt die Standfestigkeit unter der rechnerisch zulässigen Belastung gewährleistet und raumabschließende Bauteile verhindern eine Brandübertragung.

- Baulicher Brandschutz

Anforderungen: siehe auch DIN 4102

- Feuerwiderstandsklassen: F30 (Feuerwiderstandsdauer 30 Minuten),
F60, F90, F120, F180
- Baustoffklassen: A1: nicht brennbar, ohne organische Bestandteile
A2: nicht brennbar, mit geringen organischen Bestandteilen
B1: schwerentflammbar
B2: normalentflammbar
B3: leicht entflammbar

Bsp.: - Tragende und aussteifende Wände: F30-B (bis 2 Vollgeschosse)

F90-AB (> 2 VG)
wesentliche Teile übrige Teile

- Decken:

F30-B (bis 2 VG)

F30-AB (bis 5 VG)

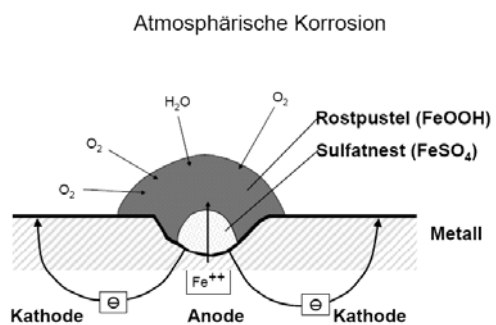
F90-AB (> 5 VG)

- Der Nachweis der Feuerwiderstandsklasse wird durch einen Brandversuch erbracht. In den letzten Jahren sind auch analytische Nachweisverfahren entwickelt worden → Zugrundelegung einer Einheitstemperaturkurve (ETK).

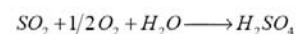
- Brandschutzmaßnahmen
 - bei nicht geschützten Stahlbauteilen ist der Temperatur umso höher, je größer das Verhältnis U/A ist (U: beflammer Umfang, A: Querschnittsfläche)
 - Abschirmungen: Die Einbeziehen der ungeschützten Stahlprofile in hohle raumabschließende Bauteile (z. B. Unterdecke).
 - Dämmschichtbildende Beschichtungen (Anstriche, Folien):
 - der in mehreren Schichten aufgetragene Anstrich erreicht seine schützende Dicke erst bei Wärmeeinwirkung des Brandes (Aufschäumung auf mehrere Zentimeter Dicke)
 - Verträglichkeit mit Korrosionssystem beachten, teilweise gleichzeitige Wirkung des Korrosionsschutzes
 - i. d. R. wird F30 erreicht, abhängig U/A -Verhältnis und der Beanspruchung
 - Ummantelungen und Verkleidungen
 - profilfolgend oder Kastenförmig
 - örtlich hergestellt als Zementgebundene Spritzputze aus Mineralfasern, ggf. mit Haftmittelzusätzen ohne Putzträger
 - teilweise auch als Korrosionsschutz wirksam, dann unmittelbar auf gestrahlte Stahloberfläche aufbringen
 - Einbetonieren von Deckenträgen
 - Einmauern
 - vorgefertigte Kastenförmige Platten
 - Kernfüllungen bei Hohlprofilen
 - Betonfüllung
 - stehende oder zirkulierende Wasserfüllung

2.6. Korrosion und Korrosionsschutz

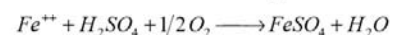
- unter Korrosion versteht man verschiedene Varianten des zersetzenden Abbaus insbesondere bei Metallen. Sie wird von äußeren Einflüssen bewirkt und beginnt an der Metalloberfläche.
- Atmosphärische Korrosion ist die für den Stahlbau wichtigste und hier betrachtete Korrosionsform
- bei der Korrosion handelt es sich meist um elektrochemische Prozesse:
 - im Zusammenwirken mit Wasser (Elektrolyt) entstehen an der Metalloberfläche anodische und kathodische Bezirke
 - an der Anode geht Metall in Lösung → Ionen wandern zur Kathode und reagieren mit Wasser und Sauerstoff zu Hydroxylionen, die ein alkalisches Milieu erzeugen und vor Korrosion schützen
 - der Rost bildet sich dort, wo Eisenionen mit den Hydroxylionen (-OH) zusammentreffen und mit Sauerstoff aus dem Elektrolyten zu Rost oxidieren ($2\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2}\text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeOOH}$)
 - dieser Prozess wird durch Verunreinigungen der Atmosphäre (Stimulatoren) wesentlich beschleunigt: Sulfation aus schwefelhaltigen Verbrennungsprodukten (Kamine, Autos) und Chloridion



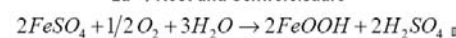
1 Elektrolyt: Schwefeldioxid → Schwefelsäure



2 Eisen und Sauerstoff → Eisen(II)sulfat und Wasser



3 Eisen(II)sulfat wird zu Eisen(III)sulfat oxidiert und hydrolysiert zu → Rost und Schwefelsäure



- die Atmosphäre ist umso korrosiver, je feuchter sie ist und je aggressiver das korrosive Medium ist:

überdachte Freiflächen
 Landklima
 Stadtklima
 Industrieklima
 Meeresklima

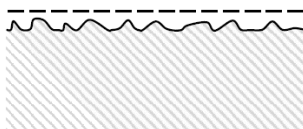


Zunehmende Korrosive Klimate

- wichtige Erscheinungsformen der Korrosion:



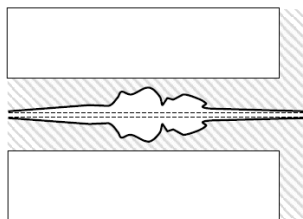
ebenflächiger Abtrag



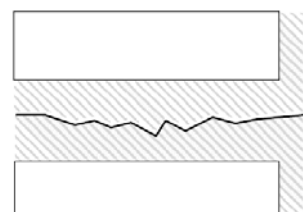
narbig-flächiger Abtrag



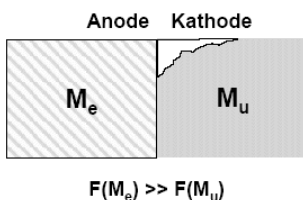
Lochfraß (lokales Versagen von Deckschichten)



Spaltkorrosion (im inneren wenig Sauerstoff → anodische Bereiche)



Risskorrosion (bei Einwirkung besonderer Stoffe (H, Chloride) im Zusammenwirken mit hohen mechanischen Spannungen, ausgehend von kleinen Narben und Kerben) verformungsarmer Bruch.



Kontaktkorrosion (das edlere Metall saniert sich auf Kosten des unedleren Metalls)

- Mögliche Eingriffe zur positiven Beeinflussung
 - Fernhalten von Wasser, Baustähle Korrodieren erfahrungsgemäß erst bei einer relativen Luftfeuchte > 65 %. Es kann auch die Metalloberfläche vor Feuchtigkeit geschützt werden (Feuerverzinkung, Emaillierung)
 - Fernhalten von Sauerstoff → allseitig geschlossene Hohlbauteile, geschlossene Kreisläufe bei Rohrsystemen
 - chemischer Korrosionsschutz, Schaffung von künstlichen Umgebungsbedingungen, die Passivität schaffen, z. B. alkalisches Milieu (Bewehrungsstähle im Zementmörtel), Grundbeschichtung mit „Aktivpigmenten“, z. B. Zinkchromat, Bleimenigge

Korrosionsschutz

- Aktiver Korrosionsschutz
 - Vermeidung von Kontaktkorrosion: isolierende Zwischenschicht bei Metallen unterschiedlichen Potentials, z. B. Al ↔ Stahl (Stahl ist unedler → wird zersetzt)
 - Zweckmäßige konstruktive Gestaltung (siehe DIN 55928)
 - möglichst kleine Oberflächen
 - möglichst glatte, ebene Flächen mit mind. 3 % Neigung
 - Vermeidung von Wassersäcken, Wasserabfluss ermöglichen
 - Spalten < 15 mm vollständig durch Futterbleche ausfüllen
 - besonders stark beanspruchte Teile reichlich bemessen (Abrostungszuschlag)
 - Einsatz von wetterfestem Stahl

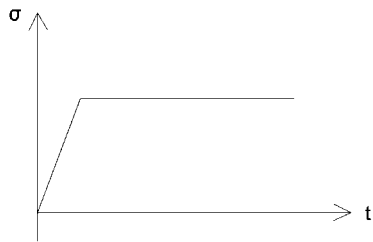
- Passiver Korrosionsschutz durch Aufbringen von Schutzschichten
 - Vorbereitung der Stahloberfläche, in DIN 55928 sind Entrostungsverfahren, Reinigungsmethoden und zu erzielende Reinheitsgrade vorgesehen
 - Reinigungsmethoden: Sa (Sandstrahlen)
 - PSa (partielles Sandstrahlen)
 - St (hand- und maschinelles Reinigen)
 - Fl (Flammstrahlen)
 - Be (Beizen, HCl [Salzsäure], H₂SO₄ [Schwefelsäure])
 - Intensitäten 1, 2, 2½, 3
 - Reinigungsgrade: z. B. Sa 2½: Sandstrahlen, Rost und Beschichtungen dürfen nur noch als leichte Schattierung erkennbar sein, Oberfläche mattglänzend
 - Schutzsystem aus 2 - 4 Beschichtungen
 - meist auf der Basis organischer Polymere, bestehen aus Bindemittel, Pigmenten, Füllstoffen, Lösungsmitteln und Hilfsstoffen
 - i. d. R.:
 - 2 Grundbeschichtungen, je ca. 50 - 100 µm, mit den Pigmenten Zinkstaub, Zinkphosphat, Bleimenigge u. ä.
 - 2 Deckbeschichtungen, je ca. 50 - 100 µm, mit den Pigmenten Eisenoxid, Aluminiumpulver, Zinkoxid u. ä.
 - Gesamtdicken: 240 bis 320 µm
 - die Haltbarkeitsdauer beträgt je nach korrosiver Beanspruchung ca. 12 bis 25 Jahre

- Metallische Überzüge
 - Entrostung im Säurebad und anschl. Wasserspülung
 - Feuerverzinkung: Eintauchen in geschmolzenes Zink ($\approx 450\text{ °C}$)
(möglich für Bauteile bis 15 m Länge)
 - Dicke: 50 - 100 μm
 - Konstruktion muss Temperaturverformungen möglichst zwängungsfrei folgen können
 - in einer verzinkten Konstruktion müssen auch die Verbindungsmittel (Schrauben) verzinkt sein.
 - Schutzdauer ca. 10 - 30 Jahre
 - neben Feuerverzinkung ist auch Spritzverzinken möglich

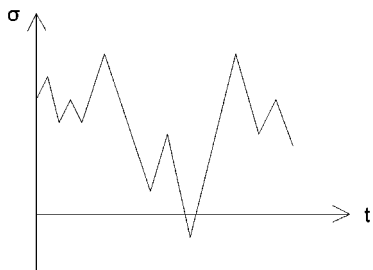
- Duplex-System
 - Kombination aus Metallüberzug (meist Feuerverzinkung) mit Beschichtungen (als Deckschichten)
 - besonders gute Haltbarkeit

2.7. Festigkeitseigenschaften bei schwingender Beanspruchung

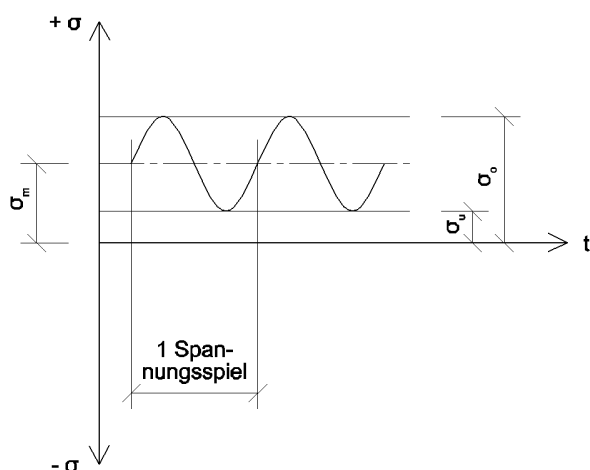
- neben der bisher vorausgesetzten statischen Beanspruchung



treten in vielen Bauwerken auch schwingende Beanspruchung auf, bei denen sich Größe und/oder Richtung in Abhängigkeit von der Zeit ändern, z. B. Bauteile von Brücken, Kranbahnen, Stahlschornsteine



- derartige Belastungen können zum Bruch führen, auch wenn sie kleiner als die Zugfestigkeit oder sogar kleiner als die Streckgrenze sind → Ermüdungsfestigkeit



σ_0 ... dem Betrag nach größte Spannung

σ_u ... dem Betrag nach kleinste Spannung (mit Vorzeichen)

$$\sigma_m = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_o + \sigma_u) \quad \dots \text{Mittelspannung}$$

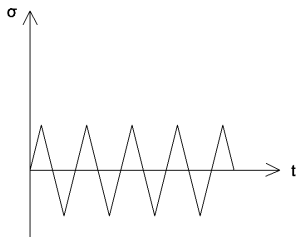
$$\sigma_A = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_o - \sigma_u) \quad \dots \text{Spannungsausschlag (Amplitude)}$$

$$\kappa = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} = \frac{\min \sigma}{\max \sigma} \quad \dots \text{Spannungsverhältnis}$$

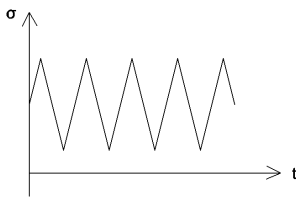
$$\Delta\sigma = \sigma_o - \sigma_u = 2\sigma_A \quad \dots \text{Spannungsdifferenz oder Spannungsdoppelamplitude } (\sigma_{DA})$$

- man unterscheidet

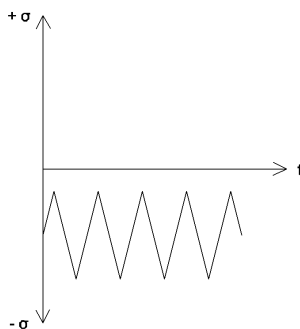
- reine Wechselbeanspruchung:



- Zugschwellbeanspruchung:



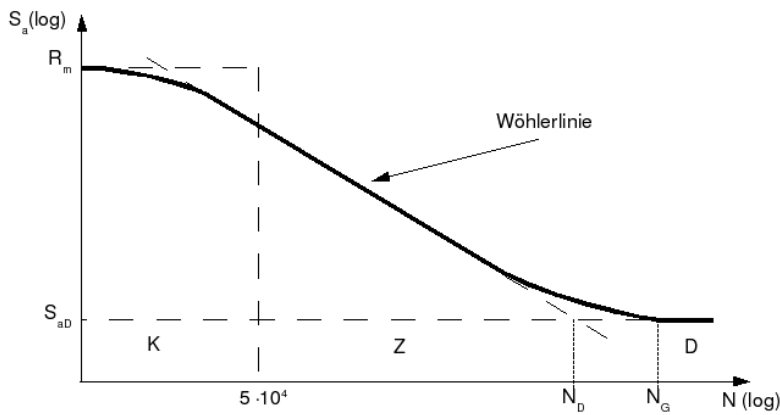
- Druckschwellbeanspruchung:



- Kennwerte zur Ermüdungsfestigkeit werden durch Schwingversuche gewonnen

- Wöhlerversuch (Dauerschwingungsversuch):

Mit dem Wöhlerversuch wird die Schwingfestigkeit von Werkstoffen oder Bauteilen (Bauteil-Wöhlerversuch) ermittelt. Hierfür werden die Versuchskörper zyklisch, meist unter einer sinusförmigen Beanspruchungs-Zeit-Funktion, belastet.



- den Bereich der Kurzzeitfestigkeit bzw. Kurzzeitschwingfestigkeit K unterhalb von ca. 10^4 bis 10^5 Schwingenspielen
- den Bereich der Zeitfestigkeit bzw. Zeitschwingfestigkeit Z zwischen 10^4 und materialabhängig etwa 10^6 bis 10^8 Schwingenspielen, in dem die Wöhlerkurve bei doppellogarithmischer Darstellung nahezu gerade verläuft
- und den anschließenden Bereich der so genannten Dauerfestigkeit D

Unterhalb der Dauerfestigkeit S_{aD} kann ein Bauteil prinzipiell beliebig viele Schwingenspiele ertragen. Belastungen oberhalb der Dauerfestigkeit bewirken ein Versagen des Bauteils nach einer bestimmten Zahl an Schwingenspielen. Die Zahl der ertragenen Schwingenspiele eines Bauteils unter Betriebsbelastung bis zum Ausfall kann im Rahmen statistischer Genauigkeit mit Hilfe der Wöhlerlinie vorausgesagt werden.

Beispiel-Tabelle Wöhlerversuch:

Nr.	Spannungsausschlag in N/mm^2	Bruch nach Lastspielen
1.	+/- 350	4.252
2.	+/- 300	8.384
3.	+/- 250	21.987
4.	+/- 200	70.355
5.	+/- 180	108.664
6.	+/- 160	10 Millionen ohne Bruch

2.8. Wichtige Stahlsorten und Stahlerzeugnisse

- Unlegierte Baustähle

- alte Bezeichnung nach DIN 17100 (1/80)

St	...	Stahl
37, 52	...	Bruchfestigkeit f_u in kN/cm ²
Vorgestelltes U	...	unberuhigt vergossen
Vorgestelltes R	...	beruhigt vergossen
Nachgestelltes U, N	...	Lieferzustand → unbehandelt, normalgeglüht
Vorgestelltes Q	...	Eignung zur Weiterverarbeitung (Abkanten, Kaltbiegen u. ä.)
-2	...	Gütegruppe 2 ... befriedigende bis gute Schweißseignung
-3	...	Gütegruppe 3 ... bessere Sprödruchunempfindlichkeit, gute Schweißseignung (i. d. R. besonders beruhigt)

z. B.: U St 37-3

R St 37-2

Q St 37-3

St 52-3 N

- neue Bezeichnung nach DIN EN 10025 (3/94)

S	...	Stahl
235	}	... 355 Fließspannung $f_{y,k}$ in N/mm ² für Dicken ≤ 16 mm
355		
JR	...	Kerbschlagzähigkeit 27 J bei + 20 °C
JO	...	Kerbschlagzähigkeit 27 J bei 0 °C
J2	...	Kerbschlagzähigkeit 27 J bei -20 °C
G1	...	unberuhigt vergossen
G2	...	beruhigt vergossen
G3	...	Lieferbedingungen
G4	...	Lieferbedingungen
C	...	mit besonderer Kaltverformbarkeit

JR, JO, J2 G3, J2 G4
 →
 bessere Schweißreignung

z. B.: S 235 JR

S 235 JR G1

S 355 J2 G3

- Ausgewählte Gegenüberstellung

St 37-2	S 235 JR
U St 37-2	S 235 JR G1
R St 37-2	S 235 JR G2
Q St 37-3 U	S 235 JO C
St 37-3 N	S 235 J2 G3
St 52-3 U	S 355 JO
St 52-3 N	S 355 J2 G3

- Festigkeitswerte

S 235 (St 37) $R_m = 340 \dots 470 \text{ N/mm}^2$ (je nach Dicke)
 $R_e = 235 \dots 215 \text{ N/mm}^2$ ($t \leq 16 \dots t \leq 100 \text{ mm}$)
 $\epsilon_b = 26 \dots 24 \%$

S 355 (St 52) $R_m = 490 \dots 630 \text{ N/mm}^2$
 $R_e = 355 \dots 315 \text{ N/mm}^2$
 $\epsilon_b = 22 \dots 20 \%$

- Wetterfeste Baustähle
 - nach DAST-Richtlinie 007 (5/93)
 - legierungstechnisch weiterentwickelt (geringerer C-Gehalt, zusätzliche Gehalte von Si und Mn)
 - es bildet sich bei freier Bewitterung eine festhaftende oxidische Deckschicht, die den Rostvorgang verlangsamt
 - WT St 37-2, WT St 37-3, WT St 52-3
 - nach DIN EN 10155 (8/93)
 - Kennzeichnung wie bei DIN 10025 mit Zusatzbezeichnung W
z. B.: S 235 JO W
- Feinkornstähle
 - Erhöhung der Streckgrenze durch Verringerung der Korngröße und durch Vergüten (Abschrecken + Anlassen)
 - Schweißbarkeit bei Einhaltung der allgemeinen Regeln der Schweißtechnik gegeben DAST-Richtlinie 011
 - z. B.: St E 460, St E 355, St E 690