

AD 2000-Merkblatt

ICS 23.020.30

Ausgabe Mai 2018

Sonderfälle	Zeitstandsbeanspruchung für Stähle	AD 2000-Merkblatt S 6
--------------------	---	----------------------------------

Die AD 2000-Merkblätter werden von den in der „Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter“ (AD) zusammenarbeitenden, nachstehend genannten sieben Verbänden aufgestellt. Aufbau und Anwendung des AD 2000-Regelwerkes sowie die Verfahrensrichtlinien regelt das AD 2000-Merkblatt G 1.

Die AD 2000-Merkblätter enthalten sicherheitstechnische Anforderungen, die für normale Betriebsverhältnisse zu stellen sind. Sind über das normale Maß hinausgehende Beanspruchungen beim Betrieb der Druckbehälter zu erwarten, so ist diesen durch Erfüllung besonderer Anforderungen Rechnung zu tragen.

Wird von den Forderungen dieses AD 2000-Merkblattes abgewichen, muss nachweisbar sein, dass der sicherheitstechnische Maßstab dieses Regelwerkes auf andere Weise eingehalten ist, z. B. durch Werkstoffprüfungen, Versuche, Spannungsanalyse, Betriebserfahrungen.

FDBR e. V. Fachverband Anlagenbau, Düsseldorf

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI), Frankfurt/Main

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), Fachgemeinschaft Verfahrenstechnische Maschinen und Apparate, Frankfurt/Main

Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf

VGB PowerTech e. V., Essen

Verband der TÜV e. V. (VdTÜV), Berlin

Die AD 2000-Merkblätter werden durch die Verbände laufend dem Fortschritt der Technik angepasst.

Inhalt

	Seite
0 Präambel	2
1 Geltungsbereich.....	2
2 Allgemeines	2
3 Formelzeichen und Einheiten	2
4 Auslegung im Zeitstandsbereich.....	3
5 Belastungen.....	6
6 Anforderungen an die Bauteilausführung.....	7
7 Schrifttum.....	8
Anhang 1 zum AD 2000-Merkblatt S 6.....	9
Anhang 2 zum AD 2000-Merkblatt S 6.....	15
Anhang 3 zum AD 2000-Merkblatt S 6 (informativ).....	17
Anhang 4 zum AD 2000-Merkblatt S 6.....	19

Ersatz für Ausgabe September 2016; | = Änderungen gegenüber der vorangehenden Ausgabe

Die AD 2000-Merkblätter sind urheberrechtlich geschützt. Die Nutzungsrechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, die Wiedergabe auf fotomechanischem Wege und die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei auszugsweiser Verwertung, dem Urheber vorbehalten.

0 Präambel

Zur Erfüllung der wesentlichen Sicherheitsanforderungen der Druckgeräterichtlinie kann das AD 2000-Regelwerk angewandt werden, vornehmlich für die Konformitätsbewertung nach den Modulen „G“ und „B (Baumuster) + F“.

Das AD 2000-Regelwerk folgt einem in sich geschlossenen Auslegungskonzept. Die Anwendung anderer technischer Regeln nach dem Stand der Technik zur Lösung von Teilproblemen setzt die Beachtung des Gesamtkonzeptes voraus.

Bei anderen Modulen der Druckgeräterichtlinie oder für andere Rechtsgebiete kann das AD 2000-Regelwerk sinngemäß angewandt werden. Die Prüfständigkeit richtet sich nach den Vorgaben des jeweiligen Rechtsgebietes.

1 Geltungsbereich

1.1 Dieses AD 2000-Merkblatt enthält Kriterien zum Umgang mit zeitstandbeanspruchten Stählen. Es muss angewandt werden, wenn eine zeitabhängige Veränderung der Materialeigenschaften infolge Temperatureinfluss zu erwarten ist. Als untere Grenztemperaturen gelten dabei:

- etwa 380 °C für unlegierte Stähle,
- etwa 440 °C für niedriglegierte Stähle,
- etwa 525 °C für hochlegierte Stähle.

1.2 Die Bestimmung der genauen Grenztemperaturen hat in Abhängigkeit von der zutreffenden harmonisierten Materialnorm zu erfolgen. Die Anwendung weiterer Werkstoffe ist möglich, bedarf aber der Eignungsfeststellung in Form eines Materialeinzelgutachtens nach Richtlinie 2014/68/EU Anhang I Abs. 4.2 einer Notifizierten Stelle für den jeweiligen Anwendungsfall.

1.3 Dieses AD 2000-Merkblatt gilt nur in Verbindung mit den AD 2000-Merkblättern der Reihe B. Für die AD 2000-Merkblätter S 3 und S 4 bedarf es eines besonderen Spannungsbewertungskonzeptes.

2 Allgemeines

Bei Einhaltung der in diesem AD 2000-Merkblatt enthaltenen Kriterien zur Spannungsbegrenzung werden folgende Versagensarten berücksichtigt:

- Kriechbruch,
- Kriechverformung,
- Kriechermüdung.

Die Anwendung dieses Merkblattes setzt mindestens gesicherte Zeitstandfestigkeitskennwerte für den Grundwerkstoff und für das eignungsgeprüfte reine Schweißgut voraus.

Eine Lebensdauerüberwachung für Anlagen im Zeitstandbereich wird grundsätzlich empfohlen. In allen Fällen, in denen ein Sicherheitsbeiwert von $S_{f_{cr}} < 1,5$ (1,8 bei äußerem Überdruck) zugrunde gelegt wird, ist sie zwingend erforderlich.

Für Druckgeräte ohne Lebensdauerüberwachung ist die Nutzungsdauer generell auf 100000 Betriebsstunden beschränkt. Ausnahmen regelt Fußnote 3 zu Tafel 2. Ist ein Nachweis der bereits erlittenen Betriebsstunden nicht zu erbringen, zählen die 100000 Stunden ab dem Beginn des Herstellungsjahres des betroffenen Druckgerätes.

Die Vorgehensweise für Druckgeräte mit Lebensdauerüberwachung erfolgt entsprechend den Maßgaben aus DIN EN 12952-4 [3] bzw. nach VGB-Standard 506 [4] (beinhaltet die zurückgezogene TRD 508 Anlage 1 [2]); siehe auch Anhang 3 zum AD 2000-Merkblatt S 6.

Die Möglichkeit anderer Versagensarten muss ggf. zusätzlich überprüft werden (z. B. Versprödung, Hochtemperaturkorrosion bzw. -oxidation, elastische Instabilität, Spannungsrisskorrosion, Schwingungsrisskorrosion).

3 Formelzeichen und Einheiten

Über die Festlegungen des AD 2000-Merkblattes B 0 hinaus gilt:

f	zulässige Spannung bei ruhender Beanspruchung
$S_{f_{cr}}$	Sicherheitsbeiwert bei Zeitstandbeanspruchung
s_e	ausgeführte Wanddicke
R_m	Mindestwert der Zugfestigkeit bei 20 °C
$R_{m,t,g}(t_i, g_i)$	interpolierter Mittelwert der Zeitstandfestigkeit in Abhängigkeit von der Auslegungslebensdauer und der Berechnungstemperatur
$R_{m\ 100000\ 0}$	Mittelwert der Zeitstandfestigkeit für 100000 h bei Berechnungstemperatur
$R_{m\ 150000\ 0}$	Mittelwert der Zeitstandfestigkeit für 150000 h bei Berechnungstemperatur
$R_{m\ 200000\ 0}$	Mittelwert der Zeitstandfestigkeit für 200000 h bei Berechnungstemperatur
$R_{m\ 250000\ 0}$	Mittelwert der Zeitstandfestigkeit für 250000 h bei Berechnungstemperatur

4 Auslegung im Zeitstandbereich

4.1 Berechnungsdruck

Als Berechnungsdruck gilt mindestens der maximal zulässige Druck (PS) des betreffenden Druckgerätes. Darüber hinaus sind statische Drücke, soweit vorhanden, in voller Höhe zu berücksichtigen.

4.2 Berechnungstemperatur

Die Berechnungstemperatur setzt sich zusammen aus der zulässigen maximalen Temperatur (TS) und einem Temperaturzuschlag. Für den Wasser-/Dampf- und Heißdampfbereich gilt die nachfolgende Tafel 1, ansonsten gilt das AD 2000-Merkblatt B 0, Abschnitt 5.

4.3 Zulässige Spannung

4.3.1 Allgemeines

Zeitabhängige Festigkeitskennwerte umfassen in der Regel Wertebereiche ab 10000 h. Die Angabe derselben hat generell unter Quellennennung zu erfolgen. Vorzugsweise sind zeitabhängige Festigkeitskennwerte harmonisierten Normen zu entnehmen. Werden andere Quellen herangezogen, ist die Eignung der Werkstoffe gemäß AD 2000-Merkblatt W 0, Abschnitt 3.2.1 nachzuweisen.

Die Abschnitte 4.3.2 und 4.3.3 legen die Bildung der zulässigen Spannung f für die „Standardfälle“ — Auslegungslebensdauer 100000 Stunden oder 200000 Stunden — fest.

Abschnitt 4.3.4 regelt die Vorgehensweise, wenn von den „Standardfällen“ abgewichen wird.

Tafel 1 — Temperaturzuschläge im Wasser-/Dampf- und Heißdampfbereich

Aggregatzustand	Bezugs-temperatur	Temperaturzuschläge			
		Unbeheizte Bauteile**)	Beheizte Bauteile**)		
			Beheizung überwiegend durch Strahlung*)	Berührung	Gegen Strahlung abgedeckt
Wasser- bzw. Wasserdampf-gemisch	Sättigungstemperatur beim maximal zulässigen Druck PS (einschließl. hydrost. Säule)	0 K	50 K, bei Sammlern***) (30 + 3s _e) K, mindestens 50 K	(15 + 2s _e) K, höchstens 50 K	20 K
Heißdampf	Heißdampf	15 K****)	50 K	35 K	20 K

*) Schottenüberhitzer werden wie Berührungsüberhitzer behandelt.

**) Definition der Beheizungsarten siehe Vereinbarung FDBR/VGB/VdTÜV 1988/1 (VdTÜV-Merkblatt 451-88/1).

***) Als Sammler gelten, unabhängig von der Durchströmung, rohrförmige Hohlkörper mit äußerem Durchmesser > 76,1 mm, in die drei oder mehr Rohre nicht axial einmünden.

****) Bei unbeheizten heißdampf führenden Bauteilen kann der Temperaturzuschlag von 15 K auf 5 K (Messtoleranz) vermindert werden, wenn sichergestellt ist, dass die bei der Auslegung vorgesehene Heißdampftemperatur nicht überschritten werden kann. Dies kann erreicht werden durch:

- (1) Temperaturregelung vor diesen Bauteilen,
- (2) Anordnung von Kühl- oder Mischstellen (z. B. durch längsdurchströmte Sammler) vor diesen Bauteilen oder
- (3) schaltungstechnische Maßnahmen vor diesen Bauteilen oder dergleichen.

4.3.2 Zulässige Spannung auf Grundlage von R_m 100000 0

4.3.2.1 Festigkeitskennwerte und zugehörige Sicherheitsbeiwerte für Walz- und Schmiedestähle

Es gilt der kleinste der folgenden Werte:

- Zugfestigkeit bei Raumtemperatur mit einer Sicherheit von 2,4;
- Mindestwert der Streck- bzw. 0,2-%-Dehngrenze oder — falls zutreffend — der 1-%-Dehngrenze bei Berechnungstemperatur mit einer Sicherheit von 1,5 für inneren Überdruck und 1,8 für äußeren Überdruck. Ist die Streckgrenze nicht ausgeprägt, so ist die nach DIN EN 10002-1 ermittelte 0,2-%-Dehngrenze einzusetzen;
- Mittelwert der Zeitstandfestigkeit für 100000 h bei Berechnungstemperatur mit einer Sicherheit von 1,5 für inneren Überdruck und 1,8 für äußeren Überdruck.

Innerer Überdruck

$$f = \min \left(\frac{R_m}{2,4}; \frac{R_{p0,2\theta}}{1,5}; \frac{R_{m100000\theta}}{1,5} \right)$$

Äußerer Überdruck

$$f = \min \left(\frac{R_m}{2,4}; \frac{R_{p0,2\theta}}{1,8}; \frac{R_{m100000\theta}}{1,8} \right)$$

4.3.2 Festigkeitskennwerte und zugehörige Sicherheitsbeiwerte für Stahlguss

Es gilt der kleinste der folgenden Werte:

- Zugfestigkeit bei Raumtemperatur mit einer Sicherheit von 3,2;
- Mindestwert der Streck- bzw. 0,2-%-Dehngrenze oder — falls zutreffend — der 1-%-Dehngrenze bei Berechnungstemperatur mit einer Sicherheit von 2,0 für inneren Überdruck und 2,4 für äußeren Überdruck. Ist die Streckgrenze nicht ausgeprägt, so ist die nach DIN EN 10002-1 ermittelte 0,2-%-Dehngrenze einzusetzen;
- Mittelwert der Zeitstandfestigkeit für 100000 h bei Berechnungstemperatur mit einer Sicherheit von 2,0 für inneren Überdruck und 2,4 für äußeren Überdruck.

Innerer Überdruck

$$f = \min \left(\frac{R_m}{3,2}; \frac{R_{p0,2\theta}}{2,0}; \frac{R_{m100000\theta}}{2,0} \right)$$

Äußerer Überdruck

$$f = \min \left(\frac{R_m}{3,2}; \frac{R_{p0,2\theta}}{2,4}; \frac{R_{m100000\theta}}{2,4} \right)$$

4.3.3 Zulässige Spannung auf Grundlage von $R_{m200000\theta}$

Für Stahlguss ist ein Nachweis der Lebensdauer > 100000 h nicht vorgesehen.

Bei der Festlegung der zulässigen Spannung gilt für Walz- und Schmiedestähle der kleinste der folgenden Werte:

- Zugfestigkeit bei Raumtemperatur mit einer Sicherheit von 2,4;
- Mindestwert der Streck- bzw. 0,2-%-Dehngrenze oder — falls zutreffend — der 1-%-Dehngrenze bei Berechnungstemperatur mit einer Sicherheit von 1,5 für inneren Überdruck und 1,8 für äußeren Überdruck. Ist die Streckgrenze nicht ausgeprägt, so ist die nach DIN EN 10002-1 ermittelte 0,2-%-Dehngrenze einzusetzen;
- Mittelwert der Zeitstandfestigkeit für die vorgegebene Betriebszeit (bis 200000 h) bei Berechnungstemperatur mit einer Sicherheit von 1,25 für inneren Überdruck und 1,5 für äußeren Überdruck.

Innerer Überdruck

$$f = \min \left(\frac{R_m}{2,4}; \frac{R_{p0,2\theta}}{1,5}; \frac{R_{m200000\theta}}{1,25} \right)$$

Äußerer Überdruck

$$f = \min \left(\frac{R_m}{2,4}; \frac{R_{p0,2\theta}}{1,8}; \frac{R_{m200000\theta}}{1,5} \right)$$

4.3.4 Zulässige Spannung für Sonderfälle

Ist für Druckgeräte eine Lebensdauer abweichend von Abschnitt 4.3.2 oder 4.3.3 vorgesehen, darf die zulässige Spannung f aus dem Zeitstandfestigkeitskennwert für die vorgesehene Lebensdauer (mindestens 10000 Stunden) bestimmt werden.

Die auf die Mittelwerte der Zeitstandfestigkeit anzuwendenden Sicherheitsbeiwerte S_{cr} sind Tafel 2 bzw. 3 zu entnehmen. Weitere Erläuterungen und Beispiele siehe Anhang 1 zum AD 2000-Merkblatt S 6.

Die in Klammern stehenden Werte gelten für äußeren Überdruck.

Tafel 2 — Im Zeitstandbereich anzuwendende Sicherheitsbeiwerte für Walz- und Schmiedestähle

Auslegung	<u>Mit</u> Lebensdauerüberwachung		<u>Ohne</u> Lebensdauerüberwachung	
	Festigkeitskennwert	Sf_{cr}	Festigkeitskennwert	Sf_{cr}
t in h				
$10000 \leq t \leq 100000$	$R_{m,t,g}(t)$	1,25 (1,5)	$R_{m,t,g}(t)$	1,5 (1,8)
$100000 < t < 200000$	$R_{m,t,g}(t)$	1,25 (1,5)	$R_{m,t,g}(t)^3$	1,5 (1,8)
200000	$R_{m,t,g}(100000 \text{ h})^1$	1,5 (1,8) ¹⁾	$R_{m,t,g}(200000 \text{ h})^3$	1,5 (1,8)
	$R_{m,t,g}(150000 \text{ h})^1$	1,35 (1,62) ¹⁾		
	$R_{m,t,g}(200000 \text{ h})$	1,25 (1,5)		
250000 ²⁾	$R_{m,t,g}(250000 \text{ h})$	1,25 (1,5)	n. a.	n. a.

1) Sind für die geforderte Lebensdauer von 200000 h keine (oder noch keine abgesicherten) Zeitstandfestigkeitskennwerte verfügbar, ist ein Sicherheitsbeiwert von $Sf_{cr} = 1,35$ (1,62) auf den $R_{m,t,g}(150000 \text{ h})$ -Kennwert bzw. $Sf_{cr} = 1,5$ (1,8) auf den $R_{m,t,g}(100000 \text{ h})$ -Kennwert anzuwenden.

2) Nur zulässig, wenn Zeitstandfestigkeitskennwerte für 250000 h vorliegen, z. B. aus DIN EN 10216-2.

3) Nur zulässig, wenn $\frac{R_{m,t,g}(200000 \text{ h})}{R_{m,t,g}(100000 \text{ h})} \geq 0,781$, um sicherzustellen, dass 60 % der theoretischen Zeitstanderschöpfung nicht überschritten werden.

Tafel 3 — Im Zeitstandbereich anzuwendende Sicherheitsbeiwerte für Stahlguss

Auslegung	<u>Mit</u> Lebensdauerüberwachung		<u>Ohne</u> Lebensdauerüberwachung	
	Festigkeitskennwert	Sf_{cr}	Festigkeitskennwert	Sf_{cr}
t in h				
$10000 \leq t \leq 100000$	$R_{m,t,g}(t)$	2,0 (2,4)	$R_{m,t,g}(t)$	2,0 (2,4)

4.4 Waddickenzuschläge

Waddickenzuschläge sind generell bei der Auslegung in voller Höhe entsprechend jeweiliger Toleranzangabe (c_1) bzw. dem definierten Waddickenabtrag (c_2) zu berücksichtigen.

4.5 Zeitstandfestigkeit der Schweißverbindung

4.5.1 Gesicherte Zeitstandfestigkeitskennwerte für das eignungsgeprüfte reine Schweißgut werden vorausgesetzt.

4.5.2 Die Bestimmung der zulässigen Spannung für Schweißverbindungen in Bauteilen, die im Zeitstandbereich betrieben werden, erfolgt nach Anhang 4 des AD 2000-Merkblattes S 6. Die dort beschriebene Vorgehensweise ist nur für Spannungskomponenten senkrecht zur Schweißnaht anzuwenden.

4.5.3 Überschreitet die Spannungskomponente senkrecht zur Schweißnaht die in Abschnitt 4.5.2 ermittelte zulässige Spannung, sind konstruktive Veränderungen zur Einhaltung der gesetzten Begrenzung notwendig.

4.5.4 Wenn in der Schweißnaht ein Beanspruchungszustand vorliegt, in dem die Spannungskomponente senkrecht zur Schweißnaht nicht konstant ist (z. B. Überlagerung aus Axial- und Biegespannungen in Rundnähten), ist durch weiterführende Analysen nachzuweisen, dass die Summe aus Axial- und Biegespannung den 1,25-fachen Wert aus Abschnitt 4.5.2 nicht überschreitet. Dabei darf die Axialspannung aus Innendruck zuzüglich eventueller weiterer konstanter Spannungsanteile (Rohre mit Tragfunktion) die in Abschnitt 4.5.2 gegebene Begrenzung nicht überschreiten.

4.6 Anforderungen an die Schweißverbindung

4.6.1 Der in den Zeichnungen und dazugehörigen Unterlagen festgelegte Schweißnahtfaktor (vgl. hierzu AD 2000-Merkblatt B 0, Abschnitt 8 sowie Abschnitt 2.1 und die Tafeln 1b, 2b, 3b des AD 2000-Merkblattes HP 0) ist in die Betrachtungen einzubeziehen, wenn dieser nur eine 85 %ige Ausnutzung der Berechnungsspannung in der Schweißnaht gestattet. Die nach Abschnitt 4.5.2 zulässige Spannung ist in diesem Fall mit dem Faktor 0,85 zu multiplizieren.

4.6.2 Für Anschweißteile erfolgt die Festlegung der Bewertungsgruppe für Schweißnahtunregelmäßigkeiten in Absprache mit der zuständigen unabhängigen Stelle.

5 Belastungen

5.1 Vorwiegend ruhende Belastungen

5.1.1 Bei Einhaltung der in den Reihen B 1 bis B 9 genannten Forderungen liegt eine ausreichende Dimensionierung auf vorwiegend ruhende Belastung vor.

5.1.2 Die Abgrenzung gegen Wechselbelastung ist den AD 2000-Merkblättern der Reihe S zu entnehmen.

5.2 Betriebsregime und Schädigungsakkumulation

5.2.1 Allgemeine Anforderungen an das Betriebsregime enthalten DIN EN 12952-4 [3] und als Erkenntnisquelle TRD 508 [1], [2].

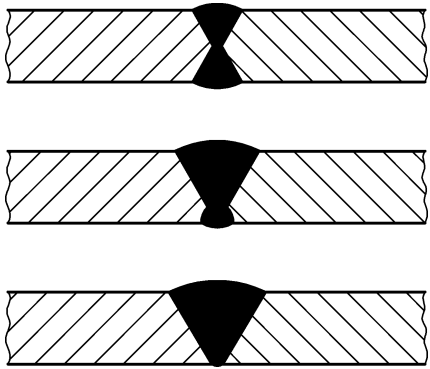
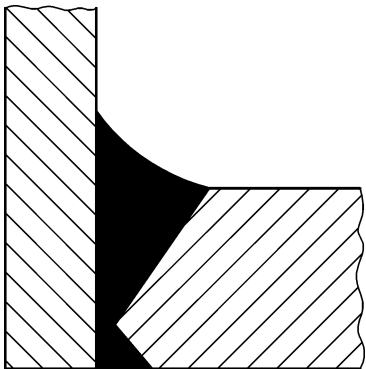
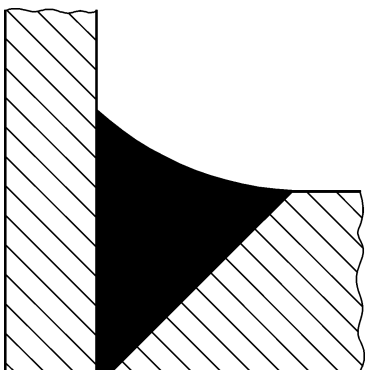
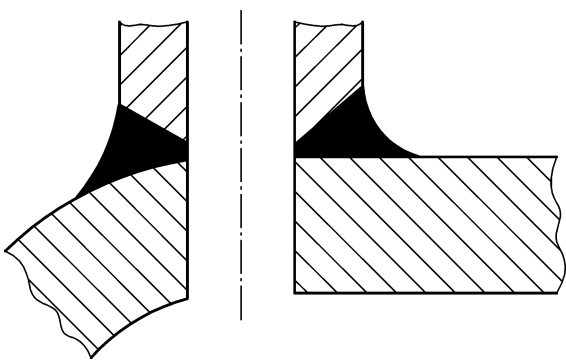
5.2.2 Ist für die gesamte geplante Lebensdauer ein konstanter Berechnungsdruck p und eine konstante Berechnungstemperatur θ vorgesehen, erfolgt die Dimensionierung von Bauteilen nach den Gleichungen der AD 2000-Merkblätter der Reihe B mit der nach Abschnitt 4.3 ermittelten zulässigen Spannung. Sind innerhalb der geplanten Lebensdauer Zeiträume mit unterschiedlichen Parametern vorgesehen, muss sichergestellt werden, dass die Summe der theoretischen Zeitstanderschöpfung aller Zeiträume kleiner oder gleich 100 % abzüglich des prognostizierten Anteils der Wechselerschöpfung ist. Dazu sind zwei Vorgehensweisen möglich, siehe auch Anhang 2 zum AD 2000-Merkblatt S 6.

- Das Bauteil wird für die vorgesehene Lebensdauer mit den maximalen Parametern p und θ dimensioniert, was zu einer deutlichen Überdimensionierung führen kann.
- Es wird ausgehend von Startabmessungen (im Allgemeinen Wanddicken) eine iterative Berechnung ausgeführt, bis die optimalen Abmessungen bei der vorgegebenen Zeitstanderschöpfung erreicht sind.

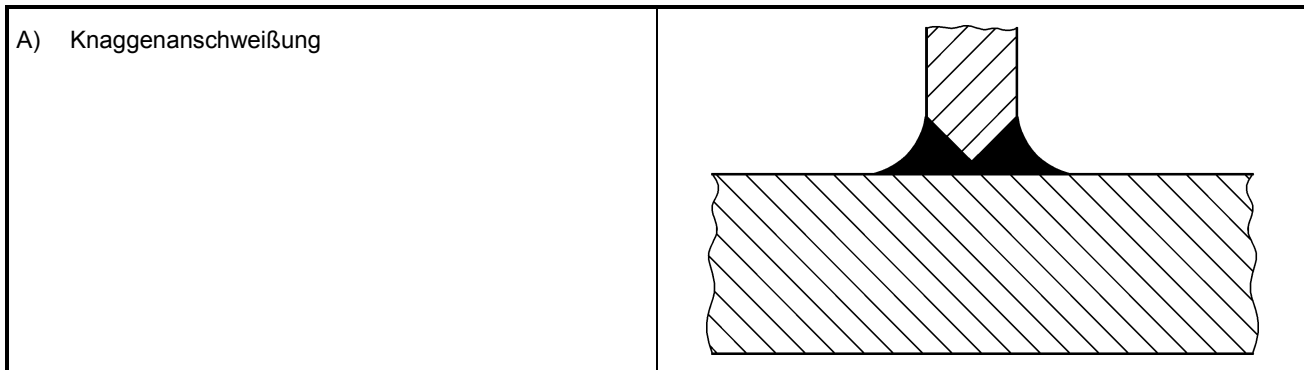
5.2.3 Die Schädigungsakkumulation setzt sich zusammen aus den Bestandteilen Zeitstanderschöpfung und Erschöpfung aus Wechselbelastung. Die Ermittlung der Zeitstanderschöpfung beruht in der Regel auf automatischer Erfassung und Aufsummierung unterschiedlicher Belastungskollektive an hochbelasteten Bauteilen, gebildet aus Druck respektive zugeordneter Temperatur oberhalb der Kriechgrenze. Wechselbelastung ergibt sich aus mechanischen und thermischen Belastungen (unterhalb und oberhalb der Kriechgrenze) und kann in Form eines Erschöpfungsgrades unter Einsatz des AD 2000-Merkblattes S 2, nach VGB-Standard 506 [4] (beinhaltet zurückgezogene TRD 508 Anlage 1 [2]) oder nach DIN EN 12952-3 [5] ermittelt werden. Die resultierende Gesamterschöpfung ergibt sich aus der Summe der beiden ermittelten Teilerschöpfungen.

6 Anforderungen an die Bauteilausführung

Tafel 4 — Zulässige Geometrie von Nahtvorbereitungen für drucktragende Schweißverbindungen im Zeitstandbereich

<p>A) Stumpfnähte</p>	
<p>B) beidseitig eingeschweißter Stutzen</p>	
<p>C) einseitig eingeschweißter Stutzen</p>	
<p>D) aufgesetzter Stutzen mit ausgebohrter Wurzel</p>	

Tafel 5 — Zulässige Geometrie von Nahtvorbereitungen für nicht-drucktragende Schweißverbindungen im Zeitstandbereich



7 Schrifttum

- [1] TRD 508, *Prüfung — Zusätzliche Prüfungen an Bauteilen, berechnet mit zeitabhängigen Festigkeitskennwerten*
- [2] TRD 508 Anlage 1, *Prüfung — Zusätzliche Prüfungen an Bauteilen — Verfahren zur Berechnung von Bauteilen mit zeitabhängigen Festigkeitskennwerten*
- [3] DIN EN 12952-4, *Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten — Teil 4: Betriebsbegleitende Berechnung der Lebensdauererwartung; Deutsche Fassung EN 12952-4*
- [4] VGB-Standard 506, *Zustandsüberwachung und Prüfung der Komponenten von Dampfkesselanlagen, Druckbehälteranlagen und Wasser oder Dampf führenden Hochdruckleitungen; 2012-03*
- [5] DIN EN 12952-3, *Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten — Teil 3: Konstruktion und Berechnung für drucktragende Kesselteile; Deutsche Fassung EN 12952-3:2011*

Anhang 1 zum AD 2000-Merkblatt S 6

Allgemeines

Bei der Auslegung von Bauteilen, die bei höheren Temperaturen betrieben werden sollen, ist als erster Schritt die Entscheidung zu treffen, ob noch mit zeitunabhängigen Festigkeitskennwerten dimensioniert werden darf (Warmstreckgrenzbereich) oder ob zeitabhängige Festigkeitskennwerte zugrunde zu legen sind (Zeitstandbereich).

Diese Entscheidung kann anhand der „Schnittpunkttemperatur“ getroffen werden, welche von der Auslegungstemperatur und der geforderten Betriebszeit abhängt.

Gemäß Druckgeräterichtlinie (DGRL) gilt: Ausschlaggebend für die Dimensionierung ist die kleinere der beiden Spannungen f oder f_{cr} .

Warmstreckgrenzbereich:
$$f = \min \left(\frac{R_{eH}}{1,5}, \frac{R_{p0,2t}}{1,5}, \frac{R_m}{2,4} \right)$$

Zeitstandbereich:
$$f_{cr} = \frac{S_{R,Tt}}{Sf_{cr}}$$

Wenn Zeitstandfestigkeitskennwerte für Schweißnähte niedriger sind als für den Grundwerkstoff, so ist dies bei der Bestimmung von f_{cr} zu berücksichtigen.

Auslegung im Zeitstandbereich — Sicherheitsphilosophie

Die Sicherheitsphilosophie bei der Auslegung von Bauteilen im Zeitstandbereich basiert auf der Überlegung, dass man mit dem Zeitstandfestigkeitskennwert der unteren Streubandgrenze auslegt und die Lebensdauer überwacht. Das aus Zeitstandversuchen bekannte Streuband beträgt $\pm 20\%$. In Normen (z. B. DIN EN 10216-2, DIN EN 10222-2) und Werkstoffblättern (z. B. VdTÜV) ist immer der Mittelwert angegeben. Aus der Breite des Streubandes ergibt sich:

$$f_{cr} = 0,8 \cdot \bar{R}_{m,t,9} = R_{m,t,9_{min}} \quad (1)$$

bzw. in der Schreibweise der Regelwerke mit einem (Schein-)Sicherheitsbeiwert $Sf_{cr} = 1,25$:

$$f_{cr} = \frac{\bar{R}_{m,t,9}}{1,25} = R_{m,t,9_{min}} \quad (2)$$

Diese Vorgehensweise wird angewendet für Bauteilauslegung von mindestens 10000 h.

Wird keine Lebensdauerüberwachung durchgeführt, ist der Sicherheitsbeiwert auf $Sf_{cr} = 1,5$ zu erhöhen, siehe AD 2000-Merkblatt S 6, Tafel 2.

Aus den in den Normen und Werkstoffblättern üblicherweise angegebenen Zeitstandfestigkeitskennwerten für 10000 h, 100000 h und 200000 h darf nach folgenden Gleichungen interpoliert (extrapoliert) werden.

Zwischen 10000 h und 100000 h

$$R_{m,t,9} = 10^{\frac{\lg(R_{m,10000,9}) - \lg(R_{m,100000,9})}{\lg(100000) - \lg(10000)} \cdot \{\lg(100000) - \lg(t)\} + \lg(R_{m,100000,9})} \quad (3)$$

Zwischen 100000 h und 200000 h (Extrapolation über 200000 h)

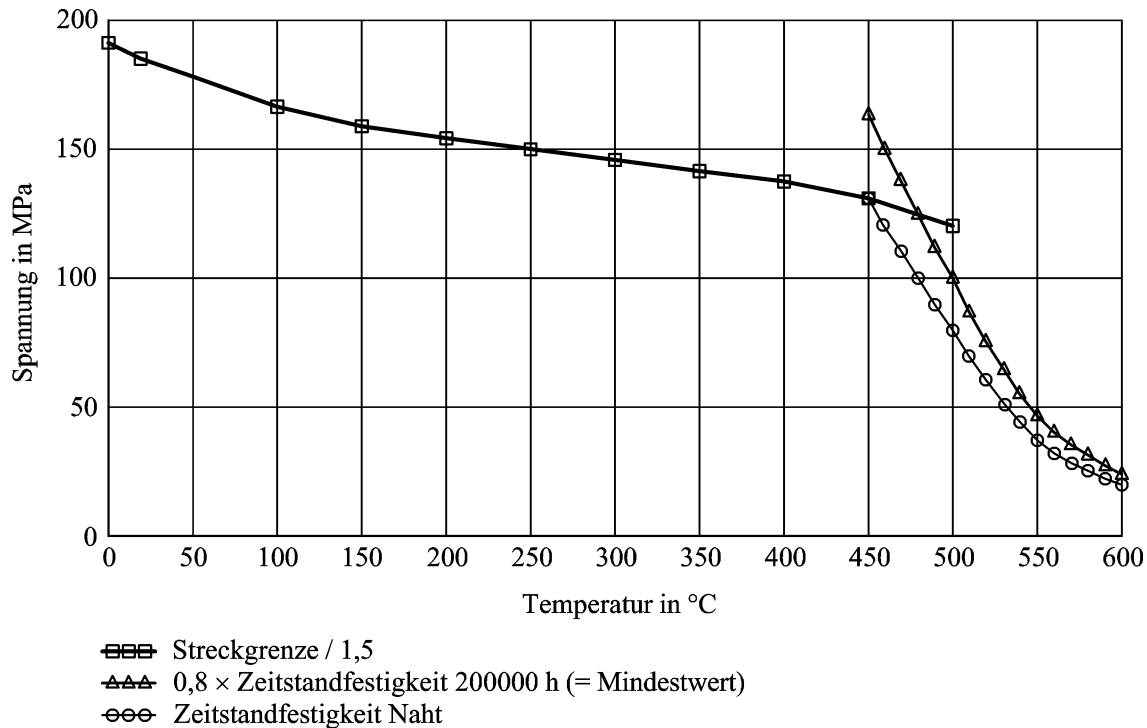
$$R_{m,t,9} = 10^{\frac{\lg(R_{m,100000,9}) - \lg(R_{m,200000,9})}{\lg(200000) - \lg(100000)} \cdot \{\lg(200000) - \lg(t)\} + \lg(R_{m,200000,9})} \quad (4)$$

ANMERKUNG 1 Eine Extrapolation ist gemäß ECCC-Regeln maximal mit dem Faktor 3,0 auf der Zeitachse zulässig. **Voraussetzung** dafür ist, dass die zur Extrapolation verwendeten Kennwerte abgesicherte Werte aus Versuchsreihen sind und nicht selbst bereits durch Extrapolation entstanden sind.

ANMERKUNG 2 Liegen Kennwerte für 250000 h vor (z. B. aus DIN EN 10216-2), ist Gleichung (4) unter Einhaltung der o. g. Sicherheitsbeiwerte Sf_{cr} sinngemäß für die Interpolation zwischen 200000 h und 250000 h anzuwenden.

Beispiele

1. Werkstoff 10CrMo9-10 Auslegung bei 520 °C für 200000 h mit Lebensdauerüberwachung



Für den Werkstoff 10CrMo9-10 existieren abgesicherte Zeitstandfestigkeitskennwerte für 200000 h, so dass diese zur Bestimmung von f_{cr} verwendet werden dürfen.

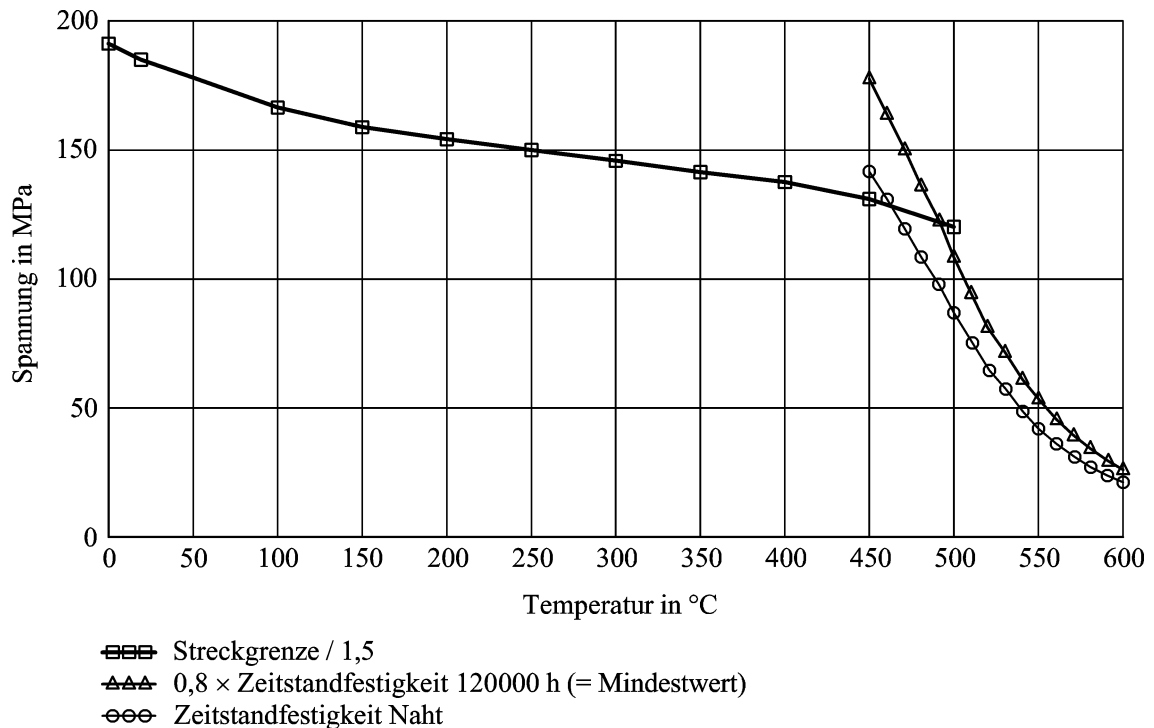
Im Beispiel wird angenommen, dass für die Schweißnaht nur 80 % des Zeitstandfestigkeitskennwertes des Grundwerkstoffs eingesetzt werden dürfen. Die Schnittpunkttemperatur für den Grundwerkstoff liegt bei 480 °C, für die Schweißnaht 450 °C.

Bei einer Temperatur von 520 °C ergibt sich für den Grundwerkstoff unter Anwendung von Gleichung (1) eine Bemessungsspannung f_{cr} von:

$$f_{cr} = 0,8 \cdot 94 = 75,2 \text{ MPa}$$

Für die im Beispiel unterstellte Abminderung der Zeitstandfestigkeitskennwerte der Schweißnaht auf 80 % dürfte demzufolge $f_{cr(\text{Naht})} = 0,8 \cdot 0,8 \cdot 94 = 60,2 \text{ MPa}$ angesetzt werden.

2. Werkstoff 10CrMo9-10 Auslegung bei 520 °C für 120000 h mit Lebensdauerüberwachung



Für den Werkstoff 10CrMo9-10 existieren abgesicherte Zeitstandfestigkeitskennwerte für 120000 h, so dass diese zur Bestimmung von f_{cr} verwendet werden dürfen. Die Interpolation erfolgte nach Gleichung (4).

Im Beispiel wird angenommen, dass für die Schweißnaht nur 80 % des Zeitstandfestigkeitskennwertes des Grundwerkstoffs eingesetzt werden dürfen. Die Schnittpunkttemperatur für den Grundwerkstoff liegt bei 491 °C, für die Schweißnaht 463 °C.

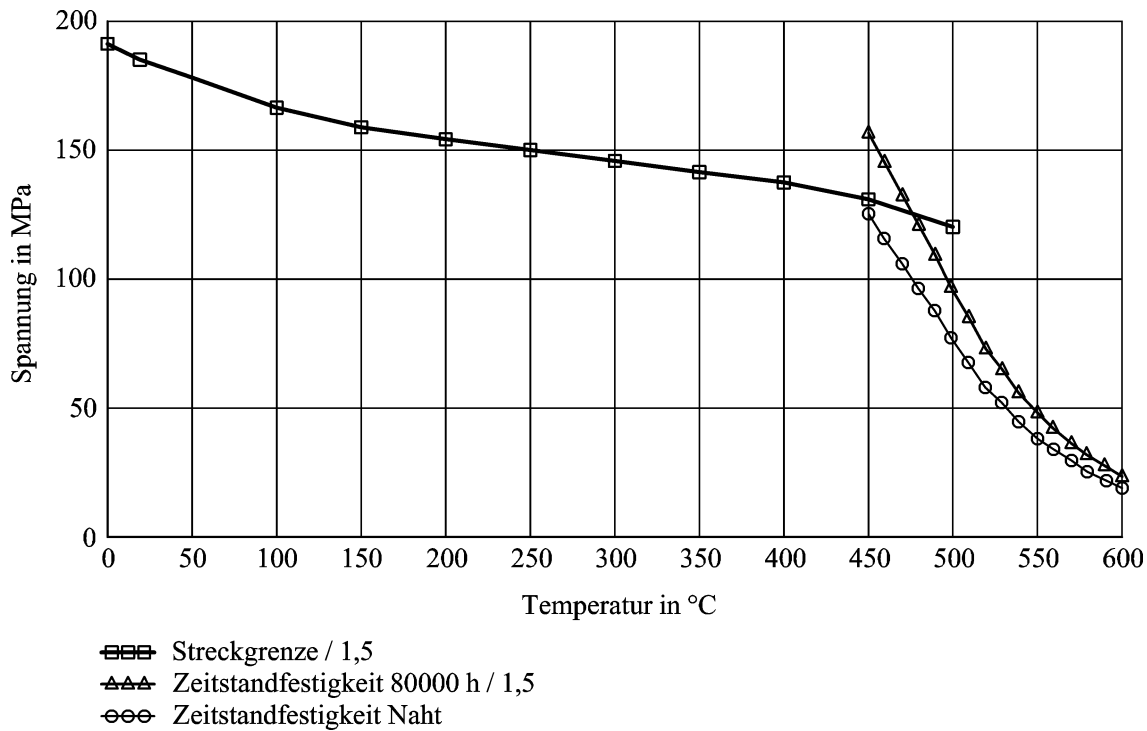
Bei einer Temperatur von 520 °C ergibt sich für den Grundwerkstoff unter Anwendung der Gleichungen (4) und (1) eine Bemessungsspannung f_{cr} von:

$$R_{m,t,9} = 10^{\frac{\lg(105) - \lg(94)}{\lg(200000) - \lg(100000)} \cdot \{\lg(200000) - \lg(120000)\} + \lg(94)} = 102 \text{ MPa}$$

$$f_{cr} = 0,8 \cdot 102 = 81,6 \text{ MPa}$$

Für die im Beispiel unterstellte Abminderung der Zeitstandfestigkeitskennwerte der Schweißnaht auf 80 % dürfte demzufolge $f_{cr(Naht)} = 0,8 \cdot 0,8 \cdot 102 = 65,3 \text{ MPa}$ angesetzt werden.

3. Werkstoff 10CrMo9-10 Auslegung bei 520 °C für 80000 h ohne Lebensdauerüberwachung



Da keine Lebensdauerüberwachung vorgesehen ist, muss ein Sicherheitsbeiwert $Sf_{cr} = 1,5$ auf den Zeitstandfestigkeitskennwert für 80000 h zur Bestimmung von f_{cr} angewendet werden. Die Interpolation erfolgte nach Gleichung (3).

Im Beispiel wird angenommen, dass für die Schweißnaht nur 80 % des Zeitstandfestigkeitskennwertes des Grundwerkstoffes eingesetzt werden dürfen. Die Schnittpunkttemperatur für den Grundwerkstoff liegt bei 477 °C. Für die (abgeminderte) Schweißnaht ist kein Schnittpunkt mehr vorhanden, so dass ab 450 °C mit Zeitstandfestigkeitskennwerten gerechnet werden muss.

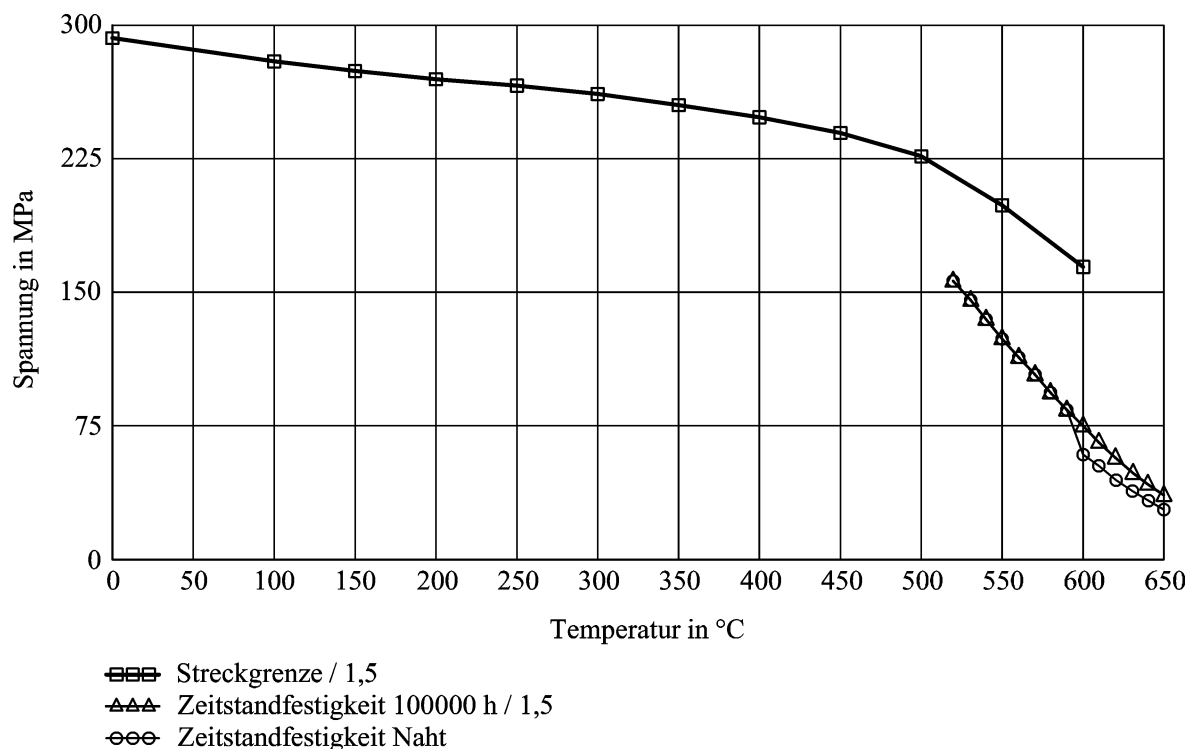
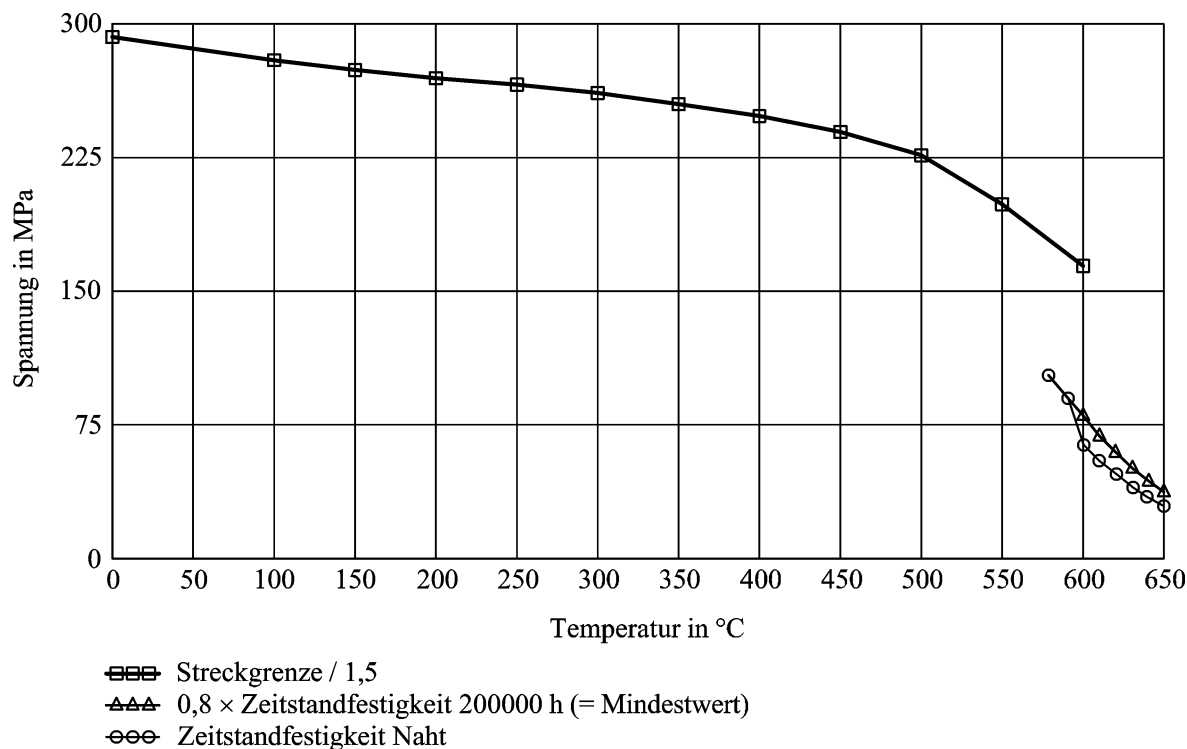
Bei einer Temperatur von 520 °C ergibt sich für den Grundwerkstoff unter Anwendung der Gleichungen (3) und (2) mit $Sf_{cr} = 1,5$ eine Bemessungsspannung f_{cr} von:

$$R_{m,t,9} = 10^{\frac{\lg(158) - \lg(105)}{\lg(100000) - \lg(10000)} \cdot \{\lg(100000) - \lg(80000)\} + \lg(105)} = 109 \text{ MPa}$$

$$f_{cr} = \frac{109}{1,5} = 72,7 \text{ MPa}$$

Für die im Beispiel unterstellte Abminderung der Zeitstandfestigkeitskennwerte der Schweißnaht auf 80 % dürfte demzufolge $f_{cr} = \frac{0,8 \cdot 109}{1,5} = 58,1 \text{ MPa}$ angesetzt werden.

4. Werkstoff X10CrWMoVNB9-2 (P92) Auslegung bei 620 °C für 200000 h mit Lebensdauerüberwachung



Die Grafiken zeigen die beiden Möglichkeiten der Bestimmung der zulässigen Spannungen f_{cr} für 200000-h-Auslegung. Beide Möglichkeiten finden derzeit Anwendung, da noch nicht für alle Temperaturen abgesicherte Kennwerte verfügbar sind, z. T. sind Kennwerte noch über den Faktor 3,0 auf der Zeitachse hinaus extrapoliert, siehe EN 10216-2. Die auf Basis solcher stark extrapolierten Werte ermittelten zulässigen Spannungen sind in Tabelle 2 mit * gekennzeichnet.

Die Grafiken berücksichtigen die z. B. laut VdTÜV-Kennblatt 09391.06 Ausgabe 05.11 zu berücksichtigende Abminderung der Zeitstandfestigkeit der Schweißnaht (80 % oberhalb von 600 °C).

Tabelle 2 — Zulässige Spannungen f_{cr} für den Grundwerkstoff X10CrWMoVNb9-2 (P92) bei Auslegung für 200000 h

Temperatur in °C	f_{cr} aus 200000-h-Kennwerten in MPa	f_{cr} aus 100000-h-Kennwerten in MPa
520		157*
530		145*
540		135*
550		125*
560		115*
570		105*
580	103*	95
590	92*	85
600	81*	75
610	70*	67
620	61*	58
630	52*	50
640	45*	43
650	38*	37

Bei einer Temperatur von 620 °C ergibt sich aus den abgesicherten 100000-h-Kennwerten für den Grundwerkstoff unter Anwendung von Gleichung (2) mit $Sf_{cr} = 1,5$ eine Bemessungsspannung f_{cr} von:

$$f_{cr} = \frac{87}{1,5} = 58,0 \text{ MPa}$$

Für die laut VdTÜV-Kennblatt 09391.06 Ausgabe 05.11 geforderte Abminderung der Zeitstandfestigkeitskennwerte der Schweißnaht auf 80 % dürfte demzufolge

$$f_{cr(Naht)} = \frac{0,8 \cdot 87}{1,5} = 46,4 \text{ MPa}$$

angesetzt werden.

Anhang 2 zum AD 2000-Merkblatt S 6

Berücksichtigung von Zeiträumen mit unterschiedlichen Betriebsparametern im Zeitstandbereich

Sind während der geplanten Gesamtbetriebszeit Zeiträume mit unterschiedlichen Betriebsparametern vorgesehen, muss die Dimensionierung des Bauteils daraufhin überprüft werden. Dies geschieht, indem die aus den einzelnen Zeiträumen resultierende Zeitstanderschöpfung zur Gesamt-Zeitstanderschöpfung kumuliert wird. Wird dabei der zulässige Erschöpfungsgrad (100 % abzüglich des Anteils für Wechsellerschöpfung) überschritten, ist die Bauteildimensionierung zu verändern.

Im Folgenden wird ein vereinfachtes Verfahren beschrieben, welches davon ausgeht, dass die lineare Schadensakkumulation (ohne Reihenfolgeeffluss) die Schädigungsentwicklung richtig wiedergibt. Dieses vereinfachte Verfahren darf nicht angewendet werden, wenn z. B. eine ausgeprägte Kriech-Ermüdungsbelastung zu erwarten ist, bei der ein Bauteilversagen schon bei theoretischen Erschöpfungsgraden < 1 zu erwarten wäre.

Praktische Vorgehensweise

Die Geometrie des Bauteils wird durch einen Parameter G beschrieben, der folgende Eigenschaft hat:

$$\sigma = G \cdot \frac{p}{10}$$

Ein solcher Parameter G lässt sich für jedes nach den AD 2000-Merkblättern der Reihe B zu dimensionierende Bauteil definieren. Für den einfachsten Fall der Zylinderschale ergibt sich:

$$G = \frac{D_a - s_{\min}}{2 \cdot s_{\min} \cdot \sqrt{v}}$$

Die Zeitstanderschöpfung wird wie folgt bestimmt:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i(G, p_i, \theta_i, T_i)$$

Erreicht D unzulässig große Werte, lässt sich dies leicht durch Verändern des Parameters G beeinflussen. Durch Rückrechnung gemäß o. a. Gleichungen lässt sich so eine geänderte Wanddicke des Bauteils ermitteln.

Beispiel:

Eine Zylinderschale (Rohr) mit Außendurchmesser $D_a = 273$ mm aus dem Werkstoff 16Mo3 nach DIN EN 10216-2 soll für einen Berechnungsdruck $p = 85$ bar, eine Berechnungstemperatur $\theta = 510$ °C und eine Betriebsdauer von 100000 h ausgelegt werden. Da keine Lebensdauerüberwachung vorgesehen ist, ist ein Sicherheitsbeiwert $Sf_{cr} = 1,5$ einzusetzen. Die Dimensionierung nach AD 2000-Merkblatt B 1 ergibt eine erforderliche Mindestwanddicke von 19,48 mm (Zuschläge für Minustoleranz und ggf. Abnutzung nicht berücksichtigt).

$$s = \frac{D_a \cdot p}{20 \cdot \frac{K}{Sf_{cr}} \cdot \sqrt{v} + p} + c_1 + c_2 \Rightarrow s_{\min} = \frac{273 \cdot 85}{20 \cdot \frac{83,0}{1,5} \cdot 1,0 + 85} + 0 + 0 = 19,48$$

Wird die ausgeführte Wanddicke so gewählt, dass nach Abzug von Minustoleranz und ggf. Abnutzung eine effektive Wanddicke von 20 mm zur Verfügung steht, ergibt sich die in nachfolgender Tabelle dargestellte Zeitstanderschöpfung nach 100000 Stunden.

Summen:

Druck in bar	Temperatur in °C	Sigma in MPa	Betriebszeit in h	Erschöpfung in %
85	510	53,8	100000	91,10
			100000	91,10

AD 2000-Merkblatt

Seite 16 AD 2000-Merkblatt S 6, Ausg. 05.2018

Werden für das gleiche Bauteil unterschiedliche Betriebsparameter innerhalb der 100000 Stunden gefordert, muss die Dimensionierung daraufhin überprüft werden, siehe folgende Tabelle.

Druck in bar	Temperatur in °C	Sigma in MPa	Betriebszeit in h	Erschöpfung in %
85	510	53,8	80000	72,88
70	520	44,3	10000	10,79
60	530	38,0	10000	14,26
			100000	97,93

Summen:

Anhang 3 zum AD 2000-Merkblatt S 6 (informativ)

Lebensdauerüberwachung von im Zeitstandbereich betriebenen Bauteilen

Allgemeines

Die Dimensionierung von Bauteilen unter Innendruck, die im Zeitstandbereich betrieben werden, darf mit einem Sicherheitsbeiwert von mindestens $S_{f_{cr}} = 1,25$ ausgeführt werden (AD 2000-Merkblatt S 6, Abschnitt 4.3). Das bedeutet, die Sicherheit gegen den Mindestwert der Zeitstandfestigkeit bei Berechnungstemperatur und spezifizierter Lebensdauer beträgt dann 1,0. In solchen Fällen ist die Überwachung der Lebensdauer zwingend erforderlich, dazu sind folgende Maßnahmen erforderlich/möglich.

ANMERKUNG Die untere Streubandgrenze der Zeitstandfestigkeit entspricht dem 0,8-Fachen des Mittelwertes bzw. der Mittelwert dividiert durch 1,25 ergibt den Wert der unteren Grenze des Streubandes.

Aufzeichnung von Betriebsdaten

Die Betriebstemperatur und der Betriebsdruck sind im Normalbetrieb meist niedriger als die der Auslegung zugrunde liegenden. Darüber hinaus sind die Zeitstandfestigkeitskennwerte der Werkstoffe meist höher als die zur Auslegung angenommene untere Streubandgrenze. Im Normalfall führt das zu einer Verlängerung der tatsächlichen Bauteillebensdauer, die durch die Maßnahmen der Lebensdauerüberwachung zu verifizieren ist. Eine möglichst genaue Aufzeichnung von Betriebsdaten (p , θ , t) [1], [2] verbessert die Treffsicherheit der theoretischen Lebensdauerberechnung und trägt dazu bei, die Prüfintervalle erforderlicher zerstörungsfreier Prüfungen zu optimieren.

Berechnung der Zeitstanderschöpfung bzw. der theoretischen Restlebensdauer

Auf Basis der aufgezeichneten Betriebsdaten (direkt oder klassiert) wird die erreichte Zeitstanderschöpfung nach Gleichungen (1) und (2) bzw. die verbleibende theoretische Restlebensdauer berechnet. Für R_{m1} und R_{m2} sind die Mindestwerte der Zeitstandfestigkeiten ($0,8 \times$ Mittelwert) für die jeweiligen Zeiten t_1 und t_2 einzusetzen (Bild 1).

$$t_{al} = 10^{\frac{\lg \frac{\sigma}{R_{m2}} \cdot \lg \frac{t_2}{t_1}}{\lg \frac{R_{m2}}{R_{m1}}} + \lg(t_2)} \quad (1)$$

$$D_c = \sum_{i=1}^n \Delta D_{ci} = \sum_{i=1}^n \frac{t_{op}}{t_{al}} \quad (2)$$

Die zur Bewertung der Zeitstanderschöpfung relevante Spannung σ wird berechnet, indem die Auslegungsgleichungen nach der Spannung aufgelöst werden. Für die Berechnung ist die gemessene (tatsächliche) Wanddicke der Bauteile einzusetzen, d. h. jede Wanddickenschwächung infolge Korrosion oder Erosion während der Betriebslebensdauer bis zum Analysezeitpunkt ist zu berücksichtigen.

Bewertung der kumulierten Kriechdehnung

Zur Verfolgung der Kriechdehnung kommen mehrere Methoden in Betracht. An zylindrischen oder kugelförmigen Bauteilen unter innerem Überdruck kann z. B. mittels Durchmessermessungen während Revisionen die Aufweitung des Bauteils bestimmt und daraus auf die Kriechdehnung geschlossen werden. Online-Messungen der Dehnung während des Betriebes sind ebenfalls möglich, jedoch sehr aufwändig. Gemäß [1] gilt die Empfehlung, dass bei einer Kriechdehnung von $\varepsilon_{cr} = 1\%$ die Prüfzeiten zu verkürzen sind, bei Erreichen von $\varepsilon_{cr} = 2\%$ ist das betreffende Bauteil auszutauschen.

Bewertung von Rissen

Zeitstandrisse — Beurteilungsklassen 4 und 5 nach [5] — dürfen ausgeschliffen werden, wenn dadurch die Tragfähigkeit des Bauteils nicht unzulässig beeinträchtigt wird [3]. Nach Feststellung wesentlicher Risse ist das Bauteil auszutauschen. Als wesentliche Risse gelten solche, die für das Bauteil Berstgefahr bedeuten bzw. deren Reparatur nicht vertretbar ist [1].

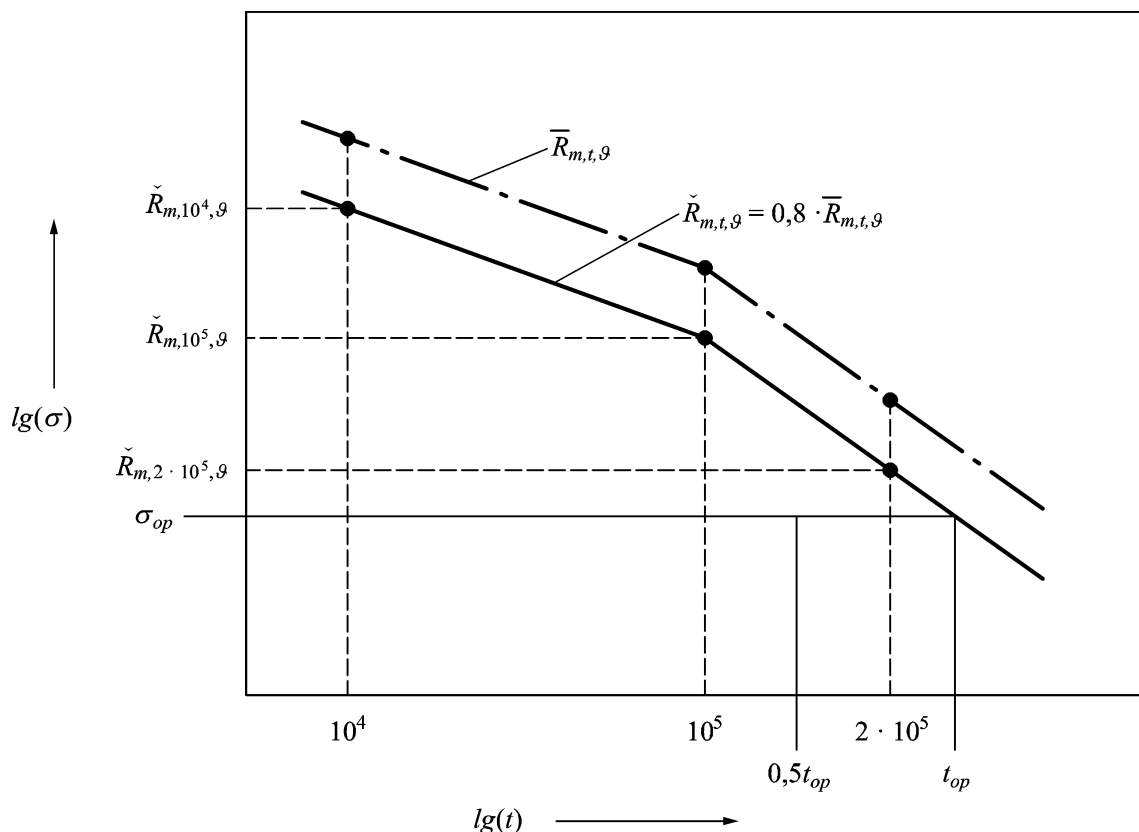


Bild 1 — Diagramm zur Ermittlung der zulässigen Betriebszeit t_{op}
($0,5 t_{op}$ = Beginn von ZfP-Maßnahmen)

Zeitstand- und Wechsellerschöpfung

Wenn an einem Bauteil Zeitstand- und Wechsellerschöpfung auftreten, kann zur Bewertung der Wechsellerschöpfung AD 2000-Merkblatt S 2 benutzt werden. Es gilt als konservativ, die Zeitstand- und die Wechsellerschöpfung einfach zu addieren. Bei Bedarf können genauere Verfahren verwendet werden, siehe PD 7910 [6]. Da beide Erschöpfungsarten meist an unterschiedlichen Stellen am Bauteil auftreten, muss dieses nicht unbedingt ausgetauscht werden, wenn die berechnete Gesamterschöpfung den Wert von 1 überschreitet. Es sind jedoch geeignete zusätzliche zerstörungsfreie Prüfmaßnahmen vorzusehen [1].

Maßnahmen bei Erreichen bestimmter Erschöpfungsgrade

Bei Erreichen einer Gesamterschöpfung von $e = 50 \%$ sollten geeignete Maßnahmen der zerstörungsfreien Prüfung vorgenommen werden, siehe [1], [3]. Bevorzugtes Verfahren ist die Beurteilung des Gefügestandes anhand der „VGB-Richtlinien zur Bewertung der Gefügestandschädigung und Zeitstandsbeschädigung“ [5].

Bei Erreichen von $e = 100 \%$ bzw. von $\varepsilon_{cr} = 1 \%$ ohne Vorliegen wesentlicher Schädigungen sind Prüfumfänge zu erhöhen und/oder Prüfzeiten zu verkürzen.

Schrifttum

- [1] TRD 508/TRD 508, Anlage 1
- [2] EN 12952-4
- [3] EN 13445-3, Annex M
- [4] VGB-Richtlinie R-509 L
- [5] VGB TW 507 Revision 2 (2005)
- [6] PD 7910, British Standardization Institute, London, UK

Anhang 4 zum AD 2000-Merkblatt S 6

Drei-Faktoren-Konzept zur Bestimmung der Auslegungsspannung für Schweißnähte im Zeitstandbereich

Die Auslegungsspannung für Bauteile im Zeitstandbereich, in denen Schweißnähte vorhanden sind, kann abhängig von den verfügbaren Zeitstandfestigkeitskennwerten nach dem hier beschriebenen Konzept bestimmt werden. Die ermittelte Auslegungsspannung

$$f_{cr} = R_{m,t,9} (\text{Mittelwert Grundwerkstoff}) \cdot a \cdot b \cdot c$$

ist zur Begrenzung von Spannungskomponenten senkrecht zur Schweißnaht anzuwenden. Die Faktoren a , b und c werden wie im Folgenden beschrieben ermittelt.

- a) Berücksichtigt das Streuband der Zeitstandfestigkeitskennwerte $R_{m,t,9}$ des Grundwerkstoffs, i. d. R. $\pm 20\%$ ($\delta_{GW} = 0,2$). AD 2000-Merkblatt S 6 sowie alle europäischen Normen beinhalten ein Sicherheitskonzept, welches darauf aufbaut.

Sicherheitsbeiwert (wenn Lebensdauer überwacht wird) $Sf_{cr} = 1,25$ heißt, dass der Mittelwert der Zeitstandfestigkeit aus Norm oder Werkstoffblatt des Herstellers auf den unteren Grenzwert des Streubands umgerechnet wird ($1/1,25 = 0,8 \cdot \text{Mittelwert}$) und man mit einer Sicherheit von 1,0 gegen die untere Streubandgrenze rechnet.

→ **Der Faktor a ist für diesen Fall $a = 0,8$.**

Sicherheitsbeiwert (wenn Lebensdauer nicht überwacht wird) $Sf_{cr} = 1,5$ heißt, man rechnet mit einer Sicherheit von 1,2 gegen die untere Streubandgrenze. Damit erhöht sich die theoretische Lebensdauer auf mehr als das 1,5-Fache bei ferritischen Werkstoffen, auf mehr als das 2,0-Fache bei martensitischen Werkstoffen.

→ **Der Faktor a ist für diesen Fall $a = 0,67$.**

Liegen für den Grundwerkstoff, das Schweißgut oder die Schweißverbindung nur Zeitstandfestigkeitskennwerte für 100000 h oder für 150000 h vor, die Auslegung soll aber für 200000 h erfolgen (nur zulässig, wenn Lebensdauer überwacht wird), so ist dies ebenfalls durch den Faktor a zu berücksichtigen.

100000 h-Kennwerte bekannt:

→ **Der Faktor a ist für diesen Fall $a = 0,67$.**

150000 h-Kennwerte bekannt:

→ **Der Faktor a ist für diesen Fall $a = 0,74$.**

- b) Berücksichtigt die Zeitstandfestigkeitseigenschaften des Schweißguts.

Das Schweißgut wird analog zum Grundwerkstoff betrachtet, d. h. es wird ein Streuband von $\pm 20\%$ ($\delta_{SG} = 0,2$) unterstellt. Sollte für das Schweißgut ein abweichendes Streuband δ_{SG} bekannt sein, kann dies ebenfalls berücksichtigt werden.

Der Faktor b ist der Quotient

$$\rightarrow b = \frac{(1 - \delta_{SG}) R_{m,t,9} (\text{Mittelwert Schweißgut})}{(1 - \delta_{GW}) R_{m,t,9} (\text{Mittelwert Grundwerkstoff})} \leq 1,0$$

Mit der Zusatzbedingung $b \leq 1,0$ wird grundsätzlich der kleinere Zeitstandfestigkeitskennwert des Grundwerkstoffs oder des Schweißguts maßgebend. Sind Zeitstandfestigkeitskennwerte der Schweißverbindung (GW / SG / WEZ) bekannt, ist $b = 1,0$ zu verwenden.

Die Zeitstandfestigkeitskennwerte des Schweißguts sind **nicht** bekannt:

→ **Der Faktor b ist für diesen Fall $b = 0,8$.**

- c) Berücksichtigt die Zeitstandfestigkeitseigenschaften der Schweißverbindung (GW / SG / WEZ).

Sind „charakteristische“ Zeitstandfestigkeitseigenschaften der Schweißverbindung als Mittelwert mit einem Streuband δ_{SV} oder als Mindestwert, d. h. $\delta_{SV} = 0$, bekannt, wird der Faktor c wie folgt bestimmt:

$$\rightarrow c = \frac{(1 - \delta_{SV}) R_{m,t,9} (\text{„charakteristische“ Schweißverbindung})}{(1 - \delta_{GW}) R_{m,t,9} (\text{Mittelwert Grundwerkstoff})} \leq 1,0$$

→ **Für diesen Fall ist der Faktor $b = 1,0$.**

Sind die Zeitstandfestigkeitseigenschaften der Schweißverbindung als Verhältnis der Mindestwerte (SV / GW) bekannt, so ist der Faktor c gleich diesem Verhältnis

$$\rightarrow c = \text{Ratio}_{\min(\text{SV})/\min(\text{GW})} \leq 1,0$$

→ **Für diesen Fall ist der Faktor $b = 1,0$.**

Sind die Zeitstandfestigkeitseigenschaften der Schweißverbindung als Verhältnis Mindestwert SV / Mittelwert GW bekannt, so ist der Faktor c gleich

$$\rightarrow c = \frac{\text{Ratio}_{\min(\text{SV})/\text{mittel}(\text{GW})}}{(1 - \delta_{\text{GW}})} \leq 1,0$$

→ **Für diesen Fall ist der Faktor $b = 1,0$.**

Die Zeitstandfestigkeitskennwerte der Schweißverbindung (GW / SG / WEZ) sind **nicht** bekannt:

→ **Der Faktor c ist für diesen Fall $c = 0,8$.**

Zusammenfassung

- Der Faktor a ist einerseits davon abhängig, ob die Lebensdauer überwacht wird oder nicht. Andererseits beeinflusst die Verfügbarkeit von Zeitstandfestigkeitskennwerten seine Größe.
- Die Faktoren b und c werden von den verfügbaren Daten des Schweißguts bzw. der Schweißverbindung (GW / SG / WEZ) bestimmt.

Beispiel 1a — Kennwerte des Grundwerkstoffs (GW) und Kennwerte des Schweißguts (SG) liegen vor, Kennwerte der Schweißverbindung (SV) liegen nicht vor.

$$R_{m,t,9(GW)} = 100 \text{ MPa} \quad \delta_{GW} = 0,2 \quad t = 200000 \text{ h}$$

$$R_{m,t,9(SG)} = 94 \text{ MPa} \quad \delta_{SG} = 0,2 \quad t = 200000 \text{ h}$$

Auslegung für 200000 h mit Überwachung der Lebensdauer

$$a = (1 - \delta_{GW}) = (1 - 0,2) = 0,8$$

$$b = \frac{(1 - \delta_{SG}) R_{m,t,9(SG)}}{(1 - \delta_{GW}) R_{m,t,9(GW)}} = \frac{(1 - 0,2) \cdot 94}{(1 - 0,2) \cdot 100} = 0,94$$

$$c = 0,8$$

$$f_{cr} = R_{m,t,9(GW)} \cdot a \cdot b \cdot c = 100 \cdot 0,8 \cdot 0,94 \cdot 0,8 = 60,16 \text{ MPa}$$

Beispiel 1b — Kennwerte des Grundwerkstoffs (GW) und Kennwerte des Schweißguts (SG) liegen vor, Kennwerte der Schweißverbindung (SV) liegen nicht vor.

$$R_{m,t,9(GW)} = 100 \text{ MPa} \quad \delta_{GW} = 0,2 \quad t = 100000 \text{ h}$$

$$R_{m,t,9(SG)} = 94 \text{ MPa} \quad \delta_{SG} = 0,2 \quad t = 100000 \text{ h}$$

Auslegung für 100000 h ohne Überwachung der Lebensdauer

$$a = (1 - \delta_{GW}) / 1,2 = (1 - 0,2) / 1,2 = 0,67$$

$$b = \frac{(1 - \delta_{SG}) R_{m,t,9(SG)}}{(1 - \delta_{GW}) R_{m,t,9(GW)}} = \frac{(1 - 0,2) \cdot 94}{(1 - 0,2) \cdot 100} = 0,94$$

$$c = 0,8$$

$$f_{cr} = R_{m,t,9(GW)} \cdot a \cdot b \cdot c = 100 \cdot 0,67 \cdot 0,94 \cdot 0,8 = 50,38 \text{ MPa}$$

Beispiel 1c — Kennwerte des Grundwerkstoffs (GW) und Kennwerte des Schweißguts (SG) liegen vor, Kennwerte der Schweißverbindung (SV) liegen nicht vor.

$$R_{m,t,9(GW)} = 94 \text{ MPa} \quad \delta_{GW} = 0,2 \quad t = 200000 \text{ h}$$

$$R_{m,t,9(SG)} = 100 \text{ MPa} \quad \delta_{SG} = 0,2 \quad t = 200000 \text{ h}$$

Auslegung für 200000 h mit Überwachung der Lebensdauer

$$a = (1 - \delta_{GW}) = (1 - 0,2) = 0,8$$

$$b = \frac{(1 - \delta_{SG}) R_{m,t,9(SG)}}{(1 - \delta_{GW}) R_{m,t,9(GW)}} = \frac{(1 - 0,2) \cdot 100}{(1 - 0,2) \cdot 94} = 1,0$$

$$c = 0,8$$

$$f_{cr} = R_{m,t,9(GW)} \cdot a \cdot b \cdot c = 94 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,8 = 60,16 \text{ MPa}$$

Beispiel 1d — Kennwerte des Grundwerkstoffs (GW) und Kennwerte des Schweißguts (SG) liegen vor, Kennwerte der Schweißverbindung (SV) liegen nicht vor.

$$R_{m,t,9}(\text{GW}) = 100 \text{ MPa} \quad \delta_{\text{GW}} = 0,2 \quad t = 200000 \text{ h}$$

$$R_{m,t,9}(\text{SG}) = 94 \text{ MPa} \quad \delta_{\text{SG}} = 0,2 \quad t = 100000 \text{ h}$$

Auslegung für 200000 h mit Überwachung der Lebensdauer

$$a = 0,67 \quad (\text{weil für SG nur } 100000\text{-h-Kennwerte verfügbar, aber } 200000 \text{ h Betriebszeit gefordert})$$

$$b = \frac{(1 - \delta_{\text{SG}}) R_{m,t,9}(\text{SG})}{(1 - \delta_{\text{GW}}) R_{m,t,9}(\text{GW})} = \frac{(1 - 0,2) \cdot 94}{(1 - 0,2) \cdot 100} = 0,94$$

$$c = 0,8$$

$$f_{\text{cr}} = R_{m,t,9}(\text{GW}) \cdot a \cdot b \cdot c = 100 \cdot 0,67 \cdot 0,94 \cdot 0,8 = 50,38 \text{ MPa}$$

Beispiel 2a — Kennwerte der Schweißverbindung (SV) liegen als Mindestwerte vor.

$$R_{m,t,9}(\text{GW}) = 100 \text{ MPa} \quad \delta_{\text{GW}} = 0,2 \quad t = 200000 \text{ h}$$

$$R_{m,t,9}(\text{SV}) = 76 \text{ MPa} \quad \delta_{\text{SV}} = 0 \quad t = 200000 \text{ h}$$

Auslegung für 200000 h mit Überwachung der Lebensdauer

$$a = (1 - \delta_{\text{GW}}) = (1 - 0,2) = 0,8$$

$$b = 1,0$$

$$c = \frac{(1 - \delta_{\text{SV}}) R_{m,t,9}(\text{SV})}{(1 - \delta_{\text{GW}}) R_{m,t,9}(\text{GW})} = \frac{(1 - 0) \cdot 76}{(1 - 0,2) \cdot 100} = 0,95$$

$$f_{\text{cr}} = R_{m,t,9}(\text{GW}) \cdot a \cdot b \cdot c = 100 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,95 = 76,0 \text{ MPa}$$

Beispiel 2b — Kennwerte der Schweißverbindung (SV) liegen als Mittelwerte vor.

$$R_{m,t,9}(\text{GW}) = 100 \text{ MPa} \quad \delta_{\text{GW}} = 0,2 \quad t = 200000 \text{ h}$$

$$R_{m,t,9}(\text{SV}) = 76 \text{ MPa} \quad \delta_{\text{SV}} = 0,15 \quad t = 200000 \text{ h}$$

Auslegung für 200000 h mit Überwachung der Lebensdauer

$$a = (1 - \delta_{\text{GW}}) = (1 - 0,2) = 0,8$$

$$b = 1,0$$

$$c = \frac{(1 - \delta_{\text{SV}}) R_{m,t,9}(\text{SV})}{(1 - \delta_{\text{GW}}) R_{m,t,9}(\text{GW})} = \frac{(1 - 0,15) \cdot 76}{(1 - 0,2) \cdot 100} = 0,8075$$

$$f_{\text{cr}} = R_{m,t,9}(\text{GW}) \cdot a \cdot b \cdot c = 100 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,8075 = 64,6 \text{ MPa}$$

Beispiel 3a — Kennwerte der Schweißverbindung (SV) liegen als Verhältnis der Mindestwerte (SV / GW) vor.

$$R_{m,t,9}(\text{GW}) = 100 \text{ MPa} \quad \delta_{\text{GW}} = 0,2 \quad t = 200000 \text{ h}$$

$$\text{Ratio}_{\text{min}(\text{SV})/\text{min}(\text{GW})} = 0,82 \quad t = 200000 \text{ h}$$

Auslegung für 200000 h mit Überwachung der Lebensdauer

$$a = (1 - \delta_{\text{GW}}) = (1 - 0,2) = 0,8$$

$$b = 1,0$$

$$c = 0,82$$

$$f_{\text{cr}} = R_{m,t,9}(\text{GW}) \cdot a \cdot b \cdot c = 100 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,82 = 65,6 \text{ MPa}$$

Beispiel 3b — Kennwerte der Schweißverbindung (SV) liegen als Verhältnis Mindestwert SV / Mittelwert GW vor.

$$R_{m,t,9(GW)} = 100 \text{ MPa} \quad \delta_{GW} = 0,2 \quad t = 200000 \text{ h}$$

$$Ratio_{\min(SV)/\text{mittel}(GW)} = 0,64 \quad t = 200000 \text{ h}$$

Auslegung für 200000 h mit Überwachung der Lebensdauer

$$a = (1 - \delta_{GW}) = (1 - 0,2) = 0,8$$

$$b = 1,0$$

$$c = \frac{Ratio_{\min(SV)/\text{mittel}(GW)}}{(1 - \delta_{GW})} = \frac{0,64}{(1 - 0,2)} = 0,80$$

$$f_{cr} = R_{m,t,9(GW)} \cdot a \cdot b \cdot c = 100 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,8 = 64,0 \text{ MPa}$$

Beispiel 3c — Kennwerte der Schweißverbindung (SV) liegen als Verhältnis Mindestwert SV / Mittelwert GW vor.

$$R_{m,t,9(GW)} = 100 \text{ MPa} \quad \delta_{GW} = 0,2 \quad t = 200000 \text{ h}$$

$$Ratio_{\min(SV)/\text{mittel}(GW)} = 0,64 \quad t = 100000 \text{ h}$$

Auslegung für 200000 h mit Überwachung der Lebensdauer

$$a = 0,67 \quad (\text{weil für SV nur 100000-h-Kennwerte verfügbar, aber 200000 h Betriebszeit gefordert})$$

$$b = 1,0$$

$$c = \frac{Ratio_{\min(SV)/\text{mittel}(GW)}}{(1 - \delta_{GW})} = \frac{0,64}{(1 - 0,2)} = 0,80$$

$$f_{cr} = R_{m,t,9(GW)} \cdot a \cdot b \cdot c = 100 \cdot 0,67 \cdot 1,0 \cdot 0,8 = 53,6 \text{ MPa}$$

Herausgeber:



Verband der TÜV e.V.

E-Mail: berlin@vdtuev.de
<http://www.vdtuev.de>

Bezugsquelle:

Beuth

Beuth Verlag GmbH
10772 Berlin
Tel. 030 / 26 01-22 60
Fax 030 / 26 01-12 60
kundenservice@beuth.de
www.beuth.de