

Hochschule Neubrandenburg

University of Applied Sciences

Fachbereich Landschaftsarchitektur, Geoinformatik,
Geodäsie, Bauingenieurwesen

Studiengang Bauingenieurwesen

Bachelor Thesis

„Einsatz von Baustählen im Konstruktiven Ingenieurbau
der Gegenwart“

urn:nbn:de:gbv:519-thesis 2009 – 0024 - 1

Erstprüfer: Prof. Dr. Ing. Hans- Ulrich Hoch

Zweitprüfer: Prof. Dr. Ing. Guido Bolle

vorgelegt von
Christof Hausmann

Neubrandenburg, den 11.05.2009

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen.....	5
Formelzeichen.....	6
Tabellenverzeichnis.....	7
Abbildungsverzeichnis.....	12
1. Einleitung.....	18
2. Stahlerzeugung heute.....	19
2.1 Ausgangsstoffe für die Eisen- und Stahlerzeugung.....	19
2.1.1 Eisenerze.....	19
2.1.2 Stahlschrott.....	19
2.1.3 Reduktionsmittel.....	20
2.1.4 Zuschläge.....	20
2.1.5 Feuerfeststoffe.....	21
2.2 Reduktion der Eisenerze zum Roheisen.....	21
2.2.1 Der Hochofenprozess.....	22
2.2.2 Die Verfahren der Direktreduktion.....	26
2.3 Erzeugung des Rohstahls.....	28
2.3.1 Das Sauerstoffblasverfahren.....	30
2.3.1.1 Das Sauerstoffaufblasverfahren.....	31
2.3.1.2 Das Sauerstoffbodenblasverfahren.....	32
2.3.1.3 Das kombinierte Blasverfahren.....	32
2.3.2 Das Elektrostahlverfahren.....	32
2.3.2.1 Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen.....	33
2.3.2.2 Stahlerzeugung im Induktionsofen.....	34
2.3.3 Das Siemens- Martin- Verfahren.....	35

2.4 Die Sekundärmetallurgie.....	35
2.4.1 Ausgewählte Verfahren der Sekundärmetallurgie.....	36
2.4.1.1 Die Desoxidation.....	36
2.4.1.2 Die Entschwefelung.....	36
2.4.1.3 Entkohlung.....	36
2.4.1.4 Entphosphorung.....	37
2.4.1.5 Stickstoffentfernung.....	37
2.4.1.6 Entfernung von Begleitelementen.....	37
2.4.2 Die Vakuumbehandlung.....	37
2.4.3 Die Sonderfrischverfahren.....	38
2.4.4 Das Sonderschmelzverfahren.....	38
2.5 Das Vergießen von Stahl.....	39
2.5.1 Stranggussverfahren.....	40
2.5.1.1 Das konventionelle Verfahren.....	40
2.5.1.2 Vergießen von Flachprodukten.....	41
2.5.2 Das Blockgussverfahren.....	42
2.6 Formgebungstechniken.....	43
2.6.1 Der Walzprozess.....	43
2.6.2 Walzerzeugnisse.....	44
2.6.3 Das konventionelle Warmwalzen.....	46
2.6.4 Die thermomechanische Behandlung von Stahl.....	47
2.6.4.1 Warmwalzen mit anschließendem Normalglühen.....	47
2.6.4.2 Normalisierendes Walzen.....	48
2.6.4.3 Thermomechanisches Walzen.....	48
2.6.4.4 Das Beschleunigte Abkühlen.....	49
2.6.4.5 Das Vergüten von Stahl.....	49
2.6.5 Das Kaltumformen von Stahl.....	50
2.6.5.1 Das Kaltwalzen.....	51
2.6.5.2 Das Kaltziehen.....	52

3. Stahlsorten.....	53
3.1 Stahlsorten nach DIN EN 10020.....	53
3.1.1 Unlegierte Stähle.....	53
3.1.1.1 Unlegierte Qualitätsstähle.....	54
3.1.1.2 Unlegierte Edelstähle.....	54
3.1.2 Nichtrostende Stähle.....	55
3.1.3 Andere legierte Stähle.....	56
3.1.3.1 Legierte Qualitätsstähle.....	57
3.1.3.2 Legierte Edelstähle.....	58
3.2 Baustähle nach DIN EN 10025.....	58
3.2.1 Allgemeine Beschreibung - DIN EN 10025-1.....	59
3.2.2 Allgemeine, unlegierte Baustähle – DIN EN 10025-2.....	60
3.2.3 Normalisierte/normalisierend gewalzte Feinkornbaustähle – DIN EN 10025-3.....	65
3.2.4 Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle – DIN EN 10025-4.....	69
3.2.5 Wetterfeste Baustähle – DIN EN 10025-5.....	75
3.2.6 Hochfeste, wasservergütete Baustähle – DIN EN 10025-6.....	79
3.3 Bezeichnung der Stähle nach DIN EN 10027.....	88
3.3.1 Bezeichnung der Stähle nach DIN EN 10027-1.....	88
3.3.2 Bezeichnung der Stähle nach DIN EN 10027-2.....	89
4. Offshore- Windenergieanlagen.....	90
4.1 Umgebungsbedingungen und Belastungen „off shore“.....	90
4.2 Die Konstruktion einer Offshore- Windenergieanlage.....	92
4.3 Schlussbemerkungen.....	95



5. Schlusswort.....	96
6. Literatur.....	97
7. Eidesstattliche Erklärung der Selbstständigkeit.....	101

Abkürzungsverzeichnis

- ACC.....Accelerated Cooling (Beschleunigtes Abkühlen)
- AR.....as rolled (Lieferzustand für Stahl)
- CET.....Kohlenstoffäquivalent zur Beurteilung der
Kaltrissanfälligkeit eines Stahls
- CEV..... Kohlenstoffäquivalent zur Beurteilung der
Schweißbeignung eines Stahls
- DQ.....Direct Quenching (Direktes Abschrecken)
- DRI.....Direct Reduced Iron
- ESU- Verfahren.....Elektro- Schlacke- Umschmelz-Verfahren
- FF.....vollberuhigt vergossen
- FN.....einfach beruhigt vergossen
- FU.....unberuhigt vergossen
- Gew-%.....Gewichtsprozent
- HBI.....High Briquetted Iron
- IWW.....International Institute of Welding
- M.....thermomechanisch gewalzt
(Lieferzustand für Stahl)
- N.....normalisiert/normalisierend gewalzt
(Lieferzustand für Stahl)
- NORSOK.....Norwegische Norm
- OBM.....Oxygen- Bottom- Maxhütte
- OWEA.....Offshore- Windenergieanlage
- P.....Kurzzeichen für wetterfesten Baustahl mit
erhöhtem Phosphorgehalt
- Pcm..... Kohlenstoffäquivalent zur Berechnung der
Vorwärmtemperatur beim Schweißen
- Q.....quenched (abgeschreckt)

-
- QST.....Quenching and Self Tempering
(Abschrecken und Selbstanlassen)
 - SEW.....Stahleisenwerkstoffblatt
 - TM.....thermomechanisch gewalzt/behandelt
 - W.....wetterfest (Lieferzustand für Stahl)

Formelzeichen

- A.....Bruchdehnung
- KV.....Kerbschlagarbeit
- R_{eh}Streckgrenze
- R_mZugfestigkeit
- Z.....Brucheinschnürung

Tabellenverzeichnis

- [T1] *Stoffbilanz Roheisenerzeugung* nach
Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Degner, Bartos u.a.: Stahlfibel.
Düsseldorf 2007, S.39
- [T2] *Industriell genutzte Verfahren zur Direktreduktion von Eisenerzen*
(Stand: Januar 2007) nach
Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Degner, Bartos u.a.: Stahlfibel.
Düsseldorf 2007, S.41
- [T3] *Vergleich zwischen Roheisen und DRI* nach
Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Degner, Bartos u.a.: Stahlfibel.
Düsseldorf 2007, S.52
- [T4] *Verfahrensrichtungen des Vergießens von Flachprodukten und*
erzielbare Gießdicken nach
Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Degner, Bartos u.a.: Stahlfibel.
Düsseldorf 2007, S.83
- [T5] *Grenzwerte zwischen unlegierten und legierten Stählen*
(Schmelzenanalyse) nach
Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik.
URL: http://www.viewegteubner.de/freebook/978-3-8348-0295-8_I.pdf,
S.107
- [T6] *Mindestwerte der Kerbschlagarbeit bei einer Versuchstemperatur*
von –50 °C bei unlegierten Edelstählen DIN EN 10020 nach
Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik.
URL: http://www.viewegteubner.de/freebook/978-3-8348-0295-8_I.pdf,
S.108

-
- [T7] *Anteil einiger Legierungselemente in nichtrostendem Stahl* nach Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik.
URL: http://www.viewegteubner.de/freebook/978-3-8348-0295-8_I.pdf, S.108
- [T8] *Mindestwerte der Kerbschlagarbeit bei einer Versuchstemperatur von –50 °C bei legierten Qualitätsstählen D IN EN 10020* nach Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik.
URL: http://www.viewegteubner.de/freebook/978-3-8348-0295-8_I.pdf, S.108
- [T9] *Grenze der chemischen Zusammensetzung zwischen Qualitätsstählen und Edelstählen bei schweißgeeigneten legierten Feinkornbaustählen* nach Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik.
URL: http://www.viewegteubner.de/freebook/978-3-8348-0295-8_I.pdf, S.108
- [T10] *Gegenüberstellung des „alten“ und „neuen“ Normensystems für im Stahlbau verwendete Stahlsorten* nach Technikerkreis Grobblech. Werner, Frank: Erläuterungen der Änderungen in der neuen überarbeiteten DIN EN 10025 Teil 1-6 Für warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen im Bereich Grobblech.
URL: http://www.stahl-online.de/stahl_zentrum/VorwortErlaeuterungenEN10025-0405.pdf, S.2
- [T11] *Warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen, DIN EN 10025-2, mechanische Eigenschaften, garantierte Mindestwerte* nach Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik.
URL: http://www.viewegteubner.de/freebook/978-3-8348-0295-8_I.pdf, S.112
-

-
- [T12] *Kurzzeichen für Sprödbrechtsicherheit, Werte gültig für Spitzkerblängsproben und Dickenbereich nach*
Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik.
URL: http://www.viewegteubner.de/freebook/978-3-8348-0295-8_l.pdf, S.112
- [T13] *Schmelzanalysewerte einiger unlegierter Baustähle aus DIN EN 10025-2 nach*
Reuter, Manfred: Werkstoffkunde.
URL: http://www.mp.haw-hamburg.de/pers_mp/rtr-w11c.pdf, S.3.
- [T14] *Vergleich der schweißgeeigneten Feinkornbaustähle DIN EN 10025-3/4 und DIN EN 10028-4/5 nach*
Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik.
URL: http://www.viewegteubner.de/freebook/978-3-8348-0295-8_l.pdf, S.114
- [T15] *Schmelzanalyse einiger hochfester Feinkornbaustähle in Gewichtsprozent, DIN EN 10025-3 nach*
Reuter, Manfred: Werkstoffkunde.
URL: http://www.mp.haw-hamburg.de/pers_mp/rtr-w11c.pdf, S.5
- [T16] *Streckgrenze und Zugfestigkeit thermomechanisch gewalzter Feinkornbaustähle in Abhängigkeit von der Erzeugnisdicke, DIN EN 10025-4 nach*
Kuhlmann, Ulrike: Stahlbaukalender 2007. Berlin 2007. S.277
- [T17] *Typische Schmelzanalyse eines S460ML in Vergleich zu einem Normalisierten S460NL (Blechdicke: 50 mm) nach*
Kuhlmann, Ulrike: Stahlbaukalender 2007. Berlin 2007. S.278
-

-
- [T18] *Eigenschaften wetterfester Baustähle, $d \leq 16 \text{ mm}$, DIN EN 10025-5 nach*
Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V.: Wetterfester Baustahl. Know.how für Konstruktion und Montage. URL: http://www.beratung-hallenbau.de/fileadmin/werthyp/Fassade/Wetterfester_Baustahl.pdf, S.5
- [T19] *Legierungsgehalte einiger wetterfester Baustähle DIN EN 10025-5 nach*
Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V.: Wetterfester Baustahl. Know.how für Konstruktion und Montage. URL: http://www.beratung-hallenbau.de/fileadmin/werthyp/Fassade/Wetterfester_Baustahl.pdf, S.4
- [T20] *Mechanische Eigenschaften hochfester, wasservergüteter Feinkornbaustähle, $3 \text{ mm} \leq d \leq 50 \text{ mm}$, DIN EN 10025-6 nach*
Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik.
URL: http://www.viewegteubner.de/freebook/978-3-8348-0295-8_I.pdf, S.115
- [21] *Chemische Zusammensetzung des Stahls S690QL1 im Vergleich zu anderen im Stahlbau üblichen Sorten (60 mm Erzeugnisdicke) nach*
Kuhlmann, Ulrike: Stahlbaukalender 2007. Berlin 2007. S.287
- [22] *Minimale und Maximale Abkühlzeiten beim Schweißen für verschiedene wasservergütete Feinkornbaustähle nach*
Kuhlmann, Ulrike: Stahlbaukalender 2007. Berlin 2007. S.288
-

[23] *Einige Stähle und die dazugehörigen Werkstoffnummern DIN EN 10027-2 nach*

Goris, Alfons: Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Neuwied 2006. S. 8.145 ff.

Abbildungsverzeichnis

- [B1] *Sinteranlage und Hochofen 1 in Duisburg-Schwegeln* nach
URL: www.revierpanorama.de/assets/images/Alsum_04.jpg
[Download März 2009]
- [B2] *Aufbau und Reaktionen eines Hochofens* nach
Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Degner, Bartos u.a.: Stahlfibel.
Düsseldorf 2007, S.36
- [B3] *DRI/HBI- Haupterzeuger 2006* nach
Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Degner, Bartos u.a.: Stahlfibel.
Düsseldorf 2007, S.41
- [B4] *Anteil der gängigen Verfahren an der Weltrohstahlproduktion 2006*
nach
Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Degner, Bartos u.a.: Stahlfibel.
Düsseldorf 2007, S.54
- [B5] *Sauerstoffaufblaskonverter (schematisch)* nach
Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Degner, Bartos u.a.: Stahlfibel.
Düsseldorf 2007, S.56
- [B6] *Elektrolichtbogenofen* nach
URL: http://www.concast.net/de/produkte_service/stahlerzeugung/elektrolichtbogenofen.html [Download März 2009]
- [B7] *Induktionstiegelofen* nach
URL: <http://www.computerbase.de/lexikon/Induktionsofen>
[Download März 2009]

-
- [B8] *Verteilung der Vergussarten von Stahl 2006* nach
Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Degner, Bartos u.a.: Stahlfibel.
Düsseldorf 2007, S.78
- [B9] *Schema einer konventionellen Stranggussanlage* nach
URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Stranggie%C3%9Fen>
[Download März 2009]
- [B10] *Konventionelle Stranggussanlage* nach
URL: <http://www.lase.de/messanlagen/stahlindustrie/brammenhandling/positionsautomatbrennschneid/de.html>
[Download April 2009]
- [B11] *Warmwalzstraße von Thyssen in Duisburg* nach
URL: <http://www.industriefoto-geisselbrecht.de/referenzen.html>
[Download März 2009]
- [B12] *Walzstahlerzeugnisse* nach
Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Degner, Bartos u.a.: Stahlfibel.
Düsseldorf 2007, S.99
- [B13] *Walz- und Wärmebehandlungsverfahren* nach
Thiemel, K.-Ch.: Werkstoffe I. Chemie und Eigenschaften metallischer
Werkstoffe. URL: www.unibw.de/bauv3/lehre/skripten/chemieundeigenschaftenmetallischerwerkstoffe2008.pdf – , S.35
[Download März 2009]
- [B14] *Schema einer modernen Kaltwalzstraße* nach
URL: http://www.flir.at/cms_data/Downloads/RAYTEK/Stahlindustrie%20-%20Anwendungsbeschreibung_nbn.pdf, S.3
[Download April 2009]
-

-
- [B15] *Beispiel Stahlhalle mit Kranbahn 72m lang, 11m hoch, 20m breit, Stahlhandel Burg (1995) nach*
URL: http://www.ib-lindigkeit.de/pagelD_904262.html
[Download April 2009]
- [B16] *Schleuse / Staustufe Riedenburg - Unterhaupt -Schleusentore, (April 2008) nach*
URL: http://www.hansgruener.de/docs_d/kanal/riedenburg_schleuse.htm [Download April 2009]
- [B17] *Festigkeits- und Verformungsverhalten von Stahl in Abhängigkeit vom C-Gehalt nach*
Thiemel, K.-Ch.: Werkstoffe I. Chemie und Eigenschaften metallischer Werkstoffe. URL: www.unibw.de/bauv3/lehre/skripten/chemieundeigenschaftenmetallischerwerkstoffe2008.pdf – , S.45
[Download März 2009]
- [B18] *Schematische Darstellung der Hall- Petch- Beziehung nach*
URL: <http://public.tfh-berlin.de/~schaller/Scha-WT-Verfestigung.pdf>, S.3 [Download März 2009]
- [B19] *Vergleich der Vorwärmtemperaturen eines S460N und S460M (DI-MC 460) für verschiedene Wasserstoffeinbringungen HD nach*
Schröter, F.: Höherfeste Stähle für den Stahlbau. Auswahl und Anwendung. URL: https://www.dillinger.de/imperia/md/content/dillinger/publikationen/stahlbau/technischeliteratur/dh_hoeherfeste_staehle_fuer_den_stahlbau.pdf, S.5 [Download April 2009].
- [B20] *Commerzbank Tower in Frankfurt am Main nach*
URL: <http://www.cityforum-profrankfurt.de/frankfurttypisch/skyline/>
[Download April 2009]

-
- [B21] *Skelettkonstruktion des Commerzbank Towers* nach
Schröter, Falko/Hubo, Ralf: Stähle für den Stahlbau. Auswahl und
Anwendung in der Praxis. URL: [https://www.dillinger.de/imperia/md/
content/dillinger/publikationen/stahlbau/technischeliteratur/dh_st_
hle_f_r_den_stahlbau_auswahl_und_anwendung_in_der_praxis.pdf](https://www.dillinger.de/imperia/md/content/dillinger/publikationen/stahlbau/technischeliteratur/dh_st_hle_f_r_den_stahlbau_auswahl_und_anwendung_in_der_praxis.pdf),
S.33 [Download April 2009]
- [B22] *Öresund- Viadukt, Hauptbrücke* nach
Öresundbro Konsortiet: Die Brücke.
URL: <http://osb.oeresundsbron.dk/documents/document.php?obj=581>
[Download April 2009]
- [B23] *Sperrwerk Maeslant- Kering* nach
Zimmermann, Claus: Große Wasserbauexkursion. Antwerpen-
Rotterdam- London. URL [www.fi.uni-hannover.de/~material/lehre/
exkursionen/Programm_Wasserbauexkursion_2005.pdf](http://www.fi.uni-hannover.de/~material/lehre/exkursionen/Programm_Wasserbauexkursion_2005.pdf) –, S.46
[Download April 2009]
- [B24] *Prinzipdarstellung des Abrostungsverhaltens unlegierter und
wetterfester Baustähle* nach
Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete
Fassaden e.V.: Wetterfester Baustahl. Know.how für Konstruktion und
Montage. URL: [http://www.beratung-hallenbau.de/fileadmin/werthyp/
Fassade/Wetterfester_Baustahl.pdf](http://www.beratung-hallenbau.de/fileadmin/werthyp/Fassade/Wetterfester_Baustahl.pdf), S.5 [Download April 2009]
- [B25] *Archäologisches Museum Kalkriese, nördlich von Osnabrück* nach
[http://www.stahl-info.de/schriftenverzeichnis/pdfs/MB434
_Wetterfester_Baustahl.pdf](http://www.stahl-info.de/schriftenverzeichnis/pdfs/MB434_Wetterfester_Baustahl.pdf), S.15 [Download April 2009].

[B26] *Fußgänger- und Radfahrerbrücke über den Seerhein in Konstanz*
nach

URL: http://www.stahl-info.de/schriftenverzeichnis/pdfs/MB434_Wetterfester_Baustahl.pdf, S.24 [Download April 2009]

[B27] *Entwicklung der höherfesten Stahlsorten in den letzten Jahren*

nach

Thiemel, K.-Ch.: Werkstoffe I. Chemie und Eigenschaften metallischer Werkstoffe. URL: <http://www.unibw.de/bauv3/lehre/skripten/chemieundeigenschaftenmetallischerwerkstoffe2008.pdf> – , S.44 [Download März 2009]

[B28] *Mobilkran LTM 1400/1 von Liebherr* nach

URL: <http://www.dillinger.de/dh/referenzen/baumaschinen/01141/index.shtml.de> [Download April 2009].

[B29] *Forumüberdachung des Sony- Center* nach

Schröter, Falko: Höherfeste Stähle für den Stahlbau. Auswahl und Anwendung. URL: https://www.dillinger.de/imperia/md/content/dillinger/publikationen/stahlbau/technischeliteratur/dh_hoeherfeste_staehle_fuer_den_stahlbau.pdf, S.7 [Download April 2009]

[B30] *Viadukt von Millau* nach

URL: <http://www.vistra.com/images/library/images/Bridge.jpg> [Download April 2009]

-
- [B31] *Stützen mit Übergang der Brücke GVZ Ingolstadt nach*
Schröter, Falko: Höherfeste Stähle für den Stahlbau. Auswahl und
Anwendung. URL: https://www.dillinger.de/imperia/md/content/dillinger/publikationen/stahlbau/technischeliteratur/dh_hoeherfeste_staehe_fuer_den_stahlbau.pdf, S.8 [Download April 2009]
- [B32] *Haupt- und Zusatzbezeichnung der Stähle in Europa, DIN EN 10027-1 nach*
Goris, Alfons: Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Neuwied 2006. S.8.139
- [B33] *Standorte europäischer Offshore- Windparks nach*
URL: http://www.offshore-wind.de/page/fileadmin/offshore/documents/F_E/Technologie/Zusammenfassung_der_Fallstudie_Europaeische_Offshore-Windparks.pdf [Download Mai 2009].
- [B34] *Tragstrukturen für OWEA, schematisch, nach*
URL: <http://www.offshore-wind.de/page/index.php?id=10236>
[Download Mai 2009]
- [B35] *OWEA „REpower 5M“ mit Jacket-Tragstruktur nach*
URL: <http://www.ifb.uni-stuttgart.de/index.php/forschung/windenergie/offshore> [Download Mai 2009]

1. Einleitung

Im weitesten Sinne beginnt die Geschichte des Stahls vor über 5000 Jahren, als Ägypter zum ersten Mal eisenhaltiges Meteoritengestein verarbeiten.

Die Wurzeln der Erzeugung von Stahl aus Eisenerz und seine gezielte Verarbeitung durch Schmieden liegen im Nahen Osten. Um etwa 1400 v. Chr. gelingt es Menschen im östlichen Mittelmeerraum erstmals Eisenerz zu verhütten. In Europa entdecken die Kelten erst 600 Jahre später die ersten Eisenerzvorkommen im heutigen Österreich. Sie bauen es ebenfalls ab, härten und verarbeiten es zu Waffen, Werkzeugen oder Schmuck.

Im Nachhinein betrachtet ist offensichtlich, dass spätestens von diesem Zeitpunkt an der unaufhaltsame Siegeszug des Werkstoffs Stahl beginnt. In den folgenden Jahrhunderten werden immer neue, effizientere Verfahren der Stahlerzeugung entwickelt. Diese ermöglichen es, bessere Eigenschaften gezielt einzustellen und ebnen dem Stahl den Weg in immer mehr Bereiche des Lebens. Ein enormer Schub für die Entwicklung des Werkstoffs Stahl in technologischer und wirtschaftlicher Hinsicht ist zu Beginn und im Laufe des 19. Jahrhunderts zu verzeichnen. Die treibende Kraft ist die Industrielle Revolution, die das Jahrhundert mit ihren Veränderungen unvergleichlich prägt. Stahl wird durch die großindustrielle Erzeugung zur Massenware, die Stahlindustrie bietet mehr und mehr Menschen einen Arbeitsplatz und der Werkstoff wird vielseitig verwendet, unter anderem zum Ausbau der Eisenbahninfrastruktur oder auch im Bauwesen – ein Trend, der bis heute anhält.

Die nachfolgenden Ausführungen beschäftigen sich mit dem Einsatz von Baustählen im Konstruktiven Ingenieurbau der Gegenwart. Es werden die aktuellen Verfahren der Stahlerzeugung erläutert und ein Überblick über die Stahlsorten sowie die Systematik ihrer Bezeichnung gegeben. Abschließend wird der Einsatz von Stählen in Offshore- Windenergieanlagen erläutert.

2. Stahlerzeugung heute

2.1 Ausgangsstoffe für die Eisen- und Stahlerzeugung

2.1.1 Eisenerze

Eisenerz ist die chemische Verbindung aus den Elementen Eisen, Sauerstoff und mineralogischen Verunreinigungen, der sogenannten Gangart, wie Kalk, Kieselsäure, Mangan, Phosphaten oder Natrium. Diese Bestandteile sind in unterschiedlichem Maße enthalten, weshalb im Wesentlichen zwischen den folgenden Eisensorten unterschieden wird:

- Magnetit
- Hämatit
- Limonit
- Siderit

Ihre Qualität und Tauglichkeit für die Roheisenerzeugung wird unter anderem beurteilt nach ihrem Eisengehalt, ihrer Reduzierbarkeit, Menge und Art der Verunreinigungen und den Kosten für ihre Förderung.

Dort wo Eisenerze als abbauwürdig erachtet werden, werden sie im Tagebeziehungsweise im Untertagebau gewonnen.

2.1.2 Stahlschrott

Die Stahlherstellung aus Stahlschrott macht sich die hervorragende Recyclingfähigkeit des Werkstoffes Stahl zu Nutze. Heute werden weltweit etwa 34 % des Rohstahls aus Stahlschrott erzeugt.¹ Sein Einsatz schont nicht nur Erz- und Kohleressourcen, sondern spart darüber hinaus

¹ Verband Deutscher Eisenhüttenleute 2007, S.24

den Einsatz von Energie und reduziert dementsprechend die Kohlenstoffdioxidemission. Damit wird diese Möglichkeit der Rohstahlerzeugung der Forderung nach Nachhaltigkeit gerecht.

Stahlschrott fällt als Kreislaufschrrott bei der Rohstahlerzeugung und beim Walzprozess, in der Stahlverarbeitung als Neuschrott sowie als Alt- oder Sammelschrott an. Im Gegensatz zum Kreislauf- und Neuschrott wird der Altschrott weniger gern verwendet, da er vor der Verarbeitung durch spezielle Aufbereitungsverfahren getrennt und von Verunreinigungen befreit werden muss.

2.1.3 Reduktionsmittel

Zur Verarbeitung der Eisenerze im Hochofen zu Roheisen sind Reduktionsmittel nötig. Dafür wird in erster Linie Koks eingesetzt, der teilweise sinnvoll durch Kohle, Öl oder Gas ersetzt werden kann.

Bei der exothermen Reaktion der Reduktionsmittel mit dem Sauerstoff des in den Hochofen geblasenen Heißwindes entsteht Wärme, die zur Reduktion der Eisenerze notwendig ist.

2.1.4 Zuschläge

Um Gangartbestandteile mit hohen Schmelztemperaturen wie Silizium, Aluminium oder Phosphor aufzuschmelzen und so in der flüssigen Schlacke zu binden, werden neben Erzen und Reduktionsmitteln Zuschläge für die Roheisenerzeugung eingesetzt. Die wichtigsten Zuschlagmittel sind die Kalkarten Kalkhydrat, Olivin und Dolomit sowie die Mineralien Bauxit und Quarz. Die Art und Menge der Zuschläge hängt von der Zusammensetzung der Erze ab und wird jeweils in den Hüttenwerken eingestellt.

2.1.5 Feuerfeststoffe

Die Eisen- und Stahlerzeugung erfolgt bei Temperaturen bis zu 2500 °C in metallurgischen Reaktionsgefäßen wie dem Hochofen. Diese Temperaturen stellen hohe Anforderungen an die Auskleidung der Reaktoren in Bezug auf Temperatur- und mechanische Beanspruchung.

Außerdem muss gewährleistet sein, dass die Auskleidung Reaktionen bei der Eisen- und Stahlschmelze nicht beeinflusst. Aus diesen Gründen kommen nur monolithische Erzeugnisse aus Werkstoffen wie Silika, Schamott, Mullit, Magnesit, Chrom oder Kohlenstoff für die Auskleidung der Reaktionsgefäße in Frage.

2.2 Reduktion der Eisenerze zum Roheisen

Die Herstellung von Roheisen ist der erste Schritt in dem komplexen Verfahren der Erzeugung des Rohstahls und chemisch gesehen eine Reduktionsreaktion. Dabei wird Sauerstoff, der im unbehandelten Eisenerz enthalten ist, reduziert, um möglichst reines Roheisen zu gewinnen.

Diesem Prozess läuft eine Vorbehandlung der Roherze voraus, die sich in zwei Verfahren aufteilt. Als erstes wird das geförderte Roherz aufbereitet, das heißt es wird unter anderem auf Trennschnecken oder mittels Magnetabscheidern so gut wie möglich von der Gangart isoliert. Danach wird das aufbereitete Erz durch Brechen, Mahlen und Sieben zerkleinert, sodass es im Anschluss zu Pellets geformt oder in Sinteranlagen stückig gemacht werden kann. Diese Vorbereitung ist notwendig, um homogene Eigenschaften der Roherze für die Roheisenerzeugung zu gewährleisten.

Ist das Roherz fertig vorbehandelt, können die eigentlichen Verfahren der Roheisenerzeugung beginnen, welche im Folgenden beschrieben werden.

2.2.1 Der Hochofenprozess

Im Hochofen werden vorbehandelte Eisenerze zu Roheisen umgewandelt. Die Hochofenanlage an sich besteht aus verschiedenen Baugruppen. Der eigentliche Hochofen ist ein zylindrischer oder kegelförmiger, kontinuierlich arbeitender Stahlblechschachtofen, der feuerfest ausgekleidet und bis zu 35 m hoch ist. An dem oberen Teil dieses Schachtes sind Gichtgasabzugsrohre und eine schleusenähnliche Beschickungsanlage angeschlossen. Das bei der Roheisenerzeugung entstehende stickstoff-, kohlenmonoxid- und kohlendioxidhaltige Gichtgas wird über Rohrleitungen einem Reinigungssystem zugeführt und seine brennbaren Bestandteile im Winderhitzer wiederverwendet. Die Beschickungsanlage wird über Förderbänder laufend mit Einsatzstoffen versorgt.



Abb. 1: Sinteranlage und Hochofen 1 in Duisburg-Schwegeln nach [B1]

Ein Gestell bildet den unteren Teil des Hochofens. Hier sammeln sich das erzeugte Roheisen und die Schlacke. Diese Reduktionsprodukte können über Abstechlöcher entnommen werden. Im oberen Teil des Gestells sind bis zu 40 Gebläserohre angeordnet, die im Winderhitzer erwärmte Heißluft und Reduktionsgas in den Hochofen leiten. Der Winderhitzer ist ein 25 m bis 40 m hoher, stahlummantelter Zylinder, der Luft auf bis zu 1300 °C vorwärmt und als Heißwind mittels Turbogebläsen in den Vergasungsraum des Hochofens führt.

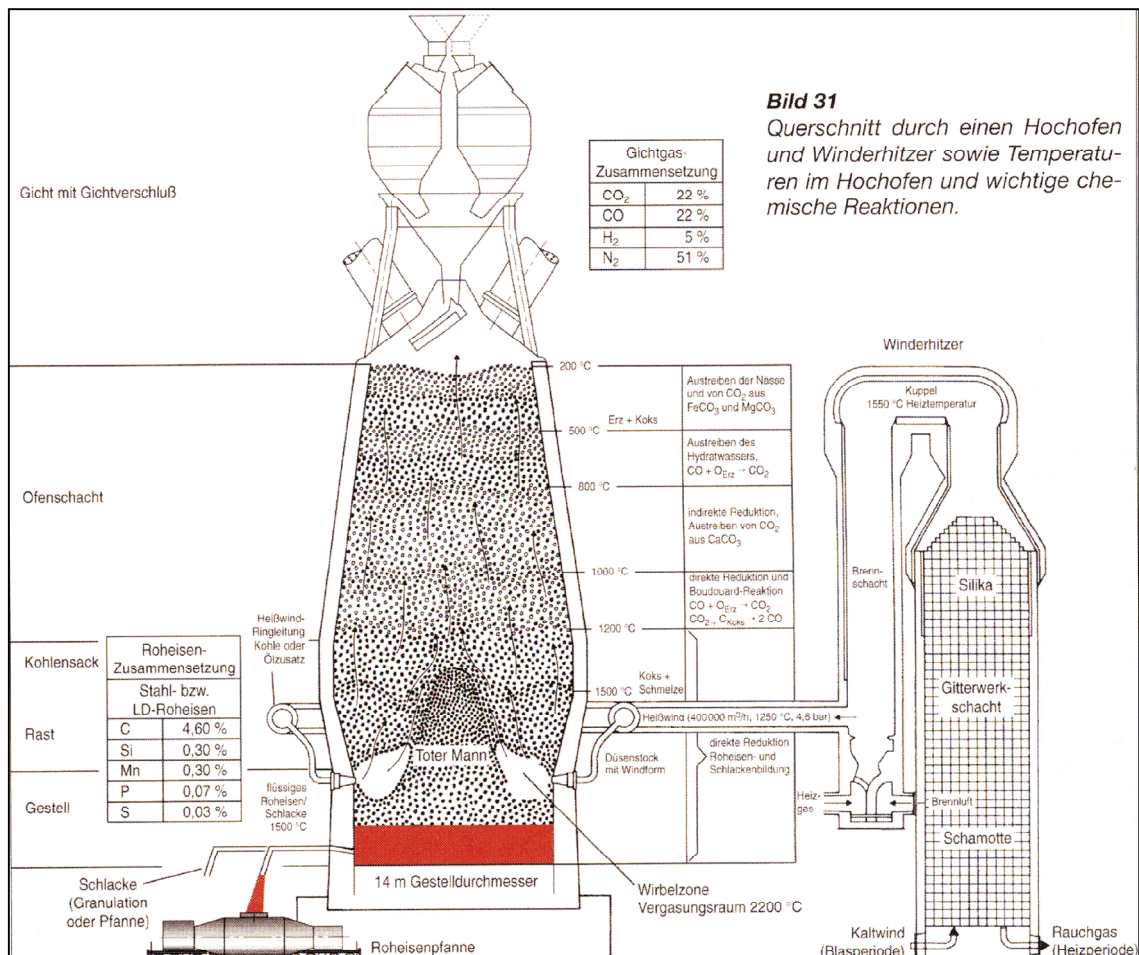


Abb. 2: Aufbau und Reaktionen eines Hochofens nach [B2]

Die Reaktionen im Hochofen sind äußerst komplex und kompliziert zu beschreiben. Vereinfacht betrachtet lässt sich feststellen, dass ein Hochofen nach dem Gegenstromprinzip arbeitet (vgl. Abb. 2).

Einen Strom bilden die während des Hochofenprozesses gebildeten Gase, die im Reaktor von unten nach oben wandern. Der Sauerstoff des Heißwindes, der im unteren Teil des Hochofengestells eingeblasen wird, reagiert mit dem Kohlenstoff des Kokses unter Bildung von Kohlenstoffdioxid. Bei Temperaturen von bis zu 2200 °C wird das eben gebildete, unbeständige Kohlenstoffdioxid sofort wieder durch den Kohlenstoff des Kokses reduziert zu Kohlenstoffmonoxid. Die exotherme Boudouard-Reaktion läuft ab. Parallel dazu, also „direkt“ zeitgleich, reduziert dieses Kohlenmonoxid das im Erz enthaltene Eisenoxid zu reinem Eisen und Kohlenstoffdioxid. Diese Reaktion wird als direkte Reduktion bezeichnet.

Weiter oben im Hochofen, bei Temperaturen unter 1000 °C, wird das Eisenoxid des Erzes indirekt durch Kohlenstoffmonoxid reduziert. Hier läuft keine Parallelreaktion ab, da das Kohlenstoffdioxid bei diesen Temperaturen beständig ist.

Im gegenläufigen Strom wandern die festen Einsatzstoffe, in ihrer Gesamtheit Möller genannt, kontinuierlich durch den Hochofen nach unten, wo sie aufgeschmolzen werden. Dieser Möller wird im oberen Teil des Hochofenreaktors bei Temperaturen von 200 °C bis 800 °C getrocknet, vorgewärmt und das Hydratwasser ausgetrieben. Die Schüttsäule sinkt weiter ab und wird erwärmt, bis sie im Temperaturbereich von 800 °C bis 1000 °C angekommen ist. In diesem Bereich wird das Eisenoxid aus dem Erz indirekt zu reinem Eisen reduziert. Weiter unten, im Temperaturbereich von 1000 °C bis 1200 °C, wird das Eisenoxid direkt reduziert. Die Schüttsäule sinkt weiter ab, bis bei Temperaturen von 1500 °C sämtliche Einsatzstoffe aufgeschmolzen sind. An dieser Stelle können nun die Schlacke, die oben schwimmt und unerwünschte Begleitelemente wie Magnesium oder Mangan enthält, sowie das flüssige Roheisen mit einem Kohlenstoffgehalt von 4 % bis 4,7 % abgestochen und weiterverarbeitet

werden.²

Wie in *Tabelle 1* verdeutlicht, lässt sich bilanzieren, dass für die Erzeugung einer Tonne Roheisen mehr als doppelt so viele Feststoffe in Form von Eisenerz, Zuschlägen, Koks und Kohle sowie 1000 m³ gasförmige Stoffe in Form von Heißwind und Sauerstoff eingesetzt werden müssen.

	Stoffbilanz für die Erzeugung von 1 Tonne Roheisen	Stoffbilanz für die Erzeugung von 12.000 Tonne Roheisen
zugeführt:		
Erz und Zuschläge	1,60 t	19.200 t
Koks	0,30 t	3.600 t
Kohle	0,18 t	2.160 t
Heißwind	900 m ³	10,8 Mio. m ³
Sauerstoff	100 m ³	1,2 Mio. m ³
abgeführt:		
Roheisen	1,00 t	12.000 t
Schlacke	0,26 t	120 t
Gichtgas	1400 m ³	16,8 Mio. m ³
Staub und Schlamm	0,01 t	12 t
Abluft	2000 – 3000 m ³	24 – 36 Mio. m ³
Kühlwasser	20 m ³	240.000 m ³

Tabelle 1: Stoffbilanz Roheisenerzeugung nach [T1]

Zum Vergleich: Die Erzeugungsleistung des größten Hochofens der Welt, der Hochofen 2 von Nippon Steel in Japan, beträgt 13.000 t täglich.³

² Verband Deutscher Eisenhüttenleute 2007, S.35 ff.

³ Verband Deutscher Eisenhüttenleute 2007, S.32

2.2.2 Die Verfahren der Direktreduktion

Direktreduktion ist die Erzeugung eines festen Eisenschwammes, dem sogenannten Direct Reduced Iron (DRI) oder High Briquetted Iron (HBI), aus Eisenerz, der meist im Elektrolichtbogenofen weiterverarbeitet wird.

Dieses Verfahren wurde zum Ende der 1950er Jahre als Alternative zur Hochofenroute entwickelt, wurde diesem Anspruch allerdings nie gerecht, da es einen hohen Einsatz an Energie erfordert und in späteren Jahren Schrott auf Grund seiner Nachhaltigkeit mehr und mehr an Bedeutung gewann.⁴

Führende DRI/HBI- Erzeugerländer waren im Jahre 2006 Indien, Venezuela, Iran und Mexiko (vgl. Abb. 3).

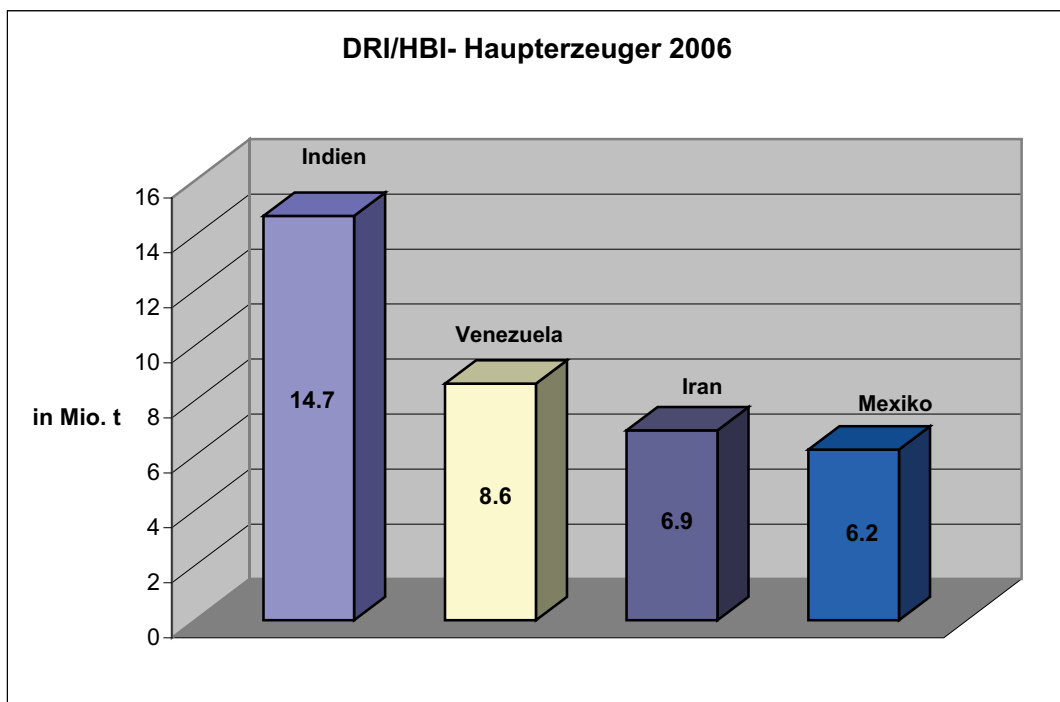


Abb. 3: DRI/HBI- Haupterzeuger 2006 nach [B3]

Die Direktreduktion unterscheidet zwei Verfahren (vgl. Tabelle 2). Beim Gasreduktionsverfahren wird Eisenerz in Form von Pellets oder als Feinerz,

⁴ Verband Deutscher Eisenhüttenleute 2007, S.40

je nach Verfahrensart mittels unterschiedlicher Reduktionsgase, Erdgas oder ein stark wasserstoffhaltiges Gasgemisch, unter Druck zu DRI reduziert. Die Direktreduktion erfolgt bei den Verfahren Midrex, Danarex und HyL III in einem Schachtofen, bei den veralteten Verfahren HyL I und HyL II dient eine Retorte als Reaktor. Das Finmet- und das Circoredverfahren nutzen einen Wirbelschichtreaktor.

Das zweite Verfahren, bei dem Eisenerz direkt zu Eisenschwamm reduziert wird, ist die Feststoffreduktion. Es wird je nach Reaktor zwischen dem Drehherd-, Drehrohr- oder dem Etagenofen- bzw. Primusverfahren unterschieden. Der Möller wird im Reaktor jeweils auf 1300 °C erhitzt, sodass noch keine Schmelze entsteht, aber dennoch eine Reaktion der stückartigen oder pelletförmigen Einsatzstoffe erfolgt. Als Reduktionsmittel dienen, wie beim Hochofenprozess auch, Koks und Kohle.

Gasreduktion	Feststoffreduktion
Schachtofen: Midrex HyL III Danarex	Drehrohr: SL/RN
Retorte: HyL I HyL II	Drehherd: Inmetco Fastmet
Wirbelschicht: Finmet Circored	Etagenofen: Primus

*Tabelle 2: Industriell genutzte Verfahren zur Direktreduktion von Eisenerzen
(Stand: Januar 2007) nach [T2]*

2.2.3 Die Schmelzreduktion

Bei der Schmelzreduktion werden Eisenerze reduziert, ohne dabei Koks als

Reduktionsmittel zu nutzen. Die bisherigen Entwicklungen zur Schmelzreduktion können unterschieden werden nach Verfahren mit Einschmelzvergaser oder Einschmelzreaktor.

Die Reduktion mittels Einschmelzvergaser läuft zweistufig ab. Im ersten Schritt wird pelletförmiges Eisenerz zu DRI vorreduziert. Der zweite Schritt besteht darin, im Vergaser Reduktionsgas aus Kohle und Sauerstoff zu erzeugen und alle Einsatzstoffe zu schmelzen, um so flüssiges Roheisen und Schlacke zu erzeugen. Heute kommen in der Industrie hierfür das Corex- und das Finex- Verfahren zum Einsatz.

Im Eisenbadrektorprozess werden pelletförmiges Erz beziehungsweise Feinerze, die vorreduziert und auf 700 °C vorgewärmt sind, sowie Kohle und Zuschläge über Lanzen in ein Bad aus flüssigem Eisen eingegeben. Über eine weitere Lanze wird Heißwind eingeblasen, sodass die Erze im Eisenbad schnell reduziert und aufgeschmolzen werden. Roheisen und Schlacke sind danach abzustechen. Ein gängiges, industriell genutztes Verfahren ist das Hismelt- Verfahren.

2.3 Erzeugung des Rohstahls

Die Erzeugnisse der bisher beschriebenen Verfahrensrouten sind das flüssige Roheisen, das zu 100 % reduziert wurde und einen Kohlenstoffgehalt von 4,0 % bis 4,7 % aufweist, sowie das Direct Reduced Iron (DRI) mit einem Reduktionsgrad von 80 % bis maximal 97 % und einem Kohlenstoffgehalt von 1 % bis 2 % (vgl. *Tabelle 3*). Das heißt, die unerwünschte Gangart wurde, anders als beim Roheisen, noch nicht abgeschieden.

Das flüssige Roheisen und das DRI werden weiter in Stahlwerke transportiert, wo sie als Rohstoff für die Stahlerzeugung dienen und spezielle Eigenschaften eingestellt werden. Als weiterer Ausgangsstoff für die Stahlerzeugung kommt an dieser Stelle Stahlschrott hinzu, weitere Einsatzstoffe sind Zuschläge wie Kalk, Bauxit, Flussspat und Legierungszusätze.

	Roheisen	Direct Reduced Iron
Zustand	flüssig	fest
Kohlenstoffgehalt	4,0 bis 4,7 %	1,0 bis 2,0 %
Reduktionsgrad	100 %	80 bis 97 %
Verbleib der Gangart	Schlacke	Eisenschwamm

Tabelle 3: Vergleich zwischen Roheisen und DRI nach [T3]

In der Stahlindustrie wird die Umwandlung von Roheisen zu Rohstahl als Frischen bezeichnet. Dabei werden unter anderem ein bestimmter Kohlenstoffgehalt sowie eine vorgegebene Legierungszusammensetzung eingestellt und unerwünschte Gangarten entfernt.

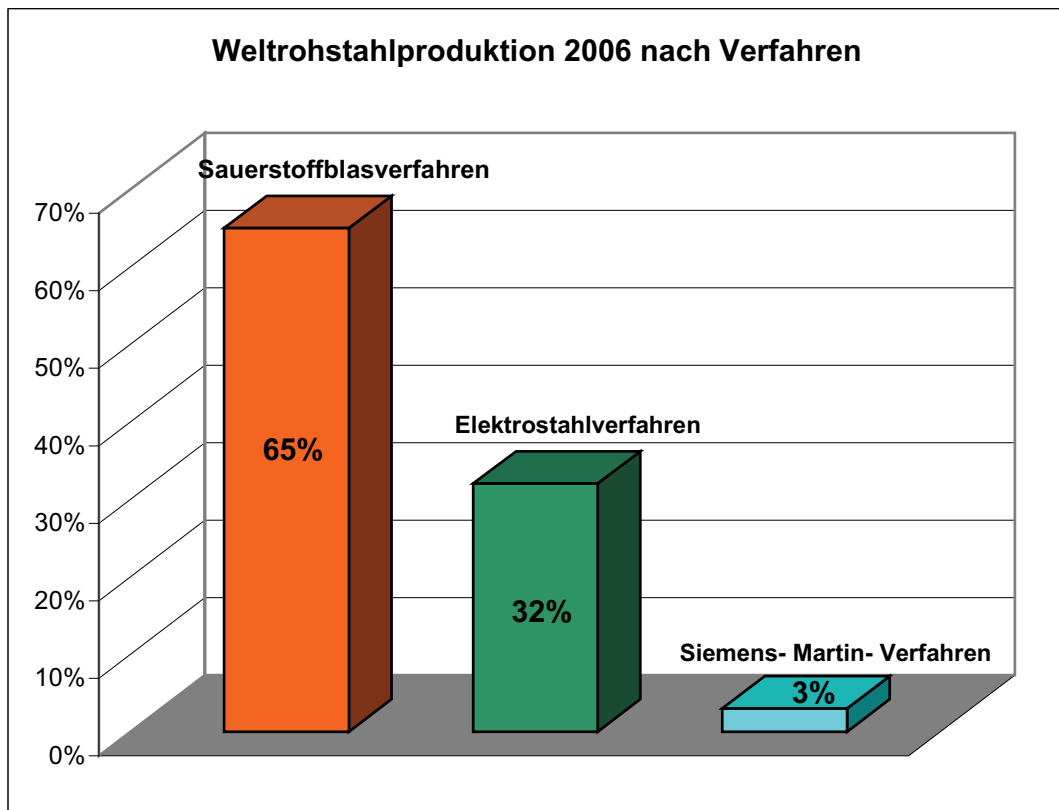


Abb. 4: Anteil der gängigen Verfahren an der Weltrohstahlproduktion 2006 nach [B4]

Im Folgenden werden die heute aktuellen Verfahrensrouten des Frischens, das Sauerstoffblasverfahren und das Elektrostahlverfahren sowie das veraltete Siemens- Martin-Verfahren, beschrieben. *Abb. 4* zeigt, welchen Anteil jedes Verfahren an der Weltrohstahlproduktion hat.

2.3.1 Das Sauerstoffblasverfahren

Die Grundidee des Sauerstoffblasverfahrens ist das Verbrennen der Roheisenbegleiter mit Hilfe von reinem Sauerstoff. Dies geschieht in einem kippbaren Konverter, der feuerfest ausgekleidet ist und je nach Anlagengröße ein Fassungsvermögen von 50 t bis 400 t hat.

Die Verwendung von reinem Sauerstoff beschleunigt die Frischreaktion, welche etwa 10 bis 20 Minuten dauert, macht sie äußerst wirtschaftlich, führt aber auch zu einer enormen Wärmeentwicklung. Um die Temperaturen der Stahlschmelze von bis zu 3000 °C zu senken, wird Stahlschrott als Kühlmittel zugegeben.

Der reine Sauerstoff wird beim Sauerstoffblasverfahren mit einem Druck von bis zu 12 bar auf das Metallbad geblasen. Dabei oxidiert Eisen zu Eisenoxid und Kohlenstoff zu Kohlenstoffmonoxid. Das Eisenoxid gibt den Sauerstoff sofort an die Eisenbegleiter ab, sodass Schlacke entsteht. Mit zunehmender Blasdauer nehmen die Gehalte der Begleiter, also Kohlenstoff, Phosphor, Mangan, Silizium, in der Schmelze bis auf ein geringes, vorher einstellbares Maß ab. Die Begleitelemente liegen somit in oxidierte Form als Schlacke vor, die wegen ihres geringeren spezifischen Gewichts über der Schmelze schwimmt.⁵

Die heutigen Sauerstoffblasverfahren sind das Sauerstoffaufblasverfahren, das Sauerstoffbodenblasverfahren und ein kombiniertes Verfahren. Sie unterscheiden sich dadurch, dass an verschiedenen Stellen am Konverter reiner Sauerstoff eingeblasen und eventuell ein reaktionsträges Gas, ein Inertgas, zugesetzt wird.

⁵ Verband Deutscher Eisenhüttenleute 2007, S.56 ff.

Alle diese Herstellungsverfahren zeichnen sich durch eine hohe Wirtschaftlichkeit aus. Mit ihnen lassen sich hohe Stahlqualitäten erzielen, was ihre weltweit hohe Verbreitung erklärt.

2.3.1.1 Das Sauerstoffaufblasverfahren

Bei dem Sauerstoffaufblasverfahren, auch Linz- Donawitz- Verfahren genannt, werden flüssiges Roheisen und Stahlschrott, zu Kühlzwecken, in den leeren Konverter chargiert (vgl. Abb. 5). Über Lanzen wird reiner Sauerstoff in den Konverter geblasen und die dosierten Zuschläge über die Zuschlags- und Legierungsbunker zugegeben. Wenn das Frischen beendet ist, wird wiederum über eine Lanze eine Stichprobe des Stahls entnommen und kontrolliert, ob die einzustellende Qualität erreicht wurde.

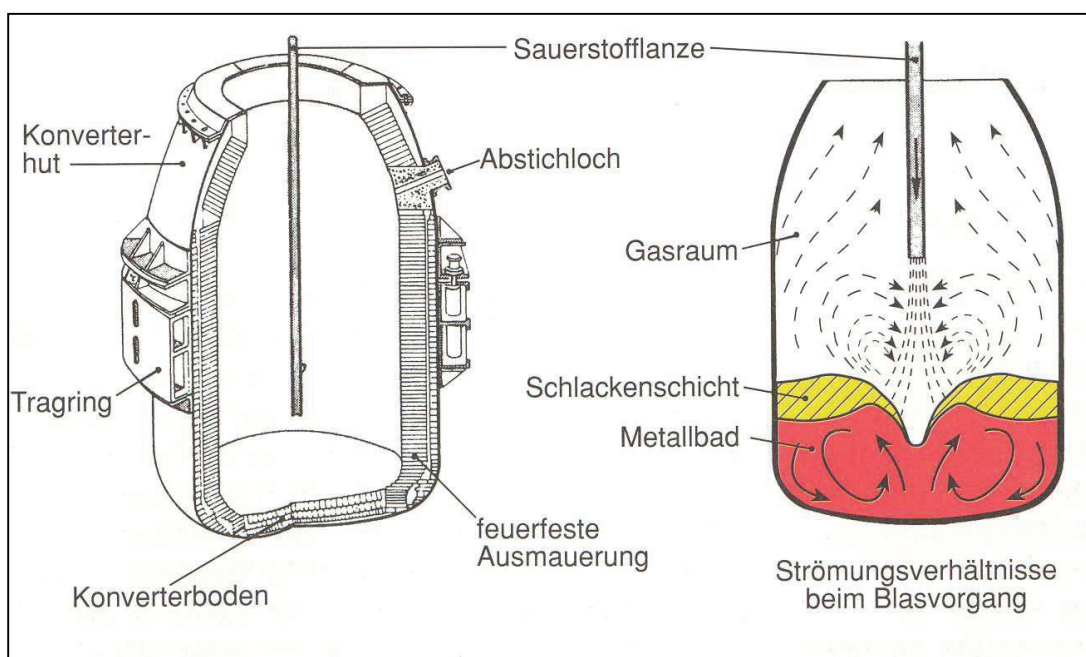


Abb. 5: Sauerstoffaufblaskonverter (schematisch) nach [B5]

Falls nicht, kann nachgefrischt werden oder eine Korrektur durch die erneute Zugabe von Zuschlagstoffen erfolgen. Am Ende dieses Vorganges liegen die

Schlacke und der Rohstahl flüssig und voneinander getrennt vor und können abgestochen werden.

2.3.1.2 Das Sauerstoffbodenblasverfahren

Im Gegensatz zum Linz- Donawitz- Verfahren wird bei diesem Prozess der Sauerstoff durch den Konverterboden eingeblasen. Dadurch wird das Schmelzbad besser durchmischt und es kann mehr Schrott eingesetzt werden. Verglichen mit dem Sauerstoffaufblasverfahren sind die Schmelzzeiten bei diesem Verfahren kürzer, die Rohstahlerzeugungsleistung hingegen höher. Das Sauerstoffbodenblasverfahren wurde Ende der 1960er Jahre in der BRD entwickelt und ist auch unter dem Namen Oxygen- Bottom-Maxhütte (OBM) bekannt.

2.3.1.3 Das kombinierte Blasverfahren

Bei den beiden vorher beschriebenen Frischeverfahren wird durch das Sauerstoffblasen keine komplette Durchmischung der Schmelze erreicht. Bei dem kombinierten Verfahren wird reiner Sauerstoff von oben in den Reaktor eingeblasen. Gleichzeitig wird ein Inertgas oder ebenfalls Sauerstoff in den Konverterboden eingeleitet. Die Schmelze wird besser durchmischt, homogener und dadurch die Erzeugungsleistung gesteigert. Desweiteren gestaltet sich die Einstellung der gewünschten Eigenschaften als sicherer und der Einsatz von Schrott kann erhöht werden.

2.3.2 Das Elektrostahlverfahren

Die Rohstahlerzeugung in einem Elektrolichtbogen- oder Induktionsofen, in dem die nötige Schmelzenergie aus elektrischem Strom erzeugt wird, wird Elektrostahlverfahren genannt. Heute werden 90 % des Elektrostahls in Elektrolichtbogenöfen, folglich 10 % in Induktionsöfen, hergestellt.⁶

⁶ Verband Deutscher Eisenhüttenleute 2007, S.61

2.3.2.1 Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen

Der Elektrolichtbogenofen ist ein feuerfest ausgemauerter, aus gekühlten Wandelementen bestehender Reaktor mit einem Fassungsvermögen für Schmelze von 80 t bis 120 t. Die Einsatzstoffe, also Stahlschrott oder DRI, Erze, Zuschläge, das Reduktionsmittel Kohlenstoff und Legierungselemente werden von oben eingefüllt und zwischen Graphitelektroden platziert. Der Lichtbogen wird gezündet und Strom fließt zwischen den Elektroden über den Stahlschrott. Dabei entstehen Temperaturen bis zu 3500 °C, wodurch die Einsatzstoffe schmelzen. Um diesen Vorgang zu beschleunigen wird den Einsatzstoffen zusätzlich zu der elektrischen chemische Energie in Form von Sauerstoff oder anderen brennbaren Gasgemischen zugeführt. Es entsteht die Stahlschmelze und Verunreinigungen wie Phosphor, Wasserstoff und Stickstoff werden entweder in der Schlacke gebunden oder entweichen gasförmig. Die Qualität des erzeugten Stahls kann durch die Entnahme von Proben überprüft werden. Im Folgenden können Rohstahl und Schlacke abgestochen werden.



Abb. 6: Elektrolichtbogenofen nach [B6]

Die Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen ist ein hochtechnologisches Verfahren, dessen Prozesssteuerung automatisiert ist. Die Einsatzstoffe werden energieeffizient und schnell eingeschmolzen, die gewünschte Stahlqualität kann genau eingestellt werden.

2.3.2.2 Stahlerzeugung im Induktionsofen

Bei diesem Verfahren werden die Einsatzstoffe in einem Induktionstiegelofen, in einigen Fällen im Vakuum, eingeschmolzen. Auf diese Weise lassen sich einige gelöste Gase leichter aus der Schmelze entfernen und eine noch exaktere Einstellung der Legierungsgehalte ist möglich. In dem Reaktor erzeugt eine Kupferspule Wirbelströme hoher Stromstärke, welche die Schmelze schnell und stark erwärmen. Induktionsöfen werden als Umschmelz-, Legierungs- und Wärmeöfen eingesetzt, um Stähle höchster Reinheit und mit speziellen Legierungen zu erzeugen.



Abb. 7: Induktionstiegelofen nach [B7]

2.3.3 Das Siemens- Martin- Verfahren

Dieses Verfahren zur Stahlerzeugung wurde Ende des 19. Jahrhunderts entwickelt, um die immer größer werdenden Schrottmengen der Stahlindustrie wiederzuverwenden. Heute hat es kaum noch Bedeutung für die Stahlproduktion, in der BRD ist es laut DIN EN 10025-2 nicht einmal mehr zugelassen. Der Anteil von 3 % an der Weltrohstahlproduktion ist Anlagen in Russland zuzuschreiben.⁷

Der Siemens- Martin- Ofen besteht aus einem Ober- und Unterofen. Die Einsatzstoffe Stahlschrott, Roheisen, Kohle und Zuschläge sowie Legierungselemente werden in dem oben liegenden Herdofen aufgeschmolzen und gefrischt. Im Unterofen sammelt sich die Schlacke, in sogenannten Regenerativkammern wird die Wärme der bei der Schmelze entstehenden Abgase genutzt, um die Verbrennungsluft, also die Luft zum Frischen, vorzuheizen. Das Vorheizen der Luft begünstigt den Prozess des Frischens. Der Abstich von Rohstahl und Schlacke kann durch Kippen des Ofens oder über Löcher am Ofenboden erfolgen.

Mangelnde Produktivität, fehlende Anpassungsmöglichkeiten an Umweltauforderungen sowie fehlende Flexibilität sorgten dafür, dass das Siemens- Martin- Verfahren nahezu komplett zurückgedrängt wurde.

2.4 Die Sekundärmetallurgie

Unter Sekundärmetallurgie versteht man die Nachbehandlung des flüssigen Rohstahls mit dem Ziel allen Qualitätsanforderungen gerecht zu werden. Hierfür werden vielseitige Verfahren eingesetzt, die oft miteinander kombiniert werden und gleich in den Hüttenwerken ablaufen.

⁷ Verband Deutscher Eisenhüttenleute 2007, S.69

2.4.1 Ausgewählte Verfahren der Sekundärmetallurgie

2.4.1.1 Die Desoxidation

Unter Desoxidation wird die Entfernung von Restsauerstoff aus der Schmelze verstanden. Als Desoxidationsmittel werden unter anderem Ferrosilizium oder Aluminium eingesetzt, die den Sauerstoff in oxidierte Form in der Schlacke binden. Die Desoxidation ist Voraussetzung für das beruhigte Vergießen und Erstarren des Stahls. Auf diese Weise vergossene Stähle heißen beruhigte Stähle. Mit diesem Verfahren wird das Gefüge des Werkstoffes Stahl homogenisiert.

2.4.1.2 Die Entschwefelung

Durch die Zugabe von Stoffen wie Magnesium, Kalk oder Soda, die leicht mit Schwefel in Verbindung treten, wird die Stahlschmelze entschwefelt. Günstig wirkt sich dabei eine zusätzliche mechanische oder durch ein Inertgas hervorgerufene Durchmischung des Stahlbades aus. Zu hohe Schwefelanteile haben einen negativen Einfluss auf die Umformbarkeit des Stahls und sind daher zu vermeiden. Die Entschwefelung kann auch im Vakuum erfolgen.

2.4.1.3 Entkohlung

Bei diesem Prozess wird die Affinität des Kohlenstoffs zum Sauerstoff genutzt. Die Entkohlung erfolgt meist bereits im Konverter beim Einblasen von Inertgasen. Die Absenkung des Kohlenstoffgehalts der Rohstahlschmelze ist ebenfalls im Vakuum möglich und wird dann als Vakuumfrischen bezeichnet.

Der Kohlenstoffgehalt beeinflusst Festigkeit und Zähigkeit des Stahls entscheidend.

2.4.1.4 Entphosphorung

Die Entphosphorung ist das Einstellen geringer Phosphorgehalte mittels synthetischer Schlacke. Dies geschieht bei intensiver Durchmischung der Schmelze durch ein Rührgas.

2.4.1.5 Stickstoffentfernung

Bereits in der Pfanne wird dem flüssigen Stahl, der sich unter einer schützenden Schlackeschicht befindet, der Stickstoff entzogen. Diese Behandlung ist auch im Vakuum möglich.

2.4.1.6 Entfernung von Begleitelementen

Bei diesem Verfahren werden die Gehalte von Kupfer, Arsen, Zinn oder Antimon im flüssigen Rohstahl durch eine Calciumbehandlung gesenkt. Da diese Begleiter vor allem durch Stahlschrott in die Schmelze gelangen, ist es besser den Schrott durch Trennverfahren entsprechend auf- und vorzubereiten.

2.4.2 Die Vakuumbehandlung

Die Vakuumbehandlung nimmt heute die Vorrangstellung bei der Nachbehandlung des flüssigen Rohstahls ein. Die Verfahren sind effektiv und es lassen sich gute Ergebnisse erzielen, was die einzustellende Stahlqualität angeht.

Grundlage dieses Prozesses ist, dass im Metall gelöste Gase bei vermindertem Druck besser entweichen als unter atmosphärischem Druck. Der Begriff Vakuumbehandlung ist folglich nicht ganz richtig, da der Druck lediglich auf 0,1 bar bis 0,5 bar gesenkt wird, aber kein Vakuum erzeugt wird. Neben der Entgasung im Vakuum sind auch eine Feinentkohlung, das

Legieren und eine Desoxidation des Rohstahls durchführbar. Die dabei ablaufenden metallurgischen Reaktionen können durch die Verwendung eines Spülgases beschleunigt werden, welches das Stahlbad durchmischt. Die Vakuumbehandlung ist direkt in der Pfanne, aber auch als Vakuumumlauf- oder Vakuumhebeverfahren möglich. Dabei wird die flüssige Stahlschmelze in spezielle Reaktoren abgezogen, in diesen der Druck vermindert und die Behandlung vorgenommen.

2.4.3 Die Sonderfrischverfahren

Innerhalb der Sonderfrischverfahren werden einige nur schwer durchführbare Verfahrensschritte des Frischens ins Vakuum verlagert. Das heißt unter normalem Druck vorgefrischte Schmelze wird nach den beschriebenen Prozessen der Vakuumbehandlung gesondert nachgefrischt. Die Sonderfrischverfahren im Vakuum vermeiden den Übergang der teuren Legierungselemente in die Schlacke. Schwefel- und Gasgehalte der Schmelze werden auf ein Minimum gesenkt.

2.4.4 Das Sonderschmelzverfahren

Beim Sonderschmelzverfahren wird bereits vergossener und erstarrter Stahl wieder eingeschmolzen mit dem Ziel seinen Reinheitsgrad zu erhöhen. Der verbreitetste Prozess ist das Elektro- Schlacke- Umschmelzverfahren (ESU-Verfahren), bei dem ein Stahlblock unter atmosphärischem Druck in ein Bad aus flüssiger Schmelze eingetaucht wird, welches mit einer Schlackeschicht bedeckt ist. Der Block fungiert dabei als Elektrode und erhitzt das Bad stark. Die Schlackeschicht reinigt den Block, der langsam eingetaucht und aufgeschmolzen wird, von seinen Verunreinigungen. Als Ergebnis dieses Vorgangs wird ein Stahl mit fehlerfreiem Gefüge, verbesserten technologischen Eigenschaften und höchster Reinheit bezüglich seines Gasgehaltes und nichtmetallischer Einschlüsse hergestellt.

2.5 Das Vergießen von Stahl

Der Stahlverguss steht im Stahlherstellungsprozess zwischen der Sekundärmetallurgie und der Formgebung im Walzwerk. Vereinfacht gesagt wird flüssiger Stahl dabei in bestimmte Formen, Abmessungen und Gewichte gebracht. Es wird zwischen dem weit verbreiteten Strang- oder dem Blockgussverfahren unterschieden (vgl. Abb. 8).

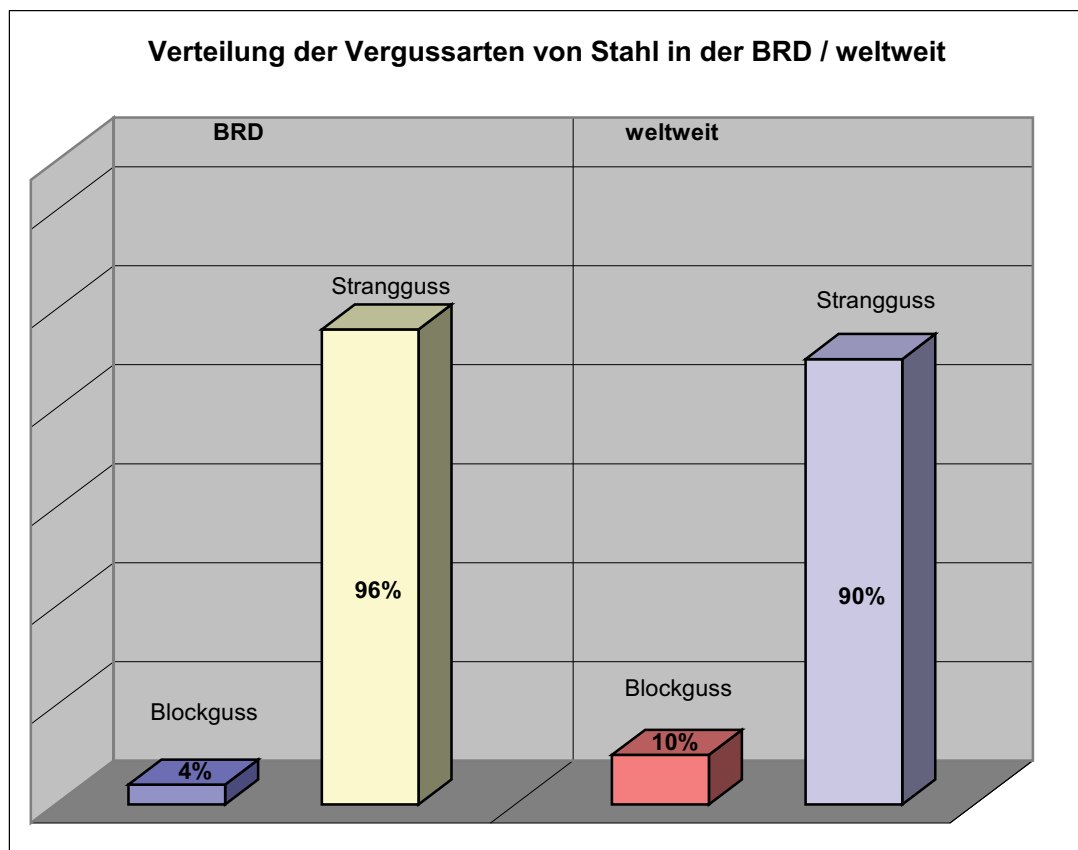


Abb. 8: Verteilung der Vergussarten von Stahl 2006 nach [B8]

2.5.1 Stranggussverfahren

2.5.1.1 Das konventionelle Verfahren

Das konventionelle Stranggießen ist ein kontinuierliches Verfahren, bei dem große Mengen Rohstahl in kurzer Zeit vergossen werden können. Wie in Abb. 9 ersichtlich, wird dabei flüssiger Stahl aus der Pfanne in den Tundish, ein feuerfestes Verteilerreservoir mit einem Fassungsvermögen von 15 t bis 40 t, gegossen.

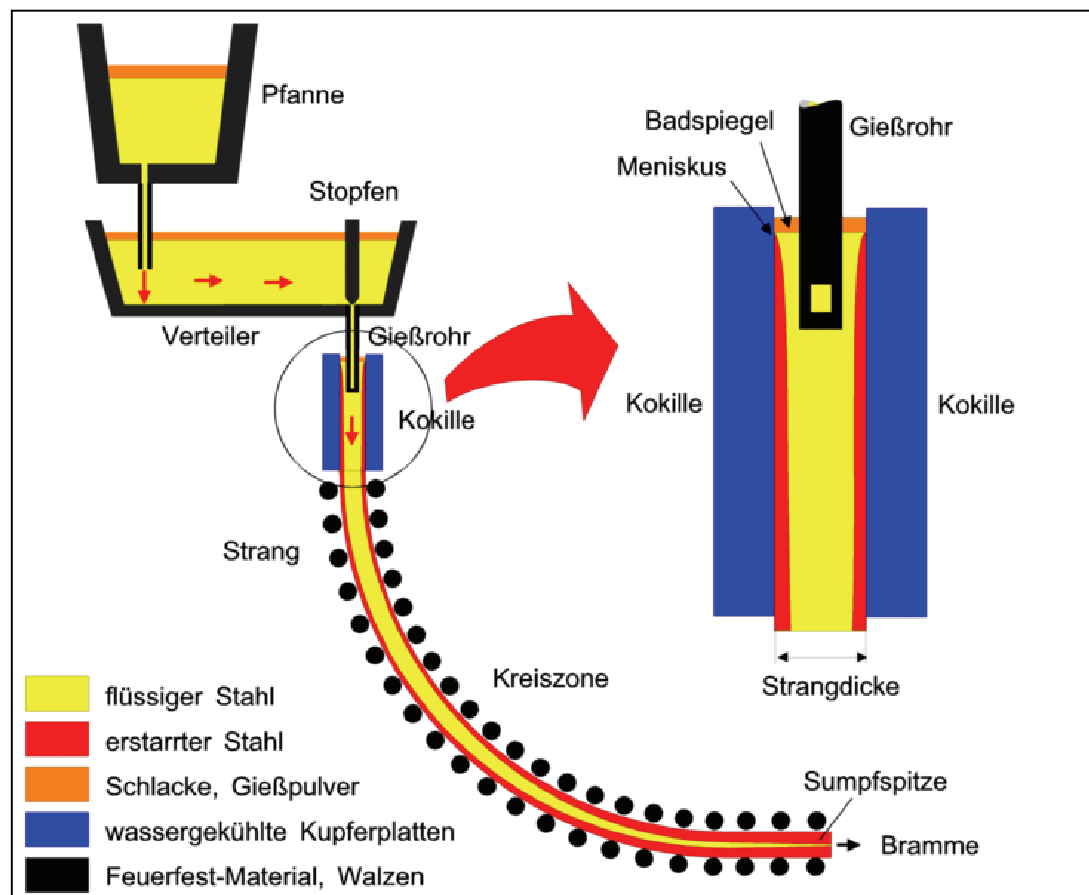


Abb. 9: Schema einer konventionellen Stranggussanlage nach [B9]

Von dort aus fließt der Stahl über ein beheiztes Gießrohr, welches mittels

Schieber reguliert werden kann, in eine Kupferkokille, bis eine bestimmte Spiegelhöhe erreicht ist. Die Kokille vibriert, damit der flüssige Stahl nicht an ihren Wandungen haften bleibt. Im nächsten Schritt wird der Stahl über Treibrollen aus der Kokillenform gezogen und wassergekühlt, sodass er erstarrt. Mittels Schneidbrennern und Scheren wird er auf die gewünschte Länge geschnitten.

Moderne Anlagen vergießen den Stahl abgebogen. So können sie einfacher und platzsparender in den Werken untergebracht werden, als die veralteten Vertikalanlagen. Fast das komplette Verfahren ist automatisiert. Es lassen sich rechteckige, quadratische, runde und mit Beam- Blank- Anlagen angenäherte Umrisse für Formstahl vergießen.



Abb. 10: Konventionelle Stranggussanlage nach [B10]

2.5.1.2 Vergießen von Flachprodukten

Dieses Verfahren kann als endabmessungsnahes Gießen bezeichnet

werden. Dabei ist der Verguss mit dem Warmwalzen gekoppelt, wodurch Produkte von nur 1 mm Dicke vergossen werden können. Wie *Tabelle 4* zeigt, wird zwischen dem Dünnbrammen-, dem Vorband- und dem Bandgießen unterschieden. Die so erzeugten Stähle werden vor allem in der Automobil- und Elektroindustrie verwendet.

Verfahrensrichtung	mögliche Gießdicke
Dünnbrammengießen	50 bis 90 mm
Vorbandgießen	10 bis 15 mm
Bandgießen	1 bis 5 mm

Tabelle 4: Verfahrensrichtungen des Vergießens von Flachprodukten und erzielbare Gießdicken nach [T4]

2.5.2 Das Blockgussverfahren

Unter dem Blockgussverfahren wird das diskontinuierliche Vergießen von Stahl zu einfachen geometrischen Körpern verstanden. Kokillen mit quadratischer, rechteckiger, runder, ovaler oder polygonaler Grundfläche dienen bei diesem Prozess als Formen für den flüssigen Stahl.⁸

Im Oberguss wird Stahl von oben, direkt aus Pfannen, mittels eines Schubventils dosierbar, in die Kokillenform gegossen.

Beim Gespannguss hingegen wird der Stahl von unten in die Kokille eingefüllt, bis eine bestimmte Spiegelhöhe erreicht ist. Bei beiden Verfahren kühlt der Stahl nach dem Verguss in der Kokille ab und kann nach dem Erstarren mit einem Kran aus dieser herausgehoben werden. Die bis zu 300 t schweren Blöcke werden dann zum weiteren Auskühlen in ein Formlager transportiert und stehen zur weiteren Verarbeitung bereit.

Hauptsächlich werden diese Gussprodukte im Energieanlagenbau zur Herstellung von Turbinen verwendet oder in Schmiedebetrieben verarbeitet.

⁸ Verband Deutscher Eisenhüttenleute 2007, S.87

2.6 Formgebungstechniken

Um die vom Stahlanwender geforderten Endabmessungen und Eigenschaften einzustellen, muss der zu Blöcken und Brammen vergossene Stahl weiterverarbeitet und –behandelt werden. Dieses Umformen des Werkstoffes zum fertigen Produkt kann im kalten oder warmen Zustand erfolgen. Die verschiedenen Verfahren und Techniken der Formgebung zur Herstellung sollen im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

2.6.1 Der Walzprozess

Unter Walzen wird das stetige oder schrittweise plastische Umformen von Stahl verstanden. Die plastische Formänderung wird erreicht durch das Aufbringen einer äußeren Kraft auf das Stahlgefüge, welches aus Kristallen aufgebaut ist, die in einem Raumgitter angeordnet sind. Infolge der Kraft verschieben sich die Atome auf ihren Gleitebenen gegeneinander und der Stahl verformt sich. Mit zunehmender plastischer Umformung verzerrt sich das Kristallgitter immer weiter, bis es letztendlich zertrümmert wird. Durch die Zerstörung dieses Gefüges ist es den Atomen unmöglich an ihre Ausgangsposition zurückzukehren. Der Stahl ist also plastisch verformt und verfestigt. Um diesen Zustand der Verfestigung zu erreichen wird die dafür nötige Kraft durch Walzen auf den Stahl übertragen. Dabei wird, je nach Art der Bewegung zwischen Walze und Werkstück, unterschieden zwischen den Verfahren Längswalzen, Querwalzen und Schrägwalzen. Zur Herstellung von Flacherzeugnissen werden Flachwalzen eingesetzt. Um Profilstahl, Halbzeug oder Langerzeugnisse zu produzieren, kommen Profil- oder Kaliberwalzen zum Einsatz.

Das einfachste Verfahren, das zur Herstellung der Endprodukte genutzt wird, ist das Duo- Walzgerüst. Es besteht aus zwei Walzen, welche parallel zueinander stehen und einen kleinen Abstand voneinander haben, die Walzöffnung (vgl. Abb. 11). Der eigentliche Vorgang des Walzens besteht

darin, dass die Walzen das Walzgut greifen und in den Walzspalt ziehen, wodurch die Verformung erreicht wird. Die Formgebung geschieht durch mehrere Walzdurchgänge, wobei das Walzgut vor- und rückwärts durch den Walzspalt gezogen wird. Die modernen Walzanlagen sind komplett automatisch gesteuert.

Sind bei der Formgebung besonders große Verformungen zu erzielen, werden Quarto- Walzgerüste eingesetzt. Diese bestehen aus einer großen Stützwalze, welche ihre Kraft auf eine darunter liegende kleine Arbeitwalze überträgt.

Das Walzen bewirkt neben der Längenänderung auch eine Seitendehnung des Werkstoffes Stahl. Um dem entgegenzusteuern sind Seitenwalzen in die Walzanlage integriert, die das Walzgut entweder entgraten, bei Flacherzeugnissen, oder ihm ein seitliches Profil geben, bei Profilstahl.



Abb. 11: Warmwalzstraße von Thyssen in Duisburg nach [B11]

2.6.2 Walzerzeugnisse

Nach DIN EN 10079 wird bei Stahlerzeugnissen unterschieden zwischen dem Halbzeug sowie Flach- und Langerzeugnissen. Die beiden letztgenannten sind fertige Erzeugnisse, das heißt bei ihnen ist die Warm-

oder Kaltformgebung abgeschlossen. Abb. 12 gibt eine kurzgefasste Übersicht von Halbzeug und Fertigerzeugnissen.

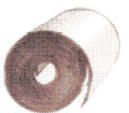
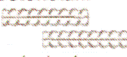
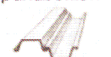
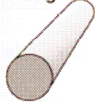
Halbzeug	Flacherzeugnisse		Fertigerzeugnisse Langerzeugnisse		Rohre	Ringe, Radreifen Vollräder
	warmgewalzt	kaltgewalzt	warmgewalzt	kaltgeformt		
Quadratisches Halbzeug  Seitenlänge des Querschnitts ≥ 50 mm	Breitflachstahl  Breite > 150 mm und ≤ 1250 mm Dicke > 4 mm Alle 4 Flächen im Kaliber gewalzt	Blech  Breite > 600 mm Band  Kaltbreitband Breite ≥ 600 mm Kaltband Breite < 600 mm	Walzdraht  Durchmesser ≥ 5 mm Stäbe  rund: Dmr. ≥ 8 mm vierkant: Seitenlänge ≥ 8 mm flach: Dicke ≥ 5 mm Breite ≤ 150 mm spezial: Dreieck, Trapez, u.a.	Gezogene Kaltprofile z. B. viereckige Querschnitte Blankstahl gezogen oder geschält und/oder geschliffen im Hinblick auf besondere Maßgenauigkeit und Oberflächengüte	Nahtlose Rohre  Fertigen durch Lochen eines runden Halbzeuges mit vollem Querschnitt und anschließendem Walzen oder Strangpressen	Ringe mit Dmr. von 100 mm bis 8.000 mm und einem Gewicht von 1 kg bis 25.000 kg; Radbandagen und Räder für die Eisenbahn Läuferinge und Radsätze für die Verkehrstechnik; Flansche und Verstärkungsringe für den Behälterbau
Rechteckiges Halbzeug  Querschnitt ≥ 2500 mm ² Breite / Dicke < 2	Blech  Feinblech und Band Dicke < 3 mm Grobblech und Band Dicke ≥ 3 mm		Betonstahl  gerippt oder profiliert		Geschweißte Rohre Fertigen durch Einformen von warm- und kaltgewalzten Flacherzeugnissen zu einem kreisförmigen Profil (längs- oder spiralförmig) und anschließendes Verschweißen der Kanten	Bandagen für Zahnräder und Großzahnkränze, Drehscheiben und Lagerbuchsen für den Getriebebau
Flaches Halbzeug  Dicke ≥ 50 mm Breite / Dicke ≥ 2	Band  Warmbreitband Breite ≥ 600 mm Bandstahl Breite < 600 mm		Warmgewalzte Profile Gleisoberbauzeugnisse:  Schienen, Schwellen Spundbohlen  Grubenausbauprofile  Große I-, H- und U-Profile  Steghöhe ≥ 80 mm Kleine I-, H- und U-Profile  Steghöhe < 80 mm		Hohlprofile Rohre mit kreisförmigem, quadratischem, oder rechteckigem Querschnitt für Bauelemente	Naben, Verstärkungsringe, Lauf- und Seilscheibenringe, Zylinderlaufbuchsen, Lagerbuchsen für den Maschinenbau Vorschweißflansche und Überschiebeflansche in der Petrochemie und Off-Shore-Technik
Rundes Halbzeug  Runder Querschnitt						
Vorprofilierendes Halbzeug  Querschnitt > 2500 mm ²						

Abb. 12: Walzstahlerzeugnisse nach [B12]

2.6.3 Das konventionelle Warmwalzen

Das konventionelle Warmwalzen ist das Walzen von Brammen oder Blöcken, die auf 1200 °C bis 1300 °C erwärmt wurden. Das Verfahren basiert auf dem Prinzip, dass mit zunehmender Temperatur die Streckgrenze von Stahl sinkt. Es muss demnach weniger Kraft aufgebracht werden, um Verformungen zu erzielen. Die gewünschten Abmessungen können in wenigen Walzdurchgängen, sogenannten Stichen, erreicht werden.

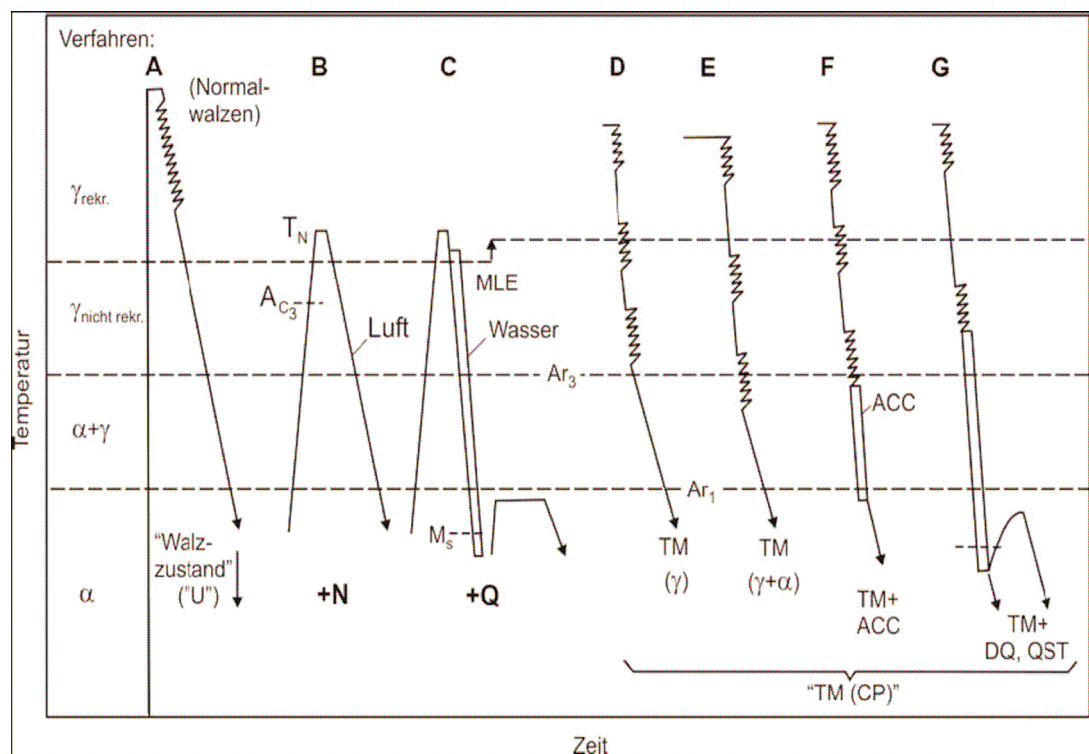


Abb. 13: Walz- und Wärmebehandlungsverfahren nach [B13]

Beim konventionellen Warmwalzen werden die Verformungen bei hohen Temperaturen, oberhalb der Rekristallisation in der Austenitphase (vgl. Abb. 13, Linie A), erreicht. Im Stahl bildet sich ein neues Gefüge aus, gleichzeitig kommt es zu einer Kornvergrößerung. Mit diesem Verfahren ist also keine

Gefügeverfeinerung erreichbar, wodurch konventionell warmgewalzte Stähle keine besonderen Eigenschaften bezüglich ihrer Festigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Sprödbbruch besitzen. Ihr Lieferzustand wird mit „AR“ (as rolled) abgekürzt.

2.6.4 Die thermomechanische Behandlung von Stahl

Diese Verfahren werden auch als kontrolliertes Warmwalzen bezeichnet und wurden in den 1960er und 1970er Jahren aufgrund neuer Anwendungsbereiche im Stahlbau, zum Beispiel Offshore- Projekte oder Kraftwerksbau, entwickelt.⁹ Dafür wurden und werden Stähle mit neuen, besseren Eigenschaften in Bezug auf Festigkeit, Widerstand gegen Sprödbbruch und Schweißeignung benötigt. Als Folge dieser Forderung wurden neue Verfahren entwickelt, bei denen Temperatur und Verformung so gesteuert werden können, dass die gewünschten Materialeigenschaften einzustellen sind.

2.6.4.1 Warmwalzen mit anschließendem Normalglühen

Bei diesem Verfahren wird der Stahl zuerst konventionell warmgewalzt und kühlt dann ab. Anschließend wird er auf eine Temperatur in der Austenitphase von ungefähr 950 °C gebracht, also 30 °K bis 50 °K oberhalb des Umwandlungspunktes vom α - zum γ - Eisen.¹⁰ Danach kühlt er an der Luft ab, wodurch sich ein feines, homogenes Gefüge aus Ferrit und Perlit ausbildet. Eine Kornvergrößerung wie beim konventionellen Warmwalzen bleibt aus. In Verbindung mit Legierungselementen lassen sich so Stähle mit hohen Streckgrenzen und großem Widerstand gegen Sprödbbruch erzeugen.

⁹ Priebe/Starossek 2008, S.1-12

¹⁰ Seidel 2007/2008, S.124

2.6.4.2 Normalisierendes Walzen

Normalisierendes Walzen ist ein Prozess, bei dem das konventionelle Warmwalzen mit dem Normalglühen gekoppelt ist. Dabei erfolgen die Endverformungen am Stahl im Temperaturbereich des Normalglühens, also bei 950 °C in der Austenitphase. Anders als beim konventionellen Walzen mit anschließendem Normalglühen kühlt der Stahl nicht erst ab, bevor er normalgeglüht wird.

Die Veränderungen im Gefüge des Stahls und die erzielbaren Eigenschaften sind die gleichen wie beim konventionellen Warmwalzen mit anschließendem Normalglühen. Der Lieferzustand von normalgeglühten Stählen beider Verfahren wird mit „N“ abgekürzt.

2.6.4.3 Thermomechanisches Walzen

Das thermomechanische Walzen ist eine Kombination aus thermischer und mechanischer Behandlung von Stahl. Das Walzen erfolgt dabei in mehreren Durchgängen sowohl oberhalb als auch unterhalb der Rekristallisation in der Austenitphase (vgl. Abb. 13, Linie D). Dabei findet die letzte Formgebung gewöhnlich bei einer Temperatur knapp oberhalb der Umwandlungstemperatur von Austenit zu Ferrit statt, die bei reinem Eisen bei 911 °C liegt. Auf diese Weise entsteht ein Stahl mit feinkörnigem, homogenen Gefüge, der ähnliche Festigkeitseigenschaften und Widerstandsfähigkeit gegen Sprödbruch aufweist wie normalisierter Stahl. Da bei seiner Erzeugung auf sehr geringe Legierungsgehalte zurückgegriffen wird, es werden Mikrolegierungselemente genutzt, ist TM-gewalzter Stahl sehr schweißgeeignet. Der Lieferzustand thermomechanisch gewalzter Stähle wird mit „M“ abgekürzt.

2.6.4.4 Das Beschleunigte Abkühlen

Das auch als Accelerated Cooling (ACC) bezeichnete Verfahren wird eingesetzt, um das Gefüge von TM- Stählen noch feiner zu machen. Bei diesem Prozess erfolgt die Kühlung des Stahls nach seiner letzten thermomechanischen Umformung mit Wasser. Die schnelle Kühlung begünstigt die Feinkornausbildung. Somit entsteht ein Gefüge aus Ferrit und Perlit sowie Ferrit und Bainit¹¹, welches erlaubt den Legierungsgehalt des Stahls noch weiter zu senken, ohne an Festigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Sprödbruch einzubüßen. Mit sinkendem Legierungsgehalt steigt allerdings die Schweißbarkeit.

2.6.4.5 Das Vergüten von Stahl

Als Vergüten wird ein Verfahren zur Herstellung hochfester Stähle bezeichnet, welches in zwei wesentlichen Schritten abläuft, dem Härten und dem Anlassen des Werkstoffs.

Beim Härten wird der Stahl schroff von Temperaturen über 900 °C, also aus der Austenitphase, heruntergekühlt. Dadurch entsteht ein feinkörniges Gefüge aus Bainit und Martensit mit guten Festigkeitseigenschaften.

Unter Anlassen wird das Durchwärmen des Werkstoffs auf Temperaturen über 600 °C verstanden. Das Gefüge kann sich dabei entspannen und umbilden, wodurch die Zähigkeitseigenschaften des Stahls verbessert werden. Die Vorgänge werden in *Abb. 13, Linie C* dargestellt.

Durch unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten an der Werkstoffoberfläche und im Kern stellen sich inhomogene Festigkeitseigenschaften des Stahls bei großen Erzeugnisdicken ein. Um dem entgegenzusteuern werden dem Kern Mikrolegierungen wie Niob, Titan oder Vanadium zugesetzt. Dadurch wird zwar eine über den Querschnitt homogene Festigkeit gewährleistet, aber

¹² Thienel 2008, S.38

¹¹ Pribe/Starossek 2008, S.1-13

durch das hohe Kohlenstoffäquivalent, welches die Legierungselemente bedingen, sind die so erzeugten Stähle weniger schweißgeeignet.

Im Lieferzustand werden vergütete Stähle mit „Q“ bezeichnet.

Bei TM- Stählen ist die Vergütung durch zwei verschiedene Verfahren möglich.

Beim Abschrecken und Selbstanlassen, dem Quenching and Self Tempering (QST), werden die Stähle zuerst auch rasch aus der Austenitphase auf 600 °C, in die Austenitphase, abgekühlt. Oberfläche und Kern kühlen dabei unterschiedlich schnell ab, was sich das Verfahren zu Nutze macht. Die vorhandene Kernwärme des Werkstoffs wird zum Anlassen genutzt, um ein feineres, spröbruchresistenteres Gefüge einzustellen.

Unter dem Direkten Abschrecken, dem Direct Quenching (DQ), wird die schnellstmögliche Abkühlung des Stahls von der Oberfläche bis zum Kern verstanden. Auf diese Weise vergütete Stähle sind nicht so spröbruchresistent wie Stähle, welche mittels QST- Verfahren behandelt wurden. Bei allen Verfahren wird Wasser genutzt, um die Abkühlung zu erreichen.

Durch den Zusatz von Mikrolegierungselementen lassen sich auch die vergüteten TM- Stähle in Bezug auf ihre Festigkeitseigenschaften verbessern, das heißt es sind Streckgrenzen von bis zu 1100 MPa (N/mm²) realisierbar.

2.6.5 Das Kaltumformen von Stahl

Das Kaltumformen von Stahl ermöglicht die Produktion kleinerer Stahlerzeugnisse als durch Warmwalzverfahren. Die Verfahren der Kaltumformung von Stahl erfordern einen hohen Krafteinsatz. Es ist möglich Kaltverformung und Wärmebehandlung zu kombinieren. Bei diesen Formänderungsverfahren unterhalb der Rekristallisationstemperatur kommt es durch die aufgebrachte Verformungsenergie zu Gefügeverzerrungen innerhalb des Kristallgitters.¹² Dadurch wird die Festigkeit des Werkstoffs

¹² Verband Deutscher Eisenhüttenleute 2007, S.120

erhöht, es sind höhere Maßgenauigkeiten erzielbar und die Oberflächengüte der Erzeugnisse verbessert. Zähigkeit und Verformungsvermögen des Stahls werden vermindert. Die zwei wichtigsten Verfahren, das Kaltziehen und das Kaltwalzen, werden im Folgenden beschrieben.

2.6.5.1 Das Kaltwalzen

Das kalte Walzen von Stahl wird hauptsächlich zur Blechproduktion eingesetzt. Es ist auch möglich Profilerzeugnisse und Rohre auf diese Weise herzustellen. Stahl wird dabei auf Zwei-, Vier- und Vielwalzgerüsten direkt von einer Ablaufhaspel gewalzt und gleich wieder aufgewickelt (vgl. Abb. 14). Auch mehrere Walzen mit unterschiedlichem Walzspalt können hintereinander angeordnet sein. Auf solchen Walzstraßen kann die Enddicke von Walzprodukten in einem Durchlauf erreicht werden. Zur Beseitigung von Gefügeverzerrungen, der Kaltverfestigung, kann nach dem kalten Umformen ein Glühen des Werkstoffs erfolgen.

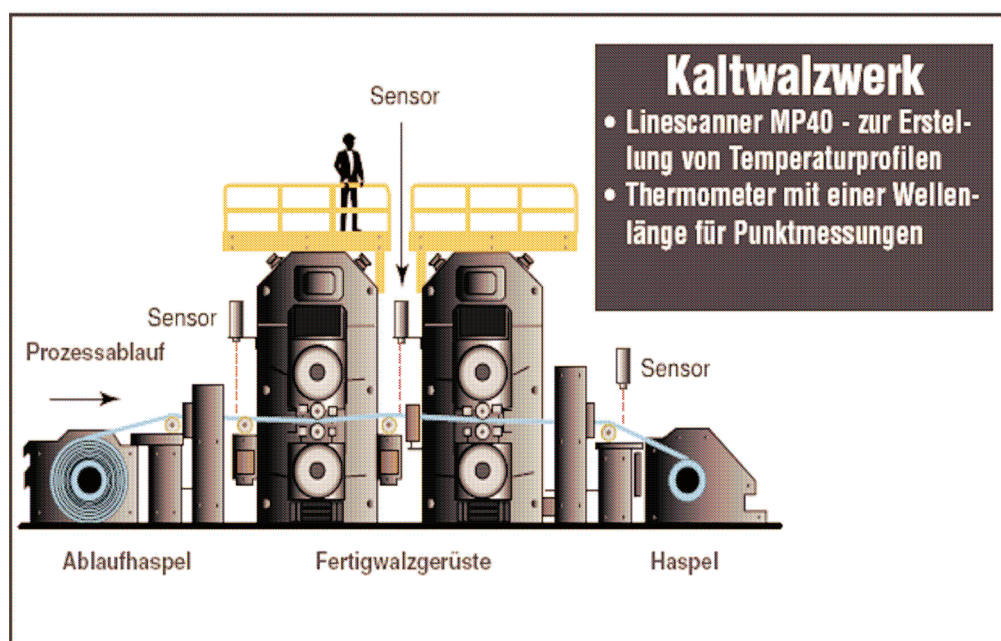


Abb. 14: Schema einer modernen Kaltwalzstraße nach [B14]

Das Kaltwalzen ist ein hochautomatisierter Prozess, bei dem ausgereifte Sensormesstechnik zur Anwendung kommt, um exakte Abmessungen und eine qualitativ hochwertige Oberfläche der Produkte zu gewährleisten. Es gibt Anlagen, bei denen das Walzen mit einem Beizprozess gekoppelt ist. Das Walzgut durchläuft dabei vor dem Umformen ein gebeiztes Warmbad, um die Oberfläche entsprechend zu behandeln. Ebenso ist heutzutage flexibles Walzen möglich. Die hierfür verwendete Walzmaschine hat einen verstellbaren Walzspalt, der es ermöglicht verschiedene, anpassbare Blechdicken zu produzieren. Diese Bleche werden nach dem Herstellungsverfahren als Tailor Roled Blanks bezeichnet.

2.6.5.2 Das Kaltziehen

Unter Kaltziehen wird das Ziehen des Werkstoffs Stahl durch eine profilierte Öffnung, das Ziehhol, verstanden. Ein dichter Film aus Schmierstoffen zwischen der Ziehapparatur und dem Ziehgut gewährleistet dabei eine glatte, glänzende Oberfläche und minimiert den Kraftaufwand, da weniger Reibungskräfte beim Ziehen entstehen. Als Ziehgüter dienen Draht, runde und profilierte Stangen sowie Rohre, deren Durchmesser durch das Ziehen auf weniger als 5 mm verringert werden kann.

Das Ziehen erfolgt meist in mehreren Stufen mit Zwischenglühen, um Gefügeverzerrungen durch Kaltverfestigung abzubauen und damit die Rissgefahr während des Umformvorgangs zu senken. Als Ziehmaschinen dienen Ein- oder Mehrfachziehbänke, auf denen Produkte wie Rohre oder Profilbleche mit exakten Abmessungen, hoher Festigkeit und hochwertiger Oberfläche hergestellt werden können.

3. Stahlsorten

Das zweite Kapitel soll einen Überblick über die aktuell gängigen Stahlsorten und die dazugehörigen Normen geben. Es werden die Stahlsorten nach DIN EN 10020, mit besonderer Aufmerksamkeit die Baustähle nach DIN EN 10025 und in Kurzform die Bezeichnung von Stählen nach DIN EN 10027 beschrieben. Insbesondere wird dabei auf die typischen mechanischen und physikalischen Eigenschaften, die chemische Zusammensetzung sowie die Schweißeignung der jeweiligen Stahlsorten eingegangen.

3.1 Stahlsorten nach DIN EN 10020

Die DIN EN 10020 wurde in ihrer aktuellen Fassung im Jahr 2000 veröffentlicht und definiert Stähle als "Werkstoffe, deren Massenanteil an Eisen größer ist als der jedes anderen Elements, dessen Kohlenstoffgehalt im allgemeinen kleiner als 2 Gew.-% C"¹³ sind. Diese Norm nimmt die Einteilung der Stähle nach ihrem Gehalt an Legierungselementen in die drei Sorten Unlegierte Stähle, Nichtrostende Stähle und Andere Legierte Stähle vor, die im Folgenden beschrieben werden.

3.1.1 Unlegierte Stähle

Unlegierte Stähle sind nach DIN EN 10020 Stähle, bei denen keiner der Grenzwerte in Bezug auf den Massenanteil eines Legierungselements nach *Tabelle 5* erreicht wird. Der Massenanteil eines Legierungselements wird nach einem Probeabstich durch eine Schmelzanalyse ermittelt.

Diese Stähle werden weiter unterteilt in die Hauptgüteklassen der unlegierten Qualitätsstähle und der unlegierten Edelstähle.

¹³ Zitat nach Quelle [27]

LE...	%	LE...	%	LE...	%
Al	0,30	Cr	0,30	Co	0,30
Cu	0,40	Mn	1,65	Mo	0,08
Ni	0,30	Nb	0,06	Pb	0,40
Se	0,10	Si	0,60	Te	0,10
Ti	0,05	V	0,10	Bor	0,0008
W	0,30	Zr	0,05	Sonst.	0,10

*Tabelle 5: Grenzwerte zwischen unlegierten und legierten Stählen
(Schmelzenanalyse) nach [T5]*

3.1.1.1 Unlegierte Qualitätsstähle

An unlegierte Qualitätsstähle werden besondere Anforderungen bezüglich ihrer Zähigkeit, Streckgrenze, Umformbarkeit und Schweißbarkeit gestellt. Das feinkörnige Gefüge dieser Stähle sowie die auf jeweils maximal 0,045 Gewichtsprozent beschränkten Gehalte an Phosphor und Schwefel machen ihre „Qualität“ aus. Zu den unlegierten Stählen werden auch die sogenannten Grundstähle aus der veralteten DIN EN 10020 (1989) gezählt.

Verwendung finden diese Stähle als Betonstähle, Kettenstähle, zur Herstellung von Blechen für Hausgeräte und für die Massenproduktion von Schrauben, Muttern und Nieten.

3.1.1.2 Unlegierte Edelstähle

Diese Stähle zeichnen sich im Gegensatz zu den unlegierten Qualitätsstählen durch einen höheren Reinheitsgrad, das heißt weniger metallische Einschlüsse, aus. Aus diesem Grund werden sie als „edel“ bezeichnet.¹⁴ Bei unlegierten Stählen nach DIN EN 10020 ist der Gehalt der

¹⁴ Pfennig, S.2

Elemente Phosphor und Schwefel auf maximal 0,025 Gewichtsprozent beschränkt. Anders als die unlegierten Qualitätsstähle sind sie für eine Wärmebehandlung mit Vergüten und Härten geeignet, da sie sich durch ein homogenes Werkstoffverhalten auszeichnen. DIN EN 10020 legt den Wert bei dem Kerbschlagbiegeversuch an diesen Stählen bei einer Versuchstemperatur von -50 °C wie folgt fest:

längs	quer
KV > 27 J	KV > 16 J

Tabelle 6: Mindestwerte der Kerbschlagarbeit bei einer Versuchstemperatur von -50 °C bei unlegierten Edelstählen DIN EN 10020 nach [T6]

Die Erzeugung unlegierter Edelstähle erfolgt mit höchster Sorgfalt, wobei die maßgebenden Eigenschaften meist im Zuge einer Vakuumbehandlung der Stahlschmelze eingestellt werden. Diese Stähle werden als Baustähle, im Motoren- und Getriebebau oder als Reaktorstähle verwendet.

3.1.2 Nichtrostende Stähle

Bei nichtrostenden Stählen liegt der Anteil von Chrom bei über 10,5 Gewichtsprozent, der Anteil von Kohlenstoff liegt unter 1,2 Gewichtsprozent. Weitere Unterscheidungsmerkmale dieser Stähle ist ihr Nickelgehalt (vgl. *Tabelle 7*) sowie die Einteilung nach ihren Haupteigenschaften in die Kategorien korrosionsbeständig, hitzebeständig oder warmfest. Die Korrosionsbeständigkeit dieser Stähle basiert auf einer Passivierungsschicht aus Chromoxid, die das Legierungselement Chrom mit dem Luftsauerstoff bildet. Das Element Nickel bewirkt eine Säurebeständigkeit des Werkstoffs. Der Zusatz von weiteren Legierungselementen wie Niob, Molybdän oder Kupfer ist möglich, um noch höheren Ansprüchen gerecht zu werden. Nichtrostende Stähle eignen sich für Verfahren der

Wärmebehandlung. Je nach Verfahren bilden sich unterschiedliche Gefügestrukturen aus, weshalb zwischen nichtrostenden Stählen mit ferritischem, martensitischem und austenitischem Gefüge unterschieden wird.¹⁵

In DIN EN 10088 sind die nichtrostenden Stähle gesondert genormt.

Element	Anteil in Gewichtsprozent
Chrom	> 10,5
Kohlenstoff	< 1,2
Nickel	Stähle mit > 2,5 Stähle mit < 2,5

Tabelle 7: Anteil einiger Legierungselemente in nichtrostendem Stahl nach [T7]

3.1.3 Andere legierte Stähle

Wenn sich nach der Schmelzanalyse der Legierungselemente bei einem Stahl herausstellt, dass auch nur einer der in *Tabelle 5* aufgeführten Grenzwerte erreicht oder überschritten wurde und der analysierte Stahl nicht zu den nichtrostenden Stählen gehört, liegt ein anderer legierter Stahl vor. Je nachdem welche Legierungselemente (vgl. *Tabelle 5*) an welchem Standort und in welcher Form im Stahlgefüge, dem Kristallgitter, angeordnet sind, wird unterschieden zwischen Mischkristall-, Carbid- und Nitridbildnern. Legierungselemente beeinflussen die mechanischen und technologischen Eigenschaften Zugfestigkeit, Streckgrenze, Härte, Bruchdehnung sowie die Verschleißneigung, Schweißneigung und Umformbarkeit des Stahl maßgeblich.

DIN EN 10020 unterscheidet legierte Qualitäts- und legierte Edelstähle.

¹⁵ Pfennig, S.2

3.1.3.1 Legierte Qualitätsstähle

An legierte Qualitätsstähle werden besondere Anforderungen bezüglich Ihrer Zähigkeit, Umformbarkeit und Korngröße gestellt. Diese Stähle sind nicht zum Oberflächenhärten und Vergüten vorgesehen.

In die Gruppe der legierten Qualitätsstähle zählen solche, die eine Streckgrenze unter 380 MPa (N/mm²) und deren Dicke unter 16 mm beträgt.¹⁶ Für diese Erzeugnisse gelten folgende Zähigkeitsanforderungen im Kerbschlagbiegeversuch bei einer Versuchstemperatur von –50 °C:

längs	quer
KV > 27 J	KV > 6 J

Tabelle 8: Mindestwerte der Kerbschlagarbeit bei einer Versuchstemperatur von –50 °C bei legierten Qualitätsstählen DIN EN 10020 nach [T8]

Darüber hinaus dürfen die Anteile der in *Tabelle 9* aufgeführten Legierungselemente nicht erreicht oder überschritten werden.

Element	Masse- anteil in %	Element	Masse- anteil in %
Cr	0,50	Cu	0,50
Mn	1,80	Mo	0,10
Nb	0,08	Ni	0,50
Ti, V, Zirkon (Zr)		je	0,12

Tabelle 9: Grenze der chemischen Zusammensetzung zwischen Qualitätsstählen und Edelstählen bei schweißgeeigneten legierten Feinkornbaustählen nach [T9]

¹⁶ Weißbach, S.108

Legierte Qualitätsstähle sind beispielsweise schweißgeeignete Feinkornbaustähle für Konstruktionen im Stahl- und Druckbehälterbau sowie Stähle für Schienen, Spundbohlen und den Grubenausbau. Auch legierte Stähle mit einem festgelegtem Kupfergehalt, Dualphasenstähle und Legierungen mit Bor, Niob, Titan, Vanadium oder Zirkon für die Kaltumformung zählen zu dieser Gruppe.

3.1.3.2 Legierte Edelstähle

Zu den legierten Edelstählen gehören alle nichtrostenden Stähle und solche, bei denen die Gehalte an Legierungselementen gemäß *Tabelle 9* erreicht oder überschritten sind.

Diese Erzeugnisse werden verwendet als Einsatz-, Vergütungs-, Werkzeug- oder Schnellarbeitsstähle.

3.2 Baustähle nach DIN EN 10025

Die neue DIN EN 10025 wurde als solche in Deutschland 2005, als EN-Norm im europäischen Raum im Jahr 2004, veröffentlicht und beinhaltet alle für die Konstruktion relevanten Stahlsorten. Sie besteht aus den bis dahin gültigen Normen:

- DIN EN 10025 (1994)
- DIN EN 10113 (1993)
- DIN EN 10137 (1995)
- DIN EN 10155 (1993)

Im Zuge der Harmonisierung der europäischen Bauprodukte (Bauproduktenrichtlinie) wurden diese Normen zu der aktuell gültigen Version zusammengefasst.¹⁷

¹⁷ Kuhlmann 2007, S. 256

Die DIN EN 10025 (2005) besteht aus sechs Teilen:

- Teil 1: Allgemeine Beschreibung
- Teil 2: Unlegierte Baustähle
- Teil 3: Normalisierte/normalisierend gewalzte Feinkornbaustähle
- Teil 4: Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle
- Teil 5: Wetterfeste Baustähle
- Teil 6: Hochfeste, wasservergütete Baustähle

In welcher Form welcher Teil der DIN EN 10025 (2005) alte Normen ersetzt, verdeutlicht Tabelle 10:

bisherige EN-Norm	neue EN-Norm	Ausgabe DIN-EN
EN 10025:1990+A1:1993	EN 10025-2:2004-11	2005-04
EN 10113-2:1993	EN 10025-3:2004-11	2005-02
EN 10113-3:1993	EN 10025-4:2004-11	2005-04
EN 10155:1993	EN 10025-5:2004-11	2005-02
EN 10137-2:1995	EN 10025-6:2004-11	2005-02
Allgemeine Lieferbedingungen für alle Teile der neuen Norm:	EN 10025-1:2004-11	2005-02

Tabelle 10: Gegenüberstellung des „alten“ und „neuen“ Normensystems für im Stahlbau verwendete Stahlsorten nach [T10]

Alle Sorten von Baustählen, die in DIN EN 10025 (2005) enthalten sind, werden in den folgenden Abschnitten hinsichtlich ihrer Eigenschaften, Anwendungsgebiete und -möglichkeiten beschrieben.

3.2.1 Allgemeine Beschreibung - DIN EN 10025-1

Im ersten Teil der „neuen“ DIN sind alle Anforderungen an die Stahlsorten, aus den Vorgängernormen entnommen, im Allgemeinen beschrieben, wodurch die DIN EN 10025 dem Anspruch gerecht wird, eine harmonisierte europäische Norm zu sein.

Es werden Maßgaben gestellt an:

- die chemische Zusammensetzung
- Abmessungen
- Technologische Eigenschaften, zum Beispiel Umformbarkeit oder Schweißbeignung
- Mechanische Eigenschaften, wie die Mindeststreckgrenze bei Raumtemperatur sowie die Sprödbrechtsicherheit
- die innere und die Oberflächenbeschaffenheit
- Prüfung und Prüfverfahren

des Werkstoffs Stahl.

Weiterhin schreibt DIN EN 10025-1 vor, dass alle Erzeugnisse mit CE-Zeichen geliefert werden, wobei die Lieferung mit CE-Zeichen explizit bestellt werden muss.¹⁸

3.2.2 Allgemeine, unlegierte Baustähle – DIN EN 10025-2

Der allgemeine, unlegierte Baustahl ist der Hauptwerkstoff im Stahlbau. Er dominiert im Bauwesen für Stahlkonstruktionen und als Werkstoff im Maschinenbau. Im zweiten Teil der DIN EN 10025 sind die Eigenschaften und Qualität der unlegierten Baustähle geregelt.

Der allgemeine Baustahl darf nach DIN EN 10025 grundsätzlich nur beruhigt vergossen werden, wobei zu unterscheiden ist zwischen dem einfach beruhigten (FN) und dem vollberuhigten Verguss (FF). Eine Ausnahme bildet dabei der Stahl S185, der noch unberuhigt vergossen (FU) werden darf.¹⁹

Als Formgebungs- und Wärmebehandlungsverfahren zur Einstellung der gewünschten Eigenschaften kommen die folgenden zum Einsatz:

¹⁸ Kuhlmann 2007, S. 257

¹⁹ Reuter, S. 2

- Das konventionelle Warmwalzen, das heißt der Hersteller liefert das Erzeugnis im Walzzustand. Abgekürzt wird dieser Lieferzustand mit „AR“ (as rolled).
- Das Warmwalzen mit anschließendem Normalglühen, der Lieferzustand wird mit „N“ abgekürzt
- Das normalisierende Walzen, wiederum mit „N“ als Kürzel

Eine Ausnahme bilden Langerzeugnisse und kontinuierlich gewalzte Flacherzeugnisse, bei denen eine thermomechanische Behandlung gestattet ist (vgl. DIN EN 10025-2).²⁰

Stahl- sorte	Werk- stoff-Nr.	R_{eH} bzw. $R_{p0.2}$			R_m	A_{80} ¹⁾	A %	Bemerkungen
		Neendicken (mm)			MPa	Neendicken (mm)		
		≤ 16	≤ 100	≤ 200	≤ 100	≤ 1...<3	≤ 3...<40	
Stahlsorten mit Angaben der Kerbschlagarbeit KV (→ Tabelle zu 4.3 Stahlbau)								
S235JR	1.0038				360	l: 17...21	l: 26	Niet- und Schweißkonstruktionen im Stahlbau, Flansche, Armaturen schmelzschweißgeeignet
S235J0	1.0114	235	215	175	...510	t: 15...19	t: 24	
S235J2	1.0117							
S275JR	1.0044							Für höhere Beanspruchung im Stahl- und Fahrzeugbau, Kräne und Maschinengestelle schmelzschweißgeeignet
S275J0	1.0143	275	235	215	410	l: 14...18	l: 22	
S275J2	1.0145				...560	t: 12...20	t: 20	
S355JR	1.0045							wie bei S275 schmelzschweißgeeignet
S355J0	1.0153	355	315	285	490	L: 14...18	l: 22	
S355J2	1.0577				...630	t: 12...16	t: 20	
S355K2	1.0596							
S450J0	1.0590	450	380	---	550			Nur für Langerzeugnisse
					...720			
Stahlsorten ohne Werte für die Kerbschlagarbeit KV								
S185	1.0035	185	175	155	290	t: 10...14	l: 18 t: 16	Bauschlosserei
					...510			
E295	1.0050	295	255	235	470	l: 12...16	l: 20 t: 18	Achsen, Wellen, Zahnräder, Kurbeln, Buchsen, Passfedern, Keile; Stifte, alle Sorten sind pressschweißgeeignet
E335	1.0060	335	295	265	570	l: 8...12	l: 16 t: 14	
					...710			
E360	1.0070	360	325	295	670	1...3...7	l: 11 t: 10	
					...830			

¹⁾ Bruchdehnungswerte an Längsproben (l) und Querproben (t) gemessen;

Tabelle 11: Warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen, DIN EN 10025-2, mechanische Eigenschaften, garantierte Mindestwerte nach [T11]

²⁰ Kuhlmann 2007, S. 257

Daneben gibt DIN EN 10025-2 Auskunft über die gewährleisteten Mindestwerte der mechanischen Eigenschaften von unlegierten Baustählen.

In *Tabelle 11* sind diese, nach ihrer Mindeststreckgrenze R_{eH} geordnet, welche mit steigender Erzeugnisdicke abnimmt, aufgeführt. Daneben enthält die Tabelle die Mindestzugfestigkeiten R_m der allgemeinen Baustähle, die ebenfalls von der Erzeugnisdicke abhängig ist.

Stähle einer Festigkeitsstufe unterscheiden sich durch unterschiedliche Sicherheiten gegen Sprödbbruch. Als Maß für die Sprödbruchsicherheit gilt die Kerbschlagarbeit an einer Materialprobe längs oder quer, die bei einer bestimmten Versuchstemperatur ermittelt wird. Dabei gilt für einen Werkstoff, je tiefer die Temperatur für eine gewährleistete Kerbschlagarbeit ist, desto sprödbbruchresistenter ist dieser. Bis zum Erreichen der jeweiligen Prüftemperatur verhält sich der betrachtete Stahl duktil, würde also mit Vorankündigung versagen. *Tabelle 12* zeigt die mindestens einzuhaltenden Werte beim Kerbschlagbiegeversuch, die jeweiligen Versuchstemperaturen sowie die dazugehörigen Kurzzeichen entsprechend der Bezeichnung der Stahlsorten.

Zeichen	KV J	Zeichen	T °C	Dicke in mm
J	27	R	+20	> 12 ≤ 250
		0	0	
		2	-20	> 12 ≤ 400
K	40	2		≤ 150

Tabelle 12: Kurzzeichen für Sprödbruchsicherheit, Werte gültig für Spitzkerblängsproben und Dickenbereich, nach [T12]

Die Umformbarkeit des Werkstoffes Stahl wird über die Bruchdehnung beurteilt. Festlegungen und Grenzwerte für unlegierte Baustähle bezüglich dieser mechanischen Werkstoffeigenschaft sind ebenfalls in DIN EN 10025-2

enthalten.

Die Schweißseignung eines Stahls nimmt mit steigendem Kohlenstoff- und Legierungsgehalt ab. Bewertet wird die Schweißseignung mit dem Kohlenstoffäquivalent CEV (Carbon Equivalent Value).²¹ Zur Berechnung des CEV dient die Formel des International Institute of Welding (IIW):

$$\text{CEV} = \text{C} + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Ni} + \text{Cu})/15 \quad [\text{Gewichtsprozent}]$$

Die Gehalte an Kohlenstoff und anderen Legierungselementen können Schmelzanalysen entnommen werden. DIN EN 10025-2 regelt ebenfalls die chemische Zusammensetzung, also die maximalen Anteile von Legierungselementen, unlegierter Baustähle (vgl. Tabelle 13).

Bezeichnung	Desoxidation	C	Si	Mn	P	S	N	Cu	Sonstige
S185	freigestellt	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	-
S235JR	FN	0.20	k.A.	1.40	0.040	0.040	0.012	0.55	-
S235J0	FN	0.17	k.A.	1.40	0.035	0.035	0.012	0.55	-
S235J2	FF	0.17	k.A.	1.40	0.030	0.030	k.A.	0.55	-
S275JR	FN	0.22	k.A.	1.50	0.040	0.040	0.012	0.55	-
S355JR	FN	0.24	0.55	1.60	0.040	0.040	0.012	0.55	-
S355K2	FF	0.22	0.55	1.60	0.030	0.030	k.A.	0.55	-
S450J0	FF	0.22	0.55	1.70	0.035	0.035	0.025	0.55	Nb/Ti ≤ 0.05; V ≤ 0.14
E355	FN	k.A.	k.A.					k.A.	k.A.

$A1_{\text{Gesamt}} \geq 0,02$ bzw. $A1_{\text{löslich}} \geq 0,015$, wenn A1 als das kornfeinende Element verwendet wird
Wenn $\text{Cu} > 0,40$ kann es beim Warmumformen zu Heißrissigkeit kommen
(Werkstoffanalysewerte werden stets in Gew% angegeben. Die Stückanalyse darf von der Schmelzanalyse innerhalb festgelegter Grenzen nach oben und unten abweichen, da die Seigerung berücksichtigt werden muss.)

Tabelle 13: Schmelzanalysewerte einiger unlegierter Baustähle aus DIN EN 10025-2 nach [T13]

²¹ Reuter, S.1

Grundsätzlich gilt, dass der Kohlenstoffanteil eines Stahls nicht über 0,22 Gewichtsprozent liegen sollte, um eine gute Schweißbarkeit zu garantieren. Der Wert des CEV in Abhängigkeit von Stahlsorte und Blechdicke ist auf Werte zwischen 0,35 und 0,49 (0,54) Gewichtsprozent beschränkt.²² Die Stähle der Gruppen JR, J0, J2 und K2 zeichnen sich durch eine gute Schweißeignung aus, alle Schweißverfahren sind anwendbar.

Da für den Stahl S185 sowie alle Maschinenbaustähle keine Anforderungen für die chemische Zusammensetzung in DIN EN 10025 formuliert sind, lässt sich keine Angabe zu ihrer Schweißeignung machen.

Unter den unlegierten Stählen spielt der in Tabelle 11 aufgeführte S450J0 eine besondere Rolle. Dieser hochfeste, mit den Elementen Titan, Vanadium und Stickstoff mikrolegierte Feinkornbaustahl wurde, obwohl artfremd, in die Gruppe der unlegierten Baustähle aufgenommen. Aber weder in europäischen noch in deutschen Normen existieren bis jetzt Regeln zur Verwendung dieser Stahlgüte. Darum muss abgewartet werden, ob und inwiefern dieser Stahl Verwendung findet.²³

Die allgemeinen, unlegierten Baustähle nach Teil 2 der DIN EN 10025 werden hauptsächlich für Konstruktionen im Bauwesen, also Stahlgeschossbauten, Stahlhallen, für Brückenbauwerke und im Stahlwasserbau für Wehre oder Schleusen, verwendet.

Darüber hinaus wird diese Stahlsorte im Fahrzeugbau, im Kranbau sowie für die Herstellung von Maschinengestellen eingesetzt. Die Maschinenbaustähle E295, E335 und E360 finden Verwendung in der Produktion von Achsen, Wellen, Keilen, Zahnrädern und Kurbeln.

²² Reuter, S.2

²³ Kuhlmann 2007, S.259



*Abb. 15: Beispiel Stahlhalle mit
Kranbahn 72m lang, 11m hoch, 20m
breit, Stahlhandel Burg (1995) nach
[B15]*

*Abb. 16: Schleuse / Staustufe
Riedenburg - Unterhaupt -
Schleusentore, (April 2008)
nach [B16]*



3.2.3 Normalisierte/normalisierend gewalzte Feinkornbaustähle – DIN EN 10025-3

Um bei Konstruktionen aus Stahl und anderen Werkstoffen Material und Gewicht einzusparen, ist es notwendig die Querschnitte der verwendeten Bauteile zu verkleinern. Das heißt, die Festigkeitswerte des jeweiligen Werkstoffs müssen erhöht werden. Bei Stahl dürfen unter dieser Festigkeitserhöhung allerdings nicht andere Eigenschaften wie seine Schweißeignung und Zähigkeit leiden. Grundsätzlich ist eine Festigkeitssteigerung, also die Erhöhung von Mindeststreckgrenze und Zugfestigkeit, über die Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes realisierbar.

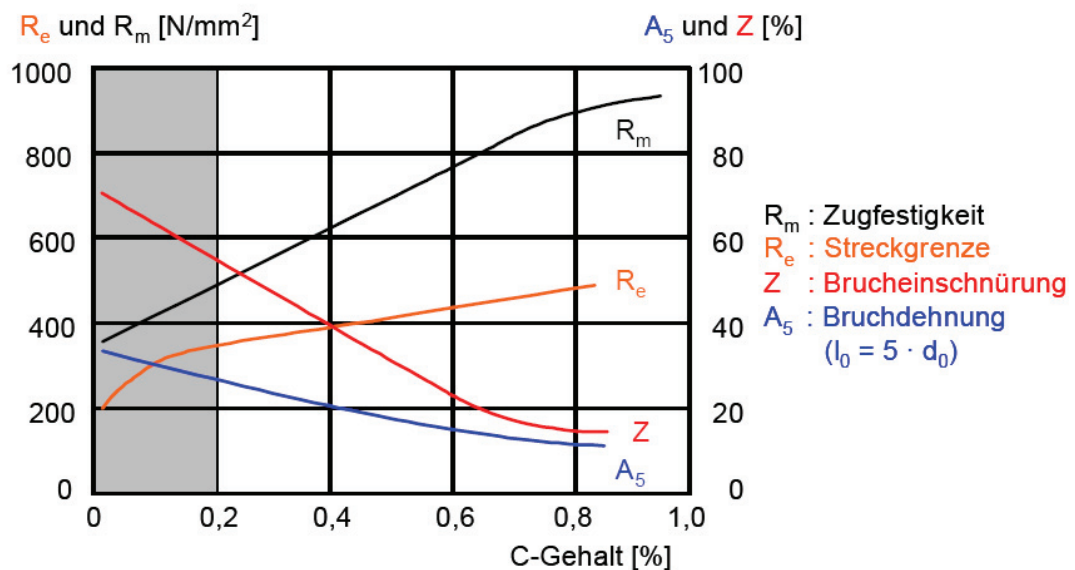


Abb. 17: Festigkeits- und Verformungsverhalten von Stahl in Abhängigkeit vom C-Gehalt nach [B17]

Da die Erhöhung dieses Legierungselementes allerdings die Schweiß-eignung, Umformbarkeit und Zähigkeit des Werkstoffes negativ beeinflusst (vgl. Abb. 17), werden die Verfahren des kontrollierten Warmwalzens eingesetzt, unter anderem das normalisierende Umformen (vgl. Abschnitt 1.6.4.1 und 1.6.4.2), um die gewünschten Werte für die Mindeststreckgrenze und Zugfestigkeit zu erreichen.

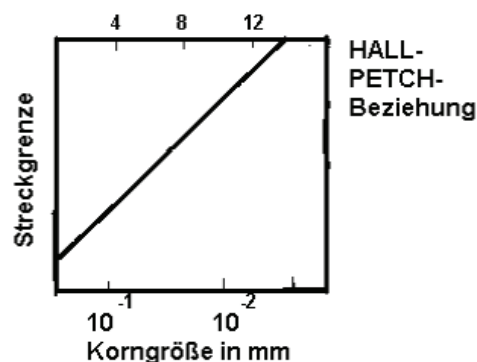


Abb. 18: Schematische Darstellung der Hall- Petch- Beziehung nach [B18]

Durch diese Verfahren wird das Stahlgefüge verfeinert, die Festigkeits-eigenschaften erhöht und Schweißseignung, Umformbarkeit sowie Spröbruchsicherheit des Stahls bleiben unbeeinträchtigt. Die Beziehung zwischen abnehmender Korngröße und steigender Streckgrenze wird Hall-Petch- Beziehung genannt und ist schematisch in *Abb. 18* dargestellt.

Durch die kontrollierte Wärmebehandlung sind bei diesen Stählen Streckgrenzen von bis zu 460 MPa erreichbar. Feinkornbaustähle mit Streckgrenzen ab 355 MPa gehören zu den härtesten Stählen. *Tabelle 14* zeigt normalisierte und thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle nach Teil 3 und 4 der DIN EN 10025, die nach ihren Streckgrenzen geordnet sind (in dieser Tabelle werden vergleichend auch die Feinkornbaustähle für Druckbehälter nach DIN EN 10028-3/5 betrachtet).

DIN EN 1010025			DIN EN 10028					Kerbschlagarbeit <i>KV</i> ³⁾				
T-3	T-5		T-3		T-5							
Kurzname ¹⁾		<i>R_m</i> ¹⁾ MPa	Kurz- name ¹⁾	<i>R_m</i> ¹⁾ MPa	Kurz- name ¹⁾	<i>R_m</i> ¹⁾ MPa	<i>A</i> ²⁾ in %	An Längsproben gemessen				
								Sorte	°C	0°	-20 °	-40
S275N NL	S275M ML	370 ...510	P275N NL1 NL2	390 ...510	----- ----		24	N/M NL/ML	47 55	40 47	-- 31	
S355N NL	S355M ML	470 ...630	P355N NL1 NL2	490 ...630	P355M ML1 ML2	450 ...610	22	Für P-Stähle gelten höhere <i>KV</i> - Werte ↓				
								Sorte	°C	0°	-20 °	-40
S420N NL	S420M ML	520 ...680	----- -----	----- -----	P420M ML1 ML2	500 ...660	19	N	40	30	--	
								NL1	50	35	27	
								NL2	60	40	30	
S460N NL	S460M ML	550 ...720	P460N NL1 NL2	570 ...720	P460M ML1 ML2	530 ...720	17	M	40	27	--	
								ML1	60	40	27	
								ML2	80	60	40	

¹⁾ Der Kurzname enthält die obere Streckgrenze in MPa für Nenndicken ≤ 16 mm.

²⁾ A-Werte gelten für S- und P-Sorten gleichermaßen.

³⁾ KV-Werte sind den Anhängesymbolen zugeordnet und gelten jeweils für alle Festigkeitsstufen.

Tabelle 14: Vergleich der schweißgeeigneten Feinkornbaustähle DIN EN 10025-3/4 und DIN EN 10028-4/5 nach [T14]

Aus *Tabelle 14* sind wieder die jeweiligen Streckgrenzen und die

gewährleistete Mindestkerbschlagarbeit an einer Längsprobe zu entnehmen. Normalisierte/normalisierend gewalzte Feinkornbaustähle sind sprödbbruchresistenter als allgemeine Baustähle. Es sind bei gleichen Prüftemperaturen höhere Werte der Mindestkerbschlagarbeit erzielbar beziehungsweise tiefere Prüftemperaturen mit einer entsprechenden Mindestkerbschlagarbeit gewährleistet. Stähle für den Einsatz bei tiefen Temperaturen werden zusätzlich durch den Buchstaben „L“ gekennzeichnet. Wie die Schmelzanalyse zeigt (vgl. *Tabelle 15*), wird die hohe Streckgrenze nicht über eine Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes eingestellt, sondern durch das feinkörnige Gefüge dieser Stähle bedingt. Das Kohlenstoffäquivalent CEV liegt bei Werten $\leq 0,55$ Gewichtsprozent, nur knapp über dem der unlegierten Baustähle, und zeigt, dass diese Stähle ebenfalls gut schweißgeeignet sind. Stähle mit einer Streckgrenze über 360 MPa müssen allerdings zum Schweißen vorgewärmt werden, um einer eventuellen Kaltrissbildung entgegenzusteuern. Kaltrisse werden durch den Eintrag von Wasserstoff in den Werkstoff während des Schweißvorgangs verursacht.²⁴

Bezeichnung	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	A1 _{ges}	Ti	Ni	Cu	N
	$\leq$	$\leq$		$\leq$	$\leq$	$\leq$	$\leq$	$\geq$	$\leq$	$\leq$	$\leq$	$\leq$
S420N	0.22	0.65	0.95-1.80	0.040	0.035	0.06	0.22	0.015	0.04	0.85	0.60	0.027
S420NL	0.22	0.65	0.95-1.80	0.035	0.030	0.06	0.22	0.015	0.04	0.85	0.60	0.027

Tabelle 15: Schmelzanalyse einiger hochfester Feinkornbaustähle in Gewichtsprozent, DIN EN 10025-3 nach [T15]

Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften können dem Stahl Mikrolegierungselemente wie Mangan, Titan, Vanadium oder Niob zugesetzt werden, deren Gehalte in DIN EN 10025-3 beschränkt sind (vgl. *Tabelle 15*). Normalisierte Feinkornbaustähle werden in erster Linie aus ökonomischen Gründen eingesetzt. Durch die Reduzierung an Material und Gewicht ist es möglich die Kosten der Konstruktion zu senken. Durch die schlankeren

²⁴ Reuter, S.4

Querschnittsformen ist es möglich ästhetisch und architektonisch anspruchsvoll zu konstruieren. Feinkornbaustähle werden vor allem bei Schweißkonstruktionen verbaut.

3.2.4 Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle – DIN EN 10025-4

Stähle bei denen durch eine spezielle thermomechanische Behandlung (vgl. Abschnitt 1.6.4.3 und 1.6.4.4) und Mikrolegierungselemente besondere Eigenschaften eingestellt werden, werden in Teil 4 der DIN EN 10025 betrachtet und mit dem Buchstaben „M“ bezeichnet. Wie auch bei den normalisierten Feinkornbaustählen und in *Tabelle 14* ersichtlich, werden auch bei dieser Stahlsorte Mindeststreckgrenzen von bis zu 460 MPa erzielt. Die Festigkeitseigenschaften, also Zugfestigkeit und Mindeststreckgrenze, nehmen bei thermomechanisch gewalzten, feinkörnigen Baustählen ebenfalls mit steigender Erzeugnisdicke ab (vgl. *Tabelle 16*).

	Minimale Streckgrenze ReH und Zugfestigkeit Rm in [Mpa], Erzeugnisdicke d in [mm]											
	d ≤ 16		16 < d ≤ 40		40 < d ≤ 63		63 < d ≤ 80		80 < d ≤ 100		100 < d ≤ 120	
	ReH	Rm	ReH	Rm	ReH	Rm	ReH	Rm	ReH	Rm	ReH	Rm
S355M	355	470 - 630	345	470 - 630	335	450 - 610	325	440 - 600	325	440 - 600	320	430 - 590
S355ML												
S420M	420	520 - 680	400	520 - 680	390	500 - 660	380	480 - 650	370	470 - 630	365	460 - 620
S420ML												
S460M	460	540 - 720	440	540 - 720	430	530 - 710	410	510 - 690	400	500 - 680	380	490 - 660
S460ML												

Tabelle 16: Streckgrenze und Zugfestigkeit thermomechanisch gewalzter Feinkornbaustähle in Abhängigkeit von der Erzeugnisdicke, DIN EN 10025-4 nach [T16]

Insgesamt lässt sich feststellen, dass thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle nach DIN EN 10025-4 die selben mechanischen

Eigenschaften bezüglich Sprödbrechtsicherheit, Umformbarkeit, Zähigkeit und Festigkeit aufweisen wie die normalisierten Feinkornbaustähle.

Der grundlegende Unterschied ist die bessere Schweißbarkeit. Bedingt durch das, bei der Wärmebehandlung erzielte, noch feinere Gefüge kann der Gehalt an Legierungselementen noch niedriger gehalten werden, ohne dass sich eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften einstellt. In *Tabelle 17* sind die Legierungsgehalte eines normalisierten und eines thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustahls vergleichend dargestellt. Dabei fällt auf, dass das Kohlenstoffäquivalent CEV, der Indikator für die Schweißbarkeit eines Stahls, bei dem TM- Stahl geringer ist als das des normalisierend gewalzten Stahls. Die Höchstwerte der Gehalte an Legierungselementen von thermomechanisch gewalzten Stählen sind ebenfalls in DIN EN 10025-4 geregelt.

	S460NL		S460ML	
	nach EN 10025-3	typ. Analyse	nach EN 10025-4	typ. Analyse
C	≤ 0.20	0.17	≤ 0.16	0.08
Si	≤ 0.60	0.45	≤ 0.60	0.46
Mn	≤ 1.60	1.65	≤ 1.70	1.64
P	≤ 0.025	0.015	≤ 0.025	0.012
S	≤ 0.02	0.01	≤ 0.02	0.005
Nb	≤ 0.05	-	≤ 0.05	0.02
V	≤ 0.20	0.17	≤ 0.12	-
Mo	≤ 0.10	-	≤ 0.20	-
Cu	≤ 0.55	-	≤ 0.55	0.17
Ni	≤ 0.80	0.29	≤ 0.80	0.20
CEV	≤ 0.53	0.50	≤ 0.47	0.39
Pcm		0.29		0.20
CET		0.34		0.26

Tabelle 17: Typische Schmelzanalyse eines S460ML in Vergleich zu einem Normalisierten S460NL (Blechdicke: 50 mm) nach [T17]

Zur Verhinderung der Kaltrissbildung nach dem Schweißen ist ein Vorwärmen in den meisten Fällen ebenfalls notwendig. Allerdings müssen dabei nicht so hohe Temperaturen erreicht werden wie bei den allgemeinen

Baustählen oder den normalisierten Feinkornbaustählen. Abb. 19 stellt die Vorwärmtemperaturen eines S460N und eines S460M vergleichend gegenüber. Dabei fällt auf, dass die erforderliche Vorwärmtemperatur nicht nur von der Feinkörnigkeit des Stahlgefüges, sondern auch von der Erzeugnisdicke abhängt. Zur Berechnung der Vorwärmtemperatur dient nach Stahleisenwerkstoffblatt 088 (SEW 088) das Kohlenstoffäquivalent CET (vgl. Tabelle 17). Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle sind nicht so kaltrissanfällig wie Stahlsorten mit größerem Gefüge. Die geringere Kaltrissanfälligkeit der TM- Stähle ist in Tabelle 17 durch das niedrige P_{cm} – Äquivalent ausgedrückt.²⁵

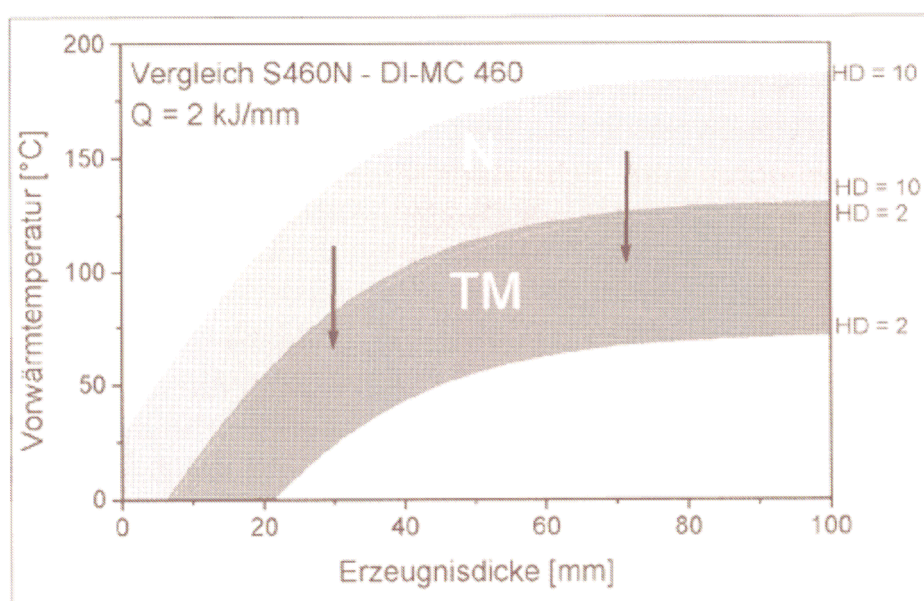


Abb. 19: Vergleich der Vorwärmtemperaturen eines S460N und S460M (DI-MC 460) für verschiedene Wasserstoffeinbringungen HD nach [B19]

Das Abkühlen der Schweißnaht sollte so gesteuert werden, dass die Abkühlzeit $t_{8/5}$ der Schweißnaht von 800 °C auf 500 °C zwischen 10 und 25 Sekunden liegt. Eine schnellere Abkühlung würde den Werkstoff aufhärten.

²⁵ Kuhlmann 2007, S.277 ff.

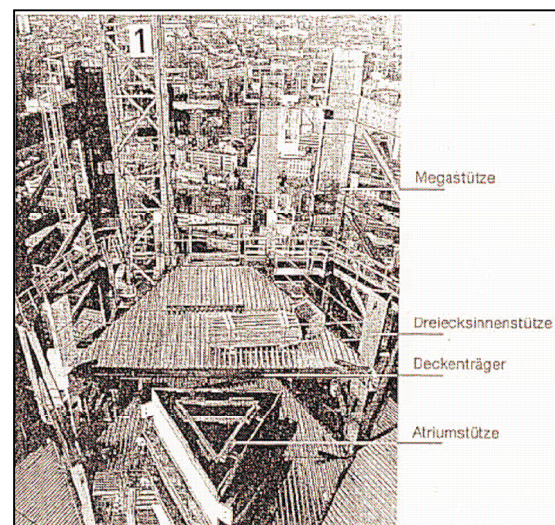
Zu langsames Abkühlen würde die Grobkornbildung fördern und so das feine Gefüge zerstören. Zum Abbau von Spannungen kann darüber hinaus ein Spannungsarmglühen in Betracht gezogen werden, wie es beispielsweise im Offshore- Bereich üblich ist.

Verwendung finden die thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustähle vornehmlich im schweren Stahlhochbau.



Abb. 20: Commerzbank Tower in
Frankfurt am Main nach [B20]

Abb. 21: Skelettkonstruktion des
Commerzbank Towers
nach [B21]



Der 298,74 m hohe Commerzbank Tower in Frankfurt am Main besteht aus einem 19500 t schweren Stahlskelett. Davon sind 5.200 t S355M und 2.700 t S460M, die vor allem in Stützenkonstruktionen verbaut sind.²⁶

In der LTU- Arena Düsseldorf besteht die Untergurtkonstruktion der Haupt- und Nebenträger aus S355ML.

Im Stahlbrückenbau ist das wohl bekannteste Bauwerk, in dem thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle verbaut wurden, das Öresund- Viadukt (vgl. Abb. 22). Diese Brückenkonstruktion, am 01.07.2000 für den Verkehr geöffnet, verbindet die dänische Hauptstadt Kopenhagen mit dem schwedischen Malmö. Um größere Spannweiten zu realisieren und die Anzahl der Brückenpfeiler zu reduzieren, wurden unter anderem 16.000 t S420M/ML für die Hauptbrücke und 60.000 t S460M/ML für die Vorlandbrücken verwendet.²⁷



Abb. 22: Öresund- Viadukt, Hauptbrücke nach [B22]

Das Viadukt ist die längste Schrägseilbrücke der Welt und hat einen doppelstöckigen Überbau, unten mit einer Bahntrasse, oben mit einer

²⁶ Kuhlmann 2007, S.300

²⁷ Kuhlmann 2007, S.307

Autobahn. Die Hauptbrücke hat eine Gesamtlänge von 1.092 m und liegt 57 m über der Wasseroberfläche. Die Vorlandbrücken sind insgesamt 3.739 m beziehungsweise 3.014 m lang.

Im Konstruktiven Wasserbau wird TM- Stahl weniger wegen seiner Festigkeits- als wegen seiner guten Verarbeitungseigenschaften eingesetzt. Beim Maas- Sperrwerk (Maeslant- Kering) in den Niederlanden wurden 30.000 t S355M/ML zur Konstruktion eines Stahltores verwendet, das eine Überschwemmung des Hafens von Rotterdam und des Umlandes verhindern soll.²⁸ An der 360 m breiten Stelle fließen die Wassermassen aus Maas und Rhein in die Nordsee (vgl. Abb. 23).



Abb. 23: Sperrwerk Maeslant- Kering nach [B23]

²⁸ Kuhlmann 2007, S.309

3.2.5 Wetterfeste Baustähle – DIN EN 10025-5

Im Grunde genommen sind die wetterfesten Baustähle eine Sonderform der allgemeinen, unlegierten Baustähle. Der große und triviale Unterschied ist die fehlende Beschichtung, etwa ein Farbanstrich, bei den wetterfesten Baustählen gegen die atmosphärische Korrosion. Diese Stähle sind zusätzlich mit Kupfer, Nickel, Chrom und Phosphor legiert und widerstehen den Witterungsbedingungen durch eine Sperrschicht, die als Rostfärbung sichtbar ist. Wetterfeste Baustähle erhalten das Kurzzeichen „W“, mit Phosphor legierte Stähle zusätzlich ein „P“.

Diese Stahlsorte wurde 1926 im Deutschen Reich entwickelt. Die Vereinigte Stahlwerke AG aus Dortmund brachte zwei Jahre später auch den ersten wetterfesten Baustahl, den Union Baustahl, auf den Markt.²⁹

Hergestellt werden diese Stähle auf dieselbe Weise wie die allgemeinen Baustähle. Daraus resultieren auch die ähnlichen mechanischen Eigenschaften, die in DIN EN 10025-5 geregelt sind (vgl. *Tabelle 18*).

Sorte nach DIN EN 10025-5	Streckgrenze R_{eH} [MPa]	Zugfestigkeit R_m [MPa]	Kerbschlagarbeit		Bruchdehnung $A_{\text{längs}}$ [%]
			KV [J]	Temperatur [°C]	
S235J0W	235	340 - 470	27	0	26
S235J2W	235	340 - 470	27	-20	26
S355J0W	355	490 - 630	27	0	22
S355J0WP	355	490 - 630	27	0	22
S355J2W	355	490 - 630	27	-20	22
S355J2WP	355	490 - 630	27	-20	22
S355K2W	355	490 - 630	40	-20	22

Tabelle 18: Eigenschaften wetterfester Baustähle, $d \leq 16$ mm, DIN EN 10025-5 nach [T18]

Auch die Schweißeignung dieser Stähle entspricht in etwa der, der jeweiligen Festigkeitsklasse der allgemeinen Baustähle. Wichtig beim Schweißen wetterfester Baustähle ist die Verwendung eines Schweißgutes, welches

²⁹ Stahl-Informations-Zentrum 2004, S.4

einen ähnlichen Legierungsgehalt aufweist wie der Grundwerkstoff, also auch wetterfest ist. Ein Verschweißen von wetterfesten und allgemeinen, sowie wetterfester Baustähle unterschiedlicher Festigkeit untereinander ist möglich. Wegen ihres hohen Phosphorgehaltes sind die WP- Stähle nicht schweißgeeignet und deshalb im bauaufsichtlichen Bereich nicht zugelassen.³⁰ Vor dem Schweißen muss der Werkstoff durch ein Abschleifen der Sperrschicht vorbereitet werden, so dass eine 10 bis 20 mm breite Schweißzone freigelegt ist.

Die maximalen Legierungsgehalte der wetterfesten Baustähle sind ebenfalls in DIN EN 10025 geregelt und auszugsweise in *Tabelle 19* dargestellt.

Stähle, die einen Legierungsgehalt an Phosphor haben, der zwischen 0,06 und 0,15 Gewichtsprozent liegt, erhalten zusätzlich das Kurzzeichen „P“.

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
S235J0W	0.13	0.40	0.50	0.040	0.035	0.55	0.80	0.65
S355J0W	0.15	0.50	1.3	0.035	0.035	0.55	0.80	0.65
S355J0WP	0.12	0.75	1.00	0.15	0.035	0.55	1.25	0.65

Tabelle 19: Legierungsgehalte einiger wetterfester Baustähle DIN EN 10025-5 nach [T19]

Durch die Deckschicht wird der Stahl vor weiterer Korrosion geschützt. Diese Sperrschicht besteht vor allem aus Kupfersulfaten, bei WP- Stählen auch aus Kupferphosphaten, und bildet sich unter atmosphärischen Witterungsbedingungen innerhalb von 1,5 bis 3,5 Jahren vollständig aus. Sie erneuert sich nach Beschädigungen selbstständig und verwährt Wasser, Sauerstoff und Schwefeloxiden den Zugang zum Stahl (vgl. *Abb. 24*).

³⁰ Kuhlmann 2007, S.291

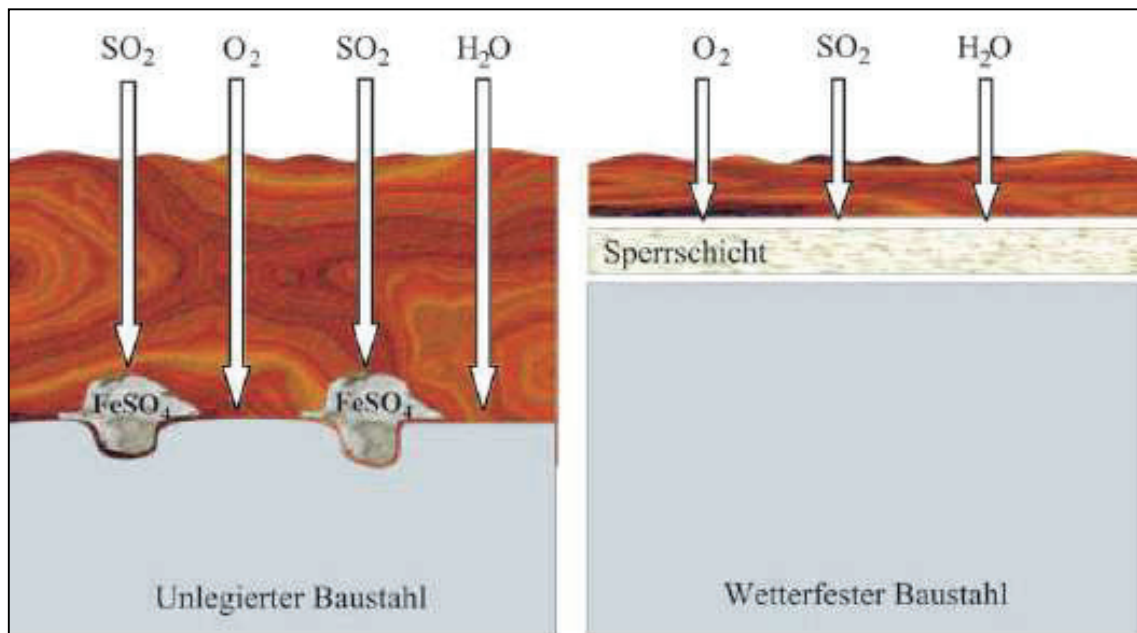


Abb. 24: Prinzipdarstellung des Abrostungsverhaltens unlegierter und wetterfester Baustähle nach [B24]

Damit sich die Sperrschicht vollständig ausbilden kann, darf das Bauteil nicht Dauerbefeuchtung ausgesetzt sein und eventuell anfallendes Niederschlagswasser muss abfließen können. Kleine Spalte zwischen zwei Bauteilen sollten vermieden werden, da Wasser an diese Stellen über Kapillarkräfte gelangen könnte. Darüber hinaus sollten Schutzbeschichtungen gegen Kondenswasser eingesetzt werden, welches sich auf der Innenseite von Bauteilen, etwa bei Fassadenkonstruktionen aus W- Stahl, bildet. Kontakt der Stähle zu Chloriden aus Tauwasser oder in Meeresluft ist ebenfalls zu vermeiden.

Heute, nachdem die Regelwerke überarbeitet wurden, sind diese Stähle sehr beliebt, denn bei ihrem Einsatz kann auf einen Korrosionsschutz verzichtet werden, was ein kostengünstiges Konstruieren ermöglicht.³¹

Verwendet werden die wetterfesten Baustähle vielseitig, im konstruktiven

³¹ Kuhlmann 2007, S.290

Hochbau vor allem als Fassadenkonstruktionen. *Abb. 25* zeigt das Archäologische Museum in Kalkriese, bei dem Platten aus W- Stahl an einer Stahlskelettkonstruktion befestigt sind.



Abb. 25: Archäologisches Museum Kalkriese, nördlich von Osnabrück nach [B25]

Auch im Brückenbau wird die Widerstandsfähigkeit der wetterfesten Baustähle genutzt, vor allem hinsichtlich einer wenig aufwendigen und kostengünstigen Unterhaltung von Brückenbauwerken. Bei der dreifeldrigen Fußgänger- und Radfahrerbrücke über den Seerhein in Konstanz (vgl. *Abb. 26*) wurden die beiden Untergurte aus geschweißtem W- Stahl hergestellt . Weitere Anwendung finden wetterfeste Stähle im Bau von Stromleitungsmasten, Schornsteinen oder in der Kunst für Skulpturen.



*Abb. 26: Fußgänger- und Radfahrerbrücke über den Seerhein in Konstanz
nach [B26]*

3.2.6 Hochfeste, wasservergütete Baustähle – DIN EN 10025-6

Die hochfesten, wasservergüteten Baustähle wurden in den 1960er und 1970er Jahren für Anwendungsfälle im Kran- und Fahrzeugbau, aber auch schwere Stahlhochbaukonstruktionen und den Brückenbau entwickelt.³² In diesen Anwendungsgebieten steht das Einsparen von Gewicht beim Konstruieren im Vordergrund, was durch die hochfesten, wasservergüteten Baustähle möglich ist.

Wie Abb. 27 zeigt, wurden die Festigkeitseigenschaften dieser Stähle in den folgenden Jahren stetig verbessert, sodass heute Streckgrenzen von bis zu 1100 MPa erreichbar sind. Diese Stähle werden im Lieferzustand mit „Q“ abgekürzt.

³² Kuhlmann 2007, S.32

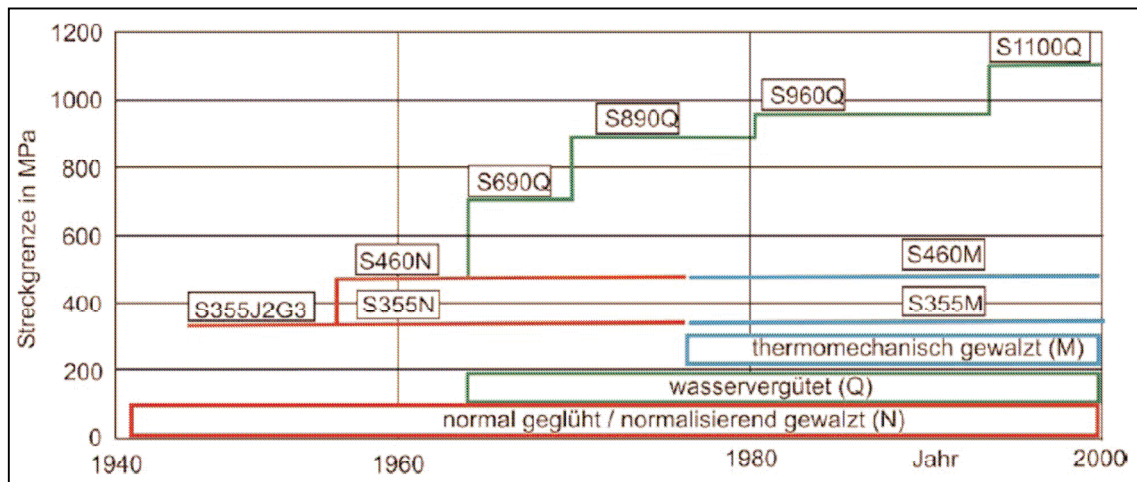


Abb. 27: Entwicklung der höherfesten Stahlsorten in den letzten Jahren
nach [B27]

Grundsätzlich werden hochfeste Stähle durch die zwei Verfahrensschritte Härten und Anlassen (vgl. Abschnitt 1.6.4.5) vergütet. Durch die gezielte Wärmebehandlung bei der Herstellung bilden die hochfesten, wasservergüteten Baustähle ebenfalls ein feinkörniges Gefüge aus. Damit werden unter anderem die in *Tabelle 20* aufgeführten mechanischen Eigenschaften eingestellt, die in DIN EN 10025-6 erfasst sind. Die Festigkeit nimmt wie bei den Stählen der anderen Klassen mit steigender Erzeugnisdicke ab. Innerhalb einer Festigkeitsstufe unterscheiden sich die Stähle lediglich durch verschiedene Widerstände gegen Sprödbbruch (vgl. *Tabelle 20*) und werden daher in die Klassen Q, QL und QL1 unterteilt. Mit steigender Festigkeit nimmt allerdings die Umformbarkeit der Stähle ab, was durch die kleiner werdenden Werte für die Bruchdehnung ersichtlich ist.

Sorte nach	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Kerbschlagarbeit		Bruchdehnung
DIN EN 10025-6	R _{eH} [MPa]	R _m [MPa]	KV [J]	Temperatur [°C]	A _{längs} [%]
S460Q	460	550 - 720	40	0	17
S460QL			30	-40	
S460QL1			30	-60	
S500Q	500	590 - 770	40	0	17
S500QL			30	-40	
S500QL1			30	-60	
S550Q	550	640 - 820	40	0	16
S550QL			30	-40	
S550QL1			30	-60	
S620Q	620	700 - 890	40	0	15
S620QL			30	-40	
S620QL1			30	-60	
S690Q	690	770 - 940	40	0	14
S690QL			30	-40	
S690QL1			30	-60	
S890Q	890	940 - 1100	40	0	11
S890QL			30	-40	
S890QL1			30	-60	
S960Q	960	980 - 1150	40	0	10
S960QL			30	-40	
S960QL1			30	-60	

Nicht genormt ist S1100QL mit R_m = 1200 bis 1500 MPa bei 8 % Bruchdehnung, S-Gehalt 0,005 % (XABO® 1100)

Tabelle 20: Mechanische Eigenschaften hochfester, wasservergüteter Feinkornbaustähle, $3 \text{ mm} \leq d \leq 50 \text{ mm}$, DIN EN 10025-6 nach [T20]

Wie aus *Tabelle 21* hervorgeht, haben die hochfesten, wasservergüteten Feinkornbaustähle einen höheren Legierungsgehalt als thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle. Mit den Legierungselementen wird unter anderem die Vergütung gesteuert. Damit sind diese direkt an der Einstellung der spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Festigkeitsklasse der hochfesten Baustähle beteiligt und unverzichtbar. Die Werte für die maximalen Gehalte der Legierungselemente dieser Stähle sind ebenfalls in

DIN EN 10025-5 geregelt.

	S460ML		S460QL1		S690 QL1	
	nach EN 10025-4	typ. Analyse	nach EN 10025-6	typ. Analyse	nach EN 10025-6	typ. Analyse
C	≤ 0.16	0.08	≤ 0.20	0.15	≤ 0.20	0.16
Si	≤ 0.60	0.46	≤ 0.80	0.45	≤ 0.80	0.30
Mn	≤ 1.70	1.65	≤ 1.70	1.50	≤ 1.70	1.45
P	≤ 0.03	0.011	≤ 0.02	0.012	≤ 0.02	0.012
S	≤ 0.025	0.002	≤ 0.01	0.005	≤ 0.01	0.005
Nb	≤ 0.05	< 0.04	≤ 0.06	0.017	≤ 0.06	-
V	≤ 0.12	-	≤ 0.12	-	≤ 0.12	0.04
Mo	≤ 0.20	-	≤ 0.07	0.115	≤ 0.07	0.37
Ni	≤ 0.45	0.19	≤ 2.00	-	≤ 2.00	0.15
Cr	≤ 0.60	-	≤ 1.50	-	≤ 1.50	0.55
Cu	≤ 0.60	0.17	≤ 1.50	-	≤ 0.50	-
B		-	≤ 0.005	-	≤ 0.005	0.002
CEV		0.39		0.42		0.60
Pcm		0.19		0.25		0.31
CET		0.26		0.31		0.38

Tabelle 21: Chemische Zusammensetzung des Stahls S690QL1 im Vergleich zu anderen im Stahlbau üblichen Sorten (60 mm Erzeugnisdicke) nach [T21]

Bis zu der Streckgrenzenstufe S460 sind die vergüteten Feinkornbaustähle sehr gut schweißgeeignet für die Verfahren des Schutzgas- und das Elektrolichtbogenschweißen. Die Schweißbeignung dieser Stahlgüte ist dabei zwischen die hervorragende der TM- Feinkornbaustähle und die gute der normalisierten Feinkornbaustähle gleicher Streckgrenze einzuordnen.³³ Mit steigender Streckgrenze steigt aber auch die Kaltrissanfälligkeit der hochfesten, wasservergüteten Feinkornbaustähle, was sich in *Tabelle 21* durch das ansteigende Pcm- Äquivalent vom S460QL1 zum S690QL1 ausdrückt. Aus diesem Grund ist es wichtig das Prinzip der kontrollierten Wärmeeinbringung beziehungsweise -steuerung beim Schweißen auch auf

³³ Schröter 2003, S.6

diese Stähle anzuwenden. Dahinter verbergen sich die folgenden Schritte:

- Einhaltung der Vorwärmtemperatur, die sich am CET- Äquivalent orientiert.
- Einhaltung der Abkühlzeit $t_{8/5}$. Aus *Tabelle 22* ergibt sich, dass das optimale Zeitfenster für den Abkühlvorgang mit steigender Streckgrenze immer kleiner wird. Es ist also komplizierter und anspruchsvoller ein Aufhärten des Werkstoffs, bei Unterschreitung der Abkühlzeit, beziehungsweise die Grobkornbildung, infolge einer Überschreitung der Abkühlzeit , zu verhindern.

Stahlgüte	Minimale	Maximale
	Abkühlzeit	Abkühlzeit
	[s]	[s]
S460Q	8	35
S500Q	10	30
S550Q	10	25
S620Q	10	22
S690Q	5	20
S890Q	5	12
S960Q	5	10

Tabelle 22: Minimale und Maximale Abkühlzeiten beim Schweißen für verschiedene wasservergütete Feinkornbaustähle nach [T22]

- Verwendung eines wasserstoffarmen Schweißgutes, wie einem Schweißpulver oder basischen Elektroden, um wasserstoffinduzierte Kaltrisse zu vermeiden.

Bei den hochfesten, wasservergüteten Feinkornbaustählen ist ein Spannungsarmglühen eher unüblich, da durch diese Wärmebehandlungsverfahren die Festigkeitseigenschaften, die beim Vergüten eingestellt wurden, aufgehoben werden könnten. Zum Kaltumformen sind diese Stähle

problemlos geeignet. Dabei ist nur zu beachten, dass die Verformungen nur mit erheblichen Kraftaufwand erzielbar sind und mit einer Verfestigung des Werkstoffs sowie einem Verlust an Zähigkeit einhergehen.

Da die Erzeugung von hochfesten, wasservergüteten Stählen kostenintensiv ist, werden diese Stähle nur dort eingesetzt, wo sie unverzichtbar sind und es keine Alternative gibt.

Beim Bau von schweren Maschinen und Geräten geht die, durch den Einsatz dieser Stahlgüten ermöglichte, Einsparung an Gewicht einher mit einer Einsparung an Antriebskosten. Aus diesem Grund sind beispielsweise nahezu alle Blechkonstruktionen bei Mobilkranen aus hochfesten Stählen hergestellt.³⁴ Dadurch ist es möglich große Tragfähigkeiten zu erzielen ohne gleichzeitig an Mobilität einzubüßen. Selbst für den öffentlichen Straßenverkehr sind diese Mobilkrane tauglich, da sie durch ihr relativ geringes Konstruktionsgewicht zulässige Achslasten nicht überschreiten. Gefertigt werden diese Krane in den drei großen Einheiten Fahrzeugrahmen, Drehbühne und Teleskopausleger.



Abb. 28: Mobilkran LTM 1400/1 von Liebherr nach [B28]

Diese Einheiten werden zusammengefügt, beispielsweise schweißtechnisch,

³⁴ Hamme u.a. 2000, S.7

und so das Endprodukt montiert. Eingesetzt werden Mobilkrane zum Heben und Montieren schwerer Teile, wie etwa beim Aufstellen einer Stahlhalle.

Das Sony- Center am Potsdamer Platz in Berlin ist ein Beispiel für die Anwendung hochfester, wasservergüteter Feinkornbaustähle im schweren Stahlhochbau. In der 3500 m² großen Dachkonstruktion wurden 700 t Stahl verbaut, unter anderem die Güte S690QL1.³⁵ Wie *Bild 29* zeigt, ist das kuppelähnliche Glasdach gespannt wie ein Regenschirm und überträgt die Lasten aus seinem Eigengewicht sowie Nutzlasten auf die mittig platzierte Luftstütze. Die Stützenkonstruktion ist über Zugseile an einen Ringbalken angeschlossen, in den die Lasten der Stütze eingeleitet werden. Die Anschlüsse zwischen den Seilen und dem Ringbalken wurden aus hochfestem Stahl gefertigt.

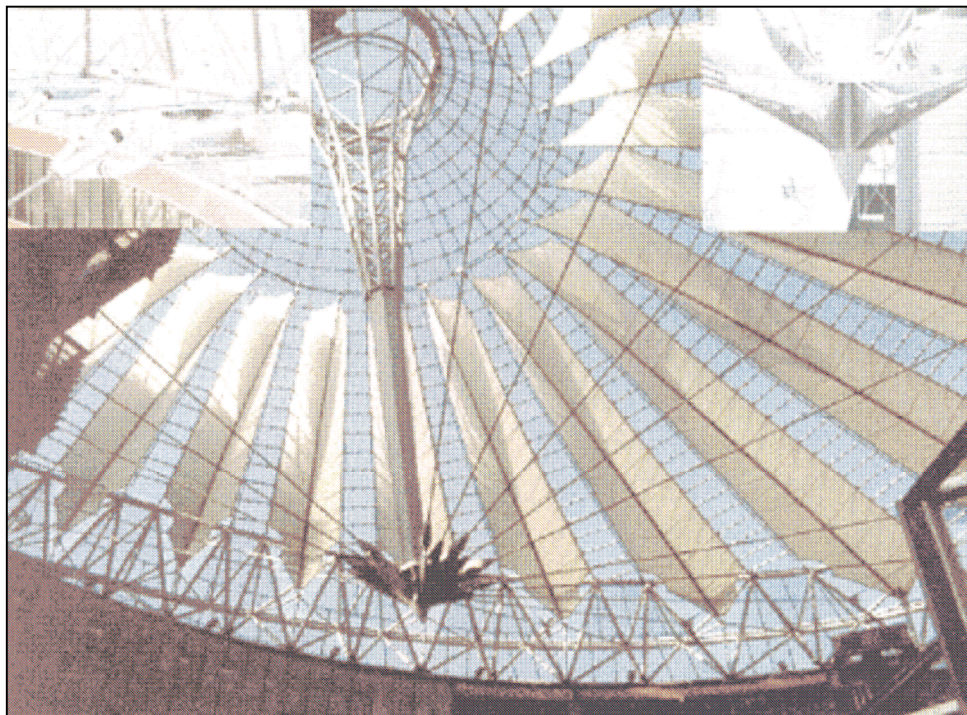


Abb. 29: Forumüberdachung des Sony- Center nach [B29]

³⁵ Schröter 2003, S.7

Auch im Brückenbau sind die hochfesten Stahlgüten für einige Bauteile unverzichtbar geworden. So wurde neben den Stählen S460M/ML auch S460QL in Dickenbereichen von bis zu 200 mm zur Konstruktion der 2400 m langen Mehrfach- Schrägseilbrücke über das Tal von Millau in Frankreich verwendet (vgl. *Bild 30*).³⁶



Bild 30: Viadukt von Millau nach [B30]

Aber auch bei kleineren Projekten kommen hochfeste Stahlbleche, vor allem als Anschlusskonstruktionen, zum Einsatz. An der Verbundbrücke des Güterverladezentrums im bayerischen Ingolstadt wurde der Fahrbahnoberbau durch Anschlussbleche aus S690QL1 mit den Stützen verbunden.³⁷ *Bild 31* zeigt ein entsprechendes Detail aus den Bauplänen.

³⁶ Kuhlmann 2007, S.309

³⁷ Kuhlmann 2007, S.304 f.

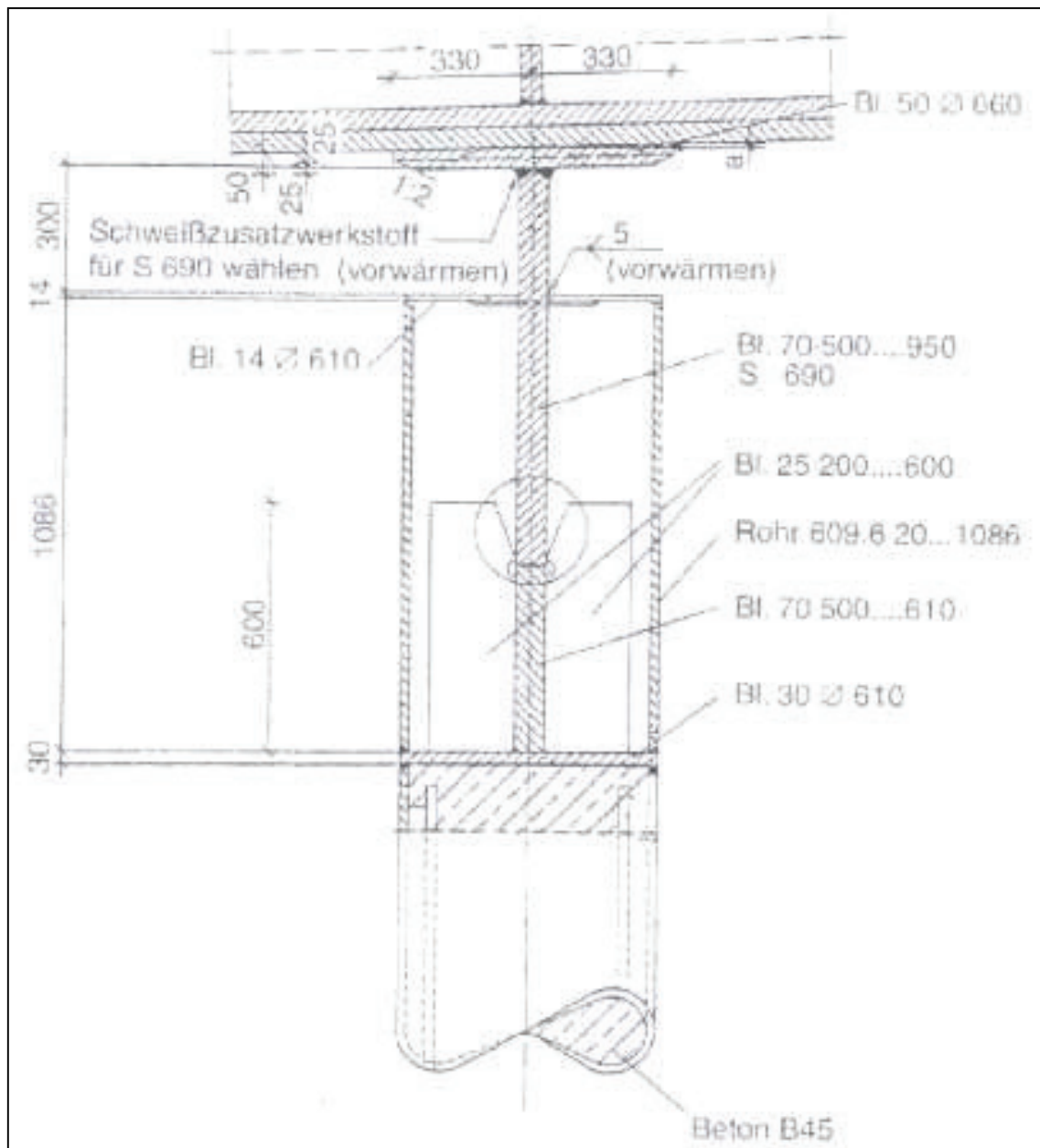


Bild 31: Stützen mit Übergang der Brücke GVZ Ingolstadt nach [B31]

3.3 Bezeichnung der Stähle nach DIN EN 10027

Die DIN EN 10027 besteht aus zwei Teilen, wobei Teil 1 in der aktuellen Form seit 2005 und Teil 2 seit 1992 gültig sind. Sie ersetzt die Vorgängernormen DIN 17006 und DIN 17007. Im Folgenden wird das System der Bezeichnungen in kurzer Form erklärt.

3.3.1 Bezeichnung der Stähle nach DIN EN 10027-1

Der erste Teil der DIN EN 10027 regelt die Bezeichnung der Stähle nach ihren Kurznamen. Dabei wird nochmals unterschieden zwischen der Bezeichnung nach Gruppe 1 und Gruppe 2.

Die Bezeichnung eines Stahls nach Gruppe 1 lässt auf seine mechanischen Eigenschaften und seine Verwendung schließen. Sie gibt Auskunft über seine Streckgrenze, Sprödbrochbarkeit und Herstellungsart (vgl. *Bild 32*).

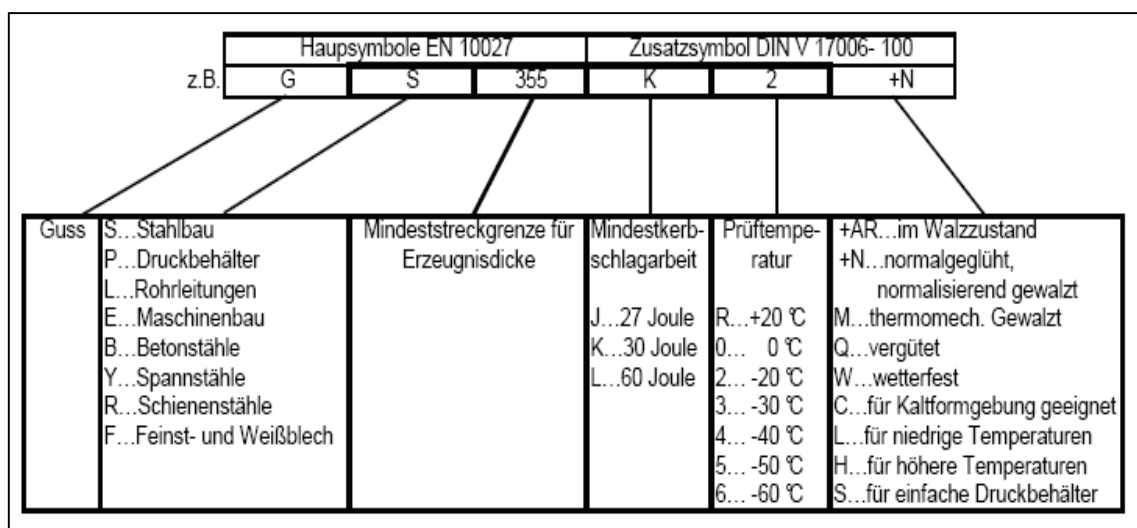


Bild 32: Haupt- und Zusatzbezeichnung der Stähle in Europa, DIN EN 10027-1 nach [B32]

Die Bezeichnung eines Stahls nach Gruppe 2 erfolgt nach seiner chemischen Zusammensetzung. Der Kurzname wird zusammengesetzt aus der Abkürzung des jeweiligen Elements entsprechend des Periodensystems der Elemente und einem Zahlenwert, welcher mit einem Multiplikator umgerechnet werden kann. Die Umrechnung gibt dann Aufschluss über den Anteil in Gewichtsprozent des jeweiligen Elements in dem Stahl. Ein Beispiel für die Bezeichnung eines Stahls nach Gruppe 2, DIN EN 10027-1 wäre:

10CrMo9-10

Dieser Stahl hat einen Gehalt in Masseprozent an Molybdän von 1,0, an Chrom von 2,5 und Kohlenstoff von 0,1.

3.3.2 Bezeichnung der Stähle nach DIN EN 10027-2

Im zweiten Teil der DIN EN 10027 werden Werkstoffe, neben metallischen auch nichtmetallische, mit sogenannten Werkstoffnummern bezeichnet. Mit einem in dieser Norm festgelegten Zahlenschlüssel lässt sich der jeweilige Werkstoff in Bezug auf Eigenschaften und Herstellungsart benennen. *Tabelle 23* zeigt Stähle nach DIN EN 10025 und ihre Werkstoffnummern.

DIN EN 10025	Werkstoffnummer DIN EN 10027-2
S235JR	1.0038
S355K2	1.0596
S420NL	1.8912
S275M	1.8818
S460ML	1.8838
S355K2W	1.8967
S500QL1	1.8984
S960QL	1.8933

Tabelle 23: Einige Stähle und die dazugehörigen Werkstoffnummern DIN EN 10027-2 nach [T23]

4. Offshore- Windenergieanlagen

Wind ist die Folge ungleichmäßiger Sonneneinstrahlung auf der Erde und bedingt die Bewegung von Luftmassen. Aus Wind kann Windenergie generiert werden. Diese ist eine Form der kinetischen und erneuerbaren Energien.

In Deutschland sind derzeit 20.901 Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von 23.903 Megawatt in Betrieb, womit ein Anteil von 7 Prozent des Gesamtstromverbrauchs gedeckt werden kann. Dabei ist ein klarer Trend zu erkennen - die Einspeisung des Windstromes nimmt stetig zu, im Jahr 2007 wurden bereits 39,5 Mrd. Kilowattstunden in das deutsche Stromnetz geleitet.³⁸

Windenergie kann mit Anlagen an Land, also „on shore“, oder abseits des Landes, „off shore“, zu Strom umgewandelt werden. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf Offshore- Windenergieanlagen (OWEA). Im Fokus stehen dabei insbesondere die Umgebungsbedingungen, denen diese Anlagen ausgesetzt sind sowie deren Konstruktion.

4.1 Umgebungsbedingungen und Belastungen „off shore“

Offshore- Windenergieanlagen werden auf See errichtet, zumeist küstennah. Abb. 33 zeigt eine Übersicht geplanter und bereits ans Netz angeschlossener Offshore- Windparks in Europa.

Im Allgemeinen sind Offshore- Windenergieanlagen höheren Belastungen ausgesetzt als Anlagen an Land. „Off shore“ werden höhere Windgeschwindigkeiten erreicht als „on shore“, woraus sich höhere Windlasten für Windenergieanlagen auf See ergeben. Dazu kommen Belastungen aus Wellengang und Strömung. Dabei muss beachtet werden, dass es zu Überlagerungen dieser Einwirkungen kommen kann. In einigen

³⁸ Statistische Zahlen nach <http://www.wind-energie.de/de/statistiken/>

Regionen der Ostsee muss darüber hinaus mit Eislasten gerechnet werden.

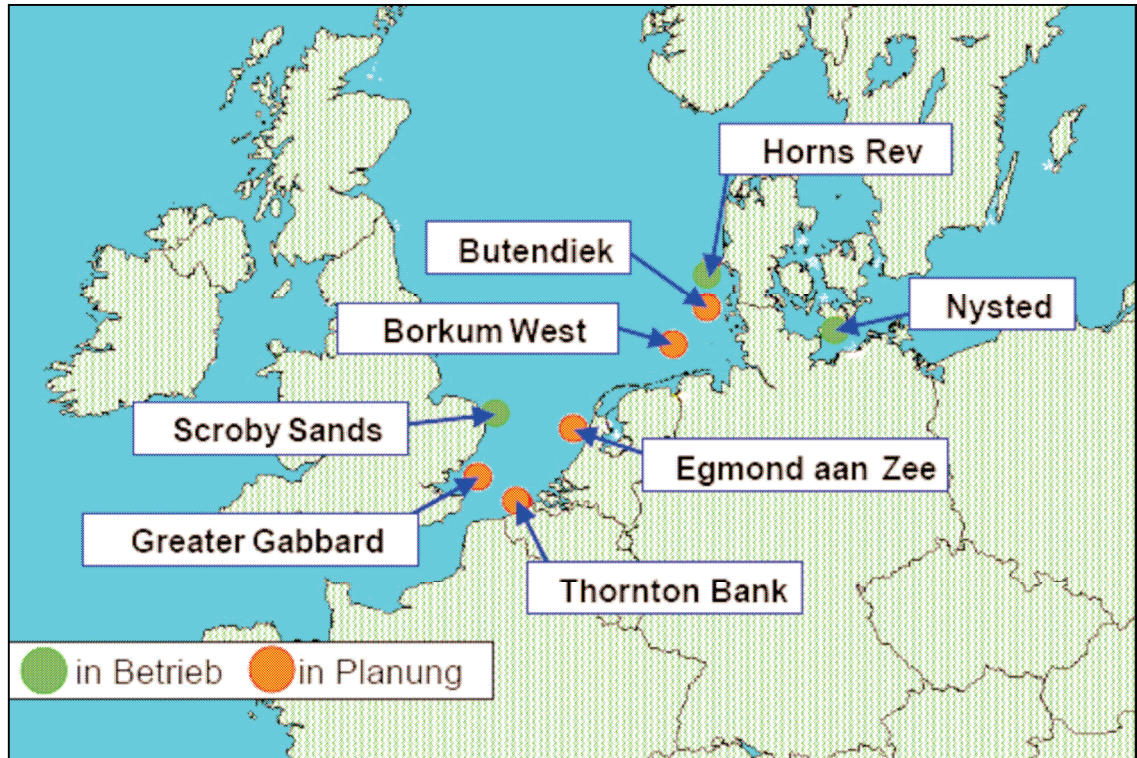


Abb. 33: Standorte europäischer Offshore- Windparks nach [B33]

Offshore- Windenergieanlagen stehen bis zu 40 m im Wasser. Bei diesen Wassertiefen sind entsprechende Gründungsbauwerke erforderlich, die auf die kompliziert zu ermittelnden Bodenverhältnisse abgestimmt sein müssen. Ebenso wichtig ist es die Stahlkonstruktion vor Korrosion zu schützen, welche durch die maritime, chloridhaltigen Luft bedingt wird. Im Bereich von Offshore- Windparks ist zusätzlich Schiffsverkehr zu erwarten. Daraus ergibt sich ein weiterer Lastfall, nämlich Schiffsanprall, der beachtet werden muss. Neben diesen Anforderungen muss ebenso ein reibungsloser Anlagenbetrieb durch die Konstruktion gewährleistet sein. Windenergieanlagen mit Nennleistungen bis zu 5 Megawatt bestehen aus großen und schweren Bauteilen, die wind- und schwingungsanfällig sind, aber trotzdem einwandfrei zu betreiben sein müssen.

Alle diese Aspekte sind bei der Planung solch einer Anlage zu berücksichtigen. Dennoch muss diese konstruierbar sein, vor allem hinsichtlich des kleinen Zeitfensters, welches wegen der Wetterbedingungen für die Installation zur Verfügung steht. Auch eine spätere Wartung muss problemlos durchzuführen sein. Offshore- Windenergieanlagen sind in der Regel konzipiert für eine Nutzungsdauer von 20 Jahren oder mehr.³⁹

4.2 Die Konstruktion einer Offshore- Windenergieanlage

Eine Offshore- Windenergieanlage besteht im Wesentlichen aus zwei großen Elementen, der Tragstruktur und der Rotor- Gondel- Einheit, welche Maschine genannt wird.

Die Maschine als solche wurde in den letzten Jahren enorm weiterentwickelt. Die Gondel und Rotorblätter sind mittlerweile verstellbar, sodass sie immer eine optimale Stellung gegenüber dem Wind einnehmen. Wenn bei zu hohen Windgeschwindigkeiten die Abschaltgeschwindigkeit erreicht wird, sind moderne Anlagen in der Lage ihre Drehzahl zu begrenzen.

Die Rotor- Gondel- Einheit ist ein typisiertes Bauteil, das heißt sie wird nach einheitlichen Standards in Baureihen gefertigt.

Die Tragstruktur besteht aus dem Turm, der Unterkonstruktion und der Gründung. Je nach Einsatzbedingungen kommen verschiedene Ausführungen für die Tragstruktur in Frage (vgl. Abb. 34):

- Monopile
- Tripod
- Jacket- Struktur
- Tragstruktur mit Schwerkraftgründung

Die Tragstruktur ist also ein standortspezifisches System und wird entsprechend der jeweiligen Verhältnisse konzipiert.

³⁹ Martin/Schröter 2005, S.435

Bei der Bemessung einer Offshore- Windenergieanlage erfolgen die Lastannahmen auf Basis der Umgebungsbedingungen und der Anlagendynamik.⁴⁰ Unter Anlagendynamik wird das Verhalten der

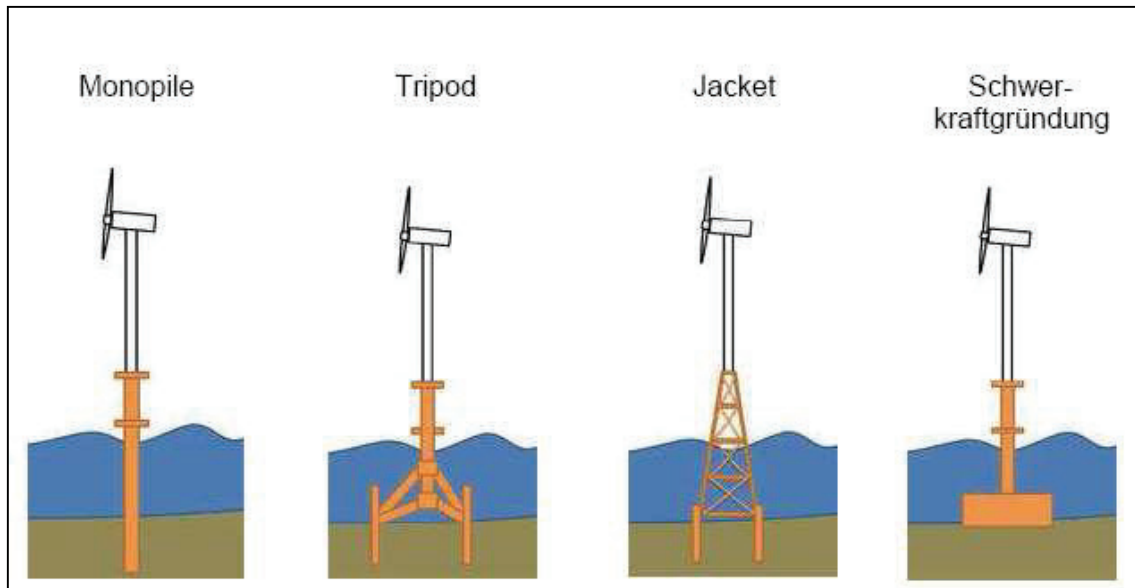


Abb. 34: Tragstrukturen für OWEA, schematisch, nach [B34]

Rotor- Gondel- Einheit bei Wind und die daraus resultierenden Belastungen auf die Tragstruktur verstanden. Dynamische Belastungen am Gesamtsystem Windenergieanlage werden mit speziellen Computerprogrammen simuliert und daraus die geeignete Tragstruktur entwickelt. Erst danach erfolgen bauteilspezifische Nachweise hinsichtlich der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Anlage, sowie Nachweise im Grenzzustand der außergewöhnlichen Lasten und der Lebensdauer.⁴¹

Als Werkstoff für die Tragstruktur wird hauptsächlich Baustahl verwendet (vgl. Abb. 35). Es gibt aber auch Konstruktionen aus Spannbeton, auf diese wird an dieser Stelle allerdings nicht weiter eingegangen.

⁴⁰ Kühn/Argyriadis 2007, S.607 f.

⁴¹ Baeßler u.a. 2009, S.271

Der verwendete Stahl ist thermomechanisch gewalzt und hat ein feinkörniges Gefüge (vgl. Abschnitt 2.2.4). Er zeichnet sich, auch bei den zur Konstruktion erforderlichen großen Blechdicken, durch sehr gute Schweißseignung, passende mechanische Eigenschaften sowie gute Verarbeitbarkeit aus. Aus diesem Grund ist diese Stahlsorte besonders geeignet für Windenergieanlagen auf See. Für Offshore- Konstruktionen werden die vom Hersteller zu gewährleistenden Eigenschaften der Stähle in DIN EN 10225 oder der norwegischen Norm, dem NORSOK- Standart, geregelt.⁴² Die Fertigung solcher Anlagen erfolgt hochautomatisiert. Das Hauptproblem ist dabei nicht mehr nur eine technische Lösung entsprechend der Randbedingungen zu finden, sondern vielmehr eine ökonomische Produktion zu ermöglichen, die es erlaubt auf standortspezifische Anforderungen einzugehen und diese bei der Fertigung zu berücksichtigen.



Abb. 35: OWEA „REpower 5M“ mit Jacket-Tragstruktur nach [B35]

⁴² Brecht/Paschold 2005, S.444

Planung, Fertigung, Bau und Installation von Offshore- Windenergieanlagen laufen meist als Joint Ventures, das heißt alle Beteiligten arbeiten Hand in Hand und Schnittstellen zwischen den Unternehmen sind kaum zu erkennen, sodass die Projektabwicklung als hochoptimiert einzustufen ist.

4.3 Schlussbemerkungen

Zur Strategie der Bundesregierung gehört es die Energiegewinnung „off shore“ bis ins Jahr 2030 auf 20.000 bis 25.000 Megawatt auszubauen. Dies bedeutet, dass sich in diese Richtung ein starker Wirtschaftszweig entwickelt. Darüber hinaus bietet die Gewinnung von Energie aus Wind eine ressourcenschonende Alternative zur „konservativen“ Energiegewinnung aus fossilen Brennstoffen oder Kernkraft. Sie ist im Sinne der aktuellen Umweltpolitik, vor allem in Hinsicht auf die Forderung der Absenkung der Kohlenstoffdioxidemission gemäß des Kyoto- Protokolls.

5. Schlusswort

Wie aus den vorherigen Ausführungen hervorgeht, handelt es sich bei Stahl aus technologischer Sicht um einen innovativen, vielseitigen Werkstoff der Gegenwart. Er ist damit Produkt einer hochentwickelten Industrie.

Vom Standpunkt der Wirtschaft betrachtet ist dieser Werkstoff Mittelpunkt einer starken Branche. Im Zuge der Globalisierung wurden die Zahlen der Stahlindustrie hinsichtlich Erzeugungsleistung und Umsatz in jüngerer Vergangenheit von Jahr zu Jahr gesteigert. Allein im Jahr 2008 wurden 1.330 Mio. t Rohstahl erzeugt, woran die „Stahlriesen“ China, Japan, USA und die EU maßgeblich beteiligt waren.

Seit den 1990er Jahren ist auch der Klimaschutz bei der Stahlproduktion in den Fokus gerückt. Durch Forschung und Entwicklung effizienterer, teils auch neuer Verfahren, wurde der Kohlenstoffdioxidausstoß je erzeugter t Rohstahl stetig gesenkt.

Dennoch geht auch die Weltwirtschaftskrise nicht spurlos an der Stahlindustrie vorbei. In Zahlen ausgedrückt heißt das konkret für Deutschland, dass die Rohstahlproduktion laut Hochrechnungen erstmals seit 1993 wieder unter der Grenze von 40 Mio. t liegen wird. Inwieweit die Rezession die Stahlbranche weiter beeinflusst und in welche Richtung die Entwicklung geht, vermag jetzt noch niemand vorauszusagen. Fakt ist allerdings, dass Stahl unverzichtbar ist, sowohl in konstruktiver Hinsicht als auch für die Wirtschaft.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Baeßler, Matthias u.a.: Erste Erfahrungen bei der Realisierung der Tragstrukturen von Offshore- Windenergieanlagen in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone. In: Stahlbau. 78 (2009), H. 4, S.267-274
- [2] Brecht, Thomas/Paschold, Rolf: Schweißen von Feinkornbaustählen und deren Eignung für Offshore- Windenergieanlagen. In: Stahlbau. 74 (2005), H.6, S.443-451
- [3] Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V.: Wetterfester Baustahl. Know.how für Konstruktion und Montage. URL: http://www.beratung-hallenbau.de/fileadmin/werthyp/Fassade/Wetterfester_Baustahl.pdf [Download April 2009]
- [4] Gobrecht, Jürgen: Werkstofftechnik Metalle. URL:http://www.oldenbourg-wissenschaftsverlag.de/fm/694/3-486-57903_p.pdf [Download März 2009]
- [5] Goris, Alfons: Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Neuwied 2006
- [6] Hamme, Ulrich u.a.: Einsatz hochfester Baustähle im Mobilkranbau. In: Stahlbau. 69 (2000), H.4, S.295-305
- [7] Kuhlmann, Ulrike: Stahlbaukalender 2007. Berlin 2007
- [8] Kühn, Martin/Argyriadis, Kimon: Anlagendynamik, Belastungen und Entwurfanforderungen von Offshore- Windenergieanlagen und deren Tragstruktur. In: Stahlbau. 76 (2007), H.9, S.606-612

-
- [9] Martin, Francis/Schröter, Falko: Stahllösungen für Offshore- Windkraftanlagen. In: Stahlbau 74 (2005), H.6, S.435-442
- [10] Martin, Francis/Schröter, Falko: Neueste Entwicklungen von thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustählen. Erfahrungen aus Offshore- Industrie und Stahlwasserbau. In: Stahlbau. 75 (2006), H.11, S.875-881
- [11] Öresundbro Konsortiet: Die Brücke.
URL: <http://osb.oeresundsbron.dk/documents/document.php?obj=581>
[Download April 2009]
- [12] Peterseim, Jürgen: Werkstofftechnik. Bezeichnung von Stählen.
URL: https://www.fh-muenster.de/fb3/downloads/werkstofftechnik/werkstofftechnik_peterseim/wt721.pdf [Download April 2009]
- [13] Pfennig, Anja: Werkstofftechnik. Skript in „Rohfassung“.
URL: http://www.dr-pfennig.de/appdf/Skript_Normung_2008.pdf
[Download März 2009]
- [14] Priebe, Jürgen/Starossek, Uwe: Stahlbau I. Skriptum zur Vorlesung.
URL: <http://134.28.93.13/lehre/veranstaltungen/stb1/stahlbau1.pdf>
[Download März 2009]
- [15] Reuter, Manfred: Werkstoffkunde.
URL: http://www.mp.haw-hamburg.de/pers_mp/rtr-w11c.pdf
[Download März 2009]
- [16] Salzgitter Flachstahl: Wetterfester Baustahl.
URL: http://www.salzgitter-flachstahl.de/de/Produkte/warmgewalzte_produkte/stahlsorten/Wetterfeste_Baustaehle/ [Download April 2009]

-
- [17] Schröter, Falko: Höherfeste Stähle für den Stahlbau. Auswahl und Anwendung. URL: https://www.dillinger.de/imperia/md/content/dillinger/publikationen/stahlbau/technischeliteratur/dh_hoeherfeste_staehle_fuer_den_stahlbau.pdf [Download April 2009]
- [18] *Skelettkonstruktion des Commerzbank Towers* nach Schröter, Falko/Hubo, Ralf: Stähle für den Stahlbau. Auswahl und Anwendung in der Praxis. URL: https://www.dillinger.de/imperia/md/content/dillinger/publikationen/stahlbau/technischeliteratur/dh_st_hle_f_r_den_stahlbau_auswahl_und_anwendung_in_der_praxis.pdf [Download April 2009]
- [19] Seidel, Wolfgang: Werkstofftechnik. Werkstoffe, Eigenschaften, Prüfung, Anwendung. München 2007/2008
- [20] Stahl- Informations- Zentrum: Merkblatt 434. Wetterfester Baustahl. URL: http://www.stahl-info.de/schriftenverzeichnis/pdfs/MB434_Wetterfester_Baustahl.pdf [Download April 2009]
- [21] Technikerkreis Grobblech. Werner, Frank: Erläuterungen der Änderungen in der neuen überarbeiteten DIN EN 10025 Teil 1-6 Für warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen im Bereich Grobblech. URL: http://www.stahl-online.de/stahl_zentrum/VorwortErlaeuterungenEN10025-0405.pdf [Download März 2009]
- [22] Thiemel, K.-Ch.: Werkstoffe I. Chemie und Eigenschaften metallischer Werkstoffe. URL: www.unibw.de/bauv3/lehre/skripten/chemieundeigenschaftenmetallischerwerkstoffe2008.pdf – [Download März 2009]

-
- [23] Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Degner, Bartos u.a.: Stahlfibel.
Düsseldorf 2007
- [24] WECOBIS, Ökologisches Bauinformationssystem: Wetterfester Stahl.
URL: http://wecobis.iai.fzk.de/cms/content/site/wecobis/Home/Grundstoffe/Metalle_GS/Stahl_GS/Wetterfester_Stahl_GS
[Download April 2009]
- [25] Weißbach, Wolfgang: Werkstofftechnik.
URL: http://www.viewegteubner.de/freebook/978-3-8348-0295-8_I.pdf
[Download März 2009]
- [26] Zimmermann, Claus: Große Wasserbauexkursion. Antwerpen-
Rotterdam- London. URL: www.fi.uni-hannover.de/~material/lehre/exkursionen/Programm_Wasserbauexkursion_2005.pdf –
[Download April 2009]
- [27] kein Autor angegeben: Stahl. URL: <http://www.formteile.ch/stahl.htm>
[Download April 2009]

7. Eidesstattliche Erklärung der Selbstständigkeit

Ich versichere an Eides statt, dass ich die beiliegende Bachelor Thesis selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet habe.

Ferner gestatte ich der Hochschule Neubrandenburg, die beiliegende Bachelor Thesis unter Beachtung insbesondere urheber-, datenschutz- und wettbewerbsrechtlicher Vorschriften für Lehre und Forschung zu nutzen.

.....
Datum/Unterschrift

