

vgbe-Technisch-wissenschaftlicher Bericht

# 9 % bis 12 % Cr-Stähle – Auslegung, Herstellung, Betrieb und Sicherheitskonzepte

VGBE-TW 531



vgbe-Technisch-  
wissenschaftlicher Bericht

**9 % bis 12 % Cr-Stähle –**

**Auslegung, Herstellung,  
Betrieb und Sicherheits-  
konzepte**

VGBE-TW 531

Herausgeber:  
vgbe energy e.V.

Verlag:  
vgbe energy service GmbH  
Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften  
Deilbachtal 173 | 45257 Essen

Tel.: +49 201 8128-200  
E-Mail: sales-media@vgbe.energy

ISBN 978-3-96284-303-8 (Print, Deutsch)  
ISBN 978-3-96284-304-5 (eBook, Deutsch)  
ISBN 978-3-96284-305-2 (Print, Englisch)  
ISBN 978-3-96284-306-9 (eBook, Englisch)

Alle Rechte vorbehalten, vgbe energy.

[www.vgbe.energy](http://www.vgbe.energy) | [www.vgbe.services](http://www.vgbe.services)

### **Urheberrechtsvermerk**

*vgbe-Berichte, hier im Weiteren als „Werk“ bezeichnet, und sämtliche im Werk enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Es liegt in der alleinigen Zuständigkeit von vgbe energy, die Nutzungsrechte wahrzunehmen.*

*Der Begriff „Werk“ umfasst die vorliegende Publikation sowohl in gedruckter als auch in digitaler Form. Der Urheberrechtsschutz umfasst dieses Werk als Ganzes als auch Teile bzw. Ausschnitte.*

*Jede Nutzung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Genehmigung des vgbe energy unzulässig. Dies gilt für jede Form von Vervielfältigung, Übersetzung, Digitalisierung sowie Veränderung.*

### **Haftungsausschluss**

*vgbe-Berichte sind Empfehlungen, deren Anwendung freigestellt ist. Sie berücksichtigen den zum Zeitpunkt der jeweiligen Ausgabe herrschenden bekannten Stand der Technik. Sie erheben jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit.*

*Die Anwendung erfolgt auf eigene Verantwortung und auf eigene Gefahr. vgbe energy e.V. schließt insoweit jegliche Haftung aus.*

*Die deutschsprachige Version dieses vgbe-Berichts ist für Übersetzungen die maßgebliche Referenzausgabe.*

### **Hinweis zur Behandlung von Änderungsvorschlägen**

*Änderungsvorschläge können an die E-Mail-Adresse **vgbe-standard@vgbe.energy** gesendet werden. Zur eindeutigen Zuordnung des Inhalts sollte die Betreffzeile die Kurzbezeichnung des betreffenden Dokuments enthalten.*

## Vorwort

Der vorliegende Bericht hat zum Ziel, den in Deutschland aktuell vorliegenden Erkenntnisstand über die qualitätsgerechte Herstellung, Verarbeitung und Auslegung der in der Energie- und Prozessindustrie eingesetzten, mittlerweile etablierten 9 % bis 12 %-Cr-Stahlsorten bzw. deren Anwendungen zusammenzufassen. Weiterhin werden Hinweise und Vorschläge zur wiederkehrenden Prüfung und Überwachung der aus diesen Stahlsorten gefertigten Komponenten unter Betriebsbedingungen gegeben. Darüber hinaus wird über neue internationale Forschungsschwerpunkte und -richtungen informiert.

Die Verfasser sind sich einig, dass dieses Dokument nicht allumfassend sein kann, denn es existiert mittlerweile eine riesige Fülle an wissenschaftlichen Publikationen zu dieser Werkstofffamilie und insbesondere zu einzelnen Sorten. Es ist vielmehr eine Zusammenstellung der relevanten Informationen als Einführung für den Anwender in der konventionellen Kraftwerkstechnik sowie in den zukünftigen Energiewandlungsanlagen. Das Autorenkollektiv hat sowohl vertiefende Details als auch vergleichende Betrachtungen einfließen lassen.

Essen, März 2023

vgbe energy e.V.\*

\* vgbe energy e.V. ist seit April 2022 der neue Name des VGB PowerTech.

## Autoren

Den nachfolgend aufgeführten Bearbeitern dieses Technisch-wissenschaftlichen Berichts sei an dieser Stelle von der vgbe-Geschäftsstelle recht herzlich gedankt:

Dr. Mirko Bader	Uniper Kraftwerke GmbH
Dr. Jörg Bareiß	EnBW Energie Baden-Württemberg AG
Andreas Diwo	Saarschmiede GmbH
Dr. Bernhard Donth	ehemals Saarschmiede GmbH
Jens Ganswind-Eyberg	vgbe energy e.V.
Prof. John Hald	Technical University of Denmark
Thomas Hauke	ehemals Lausitz Energie Kraftwerke AG
Dr. Simon Heckmann	RWE Technology International GmbH
Dr. Torsten-Ulf Kern	Siemens Energy Global GmbH & Co. KG
Dr. Andreas Klenk	Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
Clemens Koalick	Wärme Hamburg GmbH
Patrick Kozlowski	Lausitz Energie Kraftwerke AG
Dr. Ronny Krein	voestalpine Böhler Welding Germany GmbH
Dr. Gerhard Maier	Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM
Stefan Mathias	Bilfinger Engineering & Technologies GmbH
Dr. Ralf Mohrmann	ehemals RWE Power AG
Jochen Mußmann	VAIS Verband für Anlagentechnik und IndustrieService e.V.
Dr. Michael Schwienheer	Technische Universität Darmstadt
Dr. Peter Seliger	Siempelkamp Prüf- und Gutachter-Gesellschaft mbH
Tobias Steck	ehemals GE Power
Dr. Marko Subanovic	Vallourec Deutschland GmbH
Dr. Annett Udoh	Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

**Inhalt**

<b>1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Entwicklung der Stahlgruppe und Stahlerzeugung.....</b>	<b>10</b>
2.1	Zielsetzung für die Entwicklung von warmfesten martensitischen Stählen .....	10
2.1.1	Weiterentwicklung der 12 % CrMoV-Stahlgüten .....	12
2.1.2	Vorteile in Verarbeitbarkeit und der Festigkeitskennwerte .....	13
2.1.3	Erhöhung der Zeitstandfestigkeit .....	14
2.2	Werkstofftechnische Grundlagen für die martensitischen Stähle.....	16
2.2.1	Wirkungsweise der Hauptlegierungselemente.....	19
2.2.2	Einfluss der Begleitelemente und Verunreinigungen .....	21
2.3	Stahlerzeugung.....	22
2.3.1	Erschmelzung und Blockguss.....	22
2.3.2	Bekannte Seigerungseffekte an einem Bauteil .....	27
2.4	Moderne martensitische Stahlgüten .....	28
<b>3</b>	<b>Verarbeitung und Methoden zur Absicherung der Qualität .....</b>	<b>30</b>
3.1	Regelwerke.....	30
3.1.1	Harmonisierte Europäische Normen.....	31
3.1.2	Harmonisierte Normen für legierte Stähle.....	32
3.1.3	Europäische Werkstoffzulassung.....	33
3.1.4	Ergänzende Spezifikationen und Richtlinien zu Produkt- und Werkstoffnormen .....	34
3.1.5	Weitere Regelwerke im Bereich Druckgeräte .....	37
3.2	Umformen (Schmieden).....	38
3.2.1	Ziele des Schmiedens .....	38
3.2.2	Wesentliche Umformparameter und deren Einfluss.....	40
3.2.3	Anforderungen an Schmiedeaggregate (Freiformschmiedepressen) .....	44
3.2.4	Schmieden und Wärmebehandlung warmfester 9 % bis 12 % Cr-Stähle .....	45
3.3	Umformung (Rohrherstellung) .....	48
3.3.1	Vormaterial .....	51
3.3.2	Rohrfertigung .....	53
3.3.3	Wärmebehandlung .....	54
3.3.4	Qualitätssicherung .....	56
3.4	Induktivbiegen martensitischer 9 % bis 12 % Cr-Stahlrohre .....	58
3.4.1	Anforderungen an die Rohre .....	58
3.4.2	Biegeprozess .....	59
3.4.3	Wärmebehandlung und Prüfungen .....	59
3.4.4	Maßkontrolle .....	60
3.5	Kaltverformung / Kaltbiegen .....	63

3.5.1	Kaltbiegeprozess .....	64
3.5.2	Qualitätssicherungsmaßnahmen .....	64
3.5.3	Notwendigkeit einer möglichen Wärmebehandlung.....	65
3.5.4	Qualitätsprüfungen / Abnahmeprüfungen .....	66
3.6	Wärmebehandlung nach Umformung von Rohren.....	69
3.7	Schweißtechnik.....	70
3.7.1	Schweißzusätze.....	70
3.7.2	Wärmeführung.....	71
3.7.3	Wärmenachbehandlung.....	75
3.7.4	Rolle und Bedeutung der Schweißparameter .....	83
3.7.5	Schweißtechnische Vorgaben und Qualitätsanforderungen .....	83
3.7.6	Schweißen moderner Werkstoffe.....	89
3.7.7	Zusammenfassung .....	91
<b>4</b>	<b>Auslegung, Betrieb und Sicherheitskonzepte.....</b>	<b>92</b>
4.1	Auslegung.....	92
4.2	Schweißminderungsfaktoren und Mindestwerte der Zeitstandfestigkeit martensitischer Grade 91- und Grade 92-Rohrschweißverbindungen.....	92
4.3	Betrieb, wiederkehrende Prüfungen und Lebensdauerüberwachung .....	95
4.4	Analyse von Betriebsdaten, Lebensdauerberechnung .....	102
4.4.1	Ermittlung der individuellen Streubandlage einer verbauten Charge .....	102
4.4.2	Kriechermüdungsinteraktion .....	104
4.4.3	Lebensdauerberechnungen mit Expertensystemen.....	107
4.4.4	Lebensdauerabschätzung auf der Basis des Härteabfalls für 9 % bis 12 % Chromstähle.....	108
4.4.5	Small Punch Creep Test (SPCT) .....	109
4.5	Kriechduktilität .....	110
4.5.1	Zeitstanddaten der Werkstoffe Grade 91 und Grade 92 des European Creep Collaboration Committee .....	110
4.5.2	Zeitstanddaten von Komponenten aus im Betrieb befindlichen Anlagen .....	111
4.5.3	Zeitstandbruchverformungsdaten der Werkstoffe Grade 91 und Grade 92.....	113
4.5.4	DECS-Diagramm .....	117
4.5.5	Einfluss der Mikrostruktur .....	120
4.6	Bruchmechanische Bewertungskonzepte.....	124
4.6.1	Zwei-Kriterien-Verfahren.....	125
4.6.2	Stabiler Rissfortschritt.....	126
4.6.3	Betrachtungen zum Leck-vor-Bruch .....	127
4.7	Oxidationsverhalten unter Dampf und im Rauchgas.....	129
4.8	Schadensfälle .....	132

<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>142</b>
<b>6</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>144</b>
<b>7</b>	<b>Abkürzungen .....</b>	<b>153</b>
<b>8</b>	<b>Bildanhang .....</b>	<b>155</b>