

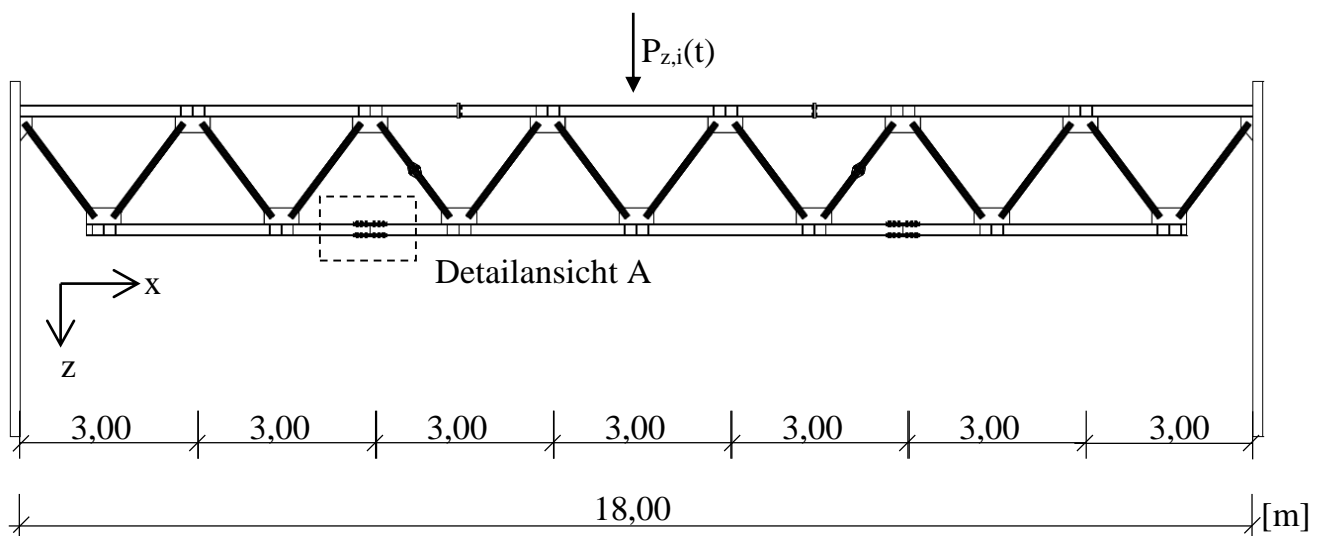
Übungsaufgabe „Ermüdung“

Matrikelnummer :

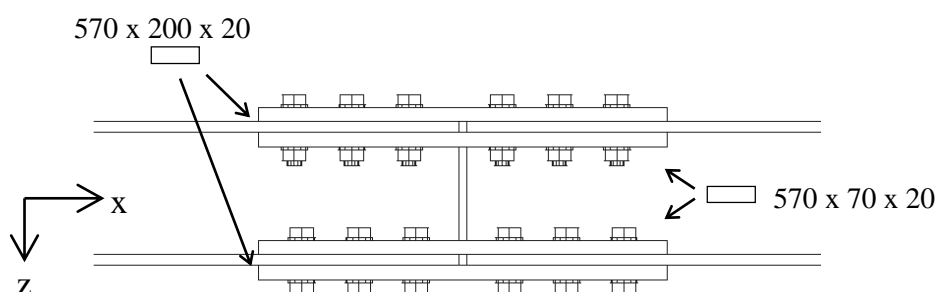
Name :

gegeben:

- gegeben ist ein ebener, ermüdungsbeanspruchter Fachwerkträger unter zyklischer Belastung in Feldmitte:



- Profile: HEB 200 (Ober- und Untergurt)
- Material: S 355
- Detailansicht A: Schraubenstoß (siehe auch **Anlage 1**)



- Passschrauben: M 16 - 8.8; $d_0 = 18 \text{ mm}$
- Teilsicherheitsbeiwerte: $\gamma_{Mf} = 1,0$; $\gamma_{Ff} = 1,0$

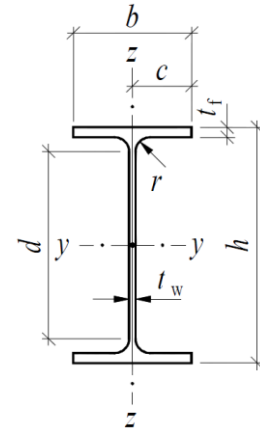
Übungsaufgabe „Ermüdung“

Matrikelnummer :

Name :

- Angaben zum Träger HEB 200:

Profilmaße			Statische Werte					
h	200	mm	I_y	5700	cm ⁴	A	78,1	cm ²
b	200	mm	I_z	2000	cm ⁴	I_{tor}	59,3	cm ⁴
t_w	9	mm	$W_{el,y}$	570	cm ³	$I_w / 10^3$	171,1	cm ⁶
t_f	15	mm	$W_{pl,y}$	642,5	cm ³			



- Belastungsgeschichte: siehe **Anlage 2**
300 Lastzyklen pro Tag
300 Tage pro Jahr
20 Jahre
- Anlagen:
Anlage 1: Detail Schraubenstoß
Anlage 2: Schnittgrößen-Zeitverlauf am Schraubenstoß
Anlage 3: Auszug DIN EN 1993-1-9 Kerbfalltabellen

gesucht:

- a) Identifizieren Sie alle Kerbdetails im Schraubenstoß unter Zuhilfenahme von **Anlage 3** und kennzeichnen Sie diese mit Angabe der Kerbfallklasse $\Delta\sigma_C$ in **Anlage 1**.
- b) Führen Sie die notwendigen Ermüdungsnachweise nach DIN EN 1993-1-9 für den Schraubenstoß anhand des Schnittgrößen-Zeitverlaufs in **Anlage 2** (berücksichtigen Sie die Hinweise).

Hinweise:

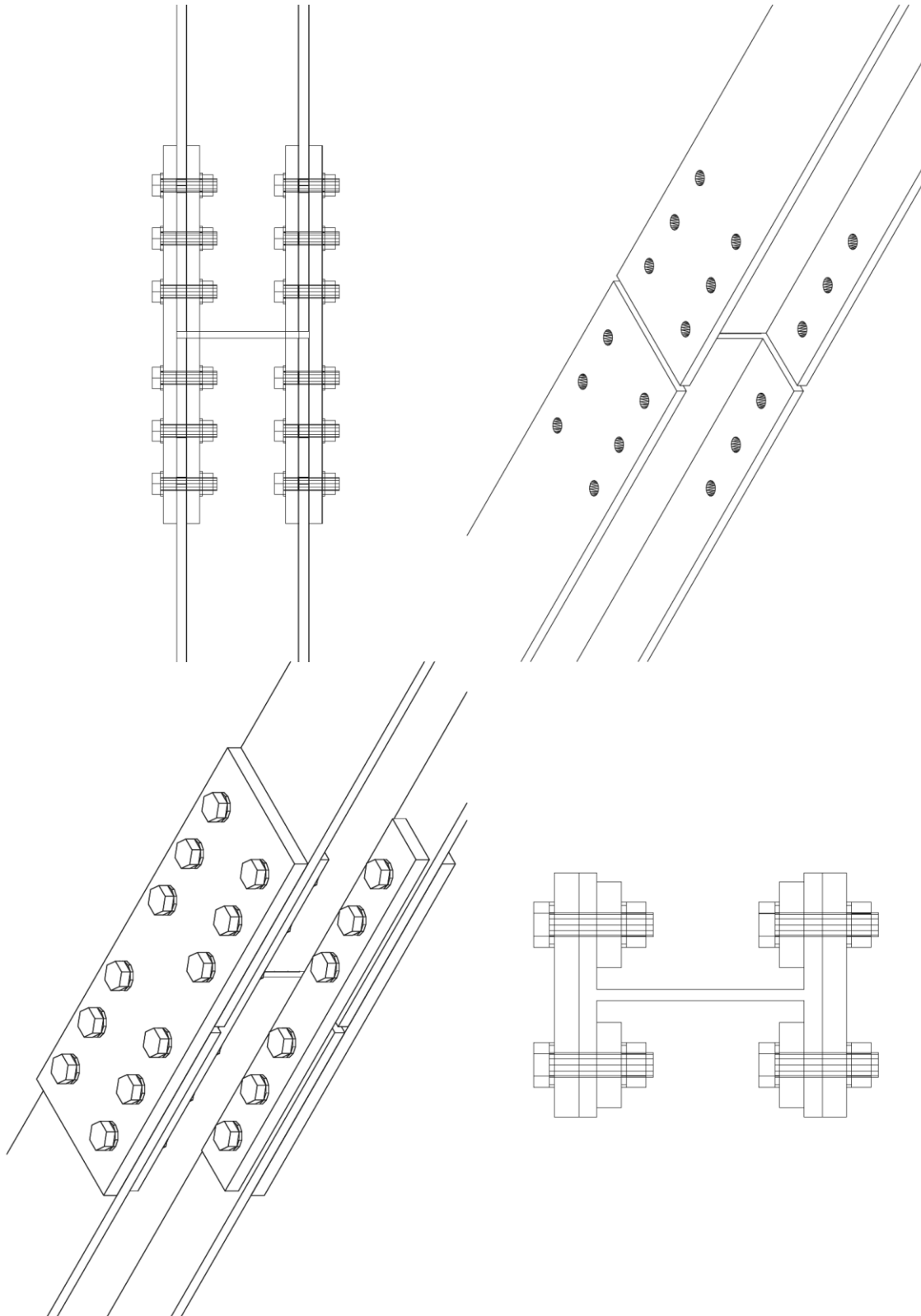
- Der Ermüdungsnachweis ist mit Hilfe der Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner zu führen.
- Die Ermittlung der Spannungskollektive soll nach der Reservoir-Methode erfolgen.
- Das Eigengewicht der Konstruktion ist zu vernachlässigen.

Übungsaufgabe „Ermüdung“

Matrikelnummer :

Name :

Anlage 1: Detail Schraubenstoß

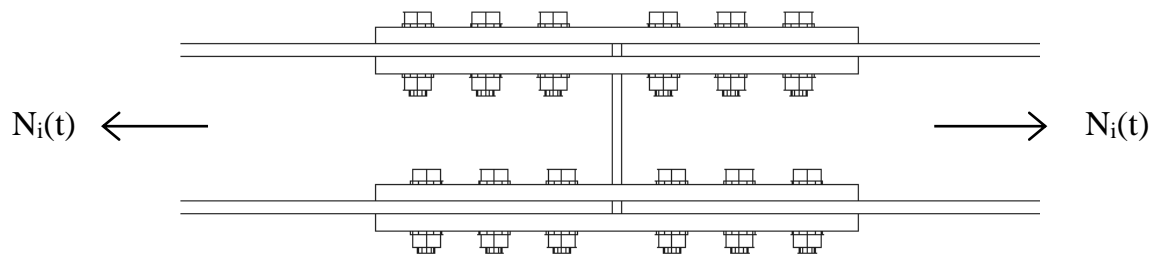


Übungsaufgabe „Ermüdung“

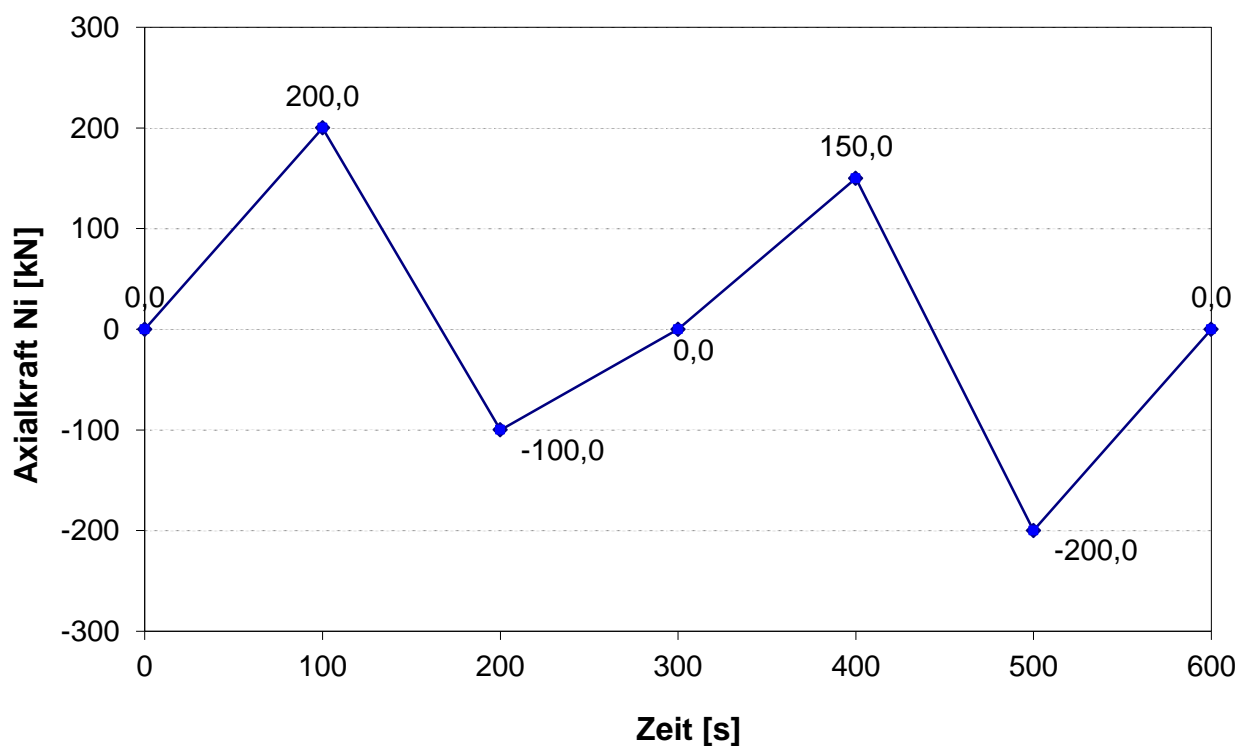
Matrikelnummer :

Name :

Anlage 2: Schnittgrößen-Zeitverlauf am Schraubenstoß (Detailansicht A)



Schnittgrößenverlauf während eines Belastungszyklus



Matrikelnummer :

Name :

Anlage 3: Kerbfalltabellen nach DIN EN 1999-1-9

Tabelle 8.1 — Ungeschweißte Bauteile und Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
160	<p>ANMERKUNG Der Kerbfall 160 ist der höchst mögliche; kein Kerbfall kann bei irgendeiner Anzahl an Spannungsschwingspielen eine höhere Ermüdungsfestigkeit erreichen.</p>	<p><u>Gewalzte und gepresste Erzeugnisse:</u></p> <p>1) Bleche und Flachstähle; 2) Walzprofile; 3) Nahtlose rechteckige oder runde Hohlprofile.</p>	<p><u>Kerbfälle 1) bis 3):</u> Scharfe Kanten, Oberflächen- und Walzfehler sind durch Schleifen zu beseitigen und ein nahtloser Übergang herzustellen.</p>
140		<p><u>Gescherte oder brenngeschnittene Bleche:</u></p> <p>4) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung 5) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit seichten und regelmäßigen Brennrinnen oder von Hand brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung. Maschinell brenngeschnittener Werkstoff der Schnittqualität entsprechend EN 1090.</p>	<p>4) Alle sichtbaren Randkerben sind zu beseitigen, Schnittflächen zu überschleifen und Kanten zu brechen. Riefen infolge mechanischer Bearbeitung (z. B. Schleifen) müssen parallel zu den Spannungen verlaufen.</p>
125			<p><u>Kerbfälle 4) und 5):</u> Einspringende Ecken sind durch Schleifen (Neigung $\leq 1/4$) zu bearbeiten oder durch einen entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen keine Ausbesserungen durch Verfüllen mit Schweißgut</p>
100 $m = 5$		<p>6) und 7) Gewalzte und gepresste Erzeugnisse entsprechend der Kerbfälle 1), 2), 3)</p>	<p><u>Kerbfälle 6) und 7):</u> Δr berechnet nach: $\tau = \frac{V S(t)}{I t}$</p>

Für Kerbfall 1–5 ist bei Einsatz von wetterfestem Stahl der nächsttiefere Kerbfall zu verwenden.

Tabelle 8.1 (fortgesetzt)

Matrikelnummer :

Name :

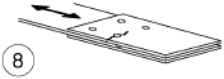
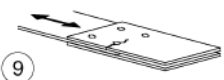
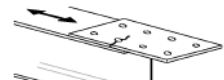


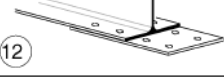
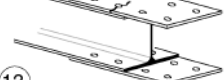
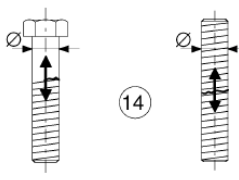
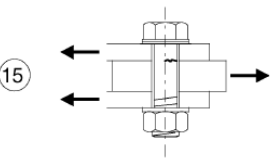
112		8) Symmetrische zweischnittige Verbindung mit hochfesten vorgespannten Schrauben.	8) $\Delta\sigma$ ist am Bruttoquerschnitt zu ermitteln.	<u>Allgemein gilt für geschraubte Verbindungen (Kerbfälle 8) bis 13)):</u> Lochabstand vom Rand in Kraftrichtung: $e_1 \geq 1,5 d$ Lochabstand vom Rand senkrecht zur Kraftrichtung: $e_2 \geq 1,5 d$ Lochabstand in Kraftrichtung: $p_1 \geq 2,5 d$ Lochabstand senkrecht zur Kraftrichtung: $p_2 \geq 2,5 d$ Ausbildung nach EN 1993-1-8, Bild 3.1
90		9) Zweischnittige Verbindung mit Passschrauben.	9) ... Bruttoquerschnitt ...	
		9) Zweischnittige Verbindung mit nicht vorgespannten Injektionsschrauben.	9) ... Nettoquerschnitt ...	
		10) Einschnittige Verbindung mit hochfesten vorgespannten Schrauben.	10) ... Bruttoquerschnitt ...	
		10) Einschnittige Verbindung mit vorgespannten Injektionsschrauben.	10) ... Nettoquerschnitt ...	
80		11) Bauteile mit Löchern unter Biegung und Normalkraft.	11) ... Nettoquerschnitt ...	
50		12) Einschnittige Verbindung mit Passschrauben.	12) ... Nettoquerschnitt ...	
		12) Einschnittige Verbindung mit nicht vorgespannten Injektionsschrauben.	12) ... Nettoquerschnitt ...	
		13) Einschnittige oder symmetrische zweischnittige Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben. Keine Lastumkehr.	13) ... Nettoquerschnitt ...	

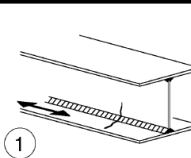
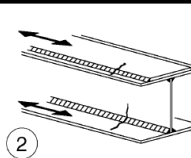
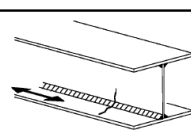
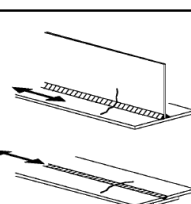
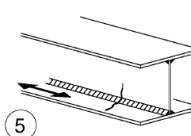
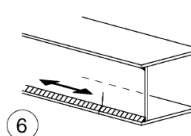
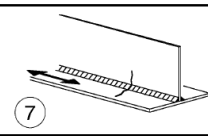
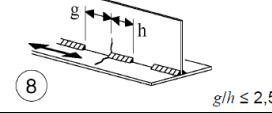
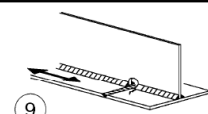
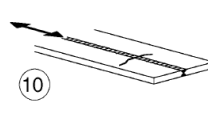

Tabelle 8.1 (fortgesetzt)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
50		14) Schrauben und Gewindestangen mit gerolltem oder geschnittenen Gewinde unter Zug. Bei großen Durchmessern (Ankerschrauben) muss der Größeneffekt mit k_s berücksichtigt werden.	14) $\Delta\sigma$ ist am Spannungsquerschnitt der Schraube zu ermitteln. Biegung und Zug infolge Abstützkraft sowie weitere Biegespannungen (z. B. sekundäre Biegespannungen) sind zu berücksichtigen. Bei vorgespannten Schrauben darf die reduzierte Spannungsschwingbreite berücksichtigt werden.
100 $m=5$		Schrauben in ein- oder zweischnittigen Scher-Lochleibungsverbindungen (Gewinde nicht in der Scherfläche) 15) – Passschrauben – Schrauben ohne Lastumkehr (Schraubengüten 5.6, 8.8 oder 10.9)	15) $\Delta\tau$ ist am Schaftquerschnitt zu ermitteln.

Matrikelnummer :

Name :

Tabelle 8.2 — Geschweißte zusammengesetzte Querschnitte

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
125	 	<u>Durchgehende Längsnähte:</u> 1) Mit Automaten beidseitig durchgeschweißte Nähte. 2) Automatengeschweißte Kehlnähte. Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Kerbfall 6) oder 7) in Tabelle 8.5 nachzuweisen.	<u>Kerbfälle 1) und 2):</u> Es dürfen keine Schweißansatzstellen vorhanden sein, ausgenommen bei Durchführung einer Reparatur mit anschließender Überprüfung der Reparaturschweißung.
112	 	3) Automatengeschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte, beide mit Ansatzstellen. 4) Mit Automaten einseitig durchgeschweißte Naht mit nicht unterbrochener Schweißbadsicherung, aber ohne Ansatzstellen.	4) Weist dieser Kerbfall Ansatzstellen auf, ist er der Kerbgruppe 100 zuzuordnen.
100	 	5) Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte. 6) Von Hand oder mit Automaten einseitig durchgeschweißte Nähte, speziell bei Hohlkästen.	5) und 6) Zwischen Flansch und Stegblech ist eine sehr gute Passgenauigkeit erforderlich. Dabei ist bei HV-Nähten das Stegblech so anzuschragen, dass die Wurzel ausreichend und ohne Herausfließen von Schweißgut erfasst werden kann.
100		7) Ausgebesserte automaten- oder handgeschweißte Kehlnähte oder Stumpfnähte nach Kerbfall 1) bis 6).	7) Durch Nachschleifen aller sichtbaren Fehlstellen durch einen Spezialisten sowie einer entsprechenden Überprüfung kann der ursprüngliche Kerbfall wiederhergestellt werden.
80		8) Unterbrochene Längsnähte.	8) $\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Flansch berechnet.
71		9) Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten (kleiner 60 mm). Bei Freischnitten > 60 mm gilt Kerbfall 1) in Tabelle 8.4.	9) $\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Flansch berechnet.
125		10) Längsbeanspruchte Stumpfnäht, beidseitig in Lastrichtung bleichen geschliffen, 100 % ZFP.	
112		10) Ohne Schleifen und ohne Ansatzstellen.	
90		10) Mit Ansatzstellen.	
140		11) Automatengeschweißte Längsnaht in Hohlprofilen ohne Ansatzstellen.	11) Ohne Schweißnahtfehler entspr. EN 1090. Wanddicke $t \leq 12,5$ mm
125		11) Automatengeschweißte Längsnaht in Hohlprofilen ohne Ansatzstellen.	11) Wanddicke $t > 12,5$ mm
90		11) Mit Ansatzstellen.	

Werden die Kerbfälle 1 bis 11 mit voll mechanisierter Schweißung ausgeführt, gelten die Kerbfallkategorien für Automaten-schweißung.

Matrikelnummer :

Name :

Tabelle 8.3 — Quer laufende Stumpfnähte

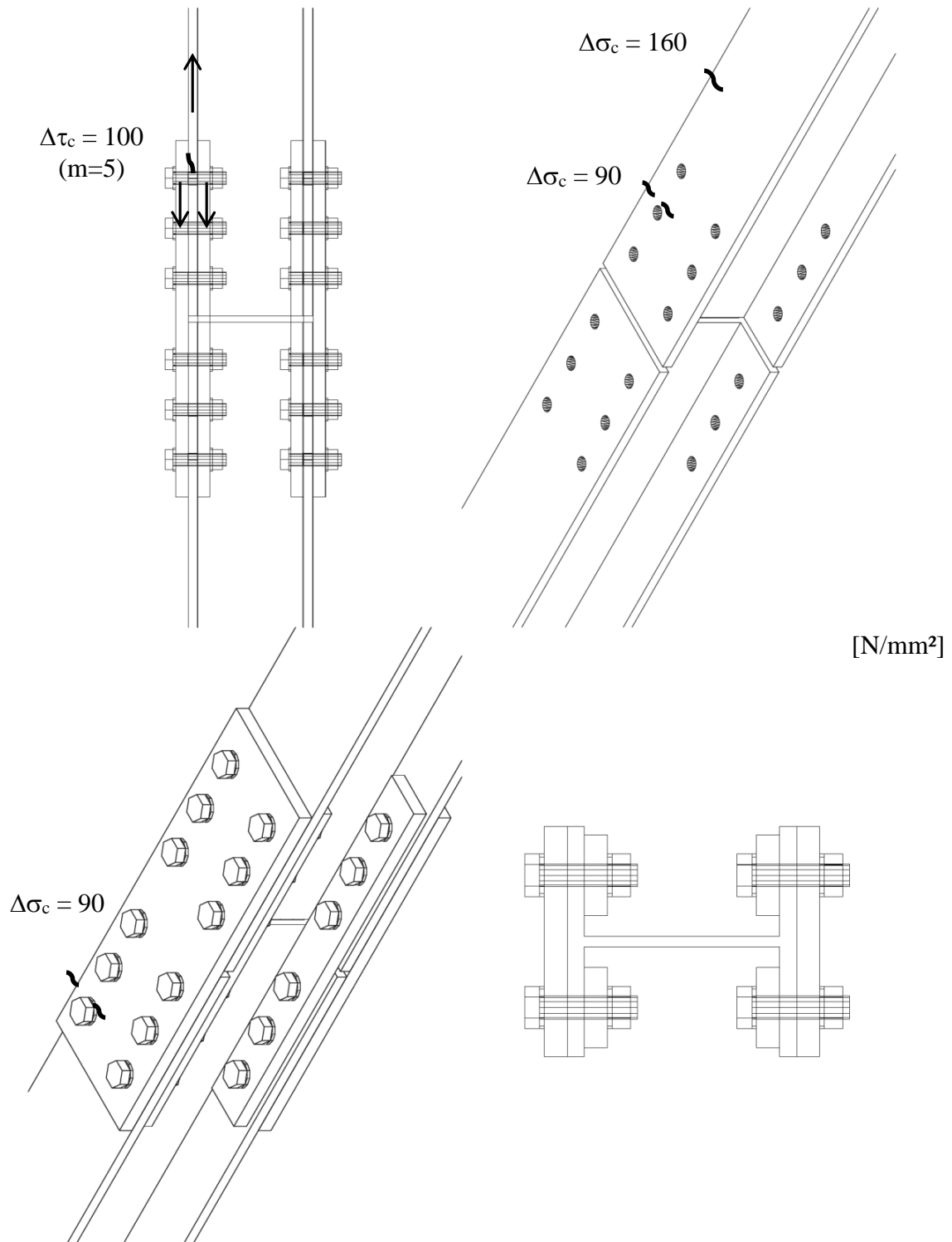
Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
112	<p>Blechdi- ckenab- hängigkeit für $t > 25 \text{ mm}$: $k_s = (25/t)^{0.2}$</p>	<p><u>Ohne Schweißbadsicherung:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Querstöße in Blechen und Flachstählen. 2) Vor dem Zusammenbau geschweißte Flansch- und Stegstöße in geschweißten Blechträgern. 3) Vollstöße von Walzprofilen mit Stumpfnähten ohne Freischnitte. 4) Querstöße in Blechen oder Flachstählen, abgeschrägt in Breite oder Dicke mit einer Neigung $\leq 1/4$. 	<ul style="list-style-type: none"> – Alle Nähte blecheben in Last- richtung geschliffen. – Schweißnahtan- und -auslauf- stücke sind zu verwenden und anschließend zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Last- richtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung mit ZFP. <p><u>Kerbfall 3):</u> Walzprofile mit denselben Abmessungen ohne Toleranzunterschiede</p>
90	<p>Blechdi- ckenab- hängigkeit für $t > 25 \text{ mm}$: $k_s = (25/t)^{0.2}$</p>	<ol style="list-style-type: none"> 5) Querstöße von Blechen oder Flachstählen. 6) Vollstöße von Walzprofilen mit Stumpfnähten ohne Freischnitte. 7) Querstöße von Blechen oder Flachstählen, abgeschrägt in Breite oder Dicke mit einer Neigung $\leq 1/4$. Der Übergang muss kerbfrei ausgeführt werden. 	<ul style="list-style-type: none"> – Die Nahtüberhöhung muss $\leq 10 \%$ der Nahtbreite und mit verlaufendem Übergang in die Blechoberfläche ausgeführt werden. – Schweißnahtan- und -auslauf- stücke sind zu verwenden und anschließend zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Last- richtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung mit ZFP. <p><u>Kerbfälle 5 und 7:</u> Die Nähte sind in Wannenlage zu schweißen.</p>
90	<p>Blechdi- ckenab- hängigkeit für $t > 25 \text{ mm}$: $k_s = (25/t)^{0.2}$</p>	<ol style="list-style-type: none"> 8) Vollstöße von Walzprofilen mit Stumpfnähten mit Freischnitten. 	<ul style="list-style-type: none"> – Alle Nähte blecheben in Last- richtung geschliffen. – Schweißnahtan- und -auslauf- stücke sind zu verwenden und anschließen zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Last- richtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung mit ZFP. – Walzprofile mit denselben Abmessungen ohne Toleranzunterschiede
80	<p>Blechdi- ckenab- hängigkeit für $t > 25 \text{ mm}$: $k_s = (25/t)^{0.2}$</p>	<ol style="list-style-type: none"> 9) Querstöße in geschweißten Blechträgern ohne Freischnitte. 10) Vollstöße von Walzprofilen mit Stumpfnähten mit Freischnitten. 11) Querstöße in Blechen, Flach- stählen, Walzprofilen oder geschweißten Blechträgern. 	<ul style="list-style-type: none"> – Die Nahtüberhöhung muss $\leq 20 \%$ der Nahtbreite und mit verlaufendem Übergang in die Blechoberfläche ausgeführt werden. – keine Schweißnahtnachbehand- lung – Schweißnahtan- und -auslauf- stücke sind zu verwenden und anschließen zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Last- richtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung mit ZFP. <p><u>Kerbfall 10:</u> Die Nahtüberhöhung muss $\leq 10\%$ der Nahtbreite und mit verlaufen- dem Übergang in die Blech- oberfläche ausgeführt werden.</p>
63		<ol style="list-style-type: none"> 12) Querstöße in Walzquer- schnitten (ohne Freischnitt). 	<ul style="list-style-type: none"> – Schweißnahtan- und -auslauf- stücke sind zu verwenden und anschließen zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Last- richtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung

Matrikelnummer :

Name :

Musterlösung

a) Identifizierung der Kerbfälle - Detail Schraubenstoß (Anlage 6.1)



Matrikelnummer :

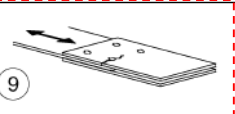
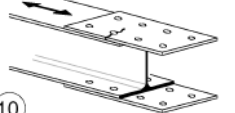
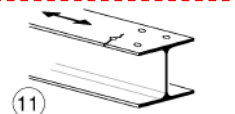
Name :

b) Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

Kerbfall 160 für Längsspannungen im Flansch

⇒ nicht maßgebend (da Kerbfall 90 am gleichen Bauteil unter gleicher Belastung vorhanden)

Kerbfall 90 für Längsspannungen sowohl im Flansch als auch im Blech

90		9) Zweischnittige Verbindung mit Passschrauben.	9) ... Nettoquerschnitt ...	Krafttrichtung: $e_1 \geq 1,5 d$
		10) Einschnittige Verbindung mit hochfesten vorgespannten Schrauben.	10) ... Bruttoquerschnitt ...	Lochabstand vom Rand senkrecht zur Krafttrichtung: $e_2 \geq 1,5 d$
		11) Bauteile mit Löchern unter Biegung und Normalkraft.	11) ... Nettoquerschnitt ...	Lochabstand in Krafttrichtung: $p_1 \geq 2,5 d$ Lochabstand senkrecht zur Krafttrichtung: $p_2 \geq 2,5 d$

$$\Delta\sigma_C = 90 \text{ N/mm}^2$$

$$N_C = 2 \cdot 10^6$$

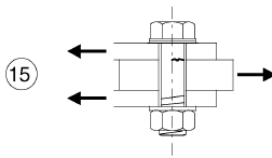
$$\Delta\sigma_D = \sqrt[m]{\frac{N_C}{N_D}} \cdot \Delta\sigma_C = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6}} \cdot 90 = 66,3 \text{ N/mm}^2$$

$$N_D = 5 \cdot 10^6$$

$$\Delta\sigma_L = \sqrt[m]{\frac{N_D}{N_L}} \cdot \Delta\sigma_D = \sqrt[5]{\frac{5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}} \cdot 66,3 = 36,4 \text{ N/mm}^2$$

$$N_L = 1 \cdot 10^8$$

Kerbfall 80 für Schubspannungen in der Schraube

100 $m=5$		Schrauben in ein- oder zweiseitigen Scher-Lochleibungsverbindungen (Gewinde nicht in der Scherfläche) 15) – Passschrauben – Schrauben ohne Lastumkehr (Schraubengüten 5.6, 8.8 oder 10.9)	15) $\Delta\tau$ ist am Schaftquerschnitt zu ermitteln.
--------------	---	--	--

$$\Delta\tau_C = 100 \text{ N/mm}^2$$

$$N_C = 2 \cdot 10^6$$

$$\Delta\tau_L = \sqrt[m]{\frac{N_C}{N_L}} \cdot \Delta\tau_C = \sqrt[5]{\frac{2 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8}} \cdot 100 = 45,7 \text{ N/mm}^2$$

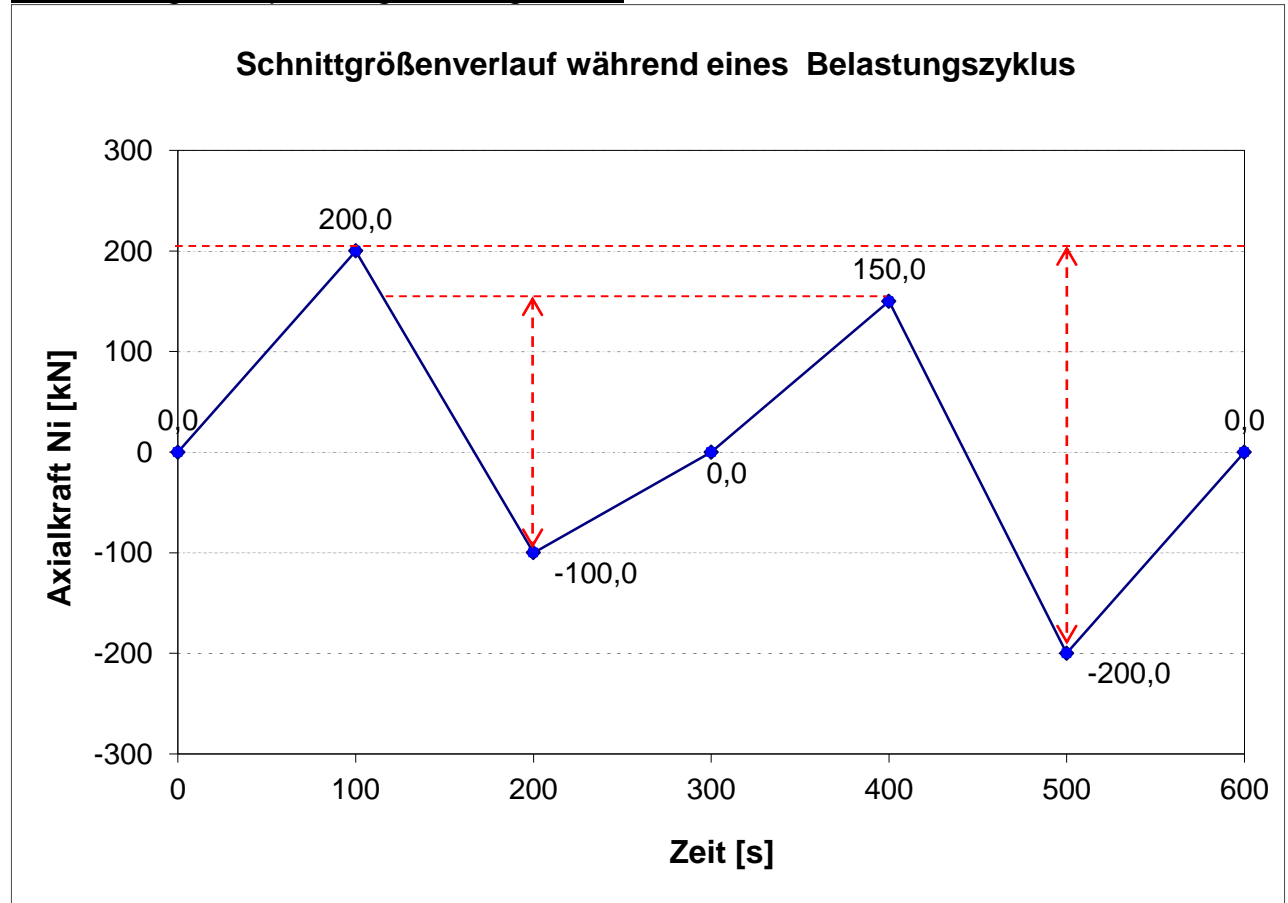
$$N_L = 1 \cdot 10^8$$

Übungsaufgabe „Ermüdung“

Matrikelnummer :

Name :

Berechnung der Spannungsschwingbreiten



Längsspannung (am Flanschquerschnitt):

$$\Delta \sigma_i = \frac{\Delta N_i}{2 \cdot A_{\text{Netto,Fl}}}$$

$$A_{\text{Netto,Fl}} = 20 \cdot 1,5 - 2 \cdot 1,8 \cdot 1,5 = 24,6 \text{ cm}^2$$

(die Normalkräfte werden im Bereich der Lasche vollständig von den Flanschen abgetragen; die Bleche werden nicht maßgebend, da die Normalspannungen in diesen aufgrund der größeren Gesamt-Netto-Querschnittsfläche geringer sind)

Schubspannung in der Schraube:

$$\Delta \tau_i = \frac{\Delta N_i}{2 \cdot 2 \cdot 6 \cdot A_{\text{Schaft}}}$$

$$A_{\text{Schaft}} = 2,27 \text{ cm}^2$$

(je Flansch (2 Flansche vorhanden) übertragen 6 Schrauben die Kraft über je 2 Schwerfugen)

n_i	ΔN_i [kN]	$\Delta \sigma_c$ [N/mm ²]	$\Delta \sigma_i$ [N/mm ²]	m
1	400	90	$81,3 > 66,3$	3
1	250	90	$66,3 > 50,8 > 36,4$	5

Matrikelnummer :

Name :

n_i	ΔN_i [kN]	$\Delta \tau_c$ [N/mm ²]	$\Delta \tau_i$ [N/mm ²]	m
1	400	100	73,4 > 45,7	5
1	250	100	45,9 > 45,7	5

Berechnung der zulässigen Lastspiele, Kerbfall 90

$$N_1(\Delta \sigma_c) = N_D \cdot \left(\frac{\Delta \sigma_D}{\Delta \sigma_i} \right)^m = 5 \cdot 10^6 \left(\frac{66,3}{81,3} \right)^3 = 2.713.225 \text{ Lastwechsel}$$

$$N_2(\Delta \sigma_c) = N_D \cdot \left(\frac{\Delta \sigma_D}{\Delta \sigma_i} \right)^m = 5 \cdot 10^6 \left(\frac{66,3}{50,8} \right)^5 = 18.932.985 \text{ Lastwechsel}$$

Berechnung der zulässigen Lastspiele, Kerbfall 80

$$N_1(\Delta \tau_c) = N_C \cdot \left(\frac{\Delta \tau_c}{\Delta \tau_i} \right)^5 = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{100}{73,4} \right)^5 = 9.387.495 \text{ Lastwechsel}$$

$$N_2(\Delta \tau_c) = N_C \cdot \left(\frac{\Delta \tau_c}{\Delta \tau_i} \right)^5 = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{100}{45,9} \right)^5 = 98.167.237 \text{ Lastwechsel}$$

(Hier kann bereits erkannt werden, dass Kerbfall 90 maßgebend wird)

Lastspielzahl

$$n_{vorh} = 300 \cdot 300 \cdot 20 = 1.800.000$$

Ermüdungsnachweis für Kerbfall 90

$$D = \sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right)_{\sigma} = \frac{1.800.000}{2.713.225} + \frac{1.800.000}{18.932.985} = 0,76 \leq 1,00$$

 \Rightarrow Nachweis erfüllt!Ermüdungsnachweis für Kerbfall 80

$$D = \sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right)_{\sigma} = \frac{1.800.000}{9.387.495} + \frac{1.800.000}{98.167.237} = 0,21 \leq 1,00$$

 \Rightarrow Nachweis erfüllt!