



Dipl.-Ing. Karl HARTL

Staatlich befugter und beeideter Zivilingenieur für Bauwesen

Statische Berechnung + Konstruktive Planung

A-4030 Linz, Dallingerstraße 25

Tel 0732/ 372 372

Mobil 0699/17372372

www.hartl-statik.at

email: hartl.statik@aon.at

ERMÜDUNG im STAHLBAU nach EN1993-1-9

Linz, 6. 7. 2019

An alle Kollegen und Interessierten,
welche schon einmal versucht haben die Rätselaufgaben der EN1993-1-9 zu lösen.

Allgemein:

Unter häufig wechselnden Beanspruchungen versagen Stahlkonstruktionen früher als bei konstanten Beanspruchungen. Dies wurde von Wöhler erkannt und erforscht, weshalb dieser Nachweis bis zum Erscheinen dieser Norm als Wöhlerfestigkeitsnachweis bezeichnet wurde. Nach dem Erscheinen dieser Norm gibt es jetzt auch hierfür die Bezeichnungen

- a) Ermüdungsnachweis
- b) Betriebsfestigkeitsnachweis oder
- c) Schädigungsnachweis

Ich verwende in meinen Berechnungen die Bezeichnung Betriebsfestigkeitsnachweis, da dieser Begriff besser klingt wie die negativ besetzten Bezeichnungen Ermüdung oder Schädigung.

Literatur hierzu:

ÖNorm EN1993-1-9 Ausgabe 2013-04-01

Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Ermüdung

ÖNorm B 1993-1-9 Ausgabe 2017-03-15

Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Ermüdung

Buch: Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3, Band 2, 4. Auflage, Wagenknecht, Beuth Verlag
Hier ist dieser Nachweis im Kapitel 10, ab Seite 283, in normalen Deutsch erklärt.

Rechenbeispiele:

RWTH, Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, Prof.Dr.-Ing.M.Feldmann, Aachen.
Bachelorprüfung nach BPO 2009/2012 6.3.2015.

Dies sind gute Rechenbeispiele mit den zugehörigen Lösungen zu diesem Thema.

Herangehensweise bzw. Leseweise dieser Norm

Bei allen bisherigen Normen werden im Wesentlichen Spannungen berechnet und geprüft ob diese kleiner sind, als die laut Norm zulässigen Widerstandsspannungen.

Mit dieser üblichen Leseweise scheidert man hier.

Grundsätzliche Abfolge eines Nachweises:

1. Feststellen der Einwirkung

1.1 deltaSigma, deltaTau:

Bei diesem Nachweis interessiert nicht, wie üblich, die maximale oder minimale Spannung. Hier interessiert nur der Differenzbetrag zwischen der maximalen und der minimalen Spannung, hervorgerufen durch eine veränderliche Einwirkung. Einwirkung ohne Teilsicherheitsbeiwerte auf Gebrauchslastniveau. Diese Differenz wird in der Norm mit **deltaSigma** bezeichnet.

In den nachfolgenden Erklärungen ist daher nie von einzelnen Spannungen sondern immer nur von delta-Spannungen, delta-Einwirkungen, etc. die Rede.

Wie hoch die mittlere Spannung $=(\max \sigma + \min \sigma) / 2$ ist, bleibt außer acht. Die mittlere Spannung wird z.B. durch "ruhende" Einwirkungen wie Eigengewicht, Schnee etc. hervorgerufen. Diese bleibt aber hier außer Acht. Es kommt rein auf jene Einwirkung(en) an, welche das deltaSigma bzw. deltaTau hervorrufen.

Ein deltaSigma kann zum

Beispiel 1: Durch eine bestimmte Anzahl von Kranüberfahrten pro Tag erfolgen.

Beispiel 2: Durch periodische Lasten vom Rührwerk einer Maschine,

z.B. Last 1, 1x pro Sekunde und Last 2, welche erheblich größer ist als die Last 1, durch das Umkehren der Laufrichtung, alle 60 Sekunden.

Beispiel 3: Durch den z.B. quasi ständigen Anteil der Windlast laut Norm.

Beispiel 4: Das delta sigma einer Einwirkung soll unendlich lange vom Bauteil abgetragen werden.

1.2 Lastspiele Ni:

Beim Betriebsfestigkeitsnachweis wird nicht die Zeit als Wertemaß verwendet sondern die Anzahl der Lastspiele N_i einer Einwirkung i .

Entweder

a) als Maß wie oft diese Einwirkung im Laufe der Nutzungsdauer auf den Bauteil einwirkt oder

b) wie oft der Bauteil diese Einwirkung zuverlässig abtragen soll oder

c) ob der Bauteil diese Einwirkung unendlich oft zuverlässig abtragen soll.

Anmerkung:

Sehr wohl kann man von der Lastspielzahl auch die reale Zeit berechnen.

Wenn man einer Einwirkung i die Frequenz kennt, das heißt wie oft per Sekunde diese Einwirkung i einwirkt, dann kann man auf die reale Zeit rückrechnen.

2. Widerstände:

2.1 Materialgüten

Die Norm gilt für die Grundmaterialien S235 und S355 und für die Schraubengüten 5.6, 8.8 und 10.9.

2.2 Kerbfall N/mm²

Die Norm gibt für bestimmte Konstruktionspunkte bzw. Konstruktionsdetails Werte an. Diese Fälle sind in den Tabellen 8.1 bis B.1 dargestellt.

Die Tabellen sind unterteilt, bezeichnet mit Kerbfälle.

Die Zahl des Kerbfalles ist aber nicht die Nummer des Kerbfalles sondern die **max delta Dauerspannung laut Norm bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln.**

Diese delta Spannung ist für S235 und S355 gleich !

Ebenso für 5.6 oder 8.8 oder 10.9 !

Anmerkung:

Für alle anderen zu erbringenden Nachweise auch außerhalb dieser Norm, ist die Güte jedoch sehr wohl maßgebend, aber eben nicht für die hier angesprochenen delta Spannungen.

2.3 Wöhlerlinie, maßgebende deltaFestigkeiten

Die Wöhlerlinie = die Materialfestigkeitskurve in Funktion der Lastwechsel.

Diese unterteilt sich in 3 Bereiche.

1.Bereich: Kurzzeitfestigkeit bis $1 \cdot 10^4$ Lastwechsel. Hier ist keine Ermüdung gegeben. Man bemisst nach den normalen Stahlbaunormen.

2.Bereich: Zeitfestigkeit von $1 \cdot 10^4$ bis $1 \cdot 10^8$ Lastwechsel, hier ist die Festigkeit von der Anzahl der Lastwechsel abhängig. Je mehr Lastwechsel umso geringer die Festigkeit.

3.)Bereich: Dauerfestigkeit über $1 \cdot 10^8$ Lastwechsel. Gleich wie hoch die Anzahl der Lastwechsel ist, die Festigkeit wird nicht mehr geringer.

Aufgetragen wird die Materialfestigkeit, delta-sigma oder delta-tau auf der y-Achse und die Anzahl der Lastwechsel N_i , in Form von $\log(N_i)$ auf der x-Achse.

Es entsteht dadurch eine Funktionlinie bestehend aus 2 oder 3 Geraden.

Der Bezugswert des Kerbfalles ist der Kerbfall = die **Dauerfestigkeit = deltaSigmaC (bzw. deltaTauC)** Dies ist aus der geschichtlichen Entwicklung jener Wert, welcher bei $2 \cdot 10^6$ Lastfällen durch Versuche ermittelt wurde.

Durch diesen Punkt wird eine Gerade mit der fallenden Neigung $1:m_1 = 1:3$ gelegt, welche bis $5 \cdot 10^6$ gilt.

Bei den Schubspannungen ist die Neigung in diesem Bereich $1:m_1 = 1:5$.

Diese Gerade gilt von $1 \cdot 10^4$ bis $5 \cdot 10^6$.

Ab den Endpunkt dieser Geraden bei $5 \cdot 10^6$, wird die 2.Gerade gelegt mit der Neigung $1:m_2 = 1:5$. Die deltaFestigkeit bei diesem Punkt ist die

Langzeitfestigkeit deltaSigmaL (bzw. deltaTauL).

Diese Gerade gilt bis $N_i = 1 \cdot 10^8$.

Dann schließt die 3.Gerade an, eine horizontale, also eine konstante Festigkeit.

In der Praxis:

Die DauerSpannung $\Delta\sigma_D$ errechnet sich aus der Spannung des Kerbfalles

$$\Delta\sigma_D = (2 \cdot 10^6 / 5 \cdot 10^6)^{1/m_1} \cdot \Delta\sigma_C$$

mit m_1 im Allgemeinen = 3.00

oder bei Schubspannungen mit $m_1 = 3.00$

oder laut Angabe Norm.

m_1 kann auch durch Versuche berechnet und ermittelt werden. Siehe Literatur.

Die LangzeitSpannung $\Delta\sigma_L$ errechnet sich zu

$$\Delta\sigma_L = (5 \cdot 10^6 / 1 \cdot 10^8)^{1/m_2} \cdot \Delta\sigma_D$$

m_2 im Allgemeinen = 5.00

Zwischen diesen beiden $\Delta\sigma$ Spannungen gibt es noch die Zeitfestigkeit

$$\Delta\sigma_T = (5 \cdot 10^6 / \text{Anzahl der Lastspiele } N_i)^{1/m_2} \cdot \Delta\sigma_D$$

2.4 Bemessung - Schadenseinwirkung - Betriebsfestigkeitsnachweis

Bemisst man nun sicherheitshalber gegen die $\Delta\sigma$ Langzeitfestigkeit, so ist man auf der sicheren Seite, allerdings ist dies unter Umständen eine erheblich unwirtschaftliche Bemessung. Besser ist, man ermittelt die Schadenseinwirkungen D_d der einzelnen $\Delta\sigma$ Spannungseinwirkungen.

Man ermittelt hierbei die maximal zugehörige zulässige Lastspielzahl zu einer einwirkenden $\Delta\sigma$ Spannung.

Auf Grund der Größe der einwirkenden $\Delta\sigma$ Spannung, stellt man fest in welchem der 3 Bereiche der Wöhlerkurve man ist.

$\Delta\sigma < \Delta\sigma_D$: Lastspielzahlbasis = $2 \cdot 10^6$, Hochzahl $m_1 = 3.00$ (bei $\tau = 5.00$)

$\Delta\sigma > \Delta\sigma_D$: Lastspielzahlbasis = $5 \cdot 10^6$, Hochzahl $m_1 = 5.00$

$\Delta\sigma > \Delta\sigma_L$: der Schädigungsanteil $D_d = 0.0$

Verwendete Werte:

einwirkende $\Delta\sigma$ Spannung = $\Delta\sigma_{a,i}$

γ_{Mf} Teilsicherheitsbeiwert für die $\Delta\sigma$ Einwirkung laut dieser Norm

γ_{Mf} Teilsicherheitsbeiwert für das Material laut dieser Norm

Die zugehörige max zur Lastspielzahl $N_{R,i}$ errechnet sich zu =

$$= (\Delta\sigma_C / (\gamma_{Mf} \cdot \gamma_{Mf} \cdot \Delta\sigma_{a,i}))^{m_1} \cdot \text{Lastspielzahlbasis}$$

Der Schädigungsanteil dieser einzelnen schwingenden $\Delta\sigma$ Einwirkung $D_{d,i}$ ist:

$$D_{d,i} = \text{Einwirkende Anzahl d Lastspiele } N_{E,i} / \text{max zur Lastspiele } N_{R,i}$$

Die Schädigungssumme gesamt = die Summe aller $D_{d,i}$, diese muß nun ≤ 1.00 sein.

Dieser Nachweis ist

1.) für die Längsspannungen zu bringen

2.) für die Schubspannungen und

3.) der Kombination aus beiden $D_{d,kombi} = (D_{d,längs})^3 + (D_{d,\tau})^5 < 1.00$

weitere ist noch nachzuweisen, dass

4.) $\Delta\sigma < 1.5 \cdot f_y$

und

5.) $\Delta\tau < 1.5 \cdot f_y / \sqrt{3}$ ist.

Dipl.-Ing. Karl Hartl