

Zutreffende Ermüdungsnachweise von Rohrleitungen – insbesondere bei Anwendung neuer numerischer Methoden

Dieser Fachbeitrag enthält einen Überblick zum kürzlich abgeschlossenen zweijährigen Forschungsprojekt „Zutreffende Ermüdungsnachweise von Rohrleitungen – insbesondere Anwendung neuer numerischer Methoden“, das federführend von der TU Graz, Institut für Stahlbau bearbeitet wurde.

Dieses Forschungsprojekt – Akronym Ermüdung - DRL, Proj. Nr. 874667 (2. Forschungsjahr) und 867177 (1. Forschungsjahr) – wurde abgeschlossen zwischen der Österreichischen Forschungsgesellschaft mbH (FFG) als Fördergeberin (60 Prozent) und Oesterreichs Energie Forschung & Innovation als Dachverband. Die Projektabwicklung erfolgte seitens der TU Graz sowie acht weiteren Vertragspartnern, die 40 Prozent der Mittel bereitstellten. Es waren dies VERBUND Hydro GmbH, TIWAG – Tiroler Wasserkraft AG, Vorarlberger Illwerke AG, ANDRITZ Hydro GmbH, ÖBB -Infrastruktur AG, Bilfinger VAM Anlagentechnik GmbH, KELAG – Kärntner Elektrizitäts Aktiengesellschaft und die Salzburg AG für Energie, Verkehr und Telekommunikation.

Nachfolgend werden die Hauptergebnisse dieses Forschungsprojektes dargestellt, die eine Zusammenfassung des umfassenden Gesamtberichts [1] darstellen, der für die Projektpartner erstellt wurde.

Projekthalt – Überblick und behandelte Einzelthemen

a) Einleitung

Stählerne Rohrleitungen von Triebwasserwegen (freie Druckrohrleitungen bzw. Druckschächte) sind sehr langlebige Komponenten und weisen aus dem Betrieb mitunter erhebliche Druckschwankungen auf, sodass bei der Auslegung auch der Ermüdungsnachweis beachtet werden muss.

Durch das Umschalten zwischen Turbinen- und Pumpbetrieb entstehen in der Rohrleitung Druckstöße, welche jedoch nur teilweise durch das Wasserschloss aufgenommen werden können. Daraus resultieren Spannungsschwankungen bzw. Spannungsspiele $\Delta\sigma$ in der Druckschachtpanzerung bzw. Druckrohrleitung, die zu einer Ermüdungsbeanspruchung führen. Da, mit der heutigen Technik, das Umschalten zwischen Pump- und Turbinenbetrieb immer schneller von statten geht, wird die Ermüdungsproblematik ein weiterhin zunehmendes Auslegungskriterium bei Druckschächten und Druckrohrleitungen.

Vor allem bei Bestandstragwerken kann die gegenüber der Planung geänderte Betriebsführung zu deutlich erhöhten Betriebskollektiven führen (vor allem Erhöhung der Anzahl der Spannungsspiele), sodass eine Neubeurteilung erforderlich wird, um die verfügbare rechnerische Restlebensdauer hinsichtlich Materialermüdung zu quantifizieren.

Der rechnerische Ermüdungsnachweis, der die Gesamtlebensdauer des Bauteils beschreibt (für den nicht rissbehafteten Bauteil), kann alternativ grundsätzlich nach folgenden Konzepten hinsichtlich der Spannungsberechnung erfolgen:

- Anhand von Nennspannungen (Nennspannungskonzept); Vorgehensweise im Eurocode EN 1993-1-9 [2] erläutert mit Angabe von Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_R$, $\Delta\tau_R$ für definierte Kerbfälle
- Anhand von Strukturspannungen (Strukturspannungskonzept); Hinweise und Kerbfälle im Eurocode EN 1993-1-9 [2] Anhang B, angegeben; Vorgehensweise zur Spannungsberechnung jedoch nicht definiert
- Anhand von Kerbspannungen (Kerbspannungskonzept); keine normativen Regelungen im Eurocode diesbezüglich vorhanden

Im Zuge dieses Forschungsprojektes wurden diese drei Konzepte des Ermüdungsnachweises näher analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung für die Anwendung bei Rohrleitungen überprüft. Dafür wurden einige repräsentative ermüdungsrelevante Details (Bezeichnung D1 bis D4) aus dem Druckrohrleitungsbau herausgegriffen und anhand dieser drei Konzepte untersucht. Die zutreffendste Vorgehensweise wurde dann für die praktische Anwendung entsprechend aufbereitet, sodass bei Detail D1 bis D3 keine numerische FE-Berechnung notwendig wird. Für das Detail D4 wird eine numerische Berechnung nach dem Strukturspannungskonzept empfohlen.

Folgende Anschlussdetails von Rohrleitungen wurden näher untersucht:

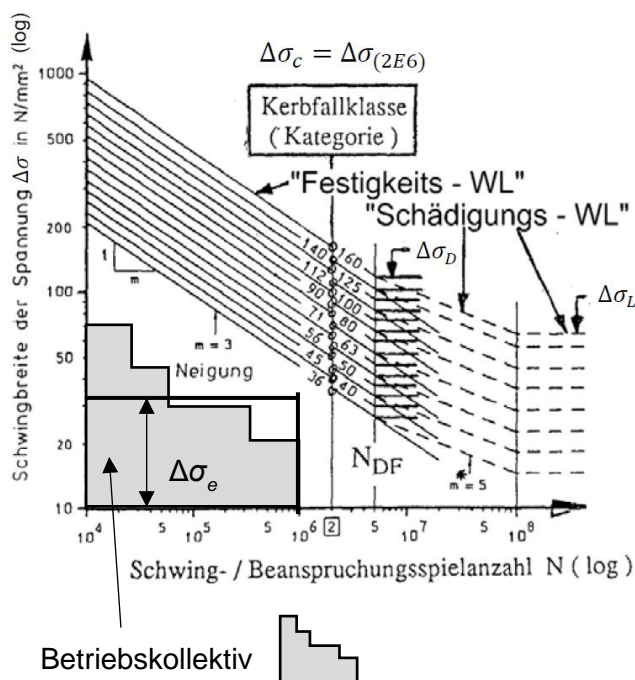
- Detail D1: Längsnaht einer Rohrleitung
- Detail D2: Quernaht einer Rohrleitung, mit/ohne Dickensprung des Rohres
- Detail D3: Ringsteifenanschluss an eine Rohrleitung
- Detail D4: Ringflanschanschluss an das Rohr

Darüber hinaus erfolgte im Projekt eine Darstellung der zutreffenden Vorgehensweise nach dem Strukturspannungskonzept anhand eines Mannlochstützens, stellvertretend für ein Anschlussdetail mit komplexer Geometrie.

b) Defizite der aktuellen Normenwerke

Nach Stand der Technik erfolgt in der Regel eine Anwendung nach dem sogenannten Nennspannungskonzept. Im Eurocode EN 1993-1-9 [2] werden, wie Abb. 1 zusammenfassend zeigt, stahlbauliche Anschlussdetails in sogenannten Kerbfallkatalogen aufgelistet und einer zutreffenden Kerbfallklasse zugeordnet. Der Zahlenwert der Kerbfallklasse entspricht der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ bei Einstufenbelastung und $N = 2 \cdot 10^6$ Spannungsspielen. Die Kerbfallkataloge in EN 1993-1-9 beinhalten in erster Linie Anschlussdetails von stabförmigen Tragkonstruktionen.

Kerbfalkatalog



Kategorie	Schweißnaht-Detail (Auswahl)
125	① ②
112	③ ④
100	⑤ ⑥ ⑦
80	⑧
71	⑨

Abb. 1 Ermüdungsfestigkeit nach EN 1993-1-9; Nennspannungskonzept
 Damit sind die typischen Anschlussdetails von Rohrleitungen, wie die genannten Details D1 bis D4, nicht oder meist nur unzureichend mit abgedeckt.
 Zusätzlich fehlen Angaben für Spannungskonzentrationsfaktoren k_f für die Anwendung des Nennspannungskonzeptes auf Rohrleitungen.

Alternativ ist im Eurocode eine Anwendung des Strukturspannungskonzeptes (vgl. Abb. 2) möglich. Für die maßgehenden Anschlussdetails von Rohrleitungen (Detail D1 bis D4) fehlen jegliche Hinweise zur Ermittlung der zutreffenden extrapolierten Strukturspannung am „Hot spot“.

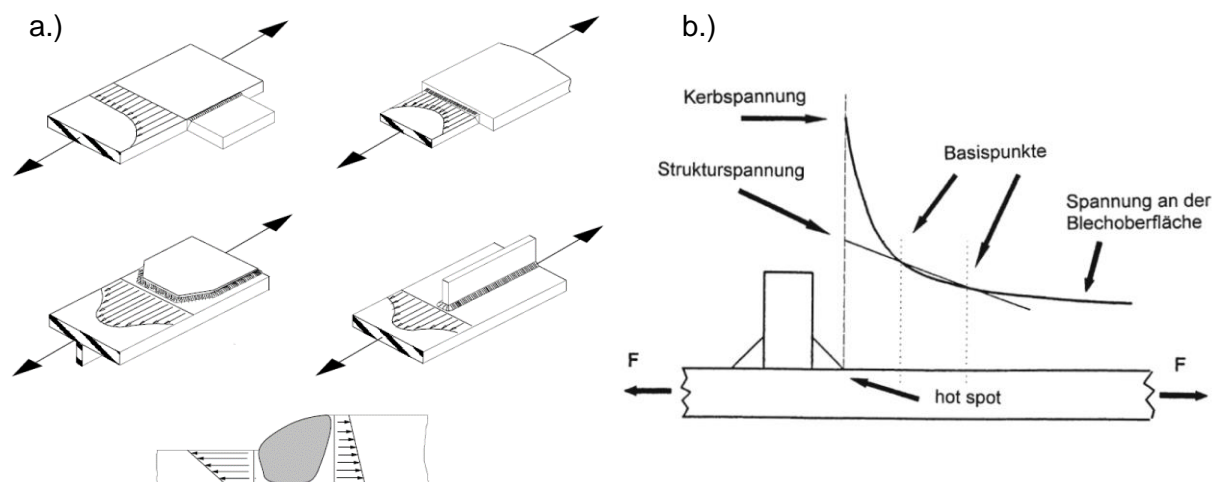


Abb. 2 Anwendung des Strukturspannungskonzeptes; a) einfache Beispiele; b) Definition der Strukturspannung (aus [3])

Bei Anwendung der Regeln nach IIW [3], sind keine aufbereiteten Lösungen für entsprechende Spannungskonzentrationsfaktoren k_{HS} am Hotspot verfügbar.

Eine weitere, alternative Vorgehensweise ist das Kerbspannungskonzept, das zwar im Eurocode aktuell noch fehlt, aber im Maschinenbau bereits international standardisiert ist (IIW [3], FKM-Richtlinie [4]; vgl. Abb. 3)

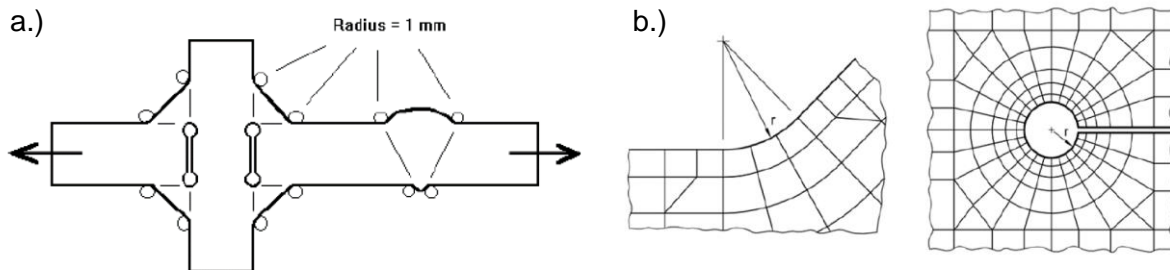


Abb. 3 Anwendung des Kerbspannungskonzeptes; a) Modellierung der effektiven Schweißnahtkerben; b) erforderliche notwendige Elementverdichtung im Bereich der Schweißnahtkerben (aus [3])

Für die Anwendung dieses Konzepts auf die maßgebenden Details von Stahlrohrleitungen (Detail D1 bis D4) fehlen praxisorientierte Angaben zur Modellbildung (insbesondere Umsetzung der notwendigen Netzverfeinerung, vgl. Abb. 3) sowie es fehlen Ergebnisvergleiche zu Nennspannungs- und Strukturspannungskonzept.

Struktur- und Kerbspannungskonzept erlauben und erfordern auch die Erfassung geometrischer Imperfektionen von Blechen und Schweißnähten (misalignment) und deren Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit.

Die Auswirkungen von geometrischen Imperfektionen an typischen Details im Rohrleitungsbau (Detail D1 bis D4) auf die Ermüdungsfestigkeit sind weitgehend unbekannt (keine systematischen Untersuchungen in der Literatur).

c) *Wesentliche Ziele im Projekt*

- Zutreffende lokale Beanspruchung $\Delta\sigma$ und Ermüdungsfestigkeit von maßgebenden Anschlussdetails von Druckrohrleitungen (Detail D1 ÷ D4)
- Verbesserte günstigere Umrechnung von Betriebskollektiven in äquivalente Einstufenbeanspruchung $\Delta\sigma_e$
- Zutreffende FE-Modellbildung bei Struktur- und Kerbspannungskonzept
- Einfluss von Imperfektionen auf die Ermüdungsfestigkeit
- Alternative Nutzung von Struktur- und Kerbspannungskonzept - anstatt Nennspannungskonzept - für wirtschaftlichere Auslegung (höhere Ermüdungsfestigkeit)
- Praktische Aufbereitung des zutreffendsten Nachweiskonzeptes (Nenn-, Struktur-, Kerbspannung) für Detail D1 ÷ D4

Wesentliche Ergebnisse

Nachfolgend werden einige erwähnenswerte Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt dargestellt, die durchaus als „Highlights“ angesehen werden können und sehr erfreuliche Ergebnisse für die Projektpartner darstellen.

Dies deshalb, da damit die aktuellen Unwägbarkeiten bei den Ermüdungsnachweisen wegfallen und vor allem auch wirtschaftlichere Ergebnisse – gegenüber der bisherigen Vorgehensweise nach dem Nennspannungskonzept – erzielt werden können (Erhöhung der geplanten Lebensdauer von stählernen Druckrohrleitungen)

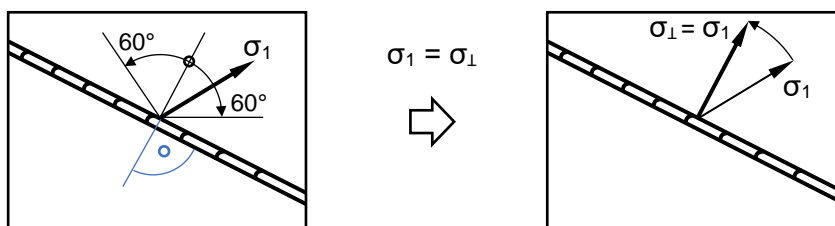
a) zutreffende Erfassung von mehrachsigen Spannungszuständen beim Ermüdungsnachweis

Bei den wesentlichen konstruktiven Ausführungsdetails im Rohrleitungsbau, für die ein Ermüdungsnachweis erforderlich wird, liegt im Wesentlichen immer ein Schweißnahtanschluss und ein ebener Spannungszustand vor (Spannungen in Blechdickenrichtung in der Regel vernachlässigbar).

Die Ergebnisse der Literaturrecherche lieferten eine unbefriedigende Situation, da die sehr knapp gehaltenen Regeln in den Normenwerken nicht durch Ergebnisse in der Forschungsliteratur ausreichend belegt werden konnten.

Die Vorgehensweise nach dem Stand der Technik wurde praxisgerecht aufbereitet (siehe Abb. 4), wobei diesbezüglich der Eurocode nur unzureichende Regelungen enthält, sodass die IIW-Richtlinie herangezogen wurde.

- Fall I: σ_1 im „Korridor 60°“



Nachweis:

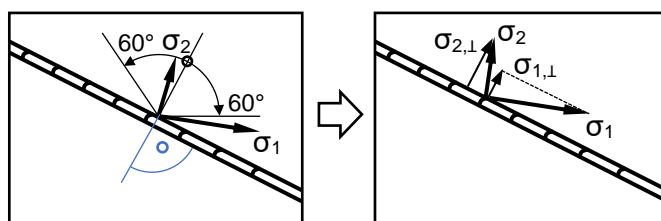
$$\Delta\sigma_{\perp} = \Delta\sigma_1 \leq \Delta\sigma_{R,\perp}$$

oder

$$\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_{R,\perp}} \leq 1.0 \quad (N1)$$

Anm. Nachweis mit $\Delta\sigma_2$ nie maßgebend, da $\Delta\sigma_{R,\parallel} > \Delta\sigma_{R,\perp}$

- Fall II: σ_1 außerhalb „Korridor 60°“



Nachweis:

$$\frac{\Delta\sigma_{1,\perp} + \Delta\sigma_{2,\perp}}{\Delta\sigma_{R,\perp}} \quad \text{od.} \quad \frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_{R,\perp}} \leq 1.0 \quad (N2)$$

und

$$\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_{R,\parallel}} \leq 1.0 \quad (N3)$$

Abb. 4 Vorgehensweise nach der IIW-Richtlinie (Fall I und II)

Ergänzend dazu wurde eine ingenieurmäßige Vorgehensweise erarbeitet, die für die Praxis empfohlen wird. Diese entspricht einer Addition der Schädigungswirkung, senkrecht und parallel zur Naht nach Gleichung (1), wobei die Größen $\Delta\sigma_{ges,i}$ nach Abb. 5 zu ermitteln sind.

$$\left(\frac{\Delta\sigma_{ges,\perp}}{\Delta\sigma_{R,\perp}}\right)^3 + \left(\frac{\Delta\sigma_{ges,\parallel}}{\Delta\sigma_{R,\parallel}}\right)^3 \tag{1}$$

Die Abb. 5 zeigt einen Ergebnisvergleich in Form eines vergleichbaren Ausnutzungsgrades AG^* für ein Beispiel einer durchgeführten Parameterstudie für übliche Verhältnisse σ_x/σ_y .

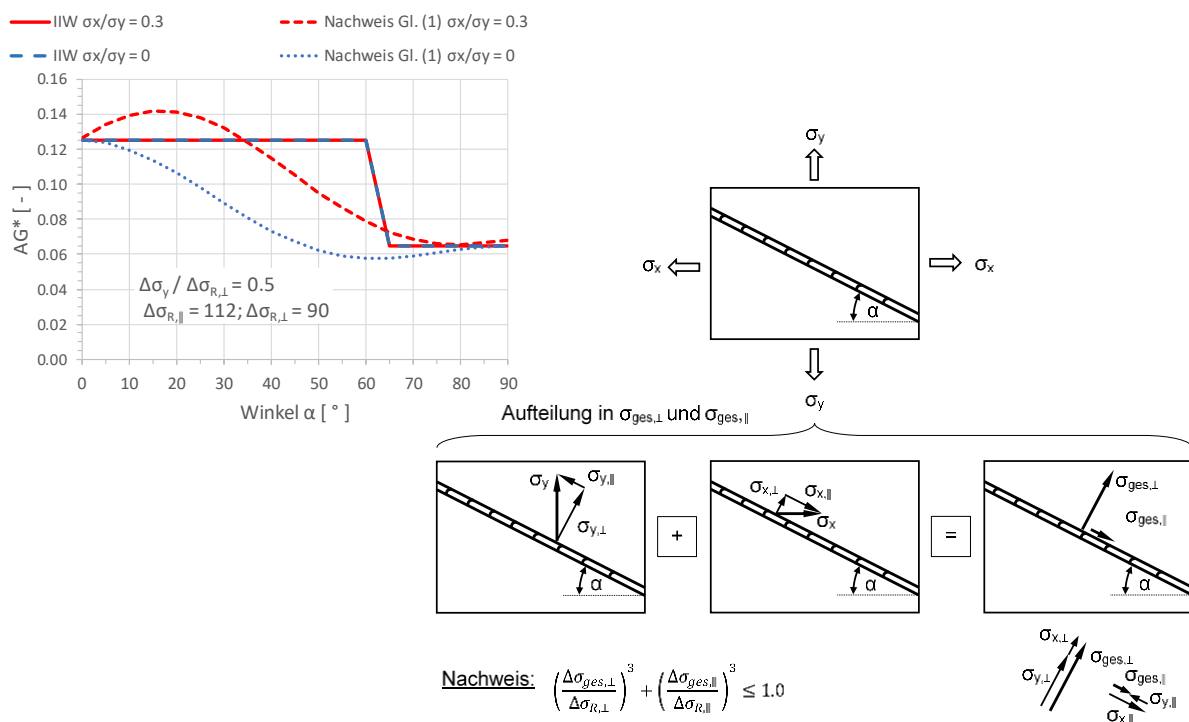


Abb. 5 Ergebnisvergleich der Parameterstudie – IIW versus empfohlener Vorgehensweise (Gleichung 1)

b) Anwendung des Kerbspannungskonzeptes als Alternative zum Strukturspannungskonzept

Die Anwendung des Kerbspannungskonzeptes auf die untersuchten Details D1 ÷ D4 zeigte, dass dieses Konzept – aus Sicht der Anwendungspraxis – zu aufwändig ist, gegenüber dem Strukturspannungskonzept. Für letzteres konnten im Projekt für die Details D2 und D3 Aufbereitungen erarbeitet werden, sodass eine FEM-Berechnung für das lokale Detail entfallen kann (s. auch Punkt d)). Das Detail D1 ist mit dem Nennspannungskonzept hinreichend genau abgedeckt. Für das Detail D4 wird eine numerische Berechnung nach dem Strukturspannungskonzept empfohlen.

Einzig im Falle von, eher unüblichen, Schweißnahtausführungen mit Doppelkehlnähten, wie in Abb. 6 für einen Ringstiftenanschluss gezeigt, erlaubt alleine das Kerbspannungskonzept einen Nachweis an der Schweißnahtwurzel.

Im Projekt wurden konstruktive Regeln, hinsichtlich Mindestschweißnahtdicken für Doppelkehlnähte mit zusätzlicher Blechanfasung, erarbeitet, sodass ein Nachweis der Schweißnahtwurzel entfallen kann und damit immer das Strukturspannungskonzept anwendbar ist.

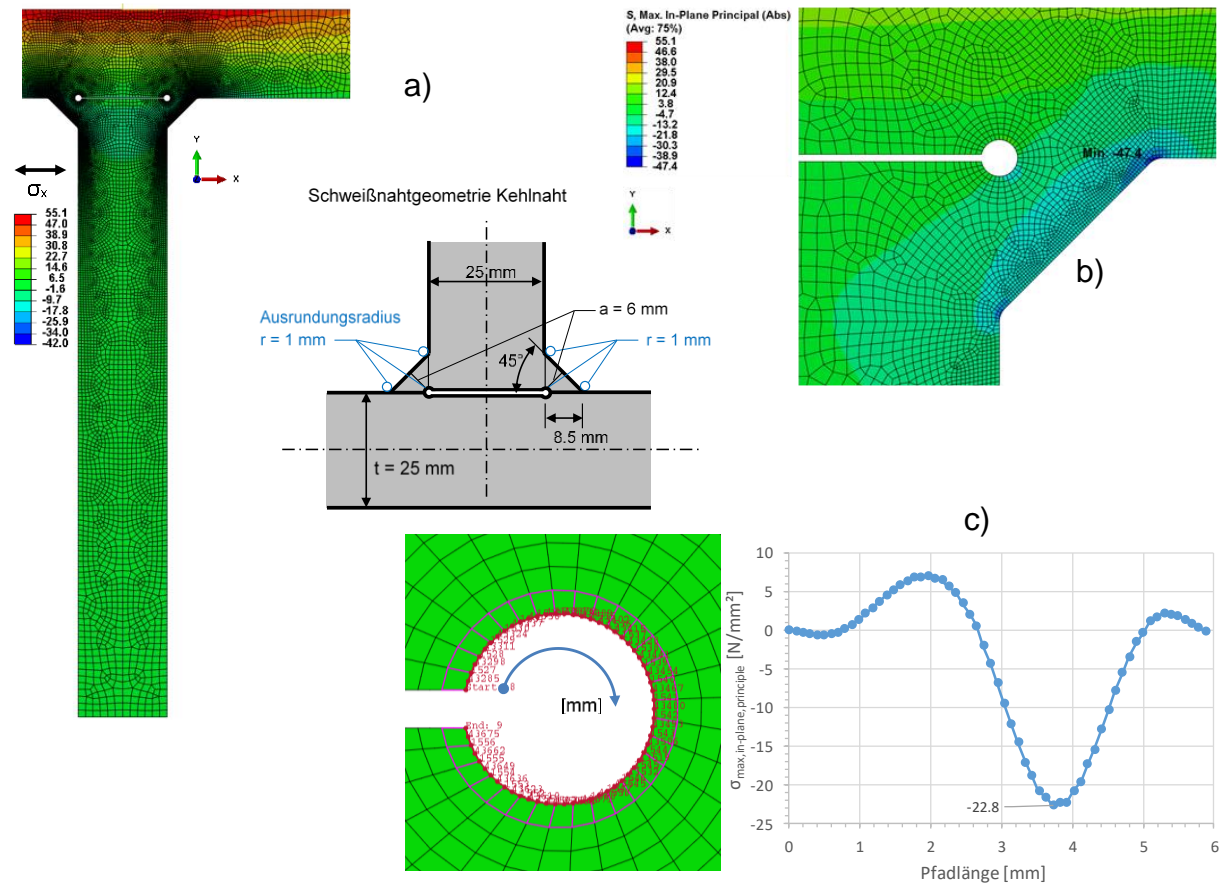


Abb. 6 Detail Ringstiftenanschluss: a) FE-Netz der Kerbspannungsberechnung mit Darstellung der Schweißnahtgeometrie der Kehlnähte für $a = 6$ mm; b) Spannungsplot im Bereich der Kehlnaht für die maximalen Hauptspannungen in der x-y Ebene; c) Maximale Hauptspannungen in der x-y Ebene entlang der Ausrundung an der Schweißnahtwurzel

c) Einfluss von Imperfektionen auf die Ermüdungsfestigkeit

Es wurde in diesem Projekt für jedes Rohrdetail D1 bis D4 die zutreffende Vorgehensweise zur Berücksichtigung von Imperfektionen beim Ermüdungsnachweis angegeben.

In Abb. 7 ist beispielsweise der Spannungskonzentrations- bzw. Spannungserhöhungsfaktor k_f aus der IIW-Richtlinie für Versätze der Größe e bei Zylinderschalen angegeben. Dieser Berechnungsansatz wurde mit Hilfe der entwickelten analytischen Lösung und mittels numerischen Berechnungen verifiziert.

In Abb. 8 ist der Spannungskonzentrationsfaktor k_f aus unterschiedlichen Normen und Richtlinien mit der entwickelten analytischen Lösung verglichen, für einen Wanddickensprung mit einer bündigen Innenkante ($e = (t_2 - t_1) / 2$). Der Spannungskonzentrationsfaktor k_f kann auch für gleiche Wanddicken, mit einem unplanmäßigen Versatz e entsprechend Abb. 7, verwendet werden.

Bei dominanter Umfangsspannung σ_φ konnte eine deutlich günstigere analytische Lösung erarbeitet werden (vgl. Abb. 8b).

Beim Ringsteifenanschluss sind geometrische Imperfektionen der Ringsteife selbst von untergeordneter Bedeutung, da sie die Strukturspannungen σ_{HS} am Hotspot nicht nennenswert beeinflussen. Sie können damit in der Regel außer Acht bleiben.

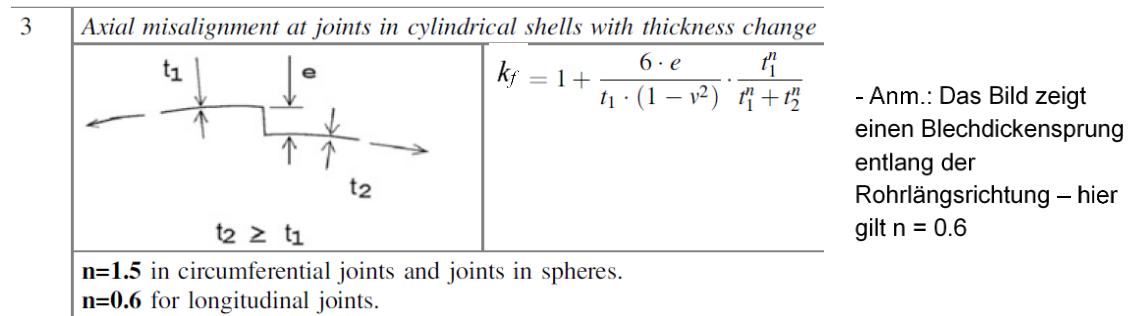


Abb. 7 Spannungskonzentrationsfaktor k_f aus der IIW-Richtlinie bei Versätzen von Blechschalen; $n=1.5$ für Wanddickensprünge entlang der Umfangsrichtung

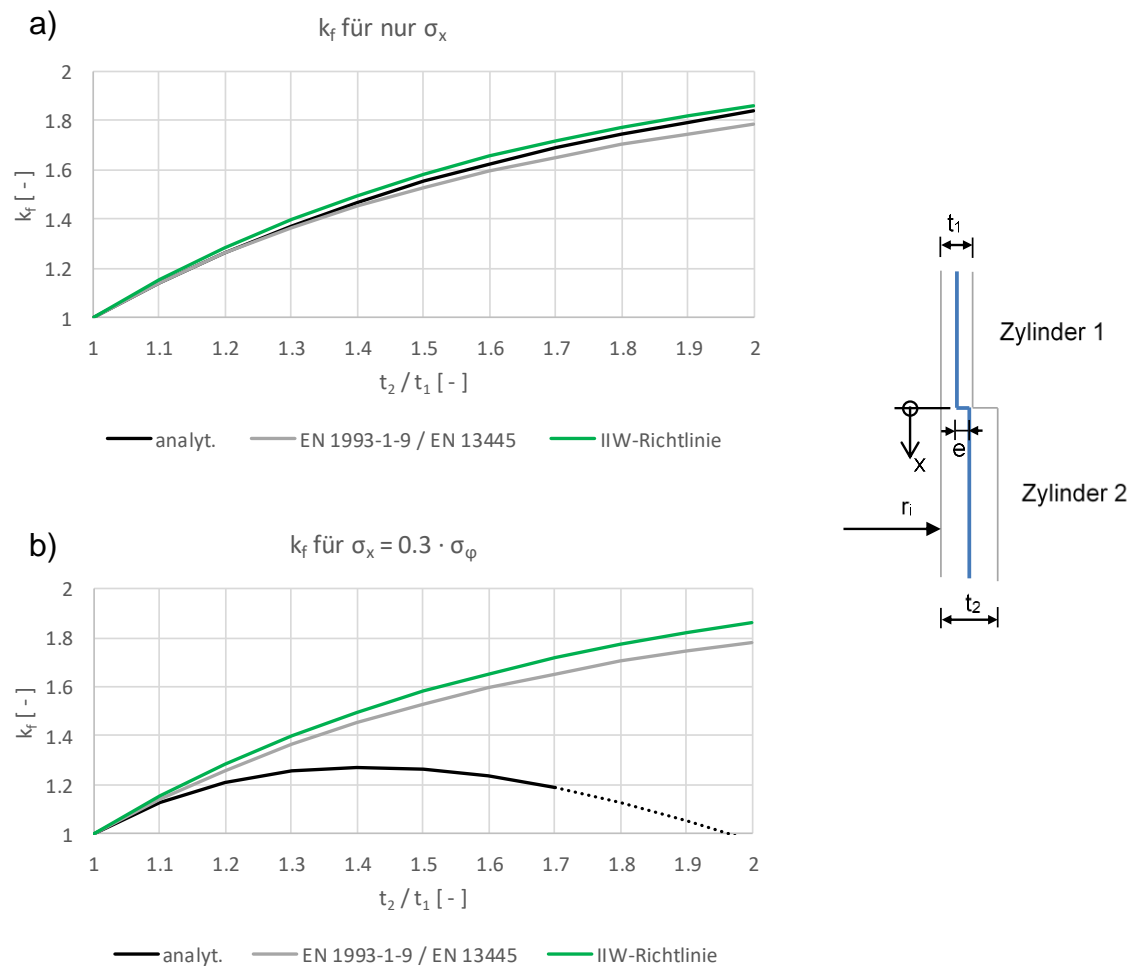


Abb. 8 Spannungskonzentrationsfaktor k_f für: a) reine Längskraftbeanspruchung, b) bei Innendruck und begleitender Längskraft (Fall B), bei Versätzen in Umfangsrichtung der Zylinderschale – Vergleich der Normen und Richtlinien mit der analytischen Lösung

d) Zutreffende Ermüdungsbeanspruchung und zugehörige Ermüdungsfestigkeit von maßgebenden Anschlussdetails von Druckrohrleitungen

Es wurden die Ermüdungsnachweise, d.h. Ermüdungsbeanspruchung und zutreffende Ermüdungsfestigkeit, für alle untersuchten Details D1 ÷ D4 und für folgende 3 Beanspruchungsfälle aufbereitet:

- **Fall A:** alleinige Innendruckbeanspruchung Δp am längsfreien Rohr. Dabei gilt für die Membranspannungen am Rohr: $\Delta\sigma_{\varphi,m}; \Delta\sigma_{x,m} = 0$
- **Fall B:** alleinige Innendruckbeanspruchung Δp am Rohr, mit vollständig behinderter Längsdehnung. Dabei gilt für die Membranspannungen am Rohr: $\Delta\sigma_{\varphi,m}; \Delta\sigma_{x,m} = \nu \cdot \Delta\sigma_{\varphi,m} = 0.3 \cdot \Delta\sigma_{\varphi,m}$
- **Fall C:** alleinige Rohrlängsbeanspruchung Δn_x . Dabei gilt für die Membranspannungen am Rohr: $\Delta\sigma_{x,m}; \Delta\sigma_{\varphi,m} = 0$

Für Detail 1 und 2 a (Rohrlängs- und Rohrquernaht) ist eine Bemessung nach dem Nennspannungskonzept sinnvoll und empfehlenswert. Struktur- und Kerbspannungskonzept sind hier mit unverhältnismäßig viel Aufwand verbunden und erfordern die explizite Miterfassung von geometrischen Imperfektionen.

Nachfolgend wird beispielhaft für das Detail 3 (Ringsteifenanschluss an das Rohr) die, in diesem Projekt neu entwickelte, Vorgehensweise für den Ermüdungsnachweis auf Basis des Strukturspannungskonzeptes gezeigt. Für Detail 2 b (Rohrquernaht mit Wanddickensprung) und Detail 4 (Ringflanschanschlussnaht) wurde ebenso eine neue Vorgehensweise entwickelt. Die Abb. 9 zeigt für den Ringsteifenanschluss die neu ermittelten Spannungskonzentrationsfaktoren k_{HS} (mit diesen lassen sich die Spannungen im maßgebenden Punkt, auch „Hot spot“ genannt, exakt bestimmen) für ausgewählte Fälle sowie die zutreffenden Ermüdungsfestigkeiten und die empfohlene Nachweisformel für den Ermüdungsnachweis.

Für alle anderen Fälle kann die Spannung im „Hot spot“ auch mit den neu entwickelten Nomogrammen bestimmt werden (aus Platzgründen hier nicht angeführt).

r _i [mm]	t [mm]	r _i /t	t _s [mm]	Δσ	h _s = 200 mm			h _s = 350 mm		
					A	B	C	A	B	C
1250	25	50	25	Δσ _x	0.66	0.29	1.22	0.86	0.48	1.28
				Δσ _φ	0.44	0.50	Δσ _φ <<	0.27	0.34	Δσ _φ <<
1500	50	30	25	Δσ _x	0.29	0.04	1.11	0.43	0.08	1.15
				Δσ _φ	0.75	0.78	Δσ _φ <<	0.64	0.67	Δσ _φ <<
1500	50	30	50	Δσ _x	0.49	0.13	1.19	0.67	0.30	1.23
				Δσ _φ	0.59	0.63	Δσ _φ <<	0.43	0.49	Δσ _φ <<
5000	50	100	25	Δσ _x	0.19	0.13	1.07	0.31	0.03	1.11
				Δσ _φ	0.84	0.85	Δσ _φ <<	0.74	0.77	Δσ _φ <<
5000	50	100	50	Δσ _x	0.34	0.00	1.13	0.51	0.16	1.18
				Δσ _φ	0.71	0.74	Δσ _φ <<	0.56	0.61	Δσ _φ <<

Legende:

- Fall A: alleiniger Innendruck, Rohr längsfrei (Δσ_{φ,m}; Δσ_{x,m} = 0)

$$\Delta\sigma_{x,HS} = k_{HS} \cdot \Delta\sigma_{\phi,m}$$

$$\Delta\sigma_{\phi,HS} = k_{HS} \cdot \Delta\sigma_{\phi,m}$$

- Fall B: alleiniger Innendruck, Rohr vollständig längsbehindert (Δσ_{φ,m}; Δσ_{x,m} = 0.3 · Δσ_φ)

$$\Delta\sigma_{x,HS} = k_{HS} \cdot \Delta\sigma_{\phi,m}$$

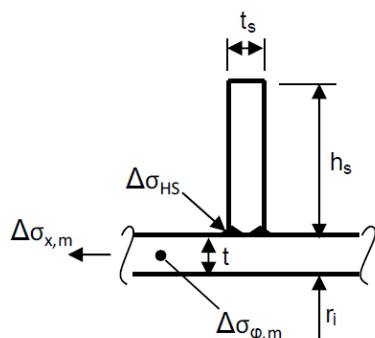
$$\Delta\sigma_{\phi,HS} = k_{HS} \cdot \Delta\sigma_{\phi,m}$$

- Fall C: alleinige Längsbeanspruchung im Rohr (Δσ_{x,m}, Δσ_{φ,m} = 0)

$$\Delta\sigma_{x,HS} = k_{HS} \cdot \Delta\sigma_{x,m}$$

$$\Delta\sigma_{\phi,HS} \ll, \text{ d.h. Ermüdungsschädigung vernachlässigbar}$$

Werte k_{HS}



- Bezugswerte

Δσ_{x,m}, Δσ_{φ,m} ... Membranspannungen im Rohr (ohne Ringsteife) aus Längskraft bzw. Innendruck

- Ermüdungsfestigkeiten

ohne Nahtnachbehandlung:

$$\Delta\sigma_{x,R,HS} = k_s \cdot 100 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_{\phi,R,HS} = 112 \text{ N/mm}^2 \text{ (aus Nennspannungskonzept nutzbar)}$$

$$\text{mit } k_s = (25/t)^{0.2} \leq 1.0$$

- Nachweisformel

$$\left(\frac{\Delta\sigma_{x,HS}}{\Delta\sigma_{x,R,HS}}\right)^3 + \left(\frac{\Delta\sigma_{\phi,HS}}{\Delta\sigma_{\phi,R,HS}}\right)^3 \leq 1.0$$

Abb. 9 Konstruktionsdetail Ringsteifenanschluss – Nachweisformel und Spannungskonzentrationsfaktoren k_{HS} für die Anwendung des Strukturspannungskonzeptes, auf Basis der Membranspannungen Δσ_{x,m} und Δσ_{φ,m} am Rohr

e) Alternative Nutzung von Struktur- und Kerbspannungskonzept für eine wirtschaftlichere Auslegung

In diesem Projekt hat sich herausgestellt, dass vor allem für die Details des Wanddickensprunges (D2), des Ringsteifen- und des Ringflanschanschlusses (D3, D4) die Vorgehensweise nach dem Strukturspannungskonzept anstatt des Nennspannungskonzepts gewählt werden sollte, um sicherere und auch wirtschaftlichere Ergebnisse für den Ermüdungsnachweis zu erhalten. Das Kerbspannungskonzept sollte nur für Spezialanwendungen, wie beispielsweise die Überprüfung des Wurzelversagens bei Kehlnähten, eingesetzt werden.

Als Beispiel wird hier für den Ringsteifenanschluss der Vergleich zwischen dem Nennspannungs- und Strukturspannungskonzept anhand der maximal ertragbaren Membranspannung $\Delta\sigma_{\varphi,m}$, bei welcher der Ermüdungsnachweis zu 100% ausgenutzt wäre, gezeigt. In der Abb. 10 ist für die Belastungsfälle A und B mit Innendruckbeanspruchung Δp_i die maximal ertragbare Umfangsmembranspannung $\Delta\sigma_{\varphi,m,max}$, für den Fall C mit Längsbeanspruchung Δn_x die maximal ertragbare Längsmembranspannung $\Delta\sigma_{x,m,max}$ dargestellt. Damit können die Ermüdungsnachweise untereinander verglichen werden. Es zeigt sich, dass der Ermüdungsnachweis nach dem Strukturspannungskonzept deutlich höhere maximal ertragbare Membranspannungen zulässt, als nach dem Nennspannungskonzept.

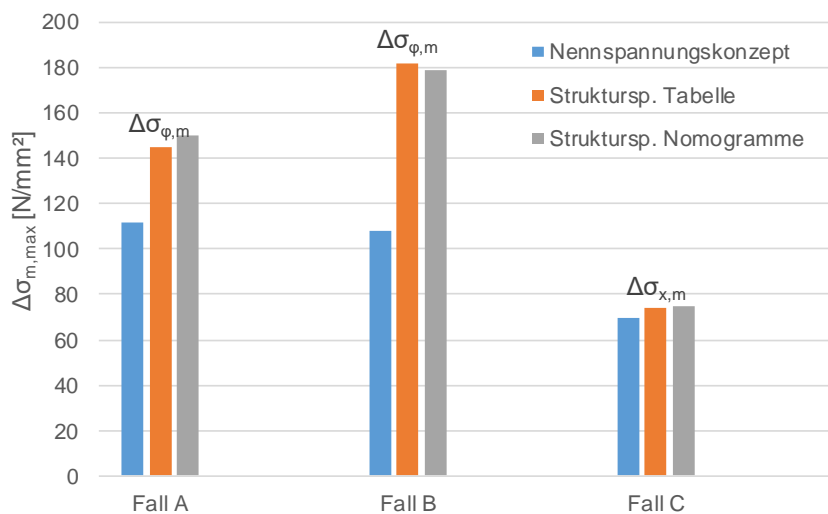


Abb. 10 Detail Ringsteifenanschluss: Maximal ertragbare Membranspannungen für ein Anwendungsbeispiel (Rohr mit $R = 5000$ mm, $t = 50$ mm, Ringsteife $h_R / t_R = 350 / 50$ mm)

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei allen Projektpartnern für die gute Zusammenarbeit und für die großzügige finanzielle Förderung des Projektes. Ein spezieller Dank ergeht an Frau Hirsch und Herrn Apperl, seitens Österreichs Energie Forschung & Innovation, für die organisatorische Abwicklung mit der FFG.

Darüber hinaus ergeht der Dank an die FFG zur Gewährleistung der Finanzmittel im Zuge der Projektfinanzierung als „Collective Research“.

Literaturverzeichnis

- [1] Unterweger H., Ecker A., Zutreffende Ermüdungsnachweise von Rohrleitungen – insbesondere Anwendung neuer numerischer Methoden, Endbericht zum FFG-Projekt, 404 Seiten, März 2020
- [2] EN 1993-1-9 + AC, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9; Ermüdung, 2009
- [3] A. Hobbacher, Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, International Institute of Welding (IIW), 2014.
- [4] FKM Richtlinie, Rechnerische Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, VDMA Verlag, 2012.

Autoren des Beitrages:

Univ.-Prof. Dr.techn. **Harald Unterweger**, Institut für Stahlbau, TU Graz

Dr.techn. **Alexander Ecker**, Institut für Stahlbau, TU Graz