

Ermüdungsnachweis für Stahlrohre bei Bahnquerungen

Von Henning Brüggemann und Jochen Lamprecht

Die statische Berechnung von Vortriebsrohren ist im DWA-Arbeitsblatt A 161 geregelt, das gleichlautend auch als DVGW-Arbeitsblatt GW 312 veröffentlicht wurde. Die aktuelle Fassung dieser Arbeitsblätter ist vom März 2014 mit Korrekturen vom Mai 2017. Der darin geforderte Ermüdungsnachweis für Stahlrohre im Gleiskörper von Bahntrassen führt zu erheblich größeren Wanddicken als diese sich aus früheren Fassungen der Arbeitsblätter ergaben. Unter gewissen Konstellationen ergeben sich Wanddicken, die ca. um den Faktor 3 über den für die übliche Leitungsverlegung erforderlichen liegen. Dies führt zu Problemen sowohl bei der Rohrerstellung und -verlegung als auch bei der Qualitätskontrolle. Jetzt wurde ein Nachweiskonzept für die Ermüdungsfestigkeit basierend auf dem im Stahlbrückenbau üblichen Verfahren nach DIN EN 1993-1-9 entwickelt, das im Dezember 2019 von der Bahn in Form einer Technischen Mitteilung verbindlich eingeführt wurde.

1. Einleitung

Die Planung und Auslegung von grabenlosen Kreuzungen, bei denen eine Rohrleitung eine bereits vorhandene Bahnanlage quert, erfolgt üblicherweise nach den Gas- und Wasserleitungskreuzungsrichtlinien 2012; Ril 877 [1]. Hierin sind u. a. Standardfälle tabelliert, aus denen, abhängig von mehreren technischen Parametern der geplanten Querung, ein geeignetes Rohr ausgewählt werden kann. Immer, wenn die Anwendung dieser Tabellen nicht möglich ist, beispielsweise weil Rahmenparameter der Baumaßnahme von den Voraussetzungen zur Anwendbarkeit der Tabellen abweichen, ist ein statischer Nachweis zu führen.

Diese dann erforderliche statische Berechnung von Vortriebsrohren ist grundsätzlich im DWA-Arbeitsblatt A 161 [2] geregelt, das gleichlautend auch als DVGW-Arbeitsblatt GW 312 [3] veröffentlicht wurde. Die aktuelle Fassung dieser Arbeitsblätter ist vom März 2014 mit Korrekturen vom Mai 2017. Im Folgenden wird einheitlich die Bezeichnung „GW 312“ verwendet. Parallel sind die „Eisenbahnspezifischen Technischen Baubestimmungen“ (EiTB, [4]) zu berücksichtigen.

Das bestehende Nachweiskonzept für Stahlrohre nach GW 312, unter Berücksichtigung der Forderungen nach EiTB, führt zu erheblich größeren Wanddicken als diese bisher aus der früheren Fassung der GW 312 bekannt waren. Dies ist darin begründet, dass gefordert wird, den Ermüdungsnachweis für 10^8 Lastwechsel zu führen (nähere Hintergründe werden im nachfolgenden Kapitel erläutert). Eine Gashochdruckleitung DP 100 bar mit einer Nennweite von DN 1400 müsste demnach eine Mindestwanddicke von 65 mm (im Vergleich zu ca. 24 mm bei Regelverlegung im offenen Graben) aufweisen. Es ist fraglich, ob die so ermittelten Mindestwanddicken in den Rohrwerken herstellbar sind. Auch führen solche Wanddicken zu konstruktiven und verfahrenstechnischen Problemen, die sich negativ

auf die Qualität der fertiggestellten Rohrleitung auswirken. So resultieren hieraus an den Übergängen zu im offenen Graben verlegten Abschnitten große Wanddickensprünge, die zu schweißtechnischen Problemen führen. Für die Druckprüfung einer Leitung mit derartiger Wanddicke wäre ein Prüfdruck von mindestens 450 bar erforderlich, um die Festigkeit der Leitung sinnvoll überprüfen zu können.

Diese Problematik wurde nach der Einführung der GW 312 im Jahre 2014 vom DVGW erkannt und es wurde nach Möglichkeiten zur Korrektur dieses offensichtlich technisch nicht sinnvollen und statisch nicht erforderlichen Nachweisverfahrens gesucht. In enger Abstimmung mit den Fachfunktionen der DB Netz AG, des DVGW sowie des Eisenbahnbundesamtes wurde von den Veenker-Ingenieuren ein Nachweiskonzept für die Ermüdungsfestigkeit basierend auf dem im Stahlbrückenbau üblichen Verfahren nach DIN EN 1993-1-9 [5] entwickelt, das im Dezember 2019 von der Bahn in Form einer Technischen Mitteilung [6] verbindlich eingeführt wurde. Mit dem dort vorgegebenen Nachweiskonzept können vergleichbare Wanddicken nachgewiesen werden, wie diese nach den bisherigen Ansätzen (GW 312:1990, Kreuzungsrichtlinien [7]) ermittelt werden. Nachfolgend sollen die Hintergründe und mechanischen Grundlagen dieser neuen Regelung erläutert werden.

2. Bisheriger Nachweis nach bestehendem Regelwerk

Die aktuell gültige Fassung der GW 312 regelt den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit unter nicht vorwiegend ruhender Belastung im Abschnitt 9.4.5. Betrachtet wird hier die Ermüdung des Rohres in Umfangsrichtung, also infolge Ovalisierung.

Der Aufbau der Nachweisführung sowie die Ermittlung der zulässigen Spannungsdoppelamplituden geht zurück auf eine Festlegung der Brückenbauvorschrift der Bahn

DS 804 von September 2000. Bei diesem Verfahren werden zulässige Spannungsdoppelamplituden abhängig vom Spannungsverhältnis für 2×10^6 Lastwechsel ermittelt. Mittlerweile werden von der Bahn erhöhte Anforderungen an den Nachweis gestellt. In der Nachweisführung nach GW 312 wird diese Forderung dergestalt umgesetzt, dass die für 2×10^6 angegebenen zulässigen Spannungsdoppelamplituden (Tabelle 22) mit einem Umrechnungsfaktor auf 1×10^8 Lastwechsel skaliert werden (vgl. **Bild 1**). Die zugrunde liegende DS 804 der Bahn wurde im Jahr 2013 komplett überarbeitet. Mittlerweile wird dort der Nachweis der Dauerfestigkeit nach EC 3 gefordert. Die zitierten Tabellen mit zulässigen Spannungsdoppelamplituden wurden ersatzlos gestrichen und es wurde auf die Kerbfälle nach EC 3 verwiesen. Insofern ist der in GW 312 dargestellte Ansatz nicht mehr durch die DS 804 abgedeckt.

Die Umrechnung der zulässigen Spannungsdoppelamplituden auf 10^8 Lastwechsel hätte konsequenterweise zur Folge haben müssen, dass die zur Ermüdung führende Spannungsdoppelamplitude nicht aus dem Maximalwert des Beanspruchungskollektivs ermittelt wird, sondern eine Schadensakkumulation durchgeführt und die resultierende Schädigung unter Berücksichtigung des tatsächlichen Lastspektrums ermittelt würde.

Die in GW 312 gewählte Konstellation führt zu einer sehr konservativen Nachweisführung, aus der grundsätzlich deutlich größere erforderliche Mindestwanddicken resultieren. Diese liegen um den Faktor 2 bis 3 über denen, die nach bisherigen Bemessungsvorschriften und Tabellenwerten [1] erforderlich waren.

3. Aktueller Nachweis nach TM

3.1 Grundlage

Bei Stahlbauwerken im Einflussbereich der Deutschen Bahn findet der EC 3, der in der deutschen Fassung als DIN EN 1993 geführt wird, Anwendung. Der Themenkomplex Ermüdung ist im Teil 1-9 [5] geregelt. Die aktuelle Fassung stammt aus dem Dezember 2010. Insofern ist es naheliegend, dieses Nachweisverfahren auch für die Untersuchung kreuzender Rohrleitungen aus Stahl anzuwenden. Der EC 3 definiert die Nachweisführung und gibt normierte Wöhlerlinien für definierte geometrische Details und bestimmte Lastwechselzahlen an. Grundsätzlich hat die Wöhlerlinie nach EC 3 die in Bild 1 dargestellte Form.

3.2 Nachweisformen

Der Ermüdungsnachweis ist in der Regel auf Basis der Spannungsdoppelamplituden zu führen. Bei der Nachweisführung werden drei Ansätze unterschieden:

- » a. Nachweis der Dauerfestigkeit
- » b. Nachweis mit Schadensäquivalenzfaktoren
- » c. Nachweis mittels Schadensakkumulation

Die Verfahren sind mit stark variierendem Rechenaufwand verbunden. Während die Verfahren b. und c. vorrangig für die Untersuchung spezieller Bauteildetails mit bekannten Schadensäquivalenzfaktoren oder genau bekannten Bean-

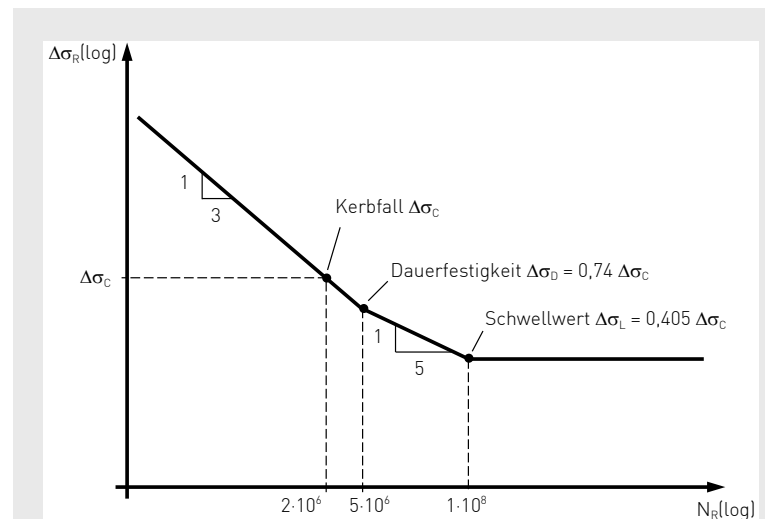


Bild 1: Standardisierte Wöhlerlinie nach Eurocode 3

spruchungsspektren sowie zur Festlegung einer maximalen Bauteillebensdauer empfehlenswert sind, ist der Nachweis der Dauerfestigkeit für die allgemeingültige Anwendung konzipiert und liefert hier für die übliche Praxis hinreichend konservative Ergebnisse. Hierbei wird die größte Spannungsdoppelamplitude des Beanspruchungskollektivs mit der Dauerfestigkeit bei 5×10^6 Spannungsspielen verglichen. Dieser Nachweis ist, basierend auf den Ergebnissen der Spannungsermittlung für das erdverlegte Rohr sowie der Berücksichtigung der Wöhlerlinien nach [5], unmittelbar anwendbar.

Grundsätzlich ist die gleichzeitige Wirkung von Normal- und Schubspannungen zu berücksichtigen, sofern diese vorliegt. Bei dem hier betrachteten Tragwerk „Rohr“ treten keine Schubspannungen in signifikanter Größenordnung auf, daher können diese vernachlässigt werden. Bei geschweißten Bauteilen hat die Mittelspannung bzw. das Spannungsverhältnis R im Allgemeinen keinen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten. Für nicht geschweißte und spannungsarm geglühte Bauteile kann ein positiver Einfluss berücksichtigt werden. Da die hier betrachteten Rohre i.d.R. geschweißt sind, wird dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

3.3 Grenzwerte und Sicherheitsbeiwerte

Die für die Nachweisführung erforderlichen Grenzwerte können aus den normierten Wöhlerlinien nach [5] entnommen werden. Die üblicherweise im Rohrleitungsbau verwendeten längs- oder spiralnahtgeschweißten Rohre weisen durch den axial verlaufenden Blechstoß ein potentiell rissinitierendes Konstruktionsdetail auf, das dem Konstruktionsdetail 13 nach [5], Tabelle 8.1, entspricht. Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass die kerbwirksame Beanspruchung von Spiralnähten infolge Innendrucks immer kleiner als die von Längsnähten ist. Dementsprechend erfolgt die konservative Einordnung in den Kerbfall 71:

Für nahtlose Rohre ist diese Einordnung konservativ. Abhängig von der Blechdicke t ist die zulässige Kerbspannung mit dem Faktor k_s nach folgender Beziehung abzumindern:

$$t \begin{cases} \leq 25 \text{ mm}: & k_s = 1 \\ > 25 \text{ mm}: & k_s = \left(\frac{25}{t}\right)^{0,2} \end{cases} \quad (1)$$

Die Benennung des Kerbfalles ist gleichbedeutend mit der maximal zulässigen Kerbspannung für 2×10^6 Lastwechsel (vgl. Bild 1). Für andere Lastspielzahlen ist die Spannungsschwingbreite mit den Faktoren nach **Tabelle 1** umzurechnen.

Die in der Nachweisführung zu berücksichtigenden Teilsicherheitsbeiwerte ergeben sich aus [5] und [7] und sind in **Tabelle 2** zusammengestellt.

3.4 Nachweis

Die maßgebliche Beanspruchungsgröße für den Nachweis stellt die größte Spannungsdoppelamplitude des Beanspruchungskollektivs dar. Diese entspricht im allgemeinen Fall der Spannungsdoppelamplitude

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2)$$

Da bei der Auslegung von Rohren nach GW 312 die Verkehrslast aus den Fahrzeugüberfahrten den einzig ermüdungsrelevanten Anteil der Beanspruchung des Rohres darstellt, lässt sich dieser Wert unmittelbar aus dem Formelwerk nach GW 312 entnehmen:

$$\Delta\sigma = \text{dyn } \sigma_{pT} \quad (3)$$

Die größte Spannungsdoppelamplitude unter Berücksichtigung der anzusetzenden Teilsicherheit ergibt sich somit zu:

$$\Delta\sigma_{i,max,Ed} = \gamma_{Ff} \cdot \text{dyn } \sigma_{pT} \quad (4)$$

Tabelle 1: Grenzwerte der Schwingfestigkeiten ([5] bzw. **Bild 1**)

| | Ermüdungs- festigkeit | Dauerfestigkeit | Schwellwert der Ermüdungsfestigkeit |
|-----------------|--------------------------|--|---|
| Spannungsspiele | 2×10^6 | 5×10^6 | 1×10^8 |
| Umrechnung | $\Delta\sigma_c$ | $\Delta\sigma_D = 0,74 \Delta\sigma_c$ | $\Delta\sigma_L = 0,405 \Delta\sigma_c$ |

Tabelle 2: Teilsicherheitsbeiwerte für den Ermüdungsnachweis

| Größe | Beiwert | Quelle |
|------------|----------------------|---------------------|
| Belastung | $\gamma_{Ff} = 1,00$ | [7]; NDP Zu 9.3(1)P |
| Widerstand | $\gamma_{Mf} = 1,15$ | [5], Tabelle 3.1P |

mit:

γ_{Ff} Teilsicherheitsbeiwert Last = 1,0 [**Tabelle 2** sowie [6]]

$\Delta\sigma_{i,max,Ed}$ maximale Spannungsdoppelamplitude aus dem Beanspruchungskollektiv der Spannungsdoppelamplituden $\Delta\sigma_{i,Ed}$ infolge Betriebslasten

dyn σ_{pT} Spannungsanteil aus der Verkehrsbelastung

Der Nachweis wird nach der folgenden Form geführt:

$$\frac{\Delta\sigma_{i,max,Ed}}{\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}} \leq 1 \quad (5)$$

mit:

$\Delta\sigma_D$ Spannung gem. Kerbfall 71 für 5×10^6 Spannungsspiele = 52 N/mm² [**Tabelle 1** sowie [6]]

γ_{Mf} Teilsicherheitsbeiwert Material = 1,15 [Tabelle 2 sowie [6]]

4. Weitere Regelungen

Über die vorgestellte Neuregelung des Ermüdungsnachweises hinaus enthält die TM mit dem „Anhang zu Modul 877.2203“ der Ril 877 [1] eine Gegenüberstellung von Werkstoffbezeichnungen nach DIN EN 10208-2 und der Nachfolgenorm DIN EN 3183. Hierdurch wird der Problematik Abhilfe geschaffen, dass strenggenommen die Bemessungstabellen nach Ril 877 [1] nur für Rohre nach DIN EN 10208-2 anwendbar sind. Durch die Festlegungen im Anhang können die Bemessungstabellen jetzt auch ohne weitere Einzelnachweise für Rohre nach DIN EN ISO 3183 angewendet werden.

5. Bedeutung für die Praxis

Seit der Einführung der Neufassungen der GW 312 [3] im Jahre 2014 konnte eine Bemessung von Rohren mit hohen Auslegungsdrücken und großen Durchmessern sinnvoll nur noch unter Anwendung der Tabellenwerke aus der Ril 877 [1] erfolgen. Die Umsetzung von Vorhaben, deren Randbedingungen von den Anwendungsgrenzen der Tabellen nicht abgedeckt wurden, war problematisch. Das oben beschriebene und mit der TM eingeführte Nachweisverfahren stellt ein Werkzeug zur Verfügung, womit Wanddicken nachgewiesen werden können, die mit denen vergleichbar sind, die nach den bisherigen Ansätzen (GW 312:1990, Kreuzungsrichtlinien [U 1]) ermittelt wurden.

Damit steht mit der TM wieder ein praxistaugliches Nachweisverfahren für die Alltagsanwendung in all den Fällen zur Verfügung, bei denen von den tabellierten Standardrohren nach Ril 877 [1] abgewichen werden soll oder muss.

Für die Auslegung von Rohren nach den Tabellen der Ril 877 [1] steht jetzt eine Werkstoffgegenüberstellung zur Verfügung, die es ermöglicht, die Tabellen auch für Werkstoffe nach aktueller Normung anzuwenden.

Literatur

- [1] DB - Richtlinie 877 „Gas- und Wasserleitungskreuzungsrichtlinien (2012)“
- [2] DWA-A 161 „Statische Berechnung von Vortriebsrohren“ (2014-03, korrigierte Fassung 2017-05)
- [3] DVGW GW 312 „Statische Berechnung von Vortriebsrohren“ (2014-03)
- [4] Eisenbahnspezifische Technische Baubestimmungen (EiTB) (2019)
- [5] DIN EN 1993-1-9 „Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009“ (2010-12)
- [6] Technische Mitteilung „TM: 4-2019-10152 I.NPF 2 zu Ril 877: Ermüdung von Stahlrohren im Druckbereich von Eisenbahnverkehrslasten“ DB Netz AG, 23.12.2019 (<https://mediendienste.extranet.deutschebahn.com/TM/PDF/4-2019-10152%20I.NPF%202.pdf>)
- [7] DIN EN 1993-2/NA „Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken“ (2014-10)

SCHLAGWÖRTER: TM, DB, Ril 877, Gas- und Wasserleitungskreuzungsrichtlinien 2012, DVGW GW 312, DWA-A 161, Ermüdungsnachweis, EC 3, DIN EN 1993-1-9

AUTOREN



HENNING BRÜGGEMANN

Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH,
Hannover
Tel. +49 511 284 99 12
henning.brueggemann@veenkermbh.de



JOCHEN LAMPRECHT

Westnetz GmbH, Dortmund
Tel. +49 231 438 6722
jochen.lamprecht@westnetz.de