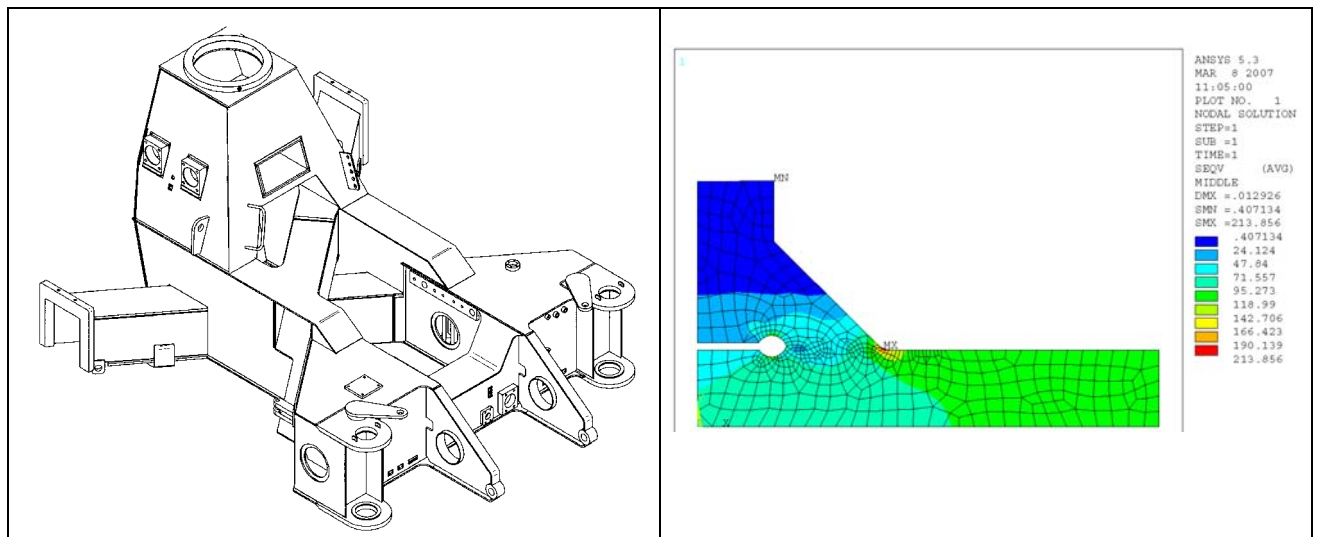


Ermüdungsnachweise mit der Finite Elemente Methode
nach der FKM- Richtlinie
– Beispiele aus der Bemessungspraxis –

Dr.-Ing. Peter Knödel, SFI/IWE

ö. b. u. v. Sachverständiger (IHK KA) für
Schweißtechnik – Sonderbauten in Metall
www.peterknoedel.de



DVS Vortragsforum

Bezirksverband Karlsruhe-Bruchsal-Bretten

www.dvs-ka.de

Bildungsakademie Karlsruhe, Hertzstrasse 177

08. März 2007

0. Inhalt

0.	Inhalt	2
1.	Einleitung	3
2.	Begriffe und Namen	4
3.	Ermüdung	6
3.1	Allgemeines	6
3.2	Globales Konzept	6
3.3	Lokale Konzepte	7
4.	FEM	8
4.1	Allgemeines	8
4.2	Genauigkeit	8
4.3	Fachliche Fehler	11
5.	FKM	13
5.1	Allgemeines	13
5.2	Einschränkungen	13
5.3	Örtliche Spannungen	14
5.3.1	Allgemeines	14
5.3.2	Spannungskollektivkennwerte	14
5.3.3	Werkstoffkennwerte	15
5.3.4	Konstruktionskennwerte	16
5.3.5	Bauteilfestigkeit	17
5.3.6	Sicherheitsfaktoren	18
5.3.7	Nachweis	19
5.4	Kritik	20
6.	Praktische Beispiele	21
6.1	Fahrzeugrahmen (ANAKON/Knödel 2007)	21
6.1.1	Kollektiv Abs. 4.1	21
6.1.2	Werkstoff Abs. 4.2	24
6.1.3	Konstruktion Abs. 4.3	24
6.1.4	Bauteilfestigkeit Abs. 4.4	25
6.1.5	Sicherheitsfaktoren Abs. 4.5	27
6.1.6	Nachweis Abs. 4.6	27
6.1.7	Bewertung	28
6.2	Rippe quer (Knödel)	31
6.3	Rippe quer (DYNATEC 2006)	36
6.4	Herrenknecht-Bohrkopf (ANAKON 2007)	38
6.5	Maurer Jochblech (CAD-FEM 2004)	41
7.	Folgerungen	43
8.	Danksagung	45
9.	Literatur	46
9.1	Normen und Regelwerke	46
9.2	Fachliteratur	46
9.3	Sonstige	48

1. Einleitung

Die folgenden Aussagen konzentrieren sich auf geschweißte Bauteile aus Baustählen im Stahl-, Maschinen- und Fahrzeugbau. Dabei wird insbesondere die Anwendung der FKM in der praktischen Bauteilbemessung beleuchtet.

Insofern die FKM-Richtlinie auch für andere Werkstoffe gilt, können die Aussagen übertragen werden.

Verweise auf Absatz- und Gleichungsnummern beziehen sich auf die FKM-Richtlinie 2003 sofern nichts anderes angegeben.

Das vorliegende Manuskript wurde nach dem Vortrag am 08.03.07 überarbeitet.

Quellenangabe für die Titelseite:

links: ELBA ca. 2002 (siehe ANAKON 2003);

rechts: Knödel, siehe Abs. „Fahrzeugrahmen“

2. Begriffe und Namen

Betriebsfestigkeit	Ertragbare Beanspruchungen bei Vorliegen eines Kollektives
Dauerfestigkeit	rechts vom Knickpunkt der Wöhlerlinie
Descartes	1596-1650 Bescherte uns (unter anderem) das „cartesische“ Koordinatensystem und die analytische Geometrie. „cogito ergo sum“ (frei übersetzt: ich denke, also bin ich)
FAT	FATigue = Ermüdung Der FAT-Wert der Bauteilkategorie entspricht der Spannungsdoppelamplitude $\Delta\sigma$ in N/mm^2 , während sonst in der FKM-Richtlinie nur einfache Spannungsamplituden betrachtet werden.
FEM	Finite Elemente Methode Ein „finites Element“ ist im Gegensatz zur Infinitesimalrechnung (Grenzübergang zu unendlich kleinen Schrittweiten) von Descartes und Leibniz ein Element mit endlichen Kantenlängen. Strukturmechanische Gleichgewichtsbedingungen werden an diesem Element näherungsweise erfüllt. In der Regel steigt die erreichbare Genauigkeit der Ergebnisse mit kleiner werdenden Elementen.
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. Geschäftsstelle: Lyoner Straße 18, D-60528 Frankfurt Tel.: (+49 69) 66 03-16 81, Fax: (+49 69) 66 03-16 73, info@fkm-net.de Bringt auch Richtlinien zur Anwendung der Bruchmechanik heraus. „Die“ FKM-Richtlinie gibt es demnach nicht – unter „der“ FKM-Richtlinie wird aber meistens „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“ verstanden. Grundlage „der“ FKM-Richtlinie sind VDI 2226 sowie ehemalige TGL-Standards (siehe FKM-Literaturverzeichnis).
Indizes	Aus Bequemlichkeit werden Indizes (Fußzeiger) durch Komma abgetrennt. Beispiel: $K_{WK,\sigma}$ wird geschrieben als K,WK,σ

Kerbspannung (effektive)

in der Schweißnaht auftretende maximale Spannung (Abs. 0.3.4.2)
Dabei soll kein kleinerer Kerbradius als $r = 1 \text{ mm}$ (!!!) angenommen werden, auch nicht im Wurzelspalt. (Knödel nennt das die „Radaj-Kerbe“)

Kollektiv

Häufigkeitsverteilung der Beanspruchungsamplituden; „Aus der Beanspruchungs-Zeit-Funktion wird nach statistischen Zählverfahren (Klassierverfahren) der Amplitudengehalt als Beanspruchungskollektiv gewonnen. (Radaj 2003 Abs. 5.2).

Leibniz

1646-1716

Universalgenie: Dualsystem, Infinitesimalrechnung (Differenzieren und Integrieren), Matrizenrechnung.

MPa

gleich N/mm^2 – MPa ist zur Bezeichnung von mechanischen Spannungen in Deutschland unüblich, läßt sich aber einfacher schreiben.

Strukturspannungen

fiktive, unmittelbar vor der Schweißnaht auftretende maximale Spannung, die aus dem aus dem Spannungsverlauf vor der Schweißnaht extrapoliert wird (Abs. 0.3.4.2). Bei den vorliegenden Auswertungen wird für die Stützstellen eine Entfernung von $0,4 \cdot T$ und $1,0 \cdot T$ vom Nahtfuß verwendet, in der Literatur finden sich jedoch auch andere Angaben, z.B. $0,5 \cdot T$ und $1,5 \cdot T$.

Zeitfestigkeit

links vom Knickpunkt der Wöhlerlinie.

3. Ermüdung

3.1 Allgemeines

Unter Ermüdung versteht man das Auftreten von Schädigungen in Bauteilen unter häufig wiederkehrenden Beanspruchungen deutlich unterhalb der Zugfestigkeit. Ermüdung tritt an Stellen im Bauteil auf, die hinsichtlich des Kraftflusses kritisch sind, dies sind z.B. geometrische Kerben (einspringende Ecken) und Schweißnähte.

Eine Übersicht über die Ermüdung von stählernen, geschweißten Bauteilen ist bei Knödel 2006 gegeben. Dort sind auch unterschiedliche Berechnungsnormen gegenübergestellt. Das Skriptum ist aus dem Internet herunterladbar.

3.2 Globales Konzept

Das Bauteil wird global betrachtet. Es werden mit einfachen (Hand-)Rechenverfahren Nennspannungen als gemittelte Spannungen aus einer tatsächlich ungleichförmigen Spannungsverteilung ermittelt, die Störstelle im Bauteil wird dabei außer acht gelassen. Das vorzeitige Versagen des Bauteils an der Störstelle wird dadurch berücksichtigt, daß für das ganze Bauteil eine nur eine verringerte Nennspannung zugelassen wird (z.B. DIN 15018, DIN 4132, EC3).

„Bei komplexen, flächenartigen oder voluminösen Bauteilen sind Nachweise mit Nennspannungen problematisch, weil möglicherweise kein Nennquerschnitt definiert ist aus dem man eine Nennspannung ermitteln kann.“ (sinngemäß zitiert aus der FKM-Richtlinie)

Bei genauerer Betrachtung trifft diese Aussage nicht zu:

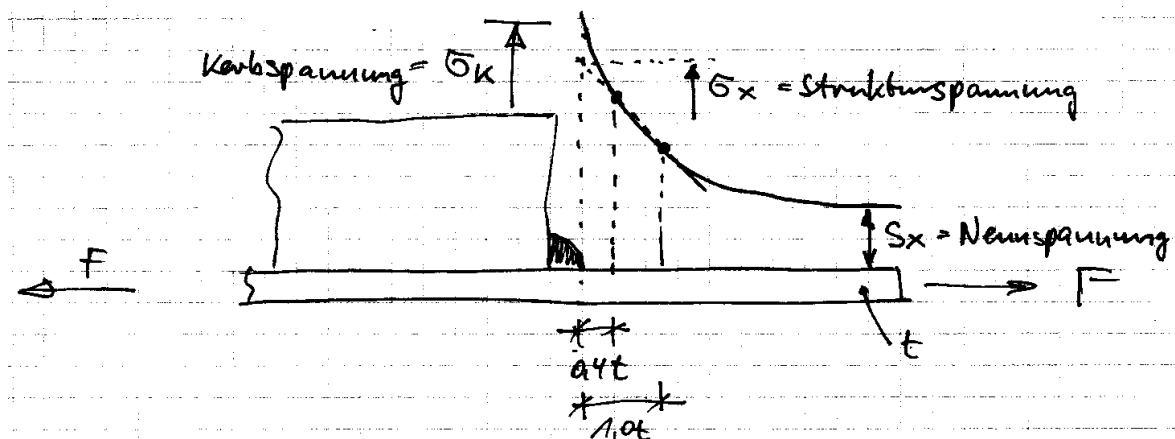
Aus einer FEM-Berechnung kann man z.B. eine bestimmte Naht herausgeschnitten denken (ingenieurmäßiges Streifenmodell), und die errechnete Spannung in gewissem Abstand von der Naht als Nennspannung betrachten.

3.3 Lokale Konzepte

Die Störstelle im Bauteil wird lokal betrachtet. Mit den im Maschinenbau üblichen Formzahlen wird die höchste Spannung (Kerbspannung) an der kritischen Stelle ermittelt. Die Beanspruchung im Kerbgrund wird einer Grundfestigkeit des Werkstoffes gegenübergestellt.

Die verwendete Grundfestigkeit des Werkstoffes wurde dabei an den Erfahrungen kalibriert, die aus der langen Anwendung des Nennspannungskonzeptes als abgesichert gelten können.

Die unmittelbare Anwendung von Kerbspannungen stößt dann auf Schwierigkeiten, wenn eine einspringende Ecke einen Kerbradius hat, der gegen Null geht, weil das nach der (linear elastischen) Kerbspannungslehre zu unendlich hohen Spannungen führt. In diesen Fällen wird eine fiktive „Strukturspannung“ verwendet, die aus zwei Stützstellen vor der Kerbe linear bis zur Kerbe extrapoliert wird (siehe „Begriffe und Namen“), und daher einen Wert (deutlich) kleiner als die Kerbspannung ergibt.



(Mitschrift Knödel bei Prof. Fahrenwald, SLV-Fellbach 2005)

Ich sehe im Strukturspannungskonzept eine nahe Verwandtschaft zum Nennspannungskonzept, da die tatsächlich an der Kerbe vorhandenen, hohen Spannungen bewußt außer acht gelassen werden.

4. FEM

4.1 Allgemeines

Die Finite Elemente Methode ist ein numerisches Berechnungsverfahren für Feldgleichungen. Für eine allgemeine Einführung wird auf den Klassiker verwiesen (Bathe/Wilson 1976).

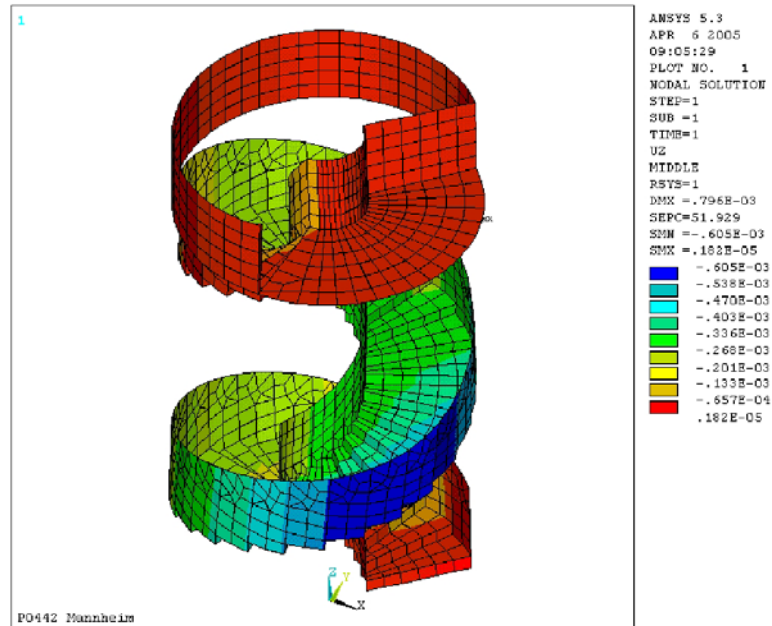
Die zu berechnende Struktur wird in Elemente unterteilt. Innerhalb dieser Elemente werden die Feldgleichungen näherungsweise erfüllt, im allgemeinen steigt die Genauigkeit mit kleiner werdenden Elementen.

4.2 Genauigkeit

Die erzielte Genauigkeit ermittelt man im allgemeinen durch sogenannte Konvergenzstudien. Man beginnt mit einem Netz beliebiger Teilung, verfeinert dieses sukzessive und beobachtet dabei ein bestimmtes Rechenergebnis, z.B. eine Kerbspannung. Diese sollte bei immer feiner werdenden Netzen gegen einen Wert konvergieren. Von diesem Wert nimmt man an, daß er das „richtige Ergebnis“ ist.

„But remember, my dear colleagues: a finite element calculation is per definition wrong!“

(aus der Erinnerung zitiert: Prof. Arbocz, EUROMECH Colloquium 317, University of Liverpool, 21.-23. March 1994)



Wendeltreppe im Schloß Mannheim (Knödel 2005)

Im Rahmen von Schwingungs- und Dämpfungsuntersuchungen an einer stählernen Wendeltreppe im Schloß Mannheim wurde das Werkzeug FEM hinsichtlich der erforderlichen Elemententeilung kalibriert.

Tests an einem Stegblech-Balken,

$L=20$; $H=1$; $T=0,050$

(Einheiten in Meter)

Grundwert der Element-Kantenlänge: 1 m

EFAK ist ein Teiler der Kantenlänge, d.h. EFAK = 4 bedeutet Elemente mit maximal 250 mm Kantenlänge

Durchbiegung statisch unter Eigenlast

EFAK	1	2	3	4	5	6	10
f(mm)	118	12,0	10,3	9,81	9,60	9,49	9,34 (bei 2000 Elementen)

der analytische Wert ist 9,16

Eigenfrequenz unter Eigenmasse

EFAK	1	2	3	4	5	6	10
------	---	---	---	---	---	---	----

f(Hz) 1,63 5,10 5,50 5,63 5,69 5,72 5,77

der analytische Wert ist 5,86

Durchbiegung statisch unter Einzellast 10 kN

EFAK 1 2 3 4 5 6 10

f(mm) 2,46 2,49 2,14 2,04 1,99 1,97 1,94

der analytische Wert ist 1,90

Durchbiegung unter einer sinusförmig veränderlichen Einzellast von 10 kN mit der kritischen Frequenz mit einer Eigendämpfung von 0,015 (logarithmisches Dekrement)

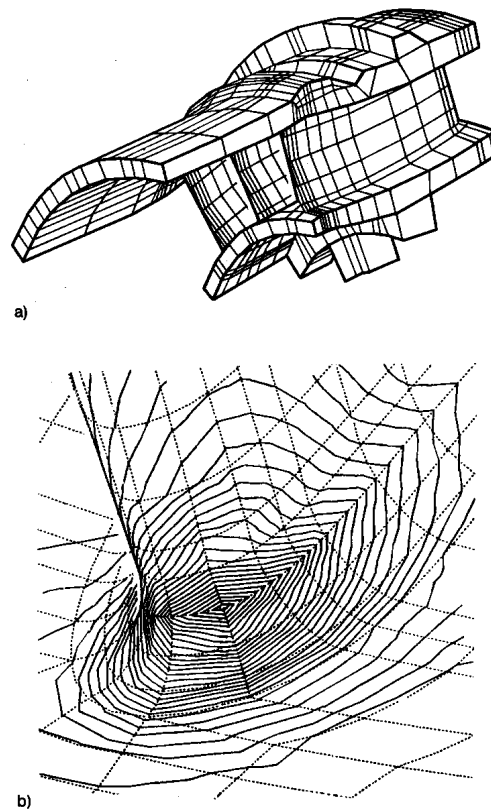
EFAK 1 2 3 4 5 6 10

f(mm) 5080 512 439 419 410 405 399

analytischer Wert ist 399

Die Ergebnisse belegen, daß man an einem Tragwerk, das von den Abmessungen her anscheinend eindeutig ein Biegebalken ist, bei dem keine Probleme zu erwarten sind, doch unerwartet eng einteilen muß.

4.3 Fachliche Fehler



(aus Radaj 2003, S. 115)

Das vorstehende Bild ist einem Fachbuch über Ermüdung entnommen, unter dem Stichwort „numerische Lösungsverfahren zur Ermittlung von Kerbspannungen“. Aus meiner Sicht ist es fahrlässig, solche Bilder zu veröffentlichen, selbst wenn die Erstausgabe des Buches 1995 datiert und die zitierte Quelle auf einen Tagungsbericht von Herrn Radaj selbst aus 1989 verweist. Solche Bilder verankern sich in den Köpfen der Leser und machen diese glauben, man könnte mit solch einer Elementierung vernünftige Ergebnisse erzielen.

Die im unteren Bild dargestellten „Höhenlinien der Kerbtensurspannung“ scheinen mir im übrigen unplausibel, ich wüßte nicht, welche realitätsnahe Temperaturverteilung am Schaufelfuß einer Gasturbine eine solche Spannungsverteilung hervorrufen könnte.

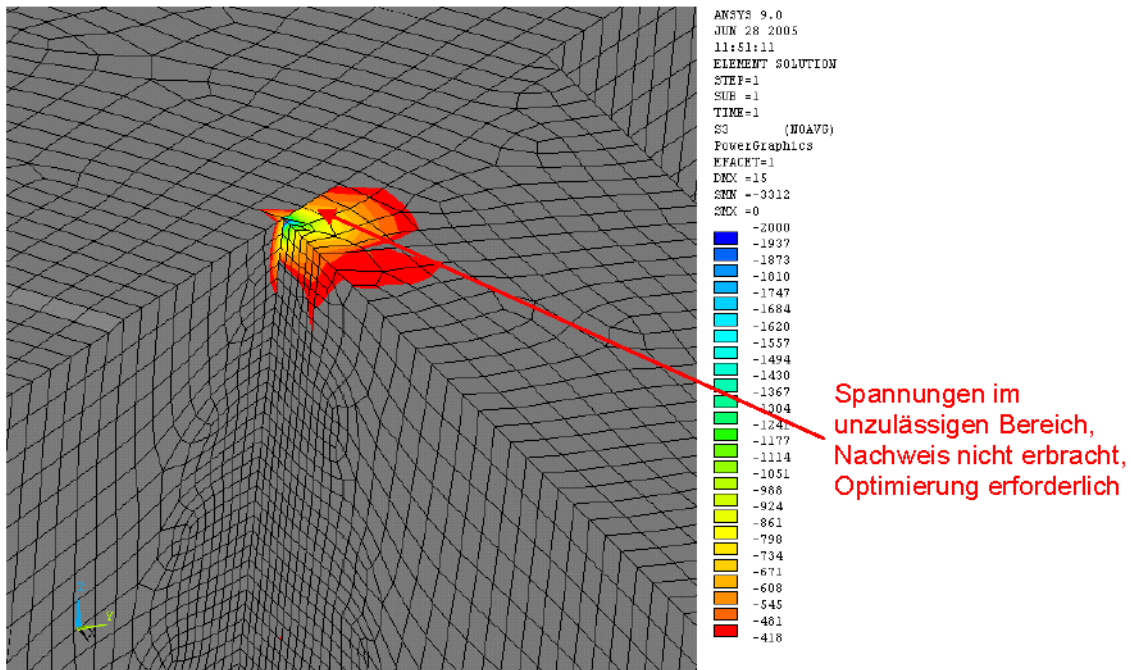


Abbildung 79 Position 2 – 3. Hauptspannung in N/mm², Stellung 2
(graue Bereiche: zulässige Spannungen, farbige Bereiche: unzulässige Spannungen)
(anonymisiert aus der FKM-Berechnung eines Ingenieurbüros 2005)

Das vorstehende Bild ist aus einer FEM-Studie, mit der ein Bauteil aus dem Bereich Fahrzeugbau nach der FKM-Richtlinie beurteilt wird. Da offensichtlich die Ermittlung von örtlichen Spannungen im Vordergrund steht, ist hier die Elemententeilung fachlich falsch. Ebenso fachlich falsch ist die Schlußfolgerung, die daraus gezogen wird. An einer scharf einspringenden Ecke sollte sich immer eine Spannungs-Singularität zeigen.

5. FKM

5.1 Allgemeines

Die folgenden Aussagen beziehen sich auf die 5. Ausgabe 2003.

Die „FKM–Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisen-
guß- und Aluminiumwerkstoffen“ beschreibt ein methodisches Konzept, mit Nachweise für belie-
bige metallische Bauteile erbracht werden können. Im Einzelnen stehen folgende Verfahren zur
Verfügung:

- Statischer Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen / mit örtlichen Spannungen
- Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen / mit örtlichen Spannungen

Die Verfahren sind für alle Werkstoffe, Festigkeitsklassen und Werkstoffzustände gleich, so daß
sich das Verfahren gut zum Programmieren eignet, wenn dann jeweils andere Werkstoffdaten hin-
terlegt werden. Im Einzelnen werden erfaßt:

- Stähle von -40°C bis $+500^{\circ}\text{C}$ (auch Austenite)
- Eisengußwerkstoff von -40°C bis $+500^{\circ}\text{C}$
- Aluminiumwerkstoff von -40°C bis $+500^{\circ}\text{C}$

5.2 Einschränkungen

In diesem Abschnitt werden – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – Einschränkungen aufgeführt,
die in der FKM-Rili enthalten sind.

- „Berechnung gilt als vorläufig und ist nur mit Vorsicht anwendbar“ für den statischen Fes-
tigkeitsnachweis ... in Anlehnung an DIN 18800 Teil1 und den Ermüdungsfestigkeitsnach-
weis ... in Anlehnung an die IIW-Empfehlungen und den Eurocode 3 für die Werkstoffe
„bedingt schweißbarer Stahl“, nichtrostender Stahl, schweißbarer Eisengußwerkstoff, Alu-

- miniumwerkstoff;
(Abs. 0.3.3.1 Fußnote 9 und Abs. 0.3.3.2 Fußnote 10)
- „Näherung, die als vorläufig gilt und mit Vorsicht anzuwenden ist“ für den statischen Festigkeitsnachweis ... auf der Grundlage der Neuber-Formel und der vollplastischen Traglast;
(Abs. 0.3.3.3 Fußnote 11)
 - „Ein Frequenzeinfluß wird nicht berücksichtigt, obwohl er für Aluminiumwerkstoff von Bedeutung sein könnte.“
(Abs. 4.2.0 Fußnote 2)
 - Schweißnahtspezifische Wechselfestigkeitskennwerte für Aluminiumwerkstoff
„Achtung: Diese Werte gelten als vorläufig und sind mit Vorsicht anzuwenden.“
(Abs. 4.2.1.2)
 - Schweißnahtspezifische Wechselfestigkeitskennwerte für bedingt schweißbaren Stahl, nichtrostenden Stahl, schweißbaren Eisengußwerkstoff
„Achtung: ... gelten die Werte als vorläufig und sind mit Vorsicht anzuwenden.“
(Abs. 4.2.1.2)
 - „Vereinfachte, näherungsweise Berechnung“ ... für nach dem Knick geneigte Wöhlerlinien
(Abs. 4.4.3.1 Fußnote 11)

5.3 Örtliche Spannungen

5.3.1 Allgemeines

Nachfolgend wird der Berechnungsgang für flächenartige Bauteile nach der FKM stichwortartig umrissen. Der z.T. etwas unstrukturiert wirkende „rote Faden“ entspricht der Darstellung in der FKM-Richtlinie.

Eine Zahlenrechnung für ein konkretes Beispiel ist in Abs. „Praktische Beispiele – Fahrzeugrahmen“ enthalten.

5.3.2 Spannungskollektivkennwerte

FKM-Kapitel 4.1.0 Allgemeines

- Berechnung gilt ab ca. 10^4 Zyklen

- elastisch bestimmte Spannungen
- auf den Größtwert normierte Spannungskollektive aus Amplitude σ_a und Mittelwert σ_m
- proportionale bzw. synchrone Komponenten gleicher Spannungsart (z.B. σ_{x1} und σ_{x2}) werden überlagert; für nichtproportionale Komponenten werden die Nachweise getrennt geführt, danach folgt eine Überlagerung

FKM-Kapitel 4.1.1 Spannungskennwerte

- örtliche Spannungen treten als Strukturspannungen oder effektive Kerbspannungen auf
- Strukturspannungen sind nur für den Schweißnahtübergang anzuwenden
- Für die Nahtwurzel ist die Berechnung mit effektiven Kerbspannungen durchzuführen

FKM-Kapitel 4.1.2 Spannungskollektivkennwerte

- größte Amplitude, Amplituden der Kollektiv-Stufen, Mittelwerte der Kollektiv-Stufen, Zyklenzahlen der Kollektiv-Stufen, Kollektivumfang, Wiederholhäufigkeit eines Kollektives
- Mittelspannungskollektiv
Mittelspannung ist auf allen Stufen gleich
- Spannungsverhältniskollektiv
Grenzspannungsverhältnis ist auf allen Stufen gleich

FKM-Kapitel 4.1.3 Anpassung an Bauteilwöhlerlinie

FKM-Kapitel 4.1.4 Anpassung an Bestimmung der Spannungskollektivkennwerte

5.3.3 Werkstoffkennwerte

FKM-Kapitel 4.2.0 Allgemeines

- Werkstoff-Festigkeitskennwerte: Wechselfestigkeit für Normalspannung, Schubspannung

FKM-Kapitel 4.2.1 Bauteil-Normwerte

FKM-Kapitel 4.2.2 Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor $f_{W,\sigma}$ und Schubwechselfestigkeitsfaktor $f_{W,\tau}$

- Der Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor $f_{W,\sigma}$ beträgt für Baustähle nach Tabelle 4.2.1
 $f_{W,\sigma} = 0,45$
- Für nichtgeschweißte Bauteile ist der Bauteil-Normwert der Werkstoff-Wechselfestigkeitswert für die Normalspannung nach Gl. 4.2.1:
 $\sigma_{W,zd} = f_{W,\sigma} * R_m$
z.B. für S235
 $\sigma_{W,zd} = 0,45 * 360 \text{ MPa} = 162 \text{ MPa}$

FKM-Kapitel 4.2.3 Temperaturfaktor

5.3.4 Konstruktionskennwerte

FKM-Kapitel 4.3.0 Allgemeines

FKM-Kapitel 4.3.1 Konstruktionsfaktoren

- Für Strukturspannungen bei flächigen Bauteilen (Gl. 4.3.5)
 $K_{WK,\sigma} = 225 / (FAT * f_t * K_{V} * K_{NL,E})$
(Schub und/oder Aluminium mit anderem Zähler)
- Für effektive Kerbspannungen bei flächigen Bauteilen (Gl. 4.3.9)
 $K_{WK,\sigma K} = 1 / (K_{V} * K_{S} * K_{NL,E})$
(Schub ohne letzten Nenner-Faktor)

FKM-Kapitel 4.3.2 Stützzahlen

- bezogenes Spannungsgefälle
- überlagerte Kerben

FKM-Kapitel 4.3.3 Rauheitsfaktor

- Oberflächenrauheit

FKM-Kapitel 4.3.4 Rand- und Schutzschichtfaktor

- Randschichtfaktor K,V für Randschichtverfestigungen, sonst gleich 1.
- Schutzschichtfaktor K,S für Aluminium mit Oxidschicht aus Bild 4.3.4, sonst gleich 1.

FKM-Kapitel 4.3.5 Konstante K,NL,E

- für GG aus Tabelle 4.3.6
für alle anderen Werkstoffe ist $K,NL,E = 1$

FKM-Kapitel 4.3.6 Bauteilklasse FAT

- Berücksichtigt bei Strukturspannungen die Form des Nahtüberganges
(Geometrie am Nahtfuß)

FKM-Kapitel 4.3.7 Dickenfaktor f,t

- Für die Berechnung querbeanspruchter Schweißnähte mit Strukturspannungen bei Blechdicken über 25 mm.

5.3.5 Bauteilfestigkeit

FKM-Kapitel 4.4.0 Allgemeines

- Bauteil-Wechselfestigkeit aus dem Konstruktionsfaktor, Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit aus dem Mittelspannungsfaktor, Amplitude der Bauteil-Betriebsfestigkeit aus dem Betriebsfestigkeitsfaktor.

FKM-Kapitel 4.4.1 Bauteil-Wechselfestigkeit $\sigma_{W,K}$

- ertragbare Bauteil-Wechselfestigkeit nach Gl. 4.4.2
 $\sigma_{W,K} = \sigma_{W,zd} * K_{W,K} * \sigma$

FKM-Kapitel 4.4.2 Bauteil-Dauerfestigkeit

- Mittelspannungsfaktor aus Bild 4.4.1, Abs. 4.4.2.1 und den Gln. 4.4.9 bis 4.4.32 in Abhängigkeit von den vier Überlastungsfällen F1 bis F4;
ohne Mittelspannung, d.h. für σ_m ist $K_{A,K,\sigma} = 1$
- ggfs. Vergleichs-Mittelspannung berücksichtigen
- Eigenspannungsfaktor $K_{E,\sigma}$
nach Tabelle 4.4.1
Geringe Eigenspannungen – nach Spannungsarmglühen, $K_{E,\sigma} = 1,54$
Mäßige Eigenspannungen – nach eigenspannungsmindernden Vorkehrungen, z.B. Schweißfolgeplan, $K_{E,\sigma} = 1,26$
Hohe Eigenspannungen – in allen anderen Fällen, $K_{E,\sigma} = 1,00$

FKM-Kapitel 4.4.3 Bauteil-Betriebsfestigkeit $\sigma_{B,K}$

- aus dem Spannungskollektiv und der Bauteilwöhlerlinie nach Gl. 4.4.43
 $\sigma_{B,K} = K_{B,K} * \sigma_{A,K}$
- Mehrstufenkollektive nach „Miner elementar“ oder „Miner konsequent“
- Bauteil-Wöhlerlinie Typ I
für horizontalen Verlauf nach dem Knick
Stahl und Eisengußwerkstoffe
aus den Erläuterungen zu den Bildern 4.4.5 und 4.4.6 ergibt sich, daß Typ I für alle geschweißten Bauteile gilt
- Bauteil-Wöhlerlinie Typ II
für geneigten Verlauf nach dem (letzten) Knick
ungeschweißte Aluminiumwerkstoffe
aus den Erläuterungen zu den Bildern 4.4.5 und 4.4.6 ergibt sich, daß Typ II für ungeschweißtes Aluminium wie für ungeschweißte Austenite gilt; auch bei Typ II wird jedoch nach einem zweiten Knick eine horizontale Wöhlerlinie erreicht

5.3.6 Sicherheitsfaktoren

FKM-Kapitel 4.5.0 Allgemeines

- Mittlere Überlebenswahrscheinlichkeit von $P, \bar{U} = 97,5 \%$
mit einer Statistischen Sicherheit von $S = 50 \%$ (Aussagewahrscheinlichkeit)

FKM-Kapitel 4.5.1 Stahl

- Sicherheitsfaktoren von 1,5 bis 1,2 aus Tabelle 4.5.1 je nach Inspektionsintervall und Schadensfolge

FKM-Kapitel 4.5.2 Eisengußwerkstoff

FKM-Kapitel 4.5.3 Aluminiumwerkstoff

FKM-Kapitel 4.5.4 Aluminiumgußwerkstoff

FKM-Kapitel 4.5.5 Gesamtsicherheitsfaktor

- aus Gl. 4.5.4 unter Berücksichtigung des Temperaturfaktors
 $j_{ges} = j_{D / K, T, d}$

5.3.7 Nachweis

FKM-Kapitel 4.6.0 Allgemeines

- für geschweißte Bauteile ist die Berechnung mit Strukturspannungen oder mit Kerbspannungen durchzuführen
- Nachweise für den Nahtübergang und die Wurzel sind jeweils getrennt durchzuführen.
- der zyklische Ausnutzungsgrad ist der Quotient aus der vorhandenen und der zulässigen Amplitude im Nachweispunkt
- der Nachweispunkt ist der kritische Punkt des Bauteils mit dem höchsten Auslastungsgrad

FKM-Kapitel 4.6.2 Flächenförmige Bauteile

- die Spannungsarten σ_x, σ_y und τ sind jeweils für sich und zusammengesetzt nach den Gln. 4.6.9 bis 4.6.12 nachzuweisen

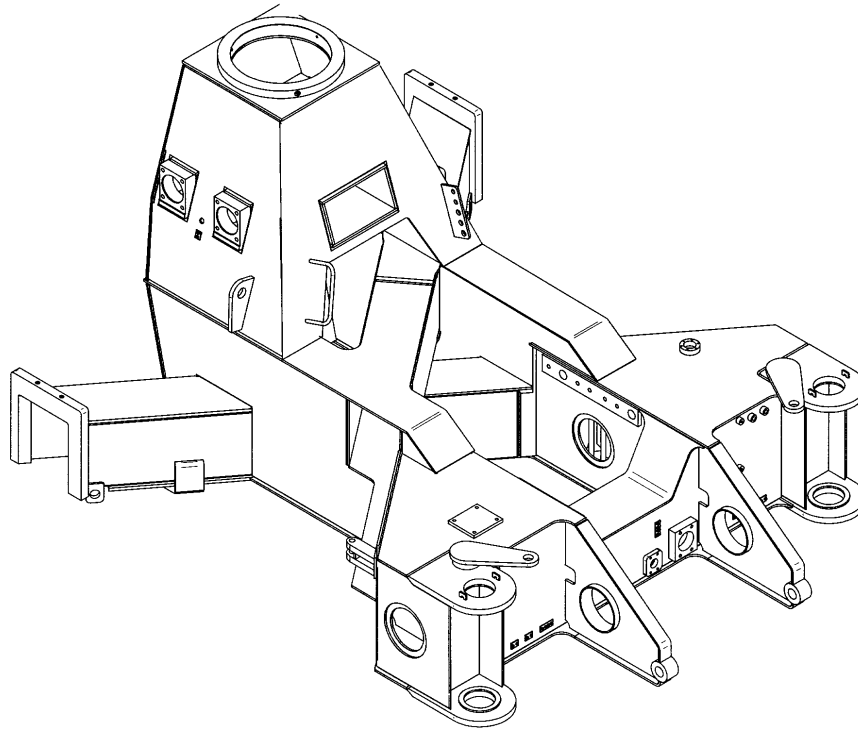
5.4 Kritik

In willkürlicher Reihenfolge werden Punkte aufgeführt, die mir negativ aufgefallen sind.

- Begriffe entsprechen z.T. nicht der gebräuchlichen Fachsprache:
fachgerecht geschweißte Bauteile (Abs. 4.2.1.2) ... was ist das?
schweißbarer Baustahl (Abs. 4.2.1.2) – statt schweißgeeignet
- „Zulässig sind Schweißnahtimperfectionen, die normalen Herstellungsstandards entsprechen“ (Abs. 4.2.1.2 Fußnote 5) ... was sind „normale“ Standards?
- Der Wert FAT0 in Abs. 7.6 ist als Begriff nicht eingeführt und wird in Abs. 4.3.1.2 Gln. 4.3.4 ff auch nicht verwendet.
- Über bzw. im Vorspann zu den FAT-Tabellen im Abs. 5.4 ist nicht angegeben, daß es sich bei den Zahlenwerten um Spannungsdoppelamplituden handelt. Dies ist gefährlich, da sonst im Rahmen der FKM-Richtlinie nur mit Amplituden gerechnet wird.
- Es ist nicht angegeben, aus welchen Stützstellen man die Strukturspannung extrapoliert.
- Das Werk enthält viele Schreibfehler, auch in Formeln.
Für die 5. Auflage und 200 EUR erwartet man eine professionelle Schlußredaktion.

6. Praktische Beispiele

6.1 Fahrzeugrahmen (ANAKON/Knödel 2007)



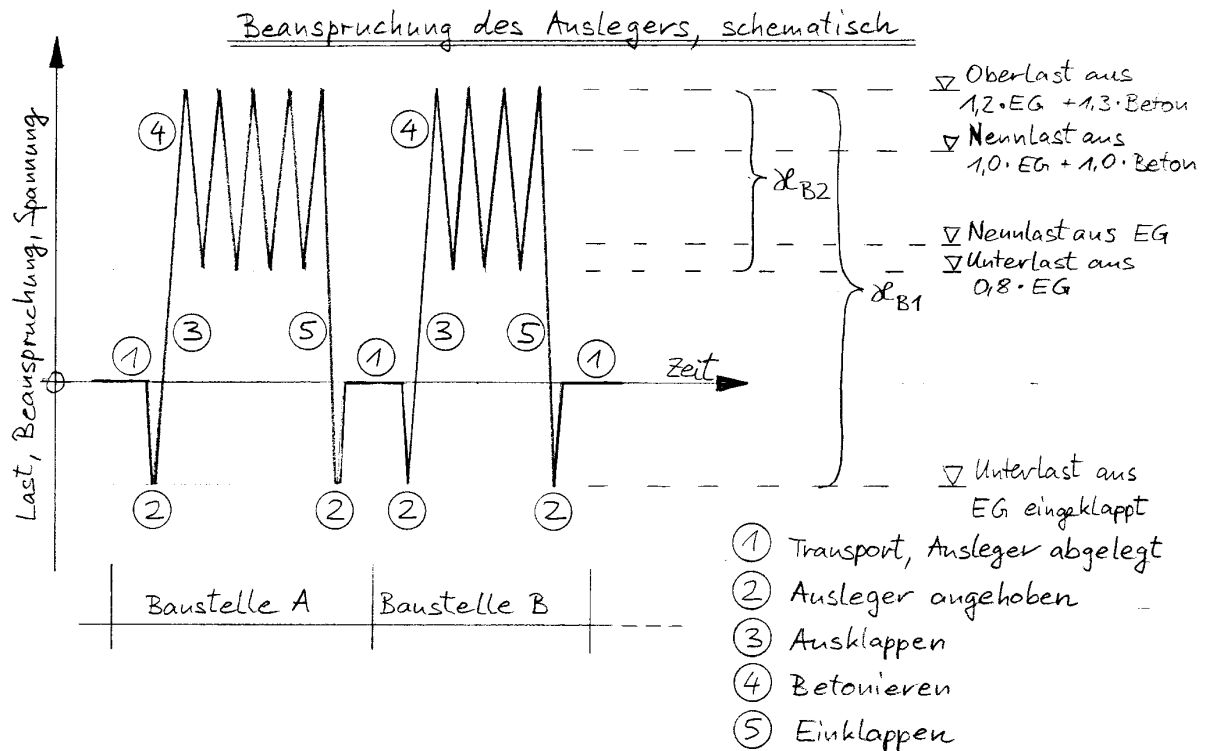
(Quelle: Fa. ELBA ca. 2002)

Die Firma ANAKON GmbH wurde kürzlich mit den Ermüdungsnachweisen für einen ELBA-Fahrzeugrahmen für eine „Betonpumpe“ beauftragt. In dem obigen Bild ist ein Vorgängermodell dargestellt, das inzwischen von ELBA weiterentwickelt wurde.

Aus Gründen der Einfachheit wird im folgenden Zahlenbeispiel angenommen, daß der Rahmen durchgehend aus S355 gefertigt wird.

6.1.1 Kollektiv Abs. 4.1

Die folgenden Angaben zu den Beanspruchungskollektiven sind einer Berechnung des zugehörigen Pumpenauslegers entnommen. Vereinfachend wird angenommen, daß die gleichen Zyklenzahlen und Spannungsveränderungen auch an den kritischen Stellen des Rahmens auftreten.



(Auszug aus ANAKON 2003)

Anzahl der Ein- und Ausklappzustände in einer Lebensdauer von 20 Jahren bei bestimmten Annahmen zur täglichen Einsatzdauer (siehe ANAKON 2003)

$$N1 = 6 \cdot 10^3$$

(geforderter Kollektivumfang der ersten Stufe)

Anzahl der Lastspiele in einer Lebensdauer von 20 Jahren bei bestimmten Annahmen zur täglichen Einsatzdauer und einem vollen Lastspiel des Armes pro Minute (Wippen in ausgefahrenem Zustand während des Betonierens, siehe ANAKON 2003). Der Arm schwingt dabei mit den in DIN 24117 vorgegebenen Schwingbeiwerten.

$$N2 = 1,4 \cdot 10^6$$

(geforderter Kollektivumfang der zweiten Stufe)

Kollektivumfang gesamt:

$$N_{ges} = N1 + N2 = 6 \cdot 10^3 + 1,4 \cdot 10^6 = 1,406 \cdot 10^6$$

Die $6 \cdot 10^3$ Lastwechsel der ersten Stufe sind vernachlässigbar – damit liegt ein „einfaches“ Einstufen-Kollektiv vor, dieses entspricht unmittelbar dem Wöhler-Versuch.

Genauere Begründung:

Die zugehörigen Ober- und Unterspannungen liegen unterhalb $f_y / 1,5$;
gleichzeitig liegt die Lastspielzahl innerhalb des Bereichs „vorwiegend ruhende Beanspruchung“;
hinsichtlich einer Ermüdungsbeanspruchung sind daher aus dieser Stufe keine Schädigungen zu erwarten.

Das Spannungsverhältnis beim Betonieren beträgt für den innersten Arm ohne Berücksichtigung der Querbiegung, z.B. aus Wind (siehe ANAKON 2003)

$$R = \sigma_{,u} / \sigma_{,o} = +0,29$$

Auf der sicheren Seite liegend wird mit einem Wert

$$R = 0$$

weiter gerechnet ((sehr) konservativ, aber zeitsparend).

Die normierten Spannungswerte sind (siehe obiges Bild):

Zugseite:

Oberspannung: $\sigma_{,o} = +1$

Unterspannung: $\sigma_{,u} = \sigma_{,o} * R = 1 * 0 = +0$

Mittelspannung: $\sigma_{,m} = (\sigma_{,o} + \sigma_{,u})/2 = (1 + 0)/2 = +0,5$

Spgs.-Amplitude: $\sigma_{,a} = \sigma_{,o} - \sigma_{,m} = +1 - (+0,5) = +0,5$

Druckseite:

Oberspannung: $\sigma_{,o} = +0$

Unterspannung: $\sigma_{,u} = -1$

Mittelspannung: $\sigma_{,m} = -0,5$

Spgs.-Amplitude: $\sigma_{,a} = +0,5$

Spannungsverhältnis: $R = -1 / +0 = -\infty$

Hinweis 1:

In den klassischen Dauerfestigkeitsnormen ist „Oberspannung“ jeweils der betragsmäßig größere Wert. Das Spannungsverhältnis R kann daher nur zwischen +1 und -1 liegen, da immer der größere Betrag im Nenner steht.

Hinweis 2:

Möglicherweise müssen bei einem praktischen Anwendungsfall noch weitere Überlegungen hinsichtlich des Lastkollektives angestellt werden.

6.1.2 Werkstoff Abs. 4.2

Temperaturfaktor für „normale“ Temperatur nach Gl. 4.2.5, d.h. für -40°C bis $+100^{\circ}\text{C}$:

$$K_{T,D} = 1$$

Zyklenzahl am Knick (vor Gl. 4.2.3)

$$N_{D,\sigma} = 5 \cdot 10^6$$

Schweißnahtspezifische Wechselfestigkeitswerte nach Gl. 4.2.3

(unabhängig von der Festigkeit des Stahls)

$$\sigma_{W,W} = 92 \text{ MPa}$$

$$\tau_{W,s} = 37 \text{ MPa}$$

6.1.3 Konstruktion Abs. 4.3

Nichtlinearitätsfaktor $K_{NL,E}$ aus Gl. 4.3.32

$$K_{NL,E} = 1,0$$

Schutzschichtfaktor K_S aus Abs. 4.3.4

$$K_S = 1,0$$

Randschichtfaktor K_V aus Abs. 4.3.4

$$K_V = 1,0$$

Bauteilklasse FAT aus Abs. 4.3.6

Aus dem Kerbfallkatalog in Abs. 5.4 folgt für die quer-aufgeschweißte Rippe:

Zeile 511, Kehlnaht, auch einseitig

$$\text{FAT} = 80$$

Dickenfaktor f_t aus Abs. 4.3.7 Gl. 4.3.33

$$f_t = 1,0$$

Konstruktionsfaktor $K_{WK,\sigma}$ nach Gl. 4.3.4 für Strukturspannungen:

$$K_{WK,\sigma} = 225 / (\text{FAT} * f_t * K_V * K_{NL,E})$$

$$K_{WK,\sigma} = 225 / (80 * 1,0 * 1,0 * 1,0) = 2,81$$

Konstruktionsfaktor $K_{WK,\sigma K}$ nach Gl. 4.3.9 effektive Kerbspannungen:

$$K_{WK,\sigma K} = 1 / (K_V * K_S * K_{NL,E})$$

$$K_{WK,\sigma K} = 1 / (1,0 * 1,0 * 1,0) = 1,00$$

6.1.4 Bauteilfestigkeit Abs. 4.4

Ertragbarer örtlicher Wert der Bauteil-Wechselfestigkeit σ_{WK} für Zugdruck nach Gl. 4.4.2:

$$\sigma_{WK} = \sigma_{W,zd} / K_{WK,\sigma K}$$

$$\sigma_{WK} = 92 \text{ MPa} / 2,81 = 32,7 \text{ MPa}$$

Für effektive Kerbspannungen:

$$\sigma_{WK} = 92 \text{ MPa} / 1,00 = 92 \text{ MPa}$$

Eigenspannungsfaktor $K_{E,\sigma}$ und Mittelspannungsempfindlichkeit M_{σ} nach Tab. 4.4.1:

Keine Eigenspannungsmindernden Vorkehrungen – hohe Eigenspannungen

$$K_{E,\sigma} = 1,0$$

$$M_{\sigma} = 0$$

Hinweis: bei mäßigen Eigenspannungen erhält man

$$K_{E,\sigma} = 1,26$$

$$M_{\sigma} = 0,15$$

Überlastfall F2:

Bei einer Überlastung im Betrieb bleibt das Spannungsverhältnis R konstant (wird hier als zutreffend angenommen)

Für $R = +0$ und $R = -\infty$ trifft der Mittelspannungsbereich II nach Gl. 4.4.10 zu:

$$K_{AK,\sigma} = 1 / (1 + M_{\sigma} * \sigma_m / \sigma_a)$$

Zugseite

$$K_{AK,\sigma} = 1 / (1 + 0 * (+0,5) / (+0,5)) = 1$$

Druckseite

$$K_{AK,\sigma} = 1 / (1 + 0 * (-0,5) / (+0,5)) = 1$$

Exkurs:

Nimmt man „mäßige Eigenspannungen“ aufgrund eines diesbezüglich erfolgreichen Schweißplanes an, so erhält man $M_{\sigma} = 0,15$, und weiter

Zugseite

$$K_{AK,\sigma} = 1 / (1 + 0,15 * (+0,5) / (+0,5)) = 0,87$$

Druckseite

$$K_{AK,\sigma} = 1 / (1 + 0,15 * (-0,5) / (+0,5)) = 1,18$$

Ertragbare örtliche Werte der Amplitude σ_{AK} der Bauteil-Dauerfestigkeit:

$$\sigma_{AK} = K_{AK,\sigma} * K_{E,\sigma} * \sigma_{WK}$$

Zugseite

$$\sigma_{AK} = 1,00 * 1,0 * 32,7 \text{ MPa} = 32,7 \text{ MPa}$$

Druckseite

$$\sigma_{AK} = 1,00 * 1,0 * 32,7 \text{ MPa} = 32,7 \text{ MPa}$$

Für effektive Kerbspannungen

Zug- und Druckseite:

$$\sigma_{AK} = 1,00 * 1,0 * 92 \text{ MPa} = 92 \text{ MPa}$$

Exkurs für mäßige Eigenspannungen:

$$\sigma_{AK} = K_{AK,\sigma} * K_{E,\sigma} * \sigma_{WK}$$

Zugseite

$$\sigma_{AK} = 0,87 * 1,26 * 32,7 \text{ MPa} = 35,9 \text{ MPa}$$

Druckseite

$$\sigma_{AK} = 1,18 * 1,26 * 32,7 \text{ MPa} = 48,6 \text{ MPa}$$

Für effektive Kerbspannungen

Zugseite

$$\sigma_{AK} = 0,87 * 1,26 * 92 \text{ MPa} = 100,9 \text{ MPa}$$

Druckseite

$$\sigma_{AK} = 1,18 * 1,26 * 92 \text{ MPa} = 136,8 \text{ MPa}$$

Knickpunktzyklenzahl $N_{D,\sigma}$ und Neigungsexponent der Wöhlerlinie k_{σ} nach Tabelle. 4.4.4 für ein geschweißtes Bauteil mit Wöhlerlinie Typ I:

$$N_{D,\sigma} = 5 * 10^6$$

(Hinweis: dieser Wert wurde schon in Abs. 4.2 bestimmt)

$$k_{\sigma} = 3,0$$

Betriebsfestigkeitsfaktor $K_{BK,\sigma}$ für ein Einstufenkollektiv, nach Gl. 4.4.47:

$$K_{BK,\sigma} = (N_{D,\sigma} / N_{\text{quer}})^{1/k_{\sigma}}$$

Mit N_{quer} als gefordertem Kollektivumfang (dieser Wert wurde oben als N_2 bezeichnet)

$$K_{BK,\sigma} = (5 * 10^6 / 1,4 * 10^6)^{1/3} = 1,53$$

Ertragbare örtliche Werte der Amplitude σ_{BK} der Bauteil-Betriebsfestigkeit nach Gl. 4.4.43:

$$\sigma_{BK} = K_{BK,\sigma} * \sigma_{AK}$$

Zugseite

$$\sigma_{BK} = 1,53 * 32,7 \text{ MPa} = 50,0 \text{ MPa}$$

Druckseite

$$\sigma_{BK} = 1,53 * 32,7 \text{ MPa} = 50,0 \text{ MPa}$$

Für effektive Kerbspannungen

Zug- und Druckseite:

$$\sigma_{,BK} = 1,53 * 92 \text{ MPa} = 140,8 \text{ MPa}$$

Exkurs für mäßige Eigenspannungen:

$$\sigma_{,BK} = K_{,BK,\sigma} * \sigma_{,AK}$$

Zugseite

$$\sigma_{,BK} = 1,53 * 35,9 \text{ MPa} = 54,9 \text{ MPa}$$

Druckseite

$$\sigma_{,BK} = 1,53 * 48,6 \text{ MPa} = 74,4 \text{ MPa}$$

Für effektive Kerbspannungen

Zugseite

$$\sigma_{,BK} = 1,53 * 100,9 \text{ MPa} = 154,4 \text{ MPa}$$

Druckseite

$$\sigma_{,BK} = 1,53 * 136,8 \text{ MPa} = 209,3 \text{ MPa}$$

6.1.5 Sicherheitsfaktoren Abs. 4.5

Temperaturfaktor $K_{,t,D}$ aus Kapitel 4.2.3 (Werkstoffeigenschaften)

Sicherheitsfaktor aus Tabelle 4.5.1

Die Schadensfolge wird als „nicht katastrophal“ eingestuft;

Es wird eine „regelmäßige Inspektion“ im Sinne einer Schadensfrüherkennung angenommen: $j_{,D} = 1,2$

Gesamtsicherheitsfaktor nach Gl. 4.5.4

$$j_{,ges} = j_{,D} / K_{,T,D}$$

$$j_{,ges} = 1,2 / 1,0 = 1,2$$

6.1.6 Nachweis Abs. 4.6

Zulässige örtliche Werte der Amplitude $\sigma_{,AK}$ der Bauteil-Betriebsfestigkeit in Anlehnung an Gl.

4.6.8:

$$\sigma_{,BK,zul} = \sigma_{,BK} / j_{,ges}$$

Zugseite

$$\sigma_{,BK,zul} = 50 \text{ MPa} / 1,2 = 41,7 \text{ MPa}$$

Druckseite

$$\sigma_{,BK,zul} = 50 \text{ MPa} / 1,2 = 41,7 \text{ MPa}$$

Für effektive Kerbspannungen

Zug- und Druckseite:

$$\sigma_{\text{BK,zul}} = 140,8 \text{ MPa} / 1,2 = 117,3 \text{ MPa}$$

Exkurs für mäßige Eigenspannungen:

$$\sigma_{\text{BK,zul}} = \sigma_{\text{BK}} / j_{\text{ges}}$$

Zugseite

$$\sigma_{\text{BK,zul}} = 54,9 \text{ MPa} / 1,2 = 45,8 \text{ MPa}$$

Druckseite

$$\sigma_{\text{BK,zul}} = 74,4 \text{ MPa} / 1,2 = 62,0 \text{ MPa}$$

Für effektive Kerbspannungen

$$\sigma_{\text{BK,zul}} = 154,4 \text{ MPa} / 1,2 = 128,7 \text{ MPa}$$

Druckseite

$$\sigma_{\text{BK,zul}} = 209,3 \text{ MPa} / 1,2 = 174,4 \text{ MPa}$$

Der eigentliche Nachweis, d.h. die Ermittlung eines Ausnutzungsgrades

$$a_{\text{BK},\sigma} = \sigma_{\text{a},1} / \sigma_{\text{BK,zul}} \leq 1,0$$

mit

$\sigma_{\text{a},1}$ als Spannungsamplitude in der Kollektivstufe 1

erfolgt dann mit den aus der FEM gewonnenen Struktur- oder Kerbspannungen.

6.1.7 Bewertung

Die dargestellte Ermittlung einer zulässigen Amplitude muß in gleicher Weise für die Spannungen σ_x , σ_y und τ durchgeführt werden.

Die umständliche, vor- und zurück springende Ermittlung von Zahlenwerten könnte wesentlich vereinfacht werden, wenn man einen „roten Faden“ bekäme wie im folgenden dargestellt.

Die zuletzt ermittelte örtlich ertragbare Amplitude der Bauteil-Betriebsfestigkeit (hier ohne Sicherheitsfaktoren) setzt sich bei hohen Eigenspannungen wie folgt zusammen:

örtlich ertragbare Amplitude der Bauteil-Betriebsfestigkeit	schweißnahtspezifische Wechselfestigkeit	Mittelspannungsfaktor	Eigenspannungsfaktor	Betriebsfestigkeitsfaktor	Randschichtfaktor	Nichtlinearitätsfaktor für Gußeisen	(indirekte Berücksichtigung der Spannungskonzentration)	Dickenfaktor
$\sigma_{BK} =$	$\sigma_{W,W}$	* K,AK	* K,E, σ	* K,BK	* KV	* K,NL,E	* FAT / FAT0	* f,T
Für Strukturspannungen								
50	92	1	1	1,53	1	1	80 / 225	1
Für effektive Kerbspannungen								
141	92	1	1	1,53	1	1	1	1

Hinweis: Diese Formel steht auch an versteckter Stelle in der FKM-Richtlinie, ist dort aber bezeichnenderweise nicht nummeriert.

Die angegebene Amplitude ist der bei der vorhandenen Mittelspannung, der vorhandenen Kollektiv-Fülligkeit und dem geforderten Kollektivumfang ertragbare Wert.

Die Dauerwechselfestigkeit Zug-Druck (d.h. Spannungsamplitude bei $R = -1$) beträgt:

- a) für Schweißnähte nach dem Strukturspannungskonzept 92 N/mm^2 (siehe Gl. 4.2.3)
 die Spannungsdoppelamplitude beträgt daher 184 N/mm^2

Die Spannungsdoppelamplitude der Bauteilkategorie beträgt

- b) für den Grundwerkstoff FAT 160 (Abs. 5.4.0 Fußnote 2)
 bzw. 162 nach Gl. 4.2.1 (siehe oben)
- c) für Schweißnähte nach dem Konzept der effektiven Kerbspannungen
 $FAT0 = FAT 225$ (Abs. 5.4.0 Fußnote 2)

Aus dem Vergleich von b) und c) läßt sich schließen:

Der Grundwerkstoff enthält im Gefüge und an der Oberfläche Fehler die einem effektiven Konstruktionsfaktor

$$K = 225 / 160 = 1,41$$

entsprechen.

Dies deckt sich nicht mit den Angaben in DIN 15018, wo in Tabelle 17 für W0 (ungeschweißter Grundwerkstoff), B6 und $\kappa = -1$ eine zulässige Spannung von 120 N/mm^2 , d.h. Spannungsdoppelamplitude von 240 N/mm^2 angegeben ist.

Aus dem Vergleich von a) und b) läßt sich schließen:

Eine Stumpfnah ohne geometrische Kerben, d.h. blecheben bearbeitet, hat mit 184 N/mm^2 eine höhere Spannungsdoppelamplitude als der ungeschweißte Grundwerkstoff?

Der für die eingebnete Naht angegebene Wert deckt sich einigermaßen mit den Angaben in DIN 15018. Dort ist in Tabelle 17 für K0, B6 und $\kappa = -1$ eine zulässige Spannung von 84 N/mm^2 , d.h. Spannungsdoppelamplitude 168 N/mm^2 angegeben.

Aus dem Vergleich von a) und c) läßt sich schließen:

Eine Stumpfnah ohne geometrische Kerben, d.h. blecheben bearbeitet, enthält Fehlstellen, an denen Spannungserhöhungen auftreten, die einem effektiven Konstruktionsfaktor

$$K = 225 / 184 = 1,22$$

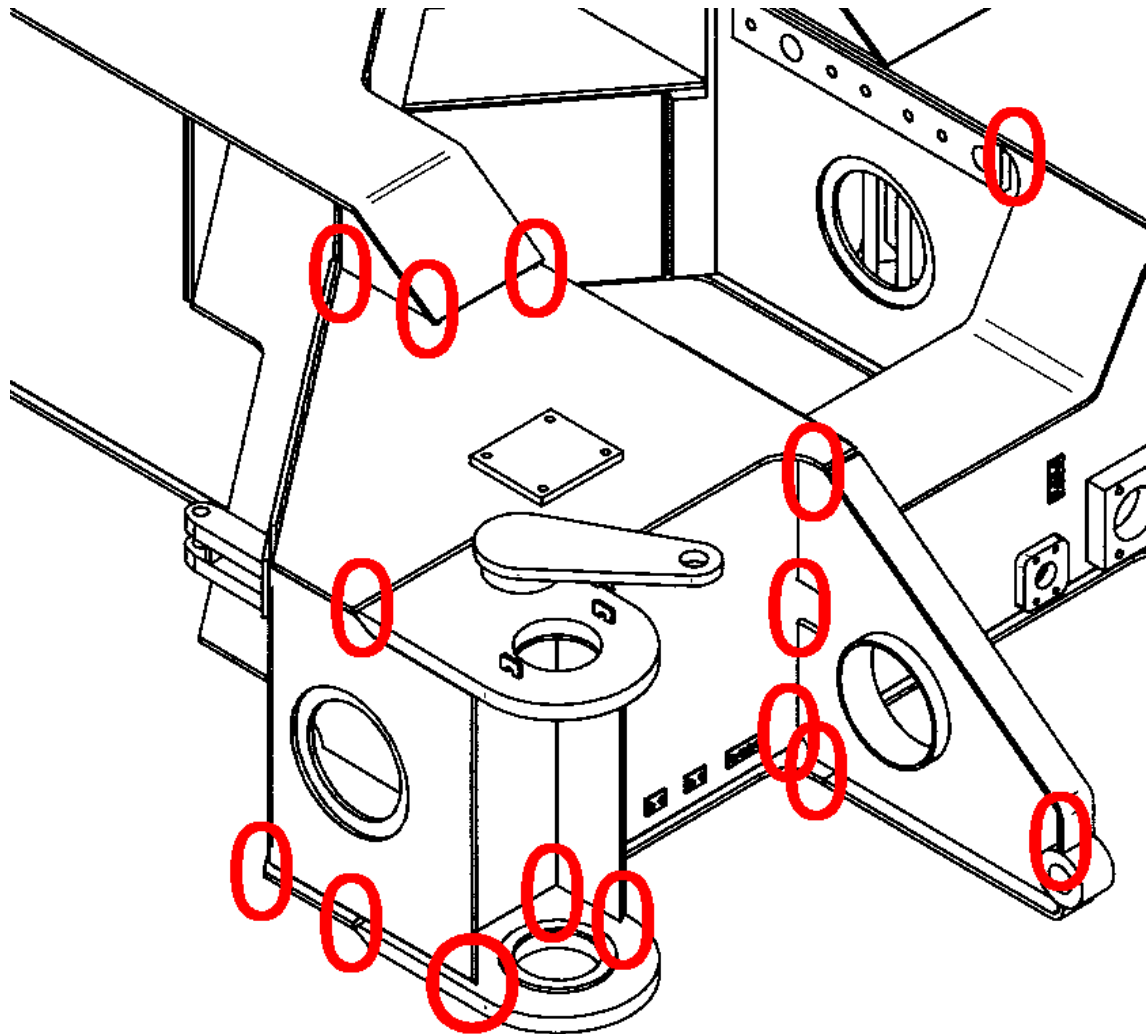
entsprechen.

In DIN 15018 ist in Tabelle 17 für W0, B6 und $\kappa = -1$ eine zulässige Spannung von 120 N/mm^2 angegeben, für K0, B6 und $\kappa = -1$ eine zulässige Spannung von 84 N/mm^2 . Dies ergibt ein Verhältnis der zulässigen Spannungen von

$$K = 120 / 84 = 1,43$$

Hinweis: Die vorstehend aufgeführten Unstimmigkeiten sind möglicherweise darauf zurückzuführen, daß die Festlegung von FAT 160 als Obergrenze für ungeschweißte Bauteile z.B. in EC3 recht willkürlich geschehen ist.

Der Nachweis ist jeweils an der „kritischen“ Stelle des Bauteils zu führen. Bei komplexen Bauteilen ist die kritische Stelle oft nicht von vorne herein zu erkennen, so daß man an allen Stellen auswerten muß, die kritisch werden könnten. Die in Frage kommenden Stellen sind nachfolgend an einem Ausschnitt des Fahrzeugrahmens dargestellt.



ELBA-Fahrzeugrahmen (Ausschnitt)

Auswahl möglicher ermüdungskritischer Punkte

6.2 Rippe quer (Knödel)

Beispielrechnung für einen längsbeanspruchten Blechstreifen mit aufgeschweißter Querrippe, modelliert als 2-D-Scheibe.

Geometrie:

10 mm	Dicke durchlaufendes Blech
60 mm	Länge durchlaufendes Blech
10 mm	Dicke Rippe
10 mm	Höhe Rippe

4 mm a-Maß der Doppelkehlnaht als gleichschenklige Flachnaht

0,5 mm Wurzelspalt

1,0 mm effektiver Kerbradius an einspringenden Ecken

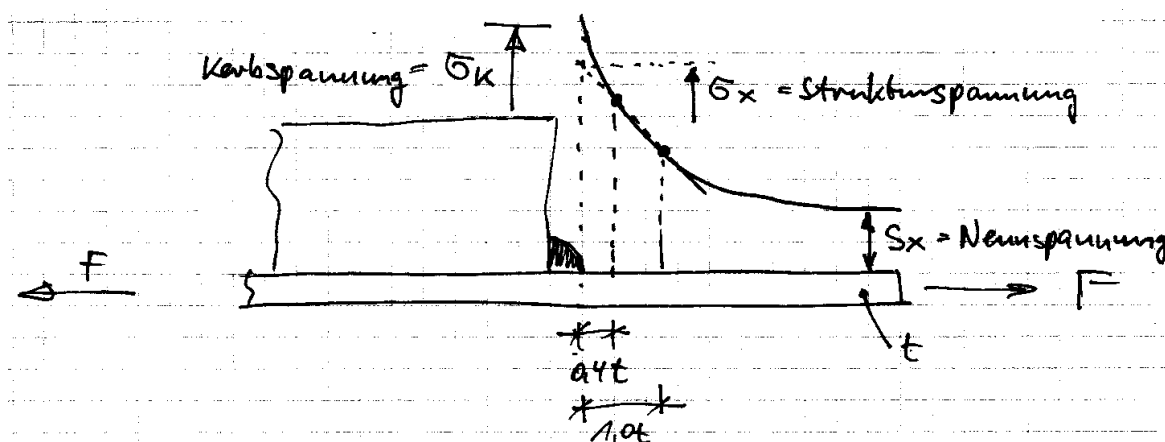
Aus Symmetriegründen wird nur 1/4-System modelliert.

Beanspruchung:

100 N/mm² eingestellte Nennspannung im durchlaufenden Blech

Kenngrößen der Berechnung:

ANSYS 5.3, SHELL181 (4 Knoten Schalenelement), lineare Berechnung

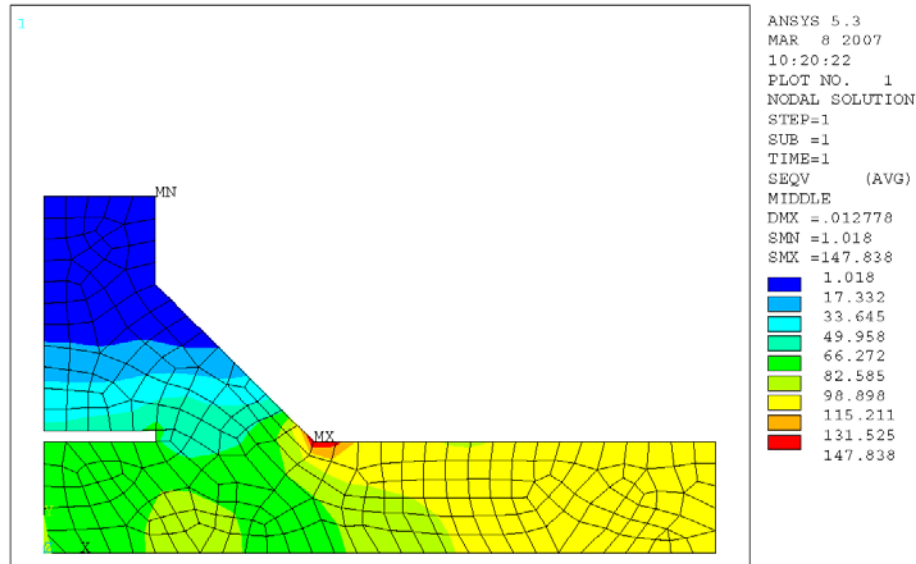


Auswertung der Strukturspannungen (siehe Knödel 2006)

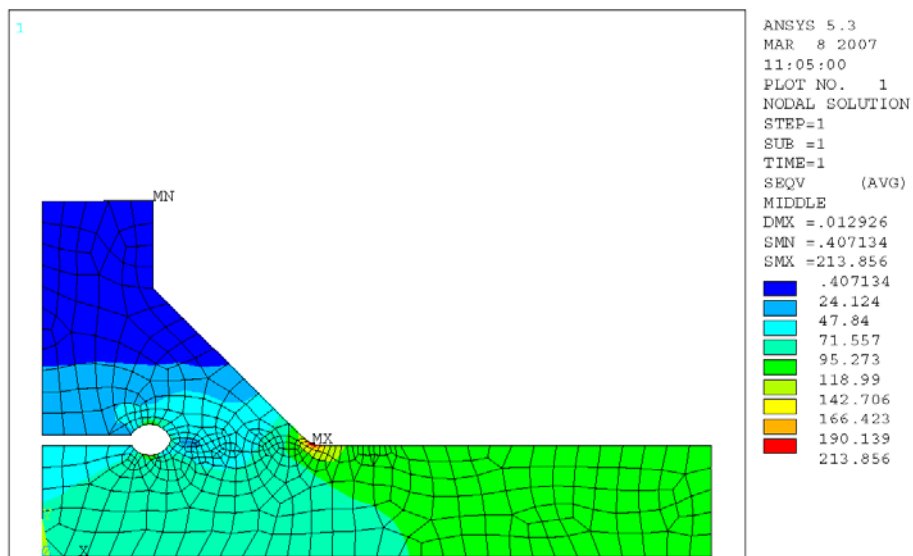
Ergebnisse:

Nr.	Elementgröße grob [mm]	Elementgröße fein [mm]	Kerbspannung [N/mm ²]	Strukturspannung [N/mm ²]	Bemerkung
1	1,0	1,0	147,8	101,6	keine Ausrundungen Spannungsminimum in der Rippen-ecke
2	1,0 = 1/1	0,25 = 1/4	213,9	101,0	mit Ausrundungen
3	0,5 = 1/2	0,125 = 1/8	227,1	101,0	

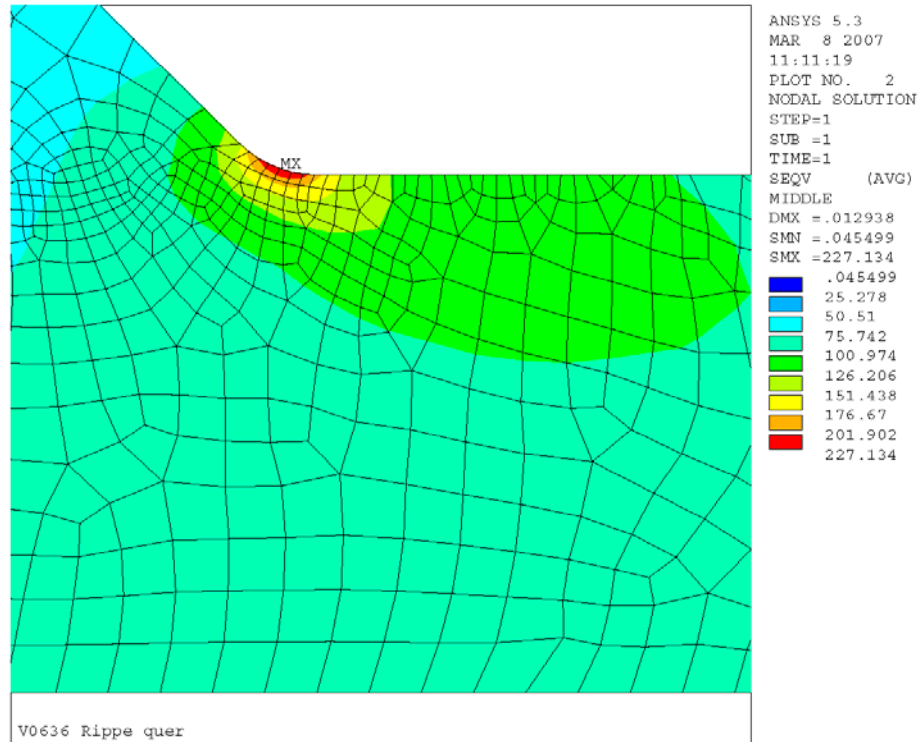
5	0,25 = 1/4	0,0625 = 1/16	223,2	96,5	I/O-Zeit 2 Minuten
6	0,5 = 1/2	0,050 = 1/20	232,5	101,0	
4	0,10 = 1/10	0,025 = 1/40	300,9	126,2	I/O-Zeit 40 Minuten



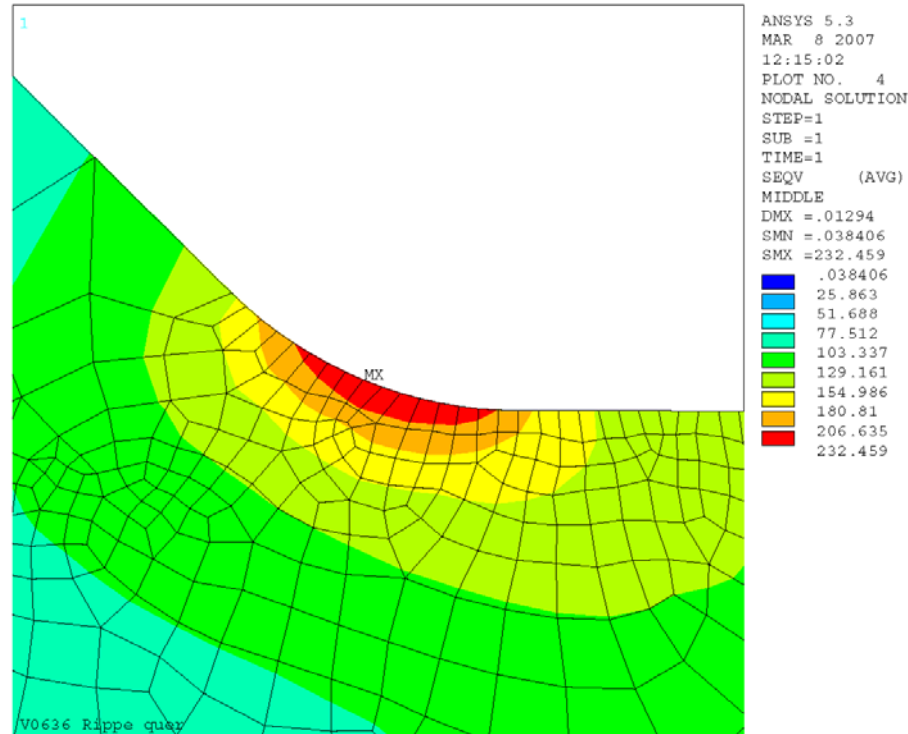
Elementeinteilung und Vergleichsspannungen zu Nr. 1



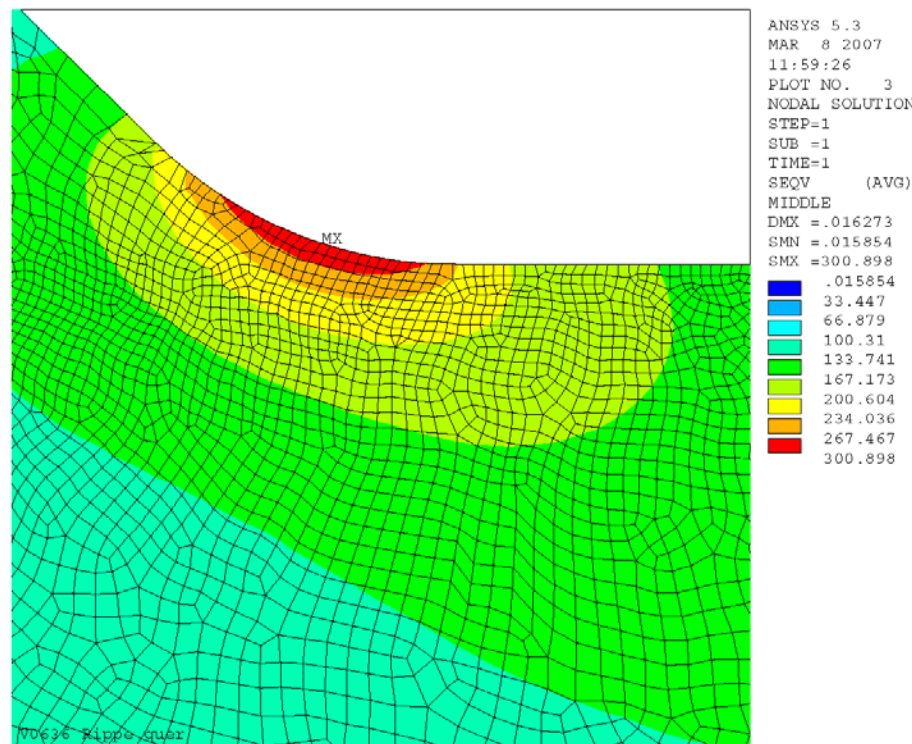
Elementeinteilung und Vergleichsspannungen zu Nr. 2



Elementeinteilung und Vergleichsspannungen zu Nr. 3



Elementeinteilung und Vergleichsspannungen zu Nr. 6



Elementeinteilung und Vergleichsspannungen zu Nr. 4

Die Ergebnisse sind in dieser Form unschlussig, man müsste noch etliche Rechnungen machen, um diese Unstimmigkeit aufzuklären.

- Was ist der „richtige“ Wert für die Kerbspannung – ca. 235 N/mm^2 ?
(dann wäre der Wert 300 N/mm^2 aus Rechnung Nr. 4 unplausibel)
- Oder liegt der „richtige“ Wert bei 300 N/mm^2 und die Konvergenz bei 235 N/mm^2 ist nur scheinbar – „hingesteuert“ durch die Elementeinteilung?

Hinweis:

Dr. Telljohann erhält in einer 3-D-Rechnung den Wert 270 N/mm^2

Würde man den Wert 235 N/mm^2 als zutreffend für die Kerbspannungen betrachten, dann erhielte man aus dem Verhältnis von Kerbspannung und Nennspannung eine Formzahl von 2,35.

Mit der oben für den Fahrzeugrahmen ermittelten zulässigen Kerbspannungsamplitude von $117,3 \text{ N/mm}^2$ erhält man daraus eine zulässige Nennspannungsamplitude von

$$S_{,a} = 117,3 \text{ N/mm}^2 / 2,35 = 50,0 \text{ N/mm}^2$$

zulassen.

Für die Strukturspannung wird ein Wert von 101 N/mm^2 als zutreffend angesehen, dies ergibt eine Formzahl von 1,01. Mit dem oben für den Fahrzeugrahmen ermittelten Werte für die zulässige Strukturspannungsamplitude von $41,7 \text{ N/mm}^2$ erhält man daraus eine zulässige Nennspannungsamplitude von

$$S_{,a} = 41,7 \text{ N/mm}^2 / 1,01 = 41,3 \text{ N/mm}^2$$

Hätte man das oben als FAT 80 eingestufte Bauteil mit dem Nennspannungskonzept bemessen, hätte man unter Berücksichtigung des Betriebsfestigkeitsfaktors und des Sicherheitsfaktors erhalten (Division durch 2 wegen Amplitude)

$$S_{,a,zul} = 0,5 * 80 \text{ N/mm}^2 * 1,53 / 1,2 = 51 \text{ N/mm}^2$$

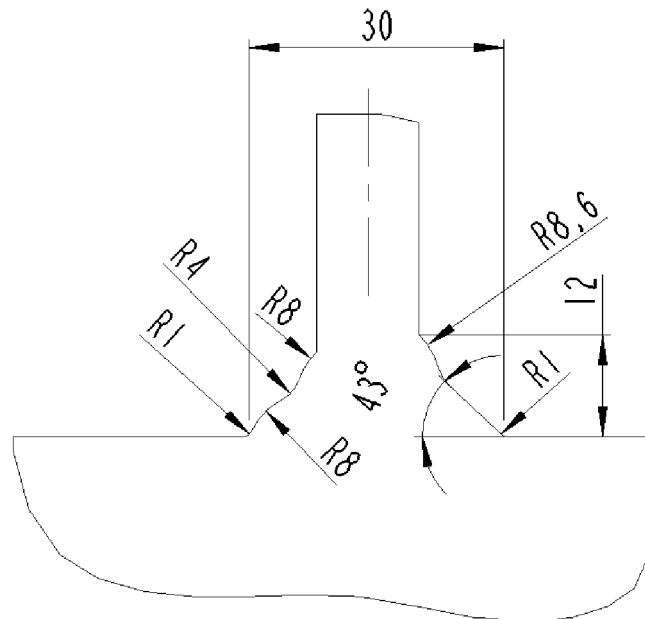
Nach DIN 15018 Tabelle 31 hätte man in K3 eingestuft und mit B6 und $\kappa = -1$ eine zulässige Spannung von 45 N/mm^2 erhalten.

6.3 Rippe quer (DYNATEC 2006)

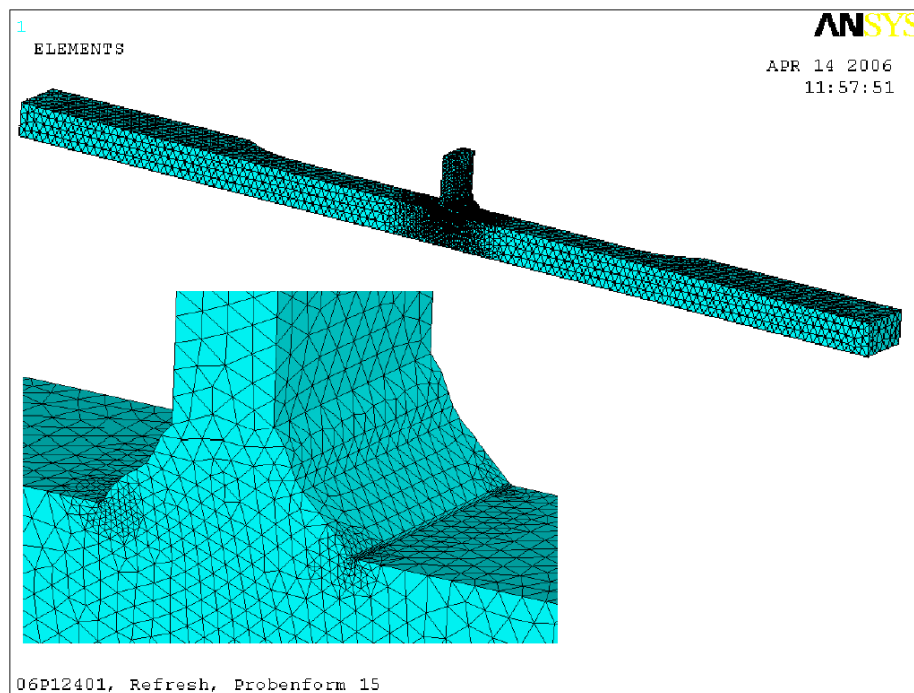
Das folgende Beispiel wurde im Rahmen des Forschungsprogramms REFRESH (siehe Literaturverzeichnis) von Herrn Kollegen Dr. Telljohann, Ingenieurbüro DYNATEC, Braunschweig, gerechnet.

Für das gezeigte durchlaufende Blech mit aufgeschweißter Querrippe wurden Berechnungen nach der FKM-Rili durchgeführt, wobei ein tatsächlich ausgeführter und vermessener Nahtquerschnitt des Probekörpers 15 zugrunde gelegt wurde (siehe folgendes Bild). Die Probekörper wurden im Ermüdungsversuch getestet, so daß innerhalb des Forschungsprogramms ein Rückschluß auf die Rechenergebnisse möglich ist.

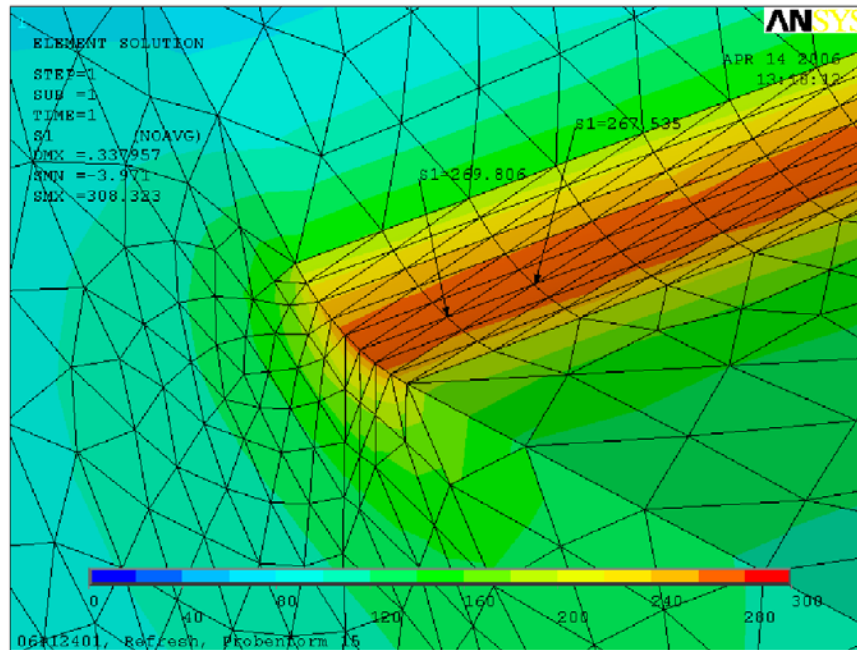
Wie im obigen Beispiel wurde auch hier eine Nennspannung von 100 N/mm^2 eingestellt.



Nahtquerschnitte (DYNATEC 2006)



3-D Netz (DYNATEC 2006)



Kerbspannungen aus der 3-D-Modellierung (DYNATEC 2006)
– nach Netzverfeinerung im Kerbgrund –

Aus dem Verhältnis von Kerbspannung und Nennspannung ergibt sich eine Formzahl von 2,7 bis 2,8.

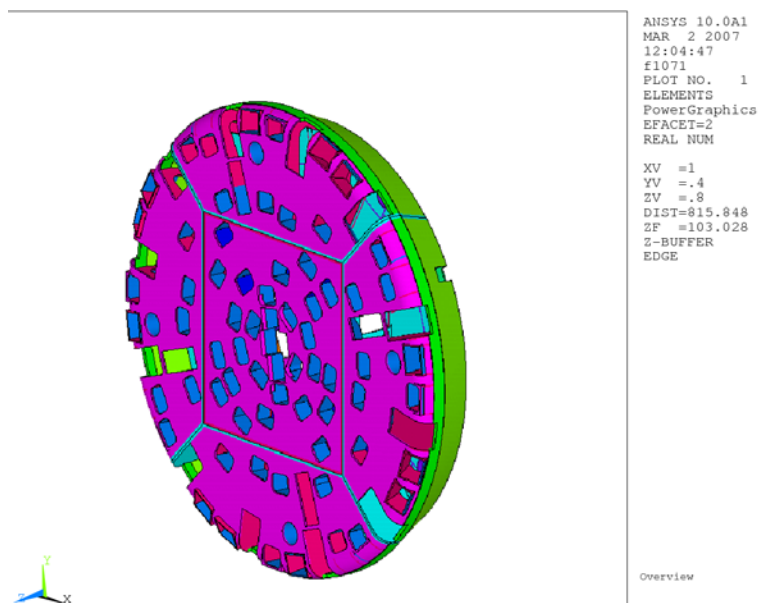
6.4 Herrenknecht-Bohrkopf (ANAKON 2007)

Tunnel-Bohrkopf der Fa. Herrenknecht, Berechnung durch Fa. ANAKON 2007. Ursprünglich war für diesen Vortrag vorgesehen, am Beispiel eines derartigen Bohrkopfes die Anwendung der FKM zu zeigen.

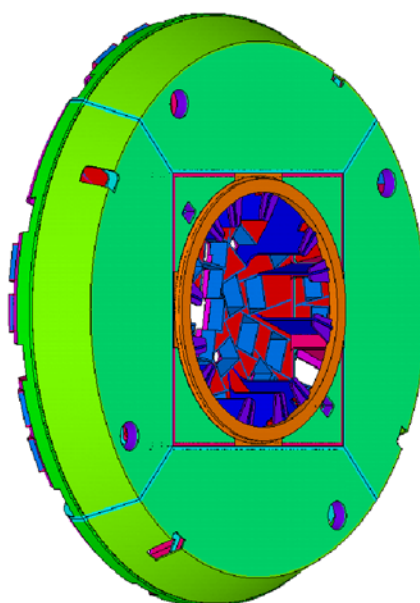
Abmessungen:

ca. 12 m Durchmesser

ca. 2 m Tiefe

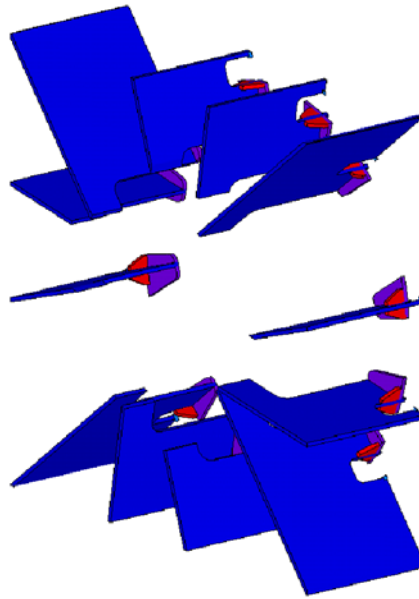


Bohrkopf Vorderseite (ANAKON 2007)

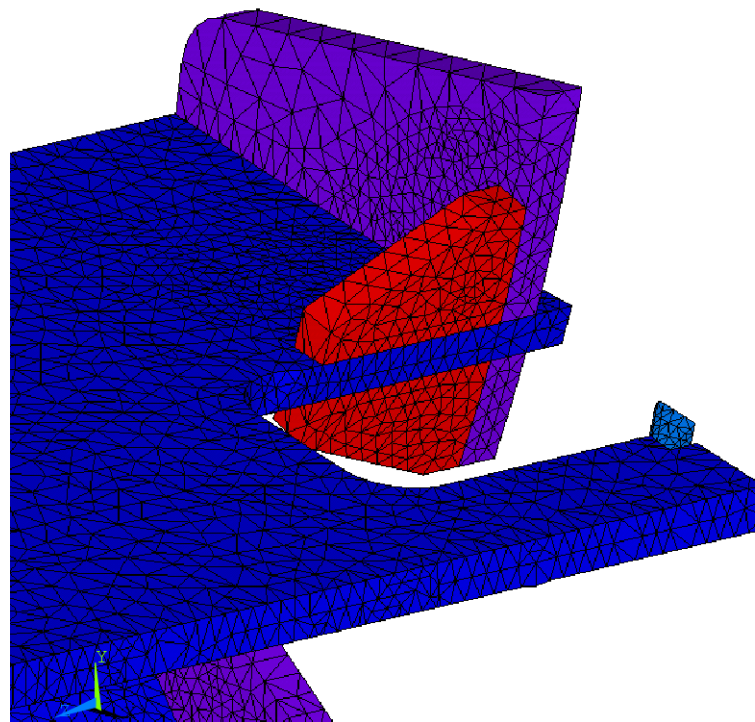


Bohrkopf Rückseite: 4 Segmente + Zentrum (ANAKON 2007)

Wegen des Transportes ist der Bohrkopf in ein Zentrum und 4 außenliegende Segmente geteilt. Im Inneren des Zentrums sind die dunkelblauen Räumerkanaalseitenbleche (siehe auch folgendes Bild) zu erkennen, die mit lila Anschlußblechen und roten Steifen an den Ring angeschlossen sind.



Räumerkanalseitenbleche (ANAKON 2007)



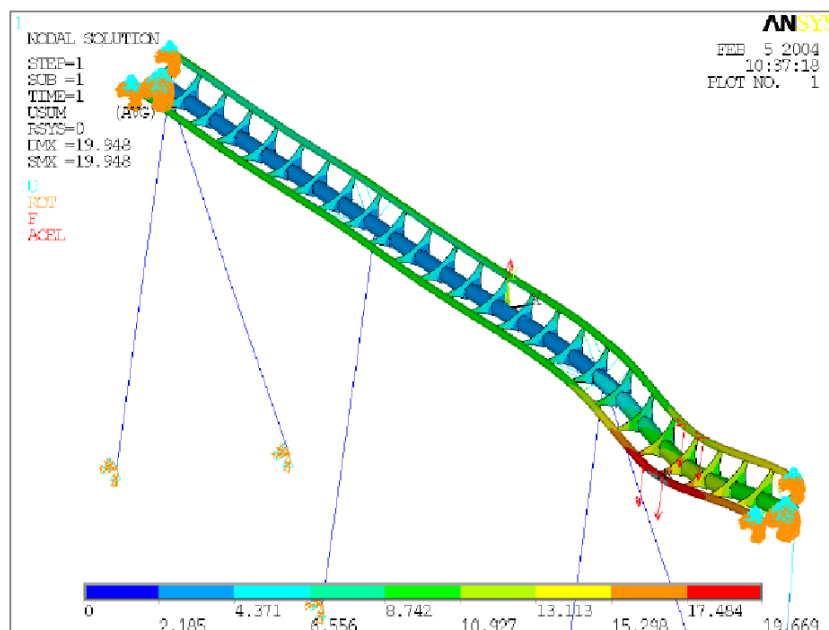
Aussteifungsrippen mit Volumen-Elementeinteilung (ANAKON 2007)

Bei einem insgesamt sehr großen und komplexen Bauteil sind eine Vielzahl von kleinen, relativ filigranen Anschlußpunkten zu untersuchen, die kritisch werden können.

Aus den vorigen Ausführungen ist zu erkennen, daß man eine sehr feine Elemententeilung braucht, um Kerbspannungen seriös ermitteln zu können. Dies verbietet sich bei einem derartigen Bohrschild mit derzeit schon über 2,4 Mio Knoten und ca. 1,3 Mio Stück 10-Knoten-Elemente (quadratischer Ansatz).

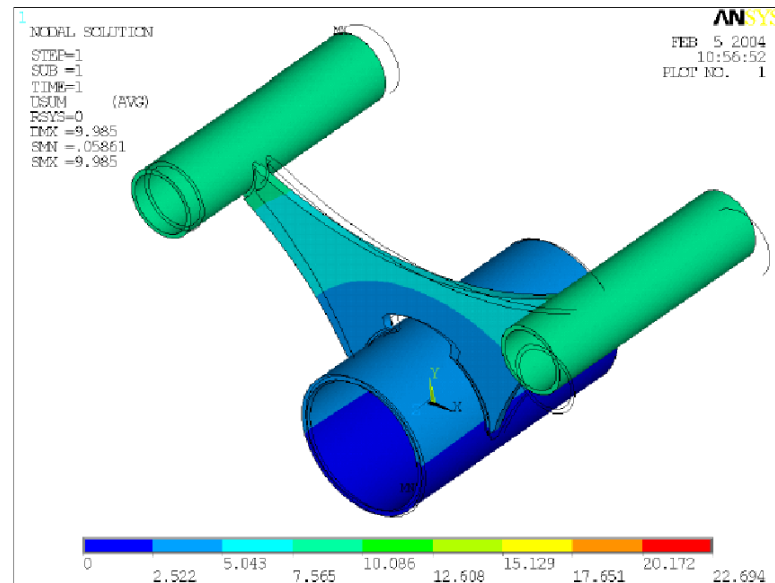
Die Ermüdungsnachweise werden daher bisher nach Nennspannungen geführt.

6.5 Maurer Jochblech (CAD-FEM 2004)



Ausschnitt aus der Fahrstrecke einer Maurer-„Achterbahn“ (CAD-FEM 2004)

Das Bild zeigt einen Ausschnitt aus einer Maurer-„Achterbahn“. Die Jochbleche zwischen dem mittleren Tragholm und den beiden Fahrschienen-Holmen kommen in relativ geringen Abständen vor und werden bei jeder Bahn so gebaut.



Jochblech mit Holm-Anschlüssen (CAD-FEM 2004)

Die Anschlußnähte zwischen dem Jochblech und den Holmen lassen sich nicht in einen der klassischen Kerbfälle einstufen. In diesem Fall lohnt es sich, aufwendige und detaillierte Berechnungen durchzuführen, da es sich um ein Serienteil handelt.

Hinweis:

Ein ebenfalls häufig angewandtes Verfahren besteht darin, parallel zu den Berechnungen am gewünschten Anschluß einen ähnlichen Anschluß aus einem der klassischen Kerbfallkataloge mit der FEM zu untersuchen. Auf diese Weise kann man die Berechnungen an dem „Klassiker“ kalibrieren.

7. Folgerungen

- Die FKM-Richtlinie hat als methodisch geschlossenes Konzept für den Festigkeitsnachweis (statisch und unter Ermüdung) von Baueilen aus den meisten technischen Metallen sicher große Vorteile, insbesondere wenn diese durch ein Programm abgearbeitet werden sollen.
- Die FKM-Richtlinie wirkt in der Handhabung sehr unhandlich, man blättert dauernd vor und zurück, um dann am Schluß festzustellen, daß man ca. 1/3 der ermittelten Werte nicht gebraucht hätte. Es fehlt ein erkennbarer roter Faden.
- Positiv ist die Möglichkeit, Eigenspannungen in drei Stufen einstellen zu können. Dies war bisher weder in den klassischen noch in den modernen Ermüdungsfestigkeitsnormen möglich. DIN 15018 war implizit mittelspannungsabhängig, EC3 ist implizit mittelspannungsabhängig (siehe Knödel 2006), was auf der sicheren Seite liegt, der Benutzer konnte jedoch keinen rechnerischen Vorteil geltend machen, wenn das Bauteil z.B. spannungsarm gegläht wurde.
- Es stört, daß bei genauem Hinsehen sehr viele Einschränkungen angeführt werden. Diese vermitteln den Eindruck, daß die Autoren von vielen Zweifeln geplagt sind, und vorsichtshalber „überall“ hinschreiben: „ist mit Vorsicht anzuwenden“. Auf diese Weise schließt sich diese Richtlinie in juristischem Sinne vom Stand der Technik und erst recht von den anerkannten Regeln der Technik selbst aus. Dies erweckt – in meinen Augen völlig unangebracht – den Eindruck, der gesicherte Wissensstand in Sachen Ermüdung sei sehr gering.
- In der Bemessungspraxis läßt sich das Auswerten von Strukturspannungen innerhalb von FEM-Berechnungen bei komplexen Bauteilen kaum realisieren, da man in Krafrichtung vor jeder Schweißnaht zwei Auswertestellen braucht, an denen man Spannungen abgreifen und zum Nahtfuß extrapolieren muß.
- Das Auswerten von Kerbspannungen ist ebenfalls mit hohem Aufwand verbunden: an den einspringenden Ecken sind nach dem Konzept des effektiven Kerbradius‘ Ausrundungen mit $R = 1 \text{ mm}$ anzubringen, dort benötigt man sehr feine Netze. Um diese Manipulationen vorzunehmen und die erforderliche Netzdichte durch Konvergenzstudien abzusichern braucht man je Detail ca. 1/2 Arbeitstag, ggfs. noch länger.

- Die beiden vorgenannten Punkte führen dazu, daß man sich in der Bemessungspraxis mit einem Mix aus allen angebotenen Methoden behilft. Grundsätzlich weist man die meisten Details nach den klassischen Kerbfall-Listen nach, sofern eine Einstufung einigermaßen möglich ist. Ansonsten ermittelt man die Kerbspannungen an einem – aus wissenschaftlicher Sicht – möglicherweise deutlich zu grobem Netz, kalibriert diese Berechnungen jedoch mit einem Netz vergleichbarer Grobheit an einem der abgesicherten Standard Kerbfälle, z.B. „Rippe quer mit Kehlnähten“.

- Die Anwendung der FKM-Richtlinie einschließlich des damit verbundenen hohen Bearbeitungsaufwandes lohnt sich dann, wenn man Serienteile hat, wie z.B. die oben beschriebenen Jochbleche der Fa. Maurer.

8. Danksagung

Bei den Recherchen zu diesem Vortrag habe ich Kontakt zu vielen Kollegen in Universitäten, Ingenieurbüros und Firmen aufgenommen. Alle haben mich freundlich und großzügig mit Informationen und Materialien unterstützt.

Hard- und Software für die gezeigten eigenen FEM Berechnungen wurden von ANAKON GmbH, Karlsruhe, zur Verfügung gestellt (siehe www.anakon.de).

Dafür bedanke ich mich an dieser Stelle herzlich.

9. Literatur

9.1 Normen und Regelwerke

- [1] DIN 743 Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen
Teil 1: Einführung, Grundlagen. 2000-10.
Beiblatt 1: Anwendungsbeispiele. 2000-10.
Teil 2: Formzahlen und Kerbwirkungszahlen. 2000-10.
Teil 3: Werkstoff-Festigkeitswerte. 2000-10.
- [2] EN 1993 Eurocode 3 (EC3): Design of steel structures
EN 1993-1-9:2005-05 Fatigue.
- [3] DIN 4132: Kranbahnen. Stahltragwerke; Grundsätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung. Februar 1981.
- [4] 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.
- [5] DIN 24117: Bau- und Baustoffmaschinen. Verteilermaste für Betonpumpen. Berechnungsgrundsätze und Standsicherheit. Juni 1987.
- [6] FKM-Richtlinie 2002 siehe Wegert et al. (2002).
- [7] FKM-Richtlinie 2003 siehe Hänel et al. (2003).
- [8] www.fkm-richtlinie.de (im Aufbau)
- [9] VDI 2226 Empfehlung für die Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile (1965).
VDI 2227 Festigkeit bei wiederholter Beanspruchung.
zitiert nach www.kissoft.ch

9.2 Fachliteratur

- [10] Bathe, K.-J., Wilson, E.L.: Numerical Methods in Finite Element Analysis. Prentice Hall, New Jersey 1976.
- [11] CAD-FEM: 18st CAD-FEM Users' Meeting 2000. Conference Proceedings Vol. 1+2. Friedrichshafen, 20.-22.09.2000.
- [12] CAD-FEM: 21st CAD-FEM Users' Meeting 2003. Conference Proceedings. Berlin, 12.-14.11.2003.
- [13] 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. ISBN 3-8163-0479-6, Preis 200 EUR.

- [14] Hobbacher, A.: Paradoxon beim Kerbspannungsnachweis von Schweißverbindungen mit dem Ersatzradius von 1 mm. 23. November 2006, 1 Seite. (Herkunft unbekannt, möglicherweise erhalten aus dem DVS-Fachausschuß 9 „Konstruktion und Berechnung“.
- [15] Knödel, P.: Lehrmaterialien zur Vorlesung Behälterbau an der Fachhochschule Karlsruhe, erreichbar unter www.peterknoedel.de/lehre/lehre.htm, seit März 2003 laufend aktualisiert.
hier:
FEM_05-09-25 Finite Elemente Methode (FEM); Bestimmung sinnvoller Elementgrößen, mit Übungsaufgaben.
P_FEM_aussen_05-09-25 FEM-Beullasten, Zylinder unter Außendruck, 7 Seiten.
P-FEM_axial_05-09-25 FEM-Beullasten, Zylinder unter Axiallast, 6 Seiten.
- [16] Knödel, P.: Schweißnähte am Ausleger einer "Betonpumpe". Skriptum zur Vorlesung „Fallbeispiele“ im Rahmen der Schweißfachingenieurausbildung an der SLV-Fellbach. Seit Dezember 2003 laufend aktualisiert.
- [17] Knödel, P.: Rechnerische Ermüdungsnachweise für geschweißte Bauteile. Vortrag in der SLV Mannheim am 26.01.2006. Skript herunterladbar von www.peterknoedel.de.
- [18] Krebs, J., Hübner, P., Kaßner, M.: Eigenspannungseinfluss auf Schwingfestigkeit und Bewertung in geschweißten Bauteilen. DVS-Berichte Band 234. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 2004.
- [19] Nitschke-Pagel, Thomas: Eigenspannungen und Schwingfestigkeitsverhalten geschweißter Feinkornstähle. Diss. TU Braunschweig 1994.
- [20] Puthli, R., Herion, S.: Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Krankonstruktionen bei Einsatz hoch- und ultrahochfester Stähle. Projekt P512 - Forschungsvereinigung für Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, Abschlußbericht 2005.
- [21] Radaj, D.: Gestaltung und Berechnung von Schweißkonstruktionen. Ermüdungsfestigkeit. DVS-Verlag, Düsseldorf 1986.
- [22] Radaj, D., Sonsino, C.M.: Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen nach lokalen Konzepten. DVS-Verlag Düsseldorf 2000.
- [23] Radaj, D.: Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen: Rechen- und Meßverfahren. Fachbuchreihe Schweißtechnik 143, DVS-Verlag Düsseldorf 2002.
- [24] Radaj, D.: Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Leichtbau, Maschinen- und Stahlbau. 2. Auflage. Springer Verlag Berlin 2003.
- [25] Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile. Empfehlungen für Entwicklungsingenieure und Konstrukteure. Tagung Fulda 22.-23.09.1998. VDI-Berichte 1442. VDI-Verlag Düsseldorf 1998.
UB-KA 98A4252
- [26] Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile. Empfehlungen für Entwicklungsingenieure und Konstrukteure. Tagung Fulda 05.-06.06.2002. VDI-Berichte 1689. VDI-Verlag Düsseldorf 2002.
- [27] Wegerdt, C., Hanel, W., Hänel, B., Wirthgen, G., Zenner, H., Seeger, T.: FKM - Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. 4. Auflage, VDMA Verlag, Forschungskuratorium Maschinenbau, Frankfurt, 2002.

- [28] Wohlfahrt, H., Nitschke-Pagel, Th., Kaßner, M.: Schweißbedingte Eigenspannungen – Entstehung und Erfassung, Auswirkung und Bewertung. DVS-Berichte Band 187, DVS-Verlag, Düsseldorf 1997.

9.3 Sonstige

- [29] ANAKON GmbH
Humboldtstr. 25a, D-76131 Karlsruhe, www.anakon.de
Standsticherheitsnachweis Nr. 178102 vom 25.01.03
Betonverteilermast EM 32/36–4 der Fa. ELBA, Ettlingen
(Bearbeiter: Dr.-Ing. P. Knödel F0224)
Aktuelle Berechnungen für einen Herrenknecht-Bohrkopf 2007.
Aktuelle Berechnungen für einen ELBA-Fahrzeugrahmen 2007 (in Bearbeitung).
- [30] CAD-FEM GmbH
Marktplatz 2, D-85567 Grafing, www.cadfem.de
Dok.-nr.: G02-MAU-01_Teil2.TB0.DOC
Studie für Fa. Maurer Söhne, München, 06.02.04.
(erhalten von Maurer Söhne, Dr. Smida, 18.10.06)
- [31] DYNATEC GmbH
Adam-Opel-Straße 4, D-38112 Braunschweig, www.dynatec.de
Betriebsfestigkeitsberechnungen an Probekörpern auf Grundlage von Nennspannungen und lokalen Spannungen entsprechend der FKM-Richtlinie. Interner Bericht Nr. 06B12401, REFRESH „Arbeitsgruppe Berechnung“, 19.04.06
(erhalten von DYNATEC, Dr. Telljohann, 11.01.07)
- [32] REFRESH
Lebensdauererlängerung bestehender und neuer geschweißter Stahlkonstruktionen, gefördert durch das BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung.
Institut für Bauwerkserhaltung und Tragwerk, Prof. Dr.-Ing. T. Ummenhofer, Universität Braunschweig;
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Dr.-Ing. S. Herion, Universität Karlsruhe;
www.refresh-steel.de