

# RWhM

## Richtlinien für Werkstoffe in hydraulischen Maschinen Ausgabe 2019



Foto: Ennskraftwerke AG, Österreichische Bundesbahnen, Verbund

**e** oesterreichs  
energie.

Brahmsplatz 3  
A – 1040 WIEN

# IMPRESSUM

---

**Aktualisierte und erweiterte Auflage 2019**

## **Medieninhaber und Verleger:**

Österreichs E-Wirtschaft Akademie GmbH

A-1040 Wien, Brahmplatz 3, Telefon: +43 (0)1 501 98-304, Fax: +43 (0)1 50 198-902

E-Mail: [akademie@oesterreichsenergie.at](mailto:akademie@oesterreichsenergie.at)

©2019, Wien.

Die Richtlinien für Werkstoffe in hydraulischen Maschinen (RWhM) sind urheberrechtlich geschützt. Nachdruck oder Vervielfältigung von Teilen des Inhalts auf oder in sonstige Medien oder Datenträger zur Erstellung von Vorschriften für Ausschreibung, Bestellung und Betrieb von Kraftwerkskomponenten ist nur mit Quellenverweis gestattet.

Artikelnummer: 152/011e

ISBN: 978-3-902222-79-4

# INHALTSVERZEICHNIS

Vorgeschichte .....	1
Weiterentwicklung .....	1
Vorwort zur Ausgabe 2019 .....	2
<b>1 GRUNDSÄTZLICHE HINWEISE .....</b>	<b>4</b>
1.1 Inhalt der Richtlinien .....	4
1.2 Zweck der Richtlinien.....	4
1.3 Anwendung der Richtlinien .....	4
1.3.1 Anwendungsbereich der Richtlinien.....	4
1.3.2 Beurteilung von Bauteilen hydraulischer Turbinen, Absperrorganen und Generatoren .....	4
1.3.3 Verwendung der Richtlinien als Ausschreibungs- bzw. Bestellgrundlage.....	5
1.3.4 Vereinfachte Anwendung der Richtlinien .....	5
1.3.5 Herstelleraudit (Lieferantenaudit).....	5
1.3.6 Unterlieferanten.....	8
1.3.7 Heranziehung von Sachverständigen oder Prüfstellen .....	8
1.4 Zuständigkeit.....	8
<b>2 VORSCHREIBUNGEN FÜR FESTIGKEITSNACHWEISE .....</b>	<b>9</b>
2.1 Geltungsbereich .....	9
2.2 Umfang von Festigkeitsnachweisen .....	9
2.3 Durchführung von Festigkeitsnachweisen.....	10
2.4 Regelwerke für Maschinenbauteile .....	11
2.4.1 Allgemeines.....	11
2.4.2 FKM-Richtlinie .....	11
2.4.3 k-Faktoren .....	15
2.4.4 Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen .....	16
2.4.5 Schraubenverbindungen.....	16
2.5 Regelwerke für druckbeaufschlagte Bauteile.....	17
2.5.1 Allgemeines.....	17
2.5.2 AD 2000-Merkblätter .....	17
2.5.3 Unbefeuerte Druckbehälter.....	18
2.5.4 Hinweise zu Spannungskategorien.....	19
2.6 Kontrolle von Festigkeitsnachweisen.....	20
2.7 Dokumentation von Festigkeitsnachweisen.....	21
2.8 Zusammenhang mit Ausführung und Qualitätssicherung .....	22
2.9 Vergleich der Bemessung mittels k-Faktoren und nach FKM.....	23
2.9.1 Statische Beanspruchung.....	23
2.9.2 Ermüdungsbeanspruchung.....	24

<b>3</b>	<b>VORSCHREIBUNGEN FÜR WERKSTOFFE IN HYDRAULISCHEN MASCHINEN .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Allgemeine Vorschriften .....</b>	<b>29</b>
3.1.1	Vorbemerkungen .....	29
3.1.2	Werkstoffwahl und Prüfumfang .....	30
3.1.3	Betriebliche Besonderheiten .....	30
<b>3.2</b>	<b>Zusammenstellung gebräuchlicher Werkstoffe und Prüfvorschläge (Werkstoffliste) .....</b>	<b>30</b>
3.2.1	Werkstoffe in Kaplan- und Rohrturbinen .....	32
3.2.2	Werkstoffe in Peltonturbinen .....	38
3.2.3	Werkstoffe in Francisturbinen, Pumpen und Pumpturbinen .....	43
3.2.4	Werkstoffe in Absperr- und Regelorganen .....	47
3.2.5	Werkstoffe in Generatoren .....	52
3.2.6	Werkstoffe für allgemeine Bauteile .....	58
<b>3.3</b>	<b>Vorschriften im Zusammenhang mit der Verarbeitung der Werkstoffe .....</b>	<b>60</b>
3.3.1	Vorbemerkungen .....	60
3.3.2	Gießen .....	60
3.3.3	Schmieden .....	60
3.3.4	Kaltverformung .....	61
3.3.5	Mechanische Bearbeitung .....	61
3.3.6	Schweißen .....	62
3.3.7	Löten .....	75
3.3.8	Brennschneiden .....	75
3.3.9	Laserschneiden .....	76
3.3.10	Thermisches Spritzen .....	77
3.3.11	Wärmebehandlungen .....	79
3.3.12	Sonstige Verarbeitungs- und Bearbeitungsmethoden .....	79
<b>3.4</b>	<b>Vorschriften für die Prüfung von Werkstoffen und Bauteilen .....</b>	<b>81</b>
3.4.1	Allgemeines .....	81
3.4.2	Durchführung der Prüfungen .....	82
3.4.3	Probekörper und mechanische Prüfungen .....	82
3.4.4	Chemische Analyse .....	83
3.4.5	Geräte für die Prüfungen .....	83
3.4.6	Prüforgane .....	83
3.4.7	Freigabe oder Rückweisung eines Bauteiles bzw. Werkstoffes .....	83
3.4.8	Protokoll über die Prüfungen .....	83
<b>3.5</b>	<b>Hinweise für die Bestellung neuer Bauteile aus GX4CrNiMo13-4 .....</b>	<b>84</b>
3.5.1	Allgemeines .....	84
3.5.2	Werkstoffvorschriften .....	84
3.5.3	Hinweise für den Konstrukteur .....	85
3.5.4	Einfluss der Oberflächengüte .....	85
<b>3.6</b>	<b>Vorschriften für Laufräder .....</b>	<b>86</b>
3.6.1	Ausführungsformen .....	86
3.6.2	Hochbeanspruchte Querschnitte .....	86
3.6.3	Prüfung der Werkstoffe .....	89
3.6.4	Prüfmethoden für die Laufradprüfungen .....	90

3.6.5	Fehlerbeurteilung.....	92
3.6.6	Tolerierung von Fehlern.....	92
3.6.7	Beseitigung von Fehlern.....	95
3.6.8	Ausbesserung durch Schweißen .....	95
3.6.9	Durchführen von Schweißungen.....	96
3.6.10	Wuchten des Laufrades.....	97
<b>3.7</b>	<b>Vorschreibungen für Wellen.....</b>	<b>98</b>
3.7.1	Allgemeines.....	98
3.7.2	Prüfung der Werkstoffe für Wellen.....	98
3.7.3	Prüfmethoden für die Rohlings- bzw. Wellenprüfung .....	99
3.7.4	Sonstige Vorschreibungen.....	101
3.7.5	Tolerierung von Fehlern.....	101
<b>3.8</b>	<b>Vorschreibungen für mechanische Verbindungselemente .....</b>	<b>102</b>
3.8.1	Allgemeines.....	102
3.8.2	Konstruktionshinweise.....	103
3.8.3	Materialauswahl .....	106
3.8.4	Prüfung der Schrauben und deren Werkstoffe.....	107
3.8.5	Prüfmethoden für die Rohlings- bzw. Fertigteilprüfung .....	108
3.8.6	Montagehinweise.....	112
3.8.7	Korrosionsschutz.....	114
<b>3.9</b>	<b>Vorschreibungen für Gleitlager .....</b>	<b>116</b>
3.9.1	Allgemeines.....	116
3.9.2	Betriebsverhältnisse der Lager .....	118
3.9.3	Werkstoffauswahl .....	118
3.9.4	Prüfmethoden für Lager.....	121
3.9.5	Ausbesserung von Fehlern in der Lagermetallschicht.....	123
<b>3.10</b>	<b>Absperr- und Regelorgane .....</b>	<b>124</b>
3.10.1	Allgemein .....	124
3.10.2	Kugelhähne und Kugelschieber.....	124
3.10.3	Drosselklappen (Absperrklappen).....	126
3.10.4	Ringschieber .....	127
3.10.5	Kegelstrahlschieber.....	130
<b>3.11</b>	<b>Vorschreibungen für Bauteile, die unter hydraulischem Druck stehen .....</b>	<b>132</b>
3.11.1	Allgemeines.....	132
3.11.2	Druckprobe.....	132
3.11.3	Dichtheitsprobe .....	133
3.11.4	Wanddickenkontrolle .....	133
<b>3.12</b>	<b>Vorschreibungen im Zusammenhang mit zerstörungsfreien Werkstoffprüfungen .....</b>	<b>134</b>
3.12.1	Vorschreibungen im Zusammenhang mit der Prüfungsvorbereitung.....	134
3.12.2	Vorschreibungen im Zusammenhang mit der Prüfungsdurchführung .....	136
3.12.3	Empfehlungen im Zusammenhang mit der Prüfungsbewertung.....	138

<b>4</b>	<b>PRÜFMETHODEN .....</b>	<b>142</b>
4.1	<b>Zerstörende Werkstoffprüfungen und Analyse.....</b>	<b>142</b>
4.1.1	Allgemeines.....	142
4.1.2	Chemische Analyse.....	142
4.1.3	Zugversuch.....	144
4.1.4	Kerbschlagbiegeversuch .....	145
4.1.5	Prüfungen zur Beurteilung der Sprödbrüchanfälligkeit.....	148
4.1.6	Härteprüfung .....	150
4.1.7	Dauerschwingversuch .....	153
4.2	<b>Zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen .....</b>	<b>156</b>
4.2.1	Allgemeines.....	156
4.2.2	Visuelle Kontrolle.....	156
4.2.3	Eindringprüfung .....	156
4.2.4	Magnetpulverprüfung.....	157
4.2.5	Ultraschallprüfung.....	163
4.2.6	Durchstrahlungsprüfung .....	169
4.2.7	Mikroskopische Prüfung; Ambulante Metallografie (Replikaverfahren, Replikafolien, Lackabzugverfahren).....	172
4.2.8	Prüfung galvanischer Überzüge auf Dichtheit und Dicke (Ferroxyl - Prüfung).....	177
4.2.9	Prüfung auf Druckfestigkeit und Dichtheit .....	177
4.2.10	Geometrische Prüfungen.....	178
4.2.11	Sonstige Prüfungen .....	179
<b>5</b>	<b>INSTANDHALTUNG .....</b>	<b>184</b>
5.1	<b>Begriffe der Instandhaltung.....</b>	<b>184</b>
5.1.1	Instandhaltungstätigkeiten .....	184
5.1.2	Instandhaltungsarten .....	186
5.2	<b>Werkstoffrelevante Aspekte .....</b>	<b>187</b>
5.2.1	Zielsetzung .....	187
5.2.2	Umfang der Instandhaltungsmaßnahmen.....	187
5.2.3	Übernahme einer Anlage.....	187
5.2.4	Betriebliche Dokumentation.....	187
5.2.5	Instandhaltungstätigkeiten .....	188
5.2.6	Instandhaltungsintervalle .....	188
5.2.7	Ausbesserung von Schäden.....	189
5.3	<b>Hinweise für die Behandlung von Laufrädern und anderen Bauteilen aus Chrom-Nickel-Stählen im Betrieb.....</b>	<b>190</b>
5.3.1	"Werkstoffgutmütigkeit".....	190
5.3.2	Verminderung der örtlichen Spannungserhöhung.....	190
5.3.3	Abhilfe gegen Oberflächenkorrosion.....	190
5.3.4	Einfluss der Stillstandskorrosion.....	190
5.3.5	Inspektionsintervalle .....	191

<b>5.4</b>	<b>Betriebliche Überprüfung von Kaplanlaufrädern .....</b>	<b>192</b>
5.4.1	Zweck der Überprüfung .....	192
5.4.2	Prüfmethoden.....	192
5.4.3	Prüfintervalle .....	193
<b>5.5</b>	<b>Betriebliche Überprüfung von Peltonlaufrädern .....</b>	<b>193</b>
5.5.1	Zweck der Überprüfung .....	193
5.5.2	Prüfmethoden.....	193
5.5.3	Prüfintervalle .....	194
<b>5.6</b>	<b>Betriebliche Überprüfung von Francis-, Pumpen- und Pumpturbinen- Laufrädern .....</b>	<b>197</b>
5.6.1	Zweck der Überprüfung .....	197
5.6.2	Prüfmethoden.....	197
5.6.3	Prüfintervalle .....	198
<b>5.7</b>	<b>Reparatur von Schäden an Laufrädern.....</b>	<b>199</b>
5.7.1	Allgemeines.....	199
5.7.2	Schweißungen an Laufrädern.....	199
5.7.3	Prüfung der Schweißungen .....	201
5.7.4	Sonderfälle .....	201
<b>5.8</b>	<b>Betriebliche Überprüfung von Wellen und Kuppelbolzen .....</b>	<b>202</b>
5.8.1	Zweck der Überprüfung .....	202
5.8.2	Prüfmethoden.....	202
5.8.3	Prüfintervalle .....	203
5.8.4	Reparaturen von Schäden.....	203
5.8.5	Ausbesserung sonstiger Wellenschäden .....	203
<b>5.9</b>	<b>Betriebliche Überprüfung von Gleitlagern.....</b>	<b>204</b>
5.9.1	Zweck der Überprüfung .....	204
5.9.2	Prüfmethoden.....	204
5.9.3	Prüfintervalle .....	205
5.9.4	Schäden durch Lagerströme .....	205
5.9.5	Schäden durch Kavitation.....	205
5.9.6	Ausbesserung von Schäden im Lagermetall.....	206

## Vorgeschichte

Im Jahre 1966 war in einem österreichischen Kraftwerk ein Peltonlaufrad während des Betriebes plötzlich geborsten. Dieser Schaden führte zu eingehenden Untersuchungen, die sich mit den Beanspruchungen des Materials, der Konstruktion sowie den Werkstoffeigenschaften und ihrer Prüfung befassten. Da aus Sicht der Wasserrechtsbehörde sogar ein Fall von "Gefährdung der öffentlichen Sicherheit" vorlag, sah sich der Verband der Elektrizitätswerke Österreichs (VEÖ, heute „Österreichs E-Wirtschaft“) veranlasst, den Werkstoff-Fragen der hydraulischen Maschinen erhöhte Aufmerksamkeit zuzuwenden und durch verstärkten Erfahrungsaustausch zur Erhöhung der Sicherheit der Kraftwerksanlagen beizutragen. Zur Wahrnehmung dieser Aufgabe wurde der Arbeitskreis (AK) "Werkstoff-Fragen", bestehend aus einschlägig erfahrenen Experten aus den Mitgliedsunternehmen, ins Leben gerufen. Primäre Zielsetzung des AK war die Erarbeitung von Werkstoff-Richtlinien sowie deren Verbreitung und ständige Anpassung an den Stand der Technik. Diese fanden 1978 im Ringbuch "Richtlinien für Werkstoffe in hydraulischen Maschinen (RWhM)" ihren Niederschlag und sind seither zum Standardwerk für die Beschaffung von Turbinen aber auch für den maschinenbaulichen Teil der Generatoren und stahlwasserbaulichen Anlagen avanciert.

Bei der Ausarbeitung der "Richtlinien für Werkstoffe in hydraulischen Maschinen" (RWhM) waren **zwei** Gesichtspunkte besonders maßgebend:

**Erstens** sollten die RWhM in der Form einer Empfehlung des VEÖ an seine Mitgliedsunternehmen Hinweise und Vorschreibungen für die Verwendung der Werkstoffe enthalten, die als Grundlage für Bestellung, Prüfung und Betrieb hydraulischer Maschinen dienen;

**Zweitens** sollten in die RWhM auch allgemeine Informationen für das Personal der EVU aufgenommen werden, um ihm Kenntnisse zu vermitteln, über die es naturgemäß nicht von vornherein verfügt.

Diesem Aspekt wurde besondere Bedeutung zugemessen. Die EVU besitzen in ihrem Mitarbeiterstab kaum jemals ausgesprochene Werkstoffspezialisten, wohl aber erfahrene Ingenieure, Werkmeister, Vorarbeiter und Arbeiter, in deren Tätigkeitsbereich immer wieder Werkstoffprobleme anfallen; die RWhM sollen diese Mitarbeiter zur intensiveren Befassung mit Werkstoff-Fragen anregen.

## Weiterentwicklung

Mittlerweile wurde eine große Anzahl grundsätzlicher und spezifischer Untersuchungen zum Problemkreis "Werkstoff, Belastbarkeit, Bruchsicherheit und Werkstoffprüfung" zur Abklärung der betreffenden Zusammenhänge durchgeführt. Beispielsweise wurde über 10 Jahre an einem Forschungsvorhaben über das Werkstoffverhalten bei Dauerbelastung unter Korrosionseinfluss gearbeitet, zuerst vom Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF (Fraunhofer LBF) in Darmstadt und später von der Technische Versuchs- und Forschungsanstalt (TVFA) der TU Wien. Der Arbeitskreis "Werkstofftechnik" hat die Koordination dieser Arbeiten im Auftrage der EVU und der Industrie übernommen und die Ergebnisse letztlich in entsprechende Empfehlungen eingebettet. Die Entwicklung des martensitischen, korrosionsbeständigen und bestens schweißbaren "Laufradwerkstoffes" **GX5CrNiMo13-4** (Werkstoff-Nr. 1.4313)<sup>1)</sup> ist wohl eines der bemerkenswertesten Zeugnisse dieser Bemühungen nach hoher und höchster Betriebssicherheit.

Darüber hinaus wurden wertvolle Impulse für einheitliche Prüfstandards gesetzt und die verlässliche Ausbildung von Personal der **zerstörungsfreien Prüfung** vorangetrieben. Die Mitarbeit an spezifischen Normungsvorhaben – Baustahlnormen, Betriebssicherheitsnormen, Prüfnormen – ist

---

<sup>1)</sup> Die Stahlbezeichnung GX5CrNiMo13-4 (1.4313) entsprach den früher gültigen Normen. In den derzeit geltenden Regelwerken wird der Werkstoff GX4CrNiMo13-4 als 1.4317 sowie der Werkstoff X3CrNiMo13-4 als 1.4313 bezeichnet.



bis zum heutigen Tage ein besonderes Anliegen der in den AK "Werkstofftechnik" entsandten Fachleute. Zu erwähnen ist auch die längst zum Standard gewordene eigens entwickelte **Werkstoffliste**, welche einen ganz wesentlichen Beitrag zum klaren Verständnis zwischen Hersteller und Besteller leistet. Darüber hinaus wurden spezifische Werkstofffragen bei den Prüfintervalen für Peltonlaufräder behandelt und in entsprechende Empfehlungen eingebettet.

## Vorwort zur Ausgabe 2019

Die nunmehr vorliegende Ausgabe wurde einerseits einer grundsätzlichen Überarbeitung unterzogen, andererseits wurden neue Kapitel aufgenommen, um vertiefende Grundlagen für die Bemessung, Ausführung und Anforderungen von modernen hydraulischen Wasserkraftanlagen zu schaffen.

Wesentlichen Ergänzungen und Änderungen dieser Ausgabe:

- Für die Bemessung der Bauteile wurde ein neues umfangreiches Kapitel eingefügt. Neben Hinweisen für die rein statische Berechnung wird auch die Ermüdungsfestigkeitsanalyse behandelt.
- Für das Herstelleraudit (Lieferantenaudit) sind nunmehr detaillierte Empfehlungen für die zu beurteilenden Punkte angeführt.
- Es erfolgte die Aktualisierung der Werkstofflisten bezüglich Werkstoffe, Normen und Kurzzeichen für Prüfungen. Insbesondere gilt dies für die Verbindungselemente, wobei bei der Gruppe Generator hier das Bauteil Verbindungselemente separat angeführt ist.
- Im Kapitel Schweißen sind die Themen Over- und Undermatching sowie Härterisse bei weichmartensitischen Werkstoffen aufgenommen.
- Die Vorschriften für Prüfung von Werkstoffen für Laufräder wurden zusammengefasst (früher getrennt für Kaplan, Francis und Pelton) und um die geschweißte und geschmiedete Ausführung von Laufrädern ergänzt.
- Detaillierte Vorschriften für Materialauswahl, Prüfung und Montage von mechanischen Verbindungselementen sind neu aufgenommen. Die Vorgabewerte für Kerbschlagwerte wurden - den Praxiswerten entsprechend - angepasst.
- Die Vorschriften für Gleitlager wurden für den Bereich Werkstoffauswahl für Stützkörper- und Lagermetallwerkstoffe sowie über Verfahren zur Aufbringung der Lagermetallschichten ergänzt. Die zerstörungsfreien Prüfungen sind praxisbezogen neu formuliert, da die bestehenden Normen ungeeignete Vorschriften enthalten.
- Der Abschnitt Qualitätsnachweise an Rohren und Formstücken aus duktilem Guss wurde nicht mehr aufgenommen.
- Im Kapitel Vorschriften im Zusammenhang mit zerstörungsfreien Werkstoffprüfungen wird nunmehr differenzierter auf verschiedenen Normen für verschiedene Herstellverfahren (Gießen, Schmieden, usw.) eingegangen, und es wurde das Verfahren Ultraschall-Array-Technik neu aufgenommen.
- Das Kapitel Instandhaltung ist komplett überarbeitet, und die Begriffe sind den derzeit geltenden Normen angepasst.
- Da die jeweils gültigen Normen und Regelwerke immer rascher Änderungen unterworfen sind, deren Anzahl sich ständig erhöht und damit der Aufwand für die Aktualisierung zu groß wurde, ist das Kapitel Tabellen und Normen nicht mehr in der RWhM enthalten (in der Ausgabe 2009 betraf dies Kapitel 6).
- Wenn in dieser Ausgabe Normen zitiert werden, so sind diese zum Ausgabezeitpunkt aktuell gehalten. Bitte vor Verwendung der Normen diese unbedingt auf Aktualität prüfen, gegebenenfalls die Nachfolgedokumente anwenden. Die Überprüfung auf Aktualität kann bei Austrian Standards - auch online - erfolgen.

Diese Tätigkeiten wurden von Experten aus dem Bereich Wasserkraft – in Weiterführung des Arbeitskreises “Werkstofftechnik und Qualitätssicherung hydraulischer Anlagen“ – vorgenommen.

Dem Expertenkreis gehörten während der Ausarbeitung der Neuauflage folgende Personen an:

AUER Wolfgang Michael, A.Dir.	TVFA Hydro TPA KKS
FELBERBAUER Josef, Dipl.-Ing.	Ennskraftwerke AG
HUBER Richard, Dipl.-Ing., Dr. techn.	TÜV Austria TVFA
JUNGBAUER Günter, Ing.	ehem. Ennskraftwerke AG
KELLNER Richard, Dipl.-Ing.	VERBUND Hydro Power GmbH
KLAUSNER Johann, Ing.	ehem. KELAG-Kärntner Elektrizitäts-AG
KREYCA Franz, Dipl.-Ing.	evn naturkraft Erzeugungsgesellschaft mbH
LEITNER Stefan, Dipl.-Ing.	KELAG-Kärntner Elektrizitäts-AG
LEMMERER August, Ing.	Energie AG Oberösterreich
MALDET Rainer, Ing.	TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG
MATSCHL Markus, Ing., MBA	Salzburg AG
SCHENK Christian, Dipl.-Ing., Dr. techn.	TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG
STEINER Peter, Dipl.-Ing.	evn naturkraft Erzeugungsgesellschaft mbH
USEL Helmut, Ing.	ÖBB-Infrastruktur AG
USEL Sarah, Ing.	ÖBB-Infrastruktur AG
WERLE Lucas, Dipl.-Ing.	Vorarlberger Illwerke AG