

# Eisen aus dem Münsterland

## Über die Metallurgie des Eisens

Vortrag zum Rennofenprojekt am Geo-Museum Zurholt (04.5. und 05.05.2024) und zum 18. Internationalen Rennofen-Symposium 2024 am Sachsenhof, Greven (07.09.2024)



Abb.: Die Schmiede vom Sachsenhof/Greven, Bernhard Reepen

# Hinweis zu Verwendung von Grafiken und Bildern

Bilder und Grafiken in diesem Dokument sind urheberrechtlich geschützt. Die dem Autor erteilten Freigaben zur Nutzung in diesem Dokument gilt nicht automatisch für Dritte.

Bilder des Autors sowie Bilder von Bernhard Reepen können unter Nennung des Namens kopiert, verändert und weitergeben werden.

## Zur Motivation - Eisen mit Rohstoffen aus dem Münsterland

### So kam es zum Projekt

Zahlreiche Namen und Bezeichnungen im Gebiet der Gemeinde Altenberge enthalten Verweise auf eine frühere Erzverhüttung. So stehen Rösteberg und Rönnehal im Zusammenhang mit dem sogenannten „Rennofen“, mittels dem regionales Erz zu metallischem Eisen erschmolzen wurde. Vor dem Schmelzen im Rennofen wurde das Erz durch „Rösten“ vorbereitet, wozu es in einem offenen Holzfeuer erhitzt wurde. Im Rennofen entstand dann im Verlauf des Betriebs das Eisen und die glutflüssige Schlacke, die aus dem Ofen ronn um den Lufteinlass nicht zu verstopfen. -Soweit zur Wortherkunft. Leider gibt es keine archäologischen Belege für das Ortsgebiet Altenberge dazu. Jedoch gibt es Nachweise dieser Schmelzöfen ganz in der Nähe: in Saerbeck. In diesem Jahr wollten die Ehrenamtlichen den Versuch wagen, einen Rennofen in Altenberge aufzubauen um regionales Eisen zu erschmelzen.

### Kooperation mit den Schmieden des Sachsenhofs

In einer Kooperation mit dem Sachsenhof Greven hat sich der Museumsverein das Ziel gesetzt, allein aus regionalen Rohstoffen des Münsterlandes und traditionellen handwerklichen Methoden Eisen zu gewinnen. Am 4. und 5. Mai 2024 wurde das Museumsgelände in Altenberge so zum regionalen Hochofen.

### Regionale Rohstoffe

Mit Altenberger Lehm für den Ofen und Raseneisenerz aus Borghorst, waren die wichtigsten Zutaten aus regionalen Quellen verfügbar. Das Erz kam aus Borghorst, weil ansonsten bei der Aktion die gesamten Erzfundamente aus dem Geo-Museum aufgebraucht worden wären. Nur die Holzkohle kam vom RCG vom Bahnhof, leider mit unbekannter Herkunft.

### Spannende Veranstaltung für Jung und Alt

Nach dem Ofenbau am Samstag gingen am Sonntag Morgen rund 45 kg Eisenerz und etwa die gleiche Menge Holzkohle buchstäblich in Rauch auf, um Erz in Metall umzuwandeln. Mehr als 120 Besucher schauten sich dieses regionale Event an. Am Ende hatten sich die Besucher rund um den Ofen versammelt, um den "Abstich" zu verfolgen, bei dem der Ofen zum Bergen des Eisens eingerissen wurde. Über 40 Handys und Kameras verfolgten das spannende Ereignis.

Das noch glühende Eisen wurde dann von erfahrenen Schmieden mit traditionellen Hämmern mit heftigen Schlägen weiterbearbeitet, um es von anhaftender Schlacke und Holzkohleresten zu befreien. Am Ende entstanden mehrere Kilogramm Eisen mit Stahl-Qualität, das durch Schmieden weiterbearbeitet werden kann. Mit diesem wissenschaftlichen Vortrag über die Metallurgie des Eisens gab es auch die Möglichkeit, tiefer in das Thema einzusteigen.

Mit diesem Projekt haben die Ehrenamtlichen vom Geo-Museum und vom Sachsenhof gezeigt, wozu unsere Vorfahren in der Lage waren: Handwerklich geschickt und kenntnisreich konnten regionale Rohstoffe nutzbar gemacht werden und Eisen-Werkzeuge sowie Dinge für den täglichen Bedarf aus Eisen hergestellt werden.

# Geschichte der Eisenverhüttung im Rennofen

Vom Erz zum metallischen Eisen – ein Versuch mit regionalen Rohstoffen



Abb.: Raseneisenerz (Bernhard Reepen) und Luppe (Dr. Hans-Georg Hettwer)

# Einige Grundlagen

## Eisen – Element und Werkstoff

# Menschheitsgeschichte der Eisenverhüttung

Archäologen teilen die vorchristlichen Geschichtsepochen nach dem Material ihrer Werkzeuge:

Steinzeit 2.6 Mio. J. v. Chr. – 2200 v. Chr.

Bronzezeit 2200 Jahre v. Chr. – 800 Jahre v. Chr.

„Eisenzeit“ 800 Jahre v. Chr. – 80 Jahre n. Chr.

Erste Rennöfen ca. 3000 Jahre v. Chr.!

# Frühe Eisenwerkzeuge vor der Erfindung des Rennofens

## Dolch von Tutanchamun (1332 bis 1323 v. Chr.)

Stahl-Klinge aus **Meteoriteneisen** (Ni + Co), Griff vergoldet



Abb.: Stahl-Klinge aus Meteoriteneisen (Ni + Co), Griff vergoldet, © Olaf Tausch - Eigenes Werk, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=85651855>

# Rohstoff Eisen?

- Wo findet man Eisen?
- Wie stellt man Eisen her?
- Warum gibt es nicht nur „Eisen“?
- Was verbirgt sich hinter der Begriffsvielfalt?

# Was wissen wir über Eisen?

Wir finden es in



gelöst



gebunden



ausgefällt

# Was wissen wir über Eisen?

## Lagerstätten und Vorkommen

- Ablagerungen im Oberen Erdmantel
- Ablagerungen in heißen Quellen unter dem Meer
- Ablagerungen durch Biomineralisation als Raseneisenerz
- Meteoriteneisen (selten)



Eisenerz (Harz)



Raseneisenerz



Meteoriteneisen

# Was wissen wir über Eisen?

## Oberflächennahe Quellen: Regionales Raseneisenerz – Fundstellen



Borghorst-Ostendorf (Bernhard Reepen)



Altenberge-Kümper (Dr. Hans-Georg Hettwer)

# Übergangsmetall Eisen und seine Verbindungen

**Periodensystem der Elemente**

Metalle

Halbmetalle

Nichtmetalle

Hg = flüchtig (bei 20°C)

Al = fest

N = gasförmig

U = kein stabiles Isotop ist bekannt

\* = künstlich hergestelltes Element

☉ = radioaktiver Zerfall

Erstellt von W. Hölzel <http://www.w-hoelzel.com>

Periode	I		II										III	IV	V	VI	VII	VIII	Schale		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
1	1,0 <b>H</b> Wasserstoff Hydrogen	2,2 <b>He</b> Helium																			4,0 <b>He</b> Helium
2	6,9 <b>Li</b> Lithium	9,0 <b>Be</b> Beryllium											10,8 <b>B</b> Bor	12,0 <b>C</b> Kohlenstoff Carbon	14,0 <b>N</b> Stickstoff Nitrogen	16,0 <b>O</b> Sauerstoff Oxygen	19,0 <b>F</b> Fluor	20,2 <b>Ne</b> Neon			
3	23,0 <b>Na</b> Natrium	24,3 <b>Mg</b> Magnesium											27,0 <b>Al</b> Aluminium	28,1 <b>Si</b> Silicium Silicon	31,0 <b>P</b> Phosphor	32,1 <b>S</b> Schwefel Sulfur	35,5 <b>Cl</b> Chlor	39,9 <b>Ar</b> Argon			
4	39,1 <b>K</b> Kalium	40,1 <b>Ca</b> Calcium	45,0 <b>Sc</b> Scandium	47,9 <b>Ti</b> Titan	50,9 <b>V</b> Vanadium	52,0 <b>Cr</b> Chrom	54,9 <b>Mn</b> Mangan	55,8 <b>Fe</b> Eisen [Ferrum] Iron	58,9 <b>Co</b> Kobalt	58,7 <b>Ni</b> Nickel	63,5 <b>Cu</b> Kupfer [Cuprum] Copper	65,4 <b>Zn</b> Zink	69,7 <b>Ga</b> Gallium	72,6 <b>Ge</b> Germanium	74,9 <b>As</b> Arsen	79,0 <b>Se</b> Selen	79,9 <b>Br</b> Brom	83,8 <b>Kr</b> Krypton			
5	85,5 <b>Rb</b> Rubidium	87,6 <b>Sr</b> Strontium	88,9 <b>Y</b> Yttrium	91,2 <b>Zr</b> Zirkon [ium]	92,9 <b>Nb</b> Niob	95,9 <b>Mo</b> Molybdän	98,9 <b>Tc</b> Technetium	101,1 <b>Ru</b> Ruthenium	102,9 <b>Rh</b> Rhodium	106,4 <b>Pd</b> Palladium	107,9 <b>Ag</b> Silber [Argentum] Silver	112,4 <b>Cd</b> Cadmium	114,8 <b>In</b> Indium	118,7 <b>Sn</b> Zinn [Stannum] Tin	121,8 <b>Sb</b> Antimon [Stibium] Antimony	127,6 <b>Te</b> Tellur	126,9 <b>I</b> Jod [od]	131,3 <b>Xe</b> Xenon			
6	132,9 <b>Cs</b> Cäsium	137,3 <b>Ba</b> Barium	La-Lu LANTHANIDE	178,5 <b>Hf</b> Hafnium	180,9 <b>Ta</b> Tantal	183,8 <b>W</b> Wolfram	186,2 <b>Re</b> Rhenium	190,2 <b>Os</b> Osmium	192,2 <b>Ir</b> Iridium	195,1 <b>Pt</b> Platin	197,0 <b>Au</b> Gold [Aurum] Gold	200,6 <b>Hg</b> Quecksilber Mercury	204,4 <b>Tl</b> Thallium	207,2 <b>Pb</b> Blei [Plumbum] Lead	209,0 <b>Bi</b> Bismut [Wismuth] Bismuth	209,0 <b>Po</b> Polonium	210,0 <b>At</b> Astat [in]	222,0 <b>Rn</b> Radon			
7	223,0 <b>Fr</b> Francium	226,0 <b>Ra</b> Radium	Ac-Lr ACTINIDE	261,1 <b>Rf</b> Rutherfordium	262,1 <b>Db</b> Dubnium	263,1 <b>Sg</b> Seaborgium	262,1 <b>Bh</b> Bohrium	265,1 <b>Hs</b> Hassium	266,1 <b>Mt</b> Meitnerium	269,0 <b>Ds</b> Darmstadtium	272,0 <b>Rg</b> Roentgenium	277,0 <b>Cn</b> Copernicium	287,0 <b>Uut</b> Ununtrium	289,0 <b>Fl</b> Flerovium	288,0 <b>Uup</b> Ununpentium	289,0 <b>Lv</b> Livermorium	293,0 <b>Uus</b> Ununseptium	294 <b>Uuo</b> Ununoctium			

Abb.: Periodensystem der Elemente, © Wolfram Hölzel, <https://www.w-hoelzel.com/pse>

## Was wissen wir über Eisenerze?

Metallisches Eisen nicht stabil (Reaktion mit Wasser und Sauerstoff)  
Metallisches Eisen nur in Eisenmeteoriten (Legierung mit Nickel)

Eisenerze sind in der Regel Oxide, Karbonate und Sulfide:

- Magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$
- Roteisenstein (Hämatit)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$
- Brauneisenstein  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$
- Siderit  $\text{FeCO}_3$
- Magnetkies  $\text{FeS}$
- Pyrit (Eisenkies)  $\text{FeS}_2$

# Was wissen wir über Eisen?

Eisenvorkommen	Eisenanteil (Gew.-%)
Erde insgesamt	28,18%
Erdkruste	4,7%
Erdmantel	5,8%
Erdkern	79,4%

Zusammensetzung der Erdkruste [Gew.-%]	
<a href="#">Sauerstoff</a>	46 %
<a href="#">Silicium</a>	28 %
<a href="#">Aluminium</a>	8 %
<a href="#">Eisen</a>	6 %
<a href="#">Magnesium</a>	4 %
<a href="#">Calcium</a>	2,4 %
alle anderen	5,6 %

Abb.: Eisen - eher ein seltenes Element? © [https://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde\\_Metall/\\_Eisen\\_und\\_Stahl/\\_Metallurgie](https://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde_Metall/_Eisen_und_Stahl/_Metallurgie)

# Geschichte der Eisenverhüttung im Rennofen

# Geschichte der Eisenverhüttung im Rennofen

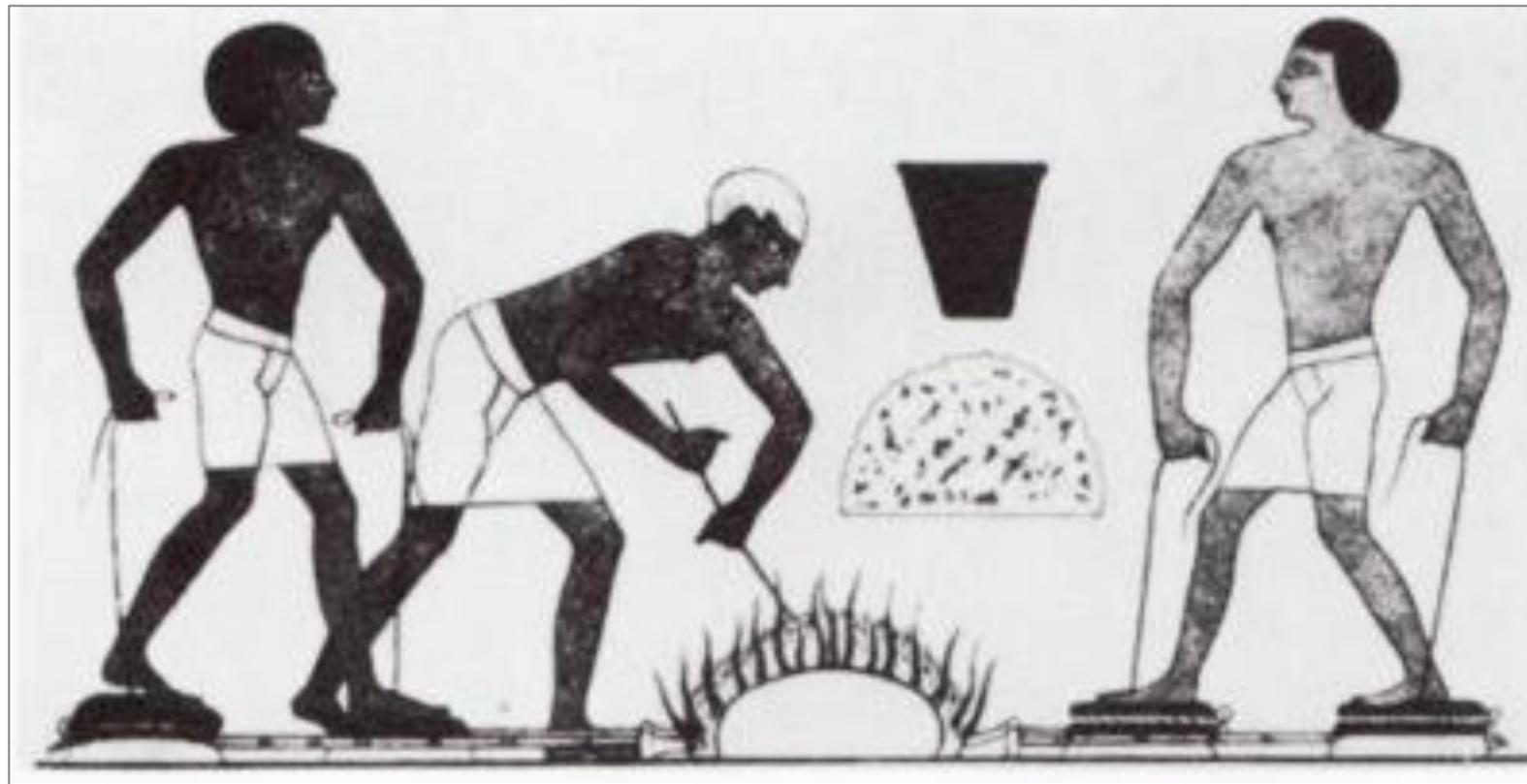


Abb.: Schmelzfeuer in Ägypten vor ca. 3000 Jahren. Mit fußbetätigten Blasebälgen wird über Blasrohre die nötige Hitze erzeugt.  
© Verein Deutscher Eisenhüttenleute Wirtschaftsvereinigung Stahl 1999, S. 161, (C) 2000 Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, Germany  
[http://www.ruhrgebiet-regionalkunde.de/html/grundlagen\\_und\\_anfaenge/eisen\\_und\\_stahl/fruehzeit\\_eisen.php%3Fp=3,0.html](http://www.ruhrgebiet-regionalkunde.de/html/grundlagen_und_anfaenge/eisen_und_stahl/fruehzeit_eisen.php%3Fp=3,0.html)

# Geschichte der Eisenverhüttung im Rennofen

## Konstruktion und historische Entwicklung

Gewinnung des Eisens liegt ca. **4000 Jahre** zurück (Afrika, Kleinasien)

Seit mehr als 2000 wird in Europa Eisenerz mit Holzkohle erschmolzen

Öfen sind Gruben oder Schachtöfen aus Lehm und Ziegeln

Betrieb erfolgt mit zerkleinertem Eisenerz und Holzkohle

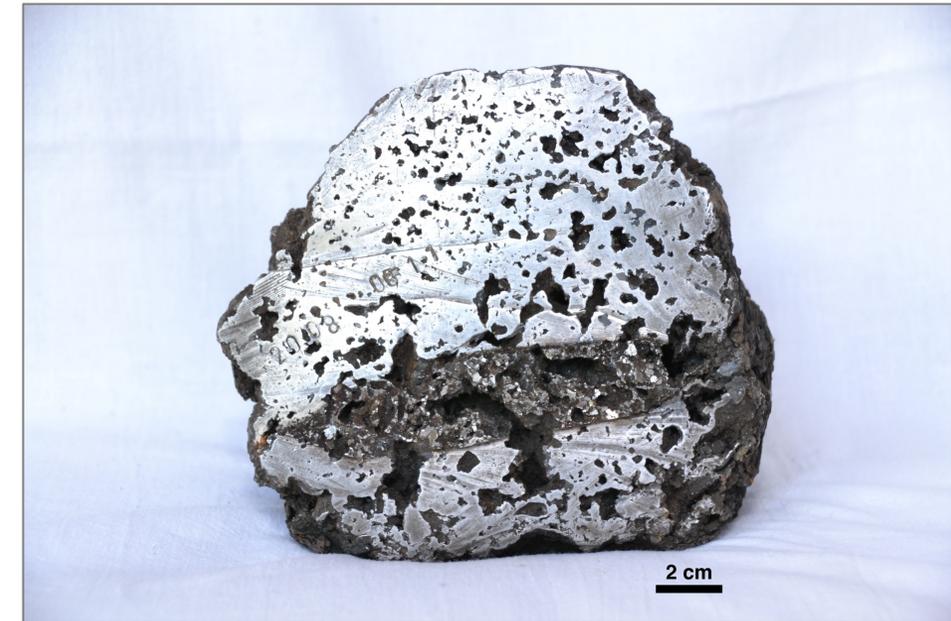
Anfangs mit dem natürlichen Luftzug, später mit handbetriebenen Blasebälgen

## Ergebnis des Rennofenprozesses

Ofentemperatur zwischen 1100°C und 1200°C

Schwammartiger Eisenklumpen mit Stahl-Qualität (die "**Luppe**"), der sich aus dem zusammengesinterten Schlackenbrei bildet

Eisenhaltige Schlacke in Form von verflüssigten Quarz- und Ton-Mineralen je nach Erz



Luppe (Bernhard Reepen)

# Geschichte der Eisenverhüttung im Rennofen

## Typische Bauarten eines Rennofens (regionale Baustoff-Ressourcen)

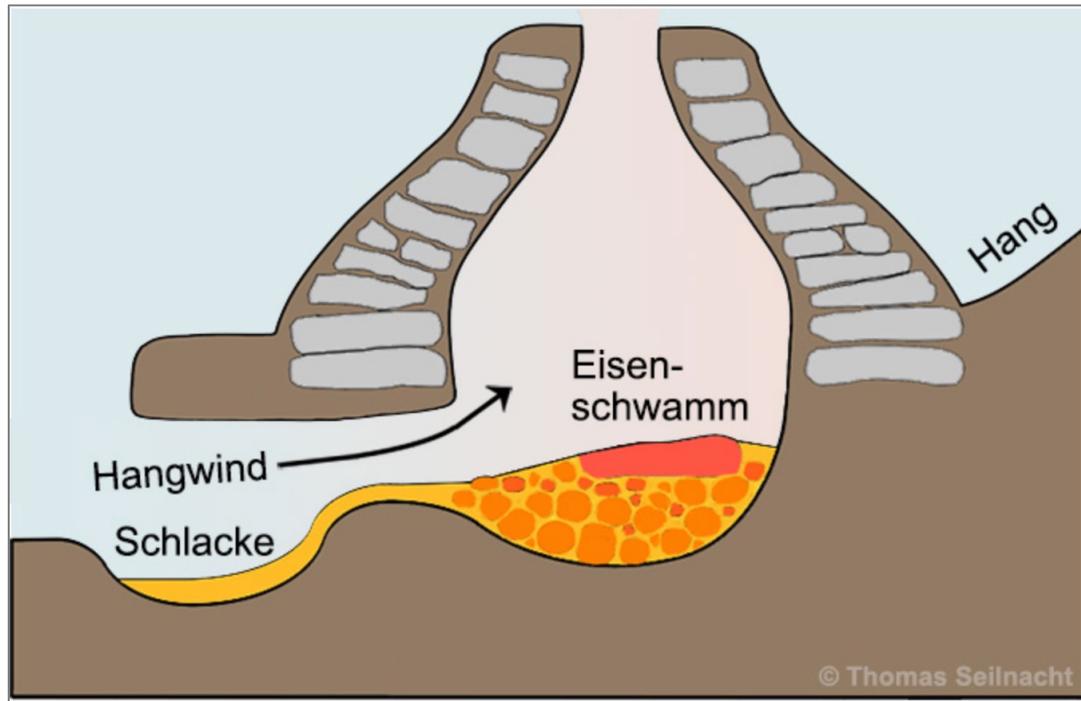


Abb. Rennofen gemauert am Hang  
 © <https://www.seilnacht.com/Lexikon/26Eisen.htm#g>

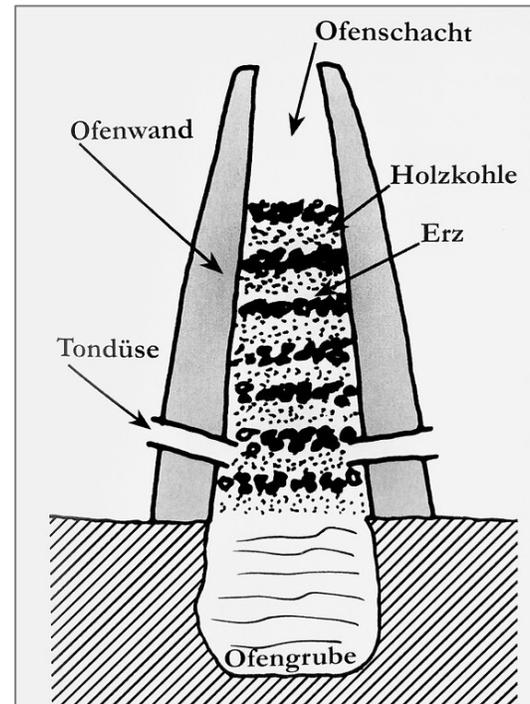


Abb.: Rennofen gemauert aus Lehm/Ton  
 © <https://www.kuladig.de/Objektansicht/KL-D-334733>

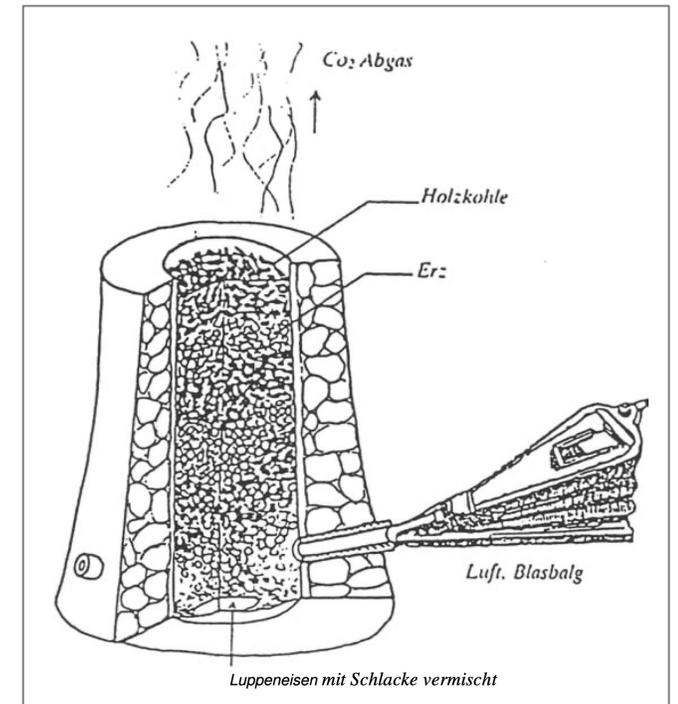


Abb. Rennofen gemauert aus Steinen/Ziegeln  
 © [http://www.thz-historia.de/\\_downloads/BK\\_48\\_Eisen\\_Schmiede\\_Hammerschmieden.pdf](http://www.thz-historia.de/_downloads/BK_48_Eisen_Schmiede_Hammerschmieden.pdf) 18

# Geschichte der Eisenverhüttung im Rennofen - Nachbau



Abb.: Nachbau Rennofen gemauert aus Lehm/Ton (Bernhard Reepen)

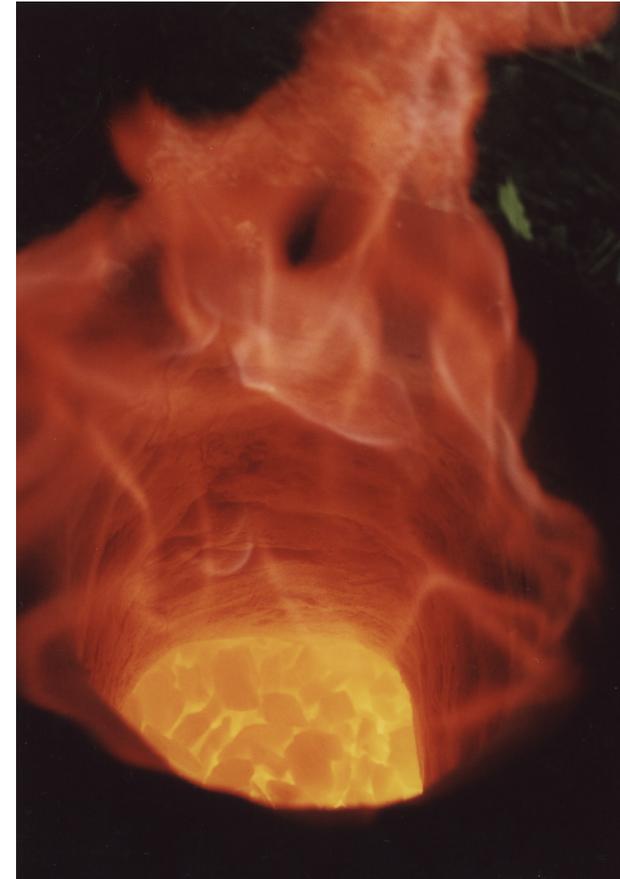


Abb. Blick in den Ofen (Bernhard Reepen)

# Geschichte der Eisenverhüttung im Rennofen

## Weiterverarbeitung der Luppe



**Viel Nacharbeit nötig (Schmieden und Feuerverschweißen)**

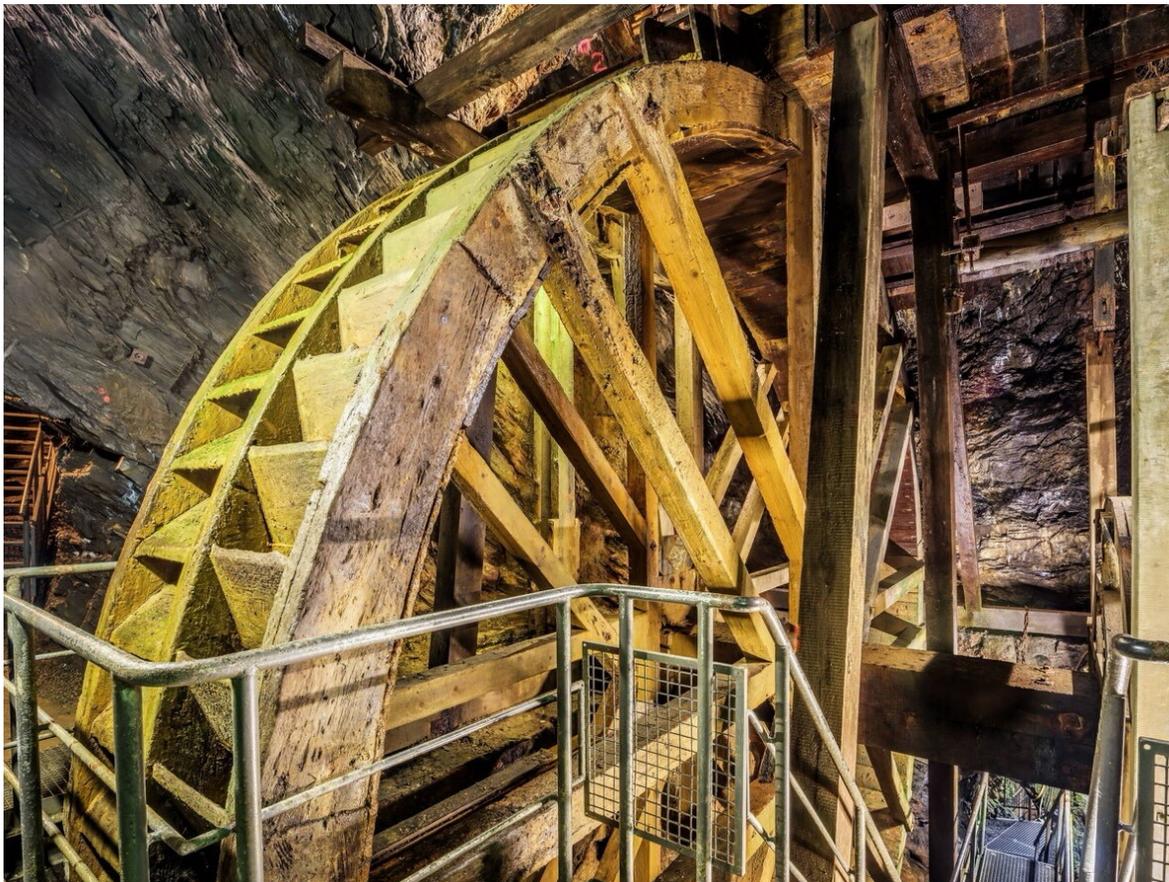
Schwammartiger Eisenklumpen **verdichten**

Ausschmieden“ der Schlackenresten und **Verunreinigungen**

**Homogenisieren** der Zusammensetzung durch Falten und Feuerverschweißen

**Reduzierung** der **Korngröße** der Eisenkristalle durch das Schmieden

# Weiterentwicklung der Rennöfen ab 12. Jahrh.



## Allgemeine Mechanisierung und größere Rennöfen

Mechanisierung durch Wasserkraft

Automatisierung der Luftzufuhr

Mechanische Hammerwerke

Bessere Ausnutzung der Wärme

Erreichen höherer Temperaturen

Eisen wird flüssig

➔ Übergang zum „Hochofen“

# Weiterentwicklung der Rennöfen ab 12. Jahrh.

## Vom Rennofen zum „Stückofen“

### Vorteil

Öfen mit von Wasserkraft angetrieben Blasebälgen erzeugten große Eisenmengen

### Nachteil

Die Luppe hatte mehr als 100 kg Gewicht (schwere „Stücke“)

Das "**Stück**"- namensgebend für „Stückofen“ war kaum noch mit Muskelkraft zu schmieden

Schmieden war noch mit einem mit Wasserkraft angetriebenem Hammer möglich



Abb.: Rennofen (Stückofen) (G. Agricola)

# Weiterentwicklung der Rennöfen ab 12. Jahrh.

## Vom Stückofen zum Floßofen

### Vorteile

Höhere Temperaturen erlauben die Erzeugung von flüssigem Roheisen und damit einen kontinuierlichen Betrieb, indem nun die Eisenschmelze aus dem Ofen kontinuierlich abfließen konnte.

Der Abriss des Ofens war nun nicht mehr nötig.

### Nachteile

Eisenschmelze nehmen bei hohen Temperaturen deutlich mehr Kohlenstoff auf -statt **Stahl** entstand gut gießbares „**Roheisen**“, das aber **nicht schmiedbar** ist!



Abb.: Ofenplatte – Gusseisen © Friedhelm Greiwe

# Weiterentwicklung der Rennöfen ab 12. Jahrh.

## Roheisen und deren Weiterverarbeitung in Herdfeuern

### **Nachbehandlung**

Nicht-schmiedbares „Roheisen“ war nun in großen Mengen zu gewinnen (Floßofen)

**Schmiedbarkeit wichtig** (bisher klassische handwerkliche Formgebung, denn mechanische Bearbeitung schwierig)

Die Entwicklung der Methode des „**frischen**“ machte aus kohlenstoffreichen Roheisen wieder Stahl

### **Glühfrischen (Glüh-Nachbehandlung)**

Festes Roheisen wird über längere Zeit unter Sauerstoff im Herdfeuer geglüht

Kohlenstoff, Phosphor und Schwefel werden dabei dem Eisen entzogen (oxidiert)

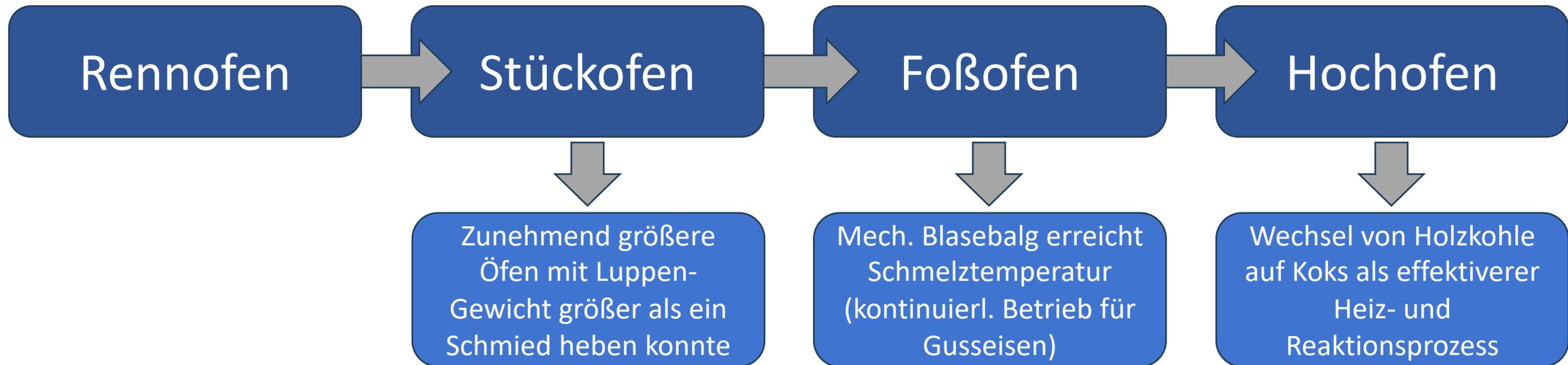
### **Herdfrischen (Schmelz-Nachbehandlung)**

Flüssiges Roheisen wird in einem flachen Herd aufgeschmolzen

Sauerstoff wird auf die Schmelze geblasen um Verunreinigungen zu verbrennen

# Weiterentwicklung der Rennöfen ab 12. Jahrh.

## Zusammenfassung



# Entwicklung der Bauformen

Perfektionierung der Rennöfen

# Schritte der Weiterentwicklung der Rennöfen

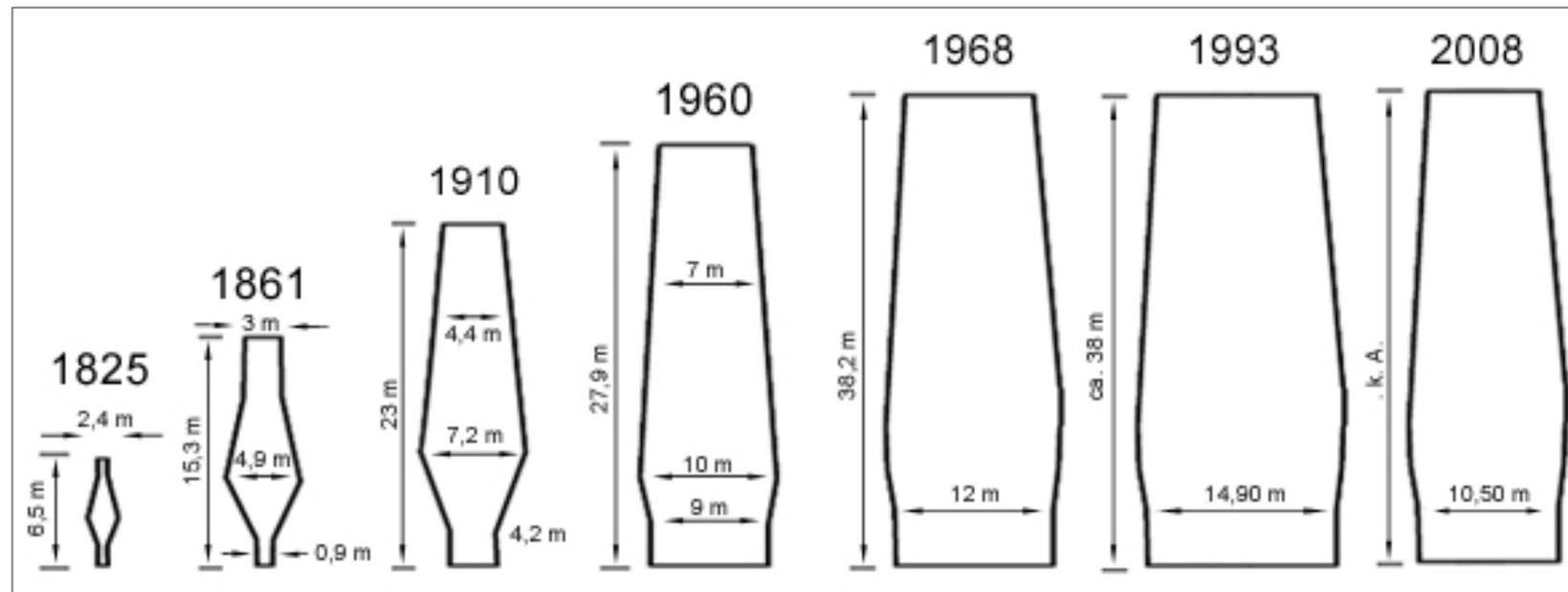


Abb.: Entwicklung der Bauformen vom Rennofen zum Hochofen

Quelle: Autorenteam, verändert nach Wiel 1970, S. 207 und <http://www.thyssenkrupp-steel.de>  
[http://www.ruhrgebiet-regionalkunde.de/html/grundlagen\\_und\\_anfaenge/eisen\\_und\\_stahl/fruehzeit\\_eisen.php%3Fp=3,0.html](http://www.ruhrgebiet-regionalkunde.de/html/grundlagen_und_anfaenge/eisen_und_stahl/fruehzeit_eisen.php%3Fp=3,0.html)

## Vom „Stückofen“ zum Holzkohlehochofen

Flüssiges Eisen konnte man abstechen und ablaufen lassen => Kontinuierlicher **Dauerbetrieb**

**Trennung** von Eisenschmelze, Schlacke und Holzkohle

Schlacke schwamm auf dem Eisen

Eisen blieb frei von Schlacke und Kohlerückständen

Zugleich dient die flüssige Schlacke als Oxidationsschutz für das darunter liegende flüssige Eisen

# Weiterentwicklung der Rennöfen – die Form bleibt

## Moderner Hochofen

### Links:

Konstruktion  
Befüllung  
Feuerung

### Rechts:

Reaktionen  
Temperaturzonen

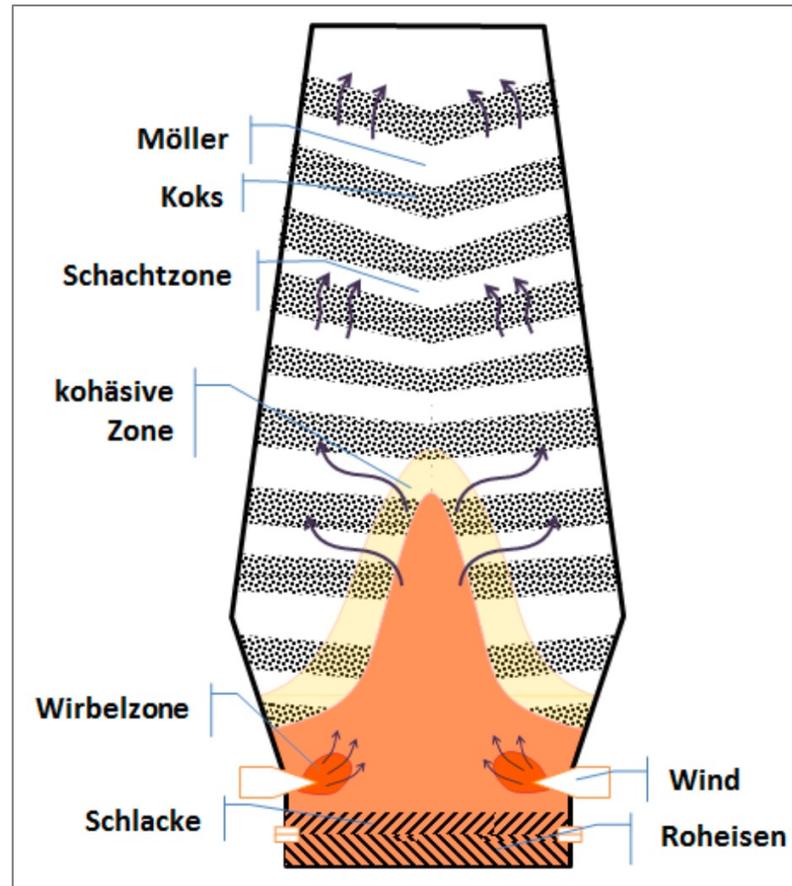


Abb. (l): Schichtung im Hochofen

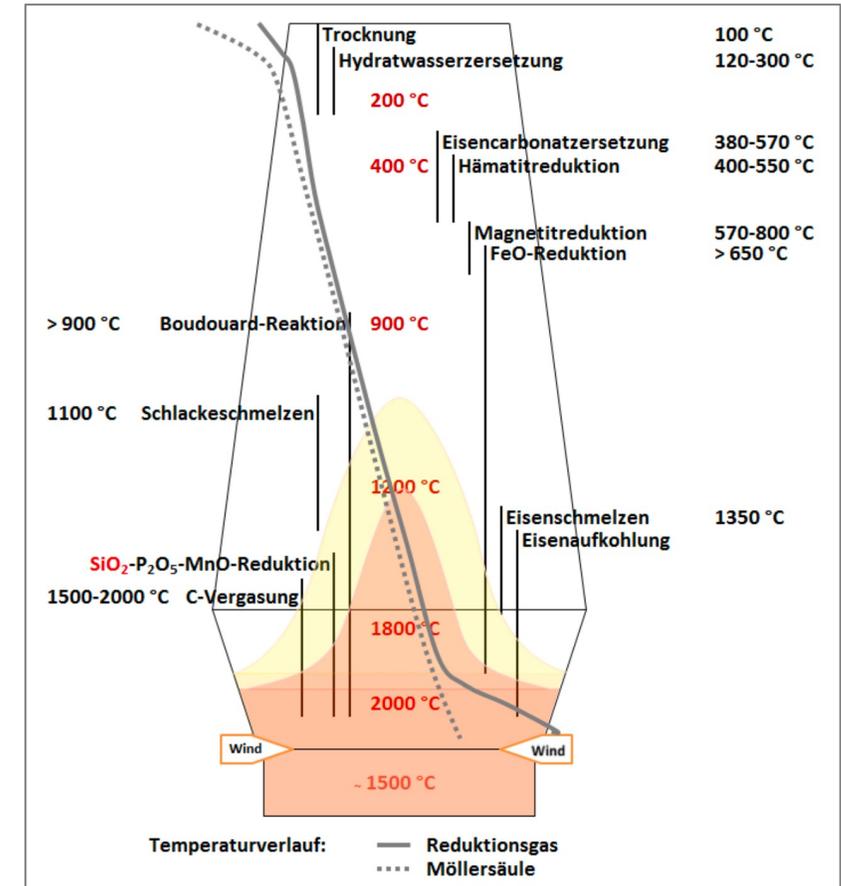


Abb. (r): Temperaturzonen im Hochofen

# Prozesse und Vorgänge bei der Eisenherstellung

„Metallurgie des Eisens“

Reaktions- und Schmelzprozesse, Gefügeumwandlungen

# Prozesse und Vorgänge bei der Eisenherstellung

Reaktions- und Schmelzprozesse, Gefügeumwandlungen



Abb.: Raseneisenerz und Luppe (Bernhard Reepen)

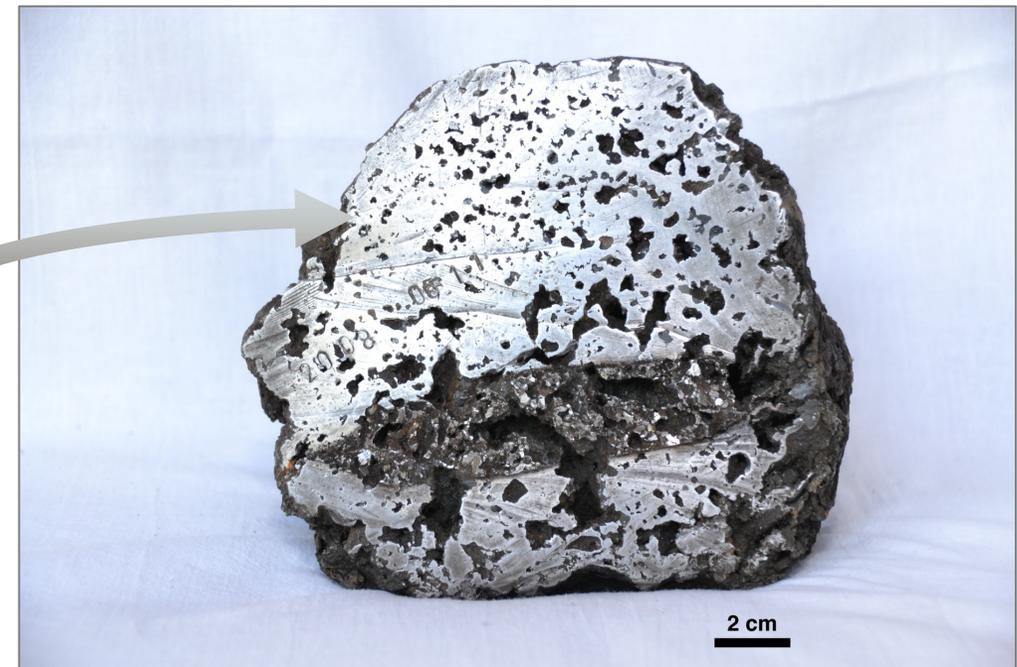


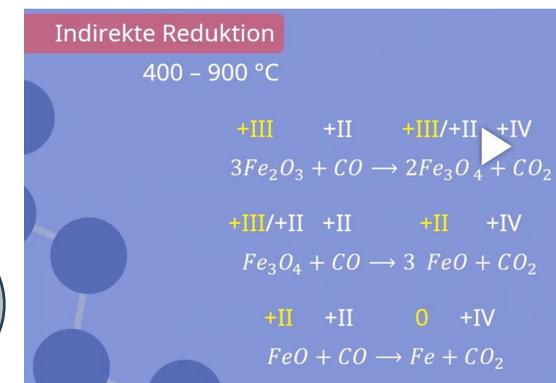
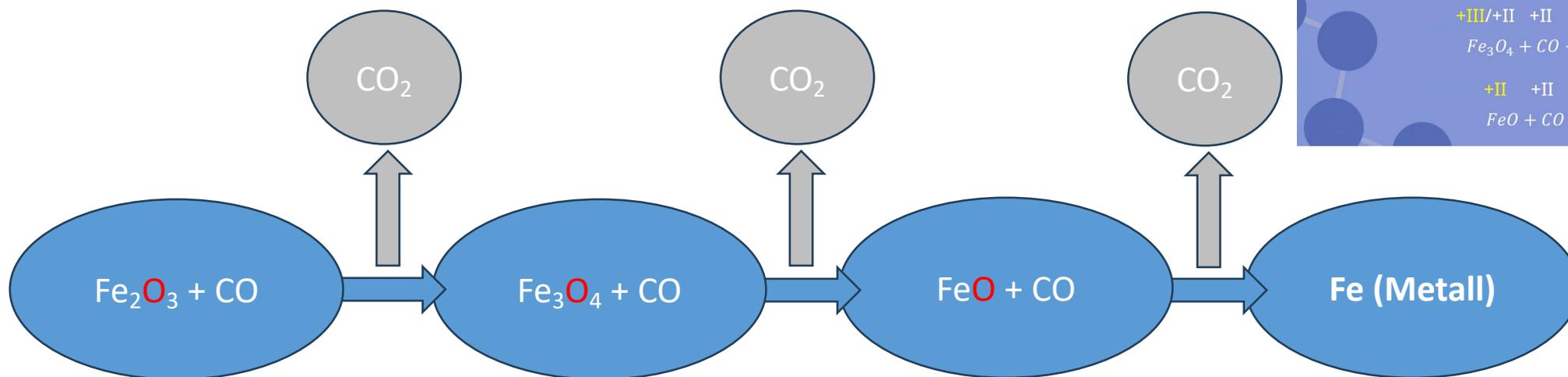
Abb.: Raseneisenerz und Luppe (Bernhard Reepen)

# Prozesse und Vorgänge bei der Eisenherstellung

## Reaktionsprozesse bei niedrigeren Temperaturen

**Reduktion des Erzes im niedrigeren Temperaturbereich 400- 900°C**

Reduktion mit **Kohlenmonoxid** (CO) in mehreren Stufen:

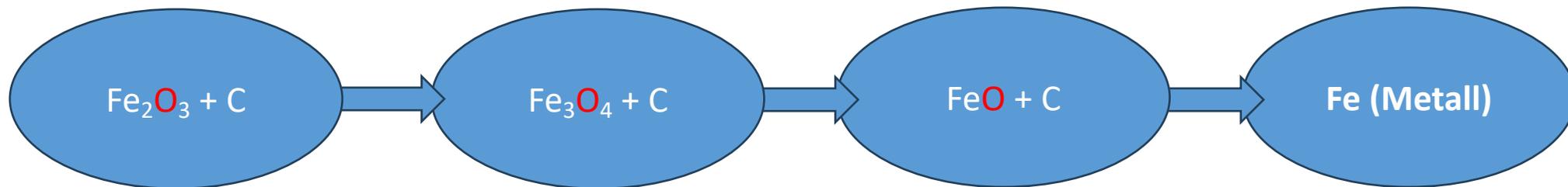
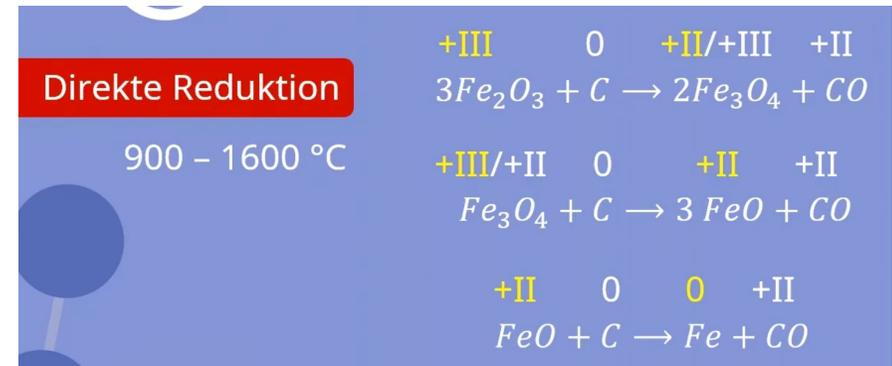


# Prozesse und Vorgänge bei der Eisenherstellung

## Reaktionsprozesse bei höheren Temperaturen

**Reduktion des Erzes oberhalb 900°C (Boudouart-Reaktion:  $\text{CO}_2 + \text{C} \leftrightarrow 2\text{CO}$ )**

Reduktion erfolgt statt mit **Kohlenmonoxid** (CO) **direkt** mit **Kohlenstoff** (C) so:



# Prozesse und Vorgänge bei der Eisenherstellung

Nebenprodukt Schlacke

# Prozesse und Vorgänge bei der Eisenherstellung

## Nebenprodukt Schlacke

**Erz und Holzhohle entwickeln sich im Rennofen zu Eisen (Luppe) und Schlacke**

Was ist Schlacke: Aufgeschmolzene Begleitminerale, Zuschlagsstoffe und Asche

Schlackenmenge wächst während des Brennens an und stört den Schmelzprozess

Schlacke muss kontinuierlich aus dem Rennofen, um die Luftzufuhr nicht abzuschneiden (Rinnt bei ca. 1200°C)

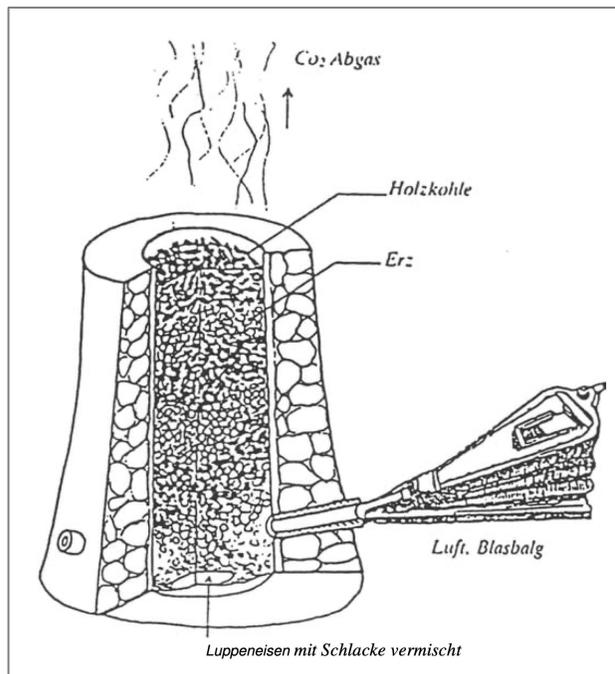


Abb.: Luftzufuhr/Schlackenabfluss



Abb.: Schlackenabfluss (Bernhard Reepen)



# Prozesse und Vorgänge bei der Eisenherstellung

## Neuzeitliche- und Historische Rennofenschlacke (Bernhard Reepen)



Abb.: Neuzeitliche Schlacke / Ofenwand (rot)



Abb.: Neuzeitliche Eisen-Silizium Schlacke



Abb.: Mittelalterliche Schlacke

# Prozesse und Vorgänge bei der Eisenherstellung

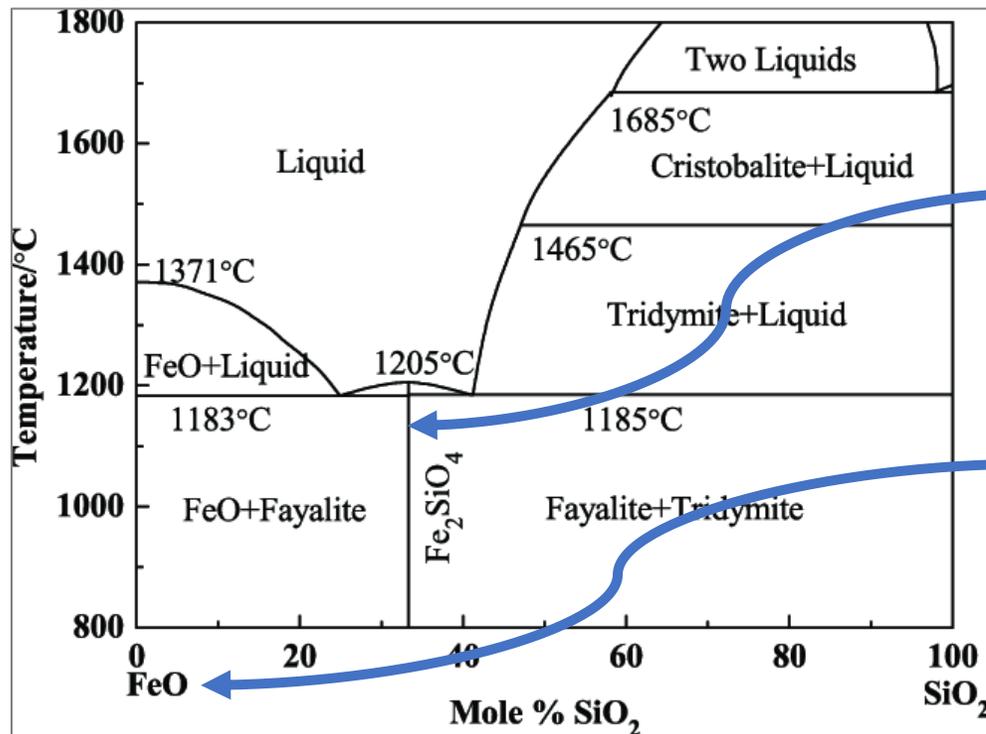
## Schlackenbildner

### Bestandteile der Schlacke

Unerwünschte mineralische Erz-Begleiter (CaO, CaCO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Begleiter aus biologischer Raseneisenerz-Genese (SO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

Nur die Schlacke wird im Rennofen flüssig und rinnt aus dem Ofen



„Silizium-Eisen“

„Eisenoxid (Erz)“

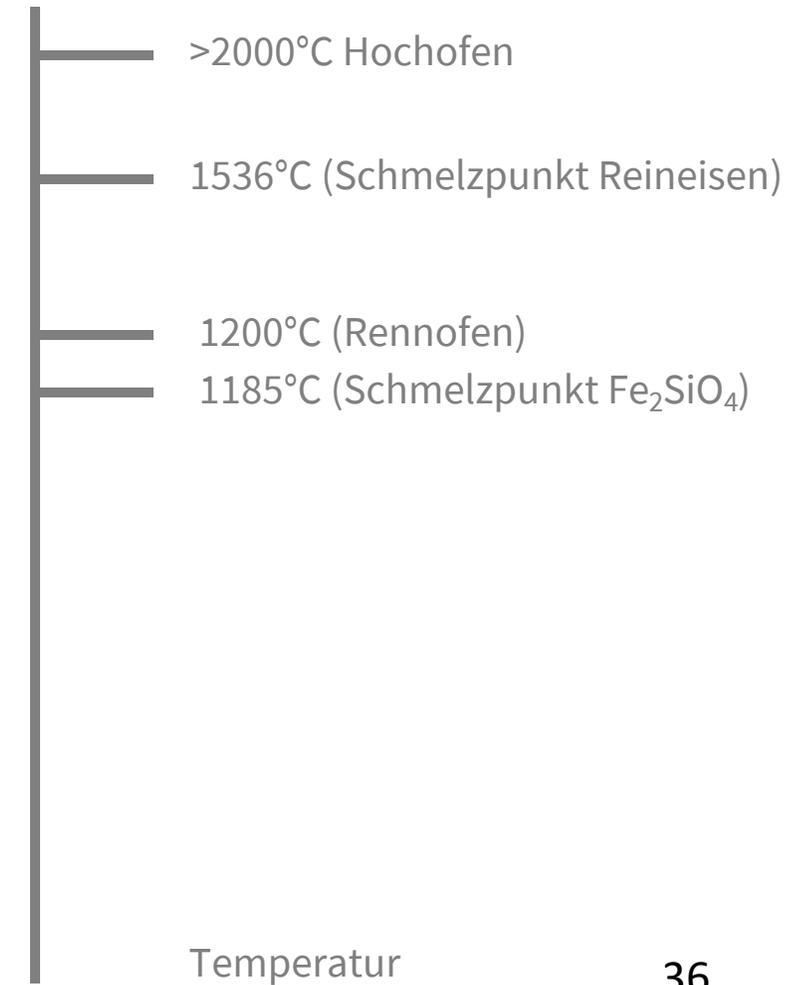


Abb.: Phasendiagramm FeO – Quarz (SiO<sub>2</sub>)

Temperatur

# Prozesse und Vorgänge bei der Eisenherstellung

Dem Ziel nahe: Metallisches Eisen

# Prozesse und Vorgänge bei der Eisenherstellung

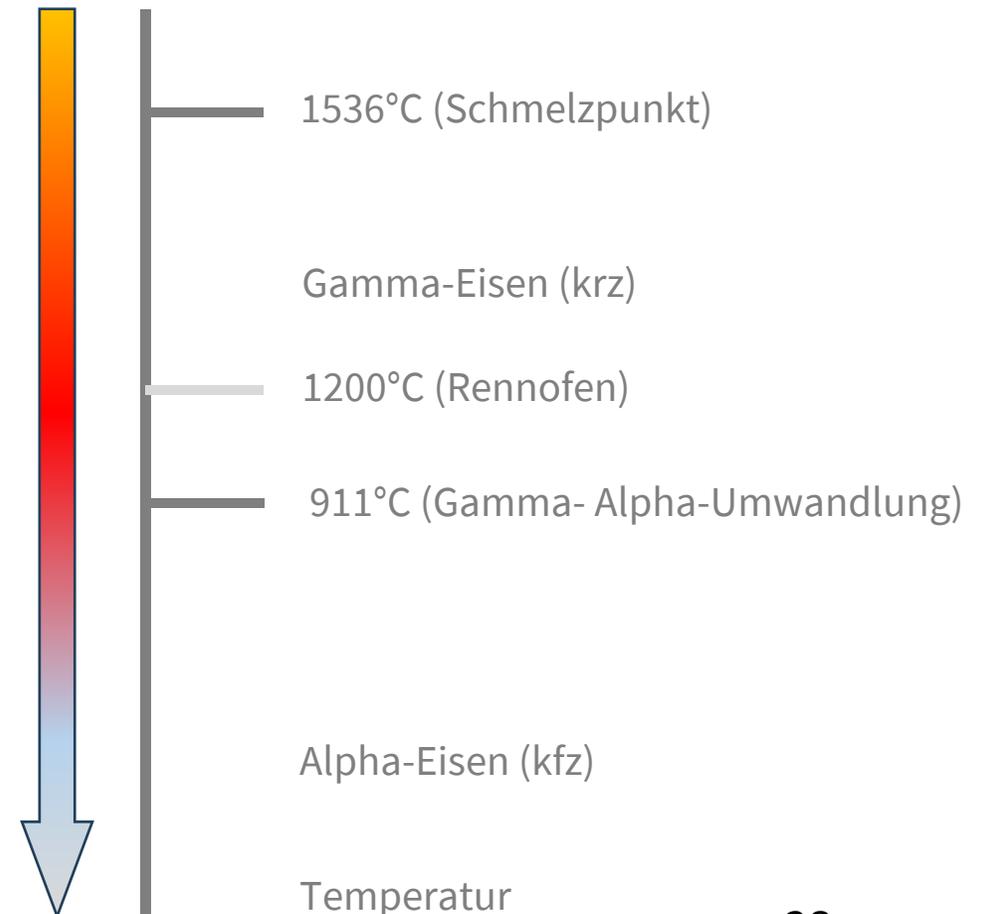
Dem Ziel nahe: Metallisches Eisen

## Kristallisation von Reineisen - Prozesse bei der Abkühlung

Kristallisation beim Unterschreiten der Schmelztemperatur (1536°C)

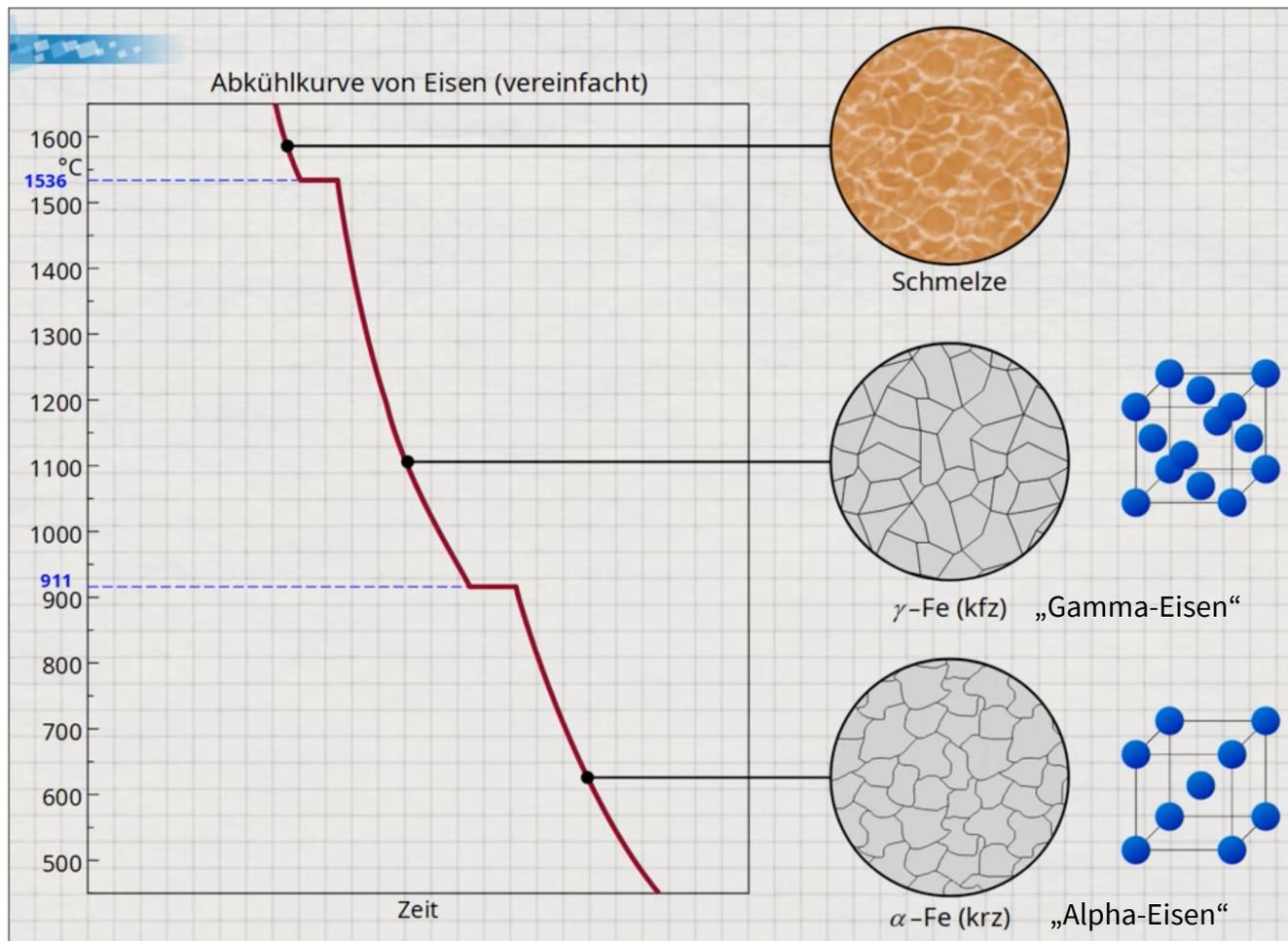
Kristallisation als kubisch flächenzentriertes Eisen (Gamma-Eisen)

Bei 911°C Umwandlung der Gitterstruktur (Gamma-Alpha-Umwandlung)



# Prozesse und Vorgänge bei der Eisenherstellung

## Metallisches **reines** Eisen – Verhalten aus dem Labor



### Abkühlung und Kristallisation von Reineisen

Abkühlungsverlauf einer reinen Eisenschmelze

1. Abkühlungs-Zeit-Verlauf
2. Mikroskopischer Aufbau
3. Kristallgitter-Typ

Abb.: Abkühlung von **Reineisen**

# Prozesse und Vorgänge bei der Eisenherstellung

Was ist was? – Eine Begriffserklärung: Eisen-, Stahl- und Gusslegierungen

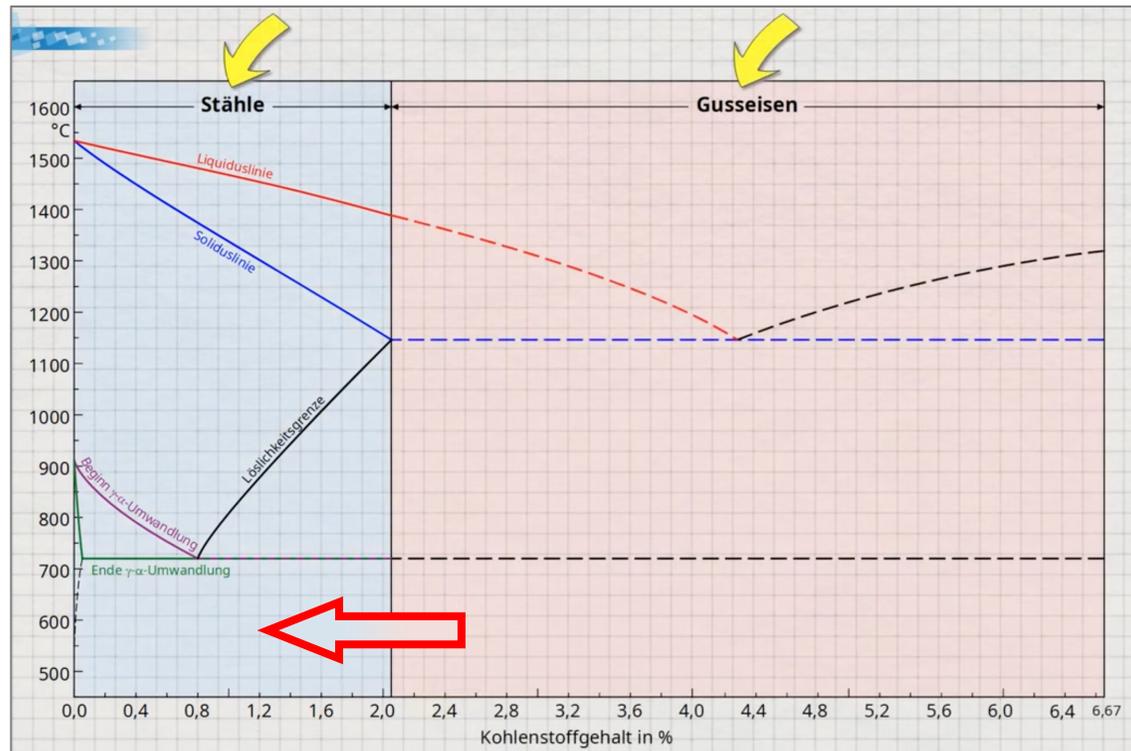


Abb.: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

© Andreas Höfler, <https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/eisen-kohlenstoff-diagramm/gefugeentstehung-waehrend-der-erstarrung/>

## Begriffsklärung

**Eisen** -ein chemisches Element („Reineisen“), Schmelzpunkt: 1536°C

Eisen mit bis zu 2,06% gelöstem Kohlenstoff heißt **Stahl**

Stahl ist nur bis 2,06% Kohlenstoff **schmiedbar**

Eisen oberhalb 2,06% Kohlenstoff heißt **Gusseisen** (ist gut giessbar)

Stahl ist im Bereich 0,8% -2,06% Kohlenstoff **härtbar**

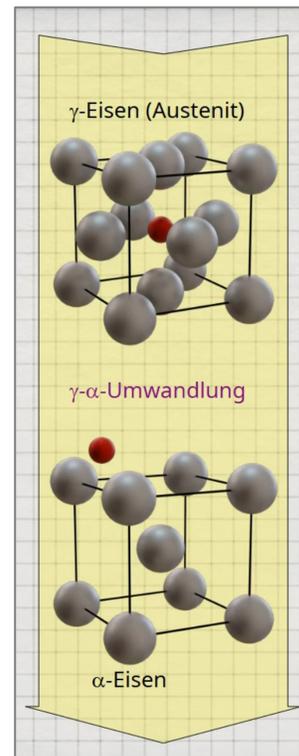
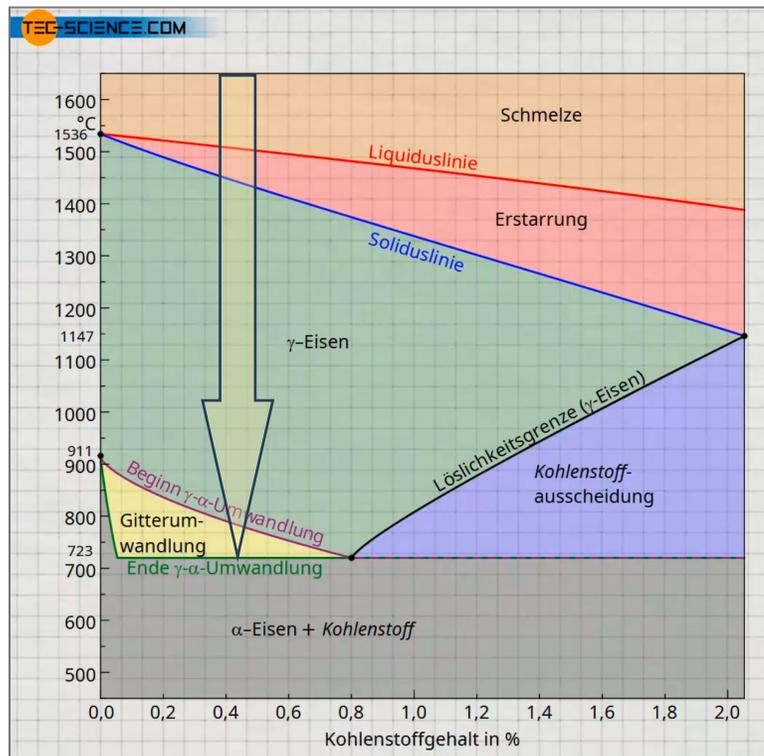
Darum: Rennofen-Eisen entsteht bei ca. 1200°C als teigige Masse

„Weicheisen“ (bis 0,8% Kohlenstoff) ist nicht härtbar

„Werkzeugstähle“ (ab 0,8% – 2% Kohlenstoff) sind härtbar

# Prozesse und Vorgänge bei der Eisenherstellung

## Kristallisation und Umwandlung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen



**Eisen mit gelöstem Kohlenstoff verhält sich anders als Reineisen**

Prozesse und Eigenschaften hängen vom **Kohlenstoffgehalt** ab:

- Kristallstruktur nimmt in der Schmelze Kohlenstoff auf
- Die Kristallisationstemperatur sinkt (Liquidus/Solidus-Line)
- Bei der Abkühlung wird Kohlenstoff in das Eisen-Gitter eingebaut
- Hochtemperatur-Phase (**grün**) enthält viel Kohlenstoff im Zwischengitter
- In der Tieftemperatur-Phase (**gelb**) ist Kohlenstoff praktisch unlösbar
- Ausscheidung vom zuviel an Kohlenstoff als Festkörperreaktion

Abb.: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm und Eisenlöslichkeit in Ferrit und Austenit

# Prozesse und Vorgänge bei der Eisenherstellung

## Phasenumwandlung in Eisen-Kohlenstoff-Legierungen

Kohlenstoffgehalt und Einfluss auf das Gefüge

Abb.: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (Ferrit – Zementit)

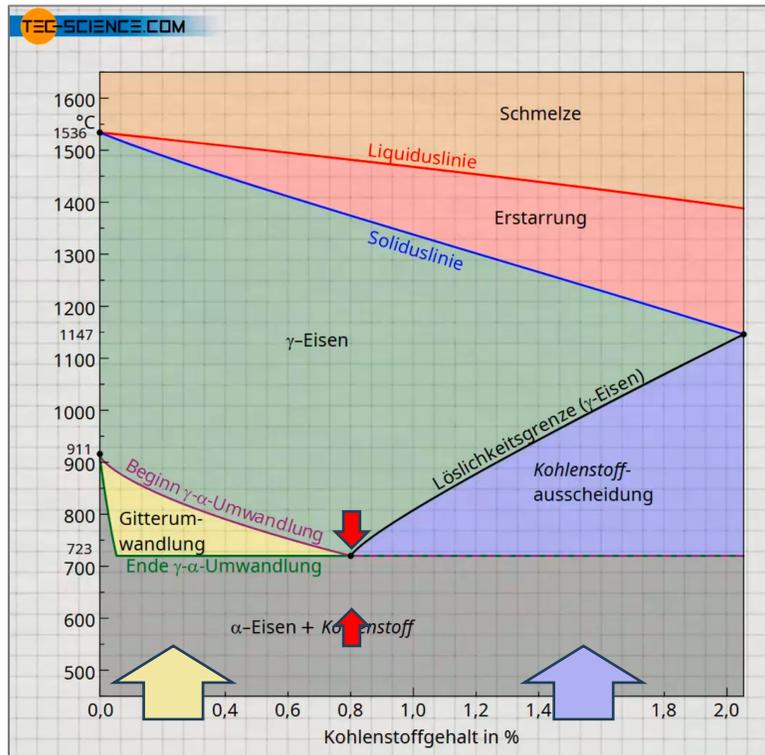
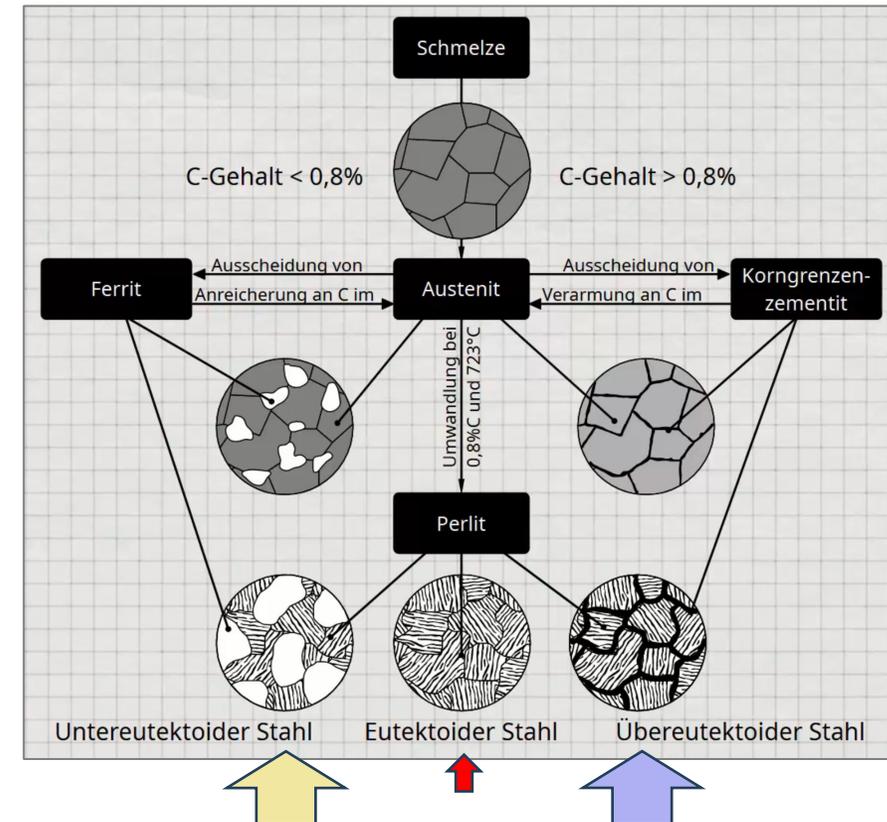


Abb.: Gefüge der Eisenlegierung



# Umwandlungsprozesse Prozesse des Eisens

## Härtung von Stahl

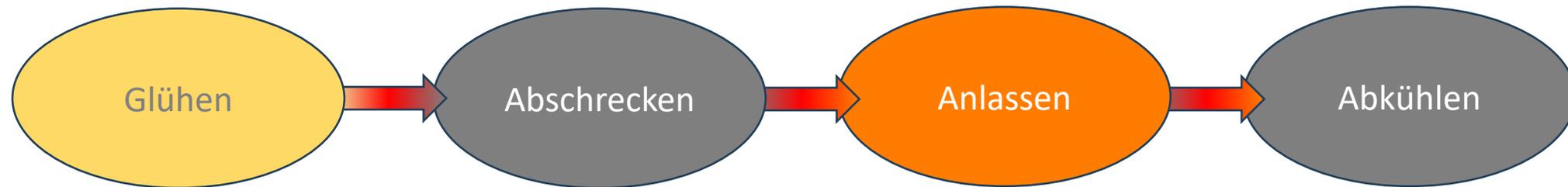


Abb. Arbeitsschritte im modernen Härteprozess

# Umwandlungsprozesse

## Glühen im Härteprozess

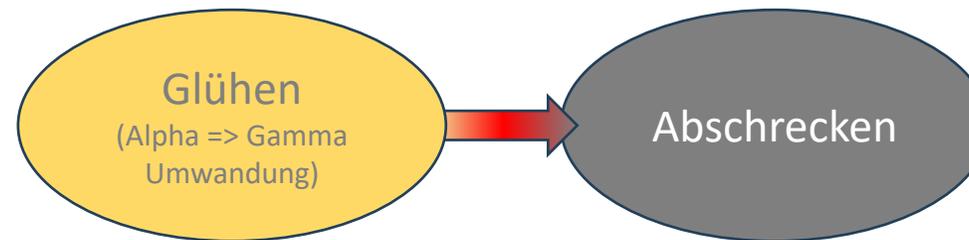


Abb. Der Härteprozess (Erhitzen auf über 900°C)

# Umwandlungsprozesse

## Glühen / Abschrecken im Härteprozess

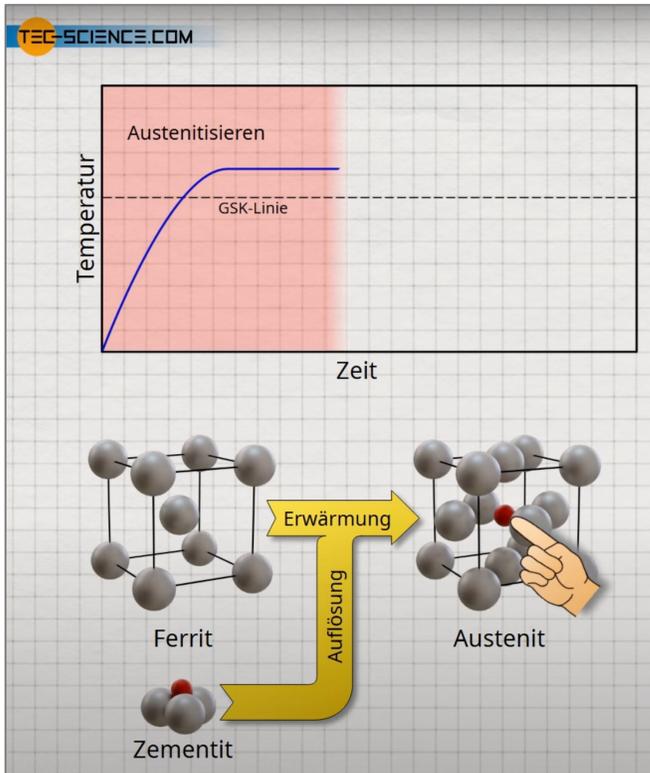


Abb.: Erwärmen

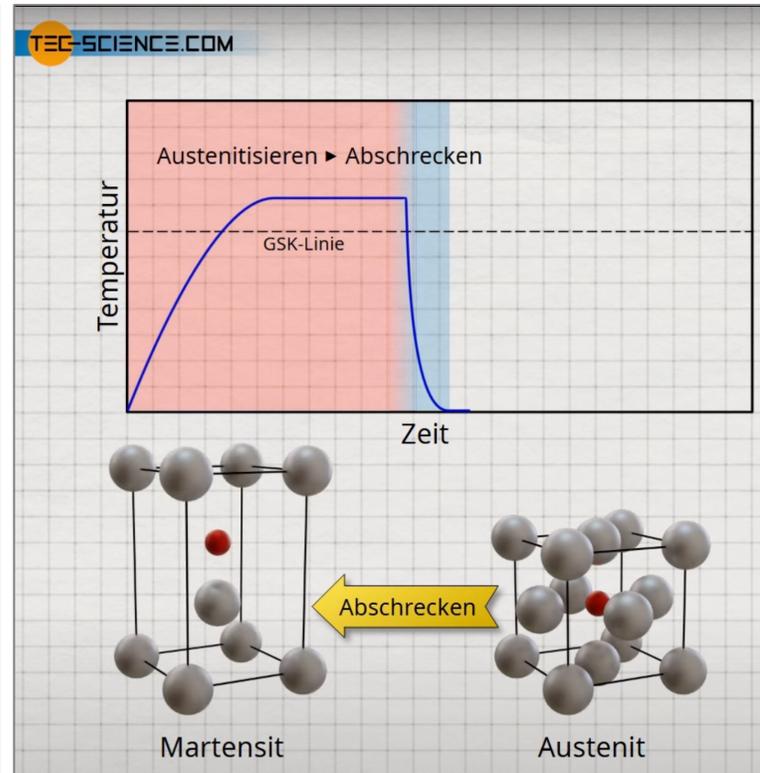


Abb.: Abschrecken

### Schritt 1: Lösungsglühen

Umwandlung von Ferrit und Zementit in Gamma-Eisen (Austenit, KFZ)

Gelöster Kohlenstoff wird im Austenit gelöst

### Schritt 2: Abschrecken (in Wasser oder Öl)

Umwandlung von Austenit in Martensit

Gitteraufweitung durch überschüssigen Kohlenstoff

# Umwandlungsprozesse

## Der Unterschied: Abschrecken oder langsame Abkühlung

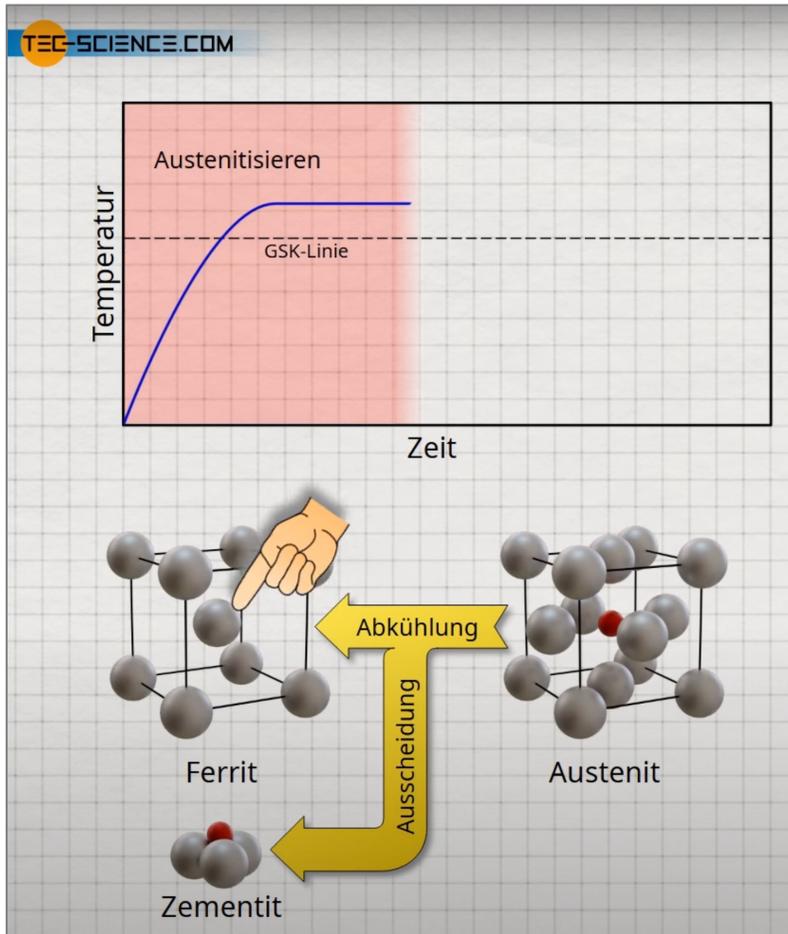


Abb.: Austenit-Zerfall bei **langsamer** Abkühlung

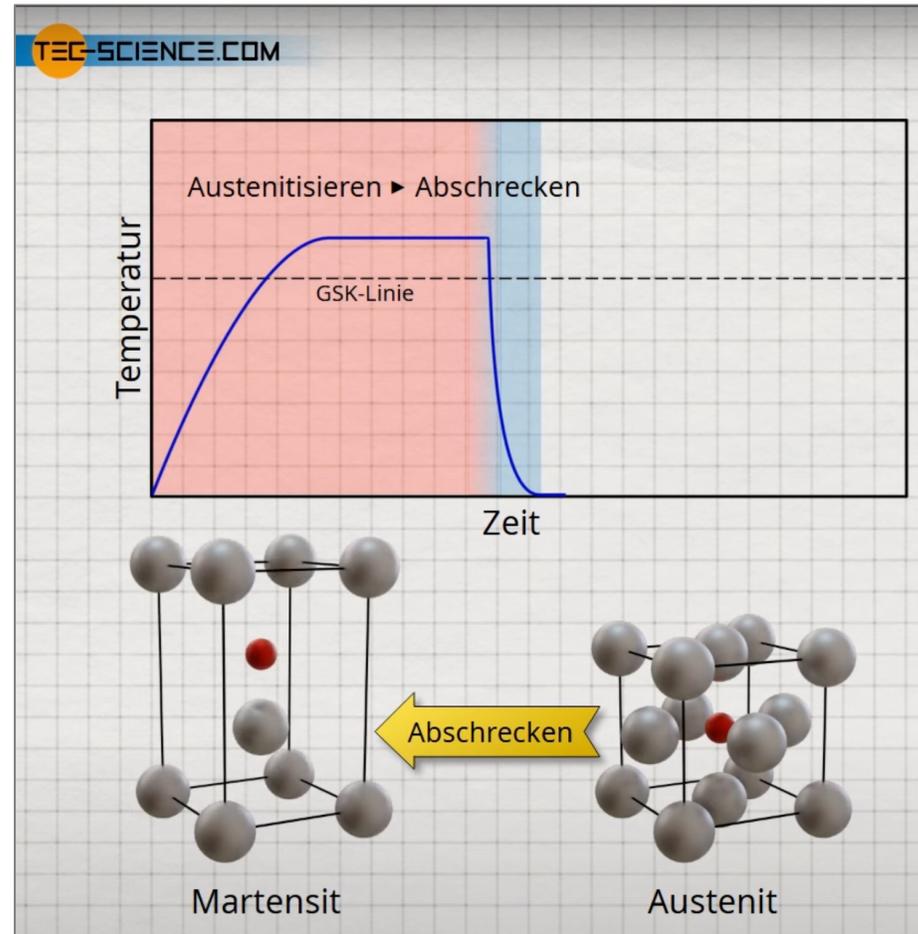


Abb.: Austenit-Martensit Umwandlung bei **rascher** Abkühlung

Unterschied zwischen **Abkühlen** und **Abschrecken**

© Andreas Höfler, <https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/eisen-kohlenstoff-diagramm/gefugeentstehung-waehrend-der-erstarrung/>

# Umwandlungsprozesse

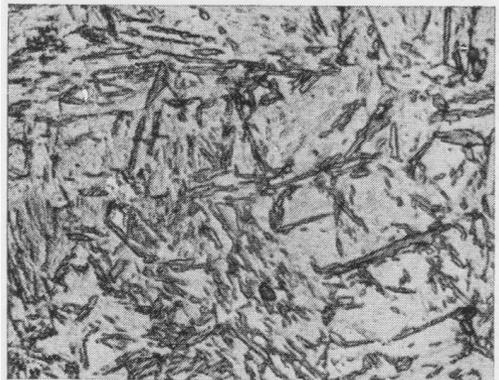
## Ergebnis nach Abschrecken: Das Härtegefüge



V = 500 : 1

**Bild 519.** Stahl mit 1,5% C. Von 1100 °C in Eiswasser abgeschreckt. Martensitnadeln und Restaustenit

Härtegefüge von Stahl (1,5% Kohlenstoff)  
nach Abschrecken von 1100°C in Eiswasser: **Nadeliges Martensit-Gefüge**



V = 500 : 1

**Bild 521.** Stahl mit 0,45% C. Von 900 °C in Wasser abgeschreckt. Martensit

Härtegefüge von Stahl (0,45% Kohlenstoff)  
Nach Abschrecken von 900°C in Eiswasser: **Martensitbildung**

# Umwandlungsprozesse

## Glühen und Anlassen im Härteprozess

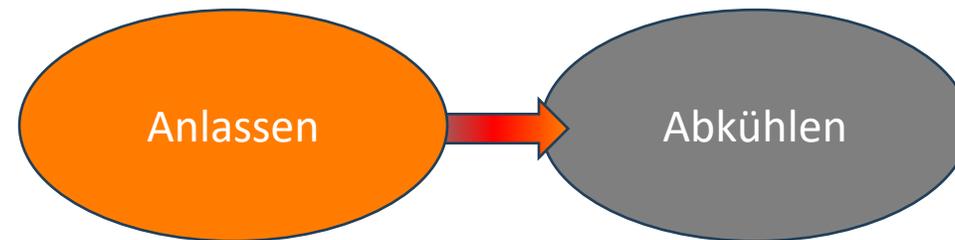


Abb. Arbeitsschritte beim Anlassen

# Umwandlungsprozesse

## Anlassen im Härteprozess – warm?

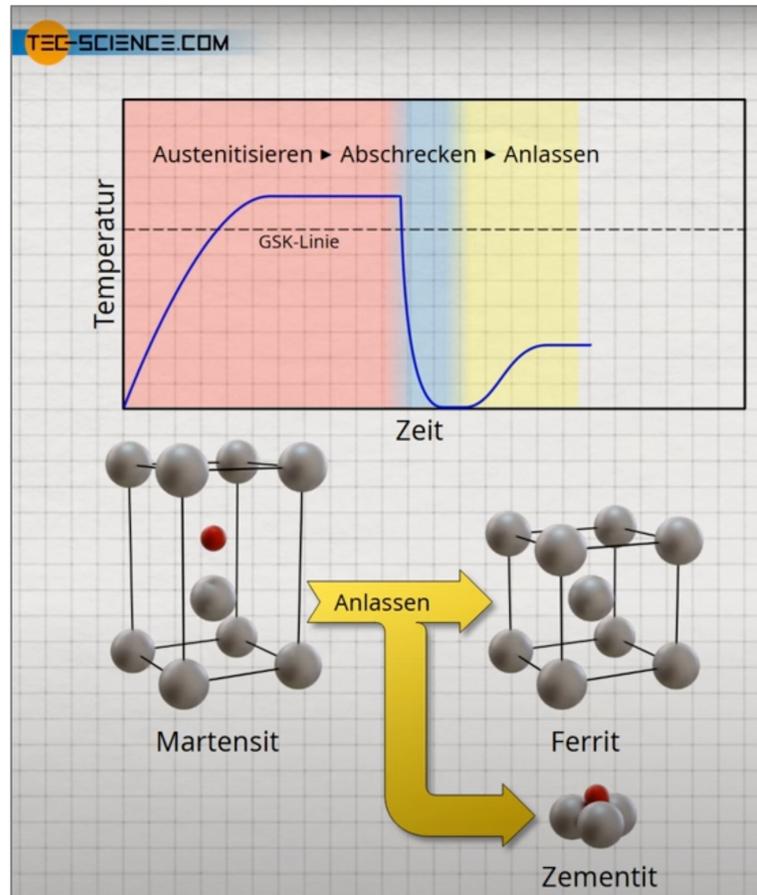


Abb.: Martensit-Zerfall bei moderater Erwärmung

### Glüh-Prozess

- Ziel: Gelöster Kohlenstoff im Martensit lösen
- (1) Rückumwandlung von Martensit in Alpha-Eisen (Ferrit)
  - (2) Bildung von Zementit

### Abkühlprozess

Langsames Abkühlen ohne Abschrecken

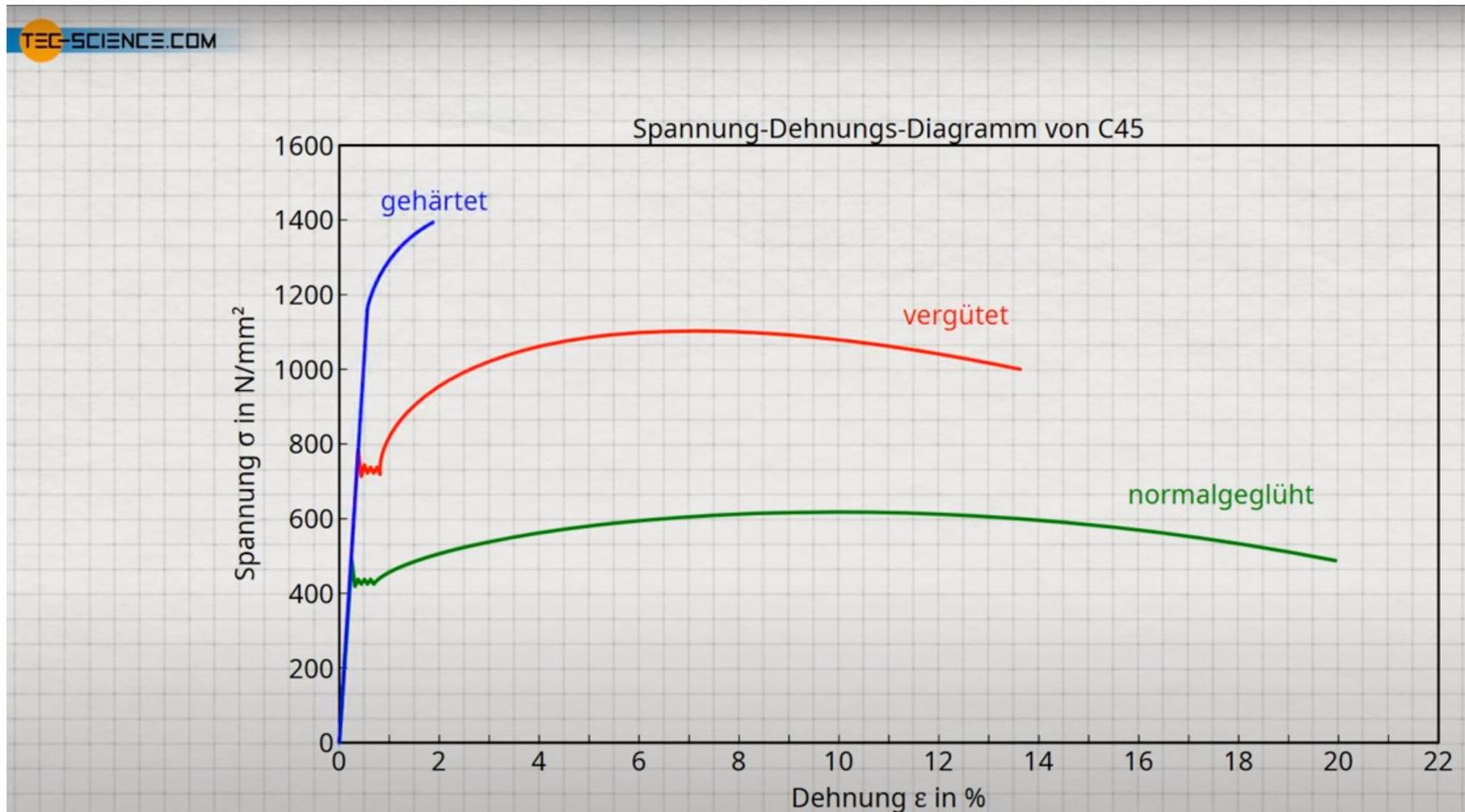
### Verbesserung der Eigenschaften

Reduzierung der Härte

Verbesserung der Zähigkeit

# Umwandlungsprozesse

## Erzielbare Härte



### Vergleich Wärmebehandlung

Härte / Sprödigkeit

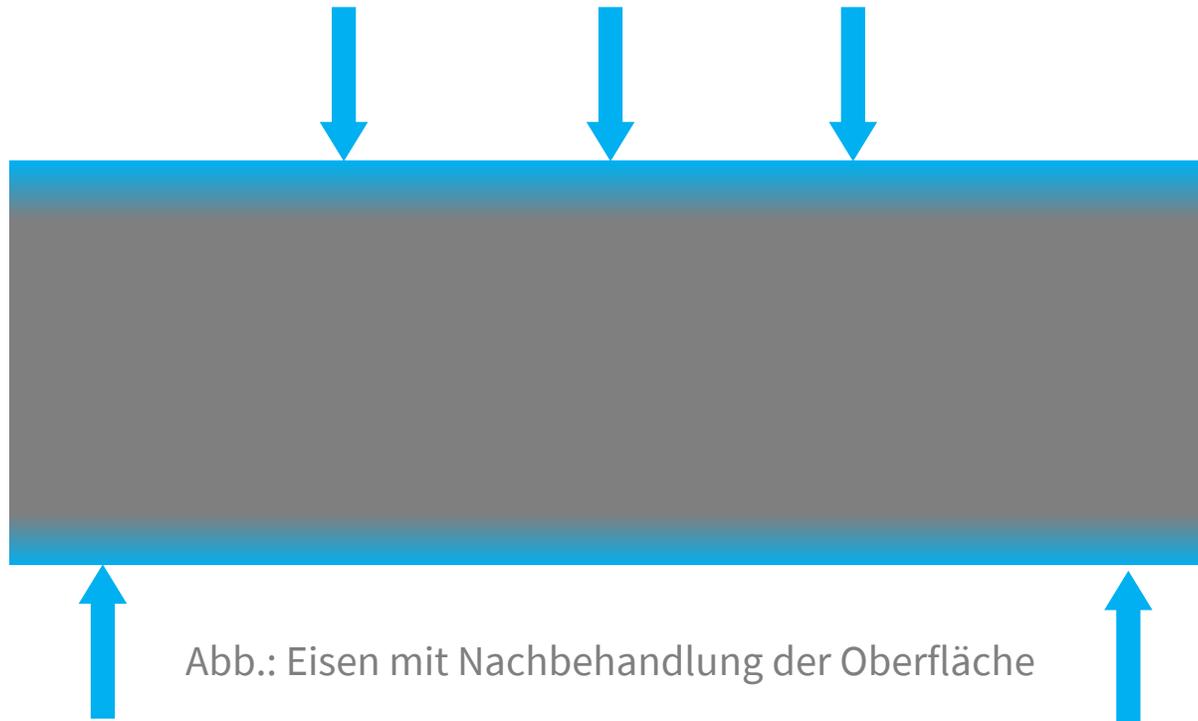
Plastische Verformbarkeit

Wärmebehandlung

© Andreas Höfler, <https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/eisen-kohlenstoff-diagramm/gefugeentstehung-waehrend-der-erstarrung/>

Abb.: Mechanische Eigenschaften von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen

# Spezielle Härtingungsverfahren



## Oberflächenhärtung (Diffusion)

- Karbonieren: Glühen/Aufkohlung im Herdfeuer
- Nitrieren (Stickstoff): Glühen mit Horn-Spänen, mit Urin- oder Cyanid-Salzen

# Weitere Glühprozesse - Wofür verwendete man das?

Verfahren

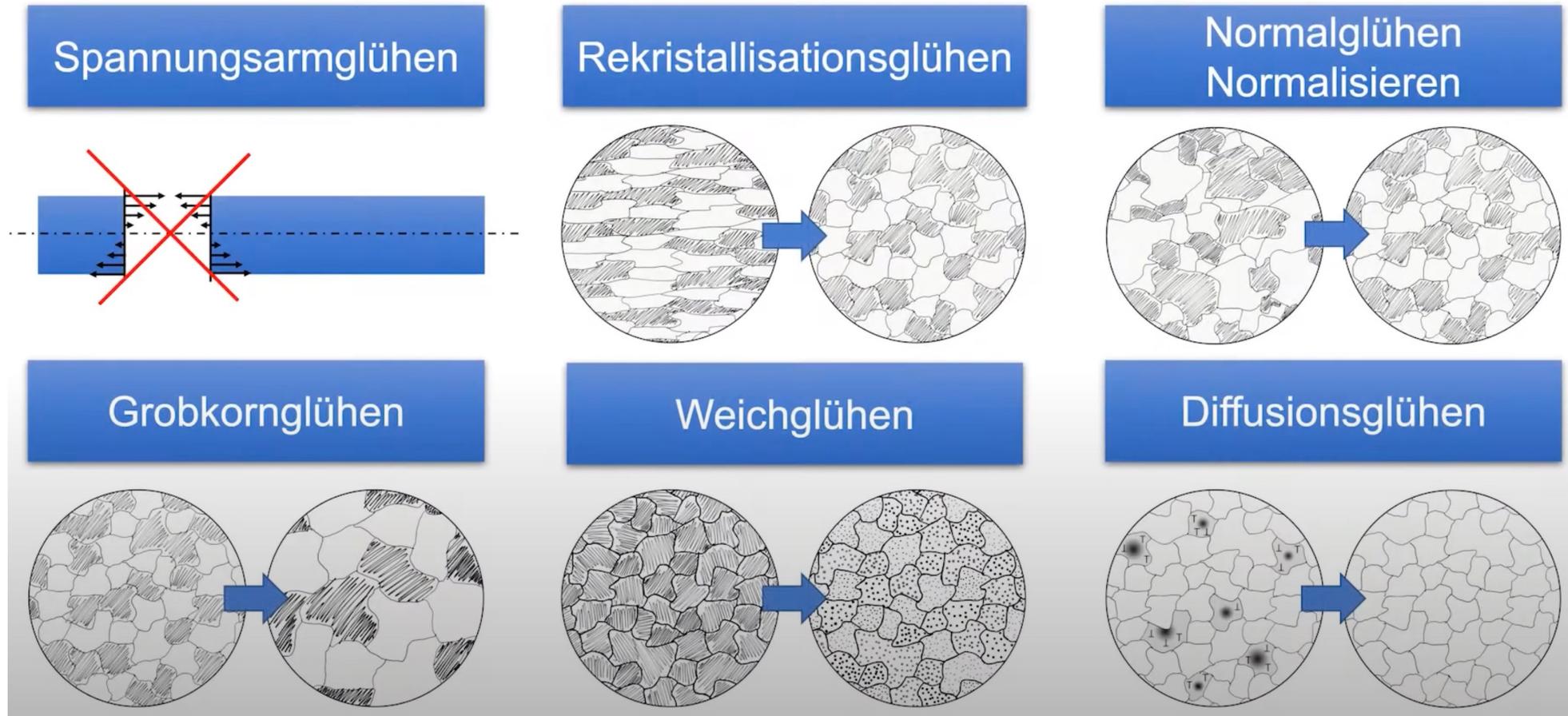


Abb.: Mechanische Eigenschaften von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen

# Literatur und Links zur Eisenverhüttung

[https://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde\\_Metall/\\_Eisen\\_und\\_Stahl/\\_Metallurgie](https://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde_Metall/_Eisen_und_Stahl/_Metallurgie) (Eisen - Eigenschaften)  
<https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/eisen-kohlenstoff-diagramm/gefugeentstehung-waehrend-der-erstarrung/> (Eisen und Eisen-Kohlenstoff-Diagramm, Andreas Höfler)  
<https://studyflix.de/chemie/hochofenprozess-1594> (Studyflix - Hochofenprozess)  
<https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Rennofen>  
[https://de.m.wikipedia.org/wiki/Eisenverhuetting\\_bei\\_den\\_Germanen](https://de.m.wikipedia.org/wiki/Eisenverhuetting_bei_den_Germanen)  
<https://www.materialmagazin.com/index.php/staehle/eigenschaften-von-eisen>  
<https://studyflix.de/chemie/eisen-kohlenstoff-diagramm-1539> (Eisen-Kohlenstoff-Diagramm)  
<https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/eisen-kohlenstoff-diagramm/gefugeentstehung-waehrend-der-erstarrung/> (Eisen-Kohlenstoff-Diagramm)  
<http://eisenzeit-rennofen.de/rennofen/>  
<https://www.kuladig.de/Objektansicht/KLD-334733>  
<https://www.praehistorische-archaeologie.de/wissen/die-eisenzeit/eisenverhuettung/#c1545>  
[http://www.ruhrgebiet-regionalkunde.de/html/grundlagen\\_und\\_anfaenge/eisen\\_und\\_stahl/fruehzeit\\_eisen.php%3Fp=3,0.html](http://www.ruhrgebiet-regionalkunde.de/html/grundlagen_und_anfaenge/eisen_und_stahl/fruehzeit_eisen.php%3Fp=3,0.html)  
<https://www.youtube.com/watch?v=b5R893UR9Eg> (Eisen-Kohlenstoff-Diagramm Teil 1, Andreas Höfler)  
<https://www.youtube.com/watch?v=yggaje4a5gs> (Eisen-Kohlenstoff-Diagramm Teil 2, Gefügeumwandlungen, Andreas Höfler)  
[https://www.youtube.com/watch?v=r8Jf4qUR\\_e0](https://www.youtube.com/watch?v=r8Jf4qUR_e0) (Kristallisation|Erstarrung von Metallen|Unterkühlung & Keimbildung|Gefügebildung, TEC Science)  
[https://www.researchgate.net/figure/FeO-SiO2-Phase-diagram\\_fig4\\_284763588](https://www.researchgate.net/figure/FeO-SiO2-Phase-diagram_fig4_284763588) (FeO-SiO<sub>2</sub> Phasendiagramm, De-qing Zhu)  
[https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/servlets/MCRFileNodeServlet/clausthal\\_derivate\\_00000038/Db112828.pdf](https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/servlets/MCRFileNodeServlet/clausthal_derivate_00000038/Db112828.pdf) (Michael Fischer, Doktorarbeit)  
Verein Deutscher Eisenhüttenleute Wirtschaftsvereinigung Stahl 1999, S. 161, (C) 2000 Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, Germany  
Autorenteam, verändert nach Wiel 1970, S. 207 und <http://www.thyssenkrupp-steel.de>  
H. Schumann: Metallographie, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 11. Aufl., o. J.

# Vielen Dank für Ihr Interesse!

Kontakt:

Dr. Hans-Georg Hettwer – 1. Vorsitzender Geo-Museum Zurholt e.V. Altenberge

48341 Altenberge, Lindenstraße 8

[www.geo-museum-zurholt.de](http://www.geo-museum-zurholt.de)

[info@geo-museum-zurholt.de](mailto:info@geo-museum-zurholt.de)

# Wer neugierig ist hat mehr Whaoo! im Leben



Abb.: Museumsarchiv