

Ermüdung im Stahl- und Anlagenbau – vom Wöhlerdiagramm bis zu Schadensfällen

Dr.-Ing. Peter Knödel, SFI/IWE

Beratender Ingenieur

ö.b.u.v. Sachverständiger für „Schweißtechnik – Sonderbauten in Metall“

Professor für Stahlbau an der FH Augsburg

www.peterknoedel.de

Seminar am 09.11.2010

Haus der Technik e.V.

Hollestr. 1, D-45127 Essen

www.hdt-essen.de

0. Inhalt

<u>0.</u>	<u>Inhalt</u>	<u>2</u>
<u>1.</u>	<u>Einleitung</u>	<u>3</u>
<u>2.</u>	<u>Begriffe / Abkürzungen</u>	<u>4</u>
<u>3.</u>	<u>Mikroskopische Beschreibung</u>	<u>5</u>
<u>4.</u>	<u>Makroskopische Beschreibung</u>	<u>6</u>
<u>5.</u>	<u>Einflussgrößen</u>	<u>9</u>
5.1	Werkstofffestigkeit	9
5.2	Oberflächenhärte	9
5.3	Belastungsfrequenz	9
5.4	Kerben	9
5.5	Eigenspannungen	9
5.6	Mehrachsige Beanspruchung	9
5.7	Regellose Beanspruchungen	10
<u>6.</u>	<u>Berechnungskonzepte</u>	<u>11</u>
6.1	Nennspannungen	11
6.2	Kerbspannungen	15
6.3	Strukturspannungen	17
6.4	FEM	17
<u>7.</u>	<u>Rechtliche Verbindlichkeit der Regelwerke</u>	<u>19</u>
7.1	Allgemeines	19
7.2	Anerkannte Regeln der Technik	20
7.3	Stand der Technik	21
7.4	Stand von Wissenschaft und Technik	22
7.5	Stand von Forschung und Wissenschaft	22
7.6	Zusammenfassung	23
<u>8.</u>	<u>Fallbeispiel</u>	<u>26</u>
8.1	Mischerturm	26
8.2	Stahlschornsteine	26
<u>9.</u>	<u>Schadensfälle</u>	<u>27</u>
9.1	Allgemeines	27
9.2	Räumschnecke (anonymisiert)	27
9.3	Werkstattkran (anonymisiert)	28
9.4	Versuchsvorrichtung (anonymisiert)	29
<u>10.</u>	<u>Literatur</u>	<u>30</u>
10.1	Rechtsvorschriften	30
10.2	Technische Normen und Regelwerke	30
10.3	Fachliteratur	32
10.4	Sonstiges	33

1. Einleitung

Immer noch treten häufig an Bauteilen und Anlagen Schäden auf, die auf Materialermüdung zurückzuführen sind.

Erstaunlicherweise hat dies oft weniger damit zu tun, dass bei der Bemessung der Bauteile die Ermüdungsnachweise selbst fehlerhaft geführt worden wären, sondern damit, dass überhaupt nicht erkannt wurde, dass es sich um ermüdungsrelevant beanspruchte Bauteile handelt.

Beispiele sind:

- Mobilfunkantennen
(Kenntnis des Verfassers, anonymisiert)
- Fördereinrichtungen in KFZ-Produktionshallen
(Kenntnis des Verfassers, anonymisiert)
- Lärmschutzwände der DB
(wer sucht, der findet im Internet)

Zum Thema liegen zwei ausführliche Vortragsskripte des Verfassers vor, die aus dem Internet herunterladbar sind.

- Rechnerische Ermüdungsnachweise für geschweißte Bauteile.
(Fortbildung für Schweißaufsichtspersonen 2006)
- Ermüdungsnachweise mit der Finite Elemente Methode nach der FKM-Richtlinie.
(Vortragsveranstaltung DVS-BV Karlsruhe-Bruchsal-Bretten 2007)

Im vorliegenden Skript werden dazu Ergänzungen angegeben.

2. Begriffe / Abkürzungen

(Allgemein) anerkannte Regeln der Technik, Stand der Technik, Stand von Wissenschaft und Technik: diesen Rechtsbegriffen ist weiter unten jeweils ein ganzes Kapitel gewidmet.

Ermüdung Verlust eines Bauteiles an Tragfähigkeit infolge eines Ermüdungsrisses.
Der Ermüdungsriss entsteht durch häufiges Auftreten von Beanspruchungen, die (zum Teil weit) unter der ertragbaren Beanspruchung bei einmalig zügiger Beanspruchung liegen.

S-N line, S-N curve (auch ohne Bindestrich): sigma-number-line
im Englischen verwendeter Begriff für die Wöhlerlinie

endurance limit
im Englischen verwendeter Begriff für Dauerfestigkeit

Weitere Begriffe wie z.B. „schwingende Belastung“, „dynamische Belastung“ usw. sind im Skript Knödel 2006 erläutert.

Schreibweise

Indizes werden vereinfachend durch Komma abgetrennt, z.B.
 $\Delta K_{,0} = \Delta K_0$ lies: delta K Null

3. Mikroskopische Beschreibung

Auf der Ebene der Gitterstruktur der metallischen Werkstoffe lässt sich Ermüdung beschreiben als irreversibles Wandern von verschiedenen Versetzungen zu einem „Sammelpunkt“, an dem diese verschiedenen auflaufenden Versetzungen schließlich einen ersten, mikroskopisch erkennbaren Anriss manifestieren.

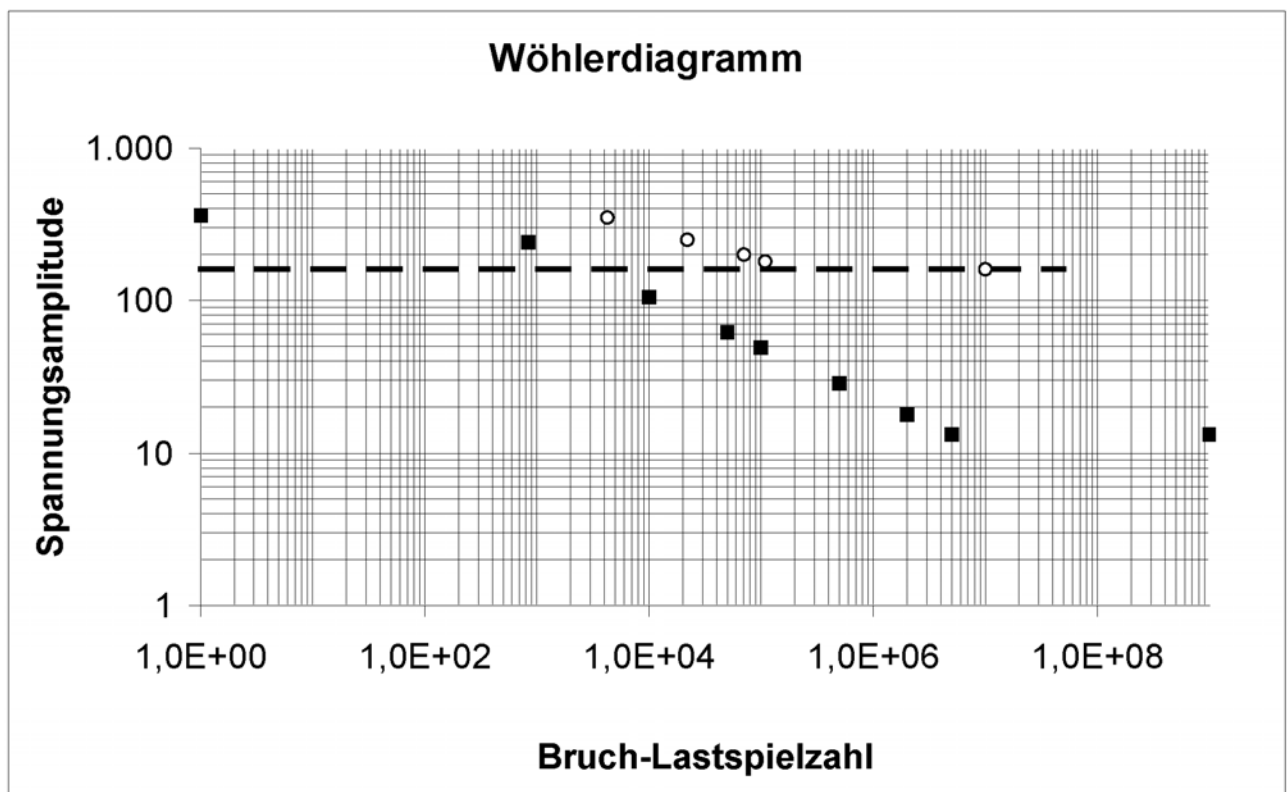
Diese Phase bezeichnet man als Rissbildungsphase, der dann die Rissfortschrittsphase folgt. Hat der Riss eine kritische Größe erreicht, tritt beim nächsten Lastzyklus ein Sprödbruch auf. Die Beschreibung der Rissfortschrittsgeschwindigkeit und die Ermittlung der kritischen Rissgröße ist Gegenstand der Bruchmechanik, der interessierte Leser wird hierzu auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen. Eine Einführung wird z.B. in Knödel (2004) gegeben.

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf eine phänomenologische, makroskopische Beschreibung der Ermüdung, in der z.B. nur die Bruchlastspielzahlen berücksichtigt werden. Dies setzt stillschweigend voraus, dass der mögliche Verlust der Gebrauchsfähigkeit eines Bauteiles ausreichend kurz vor dem späteren Bruch stattfindet.

4. Makroskopische Beschreibung

Ermüdung wird typischerweise mit Hilfe von Wöhlerdiagrammen beschrieben, branchen- und problemspezifisch werden auch andere Darstellungen verwendet.

Wir setzen zunächst voraus, dass die Nennspannung des Bauteiles im kritischen Querschnitt zwischen einem jeweils festen Wert der Ober- und Unterspannung variiert, der zeitliche Spannungsverlauf kann dann durch eine Mittelspannung und eine Spannungsamplitude beschrieben werden. Ungünstig nehmen wir jetzt noch an, dass die Mittelspannung bei Null liegt, d.h. Ober- und Unterspannung haben den gleichen Betrag und unterscheiden sich nur durch das Vorzeichen.



Synthetisches Wöhlerdiagramm

Synthetisches Wöhlerdiagramm bedeutet, dass die dort eingetragenen Punkte nicht aus Ermüdungsversuchen stammen, sondern bei einem Werkstoff S235 zu beobachten wären, wenn dieser sich normenkonform verhielte.

Der Punkt bei einer Bruch-Lastspielzahl $N = 10^0 = 1$ repräsentiert die einmalige zügige Belastung bis zum Bruch, so wie sie im einachsigen Zugversuch auftritt. Die Amplitude ist gleich der erreichten Zugfestigkeit 360 N/mm^2 .

Die hohlen Symbole beschreiben eine ungekerbte Probe, dieser Fall hat für die Bemessungspraxis im Stahlbau wenig Bedeutung und ist hier nur zu Vergleichszwecken angegeben (Wikipedia 2006).

Die vollen Symbole beschreiben ein stark gekerbtes Bauteil (z.B. mit einem Kreuzstoß), welches in die Kerbklasse 36 einzustufen ist. Kerbklasse oder FAT 36 bedeutet eine Spannungsschwingbreite von 36 N/mm^2 , nach unserer Annahme zur Mittelspannung gleichbedeutend mit einer Spannungsamplitude von 18 N/mm^2 bei einer Referenz-Lastspielzahl von 2 Mio.

Nach heutigem Erkenntnisstand liegt der Knick zur Dauerfestigkeit nicht bei 2 Mio., sondern bei 5 Mio. Lastspielen. Mit einer für Schweißnähte üblichen Steigung der Wöhlerlinie von $m = 3$ ermittelt man eine Spannungsamplitude von ca. $0,73 * 18 \text{ N/mm}^2 = 13 \text{ N/mm}^2$ bei 5 Mio. Lastspielen.

Kleinere Amplituden liegen unterhalb der Dauerfestigkeit für Konstantspannungsamplituden und erzeugen keine Brüche, bei ferritischen Werkstoffen lebt das Bauteil unendlich lange.

Hinweis:

Der Dauerfestigkeit als Grenzwert wirksamer Ermüdungsbeanspruchung entspricht in der Bruchmechanik der Schwellenwert $\Delta K_{I,0}$, unterhalb dem auch bei einem bereits vorhandenen Anriss kein Rissfortschritt mehr stattfindet.

Bei geschweißten Bauteilen hängt die Höhe der Dauerfestigkeit nicht von der Werkstofffestigkeit ab, d.h. hier bringt der Einsatz höherfester Werkstoffe keine Vorteile.

Die Neigung der Wöhlerlinie ist für geschweißte (und entsprechend eigenspannungsbehaftete Bauteile) mit „3“ festgelegt. Schwächere Kerben als die oben erwähnte „36“ haben eine höhere Tragfähigkeit und werden daher durch über der oben dargestellten Wöhlerlinie liegende Parallelen beschrieben.

Die oben eingezeichnete horizontale gestrichelte Linie kennzeichnet das Spannungsniveau, für das ein Bauteil nach statischen Kriterien bemessen wird. Mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 1,5 – diesmal bezogen auf die Streckgrenze, und nicht auf die Zugfestigkeit – ergibt sich eine „zulässige Spannung“ von $240 \text{ N/mm}^2 / 1,5 = 160 \text{ N/mm}^2$.

Man erkennt, dass ein ungekerbtes Bauteil nicht unbedingt zu Bruch gehen muss, wenn es nur sta-

tisch bemessen wurde, tatsächlich aber ermüdend beansprucht ist. Die Wöhlerlinie für FAT 36 schneidet jedoch die gestrichelte Linie bei ca. 3000 Lastwechseln, d.h. ab dieser Zahl an Volllast-spielen muss schon mit Rissen gerechnet werden. Bei FAT 71 ist dies z.B. erst ab 20000 Lastwechseln der Fall.

Der Verfasser geht davon aus, dass die (offenbar sehr unscharfe) Regel: „unter 10000 Lastwechseln braucht Ermüdung nicht berücksichtigt zu werden“ auf diesen Zahlen beruht.

5. Einflussgrößen

5.1 Werkstofffestigkeit

siehe Skript Knödel 2006

Bei geschweißten Stahlbauteilen und hohen Lastspielzahlen spielt die Werkstofffestigkeit keine Rolle – alles fällt auf die Festigkeitseigenschaften von S235 zurück.

5.2 Oberflächenhärte

siehe Skript Knödel 2006

spielt bei geschweißten Bauteilen keine Rolle

5.3 Belastungsfrequenz

siehe Skript Knödel 2006

Die Frequenz spielt in der Regel keine Rolle, es zählt nur die Anzahl der Zyklen.

5.4 Kerben

siehe Skript Knödel 2006

Literaturhinweis zur Neuberschen Kerbspannungslehre: Neuber 2001.

5.5 Eigenspannungen

siehe Skript Knödel 2006

Hoch eigenspannungsbehaftete Bauteile sind mittelspannungsunabhängig, die Vorzeichen der Ober-, Mittel- und Unterspannung spielen keine Rolle, es zählt nur die Spannungsdifferenz.

5.6 Mehrachsige Beanspruchung

siehe Skript Knödel 2006

5.7 Regellose Beanspruchungen

siehe Skript Knödel 2006

Man bildet Beanspruchungskollektive, in dem man die Beanspruchungen nach der Größe sortiert. Diese werden dann entweder mit einem standardisierten Kollektiv verglichen (DIN 15018) oder individuell ausgewertet (Lineare Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren/Miner im EC3).

8. Fallbeispiel

8.1 Mischerturm

In eine bestehendes Anlagengerüst werden neue betriebliche Einrichtungen eingebaut, darunter auch zwei neue Mischertrommeln in ca. 15 bis 20 m Höhe.

Der ganze Umbau wird von einem Ingenieurbüro geplant und nach statischen Gesichtspunkten durchkonstruiert.

Es bleibt die Frage, ob durch die neuen Mischer die Gefahr der Materialermüdung in den Bauteilen des Mischerturmes entsteht.

Das Methodische Konzept für die Problemlösung wird mit den Teilnehmern entwickelt.

8.2 Stahlschornsteine

nach Wahl der Teilnehmer

10. Literatur

10.1 Rechtsvorschriften

- [1] „Maschinenrichtlinie“: Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung). Amtsblatt der Europäischen Union, 09.06.2006.
Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on machinery, and amending Directive 95/16/EC (recast). Official Journal of the European Union, 09.06.2006.
- [2] „Bauproduktenrichtlinie“: Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte (89/106/EWG) zuletzt geändert durch die Verordnung (EG) Nr. 1882/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. November 2003.
- [3] Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen – Landesbauordnung – (BauO NRW) in der Fassung der Bekanntmachung vom 1. März 2000. Letzte Änderung vom 13.03.2007.
- [4] Liste der Technischen Baubestimmungen. Anlage zum RdErl. d. MBV vom 03.05.2010. Ministerialblatt für das Land Nordrhein-Westfalen – Nr. 18 vom 28. Mai 2010, S. 417-450.
- [5] BVerfG 08.08.1978 - 2 BvL 8/77: Grenzen des Parlamentsvorbehalts; ausreichende Rechtsgrundlage für die Genehmigung von Kernkraftwerken des Typs „Schneller Brüter“. NJW 1979, Heft 8, S. 359-362, siehe www.beck-online.beck.de, 23.08.09. („Kalkar-Urteil“) Der Wortlaut ist unter <http://lexetius.com/1978,2> zugänglich.

10.2 Technische Normen und Regelwerke

- [6] DIN EN 1011: Schweißen. Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe. Welding – Recommendations for welding of metallic materials.
Teil 1: Allgemeine Anleitungen für das Lichtbogenschweißen; Deutsche Fassung EN 1011-1:2009. Ausgabe Juli 2009. General guidance for arc welding.
- [7] DIN EN 1993/NA (EC3): Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten.
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Entwurf Oktober 2007.
Teil 1-4: Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen. Entwurf April 2010.
Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen. Entwurf August 2007.
Teil 1-9: Ermüdung. Entwurf August 2007.
Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung. Entwurf August 2007.
Teil 2: Stahlbrücken. Entwurf September 2009.
Teil 3-2: Türme, Maste und Schornsteine – Schornsteine. Entwurf Dezember 2009.
Teil 4-2: Tankbauwerke. Entwurf Oktober 2009.

- Teil 4-3: Rohrleitungen. Entwurf Januar 2009.
Teil 6: Kranbahnen. Entwurf März 2009.
- [8] DIN EN 1993 Eurocode 3 (EC3): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Design of steel structures.
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005. Juli 2005. General rules and rules for buildings.
Berichtigung 1 zu Teil 1-1. Berichtigungen zu DIN EN 1993-1-1:2005-07; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005/AC:2006. Mai 2006.
Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Oktober 2006. Deutsche Fassung EN 1993-1-2:2005 + AC:2005. General rules – Structural fire design.
DIN EN 1993-1-2 Berichtigung 1:2009-05 Berichtigung zu DIN EN 1993-1-2:2006-10. Deutsche Fassung EN 1993-1-2:2005/AC:2009.
Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche; Deutsche Fassung EN 1993-1-3:2006. Februar 2007.
Part 1-3: Supplementary rules for cold-formed members and sheeting; German version EN 1993-1-3:2006. February 2007.
Berichtigung 1 vom November 2009. Corrigendum 1 from November 2009.
Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln – Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen; Deutsche Fassung EN 1993-1-4:2006. Februar 2007.
Part 1-4: General rules – Supplementary rules for stainless steels; German version EN 1993-1-4: 2006. February 2007.
Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen; Deutsche Fassung EN 1993-1-6:2007. Juli 2007.
Part 1-6: Strength and stability of shell structures; German version EN 1993-1-6:2007. July 2007.
Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005. Juli 2005.
Part 1-8: Design of joints; German version EN 1993-1-8:2005. July 2005.
Berichtigung 1 zu Teil 1-8: Berichtigungen zu DIN EN 1993-1-8:2005-07; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005/AC:2005. März 2006.
Teil 1-9: Ermüdung. Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005. Juli 2005.
Berichtigung 1 zu Teil 1-9: Berichtigung zu DIN EN 1993-1-9:2005-07; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005/AC:2009. Dezember 2009. Fatigue.
Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung; Deutsche Fassung EN 1993-1-10:2005. Juli 2005.
Berichtigung 1 zu Teil 1-10: Berichtigungen zu DIN EN 1993-1-10:2005-07; Deutsche Fassung EN 1993-1-10:2005/AC:2005. März 2006.
- [9] DIN EN 1999 Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken. Design of aluminium structures.
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln. Deutsche Fassung EN 1999-1-1:2007. Mai 2010. General structural rules.
Teil 1-3: Ermüdungsbeanspruchte Tragwerke. Dezember 2010. Structures susceptible to fatigue.
- [10] DIN 15018 Krane. Grundsätze für Stahltragwerke.
Teil 1: Berechnung. November 1984.
Teil 2: Grundsätze für die bauliche Durchbildung und Ausführung. November 1984.
Teil 3: Berechnung von Fahrzeugkranen. November 1984.

- [11] Hänel, B. †, Haibach, E., Seeger, T., Wirthgen, G., Zenner, H.: FKM-Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen. 5. Auflage, VDMA Verlag, Forschungskuratorium Maschinenbau, Frankfurt, 2003.

10.3 Fachliteratur

- [12] Bär, A.: Zur Berechnung von Aussteifungsringen dünnwandiger Stahlbehälter mit schiefem, hängendem Kreiskegelboden. Bautechnik (1983), Heft 9, S. 321-327.
hier steht die von Schwaigerer falsch abgeschriebene mittragende Breite von $1,85 * \sqrt{(R*T)}$
- [13] Bauer, C.O.: Rechtsbegriffe technischer Sachverhalte, Werkstatt und Betrieb 120 (1987), H, 11, S. 904/907. (zitiert nach Bauer 2005)
- [14] Bauer, C.O.: Notwendiges Wissen vom Recht für Prüfeningenieure.
Quelle: www.doku.net/artikel/notwendige.htm#Regeln%20der%20Technik, 11.02.05, 24.08.09, 31.10.2010.
- [15] Bayerlein, W.: Zur rechtlichen Bedeutung von technischen Normen. Der Sachverständige 3/2008, S. 49-53.
- [16] Beitz, W., Grothe, K.-H. (Hrsg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 20. neubearbeitete und erweiterte Auflage. Springer, Berlin 2001. (Neueste Ausgabe: 22. Auflage 2007)
- [17] Knödel, P.: Projekt P_Baurecht_NRW, Stand 25.09.2005. Lehrmaterialien zur Vorlesung Behälterbau an der Fachhochschule Karlsruhe, erreichbar unter www.peterknoedel.de/lehre/lehre.htm, von März 2003 bis März 2007 laufend aktualisiert.
- [18] Knödel, P.: Bruchmechanik. Skriptum zur Vorlesung im Rahmen der Schweißfachingenieurausbildung an der SLV-Mannheim. Von 2004 bis 2007 laufend aktualisiert. Enthalten in den Seminarunterlagen der SLV Mannheim und herunterladbar von www.peterknoedel.de.
- [19] Knödel, P.: Rechnerische Ermüdungsnachweise für geschweißte Bauteile. Vortrag in der SLV Mannheim am 26.01.2006. Skript enthalten in den Seminarunterlagen der SLV Mannheim und herunterladbar von www.peterknoedel.de.
- [20] Knödel, P.: Schweißgerechtes Konstruieren an ausgewählten Beispielen. Vortrag an der SL-Eslohe am 26.10.2006, Skript herunterladbar unter www.peterknoedel.de.
- [21] Knödel, P.: Schweißanschlüsse bei „Außergewöhnlichen Einwirkungen“. Vortrag in der SLV Mannheim am 01.02.2007. Skript enthalten in den Seminarunterlagen der SLV Mannheim und herunterladbar von www.peterknoedel.de.
- [22] Knödel, P.: Ermüdungsnachweise mit der Finite Elemente Methode nach der FKM-Richtlinie – Beispiele aus der Bemessungspraxis –. Vortrag in der SL Karlsruhe am 08.03.2007. Skript herunterladbar von www.peterknoedel.de.
- [23] Knödel, P.: Lehrmaterialien zur Vorlesung Stahlbau an der Fachhochschule Augsburg, erreichbar unter www.peterknoedel.de/lehre/lehre.htm, seit März 2007 laufend aktualisiert.
- [24] Neuber, H.: Kerbspannungslehre. Theorie der Spannungskonzentration. Genaue Berechnung der Festigkeit. Springer, Berlin, 4. Auflage 2001.

- [25] Niklisch, F.: Die Bedeutung technischer Regelwerke zur Konkretisierung juristischer Generalklauseln, RWTÜV Schriftenreihe 33, S. 9-13, Techn. Überwachungsverein Essen 1984. (zitiert nach Bauer 2005)
- [26] Schwaigerer, S.: Festigkeitsberechnung von Bauelementen des Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbaus. Springer, Berlin 1961.
- [27] Schwaigerer, S.: Festigkeitsberechnung im Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau. 3. Auflage, Springer, Berlin 1978.
- [28] Sonsino, C.M., Dilger, K., Kaßner, M. (Hrsg.): Festigkeit geschweißter Bauteile. Anwendbarkeit lokaler Nachweiskonzepte bei Schwingbeanspruchung. DVS-Forschungskolloquium in Braunschweig am 17. und 18. März 2009. DVS-Berichte Band 256, DVS-Media GmbH, Düsseldorf, 2009.
- [29] Ummenhofer, T., Knödel, P.: Ermüdungsverhalten von nichtrostenden Stählen. (in Vorbereitung)
- [30] Verein deutscher Eisenhüttenleute (ed.): Steel. A Handbook for Materials Research and Engineering. Volume 1: Fundamentals. Springer, Berlin 1992. Volume 2: Applications. Springer, Berlin 1993.
- [31] Verein deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.): Werkstoffkunde Stahl. Band 1: Grundlagen. Springer, Berlin 1984. (vergriffen Stand 08/05) Band 2: Anwendung. Springer, Berlin 1985. (vergriffen Stand 08/05) (ebenso: Verlag Stahleisen m.b.H. Düsseldorf) Verantwortlich für Entwurf und Durchführung: W. Jäniche, W. Dahl, H.-F. Klärner, W. Pitsch, D. Schauwinhold, W. Schlüter, H. Schmitz.

10.4 Sonstiges

- [32] Wikipedia: Wöhlerversuch (2006). Hinweis: der Artikel erscheint mir SEHR diskussionsbedürftig, es wurden nur die Zahlenwerte der Beispieltabelle verwendet.