



# Einfluss einer lauwarmen Umformung auf die Gefügeausbildung in einem umwandlungs-trägen Vergütungsstahl und dessen Einfluss auf ausgewählte Eigenschaften

## Verteidigung der Ingenieurarbeit

Frank Sandig

## ÜBERBLICK

Einleitung

Verformungsinduzierte Plastizität

- Charakteristika

- Thermodynamik der Martensitbildung

Einordnung der Legierung

- Analyse

- ZTU-Diagramme

Lauwarme Umformung

- Allgemeines

- Eigenschaftsverbessernde Mechanismen

- Umformversuche am IMF

Anlassbehandlung

Warmwalzen

Experimentelle Methoden

## ÜBERBLICK II

### Ergebnisse

Gusszustand

Warmgewalztes Material

Lauwarme Umformung

Angelassene Proben

### Zusammenfassung und Ausblick

## CHARAKTERISTIKA

- umwandlungsträger Vergütungsstahl
- Temperaturbereich des metastabilen Austenits
- unter Verformung Umwandlung in Martensit (TRIP)

### Besonderheit

gleichsinnige Zunahme von Festigkeit und Dehnbarkeit

## CHARAKTERISTIKA II

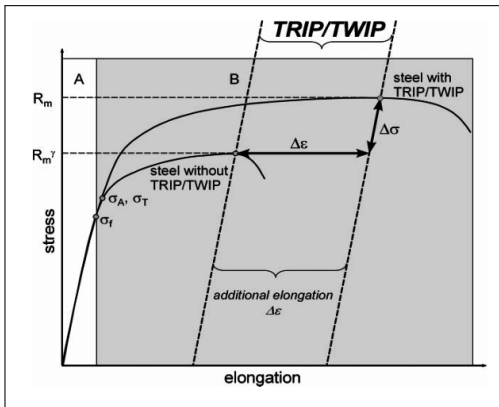


Abb. 1 : Schematischer Verlauf einer Spannungs-Dehnungs-Kurve mit und ohne TRIP/TWIP-Effekt [1]

## THERMODYNAMIK DER MARTENSITBILDUNG

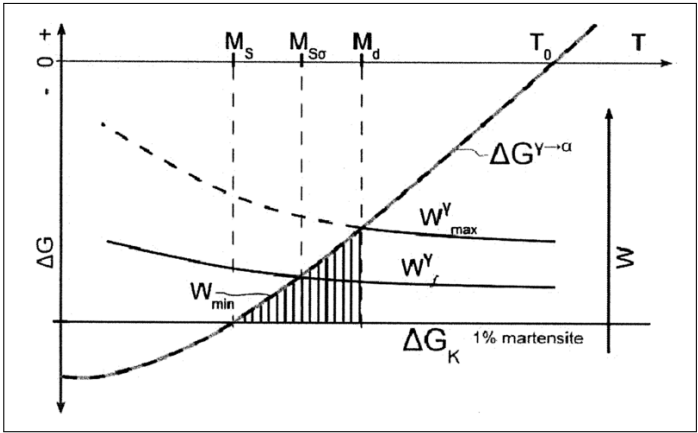


Abb. 2 : Thermodynamik der Martensitbildung, schematisch [1]

# CHEMISCHE ANALYSE

Tab. 1 : Ist-Analyse der untersuchten Legierung, Angaben in Masse-%

<b>Fe</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>
93,3	0,355	0,426	0,449
<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
0,0064	0,0069	2,08	3,25

## ZTU-DIAGRAMM GUSSZUSTAND

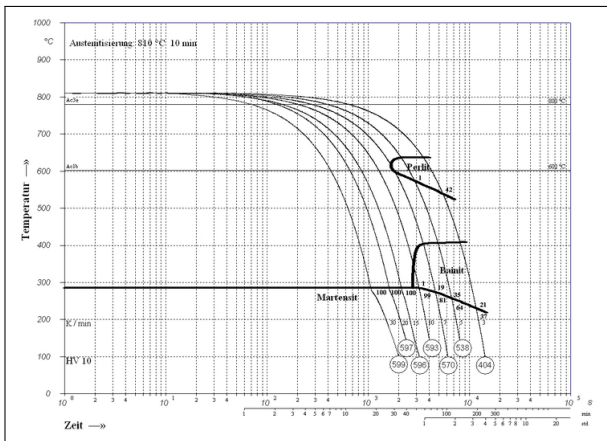


Abb. 3 : kontinuierliches ZTU-Diagramm der Probenlegierung für den Gusszustand



## ZTU-DIAGRAMM KNETZUSTAND

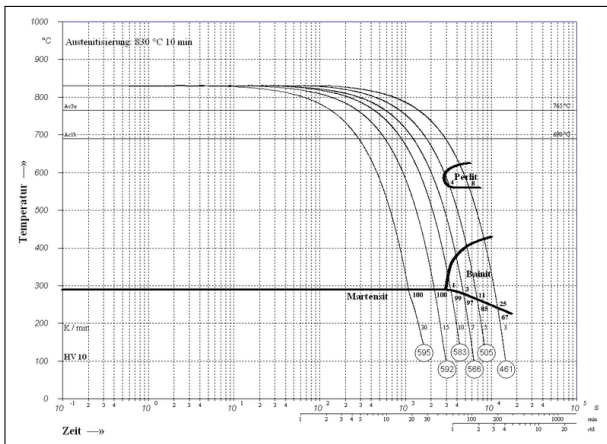


Abb. 4 : kontinuierliches ZTU-Diagramm der Probenlegierung für den Knetzustand

## ABKÜHLGESCHWINDIGKEITEN

Tab. 2 : Beispiele für Abkühlgeschwindigkeiten im Zentrum eines 2,5 cm dicken Barrens in unterschiedlichen Medien, nach [2]

Medium	Abkühlgeschwindigkeit in $Ks^{-1}$
ruhende Luft (maximal) [3]	2
Pressluft (maximal) [3]	36
Öl, unbewegt	18
Öl, bewegt	45
Wasser, unbewegt	45
Wasser, bewegt	190
Kühlsole, unbewegt	90
Kühlsole, bewegt	230

## ALLGEMEINES

- 200 °C bis 500 °C
- keine Rekristallisation
- Kaltverfestigung
- TRIP-Effekt im metastabilen Bereich  
→ höhere Umformgrade als bei herkömmlichem Presshärten

## ALLGEMEINES II

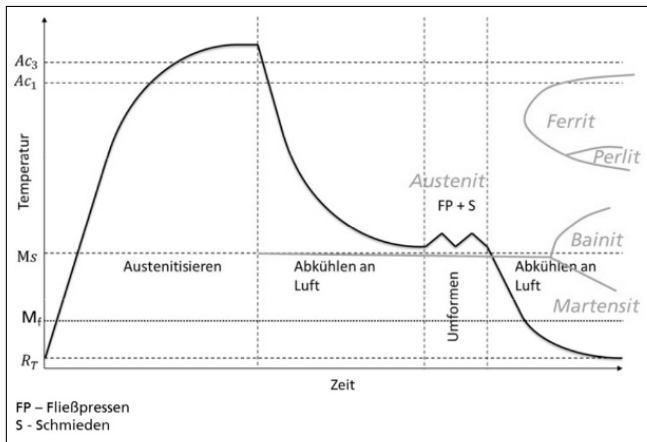


Abb. 5 : Schema eines Umformprozesses im metastabilen Austenitbereich [4]

## EIGENSCHAFTSVERBESSERENDE MECHANISMEN

- Verfeinerung der Struktur des aus dem Austenit gebildeten Martensits [5–7]
- Vererbung der Kaltverfestigung des Austenits an den Martensit [8–10]
- Ausbildung einer Verformungstextur [11–13]
- feindisperse Ausscheidungen von Carbiden an den Gleitlinien des Austenits [7, 14, 15]
- Zunahme der Störstellen- und Versetzungsdichte [7, 9]

Bislang kaum untersucht:

- TRIP-Effekt im metastabilen Austenitbereich

## UMFORMVERSUCHE AM IMF

- Zylinderstauchversuche, festes  $\varphi$ , nicht bis zum Bruch
- Aufnahme von Kraft und Weg, daraus Berechnung von

$$k_f = \frac{F}{A_0} \frac{h}{h_0} = \frac{F}{\pi r_0^2} \frac{h}{h_0} \quad (1)$$

Fließspannung, nach [16]

$$\varphi = \ln \left( \frac{h_0}{h} \right) = -\ln(1 + \varepsilon) = -\varepsilon_w \quad (2)$$

Vergleichsumformgrad, nach [16]

## UMFORMVERSUCHE AM IMF II

- Umformsimulationssystem „Gleeble<sup>®</sup> Systems HDS-V40“
- Probenabmessungen:  $\varnothing 10 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ .
- Austenitisieren:  $5 \text{ K s}^{-1}$ ,  $840 \text{ }^\circ\text{C}$ , 10 min
- anfängliche Umformtemperaturen:  $270 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  **$290 \text{ }^\circ\text{C}$** ,  $310 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $330 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $350 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperaturmessung mittels Thermoelement
- Vergleichsumformgrade  $\varphi = 0,3$ ,  $\varphi = 0,6$  und  $\varphi = 1,0$ ;  
entspricht relativer Höhenänderung von  $26,1 \%$ ,  $45,0 \%$  und  $63,3 \%$
- Umformrate  $\dot{\varphi} = 0,1 \text{ s}^{-1}$
- insgesamt 30 Proben
- anschließend Trennen, Metallografie, Härtemessung, Anlassen

# ANLASSBEHANDLUNG

- stets unterhalb  $A_1$   $\rightarrow$  keine Gefügewandlung
- 350 °C bis 680 °C
- feindisperse Ausscheidung von Carbiden
- Kohlenstoffgehalt des Martensits  $\downarrow$
- Festigkeit des Stahles  $\downarrow$ , Zähigkeit  $\uparrow$
- hier: 2 h bei 550 °C



## WARMWALZEN

- nicht reversierend
- Umformung je Stich 20%
- Ofentemperatur 1100 °C
- Temperaturmessung mittels Pyrometer
- Abkühlen an Luft

## WARMWALZEN II

Tab. 3 : Stichplan Warmwalzen

Stich $n$	$h_{n-1}$ in mm	$h_n$ in mm	$s$ in mm	$T_{WG}$ in °C	$WG$ in %
1	29,5	23,6	5,9	1010	20,0
2	23,6	18,9	4,7	–	35,9
3	18,9	15,1	3,8	990	<b>48,8</b>

$$WG = \frac{h_0 - h_n}{h_0} \cdot 100\% \quad (3)$$

Walzgrad, nach [17, 18]

# EXPERIMENTELLE METHODEN

- Digitale Lichtmikroskopie
- Funkenspektrometrie
- Dilatometrie
- Härteprüfung nach Vickers
- Zugversuche bei Raumtemperatur

# MATERIAL IM GUSSZUSTAND

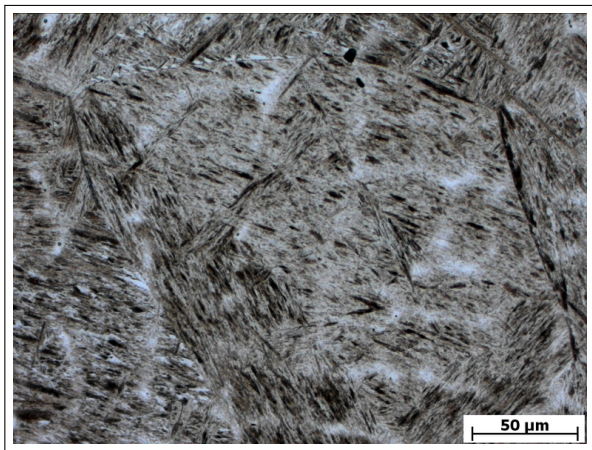


Abb. 6 : Gusszustand, 500x, Nital geätzt

## MATERIAL IM GUSSZUSTAND II

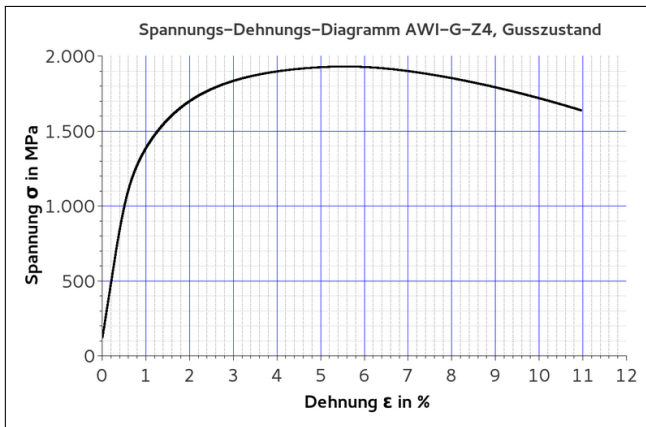


Abb. 7 : Spannungs-Dehnungs-Kurve AWI-G-Z4, Gusszustand

# MATERIAL IM GUSSZUSTAND III

Tab. 4 : Mechanische Eigenschaften im Gusszustand

$R_{p0,2}$ in MPa	$R_m$ in MPa	$A_B$ in %	$Z$ in %	HV10
1354	1977	8,7	15,9	627

# WARMGEWALZTES MATERIAL

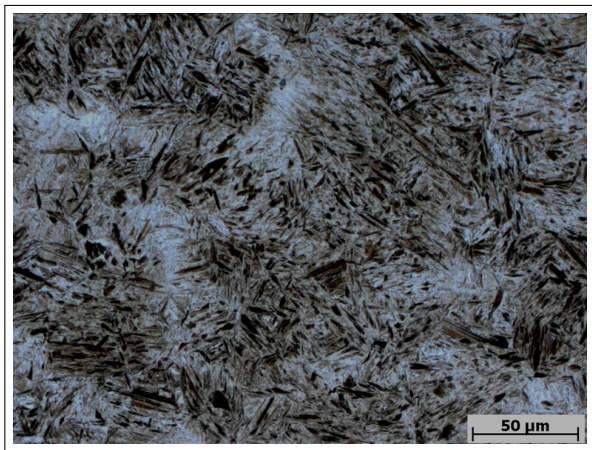


Abb. 8 : Knetzustand, 500x, Nital geätzt

# WARMGEWALZTES MATERIAL II

- 591 HV10
- Härte durch langsamere Abkühlung an Luft geringer als im Gusszustand



## LAUWARME UMFORMUNG

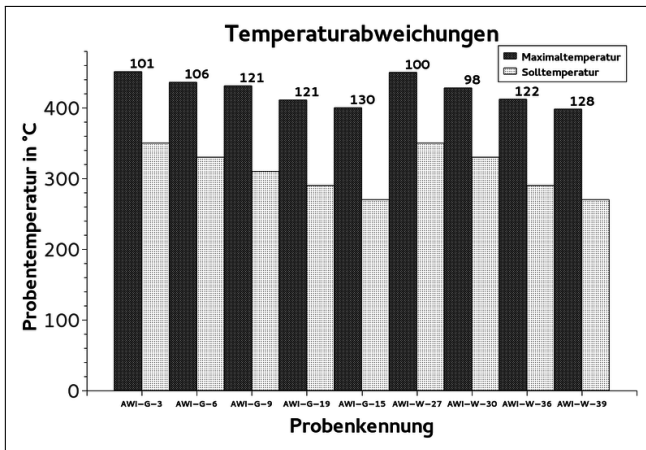
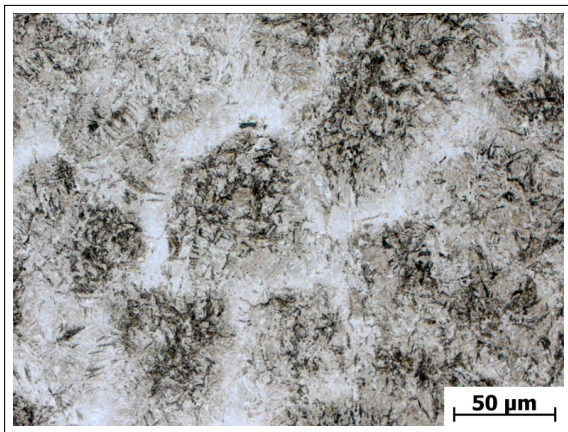


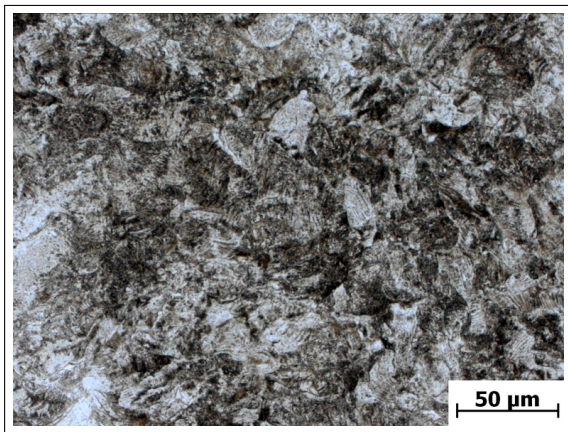
Abb. 9 : Säulendiagramm der Temperaturabweichungen,  $\varphi = 1,0$

## LAUWARME UMFORMUNG II



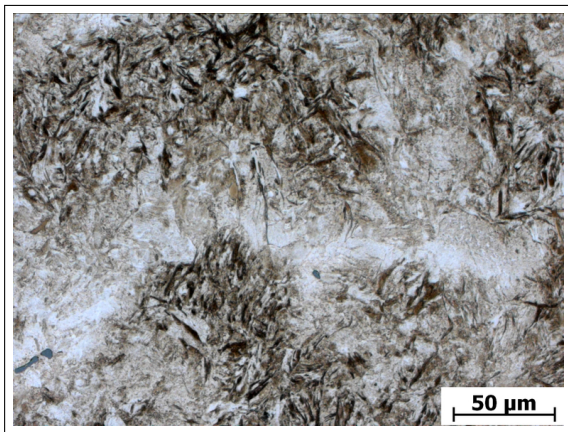
**Abb. 10 :** AWI-G-3,  $T_U=350\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi=1,0$ ,  $\dot{\varphi}=0,1\text{ s}^{-1}$ , Gusszustand, Nital geätzt, 500x

## LAUWARME UMFORMUNG III



**Abb. 11** : AWI-G-9,  $T_U=310\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi=1,0$ ,  $\dot{\varphi}=0,1\text{ s}^{-1}$ , Gusszustand, Nital geätzt, 500x

## LAUWARME UMFORMUNG IV



**Abb. 12 :** AWI-G-15,  $T_U=270\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi=1,0$ ,  $\dot{\varphi}=0,1\text{ s}^{-1}$ , Gusszustand, Nital geätzt, 500x

## LAUWARME UMFORMUNG V

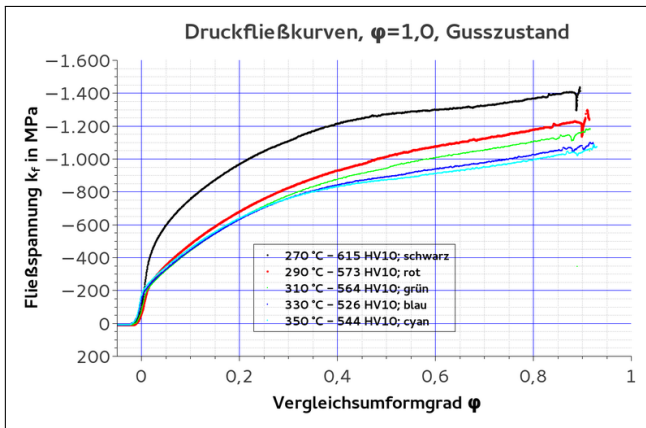


Abb. 13 : Sammeldiagramm der Fließkurven, Gusszustand

## LAUWARME UMFORMUNG VI

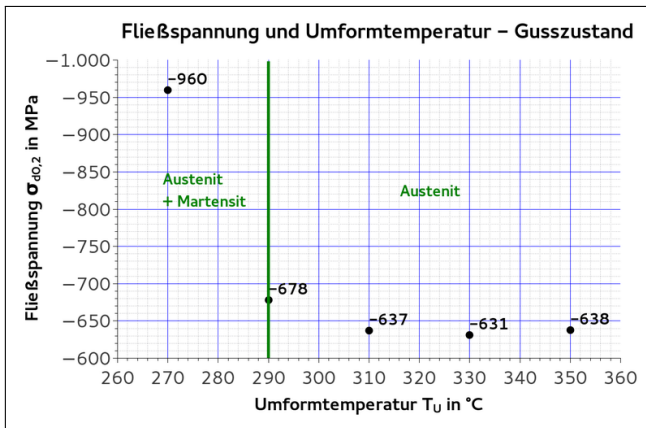


Abb. 14 : Abhängigkeit der Ersatzfließspannung  $\sigma_{d0,2}$  von der Umformtemperatur,  $\varphi=1,0$ , Gusszustand

## LAUWARME UMFORMUNG VII

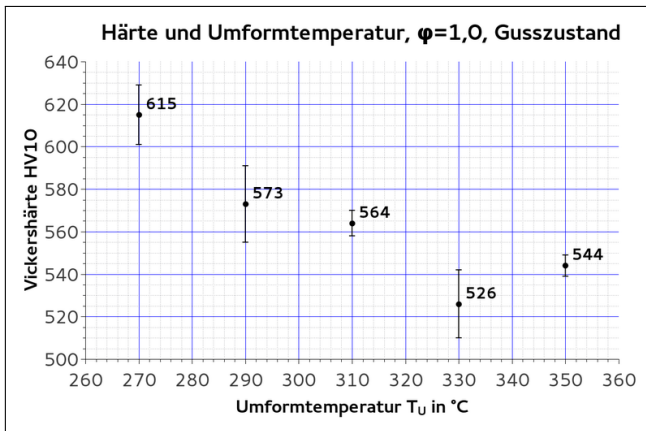


Abb. 15 : Abhängigkeit der Härte von der Umformtemperatur,  $\varphi=1,0$ ,  $\dot{\varphi}=0,1\text{ s}^{-1}$ , Gusszustand

## LAUWARME UMFORMUNG VIII

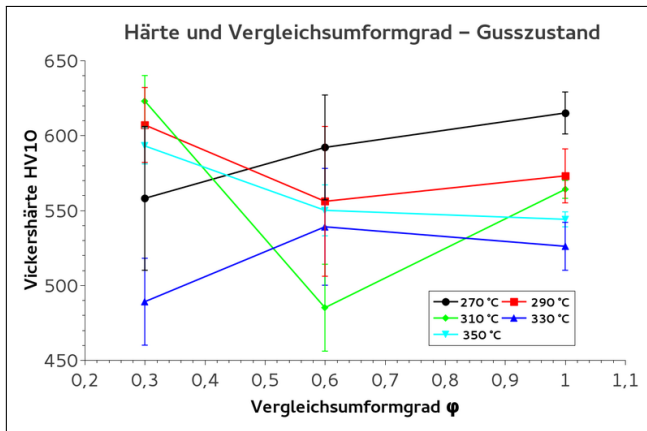
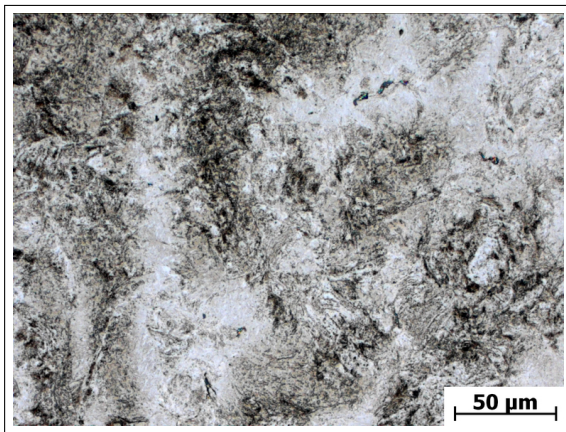


Abb. 16 : Abhängigkeit der Härte vom Vergleichsumformgrad für unterschiedliche  $T_U$ , Gusszustand

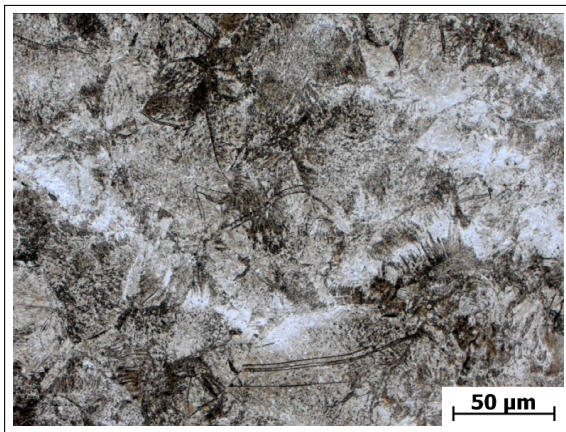


## LAUWARME UMFORMUNG IX



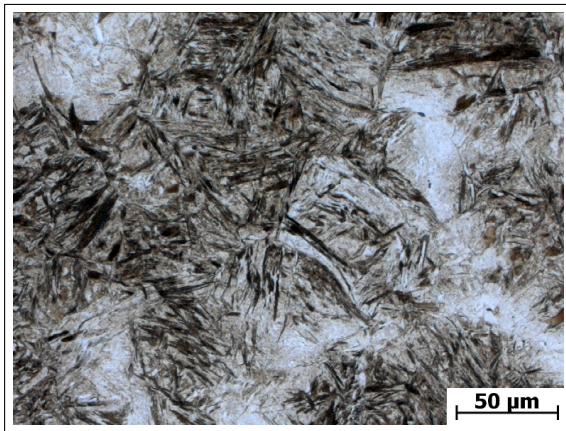
**Abb. 17 :** AWI-W-27,  $T_U=350\text{ °C}$ ,  $\varphi=1,0$ ,  $\dot{\varphi}=0,1\text{ s}^{-1}$ , Knetzustand, Nital geätzt, 500x

## LAUWARME UMFORMUNG X



**Abb. 18 :** AWI-W-33,  $T_U=310\text{ °C}$ ,  $\varphi=1,0$ ,  $\dot{\varphi}=0,1\text{ s}^{-1}$ , Knetzustand, Nital geätzt, 500x

## LAUWARME UMFORMUNG XI



**Abb. 19 :** AWI-W-39,  $T_U=270\text{ °C}$ ,  $\varphi=1,0$ ,  $\dot{\varphi}=0,1\text{ s}^{-1}$ , Knetzustand, Nital geätzt, 500x

## LAUWARME UMFORMUNG XII

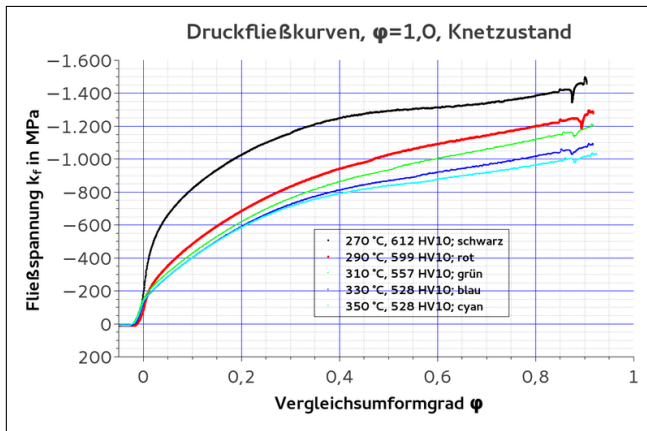


Abb. 20 : Sammeldiagramm der Fließkurven, Knetzustand

## LAUWARME UMFORMUNG XIII

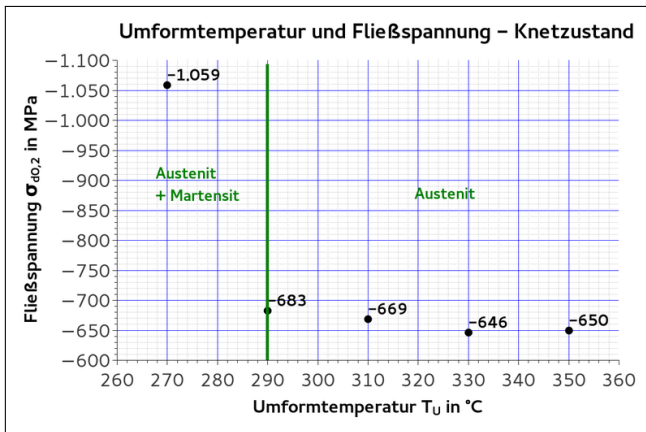


Abb. 21 : Abhängigkeit der Ersatzfließspannung  $\sigma_{d0,2}$  von der Umformtemperatur,  $\varphi=1,0$ , Knetzustand

## LAUWARME UMFORMUNG XIV

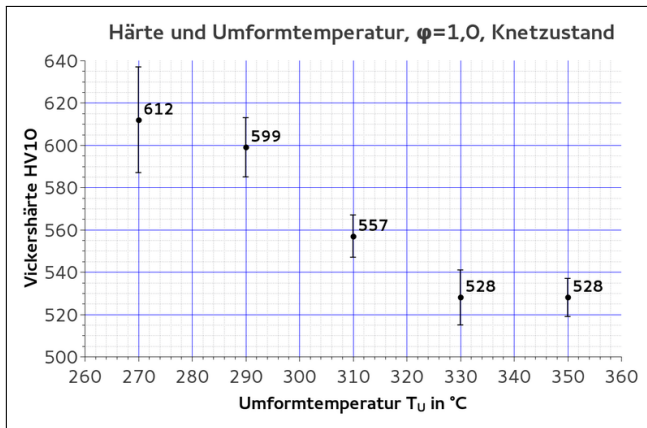


Abb. 22 : Abhängigkeit der Härte von der Umformtemperatur,  $\varphi=1,0$ ,  $\dot{\varphi}=0,1\text{ s}^{-1}$ , Knetzustand

## LAUWARME UMFORMUNG XVI

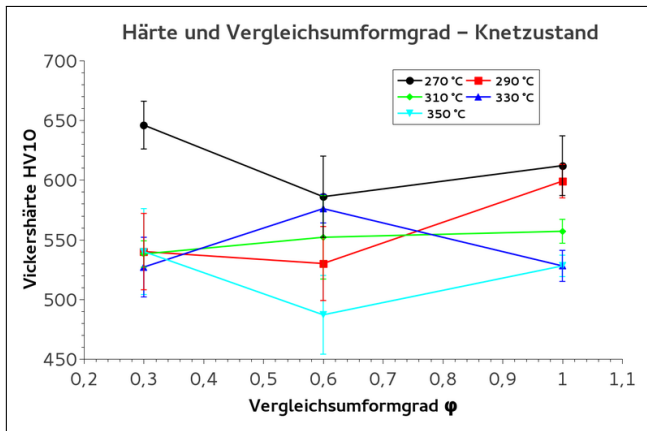
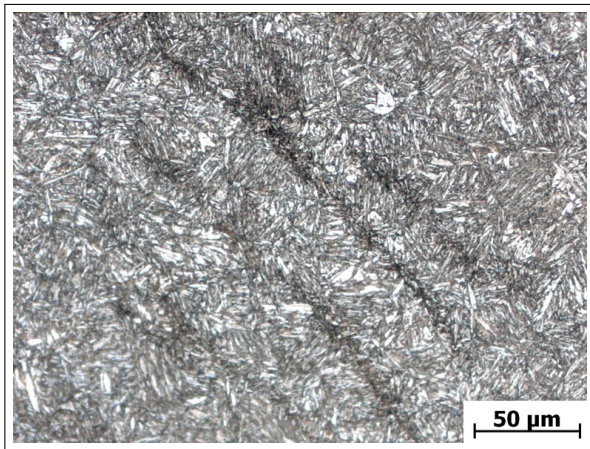


Abb. 23 : Abhängigkeit der Härte vom Vergleichsumformgrad für unterschiedliche  $T_U$ , Knetzustand

# ANGELASSENE PROBEN



**Abb. 24 :** AWI-WA, Knetzustand, angelassen, Nital geätzt, 500x



## ANGELASSENE PROBEN II

Vickershärte:

- AWI-GA: 367 HV10
- AWI-WA: 349 HV10

## ANGELASSENE PROBEN III

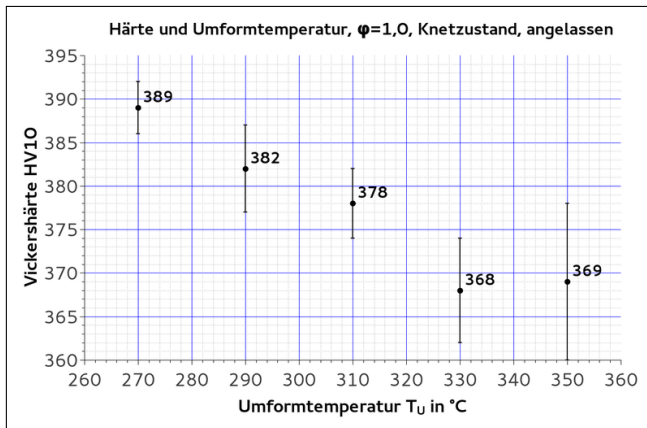


Abb. 25 : Abhängigkeit der Härte von der Umformtemperatur,  $\varphi=1,0$ ,  $\dot{\varphi}=0,1\text{ s}^{-1}$ , Knetzustand, angelassen

## ANGELASSENE PROBEN IV

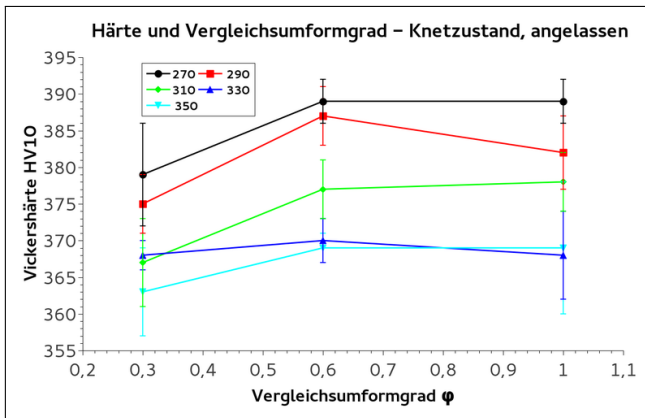


Abb. 26 : Abhängigkeit der Härte vom Vergleichsumformgrad für unterschiedliche  $T_U$ , Knetzustand, angelassen

# ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

- lufthärtender Vergütungsstahl, nicht genormt
- in allen Zuständen unterschiedlich ausgeprägt martensitisch
- Umformvermögen im Bereich von 270 °C – 350 °C sehr gut
- lauwarmer Umformbarkeit im Gusszustand bemerkenswert
- Festigkeit im Gusszustand mit  $R_m \approx 2000 \text{ MPa}$  und  $R_{p0,2} \approx 1400 \text{ MPa}$  sehr hoch
- relativ hohe Zähigkeit von  $A_B \approx 9\%$  und  $Z \approx 16\%$
- Erwartung: Zähigkeit warmgewalzten und vergüteten Zustand sehr hoch

→ viel versprechender Konstruktionswerkstoff, erscheint für Befestigungselemente als geeignet

# ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK II

offene Fragen:

- maximales Umformvermögen unter Druckbelastung  
→ klassische Druckversuche bis zum Werkstoffversagen
- weitere mechanische Eigenschaften (Zähigkeitseigenschaften, Nachweis eines TRIP-Effektes im lauwarmen Bereich)  
→ genormte Zugversuche bei erhöhter Temperatur oder Zugversuche am Umformsimulationssystem, Kerbschlagbiegeversuche nach CHARPY
- mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur im gehärteten und angelassenen Zustand nach dem Warmwalzen  
→ weitere Zugversuche

# ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK III

- Anlassverhalten → weitere Anlassversuche mit gegossenem, warmgewalztem und lauwarm verformtem Material bei unterschiedlichen Temperaturen und mit unterschiedlichen Haltezeiten
- Ausschluss von unerwünschten Anlasseffekten u. ä. lauwarmer Stauchversuche mit deutlich geringeren Umformraten und evtl. zusätzlicher Kühlung wiederholen
- Nachweis unterschiedlicher Martensitarten, nähere Untersuchung der Gefügebildung  
→ Texturanalysen, Röntgenbeugungs- und Rückstreuungselektronenbeugungsversuche, Dilatometrie

→ erneutes Erschmelzen notwendig

**VIELEN DANK!**

**Fragen und Diskussion.**

## QUELLEN

- [1] Kovalev, A.: „Characterization of the TRIP/TWIP effect in austenitic stainless steels using Stress-Temperature-Transformation (STT) and Deformation-Temperature-Transformation (DTT) Diagrams“. In: *Steel Research International* 82.1 (2011). ISSN 0177-4832, S. 45–50.
- [2] Askeland, D. R.: *Materialwissenschaften - Grundlagen, Übungen, Lösungen*. ISBN 3-86025-357-3. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg/Berlin/Oxford, 1996, 125f, 129–133, 247f.



## QUELLEN II

- [3] Eckstein, H.-J., Hrsg.: *Technologie der Wärmebehandlung von Stahl*. 2., stark überarb. Aufl. ISBN 3-342-00220-4. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1987.
- [4] Autorenkollektiv: *Hochfeste und bruchzähe Befestigungselemente für Windkraftanlagen*. Projektskizze. Stahlzentrum Freiberg e.V., 2013.
- [5] Kula, E. B. und Dhosi, J. M.: „Effect of Deformation Prior to Transformation on the Mechanical Properties of 4340 Steel“. In: *Transactions of the American Society for Metals* 52 (1960), S. 321–328.
- [6] Potak, M.: „Thermomechanische Behandlung von Stahl auf hohe Festigkeit“. In: *Metalovedenie i termiceskaja obrabotka metallov* 5 (Mai 1961), S. 2–9.

## QUELLEN III

- [7] Shyne, J. C., Zackay, V. F. und Schmatz, D. J.: „The strength of Martensite Formed from Cold-Worked Austenite“. In: *Transactions of the American Society for Metals* 52 (1960), S. 346–360, 366–371.
- [8] Justusson, W. H. und Schmatz, D. J.: „Some Observations on the Strength of Martensite Formed from Cold-Worked Austenite“. In: *Transactions of the American Society for Metals* 55 (1962), S. 640–653.
- [9] Kogan, L. J. und Entin, R. J.: „Einfluss der Verformung des unterkühlten Austenits auf die mechanischen Eigenschaften der Stähle“. In: *Metallovedenie i termiceskaja obrabotka metallov* 1 (Jan. 1962), S. 3–9.

## QUELLEN IV

- [10] Schmatz, D. J. und Zackay, V. F.: „Mechanical Properties of Deformed Metastable Austenite Ultra High Strength Steel“. In: *Transactions of the American Society for Metals* 51 (1959), S. 476–487.
- [11] Drjukova, J. N.: „Anisotropie der Eigenschaften des Stahles nach der thermo-mechanischen Behandlung“. In: *Metallovedenie i termiceskaja obrabotka metallov* 2 (Feb. 1965), S. 41–43.
- [12] Ermakov, W. N.: „Thermomechanische Behandlung von Konstruktionsstählen“. In: *Metallovedenie i termiceskaja obrabotka metallov* 4 (Apr. 1963), S. 25–29.

## QUELLEN V

- [13] Pewsner, L. M.: „Struktur und Eigenschaften von Konstruktionsstahl nach der Niedertemperatur-thermomechanischen Behandlung“. In: *Metallovedenie i termiceskaja obrabotka metallov* 4 (Apr. 1963), S. 13–19.
- [14] Detert, K. und Schmidt-Krayer, C.: „Einfluss einer Austenitverformung vor der Martensitumwandlung in niedrig legierten Baustählen“. In: *Stahl und Eisen* 83 (1963), S. 449–457.
- [15] McEvily, A. J.: „On the Formation of Alloy Carbides During Ausforming“. In: *Transactions of the American Society for Metals* 54 (1963), S. 753–767.

## QUELLEN VI

- [16] Dahl, W., Hrsg.: *Umformtechnik, Plastomechanik und Werkstoffkunde*. ISBN 3-514-00402-1. Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1993, S. 89.
- [17] Palkowski, H.: *Praktikum Metallurgie Master - Versuch U1: Warmwalzen*. Versuchsanleitung. Institut für Metallurgie der TU Clausthal, 2012, S. 2, 8.
- [18] Lange, K., Hrsg.: *Lehrbuch der Umformtechnik*. Bd. 1: Grundlagen. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2002.
- [19] Bartz, J.: „Wärme- und thermomechanische Behandlung ökonomisch legierter Vergütungsstähle im Zweiphasengebiet“. Diss. Bergakademie Freiberg, 1989, 107 Bl.

## QUELLEN VII

- [20] Berger, C.: „Das Bruchverhalten von Vergütungs- und Einsatzstählen“. Diss. Techn. Hochsch. Aachen, Fak. f. Bergbau u. Hüttenwesen, 1975, 165 S.
- [21] Bargel, H.-J. und Schulze, G., Hrsg.: *Werkstoffkunde*. 11., bearb. Aufl. ISBN 978-3-642-17717-0. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2012, 453 S. DOI:  
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-17717-0>.
- [22] Autorenkollektiv: *HÜTTE – Das Ingenieurwissen*. Hrsg. von Horst Czichos und Manfred Hennecke. 34., aktualisierte Auflage. ISBN 978-3-642-22850-6. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2012. DOI:  
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-22850-6>.

## QUELLEN VIII

- [23] Autorenkollektiv: *DIN EN ISO 18265:2014-02: Metallische Werkstoffe – Umwertung von Härtewerten*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2014.
- [24] Autorenkollektiv: *FOUNDRY-MASTER UV*. Firmenschrift. Oxford Instruments Analytical Limited, Wycomb, UK, 2011.  
URL: <http://www.oxford-instruments.de/OxfordInstrumentsDE/media/industrial-analysis/oes/OES%20broschueren/foundry-master-uv-flyer-deutsch.pdf>.
- [25] Autorenkollektiv: *DIN EN ISO 6892-2:2011: Zugversuch - Teil 2: Prüfverfahren bei erhöhter Temperatur*. Deutsch und Englisch. Deutsches Institut für Normung, 2011.

## QUELLEN IX

- [26] Autorenkollektiv: *DIN EN ISO 6892-1:2009: Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2009.
- [27] Autorenkollektiv: *DIN 50125: Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2009.
- [28] Autorenkollektiv: *Stahlschlüssel-Taschenbuch*. 21. Aufl. ISBN: 978-3-922 599-22-7. Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, Marbach/N., 2007.
- [29] Autorenkollektiv: *Dilatometer-Produktblatt*. Firmenschrift. BÄHR-Thermoanalyse GmbH, Hüllhorst, 2006. URL: [http://www.mpa.mw.tum.de/fileadmin/tumwmpa/www/MPA/pdf/Dilatometer\\_Produktblatt.pdf](http://www.mpa.mw.tum.de/fileadmin/tumwmpa/www/MPA/pdf/Dilatometer_Produktblatt.pdf).



## QUELLEN X

- [30] Autorenkollektiv: *DIN EN ISO 6507-1:2005: Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2005.
- [31] Autorenkollektiv: *Tabellenbuch Metall*. 42. Aufl. ISBN 3-8085-1722-0. Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Grutten, 2002.
- [32] Berns, H. und Theisen, W.: *Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen*. 4. bearb. Aufl. ISBN 978-3-540-79957-3. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-79957-3>.

## QUELLEN XI

- [33] Blumenauer, H.: *Werkstoffprüfung*. 6., stark überarb. und erw. Aufl. ISBN 3-342-00547-5. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig/Stuttgart, 1994, S. 56–74, 80–82, 112–127, 147–152, 177–179, 184–188.
- [34] Brandt, S.: *Datenanalyse für Naturwissenschaftler und Ingenieure*. 5. Auflage. ISBN 978-3-642-37664-1. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-37664-1>.
- [35] Doege, E. und Behrens, B.-A.: *Handbuch Umformtechnik - Grundlagen, Technologien, Maschinen*. ISBN 978-3-642-04249-2. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2010, S. 55–63. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-04249-2>.

## QUELLEN XII

- [36] Ginzburg, V. B.: *Steel-rolling Technology - Theory and Practice*. ISBN 0-8247-8124-4. Dekker, New York, 1989.
- [37] Gorski, W.: *Dilatometrie - Grundlagen und Messverfahren*. ISBN 3-89429-751-4. Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaften, Bremerhaven, 1996.
- [38] Gottstein, G.: *Physikalische Grundlagen der Materialkunde*. 3. Aufl. ISBN 978-3-540-71104-9. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2007. DOI:  
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-71105-6>.

## QUELLEN XIII

- [39] Gutte, H. und Weiß, A.: *Spannungs- und verformungsinduzierte Martensitbildung in metastabilen austenitischen CrNi-Stählen*. Habilitationsschrift. Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie der TU Bergakademie Freiberg, 2011.
- [40] Heinemann, G.: *Virtuelle Bestimmung des Verfestigungsverhaltens von Bändern und Blechen durch verformungsinduzierte Martensitbildung bei metastabilen rostfreien austenitischen Stählen*. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2004.

## QUELLEN XIV

- [41] Hornbogen, E., Eggeler, G. und Werner, E.: *Werkstoffe - Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen*. 10., neu bearb. Aufl. ISBN 978-3-642-22561-1. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-22561-1>.
- [42] Jahn, A.: *Einfluss der Martensitbildung auf die mechanischen Eigenschaften von ein- und mehrphasigen gegossenen und warmgewalzten Cr-Mn-Ni-Stählen*. 1. Aufl. Dissertation, ISBN 978-3-8440-0765-7. Shaker-Verlag, Herzogenrath, 2012.
- [43] Koyro, N.: *Kaltwalzen von austenitischem Stahlguss mit Phasenumwandlungseffekten*. Experimentelle Studienarbeit. Institut für Eisen- und Stahltechnologie der TU Bergakademie Freiberg, 2013.

## QUELLEN XV

- [44] Krüger, L.: *Werkstoffprüfung*. Vorlesungsunterlagen. Institut für Werkstofftechnik der TU Bergakademie Freiberg, 2007, S. 19, 30.
- [45] Läßle, V.: *Wärmebehandlung des Stahls - Grundlagen, Verfahren und Werkstoffe*. 9., akt. Aufl. ISBN 978-3-8085-1309-5. Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2006.
- [46] Lehnert, W.: „Thermomechanische Behandlung der Stähle, wichtigste Einflussgrößen und erreichbarer Effekt“. In: *Neue Hütte* 13.12 (Dez. 1968). ISSN 0028-3207, S. 716–722.

## QUELLEN XVI

- [47] Lehnert, W., Wohlfarth, U. und Zengler, P.: *Werkstoffseitige, verfahrenstechnische und prozesstheoretische Grundlagen der thermomechanischen Behandlung*. 1. Aufl. Dt. Verl. f. Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982.
- [48] Liedtke, D.: *Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen I - Grundlagen und Anwendungen*. 7. völlig neu bearb. Aufl. ISBN 978-3-8169-2435-8. Expert-Verlag Renningen-Malmsheim, 2007, S. 257–259.
- [49] Lührs, C. H. und Kudermann, G.: *Funkenspektrometrie - Leitfaden für die chemische Analyse von Metallen durch optische Emissionsspektralanalyse (OES) mit Funkenanregung*. ISBN 3-9804860-0-1. GDMB, Clausthal-Zellerfeld, 1996.

## QUELLEN XVII

- [50] Merziger, G. et al.: *Formeln und Hilfen zur Höheren Mathematik*. 4. Aufl. ISBN 3-923923-35-X. Binomi Verlag Springe, 2004.
- [51] Neuhold, P.: *Schmelzprotokoll AWI*. Institut für Eisen- und Stahltechnologie der TU Bergakademie Freiberg, 15.04.2013.
- [52] Rooch, A.: *Statistik für Ingenieure*. ISBN 978-3-642-54857-4. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-54857-4>.
- [53] Rowland, E. S. und Lyle, S. R.: „The Application of MS Points to Case Depth Measurements“. In: *Transactions of the American Society for Metals* 37 (1946), S. 27–47.



## QUELLEN XVIII

- [54] Sandig, F.: *Kaltumformbarkeit der hochlegierten metastabilen Stahlgusslegierung G-X5CrMnNiN 19-3-4-0,18*.  
Experimentelle Studienarbeit. Institut für Eisen- und  
Stahltechnologie der TU Bergakademie Freiberg, März 2014.  
URL: [https://www.dropbox.com/s/sjydgx90yoxc8a3/  
Studienarbeit\\_Sandig\\_2014\\_HP.pdf](https://www.dropbox.com/s/sjydgx90yoxc8a3/Studienarbeit_Sandig_2014_HP.pdf).
- [55] Schumann, H. und Oettel, H.: *Metallografie*. 15., überarb.  
und erw. Aufl. ISBN 978-3-527-32257-2. WILEY-VCH Verlag  
GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2011, S. 55–249, 565–772.
- [56] Shapiro, S. S. und Wilk, M. B.: „An Analysis of Variance Test  
for Normality (Complete Samples)“. In: *Biometrika* 52.3/4  
(Dez. 1965), S. 591–611. URL: [http:  
//sci2s.ugr.es/keel/pdf/algorithm/articulo/shapiro1965.pdf](http://sci2s.ugr.es/keel/pdf/algorithm/articulo/shapiro1965.pdf).

## QUELLEN XIX

- [57] Skoog, D. A., Holler, F. J. und Crouch, S. R.: *Instrumentelle Analytik - Grundlagen, Geräte, Anwendungen*. Hrsg. von Reinhard Nießner. 6., vollst. überarb. und erw. Aufl. ISBN 978-3-642-38169-0. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2013.
- [58] Steim, H.-J.: „Untersuchungen zum Verfestigungsverhalten martensitahärtbarer Stähle“. Diss. Universität Karlsruhe, 1970.
- [59] Stoyan, D.: *Stochastik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. ISBN 978-3-86012-322-5. Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2007.

## QUELLEN XX

- [60] Stry, Y. und Schwenkert, R.: *Mathematik kompakt für Ingenieure und Informatiker*. 2. Auflage. ISBN-13 978-3-540-32311-2. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-32312-0>.
- [61] Thas, O.: *Comparing Distributions*. ISBN: 978-0-387-92710-7. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-92710-7>.
- [62] Weiß, A.: „Hochfester und kaltumformbarer austenitischer Stahlguss mit TRIP-/TWIP-Eigenschaften“. In: *Gießerei* 100 (4/2013). ISSN 0175-1034, S. 54–65.
- [63] Weiß, A.: *Verfahren zur Herstellung eines hochfesten bzw. höchstfesten Formteils aus härtbarem Stahl*. Patentanmeldung. Deutsches Patent- und Markenamt, 2013.

## QUELLEN XXI

- [64] Weiß, A.: *Spezielle Eisenwerkstoffe*. Vorlesungsunterlagen. Institut für Eisen- und Stahltechnologie der TU Bergakademie Freiberg, Apr. 2010.
- [65] Weiß, A.: *Eisenwerkstoffe 2*. Vorlesungsunterlagen. Institut für Eisen- und Stahltechnologie der TU Bergakademie Freiberg, Mai 2009.
- [66] Weiß, A.: *Eisenwerkstoffe 1*. Vorlesungsunterlagen. Institut für Eisen- und Stahltechnologie der TU Bergakademie Freiberg, Dez. 2008.
- [67] Weiß, A., Gutte, H. und andere: „Nichtrostende Stähle mit TRIP/TWIP/SBIP-Effekt“. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 40.8 (2009). ISSN 0933-5137, S. 606–611.

## QUELLEN XXII

- [68] Czichos, H., Hrsg.: *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*. ISBN 978-3-540-30300-8. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2007, S. 283–379.
- [69] Geschke, D., Hrsg.: *Physikalisches Praktikum*. 12. Aufl. ISBN 3-519-10206-4. B. G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden, 2001, 20–36, 285f.
- [70] Schatt, W., Hrsg.: *Werkstoffwissenschaft*. 10. vollst. überarb. Aufl. ISBN 978-3-527-32323-4. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2011.