

Stefan RENGO, BSc

Validierung der Implementierung der FKM Richtlinie 6 im FatAss

Master Arbeit

erstellt für

SIEMENS

Siemens AG Österreich; MO MLT BG EN SDS LS;
Eggenberger Straße 31, 8020 Graz

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Institut für Leichtbau

Institutsvorstand: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Franz Heitmeir

Betreuer: Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Moser

Graz, November 2015

This document is set in Palatino, compiled with pdfL^AT_EX₂ε and Biber.
The L^AT_EX template from Karl Voit is based on KOMA script and can be
found online: <https://github.com/novoid/LaTeX-KOMA-template>

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, _____

Date

Signature

Eidesstattliche Erklärung¹

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, _____

Datum

Unterschrift

¹Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008; Genehmigung des Senates am 1.12.2008

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Zeitraum von Dezember 2014 bis September 2015 in enger Zusammenarbeit mit der Siemens AG Österreich, Mobility Division in Graz.

Für die Bereitstellung des Themas und die Betreuung der Masterarbeit am Institut für Leichtbau bedanke ich mich recht herzlich bei Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Moser. Des weiteren bedanke ich mich bei Herr Dipl.-Ing. Christian Buzzi für die tatkräftige Unterstützung und für die Durchsicht meiner Arbeit.

Besonders möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Werner Mössler als meinen firmeninternen Betreuer für die Unterstützung und die zahlreichen Hilfestellungen bedanken. Weiteres möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Bernhard Kittinger und Herrn Dipl.-Ing. Markus Hubmann für die tatkräftige Unterstützung beim Lösen von vorhandenen Problem bedanken. Ein großer Dank geht auch an meine übrigen Kollegen bei Siemens für die angenehme und abwechslungsreiche Arbeitsatmosphäre.

Meiner Familie, besonders meinen Eltern gebührt mein ganz persönlicher Dank, da sie mir mein Studium ermöglichten und mich in allen Lebenslagen unterstützen.

Stefan Rengo

Kurzfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde die Implementierung der FKM Richtlinie 6 in der Spannungsbewertungssoftware FatAss überprüft. Dabei wurde die Richtlinie an die firmeninternen Anforderungen der Siemens AG Österreich (Standort Graz) angepasst.

Anfangs wurden die benötigten theoretischen Fachgebiete bearbeitet und entsprechend dokumentiert. Neben der FKM Richtlinie 6 sind firmenintern noch weitere Bewertungsvorschriften im Einsatz.

Um einen Überblick zu bekommen und die unterschiedlichen Arbeitsweisen besser zu verstehen, wurde in Kapitel 4 kurz auf die jeweiligen Vorschriften eingegangen. In Kapitel 5 werden die unterschiedlichen Inputparameter definiert und übersichtlich dokumentiert. Unter Inputparameter versteht man jene Daten, welche unterschiedliche Informationen beinhalten, die für eine Bewertung eines Bauteiles benötigt werden.

Die Arbeitsweise der Spannungsbewertungssoftware FatAss wurde mit Hilfe einer graphischen Darstellung näher erklärt. Es wurde im speziellen auf die Bedienungsflächen *Userinterface* und *OpenGL-viewer* näher eingegangen und diese auch mittels unterschiedlichen Ansichten näher erläutert. Um die richtige Arbeitsweise der Vorschrift gewährleisten zu können, wurden Paramtervariationen durchgeführt. Bei etwaigen Fehlern bzw. Problemen wurden diese korrigiert und auf ihre richtige Umsetzung hin nochmals überprüft. Anhand eines Beispiels werden die einzelnen Schritte der Parametervariation im Kapitel 7 näher erklärt.

Durch diese Variationen konnte die korrekte Implementierung der FKM Richtlinie 6 im FatAss nachgewiesen werden.

Abstract

The main task of my master thesis was to verify the workflow in the fatigue assessment program FatAss.

The guideline has been modified in order to full fill the intern requirement of Siemens AG Austria. At the beginning all theoretical information, were collected and documented. Beside the FKM guideline 6 further valuation regulation are used within Siemens.

An abstract about the different workflows are shown in chapter 4. In Chapter 5 the definition and documentation of the different Input parameters include all information which are necessary to do a successful assessment.

The workflow of the fatigue assessment program FatAss is shown in a chart. In the following part of this documentation the both user interfaces *User-interface* and *OpenGLviewer* are explained and shown in different charts. To control the correct function of the regulation, different parameter variations were made. If failures have been detected the input data have been changed and a verification has been down to check the results are in line with the requirements.

All parameter variations are shown in chapter 7. With these variations it was possible to show the correct work flow of the FKM guideline 6.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iv
Kurzfassung	v
Abstract	vi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Ziel der Arbeit	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Grundlagen der Festigkeitsberechnung	3
2.1 Allgemeines	3
2.2 Spannungskennwerte	4
2.2.1 Nennspannungskonzept	6
2.2.2 Nennspannungen bei geschweißten Bauteilen	8
2.2.3 Örtliches Konzept (Kerbgrundkonzept)	8
2.2.4 örtliches Spannungskonzept	8
2.2.5 Strukturspannungskonzept	9
3 Betriebsfestigkeit	12
3.1 Betriebsbeanspruchung	12
3.2 Betriebsfestigkeitsnachweis	13
3.2.1 Rechnerischer Betriebsfestigkeitsnachweis	13
3.2.2 Experimenteller Betriebsfestigkeitsnachweis	14

Inhaltsverzeichnis

3.3	Beanspruchbarkeit	14
3.3.1	Schwingfestigkeit	14
3.3.2	Wöhlerlinie	16
3.3.2.1	Darstellung der Wöhlerlinie	17
3.3.2.2	Kennwerte und Abgrenzung der Wöhlerlinie	18
3.3.3	Auswertung gemessener Beanspruchungs-Zeit-Verläufe	19
3.3.3.1	Rainflow Zählung	20
3.3.4	Beanspruchungskollektiv	21
3.3.4.1	Kenngrößen und Zusammenhänge eines Schwing- spieles	21
3.3.4.2	Zusammenhang Kollektivform-Wöhlerlinie	22
3.3.5	Lebensdauerlinie	24
3.4	Betriebsdauerermittlung nach Schadensakkumulationshypo- these	25
3.4.1	Vorgehensweise bei Lebensdauerabschätzung	27
4	Bewertungsvorschriften	29
4.1	DIN 15018, Krane-Grundsätze für Stahltragwerke-Berechnung	31
4.2	IIW-International Institut of Welding	32
4.2.1	IIW XIII, Empfehlung zur Schwingfestigkeit geschweiß- ter Verbindungen und Bauteile	33
4.2.2	Bewertungskonzepte nach IIW-Richtlinie	33
4.3	FKM, Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbau- teile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen	36
4.3.1	Unterschiedliche Bauteilklassen bei Normal- und Schub- spannung	39

Inhaltsverzeichnis

5	Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6	40
5.1	Überlastungsfälle	40
5.1.1	Überlastungsfall F5	42
5.1.1.1	Anwendung des Überlastungsfalls F5 auf einen geschweißten Rahmen	43
5.2	Ermittlung der FAT-Klassen für verschiedene Nahtendengeometrien	49
5.3	Anpassung der Dauerfestigkeitsgrenze im Wöhlerdiagramm	50
5.4	Richtlinien zur Wahl der Inputparameter der FKM Richtlinie 6	52
5.4.1	Spannungskennwerte	52
5.4.2	Material Kennwerte	52
5.4.3	Konstruktionskennwerte	53
5.4.3.1	Plastische Stützzahl gemäß der FKM Richtlinie 6	53
5.4.3.2	Plastische Stützzahl für mäßig duktile Werkstoffe	54
5.4.4	Oberflächenrauigkeit	54
5.4.5	FAT-Klassen für Schweißnähte	55
5.4.6	Bauteilfestigkeit	58
5.4.6.1	Betriebsfestigkeitsfaktor	58
5.4.7	Sicherheitsfaktoren	58
5.4.7.1	Schadensfolgen bei statischen Festigkeitsnachweis	58
5.4.7.2	Schadensfolgen beim Ermüdungsfestigkeitsnachweis	59
5.4.7.3	Auftretenswahrscheinlichkeit der höchsten Spannungen	61
5.4.7.4	Regelmäßige Inspektion	61
5.4.7.5	Zerstörungsfrei geprüfte Gussteile	64
5.4.8	Festigkeitsnachweis	64
5.4.8.1	Berücksichtigung der Gussqualität	64

Inhaltsverzeichnis

6	Spannungsbewertungssoftware Fatigue Assessment	66
6.1	Bedieneroberfläche	69
6.1.1	Userinterface	69
6.1.2	OpenGL-viewer/ OpenGINeutralX	70
7	Nachweis der Richtigkeit der FKM 6 Implementierung	72
7.1	Aufbau der Testumgebung	73
7.2	Durchführung der Tests anhand eines Parameters	74
7.3	Kontrolle der Rainflow Implementierung	78
	Abbildungsverzeichnis	80
	Tabellenverzeichnis	83
	Literatur	84
	Anhang	86
A.1	Spannungen an geschweißtem Drehgestellrahmen	86
A.2	Schweißnahtbezeichnungen und Schweißnahtdetails inkl. FAT-Klassen	91

1 Einleitung

1.1 Motivation und Ziel der Arbeit

Siemens Transportation System in Graz entwickelt und fertigt High- Tech-Fahrwerke für jeden Bedarf im modernen Personenverkehr. Neben Fahrwerken für den Nahverkehr (Metrofahrzeuge, Straßen- und Stadtbahnen), werden auch Fahrwerke für den Fernverkehr (Lokomotiven, Reisezugwagen und Triebzüge) angeboten.

Alle Fahrwerkstätigkeiten wurden von Siemens im Weltkompetenzzentrum für Fahrwerke in Graz zusammengefasst. Das Fahrwerk bzw. Drehgestell als Bindeglied zwischen Wagenkasten und dem Gleis als Fahrweg stellt ein sicherheitsrelevantes Bauteil da. Im besonderen der Drehgestellrahmen unterliegt während der gesamten Lebensdauer hochdynamischen Beanspruchungen. Um die Lebensdauer von 30 Jahren und eine Laufleistung von bis zu 1000 Kilometer pro Tag gewährleisten zu können, ist der Einsatz umfangreicher Bewertungsvorschriften notwendig.

Je nach Einsatzgebiet des Drehgestelles kommen unterschiedliche Bewertungsvorschriften zum Einsatz. Unter anderem stellt die DIN 15018 eine dieser bereits langjährig im Einsatz befindlichen Vorschriften da.

Diese wurde durch die FKM Richtlinie 6 ersetzt und stellt die Grundlage dieser Arbeit da.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die richtige Arbeitsweise und Implementierung der FKM Richtlinie 6 im Spannungsbewertungsprogramm FatAss zu überprüfen und bei etwaigen Fehlern entsprechend anzupassen.

1.2 Aufbau der Arbeit

In meiner Arbeit wird zunächst ein Überblick über alle relevanten Themen der Festigkeit und hier im besonderen der Betriebsfestigkeit gegeben. Ich bitte Sie dabei um Verständnis, dass nicht jedes Thema vollständig erläutert werden kann.

Im Anschluss daran, werden die bei Siemens im Einsatz befindlichen Bewertungsvorschriften kurz aufgezählt und erläutert. Um einen besseren Überblick zu bekommen, wird kurz auf die jeweilige Eigenheiten jeder Vorschrift eingegangen.

Im darauffolgendem Kapitel wird auf die Anpassung der FKM Richtlinie 6 für die firmenspezifischen Anwendungen eingegangen. Neben allgemeinen Erläuterungen wird vor allem auf die richtige Wahl der benötigten Inputparameter Wert gelegt.

Im nachfolgendem Kapitel wird auf das Spannungsbewertungsprogramm FatAss eingegangen. Mit Hilfe einer graphischen Darstellung wird kurz die Arbeitsweise des Programms erläutert. Es wird dabei im speziellen auf die beiden Bedieneroberflächen *Userinterface* und *OpenGL-viewer* näher eingegangen.

Im praktischen Teil der Arbeit wurde mit Hilfe unterschiedlicher Parametervariationen die richtige Arbeitsweise der FKM Richtlinie 6 im FatAss überprüft. Um den Prüfablauf besser zu verstehen, wird zuerst dieser allgemein erklärt. Im Anschluss daran wird mit einem frei gewählten Parameter die einzelnen Schritte der Parametervariation näher erläutert.

Im Anhang der Arbeit befinden sich die Ergebnisse in tabellarischer und graphischer Darstellung der Spannungsbewertung aus Kapitel 5.1.1.1. Der Vollständigkeit halber sind auch alle FAT Klassen der Standardschweißnähte aufgelistet.

2 Grundlagen der Festigkeitsberechnung

2.1 Allgemeines

An das Betätigungsfeld des modernen Maschinenbaus wird häufig die Forderung gestellt, neu entwickelte Produkte leichter zu gestalten. Dadurch möchte man eine erhöhte Zuverlässigkeit und eine Kostenreduktion erreichen. Mit Hilfe der Betriebsfestigkeit können die Bauteile auf die entsprechende Zuverlässigkeit und der geforderten Lebensdauer dimensioniert werden.

Das Versagen eines Bauteils im Maschinenbau kann unterschiedliche Ursachen haben:

- Bruchbildung durch Gewaltbruch
- Ermüdung
- unzulässige Verformung
- Instabilität
- Verschleiß
- Korrosion

Die meisten Ausfälle im Maschinenbau sind heutzutage selten auf die statische Überbeanspruchung eines Bauteiles zurückzuführen. Sondern werden durch zyklische Kräfte hervorgerufen, die schlussendlich zur Ermüdung des Werkstoffes führen. Die Dimensionierung von zyklisch beanspruchten

2 Grundlagen der Festigkeitsberechnung

Bauteilen, Systemen und Anlagen stellt das Betätigungsfeld der Betriebsfestigkeit dar und ist ein wesentlicher Teil der Bauteiloptimierung. Bei der Dimensionierung von zyklisch beanspruchten Bauteilen unterscheidet man zwei Arten der Bemessung:

- Dauerfeste Bemessung: Unter dieser Art der Bemessung muss der Bauteil die schwingende Beanspruchung dauernd, also beliebig oft ohne Bruch ertragen können.
- Betriebsfeste Bemessung: Hier muss der Bauteil die schwingende Beanspruchung nur für die Nutzungsdauer, also für eine begrenzte Zeitdauer ohne Versagen ertragen können.

Um die Dimensionierung für eine geforderte Nutzungsdauer durchführen zu können, sind folgende Kenntnisse über das Bauteil erforderlich:

- Funktion des Produktes
- Betriebsbedingungen des Produktes, unter denen die Funktion erfüllt werden muss
- Werkstoffverhalten
- Bauteil, welches über Spannung und Dehnung charakterisiert ist

Der Einsatzbereich der Betriebsfestigkeit erstreckt sich dadurch über sehr große Bereiche, von Maschinen und Anlagen über Flugzeuge bis hin zu Schwermaschinen aller Art. (Eichlseder, o.D., S.2)

2.2 Spannungskennwerte

Aus den Bauteilbelastungen sind im Nachweispunkt die Spannungen zu bestimmen. Die zu berechnenden Bauteile können stab-, flächen- oder volumenförmig sein. Des weiteren wird zwischen geschweißten und ungeschweißten Bauteilen unterscheiden. Die Spannungen werden analytisch, numerisch oder experimentell bestimmt.

2 Grundlagen der Festigkeitsberechnung

Bei der Spannungsberechnung wird ein linear-elastisches Materialverhalten angenommen. Alle Spannungen, auch die Spannungsamplitude sind zunächst vorzeichenbehaftet. Druckspannungen sind negativ und Zugspannungen sind positiv zu betrachten.

Das Vorzeichen der Spannungsamplitude spielt nur eine Rolle bei der Überlagerung von mehreren Spannungskomponenten. Bei der reinen Festigkeitsberechnung werden die Amplituden als positive Größen angenommen.

Im Nachweispunkt können folgende Spannungen auftreten:

- Nennspannung S und T
- örtliche Spannung σ und τ

Entsprechend sind in diesem Punkt die Bauteilfestigkeitswerte zu bestimmen, welche den ertragbaren Spannungen entsprechen:

- Nennfestigkeit
- örtliche Festigkeit (FKM6, 2012, S.11)

Mit Hilfe des Struktur- und Kerbspannungskonzeptes ist gegenüber des Nennspannungskonzeptes eine weit aus detailliertere Festigkeitsanalyse von Schweißkonstruktionen möglich.

Örtliche Konzepte ermöglichen es mit Hilfe von numerischen Berechnungsverfahren, Beanspruchungen in einem deutlich geringeren Abstand zur Versagensstelle oder direkt in der Kerbe zu ermitteln, was mit dem Nennspannungskonzept nicht möglich ist. Die nachfolgende Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die heute in Verwendung befindlichen Nachweiskonzepte. (Morgenstern, 2006, S.8)

In den folgenden Kapiteln wird auf die verschiedenen Konzepte näher eingegangen.

2 Grundlagen der Festigkeitsberechnung

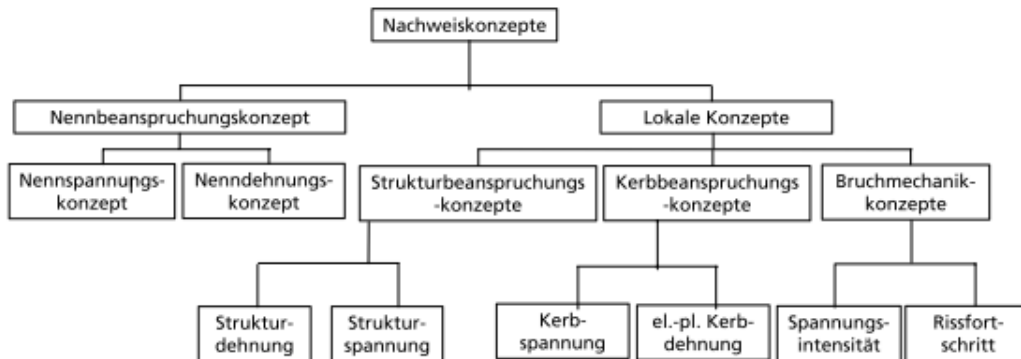


Abbildung 2.1: Nachweiskonzepte

2.2.1 Nennspannungskonzept

Nennspannungen können für stabförmige und flächenförmige Bauteile angewendet werden.

Die Ermittlung der Spannung erfolgt mit Hilfe von elementarer Formeln aus der technischen Mechanik.

Die Kennzeichen der Nennspannung sind:

- der Bezug auf einen definierten Querschnitt des Bauteils
- die Vernachlässigung der lokalen Spannungsspitzen infolge geometrischer Kerben oder Lasteinleitungen

Geometrische Kerben können Querschnittsprünge und Knicke bei stabförmigen Bauteilen sein oder Dickensprünge, Knicke und Verzweigungen bei flächenförmigen Bauteilen.

Die Nennspannung ist linear über den gesamten Querschnitt verteilt. Daher kann es zu Abweichungen zwischen der tatsächlichen Spannungsverteilung und des Nennspannungsverlaufes kommen.

Bei der Berechnung der Nennspannung wird mit einem bauteilbezogenen Koordinatensystem gearbeitet, welches wie folgt definiert wird:

2 Grundlagen der Festigkeitsberechnung

- x-Achse in Stablängsrichtung
- y-Achse und z-Achse als Hauptachsen des Querschnitts (FKM6, 2012, S.11)

Während bei Zug-Druck-Beanspruchungen die Nennspannung gleichmäßig über den gesamten Querschnitt verteilt ist, ist bei Biegung und Torsion die Nennspannung in den äußeren Randfasern am größten. In Abbildung 2.2 sind die Beanspruchungsarten in einem konstanten Querschnitt dargestellt.

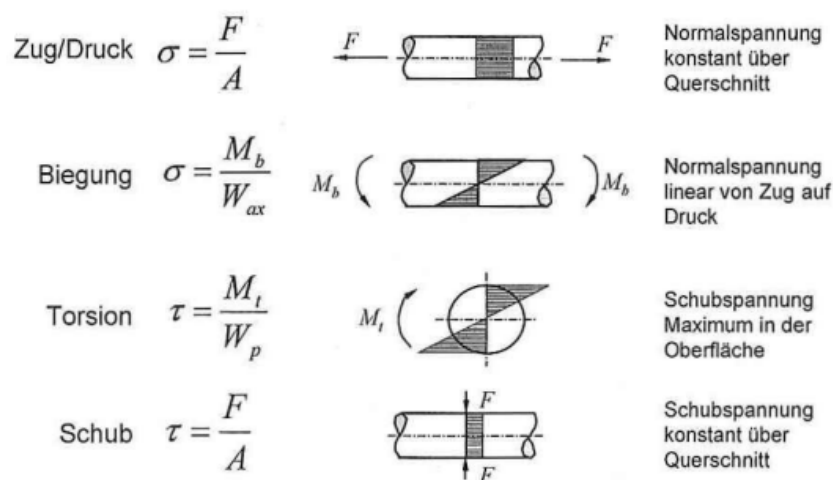


Abbildung 2.2: Beanspruchungsarten

Die Nennspannungsverläufe sind idealisierte Verläufe, welche in realen Bauteilen nur selten auftreten. Die Größe und Verteilung der Spannungen sind nicht nur von der äußeren Belastung und dem betrachteten Querschnitt abhängig, sondern auch von der Form und Querschnittsänderungen in der Nachbarschaft.

Zu Querschnittsänderungen werden Kerben, Materialinhomogenitäten, Risse, Poren, konstruktiv bedingte Querschnittsänderungen und der gleichen gezählt. (Eichlseder, o.D., S.6)

2.2.2 Nennspannungen bei geschweißten Bauteilen

Geschweißte Bauteile bestehen in der Regel aus flächenförmigen Teilen, die mit Hilfe von Stumpf- oder Kehlnähten miteinander verschweißt sind. Unter flächenförmigen Teilen kann man z.B. Profilstäbe, Platten, Scheiben oder Schalen verstehen. Als (idealisiert) stabförmiges Bauteile können sie mit der Nennspannung berechnet werden.

Die Berechnung der Nennspannungen in der Schweißnaht geschieht wie bei nichtgeschweißten Bauteilen aus den Schnittgrößen, aber mit den Querschnittskennwerten der jeweiligen Schweißnaht. (Eichlseder, o.D., S.12)

2.2.3 Örtliches Konzept (Kerbgrundkonzept)

Gekennzeichnet ist das örtliche Konzept dadurch, dass man von den an der kritischen Stelle eines Bauteiles herrschenden Beanspruchungen ausgeht. Dieses Verfahren dient zur Beurteilung der Ermüdungsfestigkeit von geschweißten und ungeschweißten Bauteilen, welche zyklisch belastet werden. Es wird der Kerbgrund bzw. die am höchsten belastete Stelle betrachtet. Als Versagenskriterium wird der technische Anriss des Bauteiles verstanden. Der Rechenaufwand ist gegenüber dem Nennspannungskonzept wesentlich höher. Als Kenndaten werden das zyklische Spannungs-Dehnungs-Diagramm und die Dehnungswöhlerlinie benötigt.

Beide Funktionen werden an kleinen glatten Werkstoffproben ermittelt. (Eichlseder, o.D., S.75)

2.2.4 örtliches Spannungskonzept

In Fällen in denen der nachzuweisenden Konstruktionsquerschnitt nicht festgelegt werden kann, kommt das örtliche Spannungskonzept zum Einsatz. Dies ist bei geometrisch komplexen Bauteilen der Fall. Mit Hilfe der Finiten-Elemente-Berechnung (FEM) oder anderen rechnerischen oder messtechnischen Verfahren werden die Spannungsverteilungen am Bauteile bestimmt.

2 Grundlagen der Festigkeitsberechnung

Bei der Spannungsermittlung wird versucht, möglichst alle geometrischen Parameter, die den Spannungsverlauf beeinflussen können, exakt zu erfassen. In FEM-Berechnungen werden z.B. geometrische Kerben durch ein feineres Netz als das übrige Bauteil nachgebildet. (Eichlseder, o.D., S.75)

2.2.5 Strukturspannungskonzept

Ist aufgrund der Bauteilgeometrie die Ermittlung der Nennspannung nicht mehr eindeutig möglich, kommt das Strukturspannungskonzept zur Anwendung. Hierbei wird bei Schweißkonstruktionen die Struktur, aber nicht die Schweißnaht erfasst. Die Spannungen in der Naht werden aus den Spannungen der benachbarten Struktur bestimmt. (Eichlseder, o.D., S.75) Um den Rechenaufwand bei großen Bauteilstrukturen so gering wie möglich zu halten, werden bei der Finiten Elemente Methode mit größeren Elementen gerechnet. (Haibach, 2005, S.210)

Hinweise zur Ermittlung der Strukturspannung liefert die IIW¹-Empfehlung. Ausgehend von zwei oder drei Basispunkten in gestaffeltem Abstand vor der Naht, werden die Spannungswerte errechnet oder mit Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen. Im allgemeinen wird die nichtlineare Spannungsverteilung bis zum Nahtübergang hin linear oder quadratisch auf den gesuchten Strukturspannungswert extrapoliert. Diese wird auch als hot-spot-Spannung bezeichnet.

In Abbildung 2.3 sind die empfohlenen Positionen dieser Basispunkte dargestellt.

Diese Art der Spannungsermittlung ist unter anderem anwendbar auf Stumpfnähte, Kehlnähte und Kreuzstöße.

¹International Institut of welding

2 Grundlagen der Festigkeitsberechnung

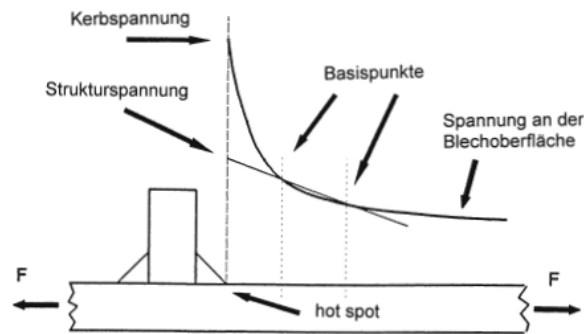


Abbildung 2.3: Strukturspannungskonzept (Haibach, 2005, S.212)

Die Angaben beziehen sich auf Schweißverbindungen aus Baustahl. Des Weiteren können die Berechnungen auch für Aluminium verwendet werden, welche mit einem Verhältniswert von 0,35:1 aus den IIW-Empfehlungen für Baustahl abgeleitet sind. (Haibach, 2005, S.212)

Abbildung 2.4 zeigt verschiedene Strukturspannungen an unterschiedlichen Konstruktionsdetails.

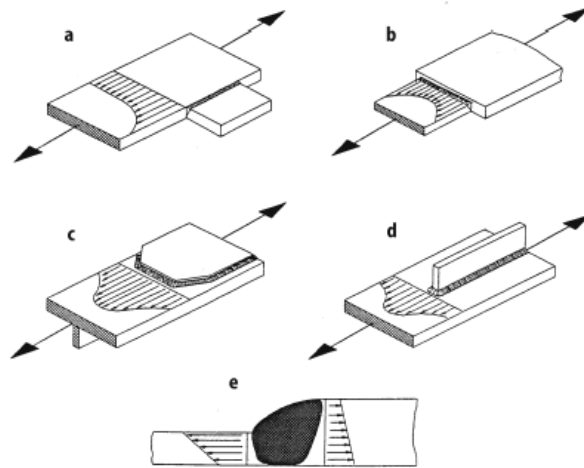


Abbildung 2.4: Strukturspannungen (Haibach, 2005, S.216)

2 Grundlagen der Festigkeitsberechnung

Die Methode des Strukturspannungskonzeptes ermöglicht nur eine Bewertung des Nahtübergangs. Ein Nachteil des Strukturspannungskonzeptes liegt in der Wahl der Basispunkte und in der Extrapolation.

Daraus ergibt sich, dass Kerbspannung und Strukturspannung bei kleinen konstruktiven Details nicht eindeutig trennbar sind. Eine Abhilfe dieses Problems bietet das Verfahren nach Radaj.

Hier erfolgt eine Linearisierung der Spannungsverteilung in Dickenrichtung, wodurch die Kerbspannung am Nahtübergang ausgeschlossen wird und die Strukturspannung eindeutig definiert werden kann. (Haibach, 2005, S.214)

3 Betriebsfestigkeit

Schwingbeanspruchte Bauteile können einerseits durch Schwingbruch andererseits auch durch einen Schwinganriss versagen. Die Ursachen und die Einflüsse die zum Ausfall von Bauteilen durch Schwingbeanspruchung führen sind sehr vielfältig und nur sehr schwer zu eruieren. Oft tritt der Ausfall von Bauteilen und ganzer Anlagen unerwartet auf und kann ein folgenschweres Ausmaß annehmen. Welche Arten von Betriebsbeanspruchungen auftreten, wie diese Verarbeitet werden und wie die Auswertung der Beanspruchungs-Zeit-Verläufe erfolgt, wird in den nächsten Kapiteln näher erklärt.

3.1 Betriebsbeanspruchung

Während des Betriebes wirken auf einen Bauteil oder eine Baugruppe gewollte und ungewollte Belastungen ein. Die Belastungen sind meist äußere Kräfte und Momente, die in den Querschnitten der einzelnen Elemente Beanspruchungen hervorrufen.

Als gewollte Belastungen werden diejenigen bezeichnet, die zur Erfüllung der Funktion der Erzeugnisse erforderlich sind. Ungewollte Belastungen resultieren aus unerwünschten Vorgängen wie zum Beispiel Missbrauch der Erzeugnisse oder Eigenschwingungen. Unter Beanspruchungen versteht man Spannungen und Dehnungen. Für beide Beanspruchungsarten können die selben Verfahren zur Beschreibung und Analyse angewendet werden. Die Betriebsbeanspruchungen können durch einen Vielzahl von

3 Betriebsfestigkeit

Ursachen hervorgerufen werden. Eine Übersicht der Ursachen von Betriebsbeanspruchungen stellt die nachfolgende Abbildung 3.1 dar. (Eichlseder, o.D., S.59)

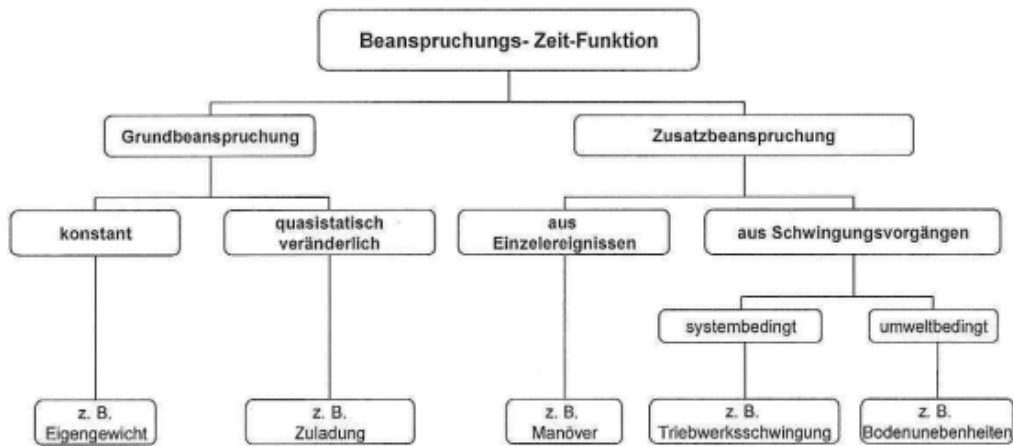


Abbildung 3.1: Ursachen der Betriebsbeanspruchungen

3.2 Betriebsfestigkeitsnachweis

Grundsätzlich kann ein Betriebsfestigkeitsnachweis folgendermaßen durchgeführt werden

- rechnerisch oder
- experimentell

3.2.1 Rechnerischer Betriebsfestigkeitsnachweis

In jenen Bemessungsfällen, bei denen sich zahlreiche schwingungsrelevante Einflussfaktoren in komplizierter Weise überlagern, wird diese Art des Nachweises nicht angewendet. Ist jedoch ein rechnerischer Nachweis sinnvoll anzuwenden und durchführbar, versucht am möglichst viele Probleme

3 Betriebsfestigkeit

auf dem Wege des Durchrechnens zahlreicher Alternativen mit Hilfe von diversen Software- Systemen zu lösen.

3.2.2 Experimenteller Betriebsfestigkeitsnachweis

Diese Art des Festigkeitsnachweises wird wenn Möglich erst am Ende des Entwicklungsprozesse durchgeführt, um zeit- und kostenaufwendige Versuche zu vermeiden. (Eichlseder, o.D., S.74)

3.3 Beanspruchbarkeit

Um die Bauteile für die zukünftige Anforderung auslegen zu können, muss deren maximal ertragbare Beanspruchung bekannt sein. Diese Beanspruchungen können gewollte oder ungewollte Belastungen sein. Schwingbeanspruchte Bauteile werden für die Betriebsfestigkeit mit Hilfe der Wöhlerlinie bemessen. Auf die Definition der Schwingfestigkeit und der Wöhlerlinie wird in den nächsten Kapiteln näher eingegangen

3.3.1 Schwingfestigkeit

Unter Schwingfestigkeit versteht man die Festigkeit des Werkstoffes gegenüber zyklischen Beanspruchungen. (Eichlseder, o.D., S.4) Eine große Anzahl an Bauteilen unterliegt während des Betriebes einer solchen zeitlich veränderlichen Belastung. Unter Schwingbeanspruchungen kann man die Umlaufbiegung einer Welle, An- und Abfahrvorgänge von Maschinen oder Vibrationen durch Anregung im Resonanzbereich verstehen. Die Ergebnisse aus Einstufenversuchen mit metallischen Konstruktionswerkstoffen lassen sich in drei Bereiche einteilen. Die durch die relative Beanspruchungsintensität bzw. durch die bis zum Auftreten des Versagens erreichten Zahl von Lastspielen gekennzeichnet sind.

Diese Bereiche sind in Abbildung 3.2 dargestellt und lauten:

3 Betriebsfestigkeit

- Kurzzeitfestigkeit

$$N < 10^3 - 10^4$$

- Zeitfestigkeit

$$10^3 - 10^4 < N < 2 \cdot 10^6$$

- Dauerfestigkeit

$$N > 2 \cdot 10^6$$

- Betriebsfestigkeit

Die angegebenen Bereichsgrenzen dienen als Näherungswerte und sind von Kerben, Mittelspannung und anderen Größen abhängig.

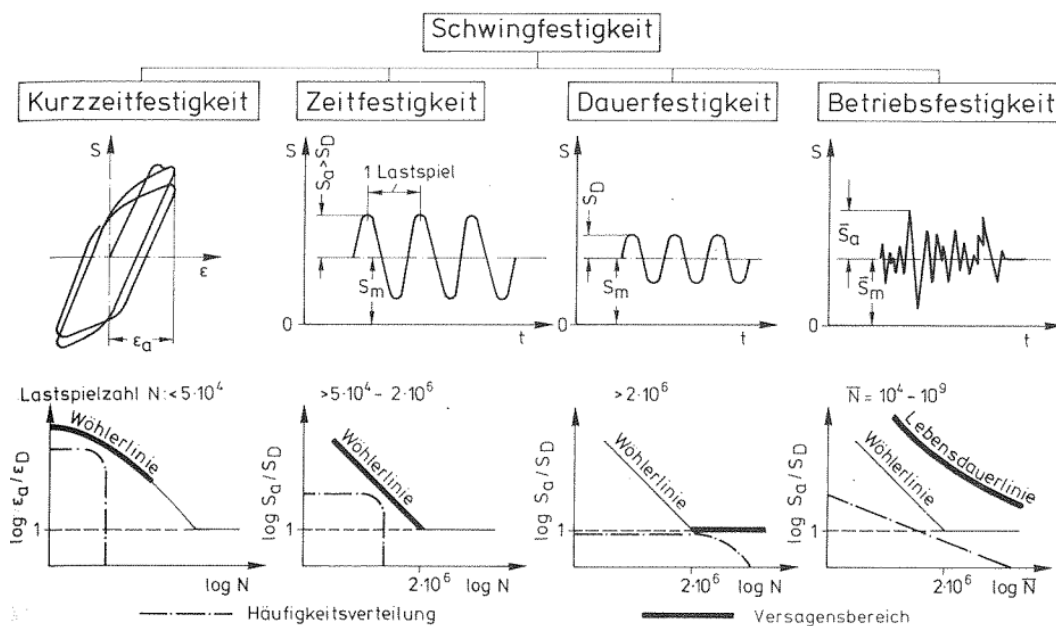


Abbildung 3.2: Schwingfestigkeit

Da bereits Spannungen im elastischen Bereich zu einem Bruch (Dauerschwingbruch) führen können, ist neben dem Festigkeitsnachweis für schwingbeanspruchte Bauteile auch ein statischer Nachweis erforderlich. Dies beruht

3 Betriebsfestigkeit

auf der Erfahrung, dass Bauteile die für eine statische Betriebsspannung richtig ausgelegt sind, bei einer schwingenden Beanspruchung unter der selben Spannung versagen können. (Buxbaum, 1992, S.122) bzw. (Eichlseder, o.D., S.24 & S.21)

3.3.2 Wöhlerlinie

Die bekannteste Funktion zur Beschreibung der Schwingfestigkeit ist die Wöhlerlinie. Wöhlerversuche werden üblicherweise durch sinusförmigen Lastverläufe mit konstanter Spannungsamplitude σ_a durchgeführt. Dies stellt eine Idealisierung der praktischen Lastfälle dar.

Werden die Ergebnisse aus dem Wöhlerversuch in Form der ertragbaren Spannungsamplitude σ_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N aufgetragen, erhält man ein doppeltarithmisches Diagramm, welches in Abbildung 3.3 dargestellt ist. Diese Art der Darstellung ist die heute am häufigsten verwendete Art und wird als Wöhlerlinie bezeichnet. An der ausgeprägten

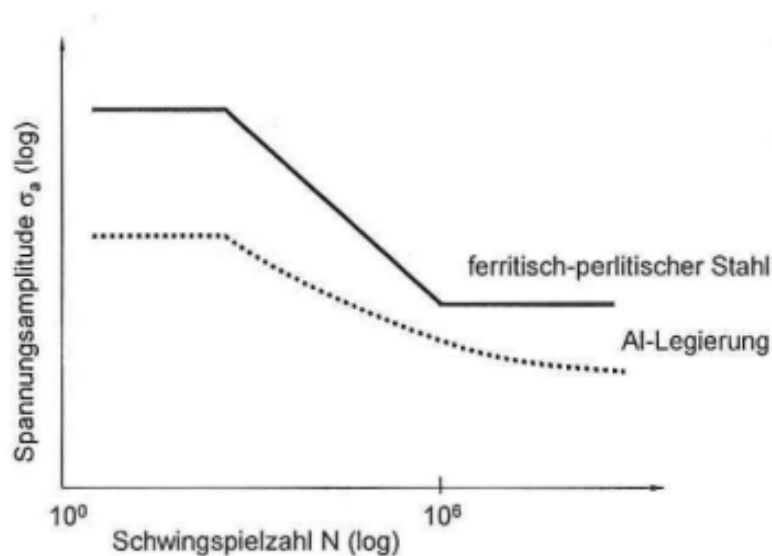


Abbildung 3.3: doppeltarithmisches Diagramm (Eichlseder, o.D., S.22)

3 Betriebsfestigkeit

Dauerfestigkeit in Abbildung 3.3 kann man erkennen, dass es sich dabei um eine Wöhlerlinie für Stähle handelt. Bei austenitischen Stählen und bei Werkstoffen mit kubisch-flächenzentriertem Kristallgittern, wie zum Beispiel Aluminium beinhaltet die Wöhlerlinie keine ausgeprägte Dauerfestigkeit. Mittels Wöhlerversuch könne folgende Aussagen getroffen werden:

- Bruch tritt unterhalb der statischen Festigkeit auf, wenn die Belastungen wiederholt auftreten
- Je kleiner die Amplituden sind, desto höher ist die ertragbare Schwingspielzahl
- Unterhalb der Dauerfestigkeit σ_{aD} treten keine Brüche auf, d.h. die ertragbare Schwingspielzahl wird unendlich groß. Diese werden auch als Durchläufer bezeichnet

3.3.2.1 Darstellung der Wöhlerlinie

Diese kann mit den drei Größen σ_{aD} , N_D und k dargestellt werden. Wobei σ_{aD} die Dauerfestigkeit, N_D die Schwingspielzahl am Abknickpunkt und k die Neigung der Zeitfestigkeitslinie darstellt. Die Neigung der Zeitfestigkeit kann folgende Werte annehmen:

- Schweißnaht mit offener Wurzel: $k=3$
- nicht geschweißtes Bauteil mit bereits vorhandenem Riss: $k=3$
- geschweißtes Bauteil: $k=3$
- Bauteile, welche auf Biegung beansprucht werden: $k=5$
- Wellen mit Torsionsbelastung: $k=12$

Für den Exponenten k gilt somit: Ein kleiner Wert bedeutet einen steilen, ein großer Wert einen flachen Verlauf der Zeitfestigkeitslinie. (Eichlseder, o.D., S.23 & S.24)

3.3.2.2 Kennwerte und Abgrenzung der Wöhlerlinie

Wie bereits im Kapitel 3.3.1 beschrieben, besteht die Wöhlerlinie aus drei unterschiedlichen Bereichen. Welche in Abbildung 3.4 entsprechend mit K, Z und D gekennzeichnet sind.

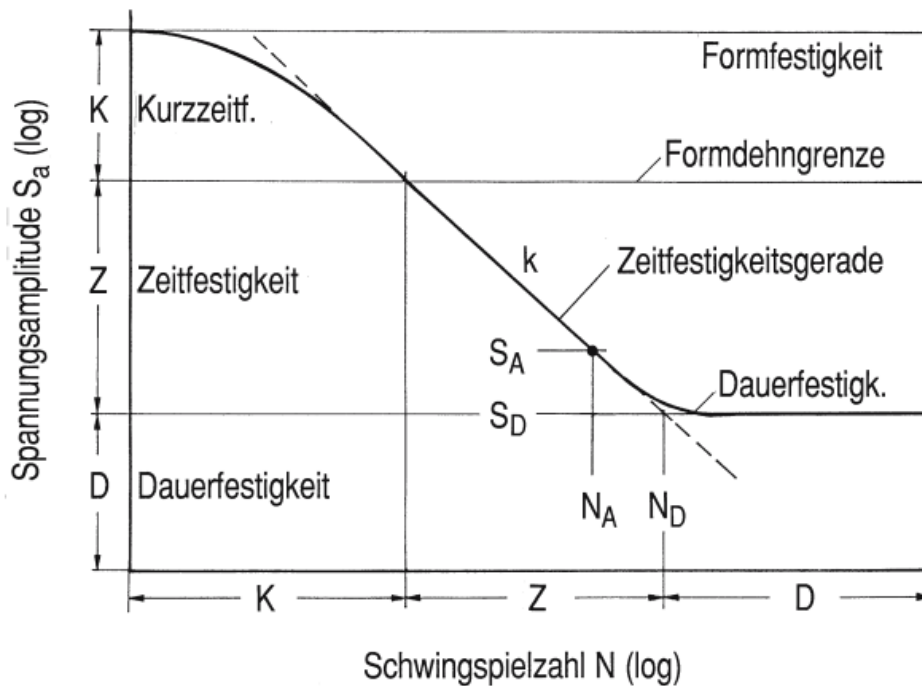


Abbildung 3.4: Woehlerdiagramm

Des weiteren ist sie durch folgende Kennwerte gekennzeichnet. Die Schwingspielzahl ist folgendermaßen definiert

$$N = N_D \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_D} \right)^{-k} \quad \text{für } \sigma_a \geq \sigma_D \quad (3.1)$$

3 Betriebsfestigkeit

die Abgrenzung zum Dauerfestigkeitsbereich lautet

$$N = \infty \quad \text{für } \sigma_a < \sigma_D \quad (3.2)$$

und die Abgrenzung zum Kurzzeitfestigkeitsbereich bei der Formdehngrenze σ_F lautet. (Eichlseder, o.D., S.24)

$$\sigma_a < \sigma_F \left(\frac{1 - R}{2} \right) \quad (3.3)$$

3.3.3 Auswertung gemessener Beanspruchungs-Zeit-Verläufe

Durch die Modellierung von Lastmodellen oder durch die Messung im laufenden Betrieb werden Beanspruchungs-Zeit-Funktionen gewonnen. Hat man eine simulierte oder gemessene Zeitreihe zur Verfügung, so kann mit Hilfe von Zählverfahren ein Beanspruchungskollektiv erstellt werden. Im weiteren wird auf die wichtigsten Zählverfahren in der Betriebsfestigkeit eingegangen. Bei diesen kann man zwischen dem einparametrischen und dem zweiparametrischen Verfahren differenzieren. Kennzeichnend für beide Verfahren ist, dass für eine Zählung eine Unterteilung des Messbereichs in sogenannte Klassen von gleicher Größe notwendig ist. Diese werden fortlaufender in Richtung positiver Messgrößen nummeriert. (Köhler u. a., 2012, S.9)

Zu den einparametrischen Zählverfahren zählt die

- Spitzenzählung
- Klassengrenzenüberschreitungszählung
- Bereichszählung
- Bereichspaarzählung

Das einparametrische Zählverfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass nur ein Merkmal gezählt wird.

3 Betriebsfestigkeit

Zu den zweiparametrischen Zählverfahren zählen die

- Bereichs-Mittelwert-Zählung
- Von-Bis-Zählung
- Bereichspaar-Mittelwert-Zählung
- Rainflow-Zählung (Köhler u. a., 2012, S.12 & S.18)

Bei Anwendung solcher Zählverfahren gehen leider immer Informationen verloren:

- Die zeitliche Aufeinanderfolge der gezählten Ereignisse kann nicht mehr rekonstruiert werden, weil diese nur nach Größe und Häufigkeit sortiert und klassiert werden.
- Die Geschwindigkeit (Frequenz), mit der die einzelnen Beanspruchungsschwankungen auftreten, beeinflusst das Zählergebnis nicht.

Daher gibt eine Häufigkeitsverteilung nur an, wie oft die Ober- und Unterwerte der Beanspruchung erreicht oder überschritten wurde. (Eichlseder, o.D., S.64)

3.3.3.1 Rainflow Zählung

Das Merkmal der Rainflow-Zählung ist, dass man sich die Zeitachse um 90 Grad im Uhrzeigersinn gedreht vorstellen muss. Dabei erfolgt die Zählung von geschlossenen Hysteresen. Nicht geschlossene Hysteresen werden als Residuum ¹ abgelegt. Um eine geschlossene Hysterese erkennen zu können, kommen verschiedene Algorithmen zum Einsatz.

Die am meisten verwendeten sind der Drei- und Vier- Punkt Algorithmus. Darunter versteht man, dass drei oder vier aufeinander folgende Extremwerte gewählt werden, um eine geschlossene Hysterese zu bilden. (Köhler u. a., 2012, S.24) Die Fläche, welche von einer Hysterese im Spannungs-Dehnungs-Diagramm eingeschlossen wird, kann als Energie verstanden werden, die

¹weist die nicht zu Hysteresen geschlossenen Schleifenäste aus (Haibach, 2005, S.373)

3 Betriebsfestigkeit

von einem Werkstoffelement während eines Schwingenspiels aufgenommen wird. Diese Energie wird für die plastische Verformung bzw. für die Bildung neuer Risse benötigt. Die Ergebnisse aus der Zählung können in verschiedenen Matrixdarstellungen wiedergegeben werden. Die gängigsten Formen sind die Vollmatrix und die Halbmatrix.

Da die Rainflow-Zählung nicht an das zyklisch-elastisch-plastische Werkstoffverhalten gebunden ist, kann dieses auch für Kräfte, Momente, Nennspannungen usw. verwendet werden. (Köhler u. a., 2012, S.26)

3.3.4 Beanspruchungskollektiv

Die Beschreibung der Schwingspiele eines Beanspruchungs-Zeit-Verlaufes nach Größe und Häufigkeit wird als Beanspruchungskollektiv bezeichnet. (Eichl seder, o.D., S.63)

3.3.4.1 Kenngrößen und Zusammenhänge eines Schwingspiels

Als Grundlage für alle Beschreibungen von Beanspruchungs-Zeit-Verläufen wird von einem einzelnen Schwingspiel ausgegangen. Ein Schwingspiel ist wie folgend definiert:

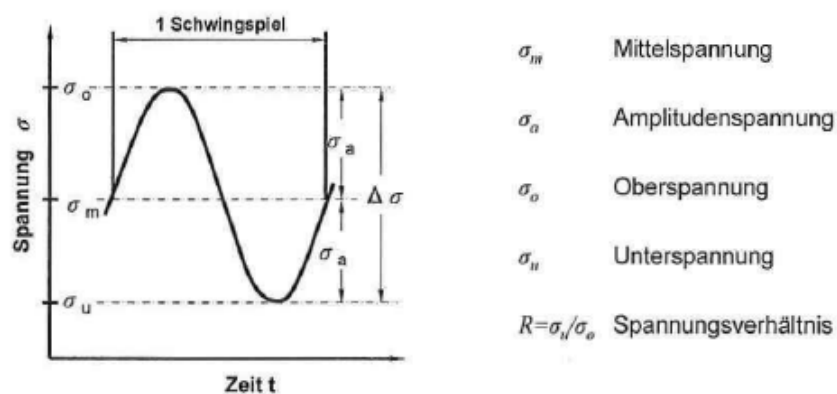


Abbildung 3.5: Schwingspiel

3 Betriebsfestigkeit

Des weiterem bestehen folgende Zusammenhänge:

$$\sigma_a = \sigma_o - \sigma_m \quad (3.4)$$

$$\sigma_a = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_o - \sigma_u) \quad (3.5)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_o + \sigma_u) \quad (3.6)$$

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad (3.7)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.8)$$

Des weiteren ist auch die Lage der Schwingspiele bezüglich der Beanspruchungs Nulllinie von Bedeutung. Dabei unterscheidet man folgende Beanspruchungen:

- Wechselbeanspruchung, wenn Amplitude die Nulllinie schneidet bzw. $\sigma_m = 0$
- Schwellbeanspruchung, wenn Nulllinie nicht geschnitten wird

Des weiteren können Schwingbeanspruchungen ein- oder mehrstufig auftreten. (Eichlseder, o.D., S.20)

3.3.4.2 Zusammenhang Kollektivform-Wöhlerlinie

Unter einem Kollektiv versteht man den Zusammenhang zwischen Beanspruchungsamplitude S_F und der dazugehörigen Summenhäufigkeit H oder Stufenhäufigkeit h (siehe Abbildung 3.6).

Unter einer Stufen- bzw. Summenhäufigkeit versteht man die Häufigkeit mit der die Spannungsamplitude S_F auftritt. Die Form eines Kollektives ist von der Art der Amplitude abhängig. Bei einer konstanten Amplitude S_a erhält man ein rechteckiges Kollektiv, bei einer veränderlichen Amplitude ein entsprechendes Einheitskollektive. Ein Kollektiv bzw. Lastkollektiv

3 Betriebsfestigkeit

enthält mit seinen Amplituden und Häufigkeiten die Größen, welche wesentlich zur Werkstoffschädigung beitragen. Mit den in Kapitel 3.3.3 erklärten Zählverfahren, kann man aus Messungen oder Simulationen Kollektive ableiten. Die simulierten oder gemessenen Lastkollektive können durch Einheitskollektive angenähert werden.

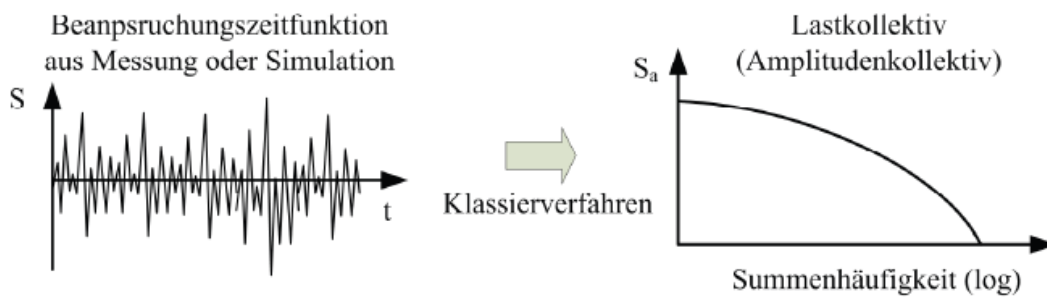


Abbildung 3.6: Von Beanspruchungszeitfunktion zu Kollektiv

Abbildung 3.7 zeigt unterschiedliche Einheitskollektive bei verschiedenen Formparameter.

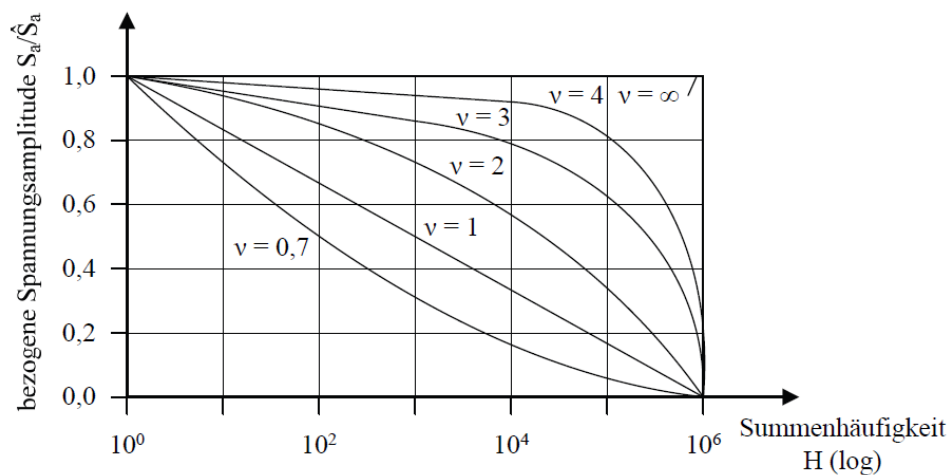


Abbildung 3.7: Einheitskollektive

3 Betriebsfestigkeit

Dabei beschreibt der Formparameter ν den Verlauf des Kollektivs zwischen dem Kollektivhöchstwert \hat{S}_a und dem Kollektivumfang H_0 . Die Summenhäufigkeit H ist folgendermaßen definiert (Hinkelmann u. a., 2002, S.5):

$$H = H_0 \left(1 - \left(\frac{S_a}{\hat{S}_a}\right)^\nu\right) \quad (3.9)$$

3.3.5 Lebensdauerlinie

Die Lebensdauerlinie bzw. Gaßnerlinie ist von der jeweiligen Kollektivform abhängig. Wobei die Wöhlerlinie eine Sonderform der Gaßnerlinie bei einem rechteckigen Kollektiv darstellt. Um eine Gaßnerlinie zu erhalten, wird wie bei der Wöhlerlinie bei konstanter Kollektivform im Versuch der Kollektivhöchstwert σ_{ai} variiert und im doppellogarithmischen Diagramm über der im Versuch erreichten Schwingspielzahl N_i bis zum Anriss bzw. Bruch aufgetragen. In der unten dargestellten Abbildung 3.8 sind drei verschiedene Kollektivformen mit den jeweilig dazugehörigen Lebensdauerlinie dargestellt.

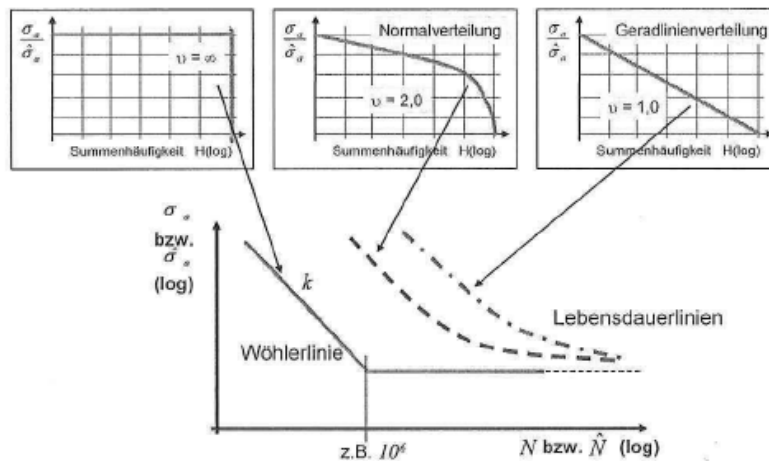


Abbildung 3.8: Kollektivformen: links: Rechteckverteilung, mitte: Normalverteilung, rechts: Geradlinienverteilung

3 Betriebsfestigkeit

Wobei die Rechteckverteilung der Wöhlerlinie das härteste Kollektiv darstellt (Einstufenbeanspruchung). (Eichlseder, o.D., S.72) Grundsätzlich wird die Lebensdauerlinie von den gleichen Einflussgrößen wie die Wöhlerlinie beeinflusst:

- Werkstoff und Werkstoffzustand
- Probengeometrie und Oberfläche
- Beanspruchung (Beanspruchungsart und Mittelspannung)
- Umgebungsbedingungen (Temperatur, korrosives Medium)
(Eichlseder, o.D., S.73)

Wobei die genaue Lage der Lebensdauerlinie in Abhängigkeit der Kollektivform nur durch Versuche bestimmt werden kann.

3.4 Betriebsdauerermittlung nach Schadensakkumulationshypothese

Um die Lebensdauer eines Bauteiles nach der Hypothese der linearen Schadensakkumulation berechnen zu können ist es wichtig, dass verwendete Kollektiv und die Wöhlerlinie zu kennen. Man unterscheidet drei wichtige Rechenverfahren, welche nach ihren Begründern benannt sind

- Original-Palmgren-Miner:
Hierbei verläuft die Wöhlerlinie waagrecht. Das bedeutet, dass Amplituden unterhalb des Abknickpunktes nicht schädigen
- Palmgren-Miner-Elementar:
Hierbei wird die Wöhlerlinie nach dem Abknickpunkt mit einer Neigung von $k' = k$ weitergeführt
- Palmgren-Miner-Modifiziert:
Hierbei wird die Wöhlerlinie nach dem Abknickpunkt mit einer Neigung von $k' = 2 \cdot k - 1$ weitergeführt

3 Betriebsfestigkeit

Das bedeutet, dass bei den Verfahren Palmgren Miner Elementar und Modifiziert auch Schädigungen durch kleine Amplituden unter dem Abknickpunkt berücksichtigt werden.

Wobei der Original-Palmgren-Miner nur Beanspruchungen berücksichtigt, die sich oberhalb der Dauerfestigkeit im Bereich der Zeitfestigkeit befinden und für den Schädigungszuwachs je Schwingspiel eine Teilschädigung von

$$\Delta D_i = \frac{1}{N_{fi}} \quad (3.10)$$

bewirkt. (Siemon, 2006, S.32)

Die Grunddefinition der Schadensakkumulationshypothese nach Miner besagt, dass keine Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeit σ_D berücksichtigt werden. Durch eine Vielzahl von experimentellen Versuchen wurde aber folgendes herausgefunden. Dass eine häufige Vorbelastung oberhalb der Dauerfestigkeit zu einem Abnehmen Dauerfestigkeitsgrenze σ_D führt und somit auch Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze zur Schädigung des Bauteiles beitragen können. (Siemon, 2006, S.31 & S.32)

In der untenstehenden Abbildung 3.9 (Eichlseder, o.D., S.77) sind aller drei Verfahren in einem doppellogarithmischen Diagramm dargestellt.

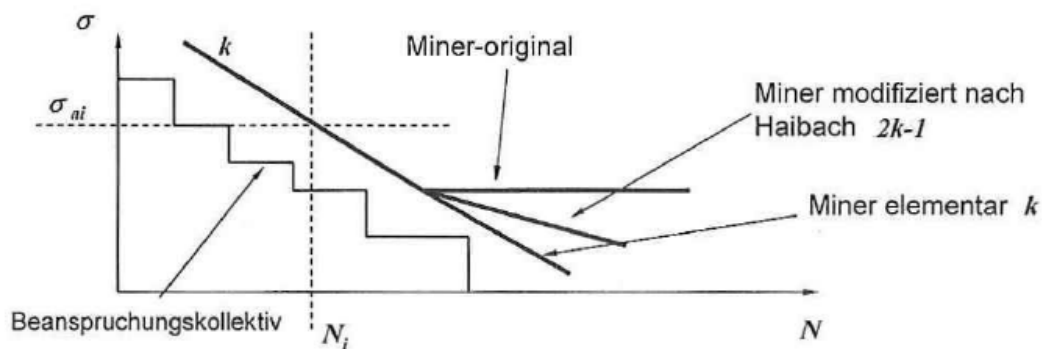


Abbildung 3.9: Palmgren Miner Verläufe

3 Betriebsfestigkeit

Dabei ist zu erkennen, dass alle drei Verläufe den selben Abknickpunkt bei $N_D = 10^6$ Lastwechsel besitzen, welcher wiederum einen Näherungswert darstellt.

3.4.1 Vorgehensweise bei Lebensdauerabschätzung

Anhand einer zweistufigen Beanspruchungs-Zeit-Funktion mit unterschiedlich großen Spannungsamplituden σ_i wird die lineare Schadensakkumulationshypothese erläutert. Um diesen Beanspruchungs-Zeit-Verlauf in ein doppellogarithmisches Diagramm übertragen zu können, muss dieser zuerst klassiert werden.

Unter klassieren versteht man das Sortieren der einzelnen Spannungsamplituden σ_i nach ihrer Größe und das Umrechnen der einzelnen Schwingenspiele auf ein Schwingenspiel mit einer Mittelspannung σ_m von Null. Das Ergebnis dieses Klassierungsvorganges ist auf der linken Seite der Abbildung 3.10 dargestellt. Daraufhin werden die einzelnen Spannungsamplituden σ_i und die dazugehörigen Schwingenspielhäufigkeiten n_i , wie in Abbildung 3.10 dargestellt, in das Wöhlerdiagramm übertragen.

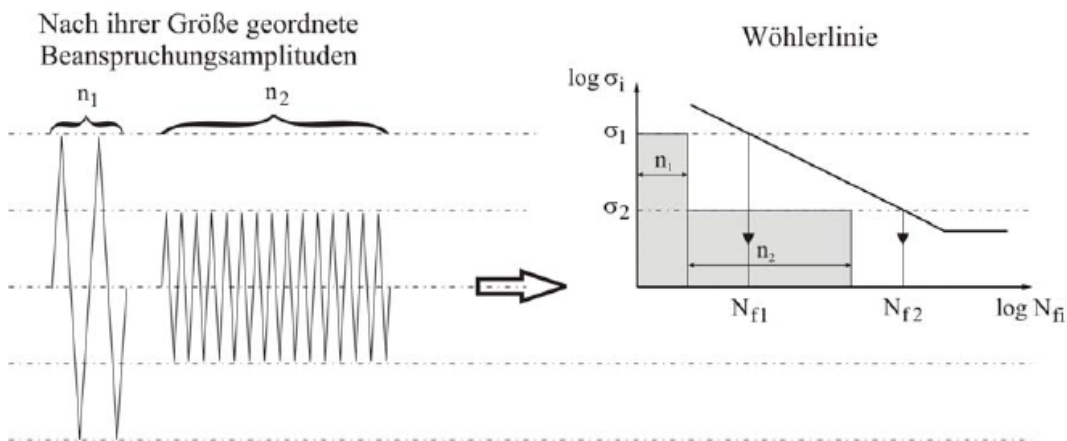


Abbildung 3.10: Beispiel für Schadensakkumulationshypothese

3 Betriebsfestigkeit

Der Klassierungsvorgang und die Übertragung der Spannungen in das Wöhlerdiagramm kann unabhängig der Palmgren Miner Verläufe erfolgen. Auf diese wurde bereits in Kapitel 3.4 näher eingegangen.

Wird die Schwingspielzahl auf die ertragbare Versagens-Lastspielzahl N_{fi} auf die Wöhlerlinie bezogen, erhält man daraus die Teilschädigung je Laststufe, welche folgendermaßen definiert ist

$$D_i = n_i \cdot \Delta D_i = \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (3.11)$$

Werden die einzelnen Teilschädigungen einer mehrstufigen Beanspruchung aufsummiert, erhält man die Schadenssumme

$$D = \sum_i^m D_i \quad (3.12)$$

Hierbei geht man von einem linearen Schädigungszuwachs aus, welcher je Lastspiel eine Teilschädigung bewirkt. Erhält man durch das Aufsummieren der Teilschädigungen einen Wert der größer ist als 1,

$$\sum_i^m D_i \geq 1 \quad (3.13)$$

so ist die Beanspruchbarkeit eines Bauteiles überschritten und es kann dadurch zum Schwingbruch bzw. zu einem technischen Anriss des Bauteiles kommen. (Siemon, 2006, S.30)

4 Bewertungsvorschriften

Die nachfolgenden Bewertungen und Vorschriften können für Schienenfahrzeuge verwendet werden, solange dies nicht ausgeschlossen wird. Des Weiteren ist es wichtig, dass die Werkstoffe, Schweißnahtdetails und die Belastungen durch diese Bewertungen und Vorschriften abgedeckt werden. Unabhängig von der im Einsatz befindlichen Bewertungsvorschrift muss die EN 15827 : 2011¹ berücksichtigt werden. Diese stellt eine „übergeordnete Norm“ da, welche festlegt, was eine Bewertungsvorschrift beinhalten muss, um als Bewertungsvorschrift verwendet werden zu können.

Das Ziel dieser Europäischen Norm ist es, alle beschriebenen Anforderungen in Bezug auf die Konstruktion und Validierung von Drehgestellen und Fahrwerken in einem Dokument zusammenfassen. Da Drehgestelle und Fahrwerke häufig von einer anderen Organisation als der für das allgemeine Schienenfahrzeug zuständigen Organisation hergestellt werden, wird zuerst mit der Festlegung der grundlegenden Information, die für die Herstellung der erforderlichen Konstruktion benötigt werden, begonnen. (EN15827, 2011, S.5)

Unter anderem wird dadurch auch die Anforderung an die Festigkeit berücksichtigt. Die untenstehende Liste zeigt eine Reihe von heute im Schienenfahrzeugbereich im Einsatz befindliche Bewertungsvorschriften.

- IIW XIII, Empfehlung zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile
- DIN EN 1993 – 1 – 9. Eurocode 3, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten

¹Railway applications-Requirements for bogies and running gears

4 Bewertungsvorschriften

- BS 7608 : 1993, British Standard-Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures
- ERRI B 12/RP 60, Versuche zum Festigkeitsnachweis an Schienenfahrzeuge
- DS 952, Schweißen an Schienenfahrzeugen an maschinentechnischen Anlagen (durch DVS 1612 ersetzt worden)
- DVS 1612, Gestaltung und Dauerfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen mit Stählen im Schienenfahrzeugbau
- FKM ², Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen
- AWS D1.1/D1.1M, Structural Welding Code-Steel, American Welding Society
- DIN 15018, Krane-Grundsätze für Stahltragwerke-Berechnung (wurde zurückgezogen)

Eine Übersicht aller Bewertungsvorschriften ist in einem doppellogarithmischen Diagramm in Abbildung 4.1 dargestellt. Diese Vorschriften können auf Schienenfahrzeuge angewendet werden, wenn dies nicht ausgeschlossen wird und wenn die verwendeten Werkstoffe, Schweißnahtdetails und die vorhandenen Belastungen dadurch abgedeckt werden. (Oßberger, 2010, S.13) Da es keine Informationen über den Wöhlerversuch gibt, sind die Bewertungsvorschriften DS 952 und DVS 1612 nicht im Diagramm enthalten. Gut zu erkennen sind die unterschiedlichen Abknickpunkte der Zeit- in die Dauerfestigkeitslinie. Diese erstrecken sich von $1,1 \cdot 10^6$ bei DIN 15018 bis zu $1,0 \cdot 10^8$ bei Eurocode 3. Des weiteren weisen die Bewertungsvorschriften IIW, BS 7608 und ERR B 12/RP60 keine ausgeprägte Dauerfestigkeit auf. Die Bewertungsvorschrift FKM weist ab 5 Millionen Lastwechsel eine ausgeprägte Dauerfestigkeit auf. (Oßberger, 2010, S.60)

²Forschungskuratorium Maschinenbau

4 Bewertungsvorschriften

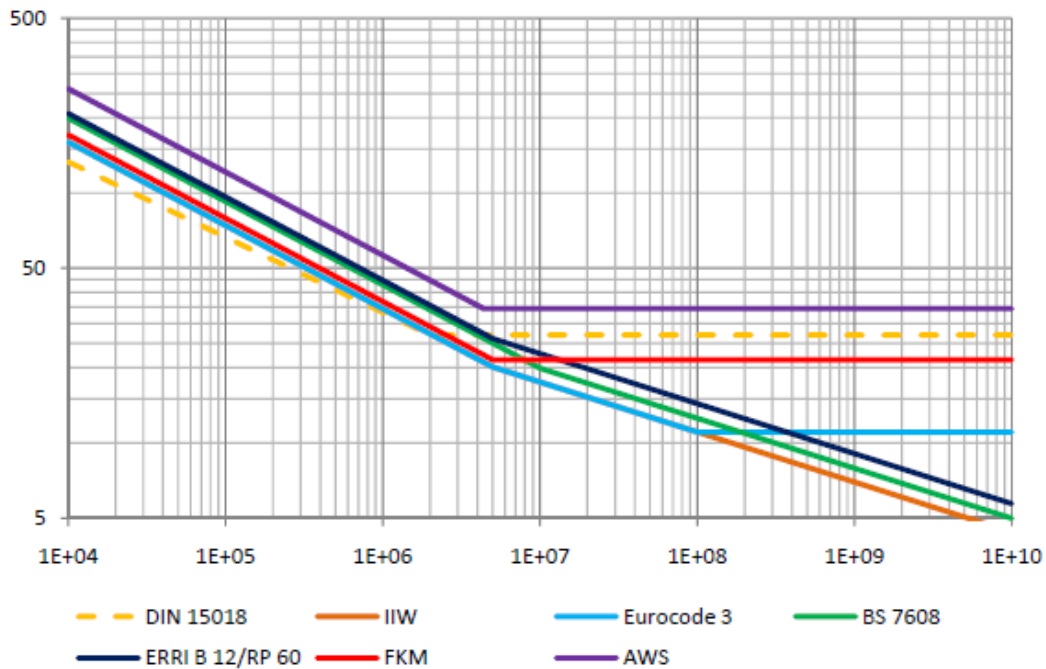


Abbildung 4.1: Übersicht über die Wöhlerliniensysteme der einzelnen Bewertungsvorschriften

In den folgenden Kapiteln wird auf die einzelnen Bewertungsvorschriften näher eingegangen.

4.1 DIN 15018, Krane-Grundsätze für Stahltragwerke-Berechnung

Die Norm ist für Stahltragwerke von Kranen und Kranausrüstung aller Art anzuwenden und kann auch für fahrbare Stahltragwerke mit Stetigförderern angewendet werden. Sie ist nicht anzuwenden für Kranbahnen, Bagger, Drahtseilbahnen, Wagenkipper und Bergwerksmaschinen. Die Vorschrift

4 Bewertungsvorschriften

erlaubt nur die Verwendung der Baustähle St37³ und St52 – 3 des Rohrstahts St35⁴, und Schienenstahl von mindestens 600 N/mm² Zugfestigkeit. Andere Stahlsorten dürfen nur verwendet werden, wenn die mechanischen Eigenschaften, die chemische Zusammensetzung und die Schweißseignung vom Hersteller des Werkstoffes gewährleistet wird. (DIN15018, 1984, S.2, S.9 & S.11) Die Anwendung der DIN 15018 für die Auslegung von Schienenfahrzeugen wird in der Norm nicht erwähnt. Der Grund dafür liegt in dem zugehörigen Lastannahmeteil, der spezielle Lasten, wie sie bei Kranbahnen auftreten können umfasst. Der Teil mit dem Betriebsfestigkeitsnachweis ist allgemein formuliert und kann deshalb, mit eigenen Lastannahmen, auch zur Auslegung von anderen Stahltragwerken verwendet werden. (Oßberger, 2010, S.14)

4.2 IIW-International Institut of Welding

Der Internationale Verband für Schweißtechnik wurde 1948 von den schweißtechnischen Verbänden bzw. Instituten aus 13 Ländern gegründet, um die Entwicklung der Schweißtechnik auf wissenschaftlichen und technischen Gebieten weltweit voranzubringen. Inzwischen gehören dem Verband über 50 Länder an. (*International Verband für Schweißtechnik (IIW) 2015*) Dieser besteht aus einer Vielzahl von Komitees.

Folgende zwei Komitees beschäftigen sich mit Spannungen und Bewertungen von Schweißkonstruktionen

- C-XIII ... Fatigue of Welded components an Structures
- C-XV ... Design, Analysis and fabrication of welded structures
(*International Institute of welding 2015*)

³Alle Gütegruppen, Erschmelzungs- und Vergießungsarten

⁴Alle Gütegruppen, Erschmelzungs- und Vergießungsarten

4.2.1 IIW XIII, Empfehlung zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile

In Anlehnung an die EKS-Empfehlung entstand durch eine internationale Arbeitsgemeinschaft im IIW die "Empfehlung zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteilen", die 1996 erstmals erschien. Durch den modularen Aufbau ist es möglich, diese in nahezu allen Bereichen der Schweißtechnik anzuwenden und vor allem dort, wo keine Regelwerke vorliegen oder bestehende Regelwerke die jeweiligen Problemstellungen nicht oder unzureichend behandeln. Die Bewertungsvorschrift kann für Schweißverbindungen aus Baustahl und Aluminiumlegierungen angewendet werden. Neuerdings sind auch nicht-stahltypische Formen von Schweißverbindungen im Kerbfallkatalog vorhanden. Des Weiteren ist die Bewertung von Schweißverbindungen mit Imperfektionen (Kantenversatz und Verzug, Einbrandkerben, Poren und Einschlüsse, rissartige Defekte) möglich. Die Bewertung kann mittels Nenn-, Struktur- und Kerbspannung erfolgen. Durch die Abgleichung der beiden Bewertungsvorschriften IIW und FKM ist es möglich, die erhaltenen Ergebnisse miteinander zu vergleichen. (Haibach, 2005, S.203)

4.2.2 Bewertungskonzepte nach IIW-Richtlinie

In der IIW- Bewertungsvorschrift wird eine Schwingfestigkeitsbewertung auf Basis von Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept beschrieben. Für jedes Konzept werden Bemessungswöhlerlinie empfohlen. In der IIW-Empfehlung wird die Beanspruchbarkeit durch eine sogenannte FAT -Klasse⁵ definiert. Diese FAT-Klasse kennzeichnet die ertragbare Schwingbreite bzw. Doppelamplitude bei $N = 2 \cdot 10^6$ Lastwechseln. (Varfoomeev u. a., 2011, S.13) Dies würde bei einer FAT 80 Klasse eine Nennspannung von 80 MPa bei $N = 2 \cdot 10^6$ Lastwechseln ergeben. Der Steigungsexponent ist für alle

⁵Fatigue Assessment Class

4 Bewertungsvorschriften

Schweißnähte (unter Normalspannung) mit $k = 3$ festgelegt. Die zulässigen Spannungswerte gelten dabei für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 95%. Die Wöhlerlinie wurde bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,5$ ermittelt. Bei geringen Eigenspannungen, zum Beispiel nach einer Spannungsarmglühung können kleinere Spannungsverhältnisse verwendet werden. (Späth und Burget, 2006, S.198) Die Wöhlerlinie ist einem umfangreichen Katalog mit unterschiedlichen Schweißnahtdetails und Belastungsfällen zugeordnet. Abbildung 4.2 zeigt einen Auszug aus der IIW Richtlinie für längsbelastete Schweißnähte. Die jeweilige FAT-Klasse wird für Stahl und für Aluminium getrennt angegeben.

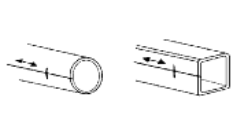
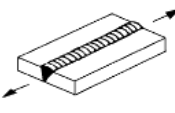
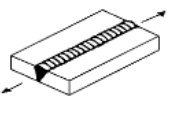
No.	Structural Detail	Description (St.= steel; Al.= aluminium)	FAT St.	FAT Al.	Requirements and Remarks
300	Longitudinal load-carrying welds				
311		Automatic longitudinal seam welds without stop/start positions in hollow sections with stop/start positions	125 90	50 36	
312		Longitudinal butt weld, both sides ground flush parallel to load direction	125	50	
313		Longitudinal butt weld, without stop/start positions, NDT with stop/start positions	125 90	50 36	

Abbildung 4.2: FAT Klassen Auszug aus IIW Richtlinie

Die in ein doppellogarithmisches Diagramm eingetragenen FAT Klassen ermöglichen die einfache Ermittlung der entsprechenden Schwingfestigkeit. Die in Abbildung 4.3 eingetragenen FAT-Klassen gelten für Stahl bzw. Normalspannungen.

Wie bereits erwähnt, werden die FAT Klassen getrennt für Stahl und Aluminium angegeben, ergeben daher auch unterschiedliche Bewertungs Wöhlerlinie.

4 Bewertungsvorschriften

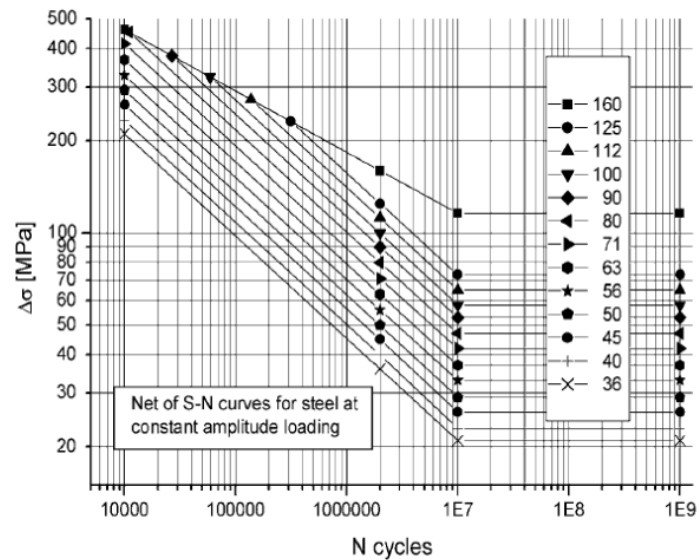


Abbildung 4.3: Bewertungs Wöhlerlinien (Stahl) für verschiedene FAT Klassen aus IIW-Richtlinie

Auch die Beanspruchungsarten (Normal- bzw. Schubspannungen) werden getrennt betrachtet. Für Schubspannungen gelten die in Abbildung 4.4 angegebenen FAT-Klassen. Wobei diese bei einer Steigung der Zeitfestigkeitsgerade von $k = 5$ und bei $N = 1 \cdot 10^8$ Lastwechseln gelten.

No.	Description (St.= steel; Al.= aluminium)	FAT St.	FAT Al.
1	Parent metal or full penetration butt weld; m=5 down to 1E8 cycles	100	36
2	Fillet weld or partial penetration butt weld; m=5 down to 1E8 cycles	80	28

Abbildung 4.4: FAT Klassen Auszug für Schubspannungen aus IIW Richtlinie

4.3 FKM, Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen

Diese Richtlinie ermöglicht den rechnerischen Festigkeitsnachweis für stab-, flächen- und volumenförmigen Bauteilen, welche mit oder ohne spanabhebender Bearbeitung oder auch durch Schweißen hergestellt werden. Diese wurde auf Grundlagen der früheren Richtlinie VDI 2226 und weiteren Quellen erarbeitet.

Sie ist im Maschinenbau und in verwandten Bereichen der Industrie anwendbar und beschreibt den statischen und Ermüdungsfestigkeitsnachweis, letzteren je nach Beanspruchungscharakteristik als Dauer-, Zeit- oder Betriebsfestigkeitsnachweis.

Des Weiteren ermöglicht die Vorschrift die Bewertung von Nennspannungen und auch örtlichen Spannungen, welche mit Hilfe von analytischen Lösungen, Finiten-Elemente- oder Randelementeberechnungen oder aus Messungen ermittelt wurden.

Die Bewertungsvorschrift ist für folgende Materialien und Einsatzbereiche anwendbar:

- Stahl, auch für nichtrostenden, bei Bauteiltemperaturen von -40 °C bis 500 °C
- Eisengusswerkstoffe bei Bauteiltemperaturen von -25 °C bis 500 °C
- Aluminiumwerkstoffe bei Bauteiltemperaturen von -25 °C bis 200 °C (FKM6, 2012, S.4)

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 erklärt, erfolgt die Bewertung von Schweißkonstruktionen mit Hilfe von unterschiedlichen FAT-Klassen. Diese stellen Schweißdetails unter verschiedenen Beanspruchungen dar. Folgende Abweichungen gegenüber den IIW-Empfehlungen treten auf:

4 Bewertungsvorschriften

- Die Bauteilklassen für den Grundwerkstoff bei Normalspannung FAT 160 (Baustahl) bzw. FAT 70 (Aluminiumlegierung 5000, 6000) oder FAT 80 (Aluminiumlegierung 7000) fehlen, da die Berechnung für den Grundwerkstoff hier wie für nicht geschweißte Bauteile durchzuführen ist.
- Die Bauteilklassen für den Grundwerkstoff bei Schubspannung FAT 100 (Baustahl) bzw. FAT 36 (Aluminiumlegierung) bleiben aber, da sie auch für voll durchgeschweißte Stumpfnähte gelten (FKM6, 2012, S.167)

Alle weiteren FAT-Klassen und Schweißdetails wurden der IIW Richtlinie entnommen. In Abbildung 4.5 bzw. 4.6 sind die beispielhaft einige FAT-Klassen (Bauteilklassen) bei Schubspannung bzw. Normalspannungen in der FKM Richtlinie 6 dargestellt.

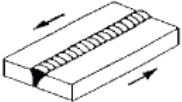

Nr.	Konstruktives Detail	Beschreibung	FAT Stahl	FAT Alu
1		Voll durchgeschweißte Stumpfnähte	100	36
2		Kehlnähte, teilweise durchgeschweißte Stumpfnähte	80	28

Abbildung 4.5: FAT Klassen Auszug bei Schubbeanspruchung aus FKM Richtlinie 6

4 Bewertungsvorschriften


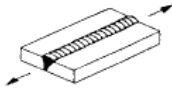
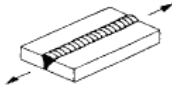
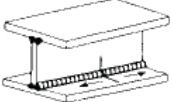
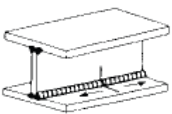
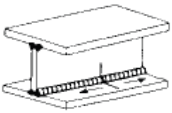
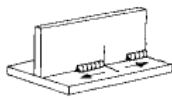
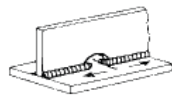
Nr.	Konstruktives Detail	Beschreibung	FAT Stahl	FAT Alu
300	Schweißnähte, längsbelastet			
311		Automatisch geschweißte Längsnähte in Hohlprofilen, ohne Nahtansätze mit Nahtansätzen	125 90	50 36
312		Längsbelastete Stumpfnah, beidseitig blecheben parallel zur Naht bearbeitet, 100 % zFP	125	50
313		Längsbelastete Stumpfnah, ohne Nahtansätze, zFP mit Nahtansätzen	100 90	40 36
321		Durchlaufende automatisch geschweißte längsbelastete K-Nah, voll durchgeschweißt, ohne Nahtansätze, 100 % zFP, Spannung im Flansch	125	50
322		Durchlaufende automatisch geschweißte längsbelastete Doppel-Kehlnaht ohne Nahtansätze, Spannung im Flansch	100	40
323		Durchlaufende manuell geschweißte längsbelastete Kehl- oder K-Nah, Spannung im Flansch	90	36
324		Unterbrochene längsbelastete Kehlnaht, Normalspannung σ im Flansch und Schubspannung τ im Steg am Nahtende	$\tau / \sigma =$ 0 0,0 – 0,2 0,2 – 0,3 0,3 – 0,4 0,4 – 0,5 0,5 – 0,6 0,6 – 0,7 > 0,7	80 32 71 28 63 25 56 22 50 20 45 18 40 16 36 14
325		Längsbelastete K- oder Kehlnaht oder unterbrochene Naht mit Freischnitt, Freischnitte kleiner als 40 % des Stegs, Normalspannung σ im Flansch und Schubspannung τ im Steg am Nahtende	$\tau / \sigma =$ 0 0,0 – 0,2 0,2 – 0,3 0,3 – 0,4 0,4 – 0,5 0,5 – 0,6 > 0,6	71 28 63 25 56 22 50 20 45 18 40 16 36 14

Abbildung 4.6: FAT Klassen Auszug bei Normalbeanspruchung aus FKM Richtlinie 6

4.3.1 Unterschiedliche Bauteilklassen bei Normal- und Schubspannung

Die Bauteilklassen unterscheiden sich je nach konstruktiven Detail. Folgende Unterteilungen bestehen

- Berechnung von geschweißten Bauteile mit Nennspannung
- Berechnung von geschweißten Bauteile mit Strukturspannung (lokale Nennspannung)
- Berechnung von geschweißten Bauteile mit effektive Nennspannung

Alle Bauteilklassen in der Bewertungsvorschrift FKM 6 entsprechen denen der IIW- Empfehlung. Die Bauteilklassen für Nennspannung enthalten die Einflüsse der Bauteilform, der Schweißnahtgeometrie und der Schweißnaht selbst. Bei Bauteilklassen für Strukturspannung enthalten die Einflüsse der Schweißnahtform und der Schweißnaht selbst, nicht aber den Einfluss der Bauteilform, da dieser in der Strukturspannung berücksichtigt wird.

Des weiteren ist zu beachten, das bei Schubbeanspruchung mit Strukturspannungen die Bauteilklassen für Nennspannung anzuwenden sind. Bei der Berechnung der Strukturspannung darf nur der Riss am Nahtübergang und nicht der Riss an der Wurzel berücksichtigt werden. Der Wurzelriss muss mit Hilfe der Nennspannung berechnet werden. (FKM6, 2012, S.167)

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

Alle bisher in Kapitel 4 erwähnten Vorschriften und Bewertungen können in den einzelnen Anwendungsgebieten der jeweiligen Vorschrift angewendet werden. Wird nicht ausdrücklich davon abgeraten, können diese weitgehend auch für Schienenfahrzeuge und dort zum Einsatz kommenden Werkstoffe verwendet werden. Um die Bewertungsvorschriften, vor allem die FKM Richtlinie 6 für die Aufgaben innerhalb der Firma vorzubereiten, wurden einige Modifikationen bzw. Anpassungen durchgeführt. Da die FKM Richtlinie 6 eine Bewertungsvorschrift darstellt, ist es möglich die vorgegebenen Berechnungsschritte an die notwendigen firmeninternen Anforderung anzupassen. Auf diese Anforderungen wird in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen.

5.1 Überlastungsfälle

Der Mittelspannungsfaktor K_{AK} ist vom Überlastungsfall F1 bis F4 abhängig. Dieser ist nach dem Spannungsverhalten bei einer möglichen Laststeigerung im Betrieb, also im Sinne der Betriebssicherheit festzulegen. Die Überlastungsfälle werden folgendermaßen unterteilt:

- Für F1 bleibt die Mittelspannung σ_m konstant
- Für F2 bleibt die Spannungsverhältnis R konstant
- Für F3 bleibt die Minimlaspannung σ_{min} konstant

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

- Für F4 bleibt die Maximalspannung σ_{\max} konstant (FKM6, 2012, S.98)

Je nach Überlastungsfall ist die ertragbare Amplitude der Bauteil-Festigkeit σ_{AK} unterschiedlich groß. Diese 4 Überlastungsfälle F1 bis F4 sind im Dauerfestigkeitsschaubild 5.1 für Normalspannung (Haigh Diagramm) dargestellt. Des weiteren ist die Mittelspannungsempfindlichkeit in Abhängigkeit der Eigenspannung im Diagramm dargestellt.

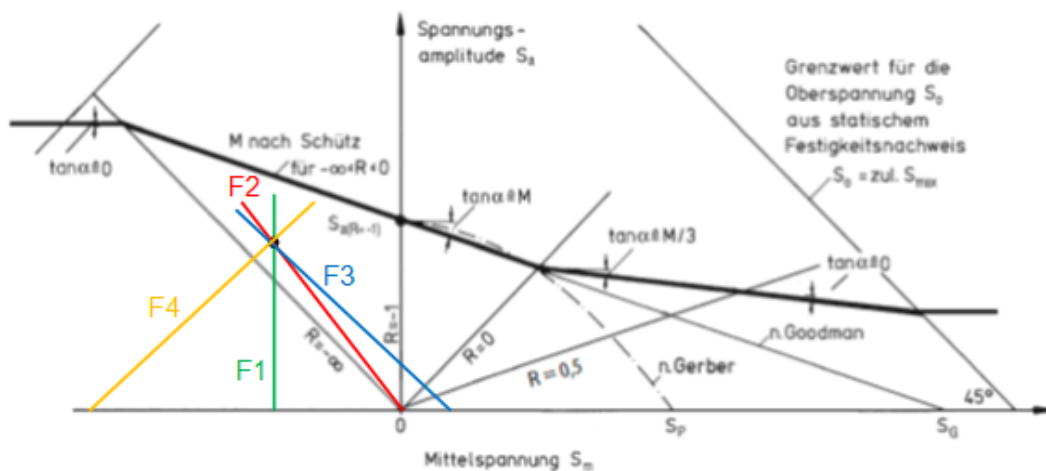


Abbildung 5.1: Haigh Diagramm (Haibach, 2005, S.184)

Die Unterteilung der Bereiche I bis IV sind folgendermaßen geregelt und sind für Normalspannungen gültig:

- Bereich I: $R > 1$... Druckschwellbereich;
 $R = +$ oder $-\infty$... ist reine Druckschwellspannung
- Bereich II: $-\infty \leq R \leq 0$;
 $R < 1$... ist der Druckschwellbereich;
 $R = -1$... ist reine Wechsellastspannung;
 $R > -1$... ist der Zugwechselbereich
- Bereich III: $0 < R < 0,5$... niedriger Zugschwellspannung;
 $R = 0$... ist reine Zugschwellbeanspruchung

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

- Bereich IV: $R \geq 0,5$... hoher Zugschwellbereich

Diese 4 Überlastungsfälle wurden um den Überlastungsfall F5 erweitert um den firmeninternen Anforderungen gerecht zu werden. Auf die Anpassung und Modifikation dieses Überlastungsfalles wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.

5.1.1 Überlastungsfall F5

Mit Hilfe dieser Erweiterung ist es möglich einen erforderlichen Referenzlastfall in die Berechnung mit ein zubinden. Die Referenzlast ist eine definierte Last im Ruhezustand. Die Definition erfolgt nach DIN EN 15663 und berücksichtigt eine Unterteilung in Hochgeschwindigkeits- und Fernverkehrszüge; Personenfahrzeuge ausgenommen Hochgeschwindigkeits- und Fernverkehrszüge, einschließlich U-Bahnen und Straßenbahnen; Güterfahrzeuge (Güterwagen und selbstangetriebene Güterfahrzeuge). Lokomotiven werden als Personenfahrzeuge ohne Zuladung betrachtet. Bei der Berechnung der Auslegungsmasse unterscheidet man zwischen *betriebsbereites Fahrzeug*, *Normaler Zuladung* und *Außergewöhnlicher Zuladung*. (DIN15663, 2012, S.5)

Die Auslastungsgrade der beiden Überlastungsfälle F1 und F5 sind folgendermaßen definiert

$$a_{BK,1} = \frac{\sigma_{a,1}}{\frac{\sigma_{BK,1}}{j_D}} \quad (5.1)$$

$$a_{BK,5} = \frac{\sigma_{a,5}}{\frac{\sigma_{BK,5}}{j_D}} \quad (5.2)$$

Wobei im allgemeinen für den Auslastungsgrad gilt: $a_{BK} \leq 1$. Die Lage des Überlastungsfalls F5 auf der horizontalen Koordinatenachse σ_m im Haigh-Diagramm hängt davon ab, ob Druck- oder Zugspannungen an der jeweils betrachteten Stelle auftreten. Bei Druckspannungen befindet sich der Referenzlastpunkt auf der linken Seite des Koordinatenursprunges,

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

bei Zugspannungen auf der rechten Seite. Die Modifikation des Haigh-Diagrammes mit dem Überlastungsfall F5 ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Als Vergleichs-Überlastungsfall wurde F1 bei konstanter Mittelspannung σ_m in einem beliebigen Betriebspunkt eingezeichnet.

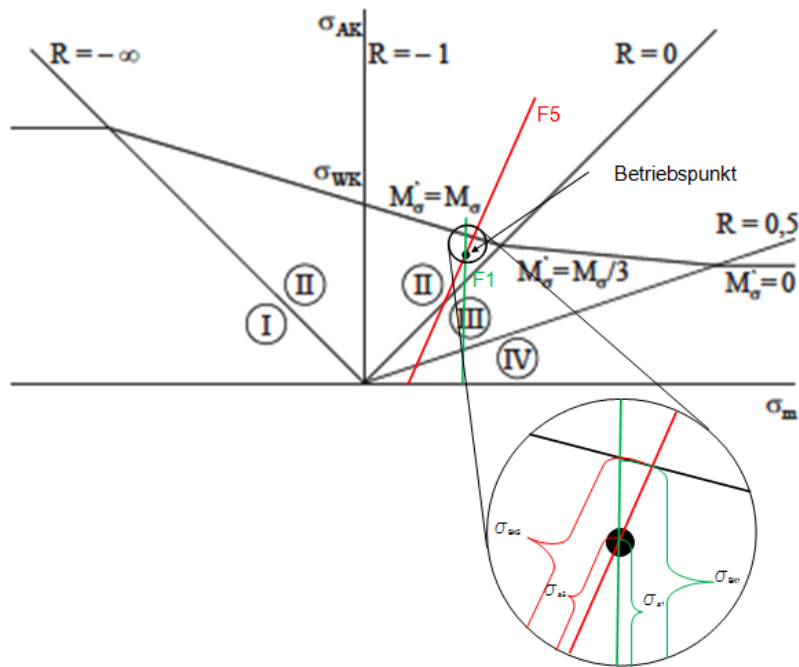


Abbildung 5.2: Modifiziertes Haigh Diagramm

5.1.1.1 Anwendung des Überlastungsfalls F5 auf einen geschweißten Rahmen

Anhand eines geschweißten Drehgestellrahmens wird die Anwendung näher erläutert. Dabei handelt es sich um ein Triebfahrzeug SF7000 für den Auftrag *Desiro City UK*. Mit Hilfe von *I-DEAS Visualizer* erfolgt die Darstellung der verschiedenen Spannungen und des Auslastungsgrades a_{BK} . Mittels vier

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

beliebig gewählten Knoten erfolgt die Berechnung des Auslastungsgrades. Diese sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

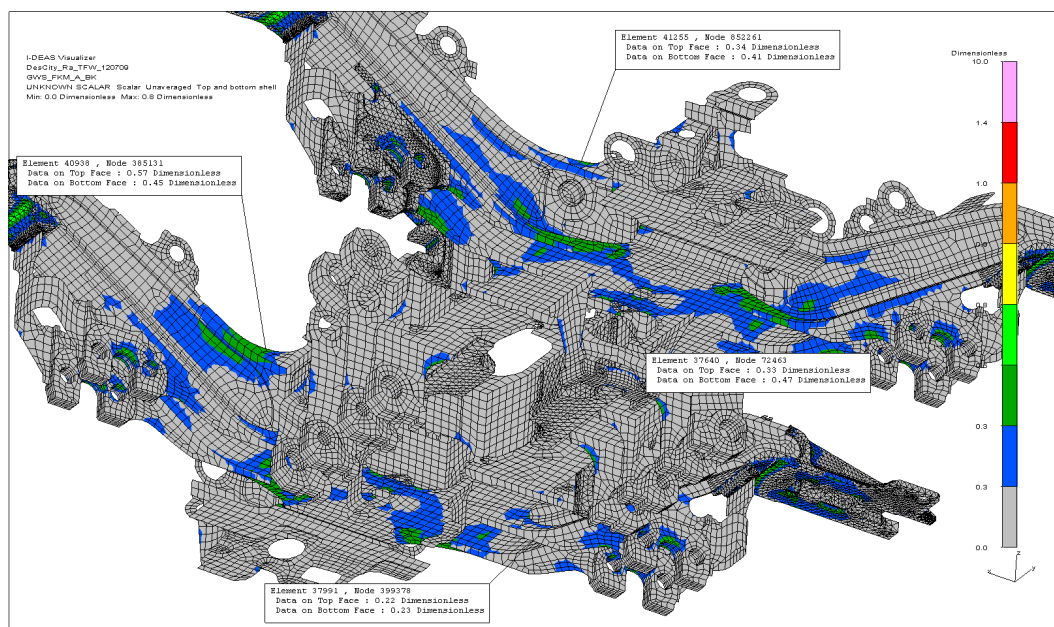


Abbildung 5.3: Auslastungsgrade an vier beliebigen Stellen

Die Berechnung der einzelnen Auslastungsgrade erfolgt nach Gleichung (4.2). Die erforderlichen Spannungen der vier Punkte (Spannungsamplitude σ_a ; Mittelspannung σ_m ; Referenzspannung σ_{ref}) kann den nachfolgenden Abbildungen entnommen werden. Tabelle 5.1 und 5.2 gibt eine Übersicht über alle berechneten Spannungen und die dazugehörigen Auslastungsgrade. Mit Hilfe der Spannungen und des jeweiligen Auslastungsgrades wurde ein entsprechendes Haigh-Diagramm 5.5 erstellt. Der Verlauf und die Steigung der Amplitude in Abhängigkeit der Mittelspannung wurde wie folgt berechnet. (FKM6, 2012, S.49)

$$M_\sigma = a_M \cdot 10^{-3} \cdot R_m + b_M \quad (5.3)$$

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

$$M_{\sigma'} = M_{\sigma} \hat{=} \tan \alpha \dots \text{Bereich II} \quad (5.4)$$

$$M_{\sigma'} = \frac{M_{\sigma}}{3} \hat{=} \tan \alpha \dots \text{Bereich III} \quad (5.5)$$

Wobei M_{σ} die Mittelspannungsempfindlichkeit darstellt und von den Konstanten a_M , b_M und von der Zugfestigkeit R_m des jeweilig gewählten Werkstoffes abhängig ist. Um den Verlauf der Amplitude in Abhängigkeit der Mittelspannung konstruieren zu können, benötigen man noch zusätzlich die Steigung $M_{\sigma'}$ für den Bereich II ($\alpha = 4,4885^\circ$) und III ($\alpha = 1,4985^\circ$). Im Bereich I verläuft diese entlang einer Horizontalen.

Element	Note	σ_a [MPa]	σ_m [MPa]	σ_{ref} [MPa]	Auslastungsgrad a_{BK}
40938	385131	69	-89,7	-89,9	$0,57 \hat{=} 57\%$
37991	399378	24,2	61	59,2	$0,22 \hat{=} 22\%$
37640	72463	39,9	29,4	57,3	$0,33 \hat{=} 33\%$
41255	852261	42,1	-110,8	-111,1	$0,34 \hat{=} 34\%$

Tabelle 5.1: Spannungen und Auslastungsgrade (Top Face)

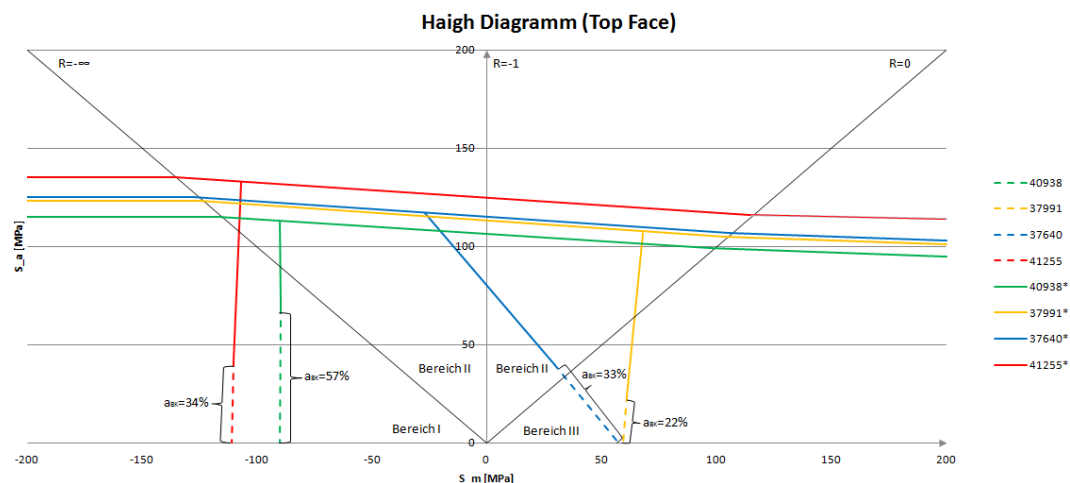


Abbildung 5.4: Haigh Diagramm aus beliebig gewählten Punkten ermittelt (Top face)

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

Element	Note	σ_a [MPa]	σ_m [MPa]	σ_{ref} [MPa]	Auslastungsgrad a_{BK}
40938	385131	51,7	-73,3	-73,4	0,45 $\hat{=}$ 45 %
37991	399378	24,2	48,9	48,8	0,23 $\hat{=}$ 23 %
37640	72463	51,7	112,5	83,3	0,47 $\hat{=}$ 47 %
41255	852261	50,6	-128,8	-129,1	0,41 $\hat{=}$ 41 %

Tabelle 5.2: Spannungen und Auslastungsgrade (Bottom Face)

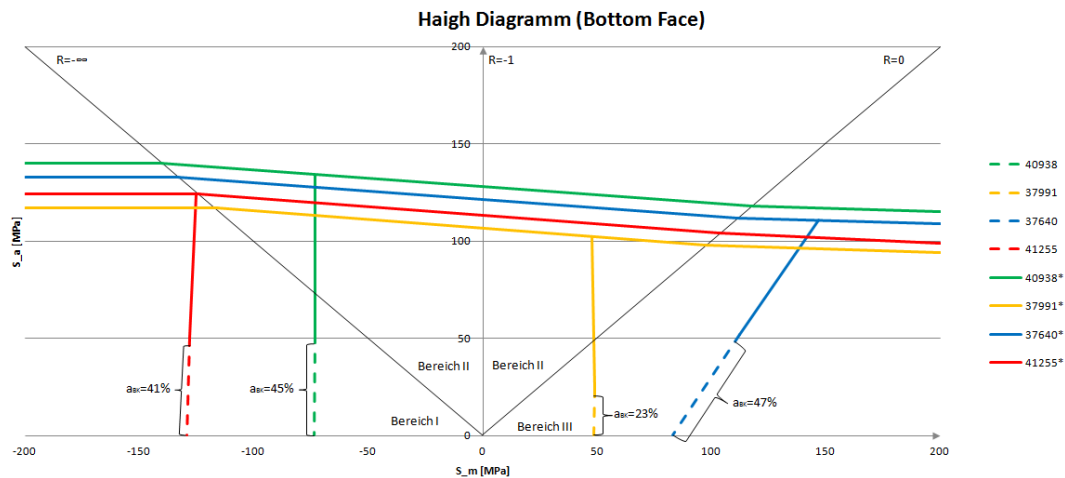


Abbildung 5.5: Haigh Diagramm aus beliebig gewählten Punkten ermittelt (Bottom face)

Die beiden Elemente 40938 und 41255 befinden sich auf der Gurtoberseite und ergeben dadurch Druckspannungen. Das Element 37991 bzw. 37640 befindet sich an der Radsatzführungskonsole bzw. Querpufferkonsole und ergeben dadurch Zugspannungen. Des weiteren erfolgt eine Unterteilung in *Top face* und *Bottom face*. Darunter versteht man die jeweiligen Spannungen an der Ober- und Unterseite der Schalenelemente.

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

Die Auslastungsgrade aus Abbildung 5.3 können in 3 unterschiedliche Beanspruchungszustände eingeteilt werden:

- Hoch: $\geq 0,9$
- Mittel: $0,75 \leq a_{BK} < 0,9$
- Niedrig: $< 0,75$

Mit Hilfe dieser Beanspruchungszustände und dem Sicherheitsbedürfnis (Hoch, Mittel, Niedrig) kann auf die jeweilige Schweißnahtgüteklasse bzw. Prüfumfang geschlossen werden. (DIN15085, 2010, S.12)

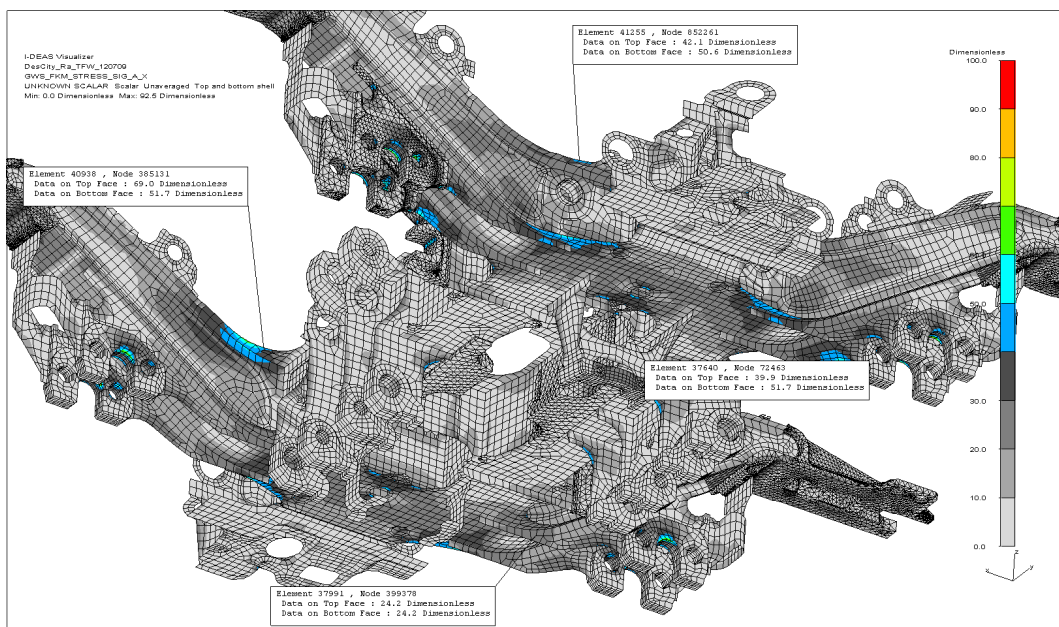


Abbildung 5.6: Spannungsamplitude

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

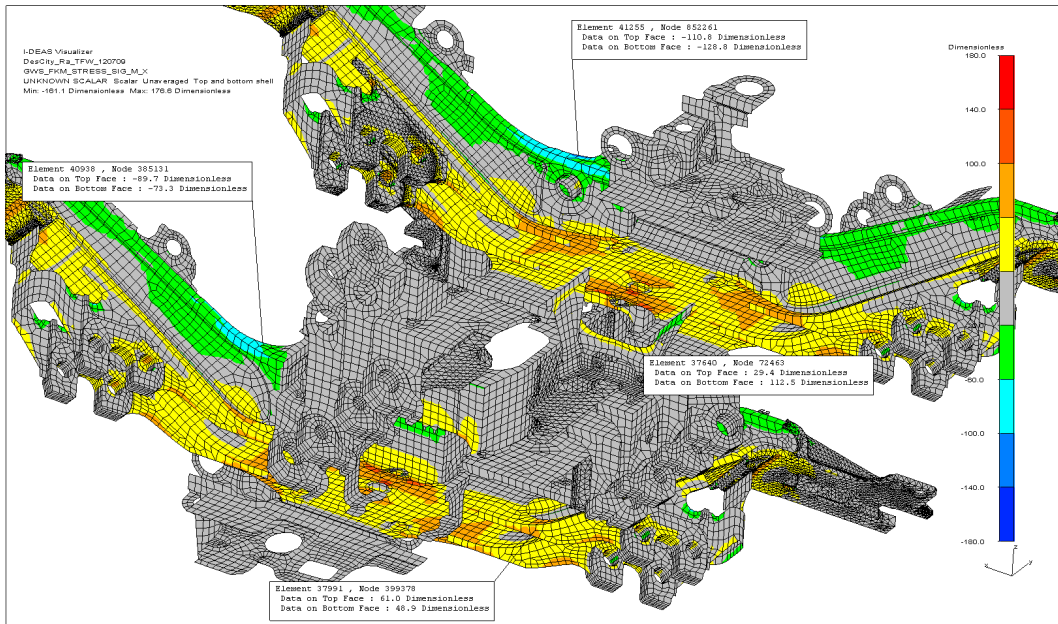


Abbildung 5.7: Mittelspannung

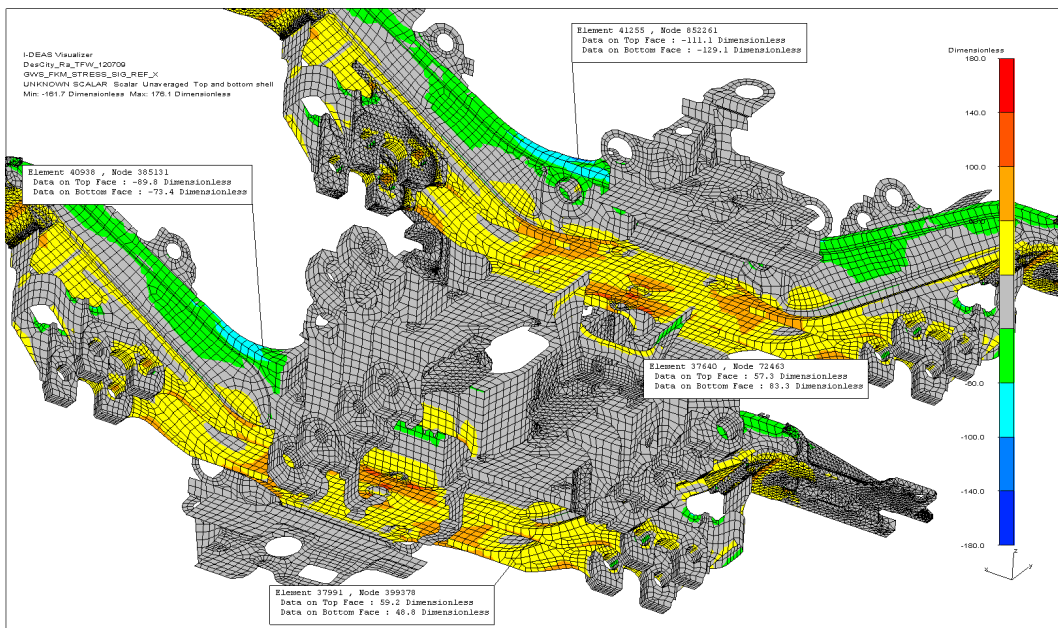


Abbildung 5.8: Referenzspannung

5.2 Ermittlung der FAT-Klassen für verschiedene Nahtengeometrien

Um einen definierten Abschluss einer Schweißnahtverbindung gewährleisten zu können, wird dieser mit einem Abbinder verschweißt.

Je nach Anforderung erfolgt das Verschweißen mit einer Kehlnaht oder mittels HY-Naht. Durch eine Reihe von Untersuchungen (A6Z00038145080, 2015) mit einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ an verschiedenen Kleinproben wurden die FAT-Klassen der unterschiedlichen Schweißdetails ermittelt.

Für die Untersuchung wurden 2 verschiedene Schweißnahtverbindungen herangezogen. Eine Schweißnahtverbindung besteht aus einer HY-Naht und einer Kehlnaht als Gegenlage inkl. einer Kehlnaht als Abbinder. Die andere Schweißnahtverbindung bestehend aus einer HY-Naht und einer Kehlnaht als Gegenlage inkl. einer HY-Naht als Abbinder.

An den Ergebnissen in Abbildung 5.9 sind die unterschiedlichen Streubreiten der Abbinder-Arten zu erkennen. Aufgrund der größeren Streubreite des Kehlnahtabbinders verschiebt sich die untere Grenze im Wöhlerdiagramm nach unten. Diese führt dazu, dass der Kehlnahtabbinder den konservativen Fall der beiden hier untersuchten Abbinderarten darstellt.

Die Umrechnungen der Versuchsergebnisse in FAT-Klassen, welche im Schweißnahtkatalog der FKM Richtlinie 6 vorhanden sind, erfolgt mit der Empfehlung aus. (IIW, 1996, S.87)

Dies führt dazu, dass ein Kehlnahtabbinder mit einer FAT-Klasse von 71 ($\cong 20\%$ von 89 MPa und auf die nächste vorhandene FAT-Klasse gerundet) und ein HY Abbinder mit einer FAT-Klasse von 88 bewertet wird. Beide FAT-Klassen ergeben sich bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen.

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

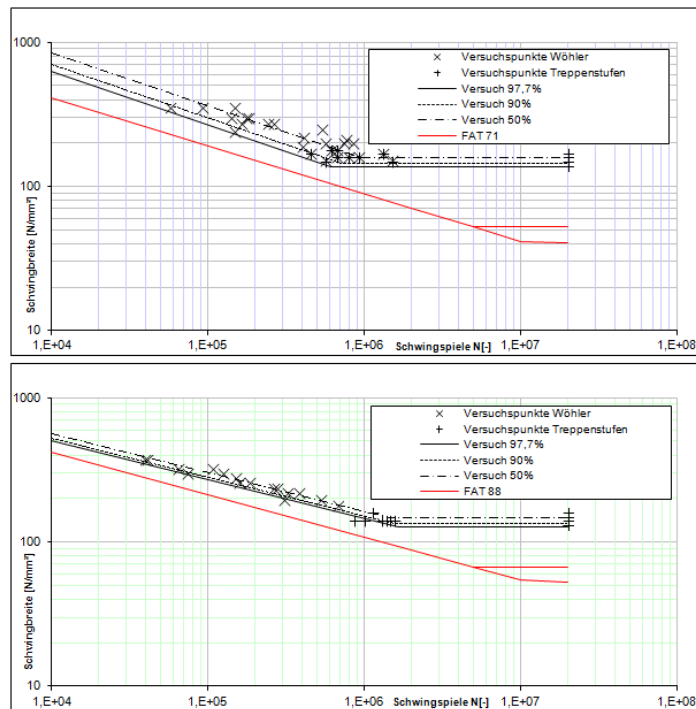


Abbildung 5.9: Ergebnisse aus Untersuchung von Abbindervariation (oben: Kehlnaht-Abbinder, unten: HY-Naht-Abbinder)

5.3 Anpassung der Dauerfestigkeitsgrenze im Wöhlerdiagramm

Eine weitere notwendige Anpassung der FKM Richtlinie 6 ist im Bereich des Wöhlerdiagramms notwendig, um es für die firmeninterne Anwendung verwenden zu können. Dabei erfolgt eine entsprechende Anpassung der Dauerfestigkeitsgrenze an die jeweilig gültige Anforderung. Dies wird mit Hilfe eines *Cutoff-Wertes* gemacht, der einen Erfahrungswert darstellt. Mit Hilfe dieses Wertes, wird die Dauerfestigkeitsgrenze entsprechend verschoben, damit kleine Spannungsamplituden, welche sich unterhalb der Dauerfestigkeit befinden nicht weiter in die Rechnung eingehen.

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

Unter kleinen Spannungsamplituden versteht man Amplituden, welche keine Auswirkung auf den weiteren Berechnungsvorgang haben. Des weiteren hat es den Vorteil, dass der Speicherumfang an Daten geringen wird. Der in Abbildung 5.10 dargestellte Wöhlerlinienverlauf nach Miner-original dient nur zur erweiterten Darstellung und wird bei der firmeninternen Anwendung durch die *Cutoff-Linie* ersetzt.

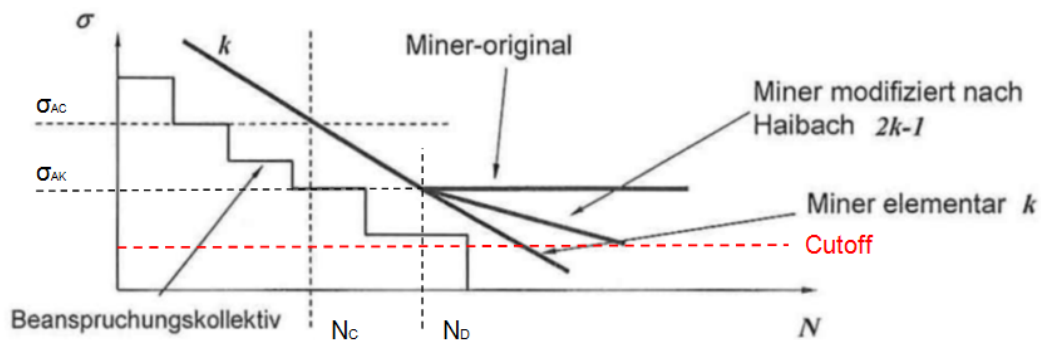


Abbildung 5.10: Lage der Cutoff-Linie im Wöhlerdiagramm für Normalspannung

Die eigentliche Dauerfestigkeitsgrenze wird durch die *Cutoff-Linie* gekennzeichnet. Alle darunter befindlichen Spannungsamplituden werden nicht für die weitere Berechnung herangezogen. Die Position des Wöhlerlinienverlaufs nach Miner-elementar ist durch σ_{AC} und N_C definiert. Des weiteren benötigt man noch die Neigung k für die vollständige Lage. Bei Miner-modifiziert nach Haibach kommt zusätzlich noch ein weiterer Abknickpunkt an der Position σ_{AK} und N_D hinzu. Wobei N_C die Bezugszyklenzahl für geschweißte Bauteile, zu der der Festigkeitskennwert σ_{AC} gehört; σ_{AK} die ertragbare Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit für S_m und N_D die Knickpunktzyklenzahl der Bauteil-Wöhlerlinie ist. (FKM6, 2012, S.226) Bei der *Cutoff-Linie* unterscheidet man zwei Arten. Einerseits besteht die Möglichkeit den Wert direkt als Absolutwert (RF_CutOff_abs [-]) anzugeben und andererseits kann man den Relativwert (RF_CutOff_rel [%]) abhängig von σ_{AK} angeben.

5.4 Richtlinien zur Wahl der Inputparameter der FKM Richtlinie 6

Diese Arbeitsanweisungen sind anzuwenden, wenn der rechnerische Festigkeitsnachweis bzw. der Nachweis auf Basis von gemessenen Beanspruchungen gemäß der FKM Richtlinie 6 durchgeführt werden muss. Sie gilt bei firmeninternen Berechnungen (BG EN SDS ¹) bzw. bei Berechnungen welche im Auftrag von BG EN SDS durchgeführt werden.

Diese schreibt vor wie der rechnerische Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile ordnungsgemäß durchgeführt werden muss. (A6Z00038145306, 2015, S.4)

5.4.1 Spannungskennwerte

Die Spannungs-Tensoren der zu bewertenden Lastfälle müssen in einem ortsfesten Koordinatensystem dargestellt werden. Für die Bewertungen an der Bauteiloberfläche sind die Spannungskennwerte für flächenförmige Bauteile gemäß (FKM6, 2012) zu verwenden. Es sind die ebenen orientierten Spannungen σ_x , σ_y und τ zu verwenden.

Das lokale Bewertungs Koordinatensystem muss im Nachweisort mit der xy-Ebene tangential auf der Bauteiloberfläche liegen. Die Spannungskomponenten, die außerhalb dieser Ebene liegen, müssen im Vergleich zu den zu bewertenden Spannungen vernachlässigbar gering sein. Zu große Fehler können hier z.B.: durch die Wahl eines falschen Koordinatensystems oder durch ein zu grobes FEM-Netz entstehen. (A6Z00038145306, 2015, S.5)

5.4.2 Material Kennwerte

Die grundlegenden statischen Materialkennwerte (Zugfestigkeit, Streckgrenze und Bruchdehnung) sind einer gültigen Norm zu entnehmen. In der Pro-

¹BG... Bogies; EN... Engineering; SDS... Structure, Diagnostics, Simulation

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

duktdefinition (Zeichnung und/ oder Spezifikation) muss diese Norm eindeutig referenziert sein. Für Bleche nach EN10025 wird die Abminderung der Festigkeits-Normwerte für größere Wandstärken durch den Faktor für die effektive Wandstärke d_{eff} abgedeckt. Für Frästeile aus dickeren Blechen muss für d_{eff} die Wandstärke des Halbzeugs eingesetzt werden. Werden in Zeichnungen oder Spezifikationen von der Norm abweichende Werte definiert, sind diese Werte zu verwenden.

Dabei ist der Unterschied in der FKM Richtlinie (FKM6, 2012) zwischen Normwert und Zeichnungswert zu beachten. Die weiteren Materialkennwerte sind für die einzelnen Materialgruppen in der FKM Richtlinie (FKM6, 2012) definiert. (A6Z00038145306, 2015, S.6)

5.4.3 Konstruktionskennwerte

5.4.3.1 Plastische Stützzahl gemäß der FKM Richtlinie 6

Die Grundvoraussetzung für die Verwendung einer plastischen Stützzahl ist ein duktiles Werkstoffverhalten. Dies wird für alle Stahlsorten und auch für Stahlguss angenommen. Ausgenommen sind oberflächen- oder einsatzgehärtete Qualitäten. Ab einer Bruchdehnung größer 8% ist in der FKM Richtlinie (FKM6, 2012) die Anwendung einer plastischen Stützzahl $n_{\text{pl}} > 1$ auch für andere Gusswerkstoffe zulässig. Bei der Verwendung einer plastischen Stützzahl ist sicherzustellen, dass die ertragbare Dehnung ϵ_{ertr} für den jeweiligen Werkstoff nicht überschritten wird.

Der Wert für die plastische Stützzahl kann für einfache Querschnitte gemäß (FKM6, 2012, Tabelle 1.3.2; S.27) festgelegt werden. Für komplexe Geometrien kann der Wert gemäß (FKM6, 2012, Kap. 1.3.2.1; S.27) durch eine nicht lineare FEM Berechnung mit einem geeigneten Materialmodell auf folgende Weise ermittelt werden:

- Ermittlung der elastischen Traglast: das ist jene Last, bei der bei linear elastischen Werkstoffverhalten die Streckgrenze erreicht wird

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

- Ermittlung der vollplastischen Traglast: Steigerung der Belastung bis der betrachtete Querschnitt gerade eben voll plastifiziert ist. Kriterium für lokales Plastifizieren ist dabei die technische Dehngrenze von $\epsilon_{\text{ertr}} = 0,002$
- Die plastische Stützzahl ist das Verhältnis von vollplastischer Traglast zu elastischer Traglast

Zeitlich konstante Effekte wie Schraubenvorspannung oder Presssitze müssen für diese Analysen konstant gehalten werden und dürfen während der Analyse nicht gesteigert werden.

5.4.3.2 Plastische Stützzahl für mäßig duktile Werkstoffe

Über die FKM Richtlinie (FKM6, 2012) hinaus kann auch bei geringen Bruchdehnungswerten als in der FKM Richtlinie definiert eine lokale Stützwirkung angenommen werden, sofern abgesicherte Werte für die lokale Bruchdehnung verfügbar sind. Diese Werte müssen mit einer ausreichenden Anzahl von Proben ermittelt worden sein, die aus dem Bauteil an repräsentativen Stellen entnommen wurden.

Der Faktor $n_{\text{pl},\sigma}$ wird dann auch gemäß der Formel (FKM6, 2012, Formel 3.3.13; S.77). Für die Ermittlung von K_p ist die gleiche Vorgehensweise wie für duktile Werkstoffe zu verwenden, der limitierende Faktor wird aber in der Regel $n_{\text{pl},\sigma}$ in Abhängigkeit von der ertragbare Dehnung des Werkstoffes sein.

Die auftretenden Spannungen dürfen in so einem Fall die Streckgrenze des Werkstoffes nicht überschritten werden.

5.4.4 Oberflächenrauigkeit

- Gußhaut: $R_z = 200 \mu\text{m}$ (oder R_z nach Zeichnung)
- Schmiedehaut: $R_z = 200 \mu\text{m}$ (oder R_z nach Zeichnung)
- Walzprofil: $R_z = 200 \mu\text{m}$ (oder R_z nach Zeichnung)

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

- Walzblech: $R_z = 100 \mu\text{m}$ (oder R_z nach Zeichnung)
- Laserschnitt: $R_z = 100 \mu\text{m}$ (oder R_z nach Zeichnung)
- Brennschnittkontur: $R_z = 200 \mu\text{m}$ (oder R_z nach Zeichnung)
- Mechanisch erzeugte Oberfläche:

R_z ist der Zeichnung zu entnehmen. Für mechanisch erzeugte Oberflächen erfolgt die Umrechnung von Zeichnungswerten R_a auf R_z anhand des informativen Teils T 1 der zurückgezogen Norm DIN4768. Nachfolgend einige Umrechnungsbeispiele:

- $R_a = 1,6 \rightarrow R_z = 20$
- $R_a = 3,2 \rightarrow R_z = 35$
- $R_a = 6,3 \rightarrow R_z = 60$
- $R_a = 12,5 \rightarrow R_z = 100$
- $R_a = 25 \rightarrow R_z = 180$

5.4.5 FAT-Klassen für Schweißnähte

Alle in Verwendung befindlichen Schweißnahtverbindungen wurden mit den entsprechenden FAT Klassen bewertet und übersichtlich dokumentiert. Es wurde eine Zuteilung entsprechend der *Längs-, Quer- und Schubbeanspruchung* eingeführt. Bei Schweißverbindungen, welche einen Abbinde² besitzen kommt die Einteilung *Längs-Nahtende* noch hinzu. Bei nicht symmetrischen Schweißverbindungen erfolgt eine weitere Einteilung in *Quer-Steg-Gegenlage* und in *Quer-Steg*. Des Weiteren wird auch auf die Bewertung des Nahtendes eingegangen. Um eine Übersichtlichkeit zu gewährleisten wurden hierfür entsprechend Tabelle 5.3 Farbcodes eingeführt. Bei den Nahtenden wird zwischen HY-Naht und Kehlnahtabbinde unterschieden.

²definiertes Schweißnahtende (HY-Naht bzw. Kehlnaht)

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

Farbcode	Bezeichnung
■	Längs
■	Längs Nahtende
■	Quer Gurt
■	Quer Steg Gegenlage
■	Quer Steg
■	Schub

Tabelle 5.3: Farbcodes

Als Beispiel ist in Abbildung 5.11 die Schweißverbindung T_FD_EY³ dargestellt.

FKM_Katalog.T_FD_EY_30012020

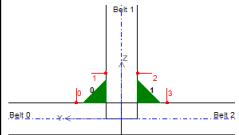
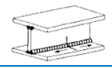
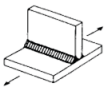

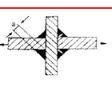
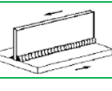
 <table border="1" style="font-size: small;"> <thead> <tr> <th colspan="6">FKM_Katalog</th> </tr> <tr> <th>ID</th> <th>0</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Einbaue</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Offset</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>DocClassStart</td> <td>L10790580</td> <td>L10790580</td> <td>L10790580</td> <td>L10790580</td> <td>L10790580</td> <td></td> </tr> <tr> <td>DocClassEnd</td> <td>L10790580</td> <td>L10790580</td> <td>L10790580</td> <td>L10790580</td> <td>L10790580</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <div style="font-size: small;"> Längs Längs Nahtende Quer Gurt Quer Steg Schub </div>	FKM_Katalog						ID	0	1	2	3		Einbaue	0	0	0	0	0		Offset	0	0	0	0	0		DocClassStart	L10790580	L10790580	L10790580	L10790580	L10790580		DocClassEnd	L10790580	L10790580	L10790580	L10790580	L10790580		322		Durchlaufende automatisch geschweißte längsbelastete Doppel-Kehlnaht ohne Nahtansätze, Spannung im Flansch	100
	FKM_Katalog																																											
	ID	0	1	2	3																																							
	Einbaue	0	0	0	0	0																																						
	Offset	0	0	0	0	0																																						
	DocClassStart	L10790580	L10790580	L10790580	L10790580	L10790580																																						
DocClassEnd	L10790580	L10790580	L10790580	L10790580	L10790580																																							
511		Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen, zweiseitige Kehlnähte, beschliffen, Kehlnaht, auch einseitig, falls dicker als Grundblech	100 100 80 71																																									
511		Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen, zweiseitige Kehlnähte, beschliffen, Kehlnaht, auch einseitig, falls dicker als Grundblech	100 100 80 71																																									
414		Kreuzstoß oder T-Stoß, Kehlnaht oder unvollständig durchgeschweißte K-Naht, auch beschliffene Nähte, Wurzelriss, Spannung in der Schweißnaht: $\sigma = F / \Sigma (a \cdot l)$ l ... Länge der Schweißnaht für $a/t \leq 1/3$ t ... Blechdicke	36 40																																									
2		Kehlnähte, teilweise durchgeschweißte Stumpfnaht	80																																									

Abbildung 5.11: Dokumentationsbeispiel T_FD_EY

³T ... T-Joint; F ... Fillet Weld; D ... double sided; EY ... Partial penetration termination

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

Die entsprechenden Schweißnahtdetails sind der FKM Richtlinie 6 entnommen. Um die Orientierung zu erleichtern ist die aktuelle Schweißverbindung graphisch dargestellt und die jeweils vorhandenen Kerbfälle tabellarisch darunter aufgelistet. Jedes Schweißnahtdetail ist in 2 sogenannte Cross-Section-Index (CSIndex0 und CSIndex1) eingeteilt. Mit Hilfe dieser erfolgt die Nummerierung der einzelnen Schweißnahtquerschnitte innerhalb einer Schweißnahtdefinition. Des weiteren erfolgt eine Einteilung in die 4 ID- Gruppen, ID0 bis ID3. Diese kennzeichnen jene Stellen, an denen eine Bewertung durchgeführt wird. Diese sind in Abbildung A.15 mit schwarzen bzw. roten Ziffern dargestellt. Die eingerahmten FAT-Klassen gelten für Schweißverbindungen aus Baustahl. Bei den in Verwendung befindlichen Schweißnähten wird zwischen *Stumpfstoß (B)*, *Eckstoß (C)*, *T-Stoß (T)*, *Kreuzstoß (X)* und *T-Stöße, welche verwendet werden um einen Kreuzstoß zu bilden (TX)* unterschieden. Es ist darauf zu achten, dass bei *TX-Stößen* und bei *X-Stößen* ein geometrischer Versatz vorhanden sein darf. Andererseits ist zu beachten, dass bei *reinen T-Stößen* kein Versatz vorhanden sein darf.

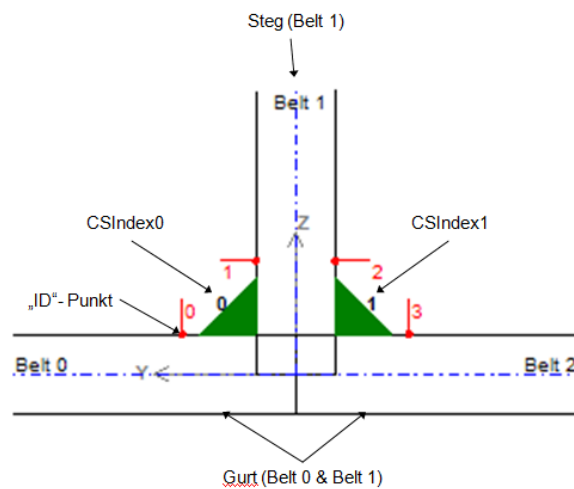


Abbildung 5.12: Beschreibung und Nummerierung des Schweißnahtdetails am Beispiel T_FD_EY

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

Die Tabelle 5.4 stellt alle derzeit in Verwendung befindlichen Standardschweißnähte dar.

Die dazugehörigen FAT-Klassen Dokumentationen und die Beschreibung der einzelnen Schweißnähte können dem Anhang A.2 entnommen werden.

ID	Stoßart	Standardschweißnähte
1	Stumpfstoß	B_VM; B_VC
3	T-Stoß	T_FD_EF; T_FD_EY; T_YS_EF; T_YD_EF; T_YD_EY; T_YB_EF; T_YB_EY
5	TX-Stoß	T_YB_EF; T_YB_EY; T_YD_EF; T_YD_EY; T_YS_EF

Tabelle 5.4: Übersicht aller Standardschweißnähte

5.4.6 Bauteilfestigkeit

5.4.6.1 Betriebsfestigkeitsfaktor

Liegen zum Lastkollektiv keine spezifischen Informationen vor, ist eine dauerfeste Bewertung vorzuziehen ($K_{BK}=1,0$). Liegt für die örtliche Beanspruchung ein definiertes Kollektiv vor oder kann von einem gegebenen Lastkollektiv auf das Beanspruchungskollektiv geschlossen werden, so muss entsprechend (FKM6, 2012, Kap.4.4.3.5) der Betriebsfestigkeitsfaktor K_{BK} ermittelt werden. Dabei muss beachtet werden, dass dieser keinen Wert < 1 annehmen kann.

5.4.7 Sicherheitsfaktoren

5.4.7.1 Schadensfolgen bei statischen Festigkeitsnachweis

Hierbei erfolgt die Zuteilung einer der drei folgenden Schadensfolgen zu einem Nachweisort gemäß der FMECA ⁴.

Die Schadensfolge „**gering**“ kann gewählt werden, wenn eines der folgenden Kriterien zutrifft:

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

- das Bauteilversagen in der FMECA wird als nicht sicherheitsrelevant bewertet
- bei duktilen Werkstoffen, sofern die Traglastreserven durch hohe Stützwirkung nicht schon ausgenutzt werden und so de facto noch hohe Traglastreserven vorhanden sind und deshalb strukturelles Versagen ausgeschlossen werden kann.
- bei redundanten Strukturen, die bei Versagen der einzelnen Nachweisstelle alternative Lastpfade innerhalb des Bauteils haben und so ein strukturelles Versagen des Bauteils ausgeschlossen werden kann.

Die Schadensfolge „mittel“ muss gewählt werden, wenn das Bauteilversagen in der FMECA als sicherheitsrelevant bewertet wird und strukturelles Versagen des Bauteils nicht durch eines der obigen Kriterien ausgeschlossen werden kann, im speziellen kann die der Fall sein:

- bei spröden Werkstoffen
- bei fehlender Redundanz der Struktur

Ein katastrophales Versagen muss bei ordnungsgemäßer Einhaltung der Inspektion ausgeschlossen werden können.

Die Schadensfolge „hoch“ muss gewählt werden, wenn das Bauteilversagen in der FMECA als sicherheitsrelevant bewertet wird und strukturelles Versagen des Bauteils nicht durch eines der obigen Kriterien ausgeschlossen werden kann, im speziellen kann dies der Fall sein:

- bei spröden Werkstoffen
- bei fehlender Redundanz der Struktur

Ein katastrophales Versagen kann auch bei ordnungsgemäßer Einhaltung der Inspektion nicht ausgeschlossen werden.

5.4.7.2 Schadensfolgen beim Ermüdungsfestigkeits-Nachweis

Die Schadensfolge „gering“ kann gewählt werden, wenn eines der folgenden Kriterien zutrifft:

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

- das Bauteilversagen in der FMECA als nicht sicherheitsrelevant bewertet wird
- bei redundanten Strukturen, die bei Versagen der einzelnen Nachweismöglichkeiten alternative Lastpfade haben und so ein strukturelles Versagen des Bauteils ausgeschlossen werden kann
- bei hohen Spannungsgradienten in Richtung des potentiellen Risswachstums, sodass eine örtliche Redundanz, extrem langsames oder begrenztes Risswachstum angenommen werden und so ein strukturelles Versagen des Bauteils ausgeschlossen werden kann.

Die Schadensfolge „mittel“ muss gewählt werden, wenn das Bauteilversagen in der FMECA als sicherheitsrelevant bewertet wird und strukturelles Versagen des Bauteils nicht durch eines der obigen Kriterien ausgeschlossen werden kann, im speziellen:

- bei fehlender Redundanz der Struktur
- bei geringen Spannungsgradienten in potentieller Risswachstumsrichtung
- wenn rasches Risswachstum nicht ausgeschlossen werden kann

Ein katastrophales Versagen muss bei ordnungsgemäßer Einhaltung der Inspektion ausgeschlossen werden können.

Die Schadensfolge „hoch“ muss gewählt werden, wenn das Bauteilversagen in der FMECA als sicherheitsrelevant bewertet wird und strukturelles Versagen des Bauteils nicht durch eines der obigen Kriterien ausgeschlossen werden kann, im speziellen:

- bei fehlender Redundanz der Struktur
- bei geringen Spannungsgradienten in potentieller Risswachstumsrichtung
- wenn rasches Risswachstum nicht ausgeschlossen werden kann

Ein katastrophales Versagen kann auch bei ordnungsgemäßer Einhaltung der Inspektion nicht ausgeschlossen werden.

5.4.7.3 Auftretenswahrscheinlichkeit der höchsten Spannungen

Das Auftreten der Höchstspannung kann als „**nicht häufig**“ angenommen werden, wenn ein rein statischer Nachweis für einen Sonderlastfall (Maximallast im Betrieb, Schnellbremsungen, Kurzschluss, Pufferstoß, Lastfälle gemäß vorgeschriebener Norm, ...) geführt werden soll.

Das Auftreten der höchsten Spannungen muss als „**häufig**“ angenommen werden, wenn die zu bewertende Spannung eine maximale Spannung von Betriebslastfällen ist, die auch gegen Ermüdung bewertet werden.

5.4.7.4 Regelmäßige Inspektion

Eine „**regelmäßige Inspektion**“ kann angenommen werden, wenn:

- Ermüdungsrisse zuverlässig erkannt werden (z.B.: bei Traversen mit Innendruck)
- bei Regelinspektionen gemäß Instandhaltungsdokumentation Risse mit hoher Wahrscheinlichkeit gefunden werden, und so ein strukturelles Versagen des Bauteiles innerhalb des Inspektionsintervalls ausgeschlossen werden kann.

Eine rein visuelle Inspektion ist dabei ausreichend, da bei den verwendeten Werkstoffen eine ausreichend langsames Risswachstum vorausgesetzt werden kann.

Das maximal zulässige Inspektionsintervall ist in der Abbildung 5.13 in Abhängigkeit des Material-Sicherheitsfaktors und der Wöhlerliniensteigung dargestellt.

Im konservativsten Fall darf das Inspektionsintervall maximal 40% der Auslegungsdauer betragen, das entspricht 12 Jahre bei der Auslegungsdauer von 30 Jahren. Die typischen HU-Intervalle⁵ sind damit abgedeckt.

⁵typ. Hauptuntersuchungsintervalle (HU) bei Schienenfahrzeugen: 5 bis 7 Jahre

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

Schadensfolge		nichtgeschweißter Stahl & Alu.			geschweißte Bauteile				
		hoch	mittel	niedrig	hoch	mittel	niedrig		
j_F	keine reg. Insp.	1,5	1,4	1,3		1,4	1,25	1,15	
	reg. Insp.	1,35	1,25	1,2		1,2	1,1	1	
j_F -Verhältnis		1,11	1,12	1,08		1,17	1,14	1,15	
k		Auslegungslbensdauer: 30 Jahre			k	Auslegungslbensdauer 30 Jahre			
Normalsp.	5	59 % 17 Jahre	56 % 17 Jahre	67 % 20 Jahre	Normalsp.	3	62 % 18 Jahre	68 % 20 Jahre	65 % 19 Jahre
Schubsp.	8	43 % 12 Jahre	40 % 12 Jahre	52 % 15 Jahre	Schubsp.	5	46 % 13 Jahre	52 % 15 Jahre	49 % 14 Jahre

Abbildung 5.13: Übersicht der Inspektionsintervalle in Abhängigkeit des Material-Sicherheitsfaktors und der Wöhlerliniensteigung

Die Berechnung der einzelnen Inspektionsintervalle erfolgt wie in Abbildung 5.14 dargestellt mit Hilfe der Zeitfestigkeitsgerade im Wöhlerdiagramm. Die im Wöhlerdiagramm dargestellte Schwingenspielzahl N_2 entspricht der Auslegungslbensdauer von 30 Jahren. Mit Hilfe der Zeitfestigkeitsgeraden ($k = 3;5$ bzw. 8) erhält man die dazugehörige zulässige Spannung σ_{zul} . Mittels dem j_F -Verhältnis und der Zeitfestigkeitsgeraden kann auf das entsprechende Inspektionsintervall N_1 zurückgerechnet werden. Die Material-Sicherheitsfaktoren j_F sind der Tabelle 2.5.1 bzw. Tabelle 2.5.3 aus (FKM6, 2012) entnommen. Die Umrechnung auf den jeweiligen Gesamtsicherheitsfaktor erfolgt nach Gleichung (4.6) und (4.7). Dabei stellt j_S den Last- Sicherheitsfaktor und $K_{T,D}$ den Temperaturfaktor da. Für Gussteile kommt die Gleichung (4.7) zum Einsatz, welche um den Gussfaktor j_G erweitert ist. Die jeweiligen Faktoren können entsprechend (FKM6, 2012, Kapitel 2.5 bzw. 2.2.3) entnommen werden.

$$j_D = j_S \cdot \frac{j_F}{K_{T,D}} \quad (5.6)$$

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

$$j_D = j_S \cdot \frac{j_F \cdot j_G}{K_{T,D}} \quad (5.7)$$

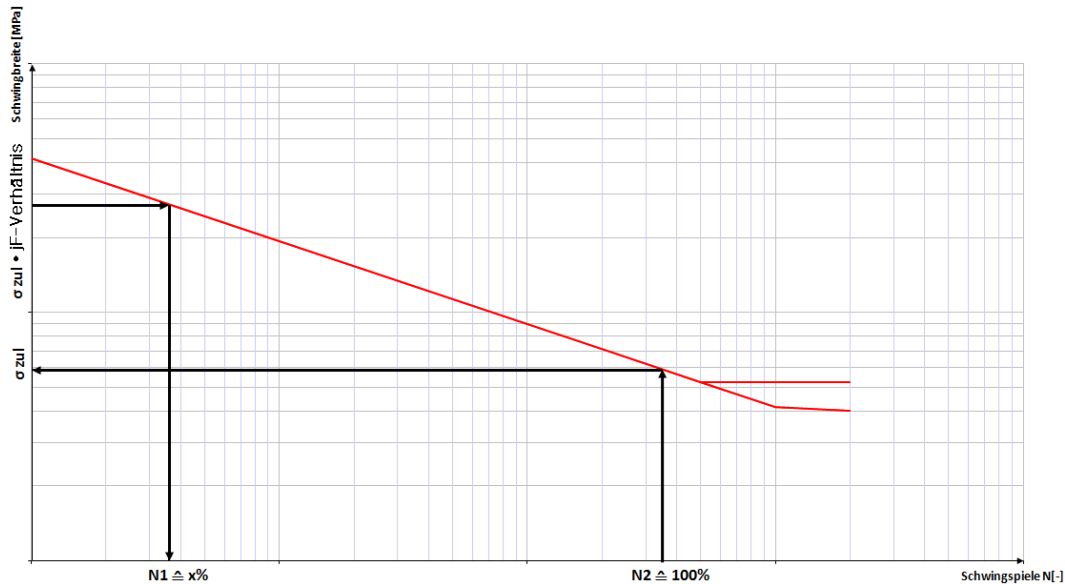


Abbildung 5.14: Berechnung der Inspektionsintervalle

„Keine regelmäßige Inspektion“ kann angenommen werden, wenn:

- der Nachweispunkt während der Inspektion nicht mehr zugänglich ist (z.B.: Rippen im Inneren eines Kastenträgers, nicht jedoch die Innenseite von Gurten und Stegen eines Kastenträgers bzw. deren Schweißnähte, da erst ein Riss der an die sichtbare Oberfläche gelangt problematisch werden kann)
- rasches Risswachstum und so ein strukturelles Bauteilversagen während eines Inspektionsintervalls nicht ausgeschlossen werden kann

5.4.7.5 Zerstörungsfrei geprüfte Gussteile

„Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) können angenommen werden“, wenn am Nachweisort das Vertrauensniveau einer 100 % ZfP besteht (mit einem der folgenden Prüfverfahren: MT, PT, UT, RT). Die lokale Bewertung muss mit den spezifizierten Prüfanordnung gemäß Zeichnung und/ oder Spezifikation konsistent sein.

„Zerstörungsfreie Prüfungen können nicht angenommen werden“, wenn ein geringerer ZfP Aufwand als 100% definiert wird, im speziellen ist dies in der Regel der Fall:

- bei Standard Guss Qualität (S3V3)
- Bei B oder C Teilen gemäß der FMECA. Hier wird trotz S2V2 nur 10% geprüft (dafür wird die Schadenfolge gering gesetzt)

5.4.8 Festigkeitsnachweis

Für einen gültigen rechnerischen Festigkeitsnachweis müssen die Auslastungsgrade des statischen und des Ermüdungsfestigkeitsnachweis ≤ 1 sein. Die ermittelten Werte für Auslastungsgrade werden dabei auf 2 Kommastellen gerundet.

5.4.8.1 Berücksichtigung der Gussqualität

Für dynamisch hoch beanspruchte Bereiche ($a_{BK} > 90\%$) ist mindestens eine Oberflächenqualität von S2 erforderlich. Für dünnwandige Bauteile und Bereiche mit geringem Spannungsgradienten normal zur Oberfläche ist auch eine Volumsqualität V2 erforderlich.

Wenn wirtschaftlich sinnvoll, kann eine gegenüber dem Standard erhöhte Gussqualität auch mit einem reduzierten Prüfaufwand kombiniert werden (dies kann der Fall sein, wenn ohne ZfP der Ermüdungsauslastungsgrad auf über 90% steigt). Eine erhöhte Gussqualität auf Grund eines hohen dynamischen Auslastungsgrades erfordert zur Prozessabsicherung zumindest

5 Firmenspezifische Anwendung der FKM Richtlinie 6

10% ZfP. Bei Prüfanforderungen die vom Standard für die jeweilige Bauteilklasse (A, B, C laut FMECA) bzw. Gussteile-Güteklasse abweichen, muss die Bauteildefinition (in der Regel die Zeichnung des Gussteils) von BG EN SDS LS ⁶ auf Konsistenz mit dem rechnerischen Nachweis fachgeprüft werden.

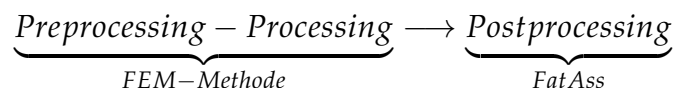
⁶BG... Bogies; EN... Engineering; SDS... Structure, Diagnostics, Simulation; LS... Loads & Strength

6 Spannungsbewertungssoftware

Fatigue Assessment

Das Spannungsbewertungsprogramm Fatigue Assessment¹ (FatAss) stellt eine Software dar, mit Hilfe dieser eine Bewertung von vorhandenen Spannungen erfolgen kann. Das speziell für die Anwendung bei Siemens entwickelte Programm ermöglicht die Bewertung von geschweißten und nicht geschweißten Konstruktionen mit Hilfe von verschiedenen Bewertungsvorschriften.

Diese wurden bereits im Kapitel 4 vorgestellt. Bei der Berechnung kann zwischen reiner Schweißnaht- und Grundmaterialberechnung unterschieden werden. In der Berechnung bzw. Bewertung von Bauteilen zählt die Spannungsbewertung zum Postprocessing. Welches mit den Ergebnissen aus einer Finite-Elemente-Methode arbeitet.



Es ermöglicht die Bewertung der Struktur-, Kerb- und Nennspannung an der Wurzel und am Nahtübergang der Schweißnaht sowie an allen Positionen des Grundmaterials für unterschiedliche Werkstoffe.

Wobei der Werkstoff des FEM-Modelles mit der Werkstoffwahl im Spannungsbewertungsprogramm übereinstimmen muss.

Abbildung 6.1 stellt eine schematische Darstellung der Input bzw. Output

¹verwendete Version: V4.0.0.3

6 Spannungsbewertungssoftware Fatigue Assessment

Parameter für das Fatigue Assessment dar. Für eine erfolgreiche Bewertung von Spannungen werden folgende Input Files, Dateien und Objekte für das Fatigue Assessment benötigt

- *.dat-File*
Beinhaltet alle für den Solver relevanten Informationen (Knoten, Elemente, Gruppenseiten, Randbedingungen)
- *.op2-File*
Beinhaltet die Nastran-Rechenergebnisse (entspricht Spannungen)
- *.Job-File*
Beinhaltet alle **vorhanden** Schweißnahtdefinitionen (entspricht Schweißnahtquerschnitt), die Materialdatenbank und alle Berechnungsparameter (Sicherheiten, Lastfälle, Kollektive usw.)
- *.lad-File*
Beinhaltet die **verwendeten** Schweißnähte (nur die Zuordnung zum jeweiligen Schweißnahtquerschnitt) und den Verlauf der Schweißnaht (durch Koordinaten hinterlegt)
- übliche Ergebnisfiles:
 - *.param.unv-File*
Dient zum Ausgeben von Zwischenergebnissen (z.B.: technologischer Größenfaktor K_d nach FKM Richtlinie) bzw. zum graphischen Ausgeben von Inputparameter (z.B.: Rauheitswerte, Kerbfälle, Werkstoffe)
 - *.crt.txt-File*
Gibt alle vorher eingestellten Informationen aus
 - *.report.txt-File*
Stellt eine Benutzerdefinierte Form des *.crt.txt-File's* dar. Beinhaltet alle Informationen zur Erstellung eines Berichtes (z.B.: Auslastungsgrad, max. Spannungen)

Die unterschiedlichen Ergebnisse können graphisch mit Hilfe von *OpenGINeutralX* bzw. *NX I-deas6* übersichtlich dargestellt werden.

6 Spannungsbewertungssoftware Fatigue Assessment

Übliche Ergebnisse sind:

- Inputparameter (Oberflächenrauigkeit, Sicherheitsfaktoren, Kerbfälle usw.)
- Zwischenergebnisse (Spannungsamplitude, Mittelspannungen usw.)
- Lastfälle
- Auslastungsgrad a_{BK}

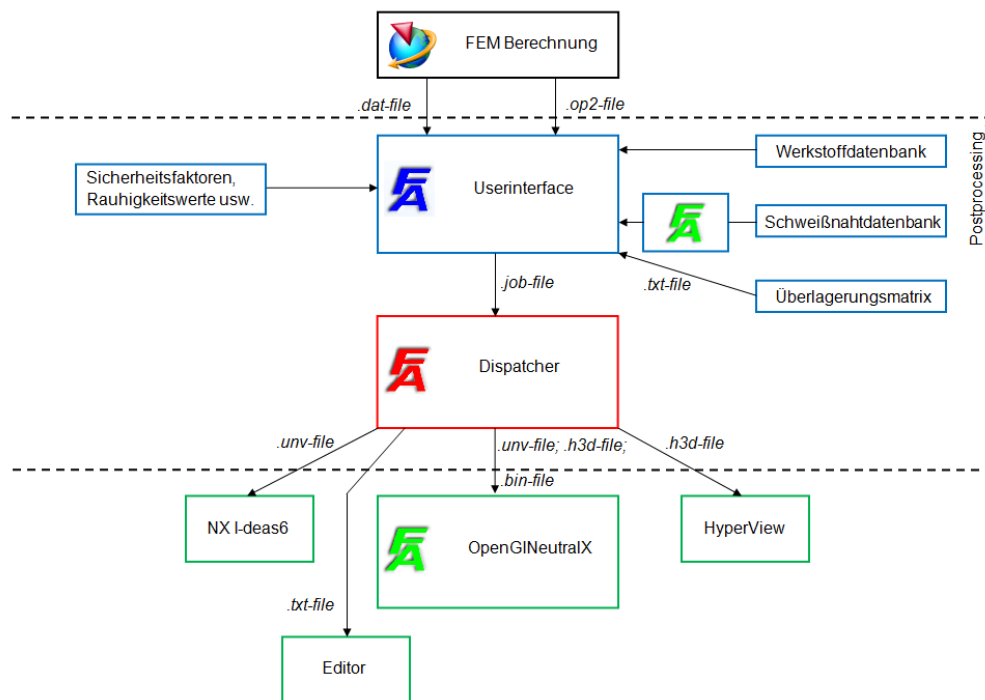


Abbildung 6.1: Für FatAss benötigte Input- und Outputparameter

6.1 Bedieneroberfläche

6.1.1 Userinterface

Jede Berechnung benötigt eine Vielzahl unterschiedlicher Voreinstellungen. All diese Voreinstellungen können mit Hilfe des *Userinterface* durchgeführt werden. In Abbildung 6.2 ist die zentrale Bedienungsoberfläche des *FatAss Userinterface* dargestellt.

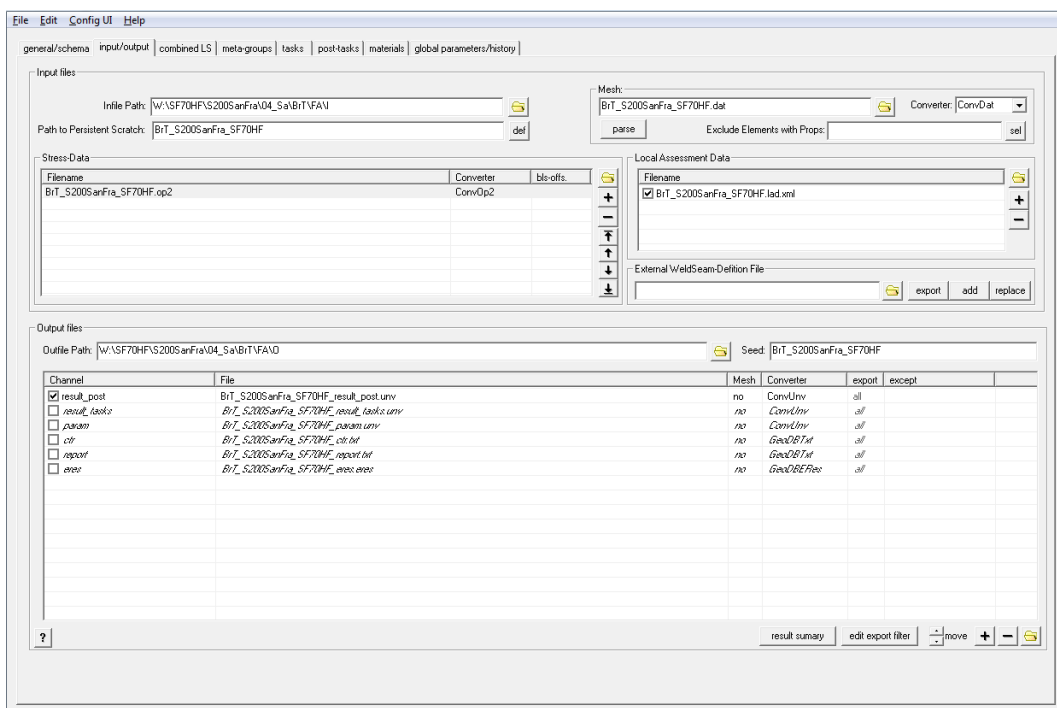


Abbildung 6.2: Bedieneroberfläche FatAss Userinterface

Im Reiter *input/ output* können die jeweiligen Inputfiles wie Spannung, Netzgeometrie usw. ausgewählt werden. Des weiteren besteht hier die Möglichkeit, die jeweiligen Outputfiles voreinzustellen. Weiteres können im Reiter *combined LS* die benötigten Überlagerungslastfälle eingefügt und

6 Spannungsbewertungssoftware Fatigue Assessment

entsprechend bearbeitet werden. Die Definition der einzelnen Bewertungsaufgaben, wie zum Beispiel die FKM6 und die Zuteilung der Bewertungsvorschriften zu den einzelnen Lastfällen, erfolgt wiederum im Reiter *tasks*.

6.1.2 OpenGL-viewer/ OpenGINeutralX

Alle schweißnahtbezogenen Inputparameter werden mit Hilfe der Bedieneroberfläche *WeldSeamDef* eingestellt und angepasst. Dieses stellt einen Teil des *OpenGINeutralX* da und ist in Abbildung 6.3 abgebildet.

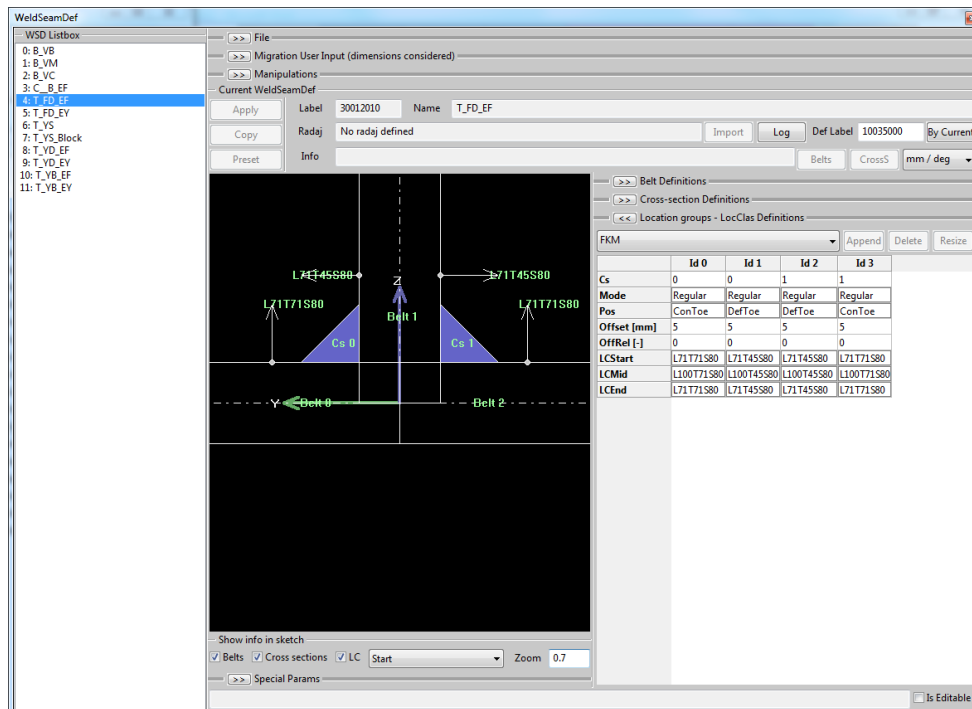


Abbildung 6.3: Benutzeroberfläche WeldSeamDef

Die aktuell ausgewählte Schweißnaht wird mit den jeweiligen Kerbfällen graphisch dargestellt. Mit Hilfe der *WSD Listbox* kann auf die Standard-schweißnähte zugegriffen werden. Des weiteren hat man die Möglichkeit

6 Spannungsbewertungssoftware Fatigue Assessment

diese Liste um spezielle Schweißnähte (auftragsbezogen, bauteilbezogen) zu erweitern. Jeder Schweißnahtquerschnitt kann mit beliebig vielen Location points (Id 0 bis Id n) beschrieben werden. Jedem Location point und jeder Location Group (LCStart, LCMid, LCEnd) kann in der entsprechenden Zeile und Spalte ein Paket aus 3 Kerbfällen zugewiesen werden. Jedes dieser Kerbfälle besteht aus einem Kerbfall für Belastungen in Längs-, Quer- und Schubrichtung. Die Bewertung mit der jeweils gewählten Bewertungsvorschrift erfolgt in diesen Location points. Diese sind in Abbildung A.15 beispielhaft an einer T-Stoß-Verbindung dargestellt. Die verwendete Schweißnaht stellt eine doppelseitige Kehlnaht mit einer Kehlnaht als Nahtende (T.FD.EF²) dar.

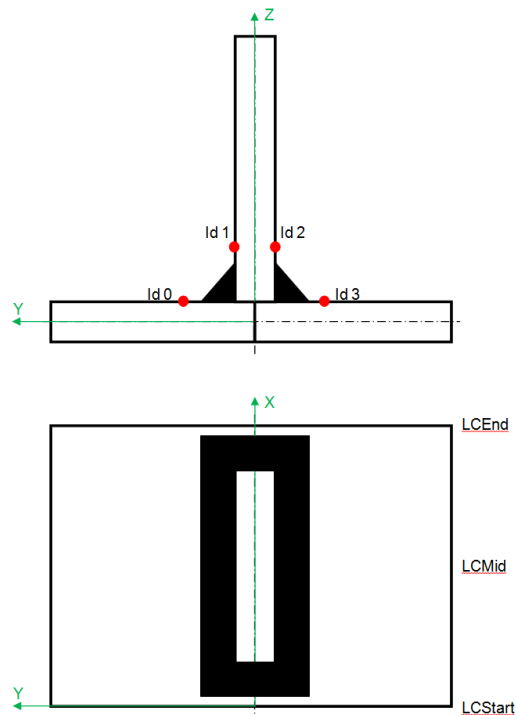


Abbildung 6.4: Schweißnahtdetail

²T ... T-Joint; F ... Fillet Weld; D ... double sided; EF ... Filled weld termination

7 Nachweis der Richtigkeit der FKM 6 Implementierung

Um die Richtigkeit der Implementierung der FKM Richtlinie 6 im *Mathcad tool*¹ zu gewährleisten, wurde dieses mit Hilfe eines umfangreichen Testaufbaues überprüft.

Der eigentliche Test bestand aus 2 unterschiedlichen Testphasen. In der ersten Phase wurde die Richtigkeit der verschiedenen Parameter inkl. deren korrekten Umsetzung im *Mathcad tool* überprüft. In der zweiten Phase wurde die richtige Umsetzung der *DLL*² kontrolliert. Mit Hilfe dieses Moduls erfolgt die Umsetzung der FKM 6 im FatAss.

Alle für einen erfolgreichen Nachweis benötigten Informationen sind in diesem Model vorhanden. Nicht Bestandteil dieser Arbeit ist die Überprüfung der Module, welche für andere Bewertungsvorschriften benötigt werden. Für die zweite Testphase wurden die bereits getesteten und korrigierten Parameter der ersten Phase herangezogen.

In einer weiteren Phase erfolgte die Überprüfung der Rainflow Implementierung. Diese Phase unterscheidet sich von den ersten zwei Phasen und wird daher im Kapitel 7.3 näher erklärt. Es wird auch hier mit dem bereits verwendeten *Excel file*³ gearbeitet.

¹verwendete Version: assFKM6_V1.1.0.0.xmcd

²*DLL* ... Dynamic Link Library

³verwendete Version: testingAssFKM6_V1.1.0.0.If4.1_RF.xls

7.1 Aufbau der Testumgebung

Wie bereits im Kapitel 7 erklärt, besteht der Testablauf aus 2 Phasen. Der grundsätzliche Ablauf beider Phasen ist identisch. Lediglich dass zu überprüfende Tool unterscheidet sich. In Abbildung 7.1 ist die Testumgebung graphisch dargestellt. Beide Testumgebungen arbeiten nach dem gleichen Prinzip und Reihenfolge (1 bis 5). Mit Hilfe des *Excel files* erfolgt die Steuerung des Testablaufes, die Variation der verschiedenen Parameter und die Überprüfung der einzelnen Tests.

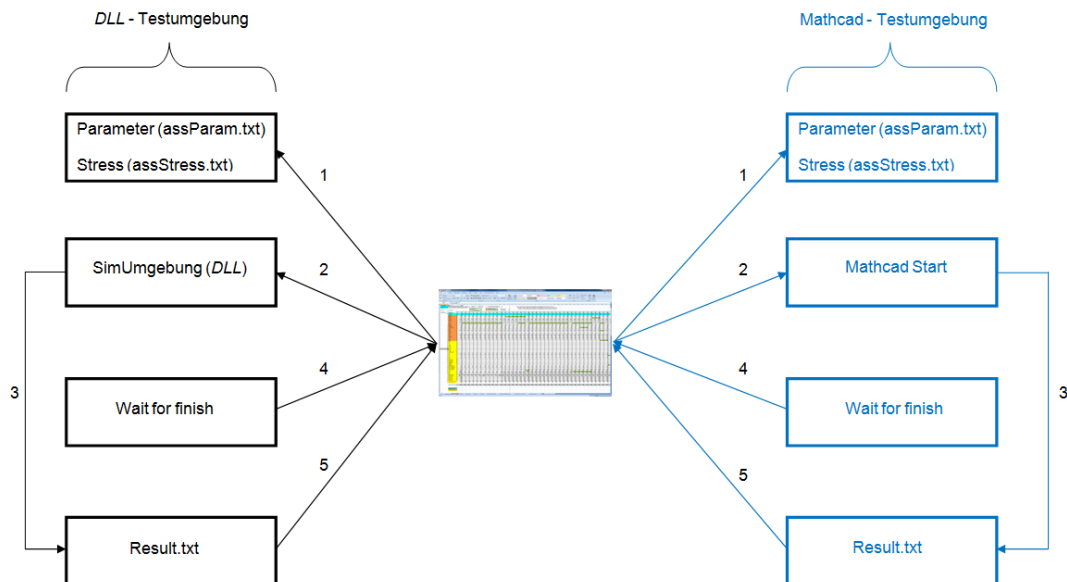


Abbildung 7.1: Testumgebungen

Auf der linken Seite ist der Testablauf für die *DLL* und auf der rechten Seite für die Parameter im Mathcad dargestellt. Um die Richtigkeit der *DLL* zu überprüfen, wurde die beiden Ergebnisse der einzelnen Testumgebungen miteinander verglichen. Dies erfolgte durch Subtraktion der beiden Ergebnisse mit Hilfe der mathematischen Funktion $\sum |\Delta result_{Ass\&Mathcad}|$. Die richtige Arbeitsweise der *DLL* ist gegeben, wenn das Ergebnis der Subtrakti-

7 Nachweis der Richtigkeit der FKM 6 Implementierung

on Null ergibt. Es muss also stets das Ergebnis der *DLL* mit dem Ergebnis des *Mathcad tools* übereinstimmen. Anhand der *Mathcad Testumgebung* wird die Durchführungsreihenfolge näher erklärt:

1. Geänderte Parameter und Spannungen werden von *Excel tool* als Textfile (*assParam.txt* bzw. *assStress.txt*) in einen vordefinierten Ordner gespeichert
2. *Excel file* gibt dem *Mathcad tool* den Befehl, die abgespeicherten Textfiles einzulesen
3. Nach erfolgreicher Neuberechnung der eingelesenen Parameter und Spannungen erfolgt die Ausgabe der Ergebnisse (*Result.txt*) wiederum in einen vordefinierten Ordner
4. Nach der Übermittlung der erfolgreichen Berechnung durch das *Mathcad Tool* erfolgt das Einlesen der Ergebnisse durch das *Excel file*
5. Die geänderten Parameter und die Ergebnisse werden gemeinsam im *Excel file* im Reiter *ResultAss Mathcad* dargestellt.

7.2 Durchführung der Tests anhand eines Parameters

Anhand des Parameters A (Bruchdehnung in %) wird der Testablauf näher erklärt. Unabhängig von dem zu testenden Parameter ist der Testablauf im *Excel file* immer der selbe. Das in Abbildung 7.3 dargestellte *Excel-file* soll die Testumgebung zeigen. Mit Hilfe dieser, erfolgt die Eingabe und die Steuerung der einzelnen Werkstoffeigenschaften und die Parametervariation. Der Parameter A ist abhängig vom gewählten Werkstoff und wird entsprechend Tabelle 7.1 zugeteilt.

⁴für GJL gilt stets: $A = 0,6 \%$

7 Nachweis der Richtigkeit der FKM 6 Implementierung

Werkstoffart	Bruchdehnung	Beispiel
Duktil	$A \geq 6\%$	Stahl, GS, Aluknetlegierung
Semiduktill bzw. spröde	$A < 6\%$	GJS, GJM, GJL ⁴ , Aluguss

Tabelle 7.1: Zuteilung der Bruchdehnung entsprechend der Werkstoffart

Die Implementierung der Bruchdehnung A im *Mathcad Tool* wurde wie in Abbildung 7.2 dargestellt durchgeführt.

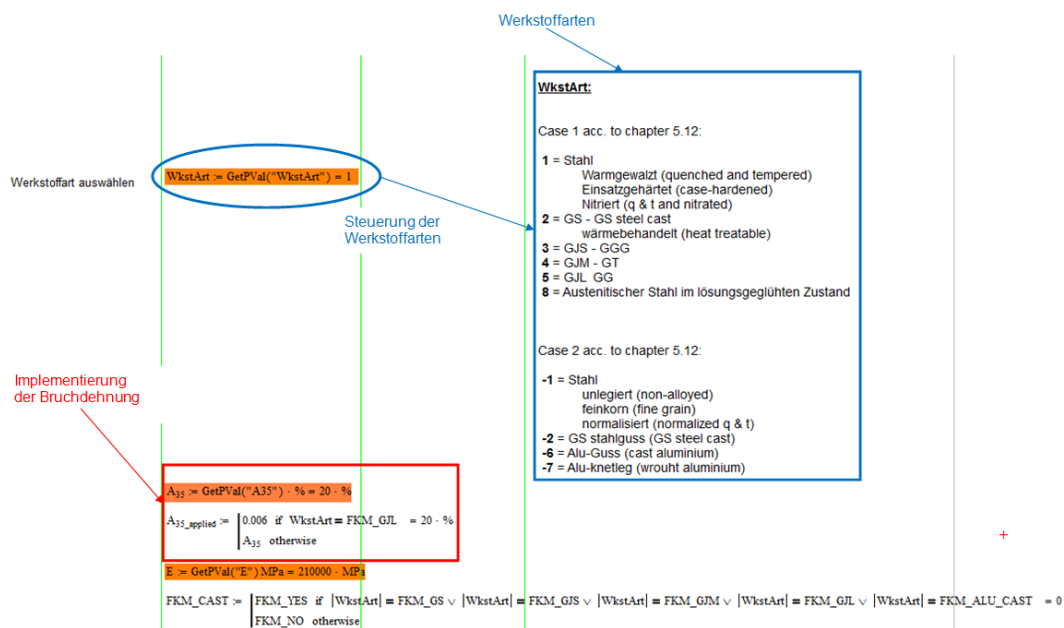


Abbildung 7.2: Implementierung der Bruchdehnung im Mathcad Tool

Für jede Werkstoffart wurde im *Excel tool* ein eigener Testfall (TestCase 2 bis 11) angelegt. Jeder einzelne Testfall berücksichtigt eine andere Werkstoffart (in Abbildung 7.3 grün hinterlegt). Mit Hilfe einer Ziffer (1 bis 8 und -1 bis -7) erfolgt die jeweilige Zuteilung zu einer Werkstoffart (in Abbildung 7.2 blau dargestellt).

Dies erfolgt durch den Befehl $WkstArt = GetPVal("WkstArt") = 1$. Durch drücken von *calc&import Mathcad-Results* (In Abbildung 7.3 gelb dargestellt) wird der

7 Nachweis der Richtigkeit der FKM 6 Implementierung

Berechnungsvorgang gestartet. Über den Befehl *MathcadStart* bzw. *MathcadEnd* können die zu berechnenden Testfälle ausgewählt werden. Das entsprechende Ergebnis wird im Reiter *ResultAss_Mathcad* aufgelistet. Im Anschluss daran wurden die Parameter mit den entsprechenden Tabellen bzw. Diagramme aus der FKM Richtlinie 6 verglichen und auf Richtigkeit überprüft. Bei etwaigen Fehlern bzw. Abweichungen wurden diese entsprechen in *Mathcad Tool* angepasst und ein erneuter Berechnungsvorgang gestartet. Die folgende Tabelle listet alle getesteten Parameter auf.

Bezeichnung	Kurzzeichen	Bezeichnung	Kurzzeichen
A_3	Bruchdehnung	K_A	Anisotropiefaktor
E	Elastizitätsmodul	K_{dm} bzw. K_{dp}	Technologischer Größenfaktor
R_m bzw. R_p	Bauteil Normwerte	K_{NLc}	Graugussfaktor
j_m bzw. j_p	Einzel Sicherheitsfaktoren	j_{zst}	Teil Sicherheitsfaktor
Δ_j	Sicherheitssummand	D_{Mmin}	Mehrstufenkollektiv
j_F bzw. j_{Zdy}	Sicherheitsfaktoren	ϵ_{ref} bzw. ϵ_0	ertragbare Dehnungen
n_{pl}	plastische Stützzahl	a_M bzw. b_M	Konstanten
n_σ	Stützzahl	F1, F2, F3, F4	Überlastungsfälle

Tabelle 7.2: Übersicht aller getesteten Parameter

Es wurden nur diejenigen Parameter getestet, bei denen die Möglichkeit besteht, dass auf eine Tabelle bzw. auf eine Auflistung von unterschiedlichen Werten zugegriffen werden kann.

Des weiteren wurde darauf geachtet, dass keine numerischen Divisionen „ $\frac{1}{0}$ “ bzw. undefinierte Ergebnisse vorkommen. Und dadurch das Problem auftreten kann, dass durch eine fehlerhafte Programmierung auf einen falschen Wert in der Tabelle zugegriffen wird.

7 Nachweis der Richtigkeit der FKM 6 Implementierung

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	VeldSeamDef	Reload														
2	name of VeldAssD	S\FatAssiValidationAssRules64\4.NAssFKM6\assFI					Batch all	Assess one		calo6.import Mathcad-Results						
3	path of dir	S\FatAssiValidationAssRules64\4.NAssFKM6														
4																
5	masTest	Assess one					ResultOfAsses	0.0 on success		87 last Testcase			Mathcad Start:	87		
6										87 last Testcase Mathcad			Mathcad End:	87		
7	VSMasParam	TestCase														
8		4 StressInput	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
9	AssMasParam	EvalSys	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
10		63 TaskDataTable	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
11		67 Param														
12	masParam	WSDefLabel	Defaultwerte													
13	masMathcadParam	WSLGlndex	A.35 applied													
14	Schweiß	Loocid	Anisotrop													
15	Naht-	TopoPos														
16	geometrie	1 R_p_N	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360
17		2 R_m_N	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460
18		3 R_m_Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19		4 f_v_tau	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577
20		5 f_v_sig	0,450	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,450	0,450
21		6 K_NLE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22		7 E	210000	210000	210000	210000	210000	210000	210000	210000	210000	210000	210000	210000	210000	210000
23		8 WkstArt	1	1	2	3	4	5	8	-1	-2	-6	-7	1	1	1
24		9 A35	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
25		10 d_eHm	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
26	11 d_eHmP	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
27	12 d_eHf_max_m	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	
28	13 a_dm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
29	14 a_dp	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
30	15 l_tau	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	0,577	
31	16 l_sig_o	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	
32	17 l_sig_l	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
33	18 a_G	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
34	19 b_G	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	
35	20 a_Rsig	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	
36	21 Rm_min	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	
37	22 a_m	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	
38	23 b_m	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	
39	24 K_NL	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
40	40 loRef	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
41	41 K_V	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
42	42 K_E	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
43	43 K_p	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
44	44 K_BK	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
45	45 K_Tm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
46	46 K_Tp	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
47	47 K_Tm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
48	48 K_Tp	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
49	49 K_TD	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
50	50 K_BK_Bij_RF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
51	51 LF	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	
52	52 LG	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	
53	53 Lm	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
54	54 Lp	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
55	55 Lmt	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
56	56 Lpt	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
57	57 LstConseq	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
58	58 LstPropOc	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
59	59 LdyConseq	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
60	60 LdyReglns	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
61	61 LNDT	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
62	62 ldyMatrix	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
63	63 RF_CI_Number	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	
64	64 RF_Thres_a_BK	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
65	65 RF_CutOff_abs	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
66	66 RF_CutOff_rel	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	
67	67 K_A	-1,00	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
68	68 d_eff	100,00	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100,00	100,00	
69	69 R_z	200,00	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200,00	200,00	
70	70 K_S	1,00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00	1,00	
71	71 RF_N_D_sig	5,00E+08	5000000	5000000	5000000	5000000	5000000	5000000	5000000	5000000	5000000	5000000	5000000	5,00E+08	5,00E+08	
72	72 RF_N_D_tau	1,00E+08	1E+08	1E+08	1E+08	1E+08	1E+08	100000000	1E+08	1E+08	1E+08	100000000	1,00E+08	1,00E+08	1,00E+08	
73	73 RF_k_sig	3,00	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3,00	3,00	
74	74 RF_k_tau	5,00	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5,00	5,00	
75	75 RF_k2_sig	3,00	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3,00	3,00	
76	76 RF_k2_tau	5,00	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5,00	5,00	
77	77 CCP_Thres_a_SBK	20,00	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
78	78 CCP_RotSteps	7,00	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
80			Σ(resultAssbMathca	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Abbildung 7.3: Testumgebung im Excel Tool

7.3 Kontrolle der Rainflow Implementierung

In einer weiteren Testphase wurde die richtige Umsetzung des Rainflow Algorithmus überprüft.

In dieser Phase stand die richtige Verarbeitung von Spannungseingaben und die Darstellung in einer Matrix im Vordergrund. Um dies zu überprüfen wurden mit Hilfe des *Excel file* unterschiedliche Spannungen implementiert. In Abbildung 7.4 ist der Spannungsinput und das Rainflow Ausgabefile *RF_SigX* dargestellt.

Durch eine beliebige Eingabe von Spannungen und dazugehörige Zykluszahlen konnte die richtige Implementierung überprüft werden. Da im *Excel file* nur die Maximal- und Minimal-Spannung für die weitere Berechnung herangezogen wird, wurde nur ein geringer Umfang an Spannungen für die Berechnung im *Excel file* angelegt.

Nach der erfolgreichen Berechnung des beliebig gewählten Testfalls werden die Ergebnisse in einem Ordner zwischengespeichert. Auf diese Ergebnisse (*LogAssess.txt*, *sigXMaster_rfMatrix_main.txt*, *Input aus StressInput*) greift das *Excel file* wieder zu und erstellt die dazugehörige Matrix. Wie in Abbildung 7.4 ersichtlich, werden die Zykluszahlen in der richtige Spalte bzw. Zeile der Matrix grün dargestellt.

7 Nachweis der Richtigkeit der FKM 6 Implementierung

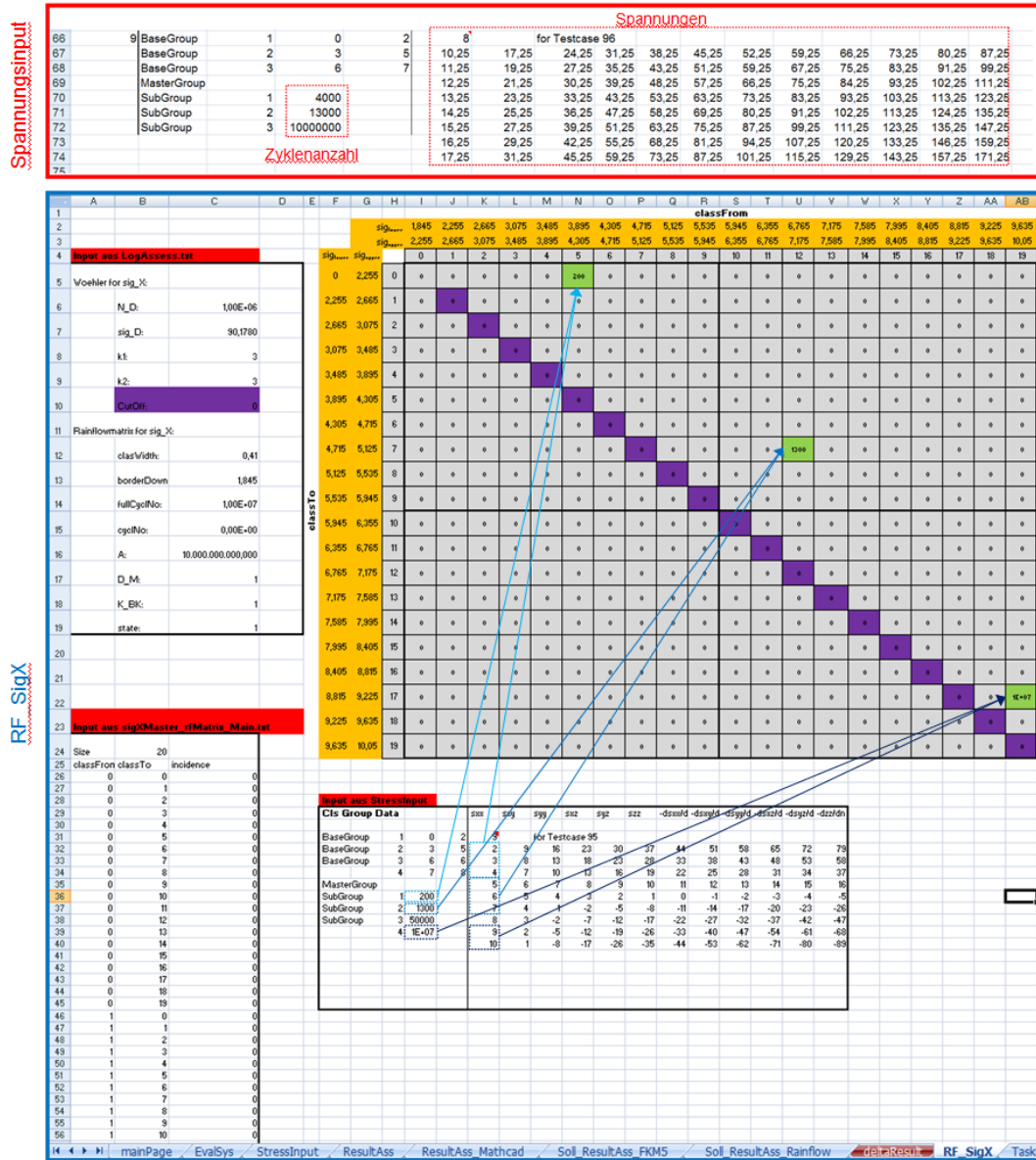


Abbildung 7.4: Testumgebung im Excel Tool für Rainflow Test

Abbildungsverzeichnis

2.1	Nachweiskonzepte	6
2.2	Beanspruchungsart	7
2.3	Strukturspannungskonzept (Haibach, 2005, S.212)	10
2.4	Strukturspannungen (Haibach, 2005, S.216)	10
3.1	Ursachen der Betriebsbeanspruchungen	13
3.2	Schwingfestigkeit	15
3.3	doppeltogarithmisches Diagramm (Eichlseder, o.D., S.22)	16
3.4	Woehlerdiagramm	18
3.5	Schwingspiel	21
3.6	Von Beanspruchungzeitfunktion zu Kollektiv	23
3.7	Einheitskollektive	23
3.8	Kollektivformen: links: Rechteckverteilung, mitte: Normalverteilung, rechts: Geradlinienverteilung	24
3.9	Palmgren Miner Verläufe	26
3.10	Beispiel für Schadensakkumulationshypothese	27
4.1	Übersicht über die Wöhlerliniensysteme der einzelnen Bewertungsvorschriften	31
4.2	FAT Klassen Auszug aus IIW Richtlinie	34
4.3	Bewertungs Wöhlerlinien (Stahl) für verschiedene FAT Klassen aus IIW-Richtlinie	35
4.4	FAT Klassen Auszug für Schubspannungen aus IIW Richtlinie	35

Abbildungsverzeichnis

4.5	FAT Klassen Auszug bei Schubbeanspruchung aus FKM Richtlinie 6	37
4.6	FAT Klassen Auszug bei Normalbeanspruchung aus FKM Richtlinie 6	38
5.1	Haigh Diagramm (Haibach, 2005, S.184)	41
5.2	Modifiziertes Haigh Diagramm	43
5.3	Auslastungsgrade an vier beliebigen Stellen	44
5.4	Haigh Diagramm aus beliebig gewählten Punkten ermittelt (Top face)	45
5.5	Haigh Diagramm aus beliebig gewählten Punkten ermittelt (Bottom face)	46
5.6	Spannungsamplitude	47
5.7	Mittelspannung	48
5.8	Referenzspannung	48
5.9	Ergebnisse aus Untersuchung von Abbindervariation (oben: Kehlnaht-Abbinder, unten: HY-Naht-Abbinder)	50
5.10	Lage der Cutoff-Linie im Wöhlerdiagramm für Normalspan- nung	51
5.11	Dokumentationsbeispiel T_FD_EY	56
5.12	Beschreibung und Nummerierung des Schweißnahtdetails am Beispiel T_FD_EY	57
5.13	Übersicht der Inspektionsintervalle in Abhängigkeit des Material- Sicherheitsfaktors und der Wöhlerliniensteigung	62
5.14	Berechnung der Inspektionsintervalle	63
6.1	Für FatAss benötigte Input- und Outputparameter	68
6.2	Bedieneroberfläche FatAss Userinterface	69
6.3	Benutzeroberfläche WeldSeamDef	70
6.4	Schweisnahtdetail	71
7.1	Testumgebungen	73

Abbildungsverzeichnis

7.2	Implementierung der Bruchdehnung im Mathcad Tool	75
7.3	Testumgebung im Excel Tool	77
7.4	Testumgebung im Excel Tool für Rainflow Test	79
A.1	Auslastungsgrad an vier beliebigen Stellen	87
A.2	Spannungsamplitude	88
A.3	Mittelspannung	89
A.4	Referenzspannung	90
A.5	Schweißnahtdetail B_VM	92
A.6	Schweißnahtdetail B_VC	93
A.7	Schweißnahtdetail T_FD_EF	94
A.8	Schweißnahtdetail T_FD_EY	95
A.9	Schweißnahtdetail T_YB_EF	96
A.10	Schweißnahtdetail T_YB_EY	97
A.11	Schweißnahtdetail T_YD_EF	98
A.12	Schweißnahtdetail T_YD_EY	99
A.13	Schweißnahtdetail T_YE_EF	100
A.14	Schweißnahtdetail T_YB_EF	101
A.15	Schweißnahtdetail T_YB_EY	102

Tabellenverzeichnis

5.1	Spannungen und Auslastungsgrade (Top Face)	45
5.2	Spannungen und Auslastungsgrade (Bottom Face)	46
5.3	Farbcodes	56
5.4	Übersicht aller Standardschweißnähte	58
7.1	Zuteilung der Bruchdehnung entsprechend der Werkstoffart .	75
7.2	Übersicht aller getesteten Parameter	76
A.1	Spannungen und Auslastungsgrade (Top Face)	86
A.2	Spannungen und Auslastungsgrade (Bottom Face)	86
A.3	Schweißnahtbezeichnung aller Standardschweißnähte	91

Literatur

- A6Z00038145080 (2015). »FatAss Schweißnaht - Datenbank (in Arbeit)«.
- A6Z00038145306 (2015). »Arbeitsrichtlinie Anwendung der FKM Richtlinie für rechnerische Festigkeitsnachweise (in Arbeit)«.
- Buxbaum, Otto (1992). *Betriebsfestigkeit; Sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile*. 2., erweiterte Auflage. STAHL EISEN.
- DIN15018 (1984). *DIN 15018 Teil 1; Krane, Grundsätze für Stahltragwerke, Berechnung*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN15085 (Jan. 2010). *DIN EN 15085-3:2007; Bahnanwendung - Schweißen von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen - Teil3: Konstruktionsvorgaben*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN15663 (2012). *DIN EN 15663; Bahnanwendung - Definition der Fahrzeugreferenzmassen. Deutsche Fassung EN 15663:2009 + AC:2010*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- Eichseder, Wilfried (o.D.). »Betriebsfestigkeit«. Montanuniversität Leoben.
- EN15827 (2011). *EN 15827:2011; Bahnanwendung - Anforderung für Drehgestelle und Fahrwerke*.
- FKM6 (2012). *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen*. Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM).
- Haibach, Erwin (2005). *Betriebsfestigkeit; Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. 3., korrigierte und ergänzte Auflage. Springer.
- Hinkelmann, Karsten u. a. (2002). *Extrapolation von Beanspruchungskollektiven*. Techn. Ber. Technische Universität Clausthal: Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit.

Literatur

- IIW (Juli 1996). *IIW-Dokument XIII-1539-96 / XV-845-96; Empfehlung zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile*. International Institute of Welding (IIW).
- International Institute of welding* (Feb. 2015). URL: <http://www.iiwelding.org/WorkingUnits/Pages/Default.aspx>.
- International Verband für Schweißtechnik (IIW)* (Feb. 2015). URL: <http://www.dvs-server.de/AfT/F/I-IIWDEL>.
- Köhler, Michael u. a. (2012). *Zählverfahren und Lastannahmen in der Betriebsfestigkeit*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Morgenstern, Christoph (2006). »Kerbgrundkonzept für die schwingfeste Auslegung von Aluminiumschweißverbindungen am Beispiel der naturharten Legierung AlMg_{4,5}Mn (AW-5083) und der warmausgehärteten Legierung AlMgSi₁ T6 (AW-6082 T6)«. Magisterarb. Technische Universität Darmstadt: Fachbereich Maschinenbau.
- Oßberger, Uwe (2010). »Analyse und Bewertung von Berechnungsvorschriften zum Ermüdungsverhalten von Schweißverbindungen«. Magisterarb. Technische Universität Graz: Institut für Leichtbau.
- Schwaigerer, Siegfried (1983). *Festigkeitsberechnung im Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Siemon, Axel (2006). »Qualitative und quantitative Analyse der linearen und nichtlinearen Schadensakkumulationshypothesen unter Einbeziehung der statischen Versuchsplanung«. Diss. Universität Kassel: Fachbereich Maschinenbau.
- Späth, Ralf und Wolfgang Burget (2006). *Lebensdauerberechnung von geschweißten Strukturen für Hydraulikbagger und ihre Validierung im Ermüdungsversuch*. Techn. Ber. Liebherr - France SAS.
- Varfoomeev, Igor u. a. (2011). *Lebensdauerbewertung von Schweißverbindungen unter besonderer Berücksichtigung von Eigenspannungen*. Techn. Ber. Fraunhofer - Institut für Werkstoffmechanik IWM.

Anhang

A.1 Spannungen an geschweißtem Drehgestellrahmen

Element	Note	σ_a [MPa]	σ_m [MPa]	σ_{ref} [MPa]	Auslastungsgrad a_{BK}
40938	385131	69	-89,7	-89,9	0,57 $\hat{=}$ 57 %
37991	399378	24,2	61	59,2	0,22 $\hat{=}$ 22 %
37640	72463	39,9	29,4	57,3	0,33 $\hat{=}$ 33 %
41255	852261	42,1	-110,8	-111,1	0,34 $\hat{=}$ 34 %

Tabelle A.1: Spannungen und Auslastungsgrade (Top Face)

Element	Note	σ_a [MPa]	σ_m [MPa]	σ_{ref} [MPa]	Auslastungsgrad a_{BK}
40938	385131	51,7	-73,3	-73,4	0,45 $\hat{=}$ 45 %
37991	399378	24,2	48,9	48,8	0,23 $\hat{=}$ 23 %
37640	72463	51,7	112,5	83,3	0,47 $\hat{=}$ 47 %
41255	852261	50,6	-128,8	-129,1	0,41 $\hat{=}$ 41 %

Tabelle A.2: Spannungen und Auslastungsgrade (Bottom Face)

Anhang

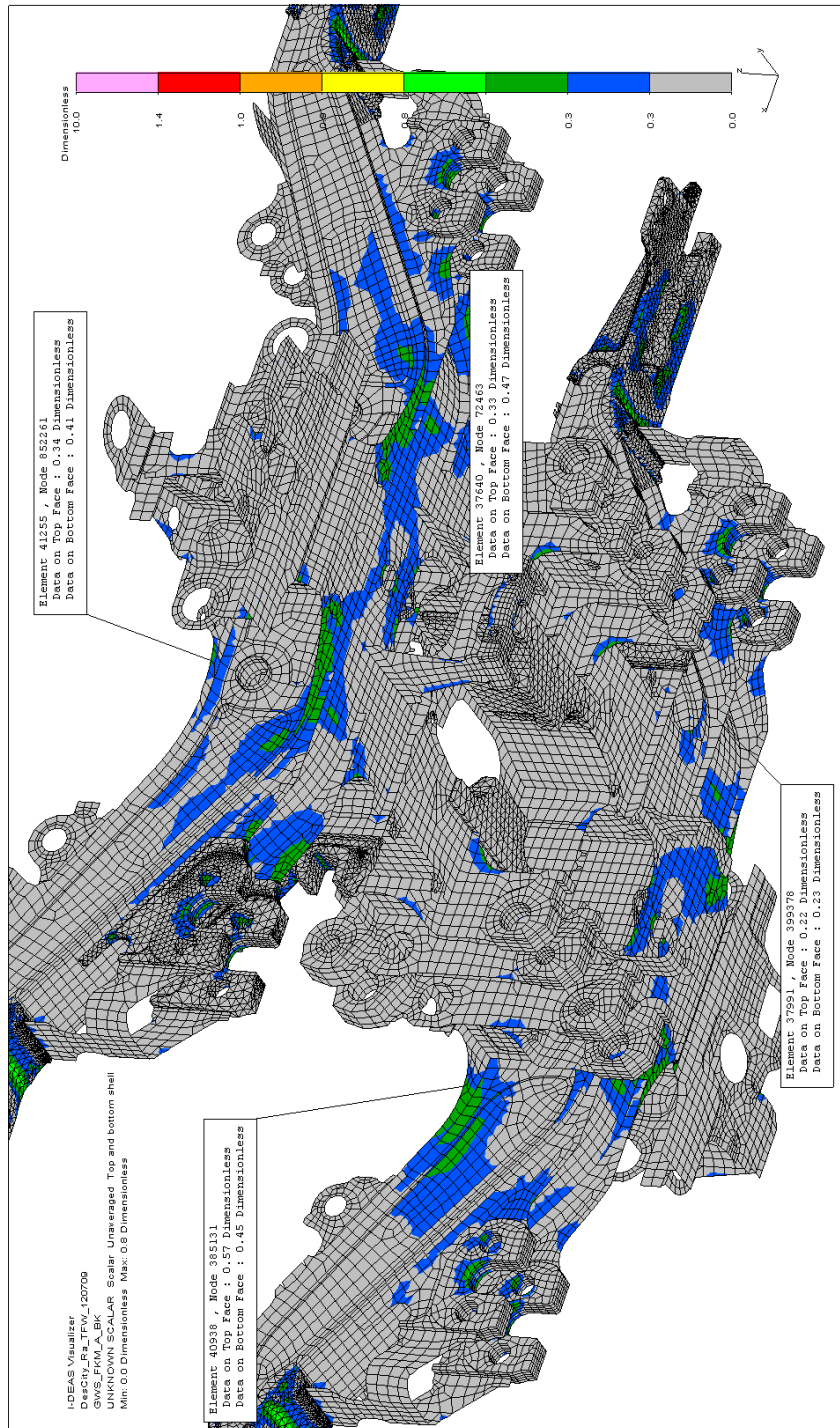


Abbildung A.1: Auslastungsgrad an vier beliebigen Stellen

Anhang

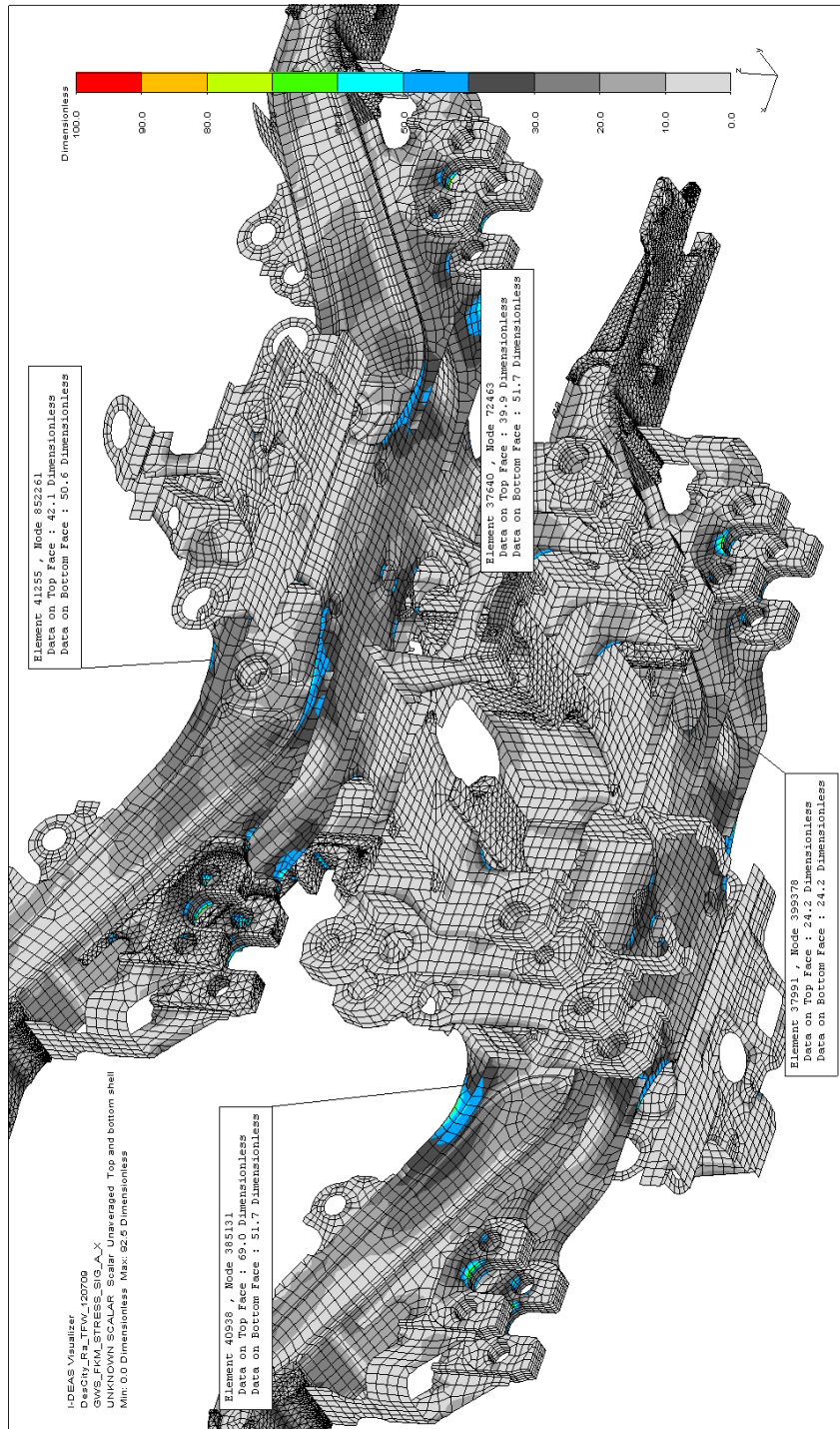


Abbildung A.2: Spannungsamplitude

Anhang

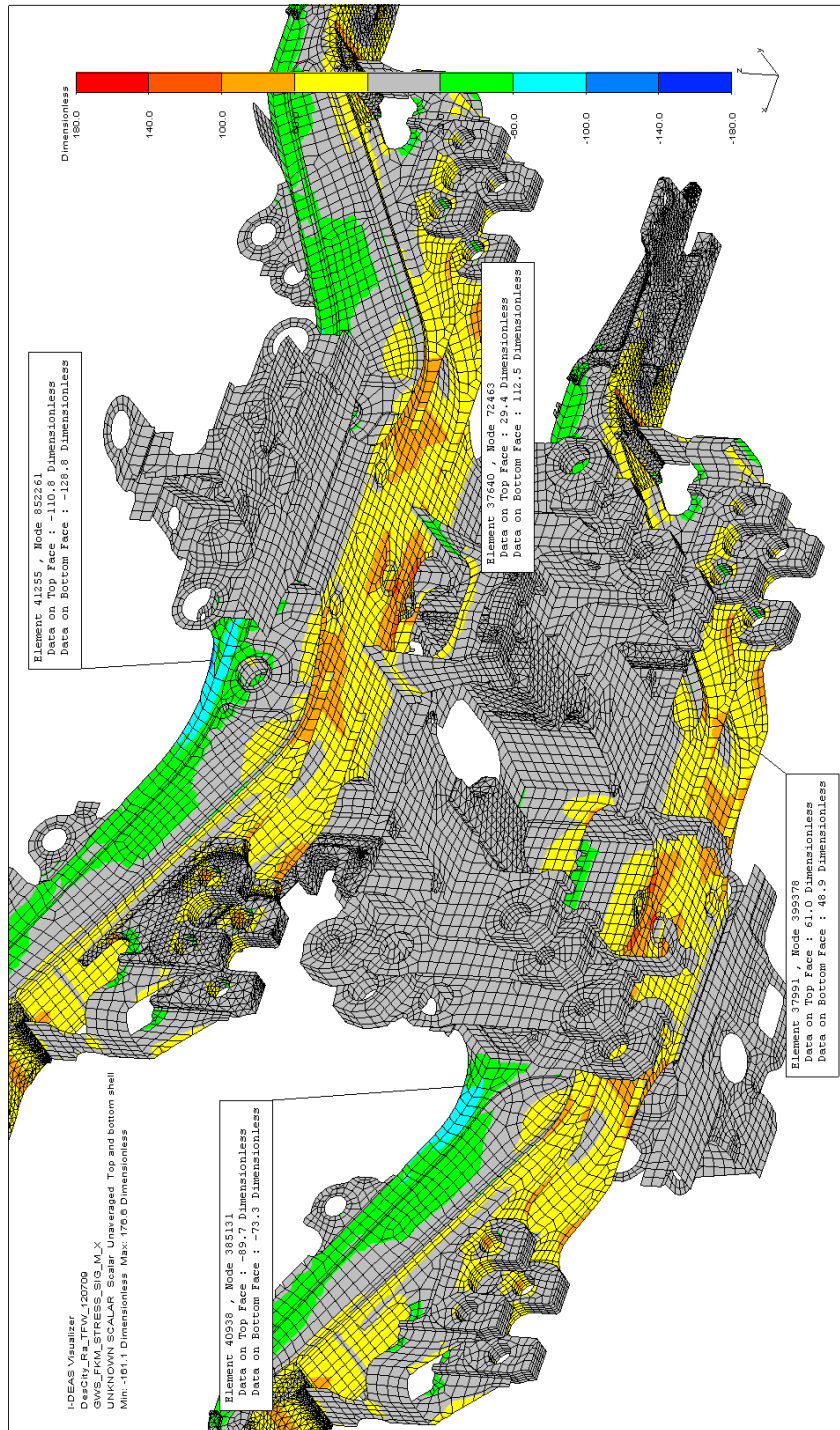


Abbildung A.3: Mittelspannung

Anhang

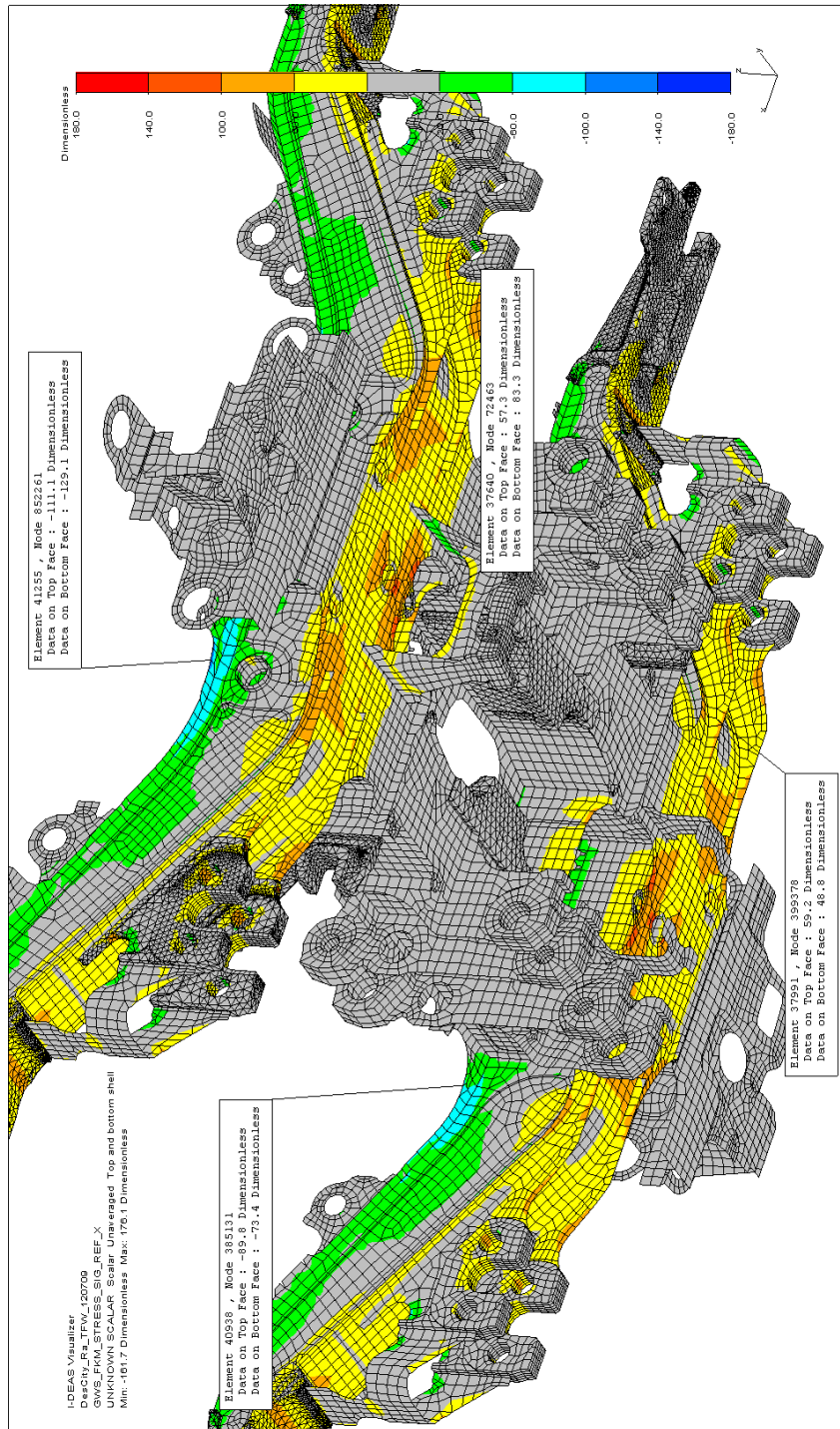


Abbildung A.4: Referenzspannung

Anhang

A.2 Schweißnahtbezeichnungen und Schweißnahtdetails inkl. FAT-Klassen

ID	Stoßart	Schweinaht	Naht	Naht-Rückseite	Ausführung Nahtende
1	Stumpfstoß	B_VM; B_VC	V... Full penetration;	M... Metal backing bar; C... Ceramic backing bar	
3	T-Stoß	T_FD_EF; T_FD_EY; T_YS_EF; T_YD_EF; T_YD_EY; T_YB_EF; T_YB_EY	F... fillet weld; Y... partial penetration	D... double sided; S... single sided; B... backing run	EF... filled weld termination; EY... partial penetration termination
5	TX-Stoß	T_YB_EF; T_YB_EY; T_YD_EF; T_YD_EY; T_YS_EF	F... fillet weld; Y... partial penetration	D... double sided; S... single sided; B... backing run	EF... filled weld termination; EY... partial penetration termination

Tabelle A.3: Schweißnahtbezeichnung aller Standardschweißnähte

Anhang

SIEMENS

FKM_Katalog.B_VM_10034000

313		Längelastete Stumpfnaht, ohne Nahtansätze, zFP mit Nahtansätzen	100 90
215		Querbelastete Stumpfnaht auf verbretterter Badsicherung, Wurzelriß \varnothing^2	71
1		Voll durchgeschweißte Stumpfnaht	100

Längs
 Quer
 Schub

A 1

Abbildung A.5: Schweißnahtdetail B.VM

Anhang

SIEMENS

FKM_Katalog.B_VC_10035000

313		Längelastete Stumpfnahht, ohne Nahtansätze, zFP mit Nahtansätzen	100 90
214		Querbelastete Stumpfnahht auf keramischer, nicht verbleibender Badsicherung, Wurzelriss $\frac{\sqrt{2}}$	80
1		Voll durchgeschweißte Stumpfnahht	100

Längs
 Quer
 Schub

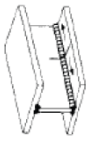




A 2

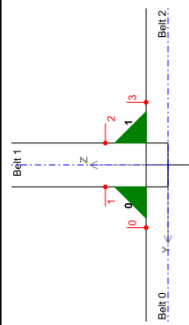
Abbildung A.6: Schweißnahtdetail B_VC

Anhang

SIEMENS

FKM_Katalog.T_FD_EF_30012010

322		Durchlaufende automatisch geschweißte längelastete Doppel-Kehlnaht ohne Nahtransätze, Spannung im Flansch	100
511		Unbelastete Querstreife, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen zweiseitige Kehlnähte, beschliffen Kehlnaht, auch einseitig falls dicker als Grundblech	100 100 80 71
511		Unbelastete Querstreife, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen zweiseitige Kehlnähte, beschliffen Kehlnaht, auch einseitig falls dicker als Grundblech	100 100 80 /1
41.4		Kreuzstoß oder T-Stoß, Kehlnaht oder unvollständig durchgeschweißte K-Naht, auch beschliffene Nähte, Wurzelriss, Spannung in der Schweißnaht: $\sigma = F / \Sigma (a \cdot l)$ 1 ... Länge der Schweißnaht für $a/l \leq 1/3$ l ... Blechdicke	36 40
2		Kehlnähte, teilweise durchgeschweißte Stumpfnahte	80



- Längs
- Längs Nahtende
- Quer Gurt
- Quer Steg
- Schub

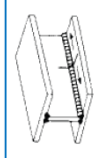
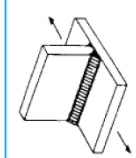
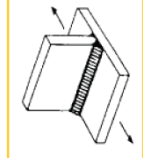
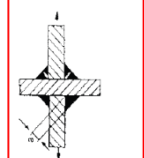
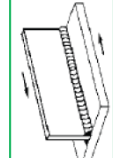
A 3

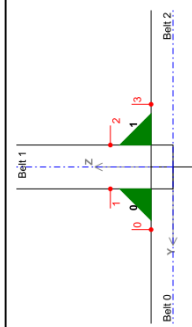
Abbildung A.7: Schweißnahtdetail T_FD_EF

Anhang

SIEMENS

FKM_Katalog_T_FD_EY_30012020

<p>322</p> 	<p>Durchlaufende automatisch geschweißte längsbelastete Doppel-Kehlnaht ohne Nahmansätze, Spannung im Flansch</p>	<p>100</p>
<p>511</p> 	<p>Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen; zweiseitige Kehlnähte, beschliffen; Kehlnaht, auch einseitig falls dicker als Grundblech</p>	<p>100 100 80 71</p>
<p>511</p> 	<p>Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen; zweiseitige Kehlnähte, beschliffen; Kehlnaht, auch einseitig falls dicker als Grundblech</p>	<p>100 100 80 71</p>
<p>41.4</p> 	<p>Kreuzstoß oder T-Stoß, Kehlnaht oder unvollständig durchgeschweißte K-Naht, auch beschliffene Nähte, Wurzelriss, Spannung in der Schweißnaht: $\sigma = F / \Sigma (a \cdot l)$ 1 ... Länge der Schweißnaht für $a/l \leq 1/3$ l ... Blechdicke</p>	<p>36 40</p>
<p>2</p> 	<p>Kehlnähte, teilweise durchgeschweißte Stumpfnaht</p>	<p>80</p>



- Längs
- Längs Nahtende
- Quer Gurt
- Quer Steg
- Schub

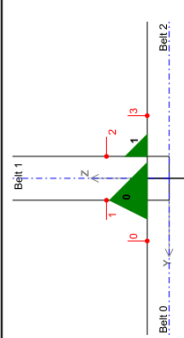
A 4

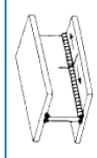
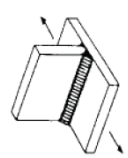
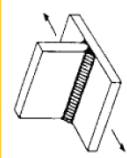
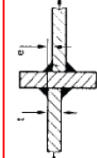
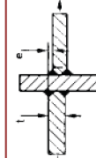
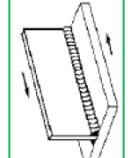
Abbildung A.8: Schweißnahtdetail T_FD_EY

Anhang

SIEMENS

FKM_Katalog.T_YB_EF_30023010



322		Durchlaufende automatisch geschweißte längsbelastete Doppel-Kehlnaht ohne Nahansätze, Spannung im Flansch	100
511		Unbelastete Querstiefe, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen; zweiseitige Kehlnähte, beschliffen; Kehlnaht, auch einseitig falls dicker als Grundblech	100 100 80 71
511		Unbelastete Querstiefe, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen; zweiseitige Kehlnähte, beschliffen; Kehlnaht, auch einseitig falls dicker als Grundblech	100 100 80 71
413		Kreuzstoß oder T-Stoß, Kehlnaht oder teilweise durchgeschweißte K-Naht, kein Lamellenriss, Blechriss, Kantenversatz $e < 0,15 \cdot t$, kein Kantenversatz	63 71
411		Kreuzstoß oder T-Stoß, K-Naht voll durchgeschweißte, Nahtübergang beschliffen, kein Lamellenriss, Blechriss, Kantenversatz $e < 0,15 \cdot t$, kein Kantenversatz	80 90
2		Kehlnähte, teilweise durchgeschweißte Stumpfnähte	80

Längs
Längs Nahtende
Quer Gurt
Quer Steg Gegenlage
Quer Steg HY
Schub

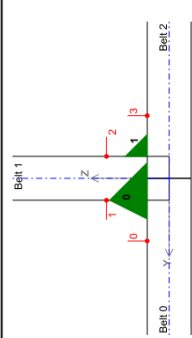
A 5

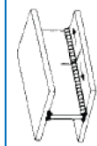
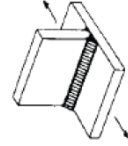
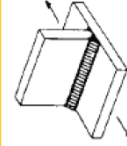
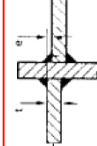

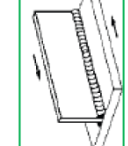
Abbildung A.9: Schweißnahtdetail T_YB_EF

Anhang

SIEMENS

FKM_Katalog.T_YB_EY_30023020



322		Durchlaufende automatisch geschweißte längsbelastete Doppel-Kehlnaht ohne Nahtansätze, Spannung im Flansch	100
511		Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen; zweiseitige Kehlnahte, beschliffen; Kehlnaht, auch einseitig falls dicker als Grundblech	100 100 80 /1
511		Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen; zweiseitige Kehlnahte, beschliffen; Kehlnaht, auch einseitig falls dicker als Grundblech	100 100 80 /1
413		Kreuzstoß oder T-Stoß, Kehlnaht oder teilweise durchgeschweißte K-Naht, kein Lamellenriss, Blechris, Kanterversatz $e < 0,15 \cdot t$, kein Kanterversatz	63 71
411		Kreuzstoß oder T-Stoß, K-Naht voll durchgeschweißte, Nahtübergang beschliffen, kein Lamellenriss, Blechris, Kanterversatz $e < 0,15 \cdot t$, kein Kanterversatz	80 90
2		Kehlnahte, teilweise durchgeschweißte Stumpfnahte	80

Längs
Längs Nahtende
Quer Gurt
Quer Steg Gegenlage
Quer Steg HY
Schub


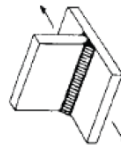
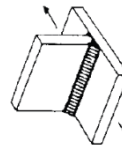
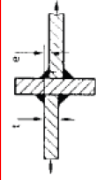

A 6

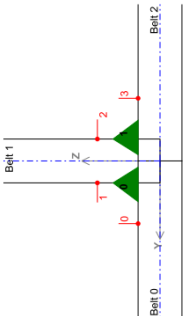
Abbildung A.10: Schweißnahtdetail T_YB_EY

Anhang

SIEMENS

FKM_Katalog.T_YD_EF_30022010

322		Durchlaufende automatisch geschweißte längsbelastete Doppel-Kehlnaht ohne Nahtansätze, Spannung im Flansch	100
511		Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech, K-Naht beschliffen, zweiseitige Kehlnähte, beschliffen, auch einseitig, falls dicker als Grundblech	100 100 80 71
511		Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen, zweiseitige Kehlnähte, beschliffen, auch einseitig, falls dicker als Grundblech	100 100 80 71
413		Kreuzstoß oder T-Stoß, Kehlnaht oder teilweise durchgeschweißte K-Naht, kein Lamellenriss, Blechris, Kantensatz $e < 0,15 \cdot t$, kein Kantensatz	63 71
2		Kehlnähte, teilweise durchgeschweißte Stumpfnaht	80



Längs
Längs Nahtende
Quer Gurt
Quer Steg
Schub


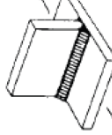
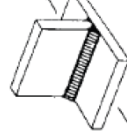
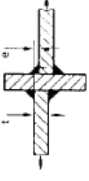
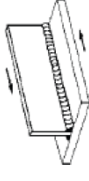
A 7

Abbildung A.11: Schweißnahtdetail T_YD_EF

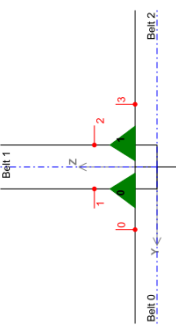
Anhang

SIEMENS

FKM_Katalog.T_YD_EY_30022020

322		Durchlaufende automatisch geschweißte längsbelastete Doppel-Kehlnaht ohne Nahtansätze, Spannung im Flansch	100
511		Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech, K-Naht beschliffen, zweiseitige Kehlnähte, beschliffen, Kehlnaht, auch einseitig, falls dicker als Grundblech	100 100 80 71
511		Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech, K-Naht beschliffen, zweiseitige Kehlnähte, beschliffen, Kehlnaht, auch einseitig, falls dicker als Grundblech	100 100 80 71
413		Kreuzstoß oder T-Stoß, Kehlnaht oder teilweise durchgeschweißte K-Naht, kein Lamellenriss, Blechriss, Kantensatz $e < 0,15 \cdot t$, kein Kantensatz	63 71
2		Kehlnähte, teilweise durchgeschweißte Stumpfnähte	80

Längs
 Längs Nahtende
 Quer Gurt
 Quer Steg
 Schub





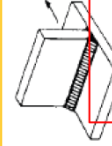
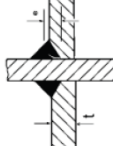
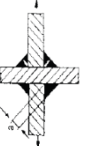

A 8

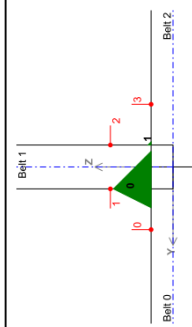
Abbildung A.12: Schweißnahtdetail T_YD_EY

Anhang

SIEMENS

FKM_Katalog.T_YS_EF_30021010

	<p>322</p>	<p>Durchlaufende automatisch geschweißte längsbelastete Doppel-Kehlnaht ohne Nahtansätze, Spannung im Flansch</p>	<p>100</p>
	<p>511</p>	<p>Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech; K- Naht beschliffen; zweiseitige Kehlnähte, beschliffen Kehlnaht, auch einseitig falls dicker als Grundblech</p>	<p>100 100 80 71</p>
	<p>511</p>	<p>Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech; K- Naht beschliffen; zweiseitige Kehlnähte, beschliffen Kehlnaht, auch einseitig falls dicker als Grundblech</p>	<p>100 100 80 71</p>
	<p>416</p>	<p>Kreuzstoß oder T-Stoß, einseitige, voll oder teilweise durchgeschweißte Y- Naht, lichtenbogen-geschweißt, Durchschweißung geprüft, kein Lamellenriss, Kantenversatz < 0,15 t. Achtung! Biegung infolge Exzentrizität e muss berücksichtigt werden. Spannung in der Nahtwurzel: $\Delta\sigma_w = \Delta\sigma_{\text{Nenn}} \cdot (1 + 6e/a)$ mit Nahtdicke a</p>	<p>71</p>
	<p>414</p>	<p>Kreuzstoß oder T-Stoß, Kehlnaht oder unvollständig durchgeschweißte K- Naht, auch beschliffene Nähte, Wurzelriss, Spannung in der Schweifnaht: $\sigma = F / \Sigma (a \cdot l)$ l ... Länge der Schweifnaht für $a/t \leq 1/3$ t ... Blechdicke</p>	<p>36 40</p>
	<p>2</p>	<p>Kehlnahte, teilweise durchgeschweißte Stumpfnahte</p>	<p>80</p>



- Längs
- Längs Nahtende
- Quer Gurt
- Quer Steg HY
- Quer Steg offene Wurzel
- Schub

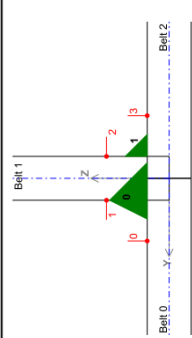
A 9

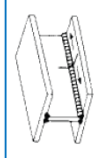
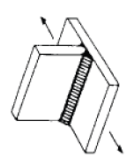
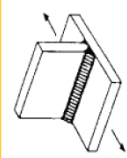
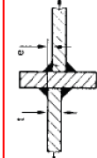
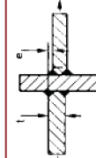
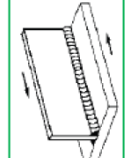
Abbildung A.13: Schweißnahtdetail T_YS_EF

Anhang

SIEMENS

FKM_Katalog.T_YB_EF_30023010



322		Durchlaufende automatisch geschweißte längsbelastete Doppel-Kehlnaht ohne Nahansätze, Spannung im Flansch	100
511		Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen; zweiseitige Kehlnähte, beschliffen; Kehlnaht, auch einseitig falls dicker als Grundblech	100 100 80 71
511		Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen; zweiseitige Kehlnähte, beschliffen; Kehlnaht, auch einseitig falls dicker als Grundblech	100 100 80 71
413		Kreuzstoß oder T-Stoß, Kehlnaht oder teilweise durchgeschweißte K-Naht, kein Lamellenriss, Blechriss, Kantenversatz $e < 0,15 \cdot t$, kein Kantenversatz	63 71
411		Kreuzstoß oder T-Stoß, K-Naht voll durchgeschweißte, Nahtübergang beschliffen, kein Lamellenriss, Blechriss, Kantenversatz $e < 0,15 \cdot t$, kein Kantenversatz	80 90
2		Kehlnähte, teilweise durchgeschweißte Stumpfnähte	80

Längs
 Längs Nahtende
 Quer Gurt
 Quer Steg Gegenlage
 Quer Steg HY
 Schub

A 10

Abbildung A.14: Schweißnahtdetail T_YB_EF

Anhang

SIEMENS

FKM_Katalog.T_YB_EY_30023020

322		Durchlaufende automatisch geschweißte längsbelastete Doppel-Kehlnaht ohne Nahtansätze, Spannung im Flansch	100
511		Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen; zweiseitige Kehlnaht, beschliffen; Kehlnaht, auch einseitig falls dicker als Grundblech	100 100 80 /1
511		Unbelastete Quersteife, nicht dicker als Grundblech; K-Naht beschliffen; zweiseitige Kehlnaht, beschliffen; Kehlnaht, auch einseitig falls dicker als Grundblech	100 100 80 /1
413		Kreuzstoß oder T-Stoß, Kehlnaht oder teilweise durchgeschweißte K-Naht, kein Lamellenriss, Blechris, Kanterversatz $e < 0,15 \cdot t$, kein Kanterversatz	63 71
411		Kreuzstoß oder T-Stoß, K-Naht voll durchgeschweißte, Nahtübergang beschliffen, kein Lamellenriss, Blechris, Kanterversatz $e < 0,15 \cdot t$, kein Kanterversatz	80 90
2		Kehlnaht, teilweise durchgeschweißte Stumpfnaht	80

Längs
Längs Nahtende
Quer Gurt
Quer Steg Gegenlage
Quer Steg HY
Schub

A 11

Abbildung A.15: Schweißnahtdetail T_YB_EY