
Analyse und Bewertung von Berechnungsvorschriften zum Ermüdungsverhalten von Schweißverbindungen

Diplomarbeit

Erstellt für

SIEMENS

Siemens AG Österreich

am Institut für Leichtbau



Technische Universität Graz

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

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

Vorgelegt von:

Uwe Oßberger

Zur Erlangung des akademischen Titels „Diplomingenieur“

Graz, Juni 2010

Deutsche Fassung:

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008

Genehmigung des Senates am 1.12.2008

Eidesstattliche Erklärung

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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

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, am 17. Juni 2010

.....

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Firma Siemens Mobility, Standort Graz Eggenberg.

Für die Betreuung der Diplomarbeit am Institut für Leichtbau möchte ich mich recht herzlich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Moser für die ausgezeichnete fachliche Unterstützung und das gute Arbeitsklima am Institut bedanken.

Weiterer Dank gebührt den Mitarbeitern der Siemens AG Österreich, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Werner Mössler und Herrn Dipl.-Ing. Bernhard Kittinger, die mir stets bei vorhandenen Problemen Klarheit vermittelten.

Der größte Dank gebührt allerdings meiner Familie, da sie mir mein Studium ermöglichten und mich in meinen Vorhaben stets unterstützt haben.

Uwe Oßberger

Kurzfassung

Durch das Inkrafttreten der DIN EN 13749 ist für die Zulassung von Rahmen für Drehgestelle eine Berechnungsmethode beim Betriebsfestigkeitsnachweis anzuwenden, die Lastannahmen aus Normen, Simulationen und Betriebsmessungen auswerten kann. Die derzeitige Auswertung nach DIN 15018 ist in Zukunft deshalb nicht mehr möglich, da Betriebsmessungen nicht als Berechnungsgrundlage verwendet werden können. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde ermittelt, welche Methoden geeignet oder ungeeignet sind, es wurde ein Drehgestellrahmen punktuell nach verschiedenen Methoden ausgewertet und ein Vergleich der Berechnungsergebnisse erstellt, um die Wahl einer zukünftigen Methode mit einer klaren Empfehlung zu erleichtern.

Abstract

Referring to the commencement of DIN EN 13749 for the approval of a bogie frame, a new calculation method for fatigue design is necessary. DIN EN 13749 claims loads out of measurements and the current calculation method (DIN 15018) for fatigue behavior is not able to refer from measurements to new load spectras. In this diploma thesis are evaluations concerning new calculation methods, including the possibility of useing the differnet methods for fatigue design and for the approval of railway vehicles. Finally there is an arrangement of the influences in the calculation, a fatigue calculation with different methods on a real bogie frame and a recommendation for a certain method.

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis.....	5
2	Aufgabenstellung und Ziele	7
3	Grundlagen der Festigkeitsberechnung von Schweißverbindungen	9
3.1	Problemstellung der Betriebsfestigkeit.....	9
3.2	Kenngößen der Betriebsfestigkeit	9
3.2.1	Dauerfestigkeitswert.....	9
3.2.2	Zeitfestigkeit.....	10
3.3	Betriebsfestigkeitsnachweis.....	10
3.4	Verbesserung der Schwingfestigkeit von Schweißkonstruktionen	11
4	Vorschriften zur Bewertung von Schweißverbindungen	13
4.1	Gültigkeitsbereich	14
4.1.1	Betrachtung der einzelnen Vorschriften	14
4.1.2	Zusammenfassung.....	17
4.2	Spannungsermittlung.....	18
4.2.1	Spannungen nach Bewertungskonzepten.....	18
4.2.2	Betrachtung der einzelnen Vorschriften	20
4.2.3	Querschnitte.....	25
4.2.4	Zusammenfassung.....	27
5	Berechnungsmethodik.....	29
5.1	DIN 15018.....	31
5.1.1	Allgemeiner Spannungsnachweis.....	31
5.1.2	Betriebsfestigkeitsnachweis.....	33
5.2	IIW - Richtlinie	35
5.3	Eurocode 3	41
5.4	BS 7608.....	44
5.5	ERRI B 12/RP 60.....	46
5.6	DS 952.....	48
5.7	DVS 1612	50
5.8	FKM Richtlinie.....	53
5.9	AWS.....	58
6	Berechnungseinflüsse	60
6.1	Wöhlerlinien.....	60
6.2	Mittelspannungen.....	61

6.3	Schweißnahtnachbehandlung.....	64
6.4	Kerbfallzuordnung.....	68
6.4.1	Kreuzstoß mit K-Naht	68
6.4.2	Stumpfstoß.....	69
6.5	Sicherheiten gegen Bauteilversagen.....	70
6.5.1	Teilsicherheitsfaktor nach IIW Richtlinie.....	71
6.5.2	Gesamtsicherheitsfaktor	72
6.5.3	Überlebenswahrscheinlichkeiten der Wöhlerlinien.....	72
6.6	Mehraxiale Ermüdung.....	74
6.6.1	Einachsige und mehrachsige Spannungen	74
6.6.2	Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit mehraxialen Spannungen	74
6.6.3	Berechnungsmethoden bei mehraxialer Beanspruchung.....	77
7	Auswertung.....	82
7.1	Bewertete Schweißnähte	83
7.2	Kerbfallzuordnung.....	87
7.3	Betriebslasten.....	89
7.4	Ergebnisse	90
8	Kerbspannungskonzept.....	98
8.1	Vorteile der Kerbspannungen	98
8.2	Bewertung durch Auswertung eines Submodells	99
8.3	Bewertung durch Auswertung eines gekoppelten 3D Modells	100
8.4	Bewertung durch vorher ermittelte Kerbfaktoren.....	101
9	Ergebnis.....	102
10	Literaturverzeichnis	104

2 Aufgabenstellung und Ziele

Das Ziel dieser Arbeit ist, eine Berechnungsmethode für den Betriebsfestigkeitsnachweis zu eruiieren, welche den Anforderungen der DIN EN 13749 genügt. Derzeit werden Drehgestelle der Firma Siemens Mobility am Standort Graz, Eggenberg nach der DIN 15018 ausgewertet. Die DIN 15018 ist aber mittlerweile ungültig und die Berechnungsmethodik hat Probleme mit Lastannahmen aus Betriebsmessungen.

Die Anforderungen der DIN EN 13749 sehen wie folgt aus:

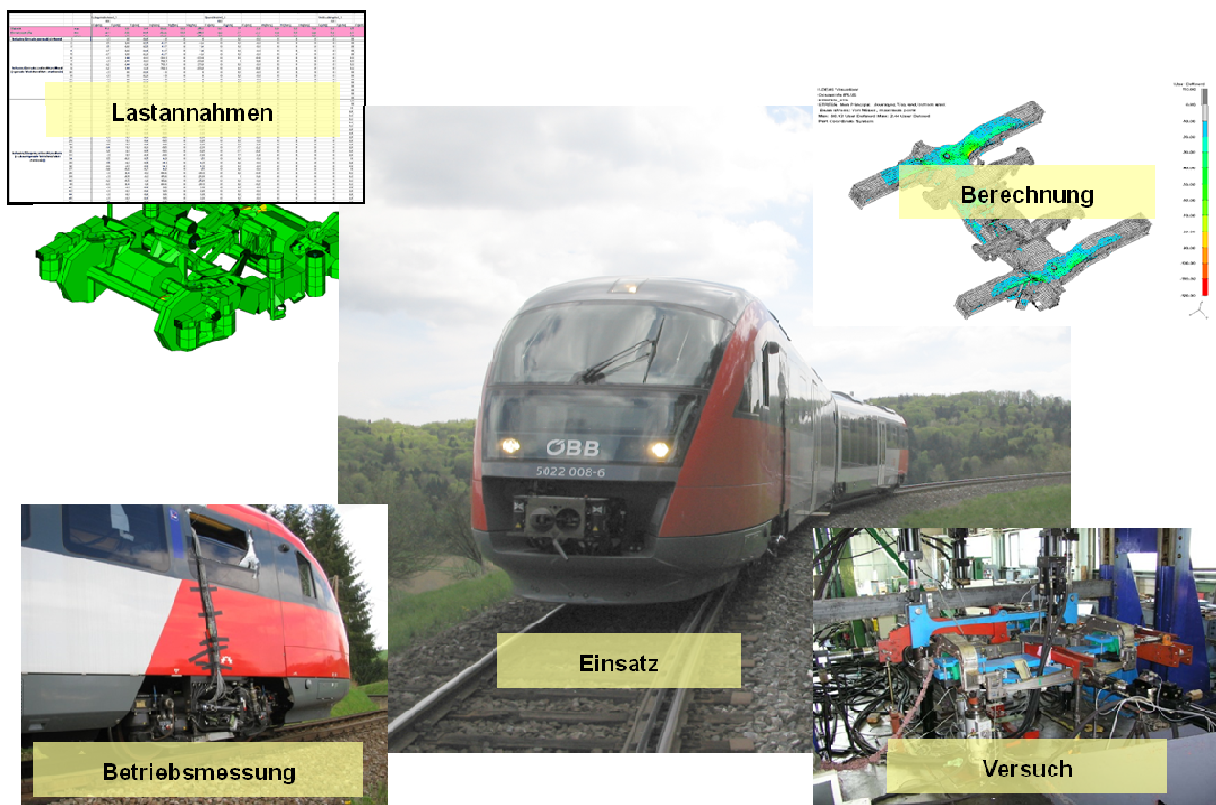


Abbildung 1: Darstellung der Anforderungen der DIN EN 13749 für die Zulassung von Drehgestellrahmen

Nach der DIN EN 13749 sind für die Simulation des Betriebsfestigkeitsverhaltens des Drehgestelltrahmens geeignete Lastannahmen zu treffen. Dafür werden die Lastannahmen nach UIC 515-4 als Beispiel angeführt. Die Berechnung durch Simulation ist durch einen Betriebsfestigkeitsversuch zu bestätigen – erst dann ist es möglich, das Drehgestell zu fertigen und eine Betriebsmessung durchzuführen. Bei der Versuchsfahrt sind die Messgrößen zu erfassen und nach diesen Ergebnissen die Lastannahmen zu korrigieren. Um diese Zulassungsmethodik gänzlich zu erfüllen, wäre es notwendig eine durchgehende Vorschrift zur Bewertung der Betriebsfestigkeit zu verwenden, welche auf Messergebnisse und auf Finite Element Berechnungen eingeht.

Im Zuge dieser Diplomarbeit werden nun verschiedenste Berechnungsvorschriften, teils direkt aus dem Schienenfahrzeugbau, jedoch auch allgemein gültige, in ihrer Methodik verglichen und eruiert, ob eine Bewertung nach dieser Vorschrift möglich ist.

Des Weiteren werden die Methoden der verschiedenen Vorschriften in ihren Ergebnissen verglichen, um einen Eindruck zu gewinnen, wie sensibel die einzelne Methode auf Spannungen, Lastwechselzahlen, Mehraxiale Ermüdung und verschiedene Kerbfälle reagiert, um die Entscheidung nach der zukünftigen Berechnungsmethode zu erleichtern.

Als Basis für die Anwendung der Berechnungsmethoden soll ein in Betrieb befindliches und bereits simuliertes Drehgestell zur Bewertung herangezogen werden.

3 Grundlagen der Festigkeitsberechnung von Schweißverbindungen

Die Berechnung geschweißter Bauteile ist traditionell durch Vorschriften und Normen geregelt für einzelne Anwendungsfälle. Deshalb entstanden in der Vergangenheit Regelwerke für den Kran-, Schienenfahrzeugs-, Schiffs- und Anlagenbau. Diese Regelwerke benutzten zur Bewertung meist Dauerfestigkeitsrechnungen auf Basis von Nennspannungen. Inzwischen wurden die Berechnungsmethoden auf Betriebsfestigkeitsrechnungen aktualisiert, wobei neben Nennspannungen auch Strukturspannungen und effektive Kerbspannungen Anwendung finden. (1 S. 198)

3.1 Problemstellung der Betriebsfestigkeit

Schwingbeanspruchte Bauteile können durch Schwingbruch oder auch schon durch Schwinganriss versagen. Das Erscheinungsbild solcher Schwingbruchschäden aus Praxis und Labor ist ebenso vielfältig wie die Ursachen und Einflüsse, die das Bauteilversagen bestimmen. Entsprechend zahlreich sind auch heute noch Schadensfälle an schwingbeanspruchten Bauteilen, die im normalen Betrieb unerwartet auftreten und nicht selten ein folgenschweres Ausmaß annehmen.

Die Problemstellung der Betriebsfestigkeit ergibt sich aus der technischen, wirtschaftlichen und haftungsrechtlichen Notwendigkeit Schwingbruchschäden durch eine geeignete Gestaltung, Bemessung, Fertigung und Qualitätssicherung zu vermeiden. (1 S. 1)

3.2 Kenngrößen der Betriebsfestigkeit

Der Zusammenhang zwischen der ertragbaren Schwingspielzahl und der Beanspruchung wird durch die Wöhlerlinie erklärt. Grundlage für die Wöhlerlinie ist der Wöhlerversuch

3.2.1 Dauerfestigkeitswert

Der Dauerfestigkeitswert ist von seiner Bezeichnung her ein Beanspruchungswert, den ein Bauteil beliebig oft erträgt. Die Existenz einer Dauerfestigkeit wird durch Wöhlerversuche bestätigt, jedoch ist die zeitaufwändige Werkstoffprüfung bei mehreren Millionen Lastwechseln zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Werkstoffen hinderlich. Folglich werden die Versuche ab einer bestimmten Lastwechselzahl abgebrochen. (2)

Forschungsaktivitäten mit den zugehörigen Versuchen im Bereich extrem hoher Schwingspielzahlen werden unter der Bezeichnung VHCF¹ und UHCF² durchgeführt. (3)

3.2.2 Zeitfestigkeit

Ist die Beanspruchungs-Häufigkeit geringer als die ertragbare Schwingspielzahl, so ist die ertragbare Spannung gegenüber der Dauerfestigkeit erhöht. In diesem Bereich spricht man von Zeitfestigkeit, da die ertragbaren Schwingspiele begrenzt sind.

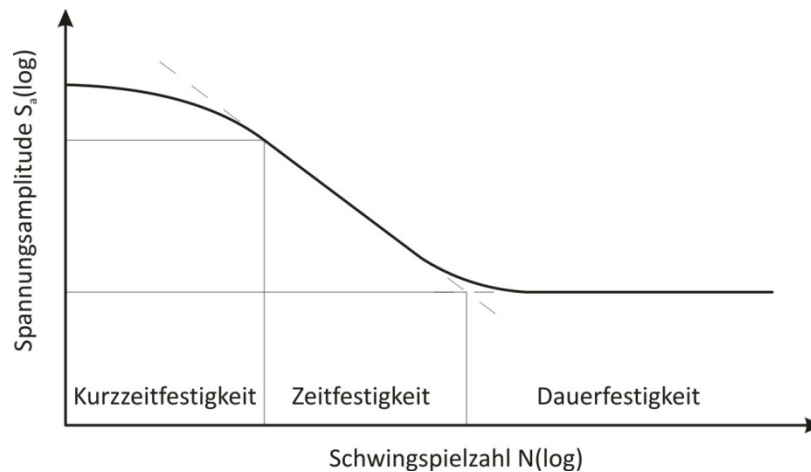


Abbildung 2: Abgrenzung der Bereiche der Dauerfestigkeit, der Zeitfestigkeit und der Kurzzeitfestigkeit

3.3 Betriebsfestigkeitsnachweis

Um das Konzept der Betriebsfestigkeit praktisch umzusetzen bieten sich zwei Wege an:

- Der experimentelle Betriebsfestigkeitsnachweis
- Der rechnerische Betriebsfestigkeitsnachweis

Für den experimentellen Betriebsfestigkeitsnachweis ist ein Prüfstandsversuch mit Reißprüfung notwendig. Für die Zulassung von kritischen Bauteilen ist der Prüfstandsversuch unabdingbar, jedoch auch zeitaufwendig und teuer. Deshalb kann man durch Simulation von Bauteilen und einem darauffolgendem rechnerischen Betriebsfestigkeitsnachweis Zeit und Kosten sparen.

¹ Very High Cycle Fatigue

² Ultra High Cycle Fatigue

3.4 Verbesserung der Schwingfestigkeit von Schweißkonstruktionen

Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass Nachbehandlungsverfahren sich zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit sowohl vorgeschädigter, als auch bisher unbelasteter Schweißnahtdetails eignen. Die Wirksamkeit der einzelnen Verfahren zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen wird bereits seit ca. 20 Jahren in einer Vielzahl von Arbeiten untersucht. Als sehr wirkungsvoll erwiesen sich dabei sowohl Maßnahmen, die auf eine Verringerung der herstellungsbedingten Kerbwirkung von Schweißnahtübergängen abzielen, als auch mechanische Oberflächenbehandlungen zur Erzeugung von Druckeigenspannungen. Die besten Resultate entstehen, wenn kerbverringemde Maßnahmen mit verfestigenden Maßnahmen kombiniert werden, und dies umso mehr, je höher die Werkstofffestigkeit und die Herstellungsgüte der Schweißverbindungen sind. Eine Analyse der Daten aus Wöhlerversuchen hat gezeigt, dass die Wöhlerlinien nachbehandelter Schweißnähte eine wesentlich flachere Neigung aufweisen als jene von unbehandelten, und demzufolge eine Schweißnahtnachbehandlung für schwingbeanspruchte Bauteile mit hohen Lastwechselzahlen einen großen Nutzen bringen kann. (4)

Die verschiedenen Techniken zur Schweißnahtnachbehandlung werden in Tabelle 1 über die Wirkungsweise der Schwingfestigkeitssteigerung dargestellt.

	Techniken
Verbesserung der Kerbgeometrie am Nahtübergang	<ul style="list-style-type: none"> • Spanabhebende Bearbeitung • Schleifen • TIG- dressing³ • Plasma- dressing • Laser- dressing⁴
Verbesserung der Eigenspannungen in der Kerbe	<ul style="list-style-type: none"> • Hämmern • Ultraschallhämmern • Nageln • Kugelstrahlen⁵ • Plastifizieren des Kerbgrundes durch Überlast • Glühen
Verbesserungen der Umgebungsbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Lackieren • Beschichten

Tabelle 1: Möglichkeiten der Schwingfestigkeitssteigerung (5)

³ Beim TIG- dressing (**tungsten inert gas**) wird der Nahtübergang ohne Drahtzusatz wiederaufgeschmolzen und ausgerundet was folglich die Kerbschärfe verringert.

⁴ Beim Plasma- und Laser- dressing wird zum Aufschmelzen des Nahtübergangs die gleichnamige Technik verwendet. Da die Wärmezufuhr wesentlich höher als beim TIG- dressing ist (ca. Faktor 2) ermöglichen diese beiden Techniken eine weitere Steigerung der Schwingfestigkeit gegenüber dem TIG- dressing. (15)

⁵ Das Kugelstrahlen basiert, gleich wie das Hämmern und Nageln auf dem Prinzip der Einbringung von Druckeigenspannungen und Kaltverfestigung in der Oberflächenschicht des Werkstücks. Beim Aufprall des Strahlmittels (Kugeln aus Stahlguss, Edelstahl, Glas oder Keramik) lassen sich diese Veränderungen im Werkstück 0,2 bis 0,5 mm tief verwirklichen. Das Verfahren kann gesteuert werden durch verschiedene Strahlmittel und die Intensität ihrer Aufbringung.

4 Vorschriften zur Bewertung von Schweißverbindungen

Folgende Vorschriften bzw. Normen wurden zum Vergleich ihrer Methoden herangezogen. Die Auswahl jener erfolgte in gemeinsamer Diskussion.

- DIN 15018, Krane – Grundsätze für Stahltragwerke – Berechnung (6)
- IIW XIII, Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile (5)
- DIN EN 1993-1-9, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten (7)
- BS 7608:1993, British Standard – Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures (8)
- ERRI B 12/RP 60, Versuche zum Festigkeitsnachweis an Schienenfahrzeugen (9)
- DS 952, Schweißen an Schienenfahrzeugen und maschinentechnischen Anlagen (10)
- DVS 1612, Gestaltung und Dauerfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen an Stählen im Schienenfahrzeugbau (11)
- FKM, Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen (12)
- AWS D1.1/D1.1M, Structural Welding Code – Steel, American Welding Society (13)

4.1 Gültigkeitsbereich

4.1.1 Betrachtung der einzelnen Vorschriften

Die Normen bzw. Vorschriften unterscheiden sich hinsichtlich Ihres Gültigkeitsbereiches und deshalb auch in ihrer Anwendbarkeit für Schienenfahrzeuge.

Die Anwendbarkeit auf Schienenfahrzeuge ist gegeben, wenn einerseits deren Anwendung nicht ausgeschlossen wird und andererseits wenn Werkstoff, Schweißnahtdetails und Belastungen von den Vorschriften abgedeckt werden.

4.1.1.1 DIN 15018

Die Norm ist für Stahltragwerke von Kranen und Kranausrüstungen aller Art anzuwenden und kann auch für fahrbare Stahltragwerke mit Stetigförderern angewendet werden. Sie ist nicht anzuwenden für Kranbahnen, Bagger, Drahtseilbahnen, Wagenkipper und Bergwerksmaschinen. Eine weitere Einschränkung gibt es hinsichtlich der verwendbaren Werkstoffe. Andere Werkstoffe als St 37 Baustahl, St 35 Rohrstuhl und St 52-3 Baustahl werden nur toleriert, wenn die chemischen und mechanischen Eigenschaften und die Schweißbeignung gewährleistet werden kann.

Die Anwendung der DIN 15018 für die Auslegung von Schienenfahrzeugen wird in der Norm nicht erwähnt. Der Grund dafür liegt in dem zugehörigen Lastannahmenteil, 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.

4.1.1.2 IIW Richtlinie

Die Empfehlungen beschreiben Methoden zur Bewertung der Schwingfestigkeit geschweißter Bauteile. Die Ermüdungsschäden bestehen in den Grenzzuständen eines Tragwerks, wie in dem Verlust der Tragfähigkeit oder der Gebrauchsfähigkeit.

Die Schwingfestigkeitsbewertung ist gültig für geschweißte Bauteile, die aus gewalzten oder extrudierten Produkten hergestellt wurden, mit den Ausnahmen Kurzzeitermüdung, Ermüdung in korrosiver Umgebung und im Bereich hoher Temperaturen, wo ein Kriechen erwartet wird.

Vergütete Baustähle werden nur bis zu einer Streckgrenze von 700 MPa berücksichtigt

4.1.1.3 DIN EN 1993-1-9 Eurocode 3

Der Eurocode 3 enthält Nachweisverfahren zur Prüfung der Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen, Verbindungen und Anschlüssen, die unter Ermüdungsbeanspruchung stehen. Die Nachweisverfahren basieren auf Ergebnissen von Ermüdungsversuchen mit bauteilähnlichen Prüfkörpern mit geometrischen und strukturellen Imperfektionen, die von der Stahlproduktion und Bauteilherstellung herrühren (z.B. Herstellungstoleranzen und Eigenspannungen infolge Schweißens). Die Regelung gilt für Bauteile, die nach EN 1090 ausgeführt wurden. Die Nachweisverfahren gelten in gleicher Weise für Baustähle, nicht rostende Stähle und geschützte wetterfeste Stähle, soweit in den Kerbfalltabellen keine anderen Angaben gemacht werden. Die Norm gilt nur für Werkstoffe, die den Zähigkeitsanforderungen nach EN 1993-1-10 genügen.

Die angegebenen Ermüdungsfestigkeitswerte gelten für Konstruktionen unter normalen atmosphärischen Bedingungen und ausreichendem Korrosionsschutz. Korrosionserscheinungen infolge Seewassers werden nicht behandelt. Zeitschäden aus hohen Temperaturen ($> 150^{\circ}\text{C}$) werden ebenfalls nicht behandelt.

4.1.1.4 BS 7608:1993 „British Standard“

Der British Standard gibt eine Methode zur Bewertung von Stahltragwerken unter alternierenden Lasten an. Er ist nicht anzuwenden für Drahtseile, geklebte Verbindungen, Stahlbeton, Druckbehälter und Gussstücken.

Der „British Standard“ ist nicht gültig für Stähle mit einer Streckgrenze größer gleich 700 MPa und bedient sich nicht der Bruchmechanik zur Berechnung der Restlebensdauer eines angerissenen Bauteils.

Die Berechnung schließt das Grundmaterial, die Schweißnaht, geschraubte oder genietete Verbindungen und Schubverbindungen im Stahlbetonbau (Verbund) ein.

4.1.1.5 ERRI B 12/RP60

Die Vorschriften dieses Dokumentes sind verbindlich für die Durchführung der Versuche an Fahrzeugkästen und Drehgestellrahmen, die in den entsprechenden UIC Merkblättern vorgesehen sind.

Ihre Berücksichtigung bei der Entwicklung und Bemessung der Fahrzeuge wird empfohlen.

4.1.1.6 DS 952 02

Die DS 952 02 ist verbindlich einzuhalten für Schienenfahrzeuge und Schienenfahrzeugteile der DB, drucklosen Behältern (Transportbehälter, Container), Dampfkesseln, Druckbehältern und maschinentechnischen Anlagen und Geräten im Eisenbahnbetrieb.

4.1.1.7 DVS 1612

Diese Richtlinie gilt für die Gestaltung und Auslegung auf Dauerfestigkeit von Lichtbogen- Schweißverbindungen an Stählen im Schienenfahrzeugbau nach der Normenreihe DIN 6700. Sie ist für Schweißkonstruktionen mit Blechdicken >2 mm anzuwenden.

4.1.1.8 FKM Richtlinie

Diese Richtlinie gilt für den Maschinenbau und für verwandte Bereiche der Industrie. Für mechanisch beanspruchte Bauteile ermöglicht sie einen rechnerischen Nachweis der statischen Festigkeit und der Ermüdungsfestigkeit, letzteren je nach Beanspruchungscharakteristik als Dauer-, Zeit- oder als Betriebsfestigkeitsnachweis.

Die Richtlinie gilt für Bauteile aus Eisen- und Aluminiumwerkstoff – auch bei höherer Temperatur, die mit oder ohne spanabhebende Bearbeitung oder auch durch Schweißen hergestellt werden.

4.1.1.9 AWS D1.1/D1.1M

Diese Richtlinie beinhaltet die Voraussetzungen für die Herstellung von Stahl- Schweißkonstruktionen nach US- Amerikanischem Standard. Ausgeschlossen von der Berechnung sind Stähle mit einer Zugfestigkeit von mehr als 690 MPa, Blechstärken kleiner 3 mm, Druckbehälter, Druckrohrleitungen und alle hochlegierten Stähle (Edelstahl).

4.1.2 Zusammenfassung

	Gilt für Schienenfahrzeuge	Speziell für Bahnanwendungen	Allgemeine Norm mit Gültigkeit in vielen Bereichen
DIN 15018			
IIW			
Eurocode 3			
BS 7608			
ERRI B12/RP60			
DS 952 02			
DVS 1612			
FKM			
AWS			

4.2 Spannungsermittlung

4.2.1 Spannungen nach Bewertungskonzepten

Im Allgemeinen ist die Spannungsverteilung über die Blechdicke in der Nähe von geometrischen Kerben nicht linear. Die Spannungen lassen sich wie folgt aufteilen:

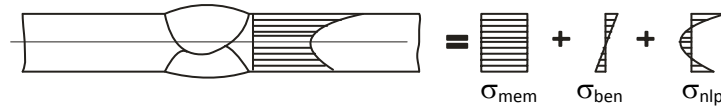


Abbildung 3: Spannungsanteile bei einem nichtlinearen Spannungsverlauf

Die Spannungsanteile der Kerbspannung sind die Membranspannung σ_{mem} , die Schalenbiegespannung σ_{ben} und die nichtlineare Spannungsspitze σ_{nlp} .

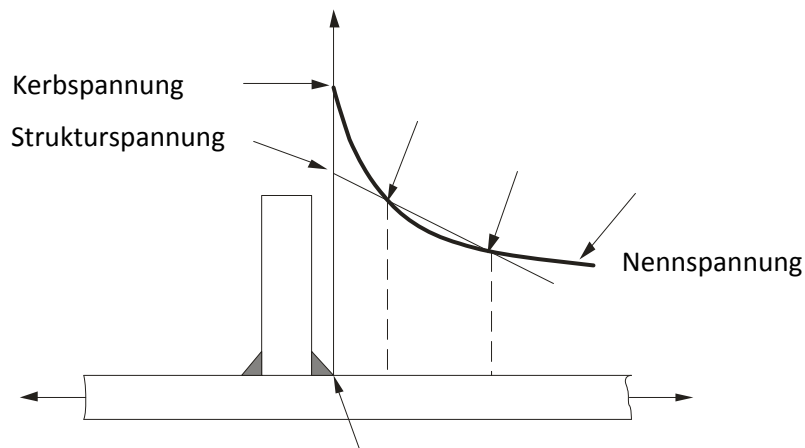


Abbildung 4: Nennspannung, Strukturspannung und Kerbspannung

4.2.1.1 Nennspannung

Die Nennspannung ist die errechnete Spannung im betrachteten Querschnitt, wobei örtliche spannungserhöhende Effekte der Schweißverbindung nicht berücksichtigt werden. Elastisches Verhalten wird angenommen. Sie enthält keine Spannungskonzentration des konstruktiven Details (Makrokerben), deshalb ist bei einer Messung der Nennspannung, der DMS außerhalb des Feldes der erhöhten Spannungskonzentration anzubringen.

Im einfachen Bauteil kann die Nennspannung mit elementaren Theorien der linear elastischen technischen Mechanik bestimmt werden. In anderen Fällen kann die Finite- Element- Methode benutzt werden. (5)

4.2.1.2 Strukturspannung

Die Strukturspannung enthält alle spannungserhöhenden Effekte des konstruktiven Details, jedoch nicht die Spannungskonzentration aus der Schweißnaht selbst. Auf diese Weise wird die nichtlineare Spannungsspitze, die durch die örtliche Kerbe verursacht wurde, z.B. durch den Schweißnahtübergang, von der globalen Strukturspannung ausgeschlossen. Die Strukturspannung ist abhängig von den globalen Dimensions- und Belastungsparametern des Bauteils in der Nähe der Schweißnaht. Sie wird am Bauteil an der Oberfläche an dem Punkt der bewertet werden soll, bestimmt.

Die Strukturspannung ist üblicherweise höher als die Nennspannung, weil spannungserhöhende Effekte aus der konstruktiven Kerbe der Schweißverbindung eingeschlossen sind.

Die Berechnung der Strukturspannung ist im Allgemeinen nicht durch analytische Methoden auszuführen. Parametrische Formeln sind selten verfügbar. Aus diesem Grund wird mehrheitlich eine Analyse mit Finiten Elementen (FEM) angewandt. Kantenversatz kann und sollte in einer solchen Berechnung mit berücksichtigt werden. (5)

4.2.1.3 Effektive Kerbspannung

Die effektive Kerbspannung ist die gesamte Spannung im Kerbgrund, wobei linear- elastisches Materialverhalten angenommen wird. Um die statistische Natur und die damit verbundene Streuung der Abmessungen der Schweißnaht und das nichtlineare Materialverhalten im Kerbgrund zu erfassen, wird die reale Form der Kerbe durch eine effektive ersetzt. Bei Baustählen wurde nachgewiesen, dass ein effektiver Kerbradius von $r = 1\text{mm}$ konsistente Ergebnisse ergibt. Zur Schwingfestigkeitsbewertung wird die effektive Kerbspannung mit einer allgemeinen Wöhlerlinie des Ermüdungswiderstandes verglichen.

Die Berechnung der effektiven Kerbspannung oder der Kerbfaktoren kann entweder aus parametrischen Formeln, aus vorweg aufgestellten Diagrammen oder aus Finit- Element oder Randelement Berechnungen erfolgen. Der effektive Kerbradius wird so eingeführt, dass die Spitze des Radius den Kerbgrund der wirklichen Kerbe berührt. (5)

4.2.2 Betrachtung der einzelnen Vorschriften

4.2.2.1 DIN 15018

Die Berechnungen müssen den anerkannten Regeln der Statik, Dynamik und Festigkeitslehre entsprechen. Werden zusätzliche Versuche zur Ermittlung von Spannungen im Rahmen der Lastannahmen durchgeführt, dann können die Versuchsergebnisse unter Einhaltung gleicher Sicherheit der Berechnung zugrunde gelegt werden.

Die Spannungen sind für die einzelnen Lastfälle mit den Querschnittswerten für Bauteile und Schweißverbindungen aus der Norm DIN 18800 (Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) zu ermitteln.

Relevant für die Berechnung sind die Spannungen σ_x , σ_y , und τ .

4.2.2.2 IIW XIII

Die IIW Richtlinie bezieht sich in der Spannungsermittlung auf Nennspannungen, Strukturspannungen und Kerbspannungen. Dabei wird auf die Spannungsermittlung durch DMS Messung oder Finite Element Berechnungen eingegangen.

Die Nennspannung kann im einfachen Bauteil mit den elementaren Methoden der linear elastischen technischen Mechanik bestimmt werden. Bei komplizierten, statisch überbestimmten Strukturen ist auch der Einsatz der Finiten Elemente Methode vorgesehen (modifizierte, lokale Nennspannung; grobes Model ohne spannungserhöhende Geometrie). Bei der Messung muss der DMS außerhalb der Spannungskonzentration des Details angebracht werden.

Die Berechnung der Strukturspannung erfolgt mehrheitlich nach der Finiten Element Methode bei der die maximale Hauptspannung zu ermitteln ist. Das Netz der finiten Elemente muss an den kritischen Stellen fein genug sein, damit Spannungen und Spannungsgradienten zu den kritischen Stellen extrapoliert werden können. Bei der Messung der Strukturspannung müssten mehrere DMS an klar definierten Stellen platziert werden, aus deren Ergebnissen die Spannung im „Hot Spot“ extrapoliert werden kann.

Die Berechnung der effektiven Kerbspannung erfolgt durch die Finite Element Methode. Der effektive Kerbradius ist dabei eine Idealisierung und kann nicht direkt am Bauteil gemessen werden.

In den meisten Fällen werden die konstruktiven Details auf Basis der Schwingbreite der maximalen Hauptspannung im gefährdeten Querschnitt bewertet. Es wird jedoch auch eine Regelung zur Bewertung der Details unter Schubbeanspruchung gegeben, welche auf der maximalen Schwingbreite der

Schubspannung beruht. Es gibt keine Information über den kritischen Querschnitt, allerdings ist er in den Kerbfalltafeln zusammen mit dem möglichen Anriss angedeutet ist.

4.2.2.3 DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3

Nennspannungen sind in der Regel an der Stelle der potentiellen Rissentstehung zu bestimmen. Abweichungen von den tabellarisch dokumentierten Konstruktionsdetails werden durch zusätzliche Spannungskonzentrationsfaktoren berücksichtigt (z. B. bei abrupten Querschnittsänderungen). Man spricht dann von korrigierten Nennspannungen.

Die maßgebenden Spannungen im Grundwerkstoff sind die Längsspannungen σ und die Schubspannungen τ ; in der Schweißnaht sind die Längsspannung σ_{wf} quer zur Nahtachse und die Schubspannung τ_{wf} längs zur Nahtachse maßgebend. Für beide Spannungen sind in der Regel getrennte Nachweise zu erbringen.

Die Methode der „Strukturspannung (Kerbspannung)“ im Eurocode 3 ist eigentlich eine reine Strukturspannungsmethode, wobei durch Eingabe der Strukturspannungen für ein konstruktives Detail die Spannungskonzentration in der Kerbe mit einem Kerbfaktor berechnet werden kann. Rückwärts gerechnet ergibt dieses Verfahren einen Kerbfall für die Strukturspannungsmethode.

In Hinblick auf verschiedene Belastungsarten wie Zug/Druck und Biegung kann man jedoch auf keine Kerbspannungen aus Strukturspannungen, wie sie hier angewendet werden, schließen. Dementsprechend sind hier Unsicherheiten vorhanden.

4.2.2.4 BS 7608:1993 „British Standard“

Um das Ermüdungsverhalten von geschweißten Strukturen zu erklären ist im British Standard nur die Betrachtung der Spannungsschwingbreite notwendig. Mittelspannungen werden vernachlässigt.

In der Berechnung wird unterschieden, ob der Anriss im Grundmaterial (im Bereich hoher Spannungskonzentration), oder in der Schweißnaht stattfindet.

Im Grundmaterial wird die Hauptnormalspannung als Bewertungsgröße verwendet. Wenn sich die Hauptnormalspannungsrichtung im Verlauf eines Lastzyklus nicht signifikant verändert, so ist die maximale Spannungsschwingbreite aller 3 Hauptnormalspannungen zu bewerten (Im Normalfall ist die HNS in Bauteildickenrichtung irrelevant). Wenn die Hauptnormalspannungsrichtung während des Lastzyklus rotiert, sind die Spannungsmaxima und Spannungsminima jener Hauptnormalspannung zu bewerten, die in ihrer Richtung maximal 45° abweicht.

Die relevante Hauptnormalspannung lässt sich ermitteln wenn a oder b erfüllt ist.

- a) $\sigma_x - \sigma_y$ ist mindestens doppelt so groß wie die zugehörige Schubspannung bei Maximal- und Minimalspannung.
- b) Die Vorzeichen von $\sigma_x - \sigma_y$ und τ sind entgegengesetzt oder gleich in beiden Fällen (Maximal- und Minimalspannung)

Im Fall a oder b, wobei σ_x numerisch größer als σ_y (Maximal und Minimalwert) ist die benötigte Spannungsschwingbreite gleich der Differenz von der numerisch größeren Maximalspannung zur numerisch größten Minimalspannung.

Bei Kehlnähten, wo sich der kritische Querschnitt im Schweißgut befindet wird davon ausgegangen dass hier auch der Anriss stattfindet. Die relevante Spannungsschwingbreite ist die maximale Schwingbreite der Schubspannungen in der Schweißnaht. Dies sollte für jeden Lastzyklus die algebraische- oder Vektordifferenz zwischen der größten und kleinsten Vektorsumme der Schubspannung, basierend auf den effektiven Abmessungen der Schweißnaht, sein.

Die Spannungsermittlung erfolgt durch Anwendung der Elastizitätstheorie. Die Effekte der Eigenspannungen, Bolzen, Nieten und kleinen gebohrten Löchern müssen in der Spannungsberechnung nicht berücksichtigt werden. Spannungskonzentrationen aufgrund von Anbindungen, exzentrische Schweißverbindungen, Spannungsverteilung in großen Platten und Herstellungstoleranzen bedürfen jedoch einer Betrachtung in der Spannungsermittlung.

Die Spannungsermittlung nimmt keinen Bezug auf die Anwendung der Finiten Elemente Methode oder auf die Messung mit DMS.

4.2.2.5 ERRI B12/RP 60

Als Grundlage der festzulegenden Grenzwerte beim Ermüdungsnachweis dienen das Nennspannungskonzept und das örtliche Spannungskonzept. Das örtliche Spannungskonzept entspricht jedoch nicht einem Kerbgrundkonzept, da es auf klar definierte Stellen vor der Kerbe für die DMS Applikation verweist. (Direkt in der Kerbe ist keine Messung möglich).

Lokale Spannungen sind die tatsächlich an einem definierten Ort auftretenden Spannungen. Die Messung erfolgt entweder in der Nähe der Kerbe, oder wird durch mehrere DMS zu der kritischen Stelle („Hot Spot“) hin extrapoliert.

Für die experimentelle Ausführung des Festigkeitsnachweises an Schienenfahrzeugen wird empfohlen die DMS in unmittelbarer Nähe der Kerbstellen anzubringen. Die gegebenen Daten zur Bewertung der Ermüdungsfestigkeit des Bauteiles beziehen sich genau auf die Spannungswerte eines DMS an einer klar definierten Stelle.

Für die Messung der Spannungen wird folgende Vorgehensweise bestimmt:

- Bestimmung der Hauptspannungen und Hauptspannungsrichtungen für alle Belastungsfälle
- Es wird derjenige Belastungsfall gesucht, der die größte Hauptzugspannung aufweist, ebenso die zugehörige Richtung. Die größte Hauptzugspannung ist nun σ_{\max}
- Die Normalkomponente der Spannung, die auf ein Werkstoffelement mit der vorhin ermittelten Richtung ausgeübt wird, wird für alle übrigen Lastfälle berechnet. Die kleinste Normalspannung ist nun σ_{\min} .
- Berechnung der Spannungsschwingbreite und Mittelspannung nach klassischer Definition.

4.2.2.6 DS 952 02

Die Berechnungen für geschweißte Fahrzeugkonstruktionen sind nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik durchzuführen. Als Grundlage können die in einschlägigen Normen festgelegten Berechnungsformeln dienen. Dabei muss bei dynamisch beanspruchten Bauteilen nachgewiesen werden, dass die Vergleichsspannung gleich oder kleiner als σ_{zul} ist.

Bei den Festigkeitsberechnungen sind die größten Spannungen im Grundwerkstoff und in den Schweißnähten σ_{\max} und τ_{\max} zu ermitteln. Die zulässige Spannung ist bei allen Werkstoffen so festzulegen, dass ein Sicherheitsbeiwert von 1,5 gegenüber der Dauerschwingfestigkeit des Werkstoffes eingehalten wird, wobei jedoch Spannungen mit einem Sicherheitsbeiwert von 1,5 gegenüber der statischen Streckgrenze nicht überschritten werden dürfen.

4.2.2.7 DVS 1612

Der Nachweis der Dauerfestigkeit erfolgt hier mit Nennspannungen. Die durch die Bau- und Schweißnahtform verursachte Spannungserhöhung wird mit kerbfallabhängigen Dauerfestigkeitswerten berücksichtigt. Nennspannungen ergeben sich aus den Schnittgrößen bezogen auf den Verbindungsquerschnitt, der an der höchstbeanspruchten Stelle, bzw. an der Anrissstelle liegt. Bei der Spannungsermittlung mit der Finiten Elemente Methode (FEM) oder durch Messung mit DMS haben die maßgebenden Nennspannungen in der Regel einen bestimmten Abstand zu der Schweißnaht, der bei FE- Berechnungen auch von der vorgenommenen Modellierung abhängt. Ein Richtwert für den Abstand zum Nahtübergang ist 1 bis 1,5 fache Blechdicke.

Beim Dauerfestigkeitsnachweis sind Normalspannungen längs und quer zur Nahtichtung, sowie Schubspannungen längs zur Nahtichtung zu betrachten (Analogie zu DIN 15018)

4.2.2.8 FKM Richtlinie

Bei flächenförmig geschweißten Bauteilen sind die Nennspannungen für den Schweißnahtquerschnitt und für den Schweißnahtübergangsquerschnitt im Allgemeinen getrennt zu bestimmen.

Für die Berechnung nach Nennspannungen gilt die Spannung S_x , für die Berechnung nach Strukturspannungen die unmittelbar vor der Schweißnaht auftretende maximale Spannung $\sigma_{x,max}$ und für die Berechnung mit effektiven Kerbspannungen die in der Schweißnaht auftretende maximale Spannung $\sigma_{Kx,max}$. Für den statischen Festigkeitsnachweis können keine bisher keine effektiven Kerbspannungen verwendet werden.

Bei flächenförmigen geschweißten Bauteilen gelten die Bezeichnungen σ_x , σ_y , und τ für die Strukturspannung und σ_K und τ_K für die effektiven Kerbspannungen.

Für den Umgang mit FE Ergebnissen und DMS Messungen gibt es keinen gesonderten Hinweis.

Für den Schweißnahtübergangsquerschnitt sind die Nennspannungen wie für nichtgeschweißte Bauteile zu berechnen (Also σ_x , σ_y , und τ). Für den Schweißnahtquerschnitt ist je nach Lastart aus den Normallasten eine Vergleichsnennspannung $S_{wv,x}$ zu berechnen ($S_{wv,y}$ und T_{wv} analog)

4.2.2.9 AWS


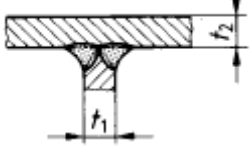
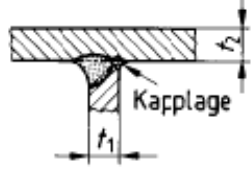
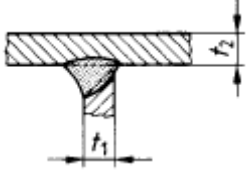
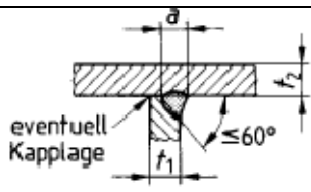
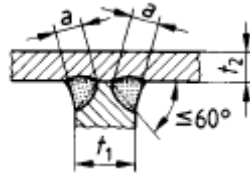
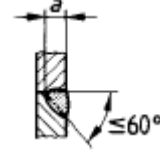
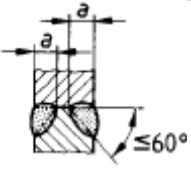
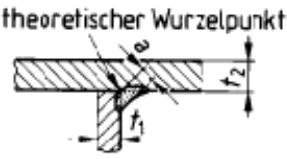
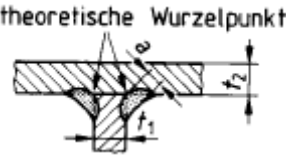
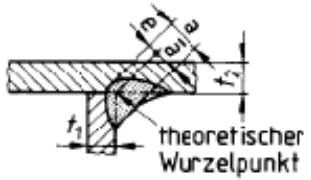
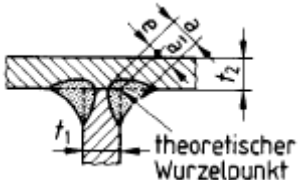
Die berechneten Spannungen sollen Nennspannungen sein, die durch anerkannte Berechnungsmethoden ermittelt werden. Sie sollen auch den spannungswirksamen Effekt der Exzentrizität berücksichtigen und in Kehlnähten die Schubbeanspruchung betrachten.

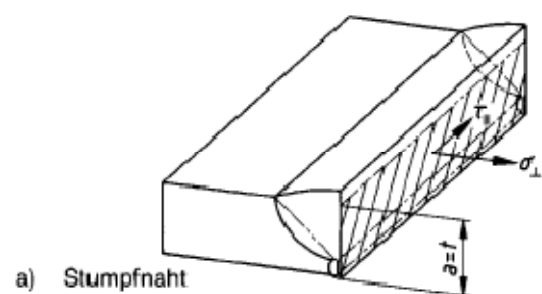
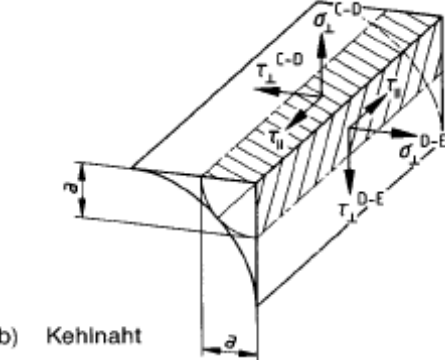
Die berechneten Spannungen und Spannungsschwingbreiten basieren auf einer elastischen Berechnung. Sie benötigen keine Modifikation durch Spannungskonzentrationsfaktoren zur Berücksichtigung lokaler Geometrieunterschiede.

Zur Berechnung der Ermüdungsfestigkeit sind die Spannungen in x und y Richtung relevant. Für Kehlnähte ist die relevante Spannung die Schubspannung.

4.2.3 Querschnitte

Die DIN 18800 gibt die rechnerischen Schweißnahtdicken tabellarisch an. Die rechnerische Schweißnahtdicke wird mit a abgekürzt. (14)

Durch- oder gegengeschweißte Nähte			
			$a = t_1$
			
Nicht durchgeschweißte Nähte			
			Die Nahtdicke a ist gleich dem Abstand vom theoretischen Wurzelpunkt zur Nahtoberfläche
			
Kehlnähte			
			$a =$ die Höhe vom theoretischen Wurzelpunkt des einschreibbaren gleichschenkligen Dreiecks
Kehlnähte mit tiefem Einbrand			
			$a = \tilde{a} + e$

Schweißnahtspannungen in Stumpfnähten	Schweißnahtspannungen in Kehlnähten
 <p>a) Stumpfnah</p>	 <p>b) Kehlnah</p>

4.2.4 Zusammenfassung

	Nennspannungen	Strukturspannungen	Effektive Kerbspannungen	Bruchmechanik	Spannungen aus DMS	Spannungen aus FE	Position der Spannungsermittlung	Anmerkung
DIN 15018	σ_x, σ_y, τ						Im kritischen Querschnitt	
IIW	σ_x, τ oder σ_{11}	σ_x, τ oder σ_{11}	σ_x, τ oder σ_{11}				Dokumentiert für FE, DMS und Nennspannungen	
Eurocode 3 ⁶	σ_{wf}, τ_{wf} σ, τ	σ_{11}					An der Position des möglichen Anrisses	Strukturspannungen werden mit Kerbspannungen gleichgesetzt
BS 7608	σ_{11}, σ_{22} τ						An der Position des möglichen Anrisses	
ERRI B12/RP60	$\sigma_{11},$ $\sigma_{2'2'}$						Abstand 30% der Blechdicke zum Nahtübergang (max. 3 mm)	Besonderes Konzept der Spannungsermittlung
DS 952 02	σ_v, τ_v						Im kritischen Querschnitt	
DVS 1612 ⁷	$\sigma_{ }, \sigma_{\perp},$ τ						Abstand zum Nahtübergang ca. 1 - 1,5 fache Blechstärke	
FKM ⁸	σ_x, σ_y, τ	$\sigma_x, \sigma_y,$ τ	σ_k, τ_k				An der Position des möglichen Anrisses	
AWS	σ_x, σ_y oder τ						An der Position des möglichen Anrisses	

Ziel ist es, die Eingabespannungen für die verschiedenen Berechnungsvorschriften mit den berechneten Spannungen einer FE Berechnung kombinierbar zu machen.

⁶ Für den Schweißnahtquerschnitt und für den Schweißnahtübergangquerschnitt sind die Berechnungen im Allgemeinen getrennt durchzuführen.

⁷ Bewertung erfolgt erst einzeln und dann für mehrachsige zusammengesetzte Spannungen

⁸ Für den Schweißnahtquerschnitt und für den Schweißnahtübergangquerschnitt sind die Berechnungen im Allgemeinen getrennt durchzuführen.

Die Spannungen wurden aus dem globalen Strukturmodell für die verschiedenen Grundlastfälle ermittelt. Durch Auslesen des Spannungstensors

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Formel 1: Allgemeiner Spannungstensor für den ebenen Spannungszustand

ist der Spannungszustand eindeutig definiert. Alle Spannungsarten, sowie Hauptachsenrichtungen lassen sich aus dem Spannungstensor ableiten. Ein ebener Spannungszustand ist für dünnwandige Bauteile (hier gilt $d \ll l, b$) zulässig. Die verwendeten Blechdicken bei dem untersuchten Eisenbahn-Drehgestell lassen diese Annahme zu. Die Spannungen sind bezogen auf die Blechdicke. Bei Schweißnähten mit spezieller kritischer Querschnittsfläche (also nicht der Blechdicke; zB bei Kehlnähten) wurden die Dicken der Schalenelemente im Finite- Element Modell soweit angepasst, dass die berechneten Spannungen zur Bewertung herangezogen werden können.

Für die Betriebsfestigkeitsrechnung können zusammengefasst, je nach Methode, verschiedene Spannungsarten relevant sein.

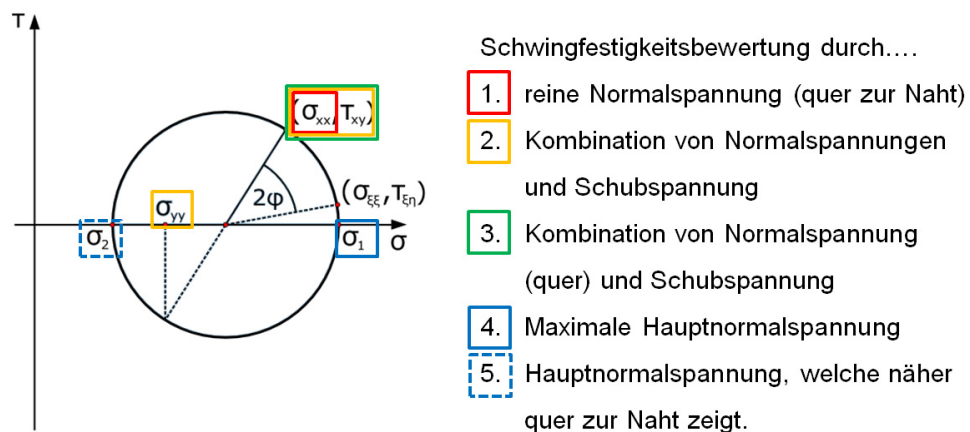


Abbildung 5: Darstellung der berechnungsrelevanten Spannungen im Mohr'schen Spannungskreis

Abbildung 5 zeigt die unterschiedlichen, berechnungsrelevanten Spannungen auf. In manchen Berechnungsvorschriften ist zusätzlich der Winkel der Hauptnormalspannungsrichtung zur x- Richtung für die Berechnung erforderlich.

5 Berechnungsmethodik

Die betrachteten Vorschriften enthalten jeweils eine eigene Berechnungsmethodik zum Ermüdungsnachweis. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob eine Schädigungsrechnung, oder eine Dauerfestigkeitsberechnung hinter der Methodik steckt. Dauerfestigkeitsmethoden sind von ihrer Anwendbarkeit eingeschränkt, da sie sich direkt auf spezielle Lastfälle beziehen.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten ein Stufenkollektiv zu bewerten:

- Durchführung einer linearen Schadensakkumulationsrechnung, d.h. Berechnung der Teilschädigungen pro Laststufe und eine darauffolgende Schadensakkumulation. Der Nachweis wäre erbracht, wenn eine Schädigung kleiner 1 ermittelt wird.
- Durchführung einer linearen Schadensakkumulationsrechnung, wie oben beschrieben - jedoch wird die Gesamtschädigung umgerechnet auf eine schadensäquivalente Spannung bei gleicher Gesamtlastwechselzahl
- Durchführung einer linearen Schadensakkumulationsrechnung und Äquivalentspannungsberechnung, wie oben beschrieben - jedoch nicht bei gleicher Lastwechselzahl, sondern bei 2 Millionen Lastwechseln (Die Spannungsschwingbreite bei 2 Millionen Lastwechseln beschreibt die Kerbfallklasse)
- Berechnung der Kollektivform. Die Kollektivform wird durch die größte Spannungsamplitude und dem Völligkeitsmaß beschrieben. Die mathematische Beschreibung der Kollektivform kann für die Betriebsfestigkeitsberechnung benützt werden.

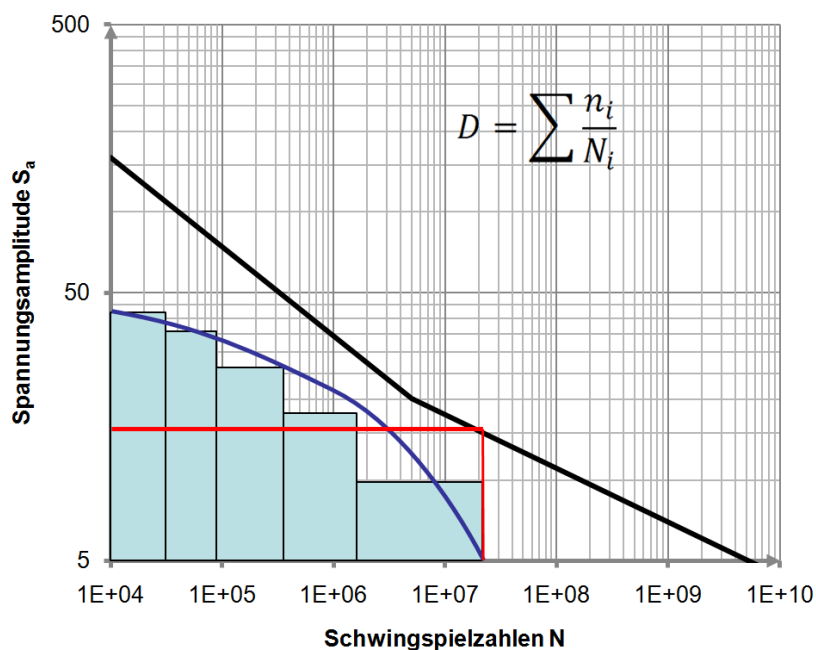


Abbildung 6: Schädigungsrechnung

Es gibt jedoch auch Methoden, die die Bewertung eines Stufenkollektives nicht ermöglichen.

Diese Dauerfestigkeitsmethoden geben zulässige Werte an, welche von keiner Spannungsamplitude überschritten werden dürfen.

Diese zulässigen Werte können sich jedoch auch auf ein Beanspruchungskollektiv beziehen (wie in der DIN 15018) und bei schmalen, abfallenden Kollektiven die zulässigen Spannungen erhöhen.

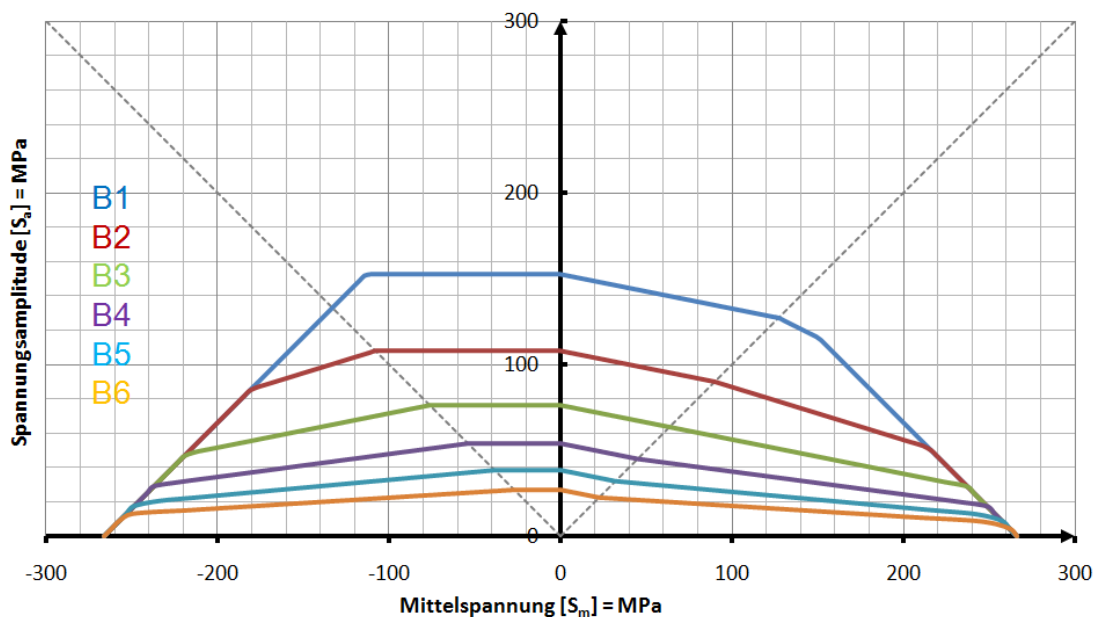
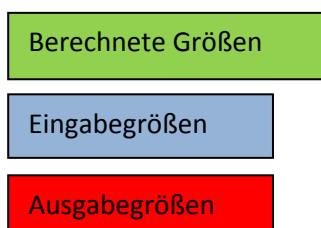


Abbildung 7: Zulässige Spannungsamplituden bei der Dauerfestigkeitsberechnung

Bei einer Dauerfestigkeitsberechnung sind Schwingspielzahlen irrelevant. Da jedoch die Existenz einer Dauerfestigkeit durchaus kritisch betrachtet werden kann, ist zu hinterfragen, ob solche Methoden zielführend sind.

Um die Ergebnisse und die Unterschiede der Berechnungsmethoden (wie sie in den nachfolgenden Berechnungsvorschriften zu finden sind) zu bewerten, wird für jede Berechnungsvorschrift ein Auslastungsgrad als Ausgabewert definiert – und dieser bedeutet stets, dass sobald 1 erreicht wird, die Schweißnaht voll (100%) ausgelastet ist und versagen wird.

In den nachfolgenden Flussdiagrammen zur Berechnungsmethodik sind die physikalischen Größen oder Werte nach folgendem Farbschema gekennzeichnet:



5.1 DIN 15018

Die DIN 15018 sieht für die Auslegung schweißtechnischer Konstruktionen einen allgemeinen und Betriebsfestigkeitsnachweis vor.

Der Betriebsfestigkeitsnachweis ist eine Dauerfestigkeitsberechnung, wobei jedoch die Schwingspielzahl und das Belastungskollektiv in Form von Beanspruchungsgruppen berücksichtigt werden. Mittelspannungen werden berücksichtigt.

Obwohl es sich bei der DIN 15018 um eine Dauerfestigkeitsnorm handelt, kann man Lastwechselzahlen und Kollektivform durch Beanspruchungsgruppen definieren und in Abhängigkeit dieser die zulässigen Spannungen ermitteln.

5.1.1 Allgemeiner Spannungsnachweis

Der allgemeine Spannungsnachweis nach DIN 15018 ist eine statische Festigkeitsberechnung auf Sicherheit gegen Erreichen der Fließgrenze. Die zulässigen Spannungen werden für verschiedene Lastfälle angegeben aus dem Kranbau.

Lastfallabhängige Parameter:

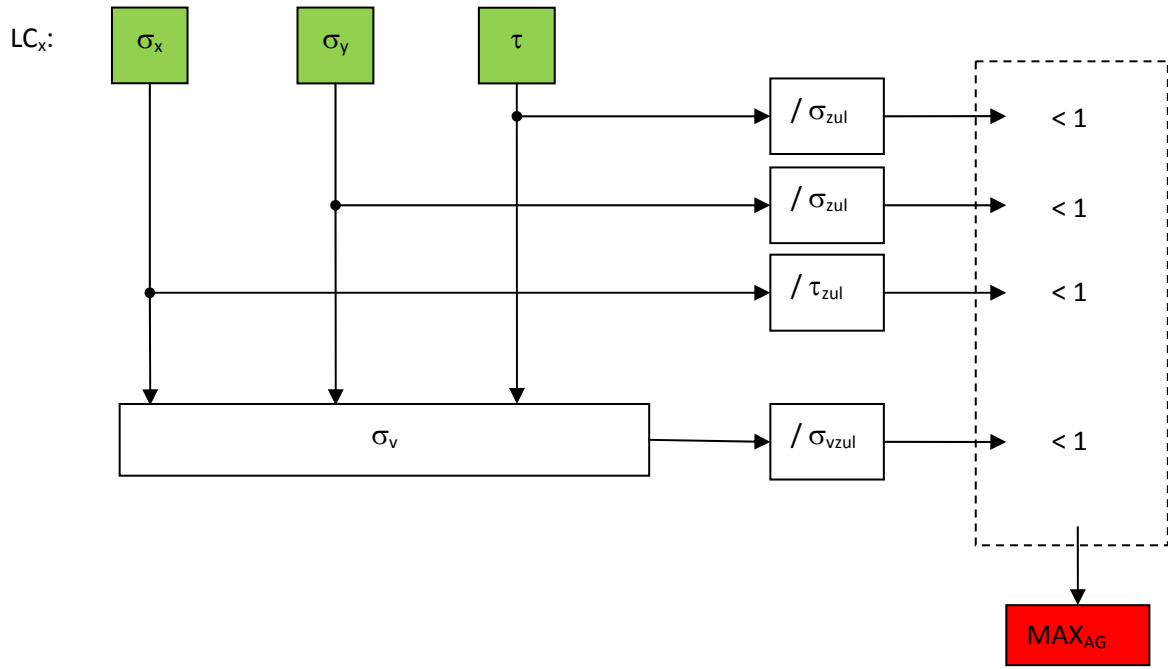
- Lastfall
 - H
 - HS
 - HZ

Lokale Parameter:

- Kerbfall NF1
 - „SN“ Stumpfnah
 - „K-SG“ K- Naht, Sondergüte
 - „K-NG“ K- Naht, Normalgüte
 - „KN“ Kehlnaht

Sonstige Parameter:

- Werkstoff
 - St37
 - St52



5.1.2 Betriebsfestigkeitsnachweis

Der Betriebsfestigkeitsnachweis auf Sicherheit gegen Bruch bei zeitlich veränderlichen, häufig wiederholten Spannungen ist nur in den Lastfällen H (Lastannahmen Kranbau) und für Spannungsspiele über $2 \cdot 10^4$ für Bauteile und Verbindungsmittel (Schweißnähte) durchzuführen.

Lastfallabhängige Parameter:

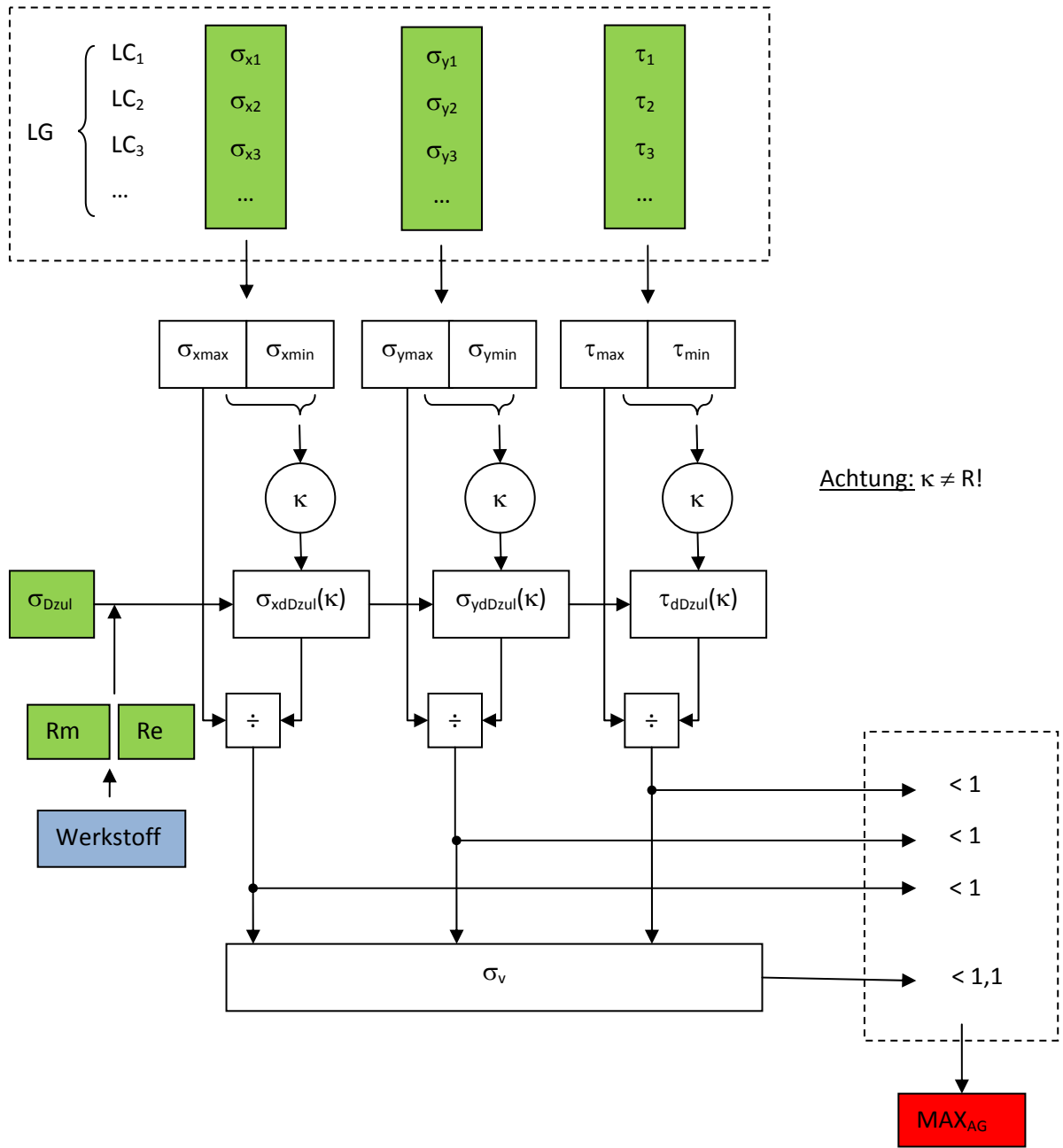
- Beanspruchungsgruppe (Abhängig von Schwingspielen und Lastkollektiv)
 - „B1“
 - „B2“
 - „B3“
 - „B4“
 - „B5“
 - „B6“

Lokale Parameter:

- Kerbfall NF1, NF2 und NF3 (Normalbeanspruchung quer, längs und Schubbeanspruchung)
 - „W0“
 - „W1“
 - „W2“
 - „K0“
 - „K1“
 - „K2“
 - „K3“
 - „K4“
 - „T0“
 - „T1“

Sonstige Parameter:

- Werkstoff
 - „St37“
 - „St52“



5.2 IIW - Richtlinie

Bei der Bewertung nach der IIW Richtlinie auf Schwingfestigkeit werden die Schwingbeanspruchungen und der Ermüdungswiderstand mit Hilfe eines Bewertungsverfahrens in Beziehung gesetzt. Die gültigen Verfahren hierfür sind:

- Verfahren die auf Wöhlerlinien beruhen
 - Mittels linearer Schadensrechnung nach Palmgren-Miner
 - Nichtlineare Schadensrechnung
- Verfahren die auf Rißausbreitung beruhen
- Direkte experimentelle Bewertung durch den Schwingversuch an Bauteilen oder ganzen Tragwerken.

Wenn Normal- und Schubspannungen gleichzeitig auftreten, so ist ihr kombinierter Effekt zu beachten. Dabei werden folgende 3 Fälle unterschieden:

- Bei kleinen Schubbeanspruchungen kann die Schubspannung vernachlässigt werden
- Bei gleichzeitig und in Phase schwingender Beanspruchung (Hauptspannungsvektor rotiert nicht mehr als 20°) wird die Schwingbreite der maximalen Hauptnormalspannung verwendet
- Wenn Normal- und Schubspannungen unabhängig voneinander auftreten, so ist die Schädigungsrechnung getrennt durchzuführen.

Bruchmechanische Rißausbreitungsrechnungen sollen auf Grundlage der Schwingbreite der maximalen Hauptspannung durchgeführt werden.

Bei einer Betriebsbeanspruchung wird eine Schadensakkumulationsrechnung eingesetzt. Für normale Fälle ist eine modifizierte Palmgren-Miner Schädigungsrechnung angemessen. Für Schadensrechnungen, die empfindlich auf die genaue Position der Schwingfestigkeit oder der Ausschlussgrenze reagieren oder bei Beanspruchungen, in denen sich das Beanspruchungskollektiv während der Betriebszeit ändert, wird eine zusätzliche Bewertung mit einer nichtlinearen Schädigungsrechnung⁹ empfohlen.

In Bereichen in denen keine Betriebsversuchswerte und keine Betriebserfahrungen vorliegen, und in denen die Form des Beanspruchungskollektives nicht nahe einer Einstufenbelastung liegt, wird empfohlen, nur die Hälfte der rechnerischen Lebensdauer auszunutzen.

Je nach Auswertungsmethode (Nenn-, Struktur- oder Kerbspannung) existieren Bemessungswerte, der Schwingbreite für Normalspannungen und Schubspannungen im Verhältnis zur Streckgrenze.

⁹ Die nichtlineare Schädigungsrechnung ist auch Teil der IIW- Richtlinie; Die Anwendung jener erfordert aber zu jeder Belastung die Information deren Zeitpunktes innerhalb der Lebensdauer.

Die Schädigungsrechnung beinhaltet eine lineare Schadensakkumulationsrechnung nach Palmgren-Miner für variable Amplitudenbelastung. Bei konstanten Amplituden wären höhere Schadenssummen und eine flacher abfallende Wöhlerlinie nach dem Knickpunkt zulässig.

Nach der Bildung der Minersumme wird eine schadensgleiche Äquivalentspannungsschwingbreite berechnet, die für die Berechnung des Auslastungsgrades verwendet wird. Sollten geringere Minersummen zugelassen sein, wird an dieser Stelle der zulässige Wert vermindert.

Einschränkungen der Berechnung:

- Nicht für Aluminium
- Gilt nicht für konstante Amplituden

Lastfallabhängige Parameter:

- Schwingspielzahl

Lokale Parameter:

- FAT Klasse für Normalbeanspruchung (Eingabe als Zahl)
- Wöhlerlinienexponent für Normalbeanspruchung (Eingabe als Zahl)
- FAT Klasse für Schubbeanspruchung (Eingabe als Zahl)
- „Thickness correction exponent“; Klassifiziert die Schweißverbindung für Wändickenkorrektur
- Wanddicke in mm

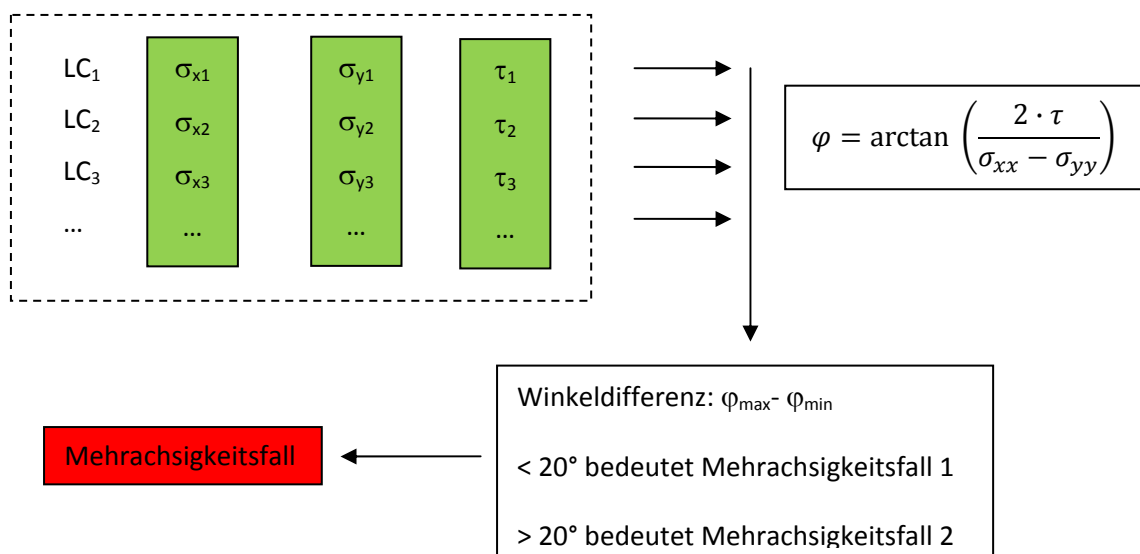
Sonstige Parameter:

- Streckgrenze Werkstoff (Eingabe als Zahl in MPa)
- Spannungsverhältnis („1“, „2“ oder „3“)
 - Fall I: Grundwerkstoff und Walzprodukte mit vernachlässigbarer Eigenspannung, entspannte Bauteile, in denen die Effekte von erzwungenen Verformungen bei der Spannungsberechnung berücksichtigt wurden.
 - Fall II: Dünnwandige geometrisch einfache Bauteile mit kurzen Schweißnähten. Teile oder Bauteile mit thermisch geschnittenen Kanten.
 - Fall III: Komplexe zwei- oder dreidimensionale Bauteile, Bauteile mit globalen Eigenspannungen, dickwandige Bauteile.
- Beanspruchungsseitiger Teilsicherheitsfaktor γ_F (Eingabe als Zahl)
- Ermüdungswiderstandsseitiger Teilsicherheitsfaktor γ_M (Eingabe als Zahl)
- Nachbehandlung durch Schleifen (Faktor 1,0 oder 1,3)
- Nachbehandlung durch TIG- dressing (Faktor 1,0 oder 1,3)

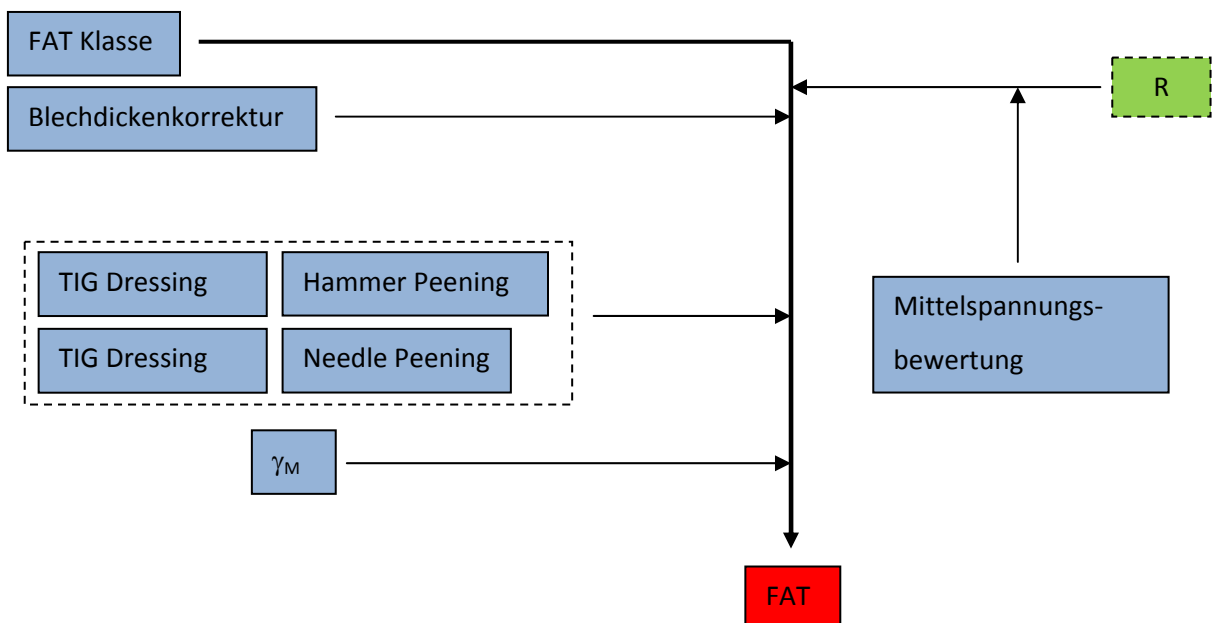
- Nachbehandlung durch Hämmern (Faktor 1,0 oder 1,6)
- Nachbehandlung durch Nageln (Faktor 1,0 oder 1,6)
- Berechnungsmethode („0“, „1“ oder „2“). Dieser Faktor beschreibt den Umgang mit mehraxialen Spannungen in der Berechnung. Beim Wert „0“ erfolgt die Berechnung automatisch durch Betrachtung des Rotationswinkels der Hauptnormalspannung (maximal 20°). Bei der Methode „1“ sollten die Spannungen proportional auftreten; bei Methode „2“ nichtproportional.

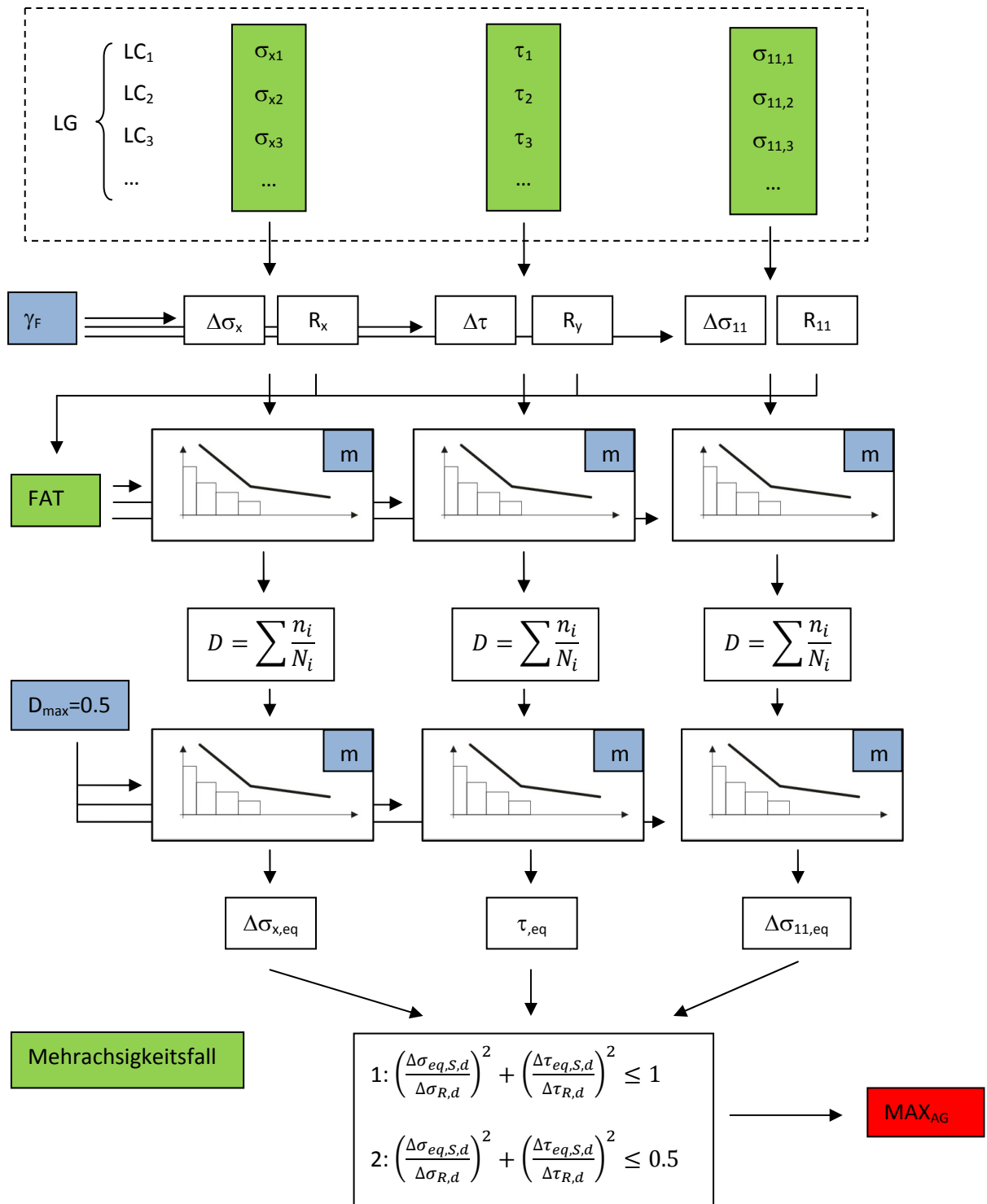
Berechnungsmethodik:

Winkelberechnung für jeden Lastfall zur Unterscheidung der Mehrachsigkeit:



Berechnung der FAT Klasse und unter den Einflussgrößen:





Die Grundgleichung der Wöhlerlinie lautet:

$$N = \frac{C}{\Delta\sigma^m}$$

- N Lastwechselzahl
- C Konstante der Wöhlerlinie in einem Bereich
- $\Delta\sigma$ Spannungsschwingbreite
- m Wöhlerlinienexponent

Die Teilsicherheitsfaktoren bewerten die Spannungsschwingbreite der Beanspruchung und des Ermüdungswiderstandes neu:

$$\Delta\sigma_{S,d} = \Delta\sigma_{S,k} \cdot \gamma_F \quad \Delta\sigma_{R,d} = \Delta\sigma_{R,k} / \gamma_M$$

- $\Delta\sigma_{S,d}$ Modifizierte Spannungsschwingbreite der Beanspruchung
- $\Delta\sigma_{S,k}$ Berechnete Spannungsschwingbreite der Beanspruchung
- $\Delta\sigma_{R,d}$ Modifizierte Spannungsschwingbreite des Ermüdungswiderstandes
- $\Delta\sigma_{R,k}$ Berechnete Spannungsschwingbreite des Ermüdungswiderstandes
- γ_M Teilsicherheitsfaktor des Ermüdungswiderstandes
- γ_F Teilsicherheitsfaktor der Beanspruchung

Die äquivalente Spannungsschwingbreite¹⁰ lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$\Delta\sigma_{eq,S,d} = \sqrt[1]{\frac{1}{D} \cdot \frac{\sum(n_i \cdot \Delta\sigma_{i,S,d}^{m_1}) + \Delta\sigma_{L,d}^{(m_1-m_2)} \cdot \sum(n_j \cdot \Delta\sigma_{j,S,d}^{m_2})}{\sum n_i + \sum n_j}}$$

- D zulässige Minersumme
- m_1 Neigung der Wöhlerlinie oberhalb des Knickpunktes
- m_2 Neigung der Wöhlerlinie unterhalb des Knickpunktes
- $\Delta\sigma_{eq,S,d}$ Äquivalentenspannungsschwingbreite
- $\Delta\sigma_{i,S,d}$ Spannungsschwingbreite der Belastung oberhalb des Knickpunktes
- $\Delta\sigma_{j,S,d}$ Spannungsschwingbreite der Belastung unterhalb des Knickpunktes
- $\Delta\sigma_{L,d}$ Ertragbare Spannungsschwingbreite des Ermüdungswiderstands beim Knickpunkt
- n_i Anzahl der Lastwechsel bei einer Belastung oberhalb des Knickpunktes
- n_j Anzahl der Lastwechsel bei einer Belastung unterhalb des Knickpunktes

Die ertragbare Spannungsschwingbreite beim Knickpunkt der Wöhlerlinie lässt sich in Abhängigkeit der FAT Klasse berechnen (hier für Normalbeanspruchung):

$$\Delta\sigma_L = \sqrt[1]{\frac{2e6}{1e7}} \cdot FAT = \sqrt[1]{\frac{1}{5}} \cdot FAT$$

¹⁰ Die äquivalente Spannungsschwingbreite ist schadensgleich zu der nach Miner aufsummierten Schädigung des Kollektives bei gleicher Lastwechselzahl.

Für die Wöhlerlinienneigung nach dem Knickpunkt gilt (nach „Miner modifiziert nach Haibach“) folgender Zusammenhang:

$$m_2 = 2 \cdot m_1 - 1$$

Bei variabler Amplitudenbelastung wird die Wöhlerlinie nach dem Knickpunkt stets gekrümmt weitergeführt.

Für den Betriebsfestigkeitsnachweis ist folgende Gleichung zu erfüllen:

$$\left(\frac{\Delta\sigma_{eq,S,d}}{\Delta\sigma_{R,d}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\tau_{eq,S,d}}{\Delta\tau_{R,d}} \right)^2 \leq CV$$

Bei proportionaler Beanspruchung gilt $CV = 1$, bei nichtproportionaler (mehraxiale Ermüdung) gilt $CV = 0,5$

5.3 Eurocode 3

Im Eurocode 3 wird für den Ermüdungsnachweis die Normalspannung und die Schubspannung zur Bewertung herangezogen. Abweichungen von Konstruktionsdetails (in Tabellen dokumentiert), die zusätzliche Spannungskonzentrationen erzeugen, werden mit Spannungskonzentrationsfaktoren berücksichtigt.

Der Ermüdungsnachweis ist auf Basis von Spannungsschwingbreiten durchzuführen. Das Spannungsverhältnis der Beanspruchung hat keinen Einfluss auf die zulässigen Spannungsschwingbreiten.

Für Nennspannungen werden die Ermüdungsfestigkeiten durch verschiedene Wöhlerlinien bestimmt, wobei jede Kurve einer bestimmten Kerbfallkategorie zugeordnet wird.

Für den Ermüdungsnachweis ist erst die Schädigung jeder Beanspruchungskollektivstufe zu berechnen und danach zu einer Gesamtschädigung zu akkumulieren. Aus der Gesamtschädigung ist eine schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite bei 2 Millionen Lastwechseln zu berechnen, die wiederum ins Verhältnis zu setzen ist mit der zulässigen Spannungsschwingbreite bei 2 Millionen Lastwechseln. Dieser Wert wird als Auslastungsgrad bezeichnet; bei dem gleichzeitigen Wirken von Längs- und Schubspannungsschwingbreiten ist ein gesonderter Nachweis durchzuführen.

Die Wöhlerlinien werden für Normalspannung und Schubspannung nach folgender Formel beschrieben:

$$\Delta\sigma_R^m \cdot N_R = \Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6$$

N_R	Lastwechselzahl
$\Delta\sigma_C$	Spannungsschwingbreite bei 2 Millionen Lastwechseln
$\Delta\sigma_R$	Spannungsschwingbreite
m	Wöhlerlinienexponent

Der Nachweis ist erbracht, wenn:

$$\frac{\sigma_{E,2} \cdot \gamma_F}{\sigma_C / \gamma_M} \leq 1$$

$$\frac{\tau_{E,2} \cdot \gamma_F}{\tau_C / \gamma_M} \leq 1$$

Bei gleichzeitiger Wirkung von Längs- und Schubspannungsschwingbreiten ist nachzuweisen, dass:

$$\left(\frac{\sigma_{E,2} \cdot \gamma_F}{\sigma_C / \gamma_M} \right)^3 + \left(\frac{\tau_{E,2} \cdot \gamma_F}{\tau_C / \gamma_M} \right)^5 \leq 1$$

$\Delta\sigma_C$	Spannungsschwingbreite bei 2 Millionen Lastwechseln
$\Delta\sigma_{E,2}$	Äquivalentspannungsschwingbreite
γ_M	Teilsicherheitsfaktor des Ermüdungswiderstandes
γ_F	Teilsicherheitsfaktor der Beanspruchung

Einschränkungen der Berechnung:

- Es wird davon ausgegangen, dass die Belastungen sowohl oberhalb, als auch unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze auftreten. Ansonsten könnte der modifizierte Teil der Wöhlerlinie (zwischen $5 \cdot 10^6$ und 10^8 Lastwechseln weggelassen werden.

Lastfallabhängige Parameter:

- Schwingspielzahl

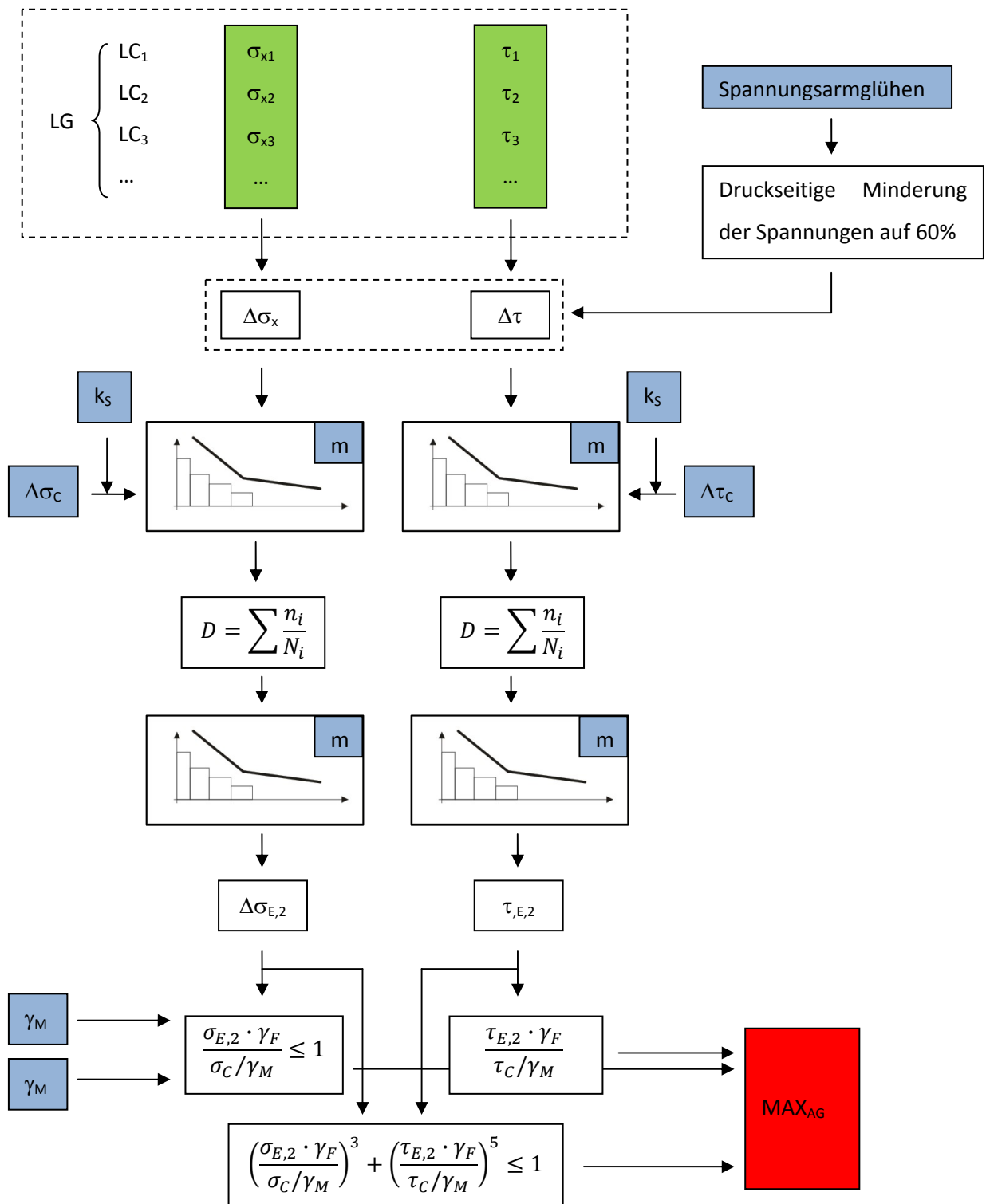
Lokale Parameter:

- σ_c für Normalbeanspruchung (Eingabe als Zahl)
- τ_c für Schubbeanspruchung (Eingabe als Zahl)
- m für den Wöhlerlinienexponenten
- k_s Wert um die Größenabhängigkeit aus Effekten der Blechdicke zu berücksichtigen

Sonstige Parameter:

- Streckgrenze des Werkstoffes (Eingabe als Zahl in MPa)
- Beanspruchungsseitiger Teilsicherheitsfaktor γ_F (Eingabe als Zahl)
- Ermüdungswiderstandsseitiger Teilsicherheitsfaktor γ_M (Eingabe als Zahl)
- Nachbehandlung durch Spannungsarmglühen (0/1)

Berechnungsmethodik:



5.4 BS 7608

Im BS 7608 ist zur Bemessung der Schwingfestigkeit die Spannungsschwingbreite der Hauptnormalspannung relevant. Die Mittelspannung kann bei der Bewertung vernachlässigt werden. Die Wöhlerlinie wird berechnet nach folgender Formel:

$$N_i = 1 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{S_0}{S_{ri}}\right)^m$$

N_i	Lastwechselzahl
S_0	Spannungsschwingbreite bei 10^7 Lastwechseln
S_{ri}	Spannungsschwingbreite der Beanspruchung
m	Wöhlerlinienexponent

Die Berechnung beinhaltet eine lineare Schadensakkumulationsrechnung und als Ausgabe eine Schädigung D . Der Nachweis ist erbracht, sofern dieser Wert 1 nicht überschreitet.

Einschränkungen in der Berechnung:

- Die Wöhlerlinie wird bei der 2 fachen Standardabweichung fix festgelegt

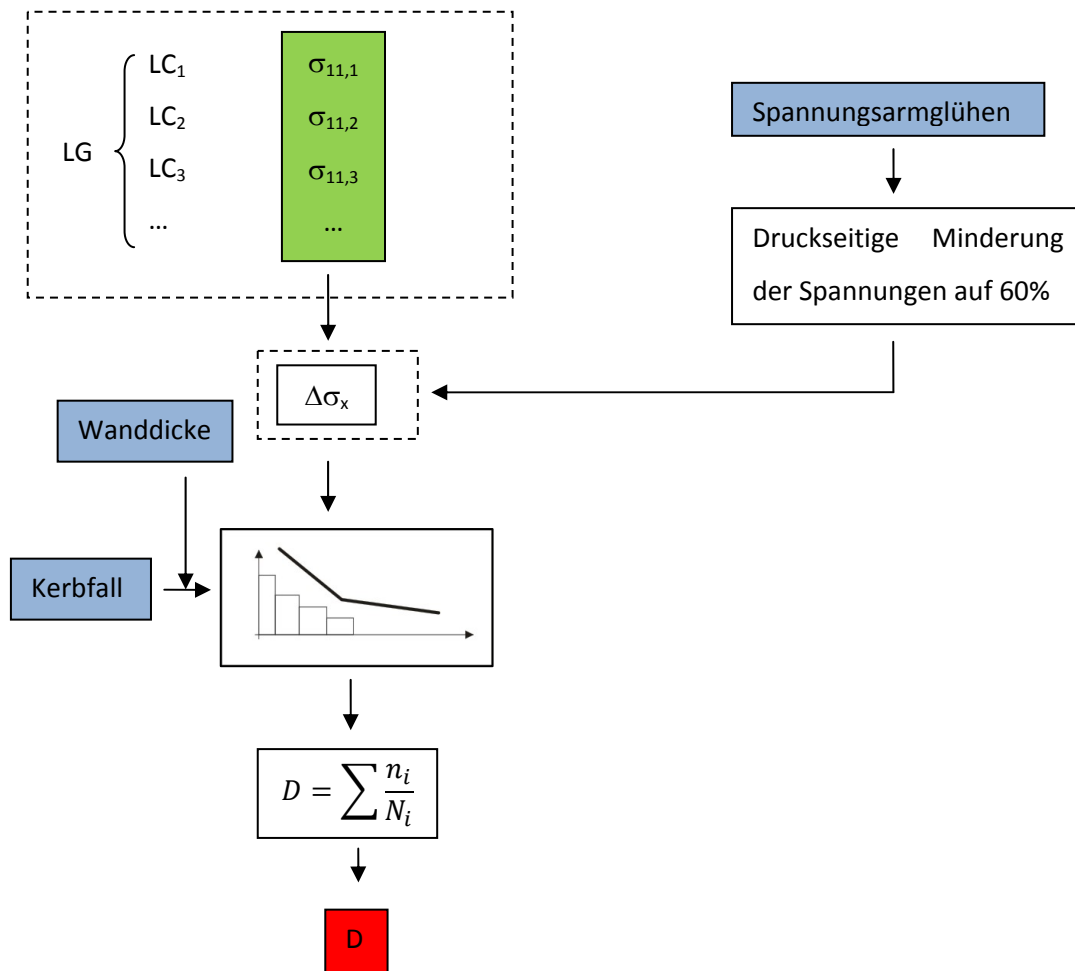
Lastfallabhängige Parameter:

- Schwingspielzahl

Lokale Parameter:

- Kerbfall (Eingabe in Textform)
 - „B“
 - „C“
 - „D“
 - „E“
 - „F“
 - „F2“
 - „G“
 - „W“
 - „S“
 - „T“
- Wanddicke in mm

Berechnungsmethodik:



5.5 ERRI B 12/RP 60

Die Berechnungsmethodik der ERRI B 12/RP 60 zum Betriebsfestigkeitsnachweis beinhaltet zwei getrennte Verfahren:

- Schadensakkumulationsverfahren
- Goodman- Diagramm Verfahren

Das Schadensakkumulationsverfahren basiert auf der Palmgren- Miner Regel zur linearen Schädigungsrechnung. Bemessungswert ist die Spannungsschwingbreite. Beim Goodman Verfahren hängt die zulässige Spannungsamplitude von der Mittelspannung ab. Deshalb sind jeweils für die verschiedenen Methoden verschiedene Kerbfälle definiert.

Die Grundgleichung der Wöhlerlinie lautet:

$$\log(N) = \log(a) - m \cdot \log(2 \cdot \sigma_A)$$

N_i	Lastwechselzahl
a	Wöhlerlinienkonstante
σ_A	Spannungsamplitude der Beanspruchung
m	Wöhlerlinienexponent

Lastfallabhängige Parameter:

- Schwingspielzahl

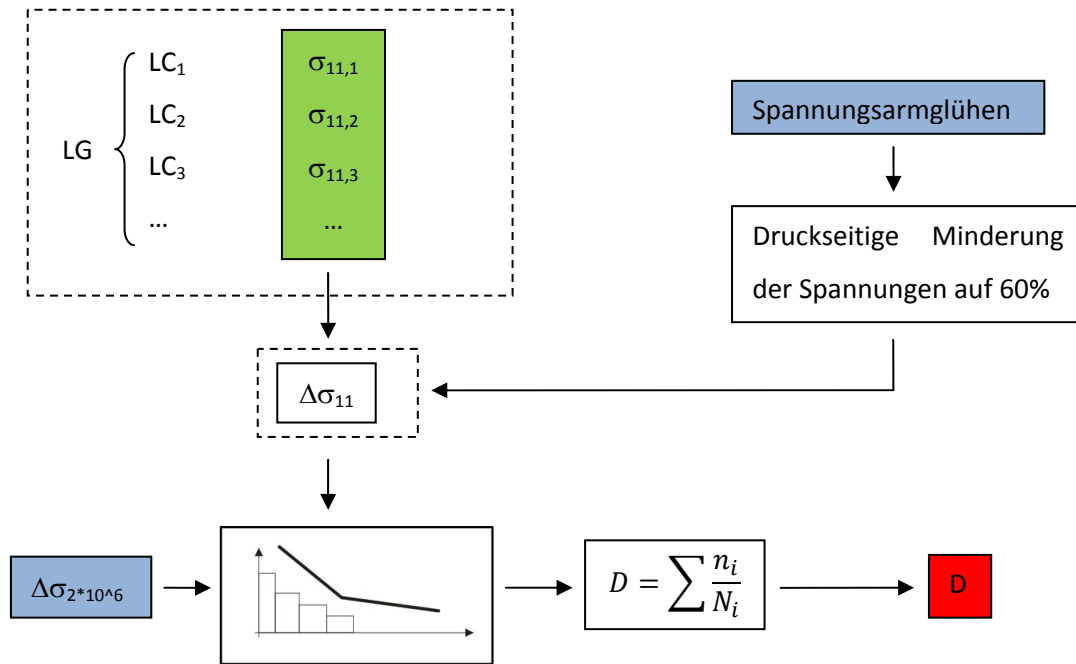
Lokale Parameter:

- Kerbfall für Schädigungsberechnung (Eingabe in als Zahl)
- Kerbfall für Goodman Verfahren (Eingabe als Text)
 - „A“
 - „B“
 - „C“
 - „D“
 - „E“

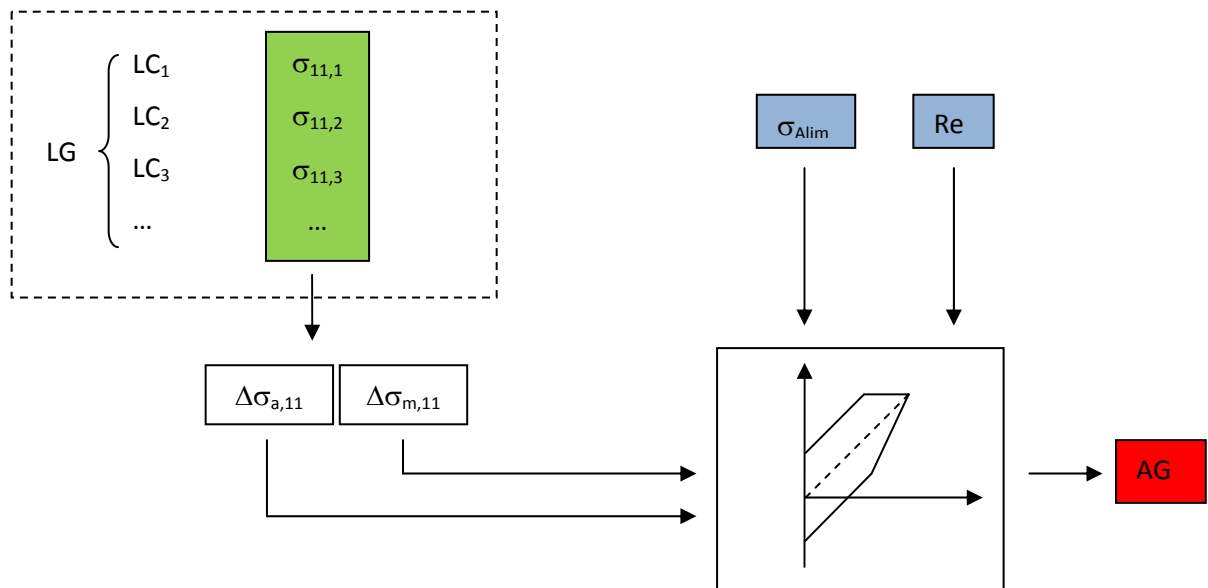
Sonstige Parameter:

- Streckgrenze des Werkstoffes (R_e in MPa)
- Zugfestigkeit des Werkstoffes (370, 420 oder 520 MPa; beschreibt die Stahlsorte)

Berechnungsmethodik der Schädigungsrechnung:



Berechnungsmethodik des Goodman Verfahrens:



5.6 DS 952

Die DS 952 ist eine Dauerfestigkeitsnorm und gibt in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses verschiedene zulässige Spannungen in Form von Diagrammen an. Da die Kerbfallkurven nicht weiter mathematisch beschrieben sind, jedoch gleich den Kerbfällen der DVS 1612 sind, wurden die zulässigen Spannungen nach DVS 1612 berechnet.

Lastfallabhängige Parameter:

- - keine -

Lokale Parameter:

- Kerbfall für Normalbeanspruchung, quer zur Naht(Text)
 - „A+“, „A“ oder „A-“
 - „AB+“, „AB“ oder „AB-“
 - „B+“, „B“ oder „B-“
 - „C+“, „C“ oder „C-“
 - „D+“, „D“ oder „D-“
 - „E1+“, „E1“ oder „E1-“
 - „E4+“, „E4“ oder „E4-“
 - „E5+“, „E5“ oder „E5-“
 - „E6+“, „E6“ oder „E6-“
 - „F1+“, „F1“ oder „F1-“
 - „F2+“, „F2“ oder „F2-“
- Kerbfall für Schubbeanspruchung
 - „G+“, „G“ oder „G-“
 - „H+“, „H“ oder „H-“

Sonstige Parameter:

- Werkstoff (S235 oder S355)

Die zulässigen Spannungen werden im Zugbereich wie folgt berechnet:

$$\sigma_{zul} = 150 \cdot 1,04^{-x} \cdot \frac{2 \cdot (1 - 0,3 \cdot R)}{1,3 \cdot (1 - R)}$$

σ_{zul}	zulässige Spannung
x	Exponent für die Kerbfalllinien
R	Spannungsverhältnis

Im Druckbereich werden die zulässigen Spannungen in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis κ , was dem Kehrwert von R entspricht, berechnet.

$$\sigma_{zul} = 150 \cdot 1,04^{-x} \cdot \frac{2}{(1 - \kappa)}$$

- σ_{zul} zulässige Spannung
- x Exponent für die Kerbfalllinien
- κ Spannungsverhältnis

Für Schubbeanspruchung gelten folgende zulässigen Werte:

$$\tau_{zul}(R) = \frac{2 \cdot (1 - 0,17 \cdot R)}{1,17 \cdot (1 - R)} \cdot \tau_{zul,R=-1}$$

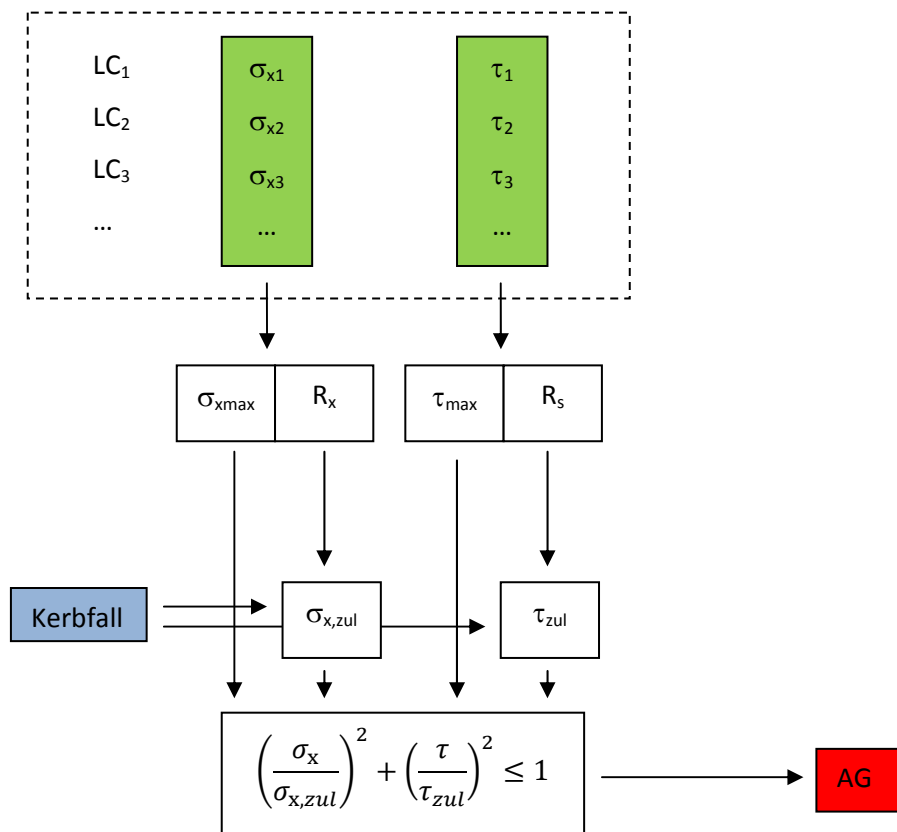
- τ_{zul} zulässige Schubspannung
- $\tau_{zul,R=-1}$ Zulässige Schubspannung bei wechselnder Beanspruchung
- R Spannungsverhältnis

Für den Nachweis ist eine Vergleichsspannung nach folgender Formel zu berechnen:

$$\left(\frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{\perp,zul}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallel}}{\tau_{\parallel,zul}} \right)^2 \leq 1$$

- σ_{\perp} maximale Spannung quer zur Naht
- τ_{\parallel} maximale Schubspannung
- zul $\sigma_{\perp,zul}$ zulässige Spannung quer zur Naht
- zul $\tau_{\parallel,zul}$ zulässige Schubspannung

Berechnungsmethodik:



5.7 DVS 1612

Die DVS 1612 Norm für den Festigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugen beruht auf einer Dauerfestigkeitsrechnung und erlaubt dabei keine Kollektivierung. Sie bezieht sich bei der Lastannahme auf die DIN EN 13749, Ausgangslage für die Berechnung können aber nur die UIC Lastfälle sein.

Berechnungsrelevant sind die Normalspannungen quer zur Naht, längs zur Naht und die Schubspannung. Die Vergleichsspannungsrechnung entspricht jener nach der DIN 15018.

Lastfallabhängige Parameter:

- - keine -

Lokale Parameter:

- Kerbfall für Normalbeanspruchung, quer zur Naht(Text)
 - „A+“, „A“ oder „A-“
 - „AB+“, „AB“ oder „AB-“
 - „B+“, „B“ oder „B-“
 - „C+“, „C“ oder „C-“
 - „D+“, „D“ oder „D-“
 - „E1+“, „E1“ oder „E1-“
 - „E4+“, „E4“ oder „E4-“
 - „E5+“, „E5“ oder „E5-“
 - „E6+“, „E6“ oder „E6-“
 - „F1+“, „F1“ oder „F1-“
 - „F2+“, „F2“ oder „F2-“
- Kerbfall für Schubbeanspruchung
 - „G+“, „G“ oder „G-“
 - „H+“, „H“ oder „H-“

Sonstige Parameter:

- Werkstoff (S235 oder S355)

Die zulässigen Spannungen werden im Zugbereich wie folgt berechnet:

$$\sigma_{zul} = 150 \cdot 1,04^{-x} \cdot \frac{2 \cdot (1 - 0,3 \cdot R)}{1,3 \cdot (1 - R)}$$

σ_{zul}	zulässige Spannung
x	Exponent für die Kerbfalllinien
R	Spannungsverhältnis

Im Druckbereich werden die zulässigen Spannungen in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis κ , was dem Kehrwert von R entspricht, berechnet.

$$\sigma_{zul} = 150 \cdot 1,04^{-x} \cdot \frac{2}{(1 - \kappa)}$$

- σ_{zul} zulässige Spannung
- x Exponent für die Kerbfalllinien
- κ Spannungsverhältnis

Für Schubbeanspruchung gelten folgende zulässigen Werte:

$$\tau_{zul}(R) = \frac{2 \cdot (1 - 0,17 \cdot R)}{1,17 \cdot (1 - R)} \cdot \tau_{zul,R=-1}$$

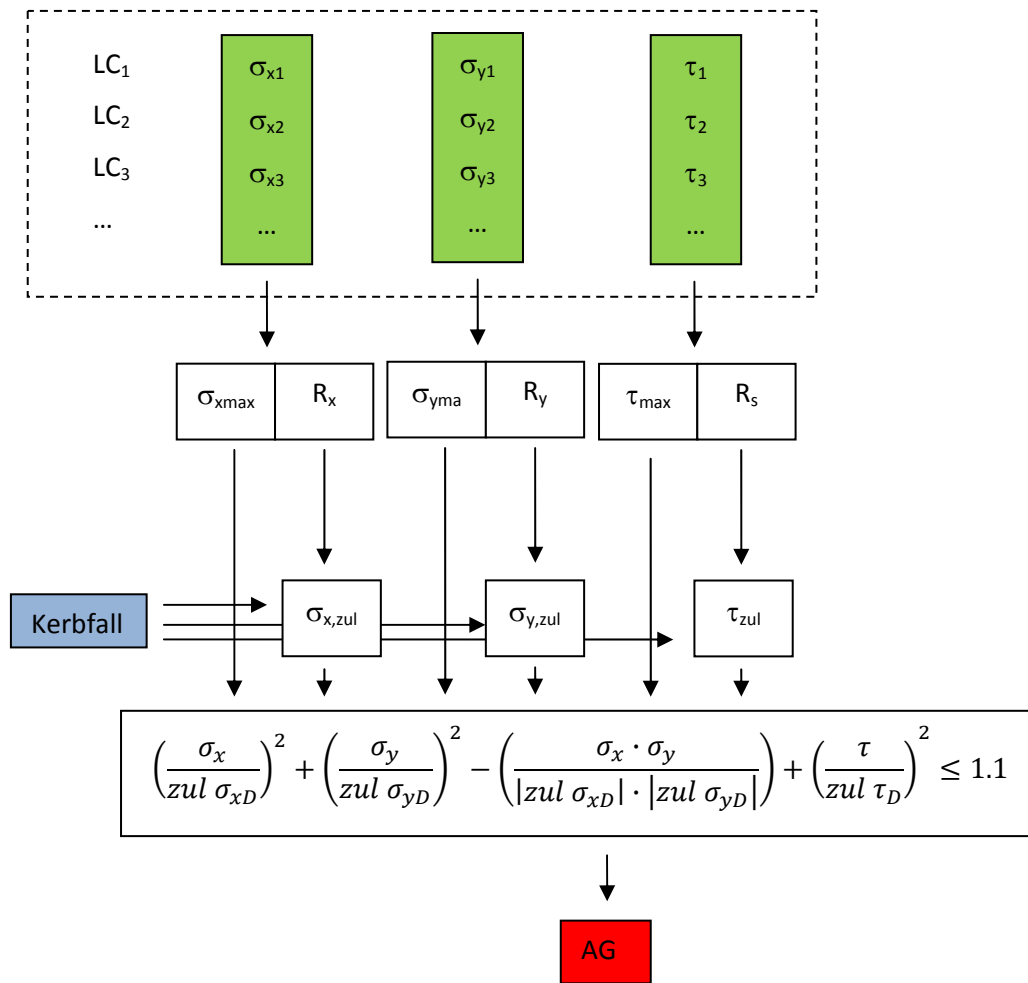
- τ_{zul} zulässige Schubspannung
- $\tau_{zul,R=-1}$ Zulässige Schubspannung bei wechselnder Beanspruchung
- R Spannungsverhältnis

Für den Nachweis ist eine Vergleichsspannung nach folgender Formel zu berechnen:

$$\left(\frac{\sigma_x}{zul \sigma_{xD}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{zul \sigma_{yD}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_x \cdot \sigma_y}{|zul \sigma_{xD}| \cdot |zul \sigma_{yD}|} \right) + \left(\frac{\tau}{zul \tau_D} \right)^2 \leq 1.1$$

- σ_x maximale Spannung in x- Richtung
- σ_y maximale Spannung in y- Richtung
- τ maximale Schubspannung
- $zul \sigma_{xD}$ zulässige Spannung in x-Richtung
- $zul \sigma_{yD}$ zulässige Spannung in y-Richtung
- $zul \tau_D$ zulässige Schubspannung

Berechnungsmethodik:



5.8 FKM Richtlinie

Die FKM Richtlinie ist ein Regelwerk zur Berechnung verschiedenster Bauteile und auch Schweißnähten. Für die Berechnung von Schweißnähten mit Nennspannungen ist das Kapitel: „Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen“ für flächenförmige Bauteile relevant.

Die Nachweise für jede einzelne Spannungsart und für die zusammengesetzten Spannungsarten sind im Allgemeinen getrennt durchzuführen. Für geschweißte Bauteile sind die Nachweise für den Schweißnahtübergangsquerschnitt und für den Schweißnahtquerschnitt im Allgemeinen getrennt durchzuführen. Beide Nachweise sind in gleicher Art durchzuführen, aber mit den jeweiligen, im Allgemeinen unterschiedlichen Querschnittswerten, Nennspannungen und Bauteilklassen FAT.

Die Nachweise sind mit Hilfe der zyklischen Auslastungsgrade durchzuführen. Der zyklische Auslastungsgrad ist der Quotient aus vorhandener Spannungsamplitude $S_{a,zd,1}$ und zulässiger Amplitude der Bauteil- Betriebsfestigkeit im Nachweispunkt. Die zulässige Amplitude der Bauteil- Betriebsfestigkeit ist der Quotient aus ertragbarer Amplitude der Bauteil- Betriebsfestigkeit $S_{BK,zd}$ und erforderlichem Gesamtsicherheitsfaktor j_{ges} .

Wenn unterschiedliche Spannungsarten wie Zugdruck, Biegung, usw. zusammenwirken und wenn die resultierende Spannung mehrachsiger ist, sind sowohl die einzelnen Spannungsarten getrennt für sich, als auch die zusammengesetzten Spannungsarten zu betrachten. Es ist zu unterscheiden zwischen synchronen, proportionalen und nichtproportionalen, mehrachsigen Spannungen.

Einschränkungen in der Anwendung:

- Temperaturfaktor nicht berücksichtigt
- Überlastfall Typ F2: das Spannungsverhältnis bleibt im Überlastfall konstant (Standard)
- Nicht für Aluminiumwerkstoff

Lastfallabhängige Parameter:

- Schwingspielzahl

Lokale Parameter:

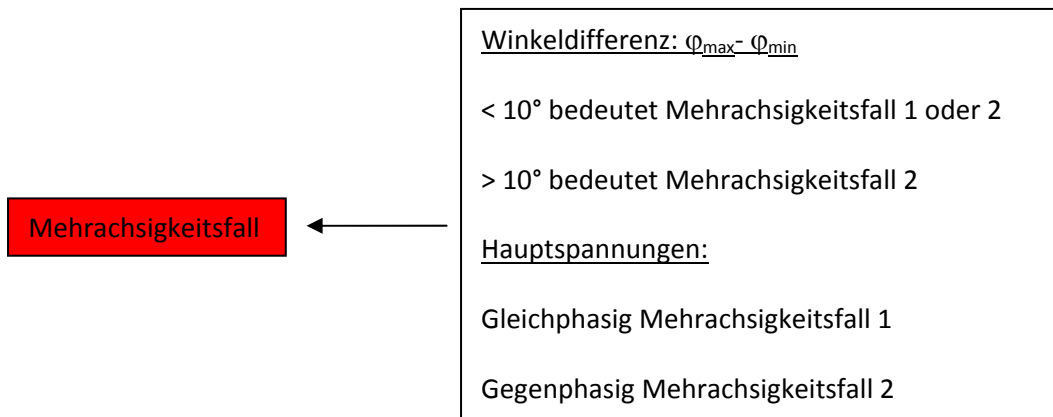
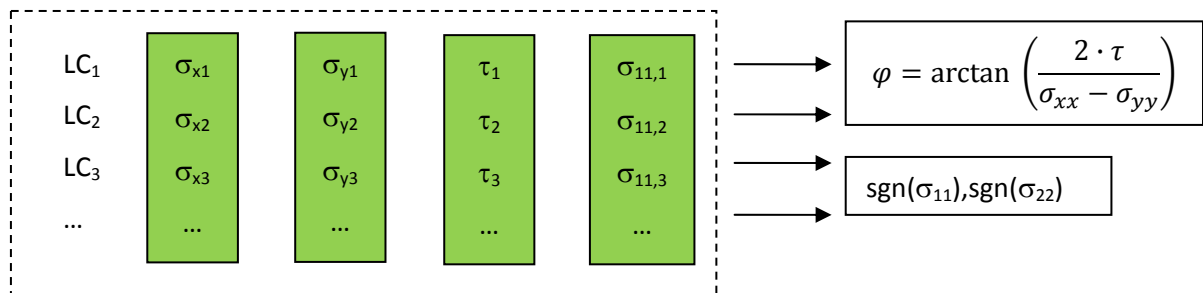
- FAT Klasse für Normalbeanspruchung in x Richtung (Eingabe als Zahl)
- FAT Klasse für Normalbeanspruchung in y Richtung (Eingabe als Zahl)
- FAT Klasse für Schubbeanspruchung (Eingabe als Zahl)
- „Thickness correction exponent“; Klassifiziert die Schweißverbindung für Wanddickenkorrektur
- Wanddicke in mm

Sonstige Parameter:

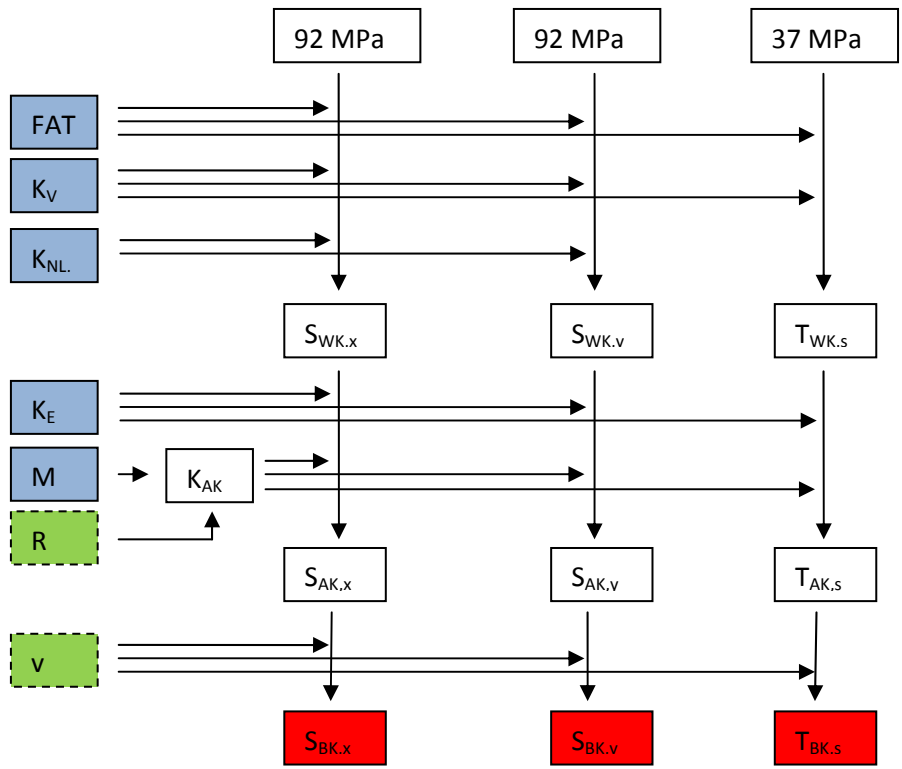
- Mittelspannungsempfindlichkeit für Normalspannung (als Wert)
- Mittelspannungsempfindlichkeit für Schubspannung (als Wert)
- Oberflächenverfestigungsfaktor K_V (als Wert)
- Eigenspannungsfaktor K_E für Normalspannung (als Wert)
- Eigenspannungsfaktor K_E für Schubspannung (als Wert)
- Zulässige Schädigung bei der Berechnung des Betriebsfestigkeitsfaktors (Std.: 0,5)
- j_{ges} Gesamtsicherheitsfaktor (als Wert)
- Berechnungsmethode („0“, „1“, „2“ oder „3“). Dieser Faktor beschreibt den Umgang mit mehraxialen Spannungen in der Berechnung. Beim Wert „0“ erfolgt die Berechnung automatisch durch Betrachtung des Rotationswinkels der Hauptnormalspannung und den Beträgen der HNS. Bei der Methode „1“ sollten die Spannungen proportional auftreten; bei Methode „2“ synchron, bei Methode 3 nichtproportional und asynchron.

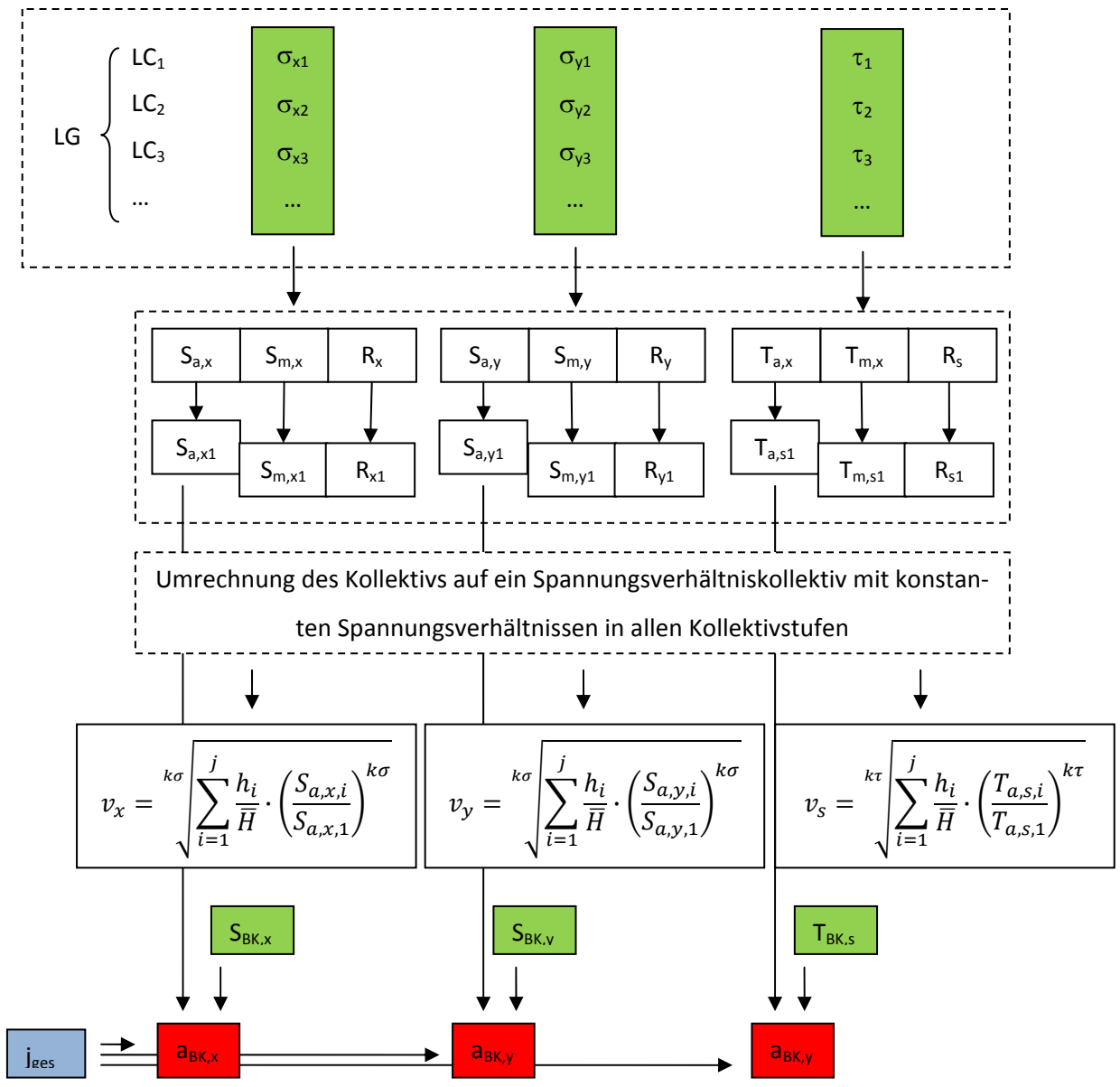
Berechnungsmethodik:

Winkelberechnung und HNS- Betrag für jeden Lastfall zur Unterscheidung der Mehrachsigkeit:



Berechnung der Bauteilbetriebsfestigkeit:





Mehrachsigsigkeitsfall →

$$1: a_{BK,Sv} = \frac{1}{2} \cdot \left(|a_{BK,x} + a_{BK,y}| + \sqrt{(a_{BK,x} - a_{BK,y})^2 + 4 \cdot a_{BK,s}^2} \right)$$

$$2: a_{BK,Sv} = \frac{1}{2} \cdot \left(|a_{BK,x} - a_{BK,y}| + \sqrt{(a_{BK,x} + a_{BK,y})^2 + 4 \cdot a_{BK,s}^2} \right)$$

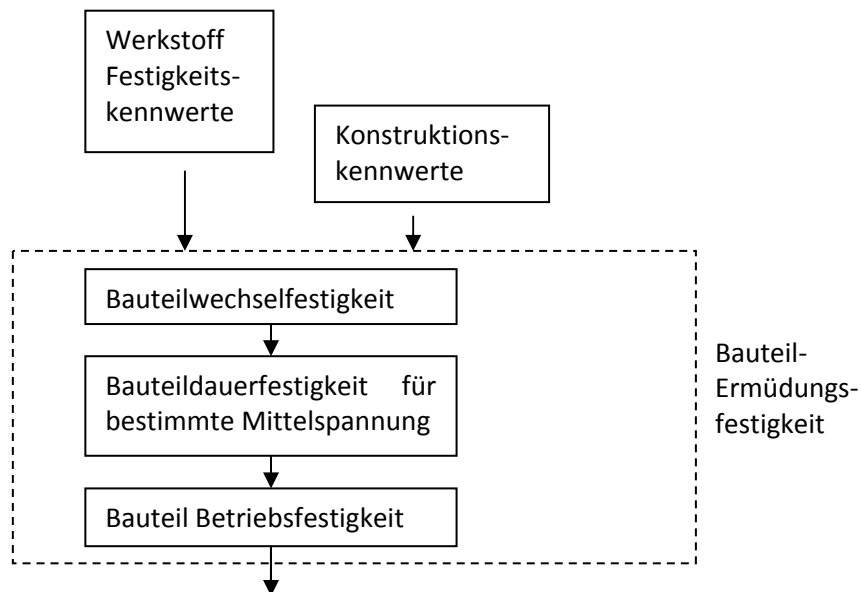
Basis der Berechnungen sind Wechselfestigkeitswerte von 92 MPa für Normalspannung und 37 MPa für Schubspannung.

Bei der Auswertung der Spannungen des Belastungskollektives muss die größte Stufenbeanspruchung und das Völligkeitsmaß, zur Beschreibung der Kollektivform berechnet werden.

$$v_{zd} = \sqrt[k_{\sigma}]{\sum_{i=1}^j \frac{h_i}{H} \cdot \left(\frac{S_{a,zd,i}}{S_{a,zd,1}}\right)^{k_{\sigma}}}$$

- v_{zd} Völligkeitsmaß
- k_{σ} Wöhlerlinienexponent (3 für Normalspannung, 5 für Schubspannung)
- h_i zugehörige Zyklenzahl je Kollektivstufe
- H Gesamtzyklenzahl des Kollektives
- $S_{a,zd,i}$ Spannungsamplitude je Kollektivstufe
- $S_{a,zd,1}$ Spannungsamplitude der größten Kollektivstufe

Dabei müssen, in einem allgemeinen Fall zuerst die Spannungsamplituden der einzelnen Stufen, mit Ausnahme der Größten, modifiziert werden, damit das gesamte Kollektiv das gleiche Spannungsverhältnis aufweist.



5.9 AWS

Der „Structural Welding Code – Steel“ der American Welding Society (AWS) bietet für die Ermüdungsfeste Auslegung von Schweißkonstruktionen nur eine äußerst eingeschränkte Berechnungsmethode an. Die Berechnungsmethode macht keinen Unterschied zwischen verschiedenen Belastungsszenarien (wie z.B. synchrone, asynchrone und proportionale, nichtproportionale Belastungen) und nimmt zur Berechnung der zulässigen Spannungsschwingbreite nur Nennspannungen und in diesem Fall auch ausschließlich Spannungen, die quer und längs zur Naht wirken, her. Ermüdungswirksam ist die Normalspannungs- bzw. bei Kehlnähten die Schubspannungsschwingbreite. Mittelspannungen werden vernachlässigt.

Eine lineare Schädigungsrechnung ist in „Teil D“ verfügbar; jedoch ist die Anwendung dieser Berechnungsmethodik für Rohrverbindungen eingeschränkt.

Aufgrund des unterschiedlichen Einheitensystems in Amerika liegen die Berechnungsformeln sowohl in amerikanischen, als auch europäischen (SI) Einheiten vor.

Die Grundgleichung der Wöhlerlinie lautet:

$$F_{SR} = \left(\frac{C_f}{N} \right)^n \geq F_{TH}$$

F_{SR}	zulässige Spannungsschwingbreite
F_{TH}	Dauerfestigkeitswert
C_f	Konstante der Wöhlerlinie
N	Lastwechselzahl
n	charakteristischer Exponent zur Wöhlerlinie

Lastfallabhängige Parameter:

- Schwingspielzahl N

Lokale Parameter:

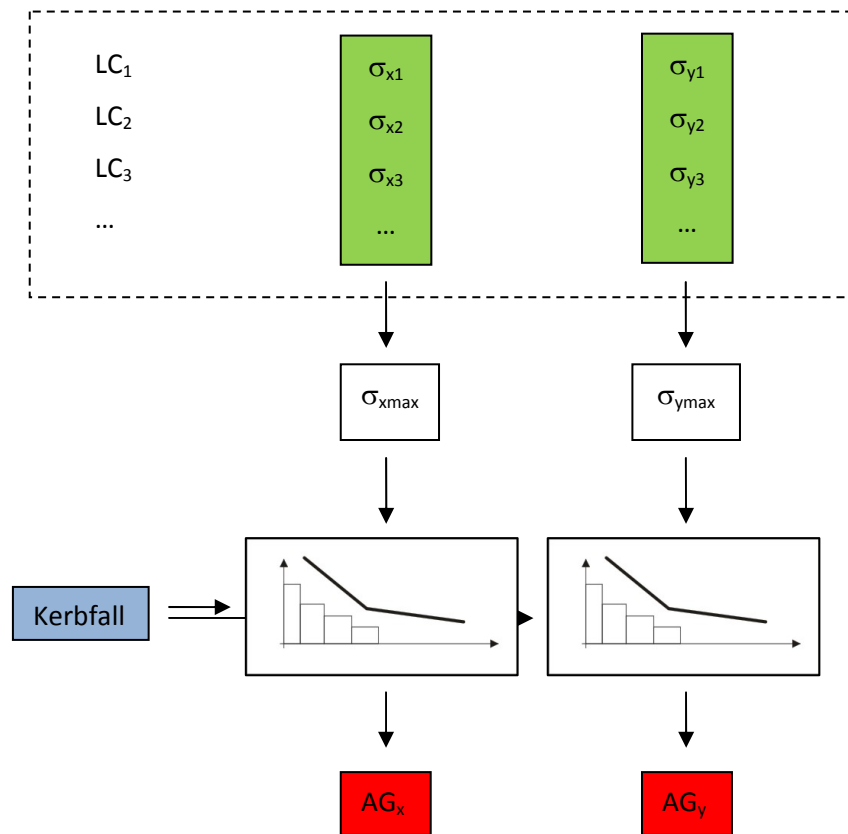
- Kerbfall für Normalbeanspruchung, quer zur Naht (Text)
 - „A“
 - „B“
 - „B““
 - „C“
 - „C““
 - „D“
 - „E“
 - „E““
 - „F“

- Kerbfall für Normalbeanspruchung, längs zur Naht (Text)
 - „A“
 - „B“
 - „B““
 - „C“
 - „C““
 - „D“
 - „E“
 - „E““
 - „F“

Sonstige Parameter:

- -keine-

Berechnungsmethodik:



6 Berechnungseinflüsse

Um die unterschiedlichen Berechnungsergebnisse zu begründen muss man die Methoden analysieren und die einzelnen Berechnungsparameter miteinander vergleichen. Die folgenden Vergleiche wurden inklusive aller Berechnungsparameter aufgestellt, d.h. eine Beanspruchung mit der genannten Spannungsamplitude oder Mittelspannung, kann folgende Lastwechselzahl, oder Spannungsamplitude ertragen bis es versagt.

6.1 Wöhlerlinien

Die meisten Berechnungsmethoden beruhen auf Wöhlerlinien. Die unterschiedlichen Interpretationen des Wöhlerversuchs für eine HV Naht sind in Abbildung 8 zu erkennen:

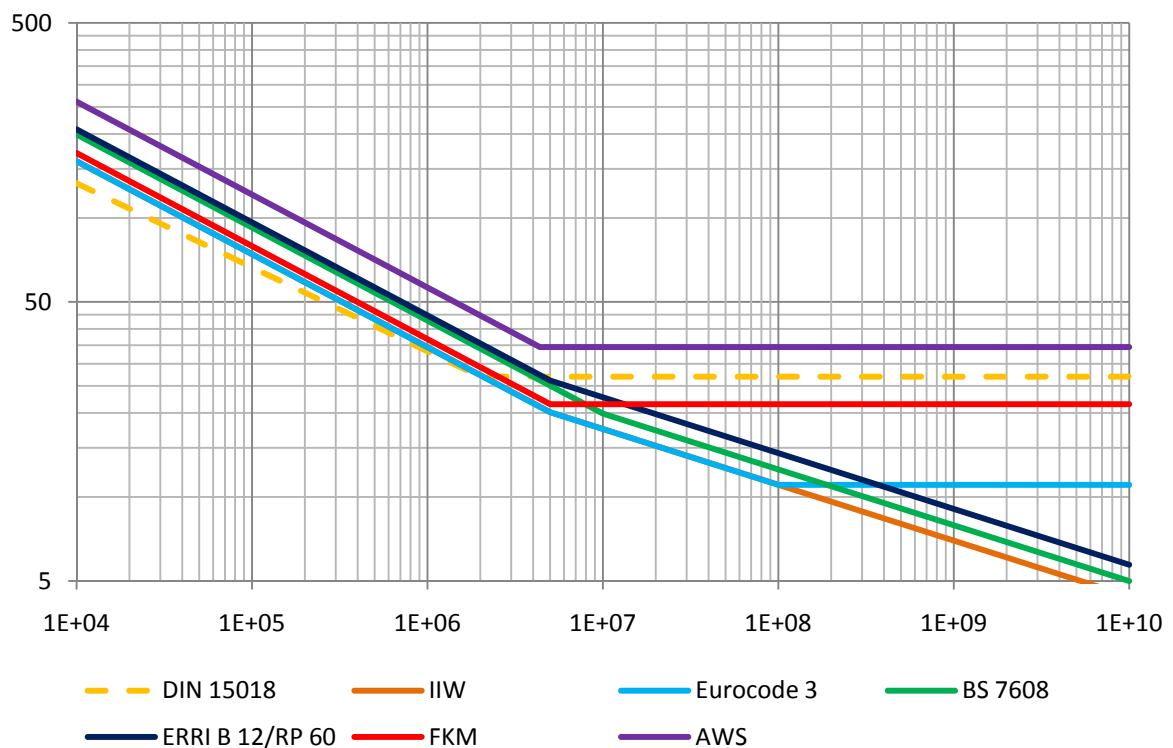


Abbildung 8: Wöhlerlinien

Die DS 952 und DVS 1612 haben keine Information bezüglich des zugehörigen Wöhlerversuchs enthalten.

Die DIN 15018 hat auch keine Wöhlerlinie hinterlegt – es kann jedoch auf Basis der Beanspruchungsgruppen und der zugehörigen zulässigen Werte eine Wöhlerlinie rückberechnet werden.

Die IIW Richtlinie verwendet eine Wöhlerlinie zur Bewertung, welche durch die Spannungsschwingbreite bei 2 Millionen Lastwechseln definiert ist; bei 5 Millionen Lastwechseln folgt ein Knick und sie wird flacher weitergeführt

Der Eurocode 3 verwendet eine Wöhlerlinie, die ähnlich charakterisiert wird, wie jene der IIW, jedoch existiert ein Dauerfestigkeitswert bei 10^8 Lastwechseln; unter diesem Wert ist keine Schädigung mehr zu erwarten.

Im British Standard wird die Wöhlerlinie nach dem Knickpunkt leichter gekrümmt fortgeführt; der Knickpunkt ist erst bei 10^7 Lastwechseln.

Die ERRI B 12/RP 60 verwendet die gleiche Wöhlerlinie wie die IIW Richtlinie; aufgrund des Teilsicherheitsfaktors bei der IIW Richtlinie sind sie nicht deckungsgleich.

Die FKM- Richtlinie hat eine Wöhlerlinie für Schweißverbindungen hinterlegt, die als „Miner- Original“ bezeichnet wird. Sie hat ab 5 Millionen Lastwechsel eine ausgeprägte Dauerfestigkeit (horizontale Linie).

Bei der Vorschrift der AWS wird die Wöhlerlinie ebenfalls durch einen Dauerfestigkeitswert und einer Wöhlerlinienkonstante definiert. Folglich kann sich die Knickpunktlastwechselzahl in Abhängigkeit des Kerbfalles ändern.

6.2 Mittelspannungen

Viele Berechnungsmethoden verhalten sich sehr konservativ beim Auftreten von Mittelspannungen und in der Berechnung werden sie manchmal komplett weggelassen. Der Grund dafür liegt in den hohen Eigenspannungen beim Schweißen. Sollten jedoch Maßnahmen zur Reduktion der Eigenspannungen ausgeführt werden lassen sich manche zulässigen Spannungsamplituden weiter steigern.

Die DIN 15018 hat eine Mittelspannungsabhängigkeit der zulässigen Spannungen unabhängig von den erwarteten Eigenspannungen enthalten:

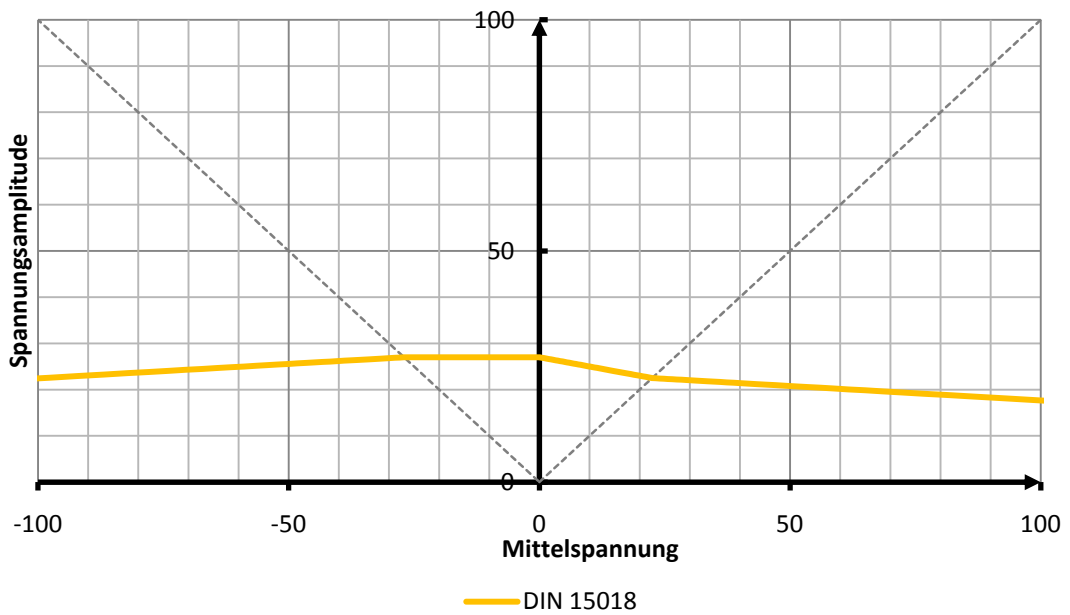


Abbildung 9: Mittelspannungseinfluss bei DIN 15018

Die Spannungsamplitude erfährt im Wechselfestigkeitsbereich und Schwellfestigkeitsbereich im Druck- als auch im Zugbereich Modifikationen.

Die IIW Richtlinie macht den Faktor, der die zulässige Spannungsamplitude modifiziert, abhängig von den Eigenspannungen. Bei geringen Eigenspannungen gilt Fall 1; bei hohen Eigenspannungen Fall 3

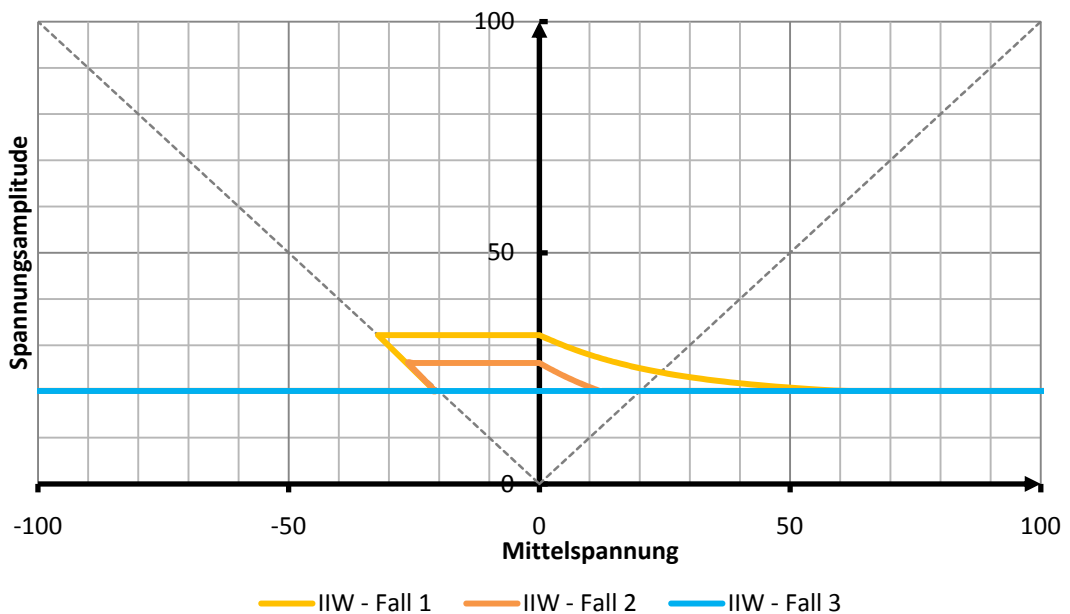


Abbildung 10: Mittelspannungseinfluss bei der IIW Richtlinie

Im Eurocode 3, beim BS 7608 und in der ERRI B 12/RP 60 haben Mittelspannungen keinen Einfluss auf die Berechnung. Allerdings ermöglicht das Spannungsarmglühen eine Modifikation der beanspruchungsseitigen Spannungsschwingbreite.

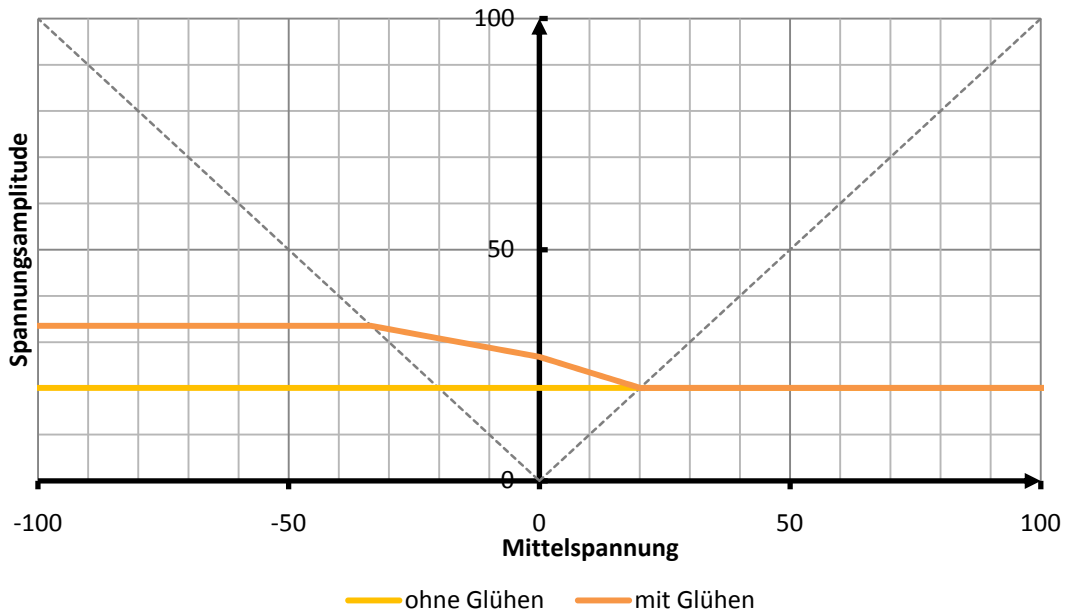


Abbildung 11: Mittelspannungsabhängigkeit bei Spannungsarmglühen

In der DVS 1612 und DS 952 findet eine Modifikation in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses statt, jedoch unabhängig von den zu erwartenden Eigenspannungen.

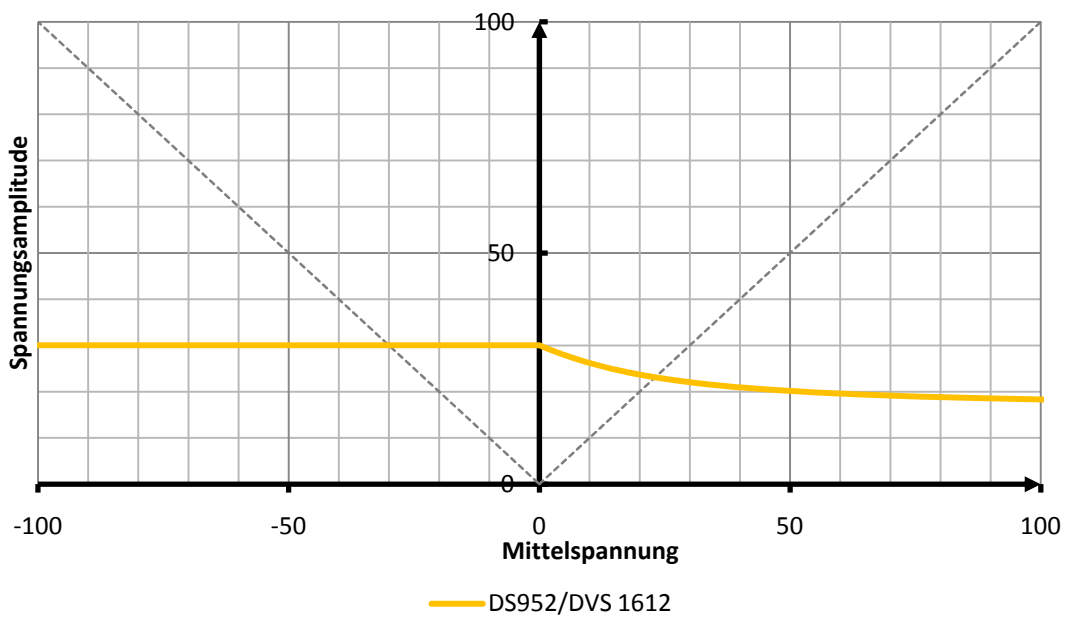


Abbildung 12: Mittelspannungseinfluss bei der DS952 und DVS1612

Wiederum anders wird die Mittelspannungsabhängigkeit bei der FKM Richtlinie interpretiert. Die Größe hierfür ist die Mittelspannungsempfindlichkeit. Sie nimmt in Abhängigkeit der erwartenden Eigenspannungen unterschiedliche Werte an. Bei geringen Eigenspannungen gilt $M = 0,00$; bei hohen Eigenspannungen $M = 0,30$. Das folgende Haigh Diagramm gilt für den Überlastfall F2

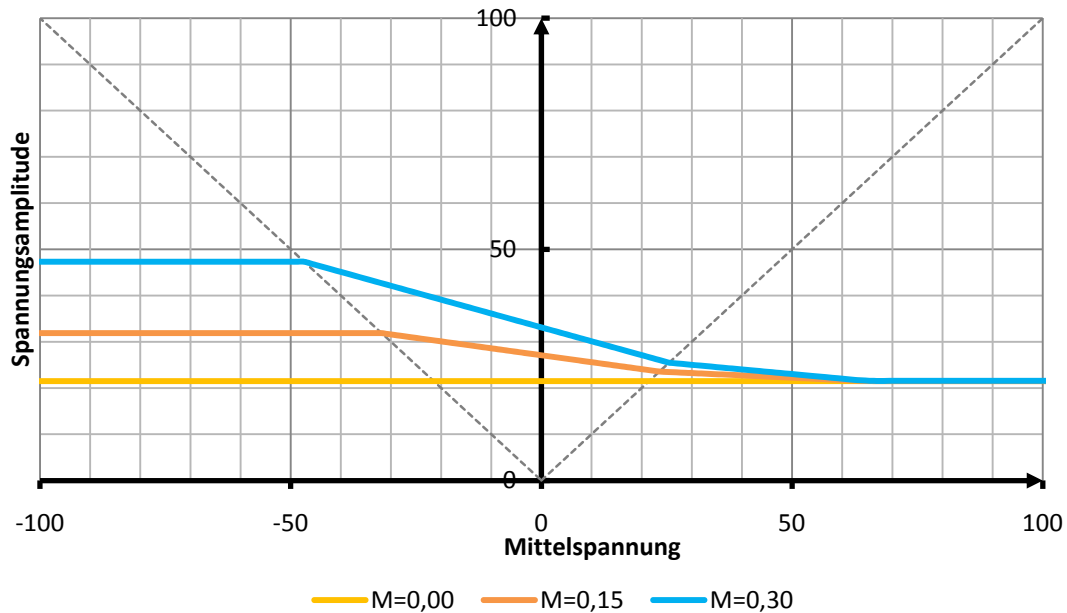


Abbildung 13: Mittelspannungseinfluss bei der FKM Richtlinie

Beim Nachweis nach AWS ist keine Mittelspannungsabhängigkeit zu berücksichtigen.

6.3 Schweißnahtnachbehandlung

Verschiedene Schweißnahtnachbehandlungsmethoden wirken sich positiv auf die Schwingfestigkeit des Werkstoffes aus. In den Berechnungsmethoden sind solche Modifikationen des Ermüdungswiderstandes teilweise vorhanden und werden in den folgenden Absätzen dargestellt.

Die DIN 15018 bietet keine Berechnungsmöglichkeit für nachbehandelte Schweißnähte an, jedoch sind in den Kerbfalltafeln verschiedene Nachbehandlungsarten erwähnt. Demzufolge können manche Schweißnähte bei einer Nachbehandlung, z.B. durch Kugelstrahlen, einer günstigeren Kerbfallkategorie zugeordnet werden.

Die IIW Richtlinie gibt Festigkeitssteigerungsfaktoren für Schleifen, TIG Dressing, Hämmern und Nageln an. Die zulässige Spannungsamplitude wird in Abbildung 14 für mittlere Eigenspannungen dargestellt.

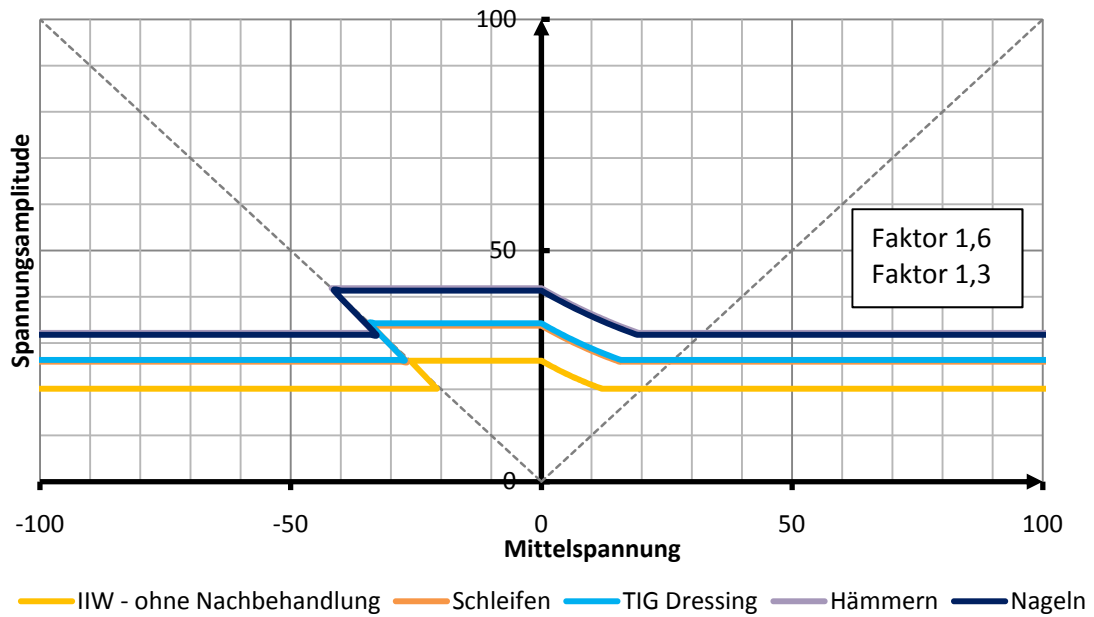


Abbildung 14: Einflüsse der Schweißnahtnachbehandlung bei der IIW

Im Eurocode 3 ist durch Spannungsarmglühen eine Festigkeitssteigerung im Druckbereich festzustellen, da die Druckspannungen im Lastwechsel nur mit 60% bewertet werden.

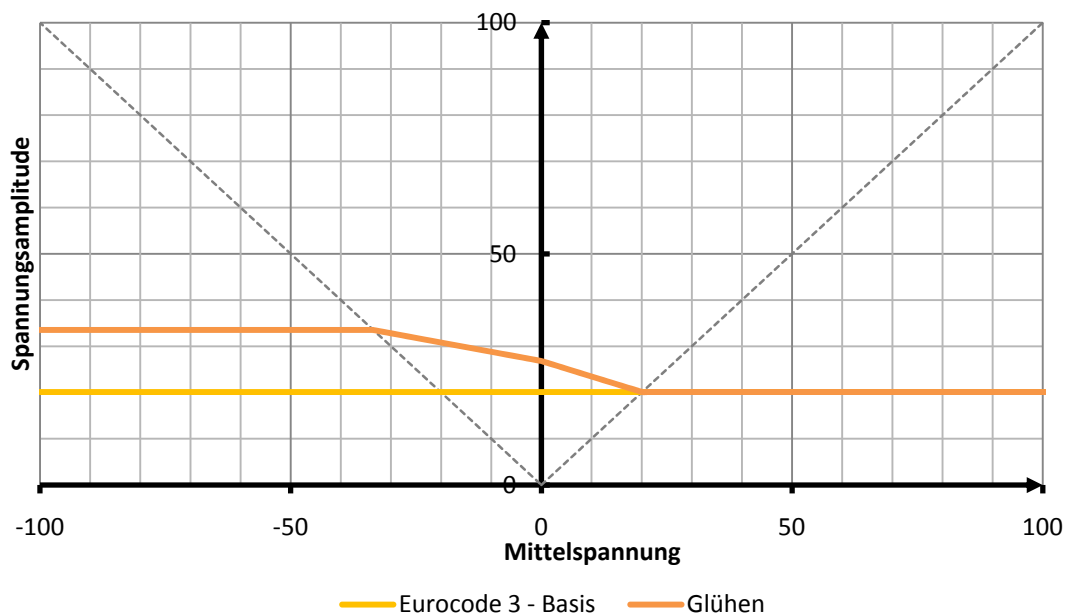


Abbildung 15: Einflüsse der Schweißnahtnachbehandlung beim Eurocode 3

Beim British Standard 7608 wird auf die Nachbehandlungsmethoden Spannungsarmglühen und Schleifen eingegangen. Wie beim Eurocode 3, werden nur 60% der Druckspannungen bei geglähten Bauteilen bewertet.

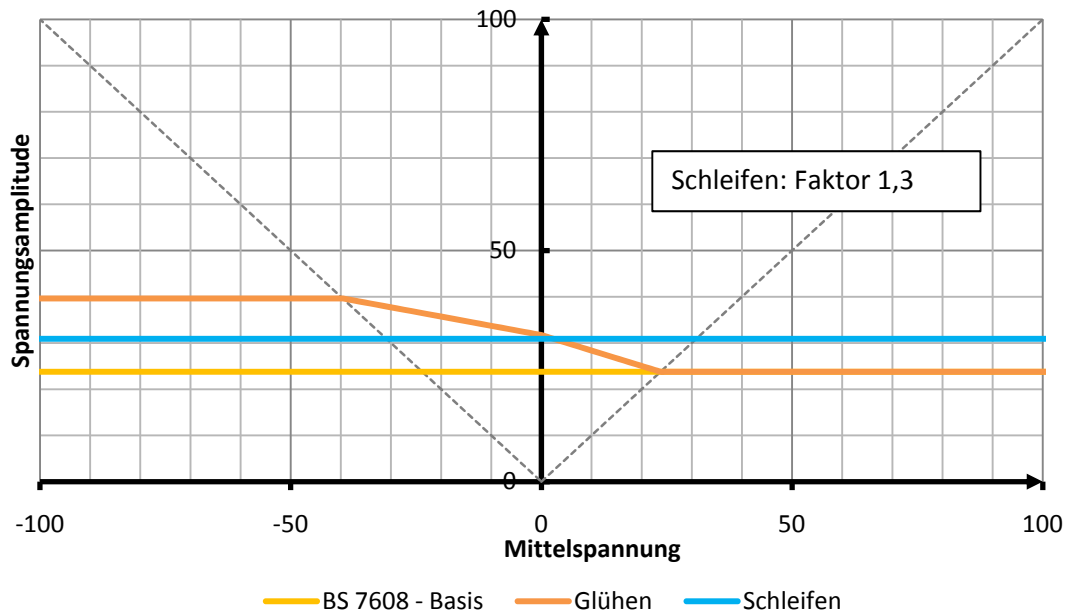


Abbildung 16: Einflüsse der Schweißnahtnachbehandlung im BS 7608

In der EN 12169 ist ebenfalls eine Modifikation der Druckspannung auf 60% für spannungsarmgeglühte Schweißnähte vorgesehen. Das Haigh Diagramm ist demzufolge gleich jenem des Eurocode 3. Siehe Abbildung 15.

Die DS 952 und DVS 1612 bieten keine Berechnungsmöglichkeiten an um eine Festigkeitssteigerung die sich in der Berechnung auswirkt zu erfahren.

Die FKM Richtlinie gibt Richtwerte für Oberflächenfaktor K_v an. Diese Werte gelten allerdings sowohl für Bauteile, als auch für Schweißnähte. Einige Verfahren machen bei Schweißnähten keinen Sinn. Die Festigkeitssteigerung durch Kugelstrahlen ist in der nachfolgenden Grafik für Bauteile mit mittleren Eigenspannungen angegeben.

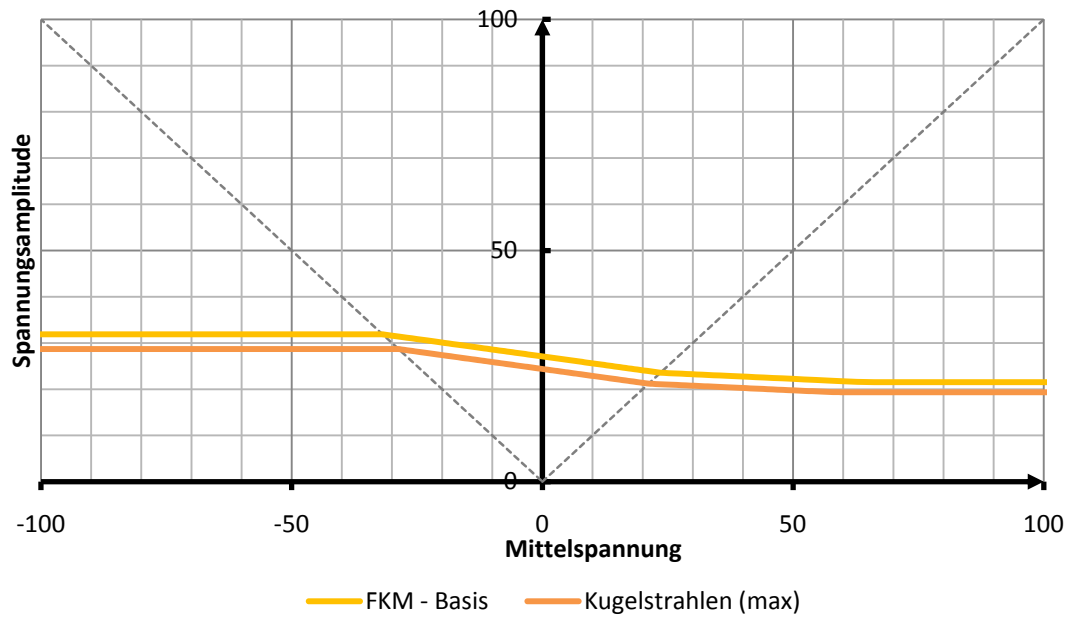


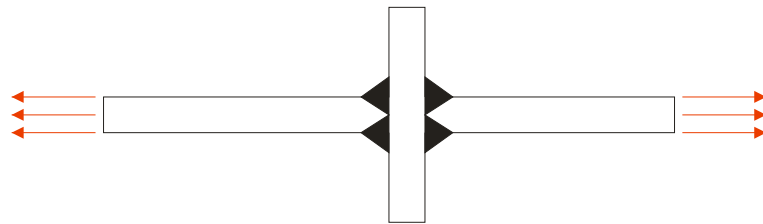
Abbildung 17: Schweißnahtnachbehandlungsmethoden nach der FKM Richtlinie

In der AWS Norm gibt es keine Methode, welche die Festigkeitssteigerung für den Betriebsfestigkeitsnachweis berechenbar machen würde.

6.4 Kerbfallzuordnung

Eine weitere große Unsicherheit besteht in der Kerbfallwahl. Die Kerbfalkataloge bieten oft nicht die gleichen Schweißnahtdetails an, wie sie in der Schienenfahrzeugbranche verwendet werden. Deshalb können hier große Unsicherheiten auftreten, welche an den folgenden zwei Beispielen illustriert werden.

6.4.1 Kreuzstoß mit K-Naht



Einstufige Belastung, Nennspannungsmethode

Dauerfestigkeit festgelegt bei $5 \cdot 10^6$ Lastwechsel

Werkstoff: S355 (St 52-3)

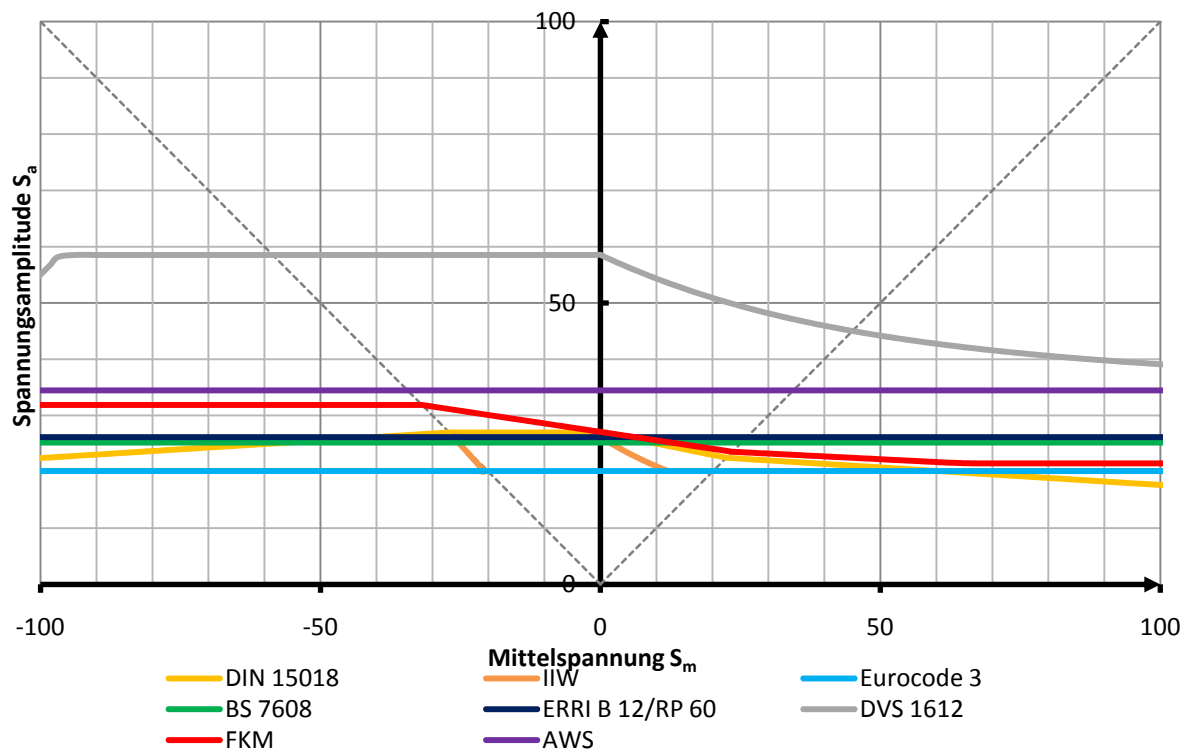


Abbildung 18: Haigh Diagramm nach verschiedenen Vorschriften für eine K-Naht

6.4.2 Stumpfstoß



Einstufige Belastung, Nennspannungsmethode

Dauerfestigkeit festgelegt bei Lastwechsel

Werkstoff: S355 (St 52-3)

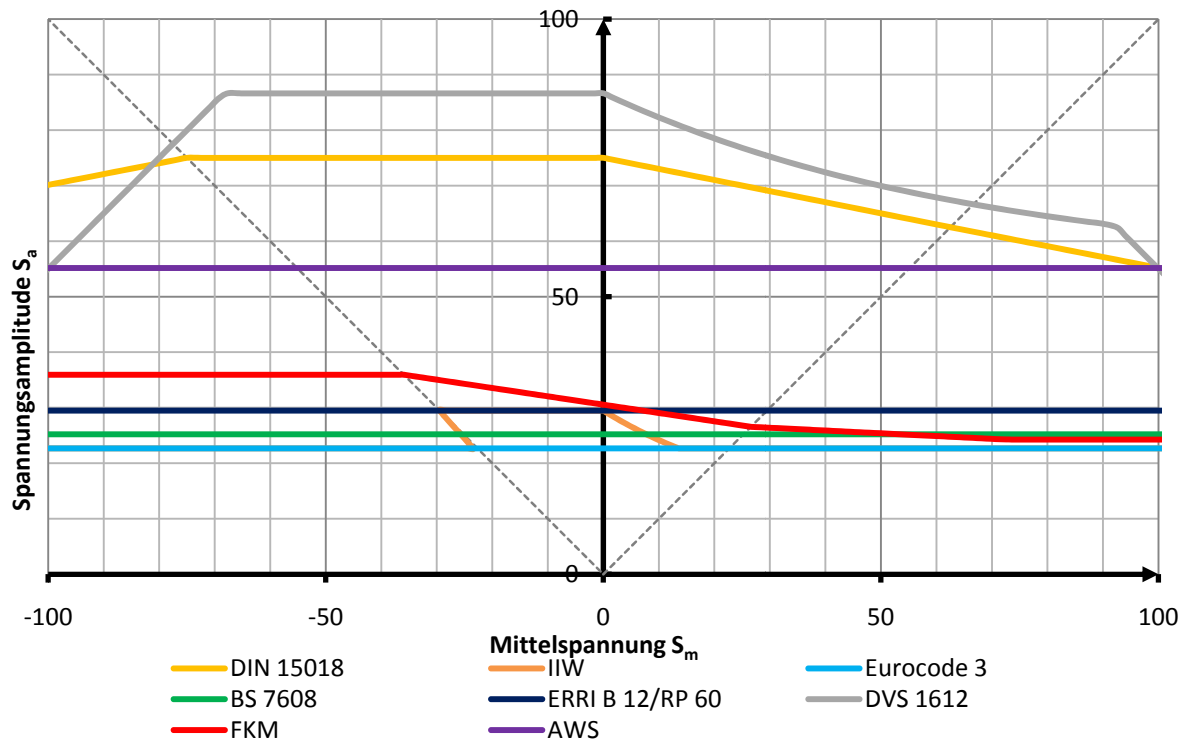


Abbildung 19: Haigh Diagramm nach verschiedenen Vorschriften für einen Stumpfstoß

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei der richtigen Einordnung des Schweißnahtdetails nach den Tafeln Schwierigkeiten auftauchen können und große Unsicherheiten vorhanden sind. Diese Unsicherheiten könnten durch den Einsatz der Kerbspannungsmethode eliminiert werden.

Im Vergleich zu anderen Berechnungsmethoden, sind jene Methoden, welche die FAT Klasse (Spannungsschwingbreite bei 2 Millionen Lastwechseln) zur Beschreibung der Wöhlerlinie verwenden, eher konservativ. In der Folge sind hohe Auslastungsgrade / Schädigungen zu erwarten.

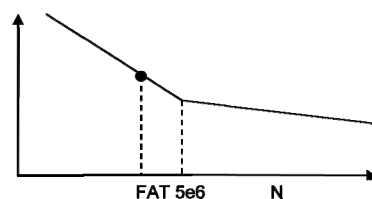


Abbildung 20: Darstellung der FAT Klasse

6.5 Sicherheiten gegen Bauteilversagen

DIN 15018	Die zulässigen Spannungen, wie sie tabellarisch für Wechselfestigkeit angegeben sind, entsprechen bei einer <u>Sicherheit von 4/3</u> der ertragbaren Spannungen bei <u>90 % Überlebenswahrscheinlichkeit</u> .
IIW Richtlinie	Alle Daten des Ermüdungswiderstandes werden als charakteristische Werte angegeben, wobei <u>eine Überlebenswahrscheinlichkeit von mindestens 95%</u> in Bezug auf einen <u>zweiseitigen Vertrauensbereich des Mittels von 75%</u> zugrundegelegt wird. Sicherheiten werden über die Teilsicherheitsfaktoren eingebracht.
Eurocode 3	Die ermittelten charakteristischen Werte für ein Schweißnahtdetail gelten für eine <u>Überlebenswahrscheinlichkeit des Bauteils von 95%</u> mit einer <u>Vertrauenswahrscheinlichkeit von 75%</u> . Sicherheiten werden über Teilsicherheitsfaktoren definiert
BS 7608	Aus dem Wöhlerversuch wird die Linie, welche der -2 fachen logarithmischen Standardabweichung entspricht zur Bewertung verwendet. Dies entspricht einer <u>Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,7%</u>
ERRI B 12/RP 60	Die angegebenen zulässigen Grenzwerte gelten für eine <u>Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,7%</u>
DS 952	Keine weiterführende Information
DVS 1612	Die zulässigen Dauerfestigkeitswerte der MKJ- Diagramme enthalten einen Sicherheitsfaktor von 1,5 und entsprechen damit einer <u>Überlebenswahrscheinlichkeit von 99,5%</u> . Sie gelten ab $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel
FKM	Die gegebenen Bauteilfestigkeitswerte haben eine <u>Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5%</u>
AWS	Keine weiterführende Information

6.5.1 Teilsicherheitsfaktor nach IIW Richtlinie

Die Bezeichnung Teilsicherheitsfaktor lässt sich daraus begründen, dass jeweils ein Faktor ermüdungsseitig die zulässigen Spannungen der im Versuch ermittelten Wöhlerlinie senkt und ein Faktor beanspruchungsseitig die Spannungen erhöht.

Der ermüdungsseitige Sicherheitsfaktor wird angewandt um eine Sicherheit gegenüber den ermittelten Werkstoffdaten zu haben. Je nach Anwendungsfall (z.B. ob Menschenleben vom Bauteilversagen abhängen würde) und zulässigem Bauteilversagen (z.B. schadenstoleranter oder dauerschwingfester Bauweise) werden verschiedene Sicherheiten vorgeschlagen, jedoch gelten diese Werte nicht als Empfehlung (Siehe Tabelle 2)

Der beanspruchungsseitige Sicherheitsfaktor dient dazu um Unsicherheiten in den Lastannahmen zu korrigieren. Die IIW Richtlinie gibt keine Beispielwerte für diesen Faktor an.

Im Eurocode 3 werden zum Nachweis der Schwingfestigkeit ebenfalls Teilsicherheitsfaktoren eingesetzt, die jenen nach der IIW Richtlinie sehr ähneln.

Tabelle 2: Beispiel für Teilsicherheitsfaktor

Teilsicherheitsfaktor γ_M Folge des Versagens:	Ausfallsichere und schadenstolerante Bauweise	Bemessung auf sichere Lebensdauer oder auf Dauerschwingfestigkeit
Verlust sekundärer Bauteile	1,0	1,15
Verlust des gesamten Tragwerks	1,15	1,30
Verlust menschlichen Lebens	1,30	1,40

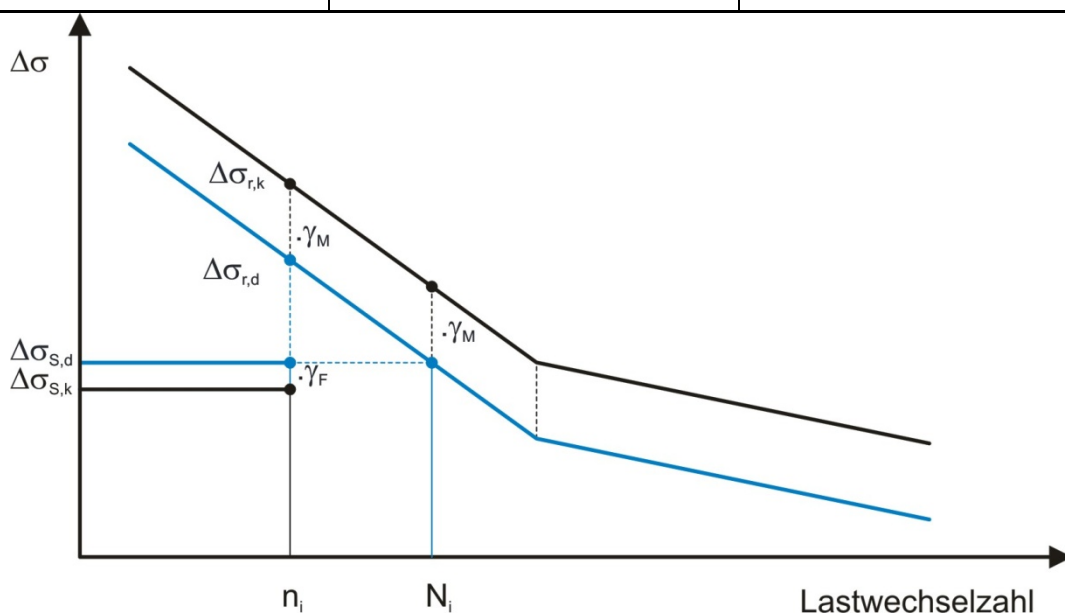


Abbildung 21: Graphische Darstellung der Teilsicherheitsfaktoren

6.5.2 Gesamtsicherheitsfaktor

Ein Gesamtsicherheitsfaktor wird in der FKM Richtlinie angewandt.

Der Grundsicherheitsfaktor bezüglich der Ermüdungsfestigkeit ist $j_D = 1,5$. Dieser Wert darf unter günstigen Voraussetzungen je nach Inspektionsmöglichkeiten und je nach Schadensfolgen vermindert werden.

Tabelle 3: Sicherheitsfaktor nach FKM

Gesamtsicherheitsfaktor j_D		Schadensfolgen	
		Hoch	Gering
Regelmäßige Inspektion	Nein	1,5	1,3
	Ja	1,35	1,2

Sicherheitsfaktoren gelten sowohl für *nichtgeschweißte*, als auch für *geschweißte* Bauteile.

Der Sicherheitsfaktor wird im Ermüdungsnachweis angewandt und mindert hier die zulässige Spannungsamplitude um jenen Faktor ab.

$$a_{BK} = \frac{S_{a,1}}{S_{BK}/j_{ges}} \leq 1$$

- a_{BK} Auslastungsgrad
- j_{ges} Gesamtsicherheitsfaktor
- $S_{a,1}$ Spannungsamplitude
- S_{BK} zugehörige Bauteil- Betriebsfestigkeit (ertragbare, größte Spannungsamplitude)

6.5.3 Überlebenswahrscheinlichkeiten der Wöhlerlinien

Im British Standard BS 7608 kann die Überlebenswahrscheinlichkeit der Wöhlerlinie aufgrund der statistischen Wöhlerversuchsergebnisse, welche zu den einzelnen Kerbfällen tabelliert angegeben sind, selbst bestimmt werden. Die Wöhlerliniengleichung sieht wie folgt aus:

$$\log(N) = \log(C_0) - \frac{d}{\sigma} - m \cdot \log(S_r)$$

- N Schwingspielzahl
- C_0 Wöhlerlinienkonstante
- d ist die Zahl der Standardabweichung ausgehend von $P_{\bar{0}} = 50\%$
- σ ist die Standardabweichung
- m Wöhlerlinienexponent
- S_t Spannungsschwingbreite (stress range)

Die entsprechenden Versuchswerte für C_0 , σ und m sind in den Kerbfallkategorien nachzulesen. Die Standardberechnung sieht eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,7% bei einer Abweichung von der zweifachen Standardabweichung von der Mitte vor.

6.6 Mehraxiale Ermüdung

6.6.1 Einachsige und mehrachsige Spannungen

Die im betrachteten Bauteilquerschnitt bzw. im Nachweispunkt eines Bauteils auftretenden Spannungen entstehen:

- Aus einer einzigen Belastung oder
- Aus mehreren, gleichzeitig wirkenden Belastungen

In beiden Fällen ergeben sich im Nachweispunkt

- Eine einachsige Spannung oder
- Mehrachsige Spannungen

Einachsige Spannungen entstehen nur unter besonderen Umständen, wie beispielweise bei einer Zugbelastung prismatischer Stäbe, oder an kräftefreien Kanten flächenförmiger oder volumenförmiger Bauteile, und das auch dann, wenn auf diese Bauteile mehrere Belastungen gleichzeitig einwirken. Erfahrungsgemäß dürfen darüber hinaus einachsige Spannungen im Nachweispunkt angenommen werden, wenn die weiteren Spannungen gering sind.

Im Allgemeinen entstehen in Bauteilen aber mehrachsige Spannungen. Im Nachweispunkt treten dann zwei oder drei Normalspannungen, bzw. Normalspannungen und Schubspannungen auf. (12 S. 16)

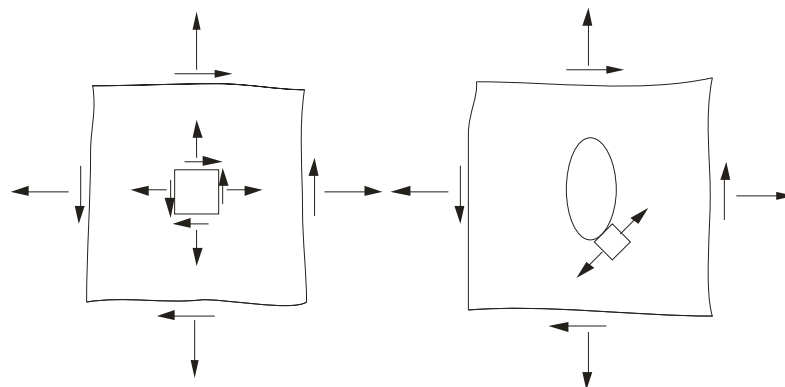


Abbildung 22: Einachsige und mehrachsige Spannungen

6.6.2 Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit mehraxialen Spannungen

Für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis sind zeitlich veränderliche Spannungen zu unterscheiden in proportionale Spannungen, synchrone Spannungen und nichtproportionale Spannungen

6.6.2.1 Proportionale Spannungen

Proportionale Spannungen entstehen in der Regel aus einer einzigen auf das Bauteil einwirkenden Belastung. Ist diese einzige einwirkende Belastung zeitlich veränderlich, so sind alle mehrachsigen Spannungen zur Belastung proportional; also auch hinsichtlich ihrer Amplituden und ihrer Mittelwerte. Als Folge ergeben sich bauteilbezogen konstante Hauptspannungsrichtungen. Die Beträge der Spannungen, auch in den Spannungskollektiven der Amplituden, sind mit konstanten Faktoren erreichbar. Proportionale mehrachsige Spannungen entstehen auch, wenn mehrere Belastungen gleichzeitig auf das Bauteil einwirken, die sich ihrerseits zeitlich proportional ändern. (12 S. 16)

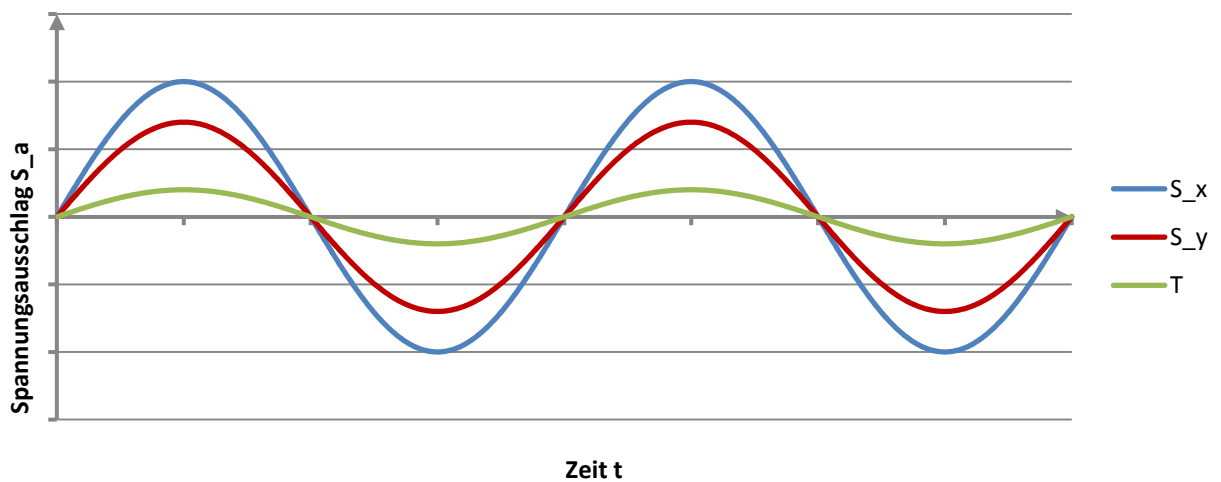


Abbildung 23: Proportionale, synchrone Belastungen

6.6.2.2 Synchrone Spannungen

Synchrone Spannungen sind ein einfacher Fall nichtproportionaler Spannungen. Sie sind hinsichtlich ihrer Amplituden proportional, aber hinsichtlich ihrer Mittelspannungswerte nichtproportional. Synchrone mehrachsige Spannungen entstehen beispielweise beim Zusammenwirken einer zeitlich veränderlichen Belastung mit einer zweiten konstanten Belastung. Die Richtung der Hauptspannung ändert sich in diesem Fall auch nicht. (12 S. 17)

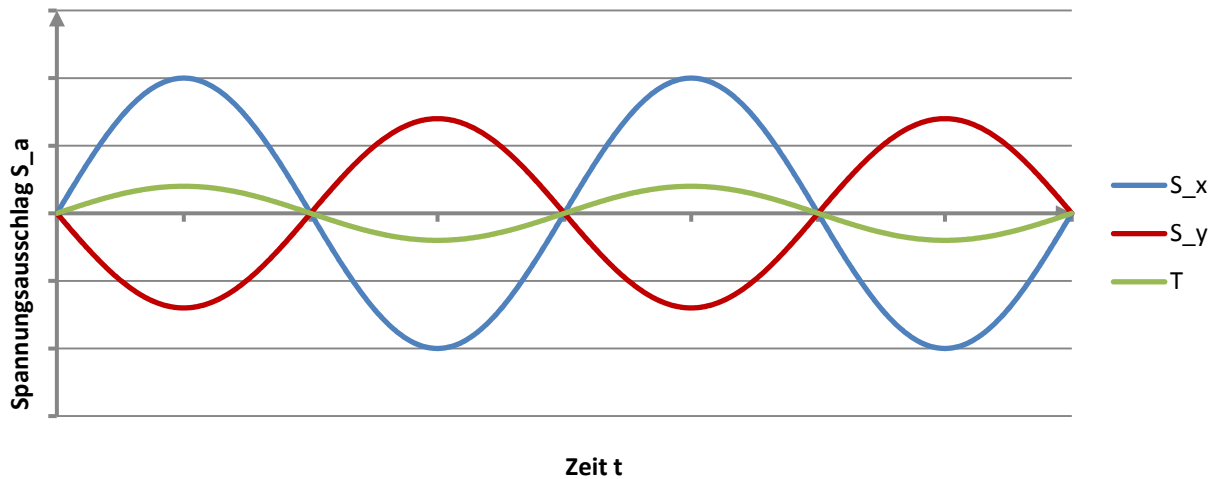


Abbildung 24: nicht-proportionale, synchrone Spannungen

6.6.2.3 Nichtproportionale Spannungen

Nichtproportionale Spannungen entstehen, wenn auf das Bauteil mindestens zwei verschiedenartige und in unterschiedlicher Weise zeitlich veränderliche Belastungen einwirken. Für die einzelnen Belastungen und für die daraus entstehenden Spannungen gelten im Allgemeinen unterschiedliche Belastungskollektive. Im allgemeinen Fall nichtproportionaler mehrachsiger Spannungen sind die Beträge und Richtungen der Hauptnormalspannungen zeitlich veränderlich. (12 S. 17)

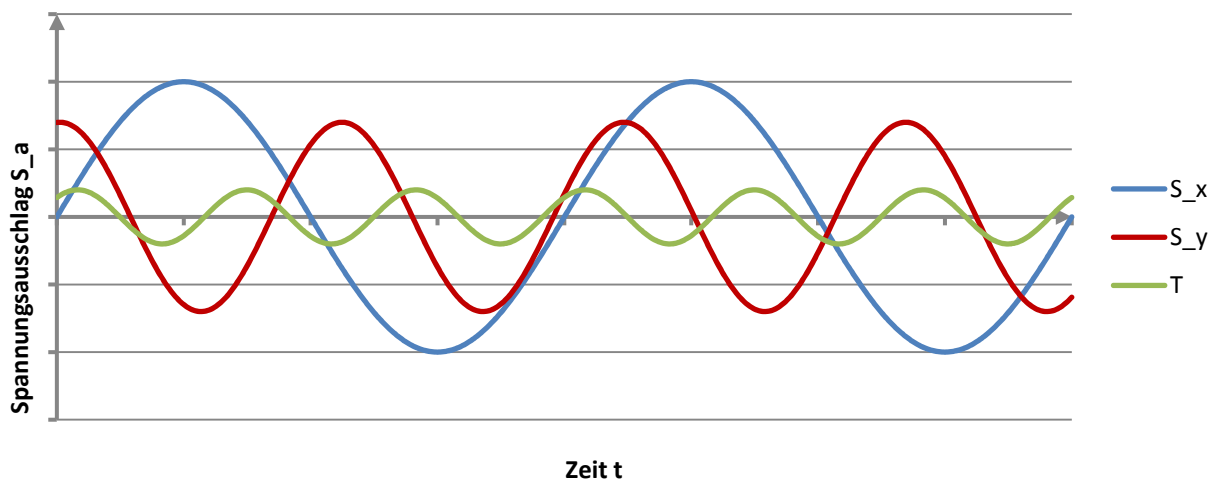


Abbildung 25: Nichtproportionale, nichtsynchrone Spannungen

In der Berechnung lassen sich die 3 Fälle auch unterscheiden, denn für jede Spannungssituation lassen sich die Hauptnormalspannungen und deren Winkel berechnen.

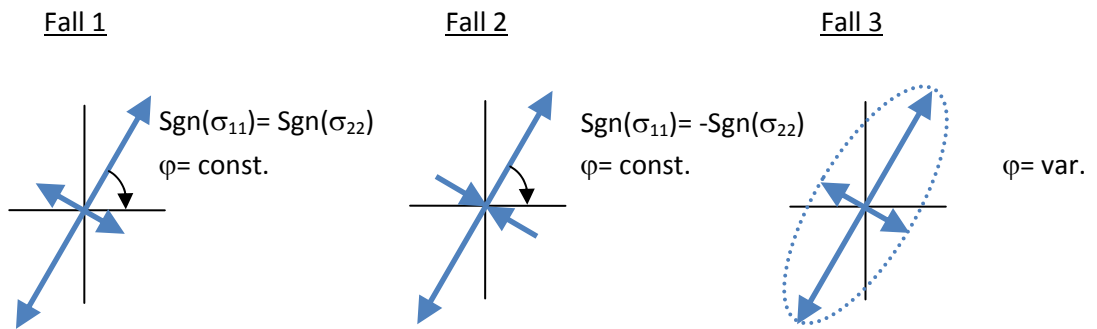


Abbildung 26: Fallunterscheidungen in der Berechnung

6.6.3 Berechnungsmethoden bei mehraxialer Beanspruchung

DIN 15018:

Die DIN 15018 bildet einen Vergleichsauslastungsgrad durch Kombination der verschiedenen Auslastungsgrade:

$$\left(\frac{\sigma_x}{\text{zul } \sigma_{xD}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\text{zul } \sigma_{yD}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_x \cdot \sigma_y}{|\text{zul } \sigma_{xD}| \cdot |\text{zul } \sigma_{yD}|}\right) + \left(\frac{\tau}{\text{zul } \tau_D}\right)^2 \leq 1.1$$

σ_x	maximale Spannung in x- Richtung
σ_y	maximale Spannung in y- Richtung
τ	maximale Schubspannung
zul σ_{xD}	zulässige Spannung in x-Richtung
zul σ_{yD}	zulässige Spannung in y-Richtung
zul τ_D	zulässige Schubspannung

IIW:

Die IIW Richtlinie macht einen Unterschied zwischen proportionaler Beanspruchung und nichtproportionaler Beanspruchung. Grundsätzlich ist für variable Spannungsamplituden eine maximale Schädigung von 0,5 erlaubt. Sollten die Hauptspannungsvektoren während der Lastzyklen mehr als 20° rotieren, so darf das „Control Value“ nicht größer als 0,5 werden; ansonsten gilt 1,0

In der Berechnung des CV Wertes werden die Auslastungsgrade für Normalspannung und für Schubspannung jeweils zum Quadrat addiert.

$$\left(\frac{\sigma_{S,d}}{\sigma_{R,d}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{S,d}}{\tau_{R,d}}\right)^2 \leq CV$$

$\sigma_{S,d}$	Konstruktionswert der Äquivalentspannungsschwingbreite der Normalspannung
$\tau_{S,d}$	Konstruktionswert der Äquivalentspannungsschwingbreite der Schubspannung
$\sigma_{R,d}$	Konstruktionswert des Ermüdungswiderstandes bei Normalspannung
$\tau_{R,d}$	Konstruktionswert des Ermüdungswiderstandes bei Schubspannung

Eurocode 3:

Im Eurocode 3, Teil 9 Ermüdung werden, ähnlich wie bei der IIW Richtlinie die Auslastungsgrade potenziert und danach miteinander addiert. Die Teilsicherheitsfaktoren sind hier noch mit einzurechnen; in der IIW Richtlinie sind die Spannungswerte (gekennzeichnet durch den Index d) bereits mit den Teilsicherheitsfaktoren modifiziert.

$$\left(\frac{\sigma_{E,2} \cdot \gamma_F}{\sigma_C / \gamma_M}\right)^3 + \left(\frac{\tau_{E,2} \cdot \gamma_F}{\tau_C / \gamma_M}\right)^5 \leq 1$$

$\sigma_{E,2}$	Äquivalentspannungsschwingbreite für Normalspannung
$\tau_{E,2}$	Äquivalentspannungsschwingbreite für Schubspannung
σ_C	Spannungsschwingbreite der Normalspannung bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln
τ_C	Spannungsschwingbreite der Normalspannung bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln
γ_M	Teilsicherheitsfaktor für den Ermüdungswiderstand
γ_F	Teilsicherheitsfaktor für die Belastung

Im Eurocode gibt es keinen Hinweis darauf, dass bei nichtproportionalen Spannungen ein geringerer Wert als 1 erlaubt sein könnte.

Durch Wahl der Potenzen von 3 für den Normalspannungsauslastungsgrad und 5 für den Schubspannungsauslastungsgrad bedeutet die Formel vorhin nichts Geringeres als die Summe der Schädigungen für Normalspannung und Schubspannung, da folgender Zusammenhang gilt:

$$AG = \sqrt[m]{D}$$

AG	Auslastungsgrad
m	Wöhlerlinienexponent
D	Schädigung

BS 7608:

Im British Standard wird zur Bewertung der Betriebsfestigkeit die Hauptnormalspannung, welche näher quer zur Naht zeigt zur Bewertung verwendet. Ansonsten sind keine weiteren Vergleichsspannungsrechnungen vorgesehen.

ERRI B 12/RP 60:

Die ERRI B 12/RP 60 Versuchsnorm verwendet in ihrer Bewertung die Spannungsschwingbreite der maximalen Hauptnormalspannung zu der in derselben Richtung liegenden minimalen Hauptnormalspannung. Durch dieses Verfahren verlieren mehraxiale Spannungen komplett an Bedeutung, jedoch ist die Bewertung mit Hauptnormalspannungen grundsätzlich sensibler.

DS 952:

In der DS 952 wird eine Bewertung nach einer Vergleichsspannung festgelegt. Es wird jedoch nicht weiter verwiesen auf welche. Aus der Literaturquelle „Praxiswissen Schweißtechnik“ (14) kann entnommen werden, welche Vergleichsspannung verwendet werden kann:

$$\left(\frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{\perp,zul}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{||}}{\tau_{||,zul}}\right)^2 \leq 1$$

σ_{\perp} maximale Spannung quer zur Naht
 $\tau_{||}$ maximale Schubspannung
zul $\sigma_{\perp,zul}$ zulässige Spannung quer zur Naht
zul $\tau_{||,zul}$ zulässige Schubspannung

DVS 1612:

Die DVS 1612 Berechnungsvorschrift verwendet die gleiche Methode zur Bildung eines Vergleichswertes bei mehraxialer Beanspruchung wie die DIN 15018. Aufgrund der verschiedenen zulässigen Werte ist das Ergebnis jedoch nicht ident.

$$\left(\frac{\sigma_x}{zul \sigma_{xD}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{zul \sigma_{yD}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_x \cdot \sigma_y}{|zul \sigma_{xD}| \cdot |zul \sigma_{yD}|}\right) + \left(\frac{\tau}{zul \tau_D}\right)^2 \leq 1.1$$

σ_x maximale Spannung in x- Richtung
 σ_y maximale Spannung in y- Richtung
 τ maximale Schubspannung
zul σ_{xD} zulässige Spannung in x-Richtung
zul σ_{yD} zulässige Spannung in y-Richtung
zul τ_D zulässige Schubspannung

FKM- Richtlinie:

Die FKM- Richtlinie hat die detaillierteste mathematische Formulierung bei mehrachsigen Spannungen. Im Vorhinein ist eine Unterscheidung ob proportionale, synchrone oder nichtproportionale Spannungen auftreten, zu treffen.

Bei proportionalen Spannungen gilt folgender Vergleichsauslastungsgrad, der per Definition kleiner als 1 sein muss, um den Betriebsfestigkeitsnachweis zu erfüllen:

$$a_{BK,Sv} = \frac{1}{2} \cdot \left(|a_{BK,x} + a_{BK,y}| + \sqrt{(a_{BK,x} - a_{BK,y})^2 + 4 \cdot a_{BK,s}^2} \right)$$

$a_{BK,Sv}$	Vergleichsauslastungsgrad
$a_{BK,x}$	Auslastungsgrad in x- Richtung
$a_{BK,y}$	Auslastungsgrad in y- Richtung
$a_{BK,s}$	Auslastungsgrad für Schubbeanspruchung

Bei synchroner, aber nicht proportionaler Beanspruchung gilt ein ähnlicher Vergleichsauslastungsgrad. Bei dieser Belastungsart wird der Vergleichsauslastungsgrad geringer, d.h. die Materialermüdung ist in diesem Lastfall geringer.

$$a_{BK,Sv} = \frac{1}{2} \cdot \left(|a_{BK,x} - a_{BK,y}| + \sqrt{(a_{BK,x} + a_{BK,y})^2 + 4 \cdot a_{BK,s}^2} \right)$$

$a_{BK,Sv}$	Vergleichsauslastungsgrad
$a_{BK,x}$	Auslastungsgrad in x- Richtung
$a_{BK,y}$	Auslastungsgrad in y- Richtung
$a_{BK,s}$	Auslastungsgrad für Schubbeanspruchung

Bei nichtproportionaler Beanspruchung ist für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit eine Näherungslösung anzuwenden. Die Begründung dafür ist:

Nichtproportionale mehrachsige Spannungen entstehen, wenn auf das Bauteil mindestens zwei verschiedenartige und in unterschiedlicher Weise zeitlich veränderliche Belastungen einwirken. Für die einzelnen Belastungen gelten im Allgemeinen unterschiedliche Belastungskollektive.

Unter der Einwirkung der Belastungen entsteht im Nachweispunkt ein mehrachsiger Spannungszustand, bei dem die Beträge und die Richtungen der Hauptnormalspannungen zeitlich veränderlich und die Spannungskollektive der drei Hauptnormalspannungen, wie auch aller anderer Spannungskomponenten unterschiedlich sind.

Demgegenüber ergibt eine gesonderte Berechnung für eine einzelne Belastung im Nachweispunkt einen zeitlich proportional veränderlichen Spannungszustand mit bauteilbezogen konstanten Hauptspannungsrichtungen, und alle Spannungskollektive sind (bis auf einen Faktor in Spannungsrichtung) identisch mit dem Belastungskollektiv.

Für jede einzelne Belastung kann also ein Auslastungsgrad berechnet werden. Der für jede einzelne Belastung ermittelte Auslastungsgrad ist dann linear zu einem Gesamtauslastungsgrad zu addieren.

Im Prinzip ist mit der linearen Addition der Auslastungsgrade die denkbar ungünstigste Interaktion unterstellt. (12 S. 226)

Demzufolge ist folgende Berechnung auszuführen:

$$a_{BK,Sv,ges} = a_{BK,Sv,I} + a_{BK,Sv,II} + a_{BK,Sv,III} + \dots$$

$a_{BK,Sv,ges}$ Gesamtvergleichsauslastungsgrad
 $a_{BK,Sv,i}$ Auslastungsgrad zufolge der Belastung i

AWS:

Hier ist keine Vergleichsspannungsbildung vorgesehen.

7 Auswertung

Als Basis für die punktuell automatisierte Betriebsfestigkeitsauswertung diente ein London Underground Drehgestell. Dieses Drehgestell wird aktuell von der Firma Siemens Mobility am Standort Graz, Eggenberg gefertigt. Es wurde an 154 kritischen Punkten nach den verschiedenen Methoden ausgewertet und die Ergebnisse verglichen.

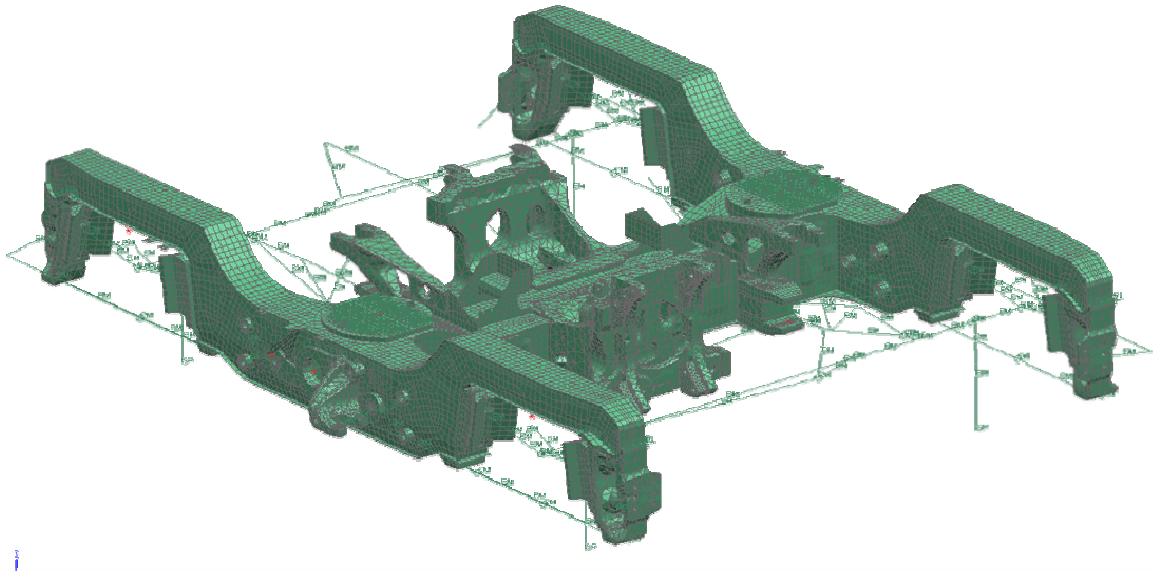


Abbildung 27: FE- Strukturmodell des Drehgestell- Rahmens

Für den Drehgestellrahmen lagen Berechnungsergebnisse für verschiedene Grundlastfälle vor; diese Grundlastfälle wurden mit Hilfe einer Überlagerungsmatrix, welche aus einem eigenen Lastannahmenmodell ermittelt wurde, zu den tatsächlichen Beanspruchungen je nach Lastfall linear überlagert.

Zur Verfügung standen sämtliche Betriebslasten, wie sie nach VDV 152 auftreten, die UIC Lastfälle und die Lasten nach „LUL Document 2-01202-025“, welche vom Kunden, der Betreibergesellschaft der Londoner U-Bahn, gefordert worden waren.

Die Berechnungsmethodik zu den Spannungen der einzelnen Lastfälle wird in der nächsten Grafik dargestellt.

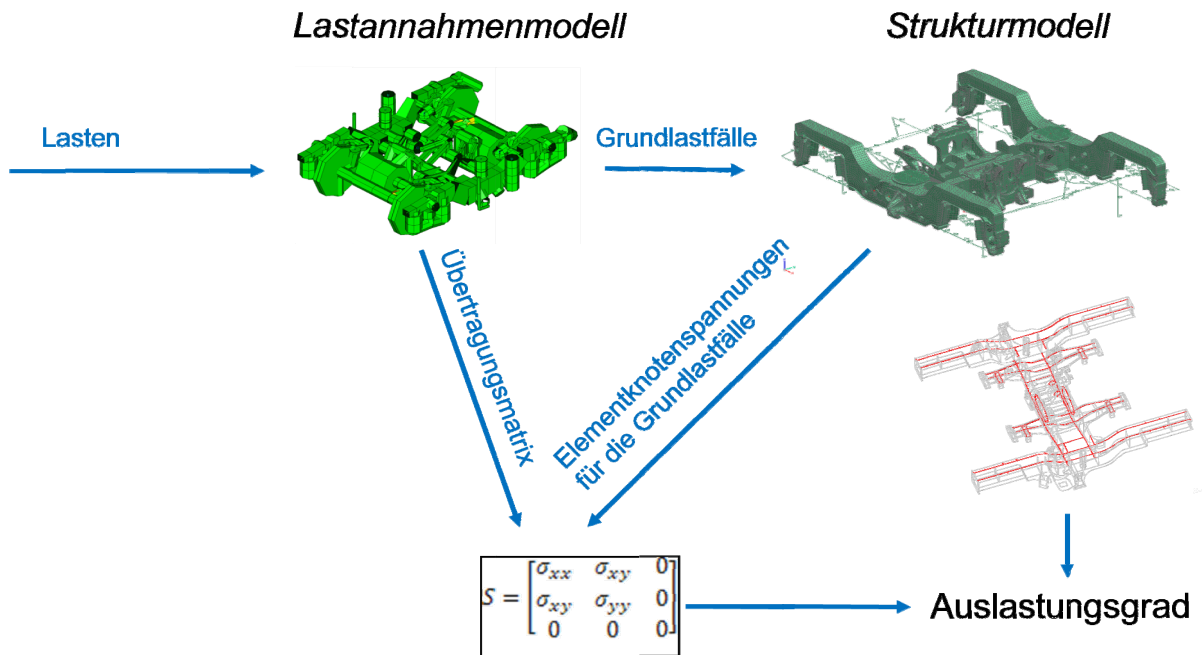


Abbildung 28: Schema der Spannungsberechnung

7.1 Bewertete Schweißnähte

Die in der folgenden Tabelle angeführten Schweißnahttypen wurden ausgewertet. Diese Schweißnahtdetails unterscheiden auch, auf welcher Seite die Top bzw. Bottom Spannungen auftreten; deshalb kommen hier einige Schweißnahtdetails doppelt vor. In der späteren Auswertung wird auf diese Unterscheidung verzichtet. In den Schweißnahtdetails werden die „Top“ Seiten stets mit Volllinien markiert, die „Bottom“ Seiten haben punktierte Linien.

Die Kerbstelle wird mit folgendem Code gekennzeichnet:

„Typ/Elementband+Top/Bottom“ z.B.: „6/1b“ bezeichnet hier den Kerbfall für Schweißnahtdetail Typ 6, Gurtzug (Elementband 1) und Bottom Elementspannungen.

6		T- Stoß mit HY Naht
---	--	------------------------

<p>7</p>		<p>T- Stoß mit HY Naht und Gegalage</p>
<p>8</p>		<p>Kreuzstoß mit HY- Naht</p>
<p>9</p>		<p>T- Stoß mit HY Naht</p>
<p>15</p>		<p>T Stoß mit K- Naht</p>

16		T Stoß mit K-Naht
17		T- Stoß mit HY Naht mit Gegelage
21		T- Stoß mit HY Naht
22		Stumpfstoßverbindung verschiedener Blech- dicken

<p>23</p>		<p>Stumpfstoß mit Schweißbadsicherung</p>
<p>25</p>		<p>T- Stoß mit einseitiger Kehlnaht</p>

7.2 Kerbfallzuordnung

Für die Kerbdetails in der vorigen Tabelle wurden nun die Kerbfallkategorien, Spannungsschwingbreiten oder auch Dickenkorrekturpotenzen in maximal 4 Spalten für jede einzelne Berechnungsmethode mit bestem Gewissen erstellt.

	1 DIN 15018			2 IIW				3 Eurocode 3				4 BS 7608			
	x	y	s	FAT_S	FAT_T	m	n	S_C	T_C	m	k_s	Kx			
12/2b	K4	K1	T1	36	80	3	0,2	36	80	3		f2			
12/2t	K4	K1	T1	36	80	3	0,2	36	80	3		f2			
15/2b	K3	K1	T1	63	100	3	0,3	63	100	3		f			
15/2t	K3	K1	T1	63	100	3	0,3	63	100	3		f			
16/1t	W0			125	100	3	0,3	125	100	3		f			
16/3b	K2	K1	T0	80	100	3	0,3	80	100	3		f			
17/2b	K3	K1	T1	71	100	3	0,3	71	100	3		f			
17/2t	K2	K1	T0	80	100	3	0,3	80	100	3		e			
21/2b	K2	K1	T0	71	100	3	0,3	71	100	3		f			
21/2t	K4	K1	T1	36	100	3	0,3	36	100	3		f2			
22/1b	K3	K1	T1	71	100	3	0,2	71	100	3		f			
22/1t	K1	K1	T0	71	100	3	0,2	71	100	3		e			
22/2b	K3	K1	T1	71	100	3	0,2	71	100	3		f			
22/2t	K1	K1	T0	71	100	3	0,2	71	100	3		e			
23/1b	K2	K1	T0	80	100	3	0,2	80	100	3		d			
23/1t	K1	K1	T0	80	100	3	0,2	80	100	3		d			
23/2b	K2	K1	T0	80	100	3	0,2	80	100	3		d			
23/2t	K1	K1	T0	80	100	3	0,2	80	100	3		d			
25/2t	K4	K1	T1	36	80	3	0,2	36	80	3		f			
31/1b	K4	K1	T1	40	80	3	0,2	40	80	3		f2			
31/1t	K2	K1	T0	71	80	3	0,2	71	80	3		e			
6/2b	K2	K1	T0	71	100	3	0,3	71	100	3		f2			
6/2t	K2	K1	T0	71	100	3	0,3	71	100	3		f			
6/3b	K3	K1	T1	80	100	3	0,3	80	100	3		f2			
6/3t	W0			125	100	3	0,3	125	100	3		f			
7/2b	K3	K1	T1	63	100	3	0,3	63	100	3		f			
7/2t	K2	K1	T1	71	100	3	0,3	71	100	3		f			
8/1b	K4	K1	T1	36	100	3	0,3	36	100	3		f2			
8/1t	K2	K1	T0	71	100	3	0,3	71	100	3		f			
8/2b	K3	K1	T1	71	100	3	0,3	71	100	3		f			
8/2t	K3	K1	T1	71	100	3	0,3	71	100	3		f			
9/1b	W0			125	100	3	0,3	125	100	3		b			
9/1t	K2	K1	T0	71	100	3	0,3	71	100	3		f			
9/2b	K4	K1	T1	71	100	3	0,3	71	100	3		f2			
9/2t	K2	K1	T0	71	100	3	0,3	71	100	3		f			
c	W0			160	100	5	0,3	160	100	3		b			

	5 ERRI B 12/RP 60			6 DS 952 /DVS 1612			7 FKM				8 AWS				
	FAT	GM		x	y	s		x	y	s	n	x	y		
12/2b	36	D		E5+	E4+	H-		36	125	80	0,2	C	B		
12/2t	36	D		E5+	E4+	H-		36	125	80	0,2	C	B		
15/2b	63	D		E5+	C	H		63	125	100	0,3	C'	B		
15/2t	63	D		E5+	C	H		63	125	100	0,3	C'	B		
16/1t	125	D		E5+	C	H		125	125	100	0,3	C	B		
16/3b	80	D		E5+	C	H		80	125	100	0,3	C	B		
17/2b	71	D		E5+	C	H		71	125	100	0,3	C'	B		
17/2t	80	D		E5+	C	H		80	125	100	0,3	C'	B		
21/2b	71	D		E6	D+	H-		71	125	100	0,3	C'	B		
21/2t	36	D		E6	D+	H-		36	125	100	0,3	C'	B		
22/1b	71	B		E1	E1	G-		71	125	100	0,2	B	B		
22/1t	71	B		E1	E1	G-		71	125	100	0,2	B	B		
22/2b	71	B		E1	E1	G-		71	125	100	0,2	B	B		
22/2t	71	B		E1	E1	G-		71	125	100	0,2	B	B		
23/1b	80	B		E1+	E1	G-		80	125	100	0,2	B	B		
23/1t	80	B		E1+	E1	G-		80	125	100	0,2	B	B		
23/2b	80	B		E1+	E1	G-		80	125	100	0,2	B	B		
23/2t	80	B		E1+	E1	G-		80	125	100	0,2	B	B		
25/2t	36	D		E5+	E4+	H-		36	125	80	0,2	C'	B		
31/1b	40	D		E5+	E4+	H-		40	125	80	0,2	C	B		
31/1t	71	D		E5+	E4+	H-		71	125	80	0,2	C	B		
6/2b	71	D		E6	C	H-		71	125	100	0,3	C'	B		
6/2t	71	D		E6	C	H-		71	125	100	0,3	C'	B		
6/3b	80	D		E5-	C	H-		80	125	100	0,3	C'	B		
6/3t	125	D		E5-	C	H-		125	125	100	0,3	C'	B		
7/2b	63	D		E5+	C	H		63	125	100	0,3	C'	B		
7/2t	71	D		E5+	C	H		71	125	100	0,3	C'	B		
8/1b	36	D		E6	D+	H-		36	125	100	0,3	C'	B		
8/1t	71	D		E6	D+	H-		71	125	100	0,3	C'	B		
8/2b	71	D		E5+	C	H-		71	125	100	0,3	C	B		
8/2t	71	D		E5+	C	H-		71	125	100	0,3	C	B		
9/1b	125	D		E5-	C	H-		125	125	100	0,3	C	B		
9/1t	71	D		E5-	C	H-		71	125	100	0,3	C	B		
9/2b	71	D		E6	C	H-		71	125	100	0,3	C'	B		
9/2t	71	D		E6	C	H-		71	125	100	0,3	C'	B		
c	160	D		AB	AB	G+		125	160	100	0,3	B	A		

7.3 Betriebslasten

Die Berechnungsmethoden wurden mit verschiedenen Lasten ausgewertet, da für die Schädigungsrechnung Lastwechselzahlen erforderlich und für die Dauerfestigkeitsrechnungen in den Berechnungsvorschriften Prüflastfälle definiert sind.

DIN 15018	UIC 515-4
IIW- Richtlinie	LUL Document 2-01202-02
Eurocode 3	LUL Document 2-01202-02
BS 7608	LUL Document 2-01202-02
ERRI B 12/RP 60	UIC 515-4
DS 952	UIC 515-4
DVS 1612	UIC 515-4
FKM- Richtlinie	LUL Document 2-01202-02
AWS	LUL Document 2-01202-02

Die Ergebnisse zu den betrachteten Berechnungsmethoden sind folgende:

				DIN 15018	IIW	EC3	BS 7608	ERRI B12/R P 60	DS 952	DVS 1612	FKM	AWS
1	1	1	9/2t	0,15	0,20	0,00	0,68	0,54	0,21	0,21	0,54	0,22
2	2	1	9/2b	0,34	0,19	0,00	0,69	0,52	0,21	0,21	0,50	0,23
3	3	1	9/2t	0,11	0,33	0,00	0,27	0,26	0,27	0,27	0,45	0,21
4	4	1	9/2b	0,19	0,41	0,00	0,41	0,16	0,23	0,23	0,37	0,28
5	5	1	6/2t	0,18	0,94	0,64	0,47	0,97	0,15	0,15	0,91	0,32
6	6	1	6/2b	0,05	0,74	0,48	0,69	0,73	0,22	0,14	0,70	0,27
7	7	1	6/2t	0,17	0,90	0,63	0,46	0,78	0,10	0,10	0,82	0,32
8	8	1	6/2b	0,05	0,63	0,37	0,59	0,66	0,21	0,12	0,65	0,24
9	9	1	9/2t	0,04	0,17	0,00	0,05	0,53	0,10	0,10	0,69	0,25
10	10	1	9/2b	0,04	0,19	0,00	0,20	0,54	0,07	0,05	0,37	0,16
11	11	1	9/2t	0,10	1,34	0,94	1,03	0,64	0,11	0,11	1,04	0,38
12	12	1	9/2b	0,16	0,17	0,00	0,20	0,62	0,10	0,10	0,35	0,12
13	13	1	9/2t	0,21	0,32	0,00	0,28	0,49	0,18	0,11	0,42	0,13
14	14	1	9/2b	0,43	0,21	0,00	0,26	0,49	0,15	0,15	0,40	0,13
15	15	1	9/2t	0,27	0,96	0,40	0,93	0,77	0,19	0,17	0,91	0,31
16	16	1	9/2b	0,42	0,37	0,00	0,44	0,56	0,14	0,12	0,56	0,16
17	17	1	9/2t	0,33	1,10	0,66	0,63	0,80	0,24	0,07	0,72	0,34
18	18	1	9/2b	0,67	0,79	0,38	0,56	0,58	0,21	0,07	0,61	0,27
19	1	2	17/2t	0,09	1,54	0,80	0,73	0,41	0,19	0,09	0,91	0,39
20	2	2	17/2b	0,14	0,55	0,00	0,41	0,48	0,08	0,08	0,43	0,29
21	21		31/1t	0,21	0,73	0,41	0,34	0,46	0,10	0,05	0,63	0,26
22	22		31/1b	0,52	2,07	1,15	0,47	0,83	0,11	0,05	0,96	0,23
23	19	1	6/2t	0,26	0,31	0,35	0,45	0,89	0,03	0,10	0,81	0,11
24	20	1	6/2b	0,28	0,36	0,43	0,64	0,94	0,03	0,10	0,86	0,12
25	25		31/1t	0,12	0,62	0,31	0,51	0,41	0,13	0,13	0,92	0,20
26	26		31/1b	0,25	0,77	0,41	0,54	0,68	0,13	0,13	0,84	0,15
27	21	1	9/2t	0,09	0,23	0,00	0,14	0,52	0,10	0,10	0,68	0,27
28	22	1	9/2b	0,08	0,16	0,00	0,17	0,52	0,07	0,05	0,36	0,14
29	23	1	9/2t	0,12	1,08	0,74	0,96	0,56	0,14	0,14	1,00	0,34
30	24	1	9/2b	0,07	0,14	0,00	0,18	0,12	0,09	0,06	0,33	0,11
31	25	1	9/2t	0,25	0,42	0,00	0,31	0,50	0,20	0,07	0,45	0,23
32	26	1	9/2b	0,52	0,31	0,00	0,33	0,48	0,18	0,11	0,42	0,17
33	27	1	9/2t	0,28	1,01	0,47	0,90	0,78	0,20	0,17	0,93	0,27
34	28	1	9/2b	0,46	0,42	0,15	0,46	0,58	0,15	0,11	0,58	0,17
35	29	1	6/2t	0,07	0,01	0,00	0,03	1,04	0,06	0,18	0,20	0,16
36	30	1	6/2b	0,26	0,15	0,00	0,30	0,44	0,24	0,10	0,38	0,20
37	31	1	9/1t	0,26	1,34	0,85	0,83	0,63	0,11	0,08	0,91	0,37
38	32	1	9/1b	0,07	0,05	0,00	0,04	0,27	0,09	0,09	0,23	0,11
39	33	1	9/1t	0,15	0,75	0,51	0,77	0,41	0,10	0,10	0,85	0,28
40	34	1	9/1b	0,08	0,07	0,00	0,01	0,09	0,11	0,11	0,41	0,10
41	35	1	9/2t	0,22	1,68	1,02	0,98	0,42	0,10	0,07	0,90	0,44
42	36	1	9/2b	0,68	1,25	0,82	0,91	0,58	0,17	0,06	0,69	0,38
43	37	1	9/2t	0,22	1,11	0,58	0,68	0,55	0,14	0,10	0,78	0,30
44	38	1	9/2b	0,60	0,94	0,56	0,73	0,58	0,17	0,07	0,73	0,29
45	3	2	17/2t	0,26	0,24	0,32	0,29	0,67	0,03	0,10	0,69	0,13
46	4	2	17/2b	0,23	0,29	0,34	0,43	0,77	0,03	0,09	0,75	0,11
47	39	1	9/2t	0,28	1,45	0,90	0,87	0,61	0,18	0,07	0,94	0,39
48	40	1	9/2b	0,43	0,44	0,23	0,37	0,48	0,13	0,07	0,48	0,20
49	41	1	9/2t	0,24	1,54	1,24	0,96	0,46	0,12	0,06	1,02	0,41
50	42	1	9/2b	0,35	0,29	0,00	0,28	0,28	0,08	0,06	0,38	0,19
51	43	1	9/1t	0,20	0,85	0,54	0,88	0,68	0,16	0,16	0,90	0,29
52	44	1	9/1b	0,03	0,03	0,00	0,01	0,37	0,15	0,15	0,28	0,08
53	5	2	17/2t	0,19	1,60	0,79	0,86	0,80	0,17	0,17	1,02	0,38
54	6	2	17/2b	0,16	0,14	0,00	0,12	0,84	0,09	0,12	0,39	0,24

55	7	2	17/2t	0,28	1,25	0,51	0,82	0,78	0,14	0,12	1,00	0,31
56	8	2	17/2b	0,29	0,28	0,00	0,40	0,45	0,12	0,10	0,56	0,19
57	45	1	6/2t	0,30	0,08	0,00	0,08	1,06	0,09	0,11	0,51	0,23
58	46	1	6/2b	0,28	0,14	0,00	0,24	1,28	0,16	0,16	0,44	0,23
59	47	1	6/2t	0,32	0,13	0,00	0,14	1,10	0,07	0,12	0,57	0,24
60	48	1	6/2b	0,28	0,37	0,00	0,27	1,28	0,20	0,20	0,38	0,21
61	1	5	22/1t	0,11	0,34	0,00	0,07	0,47	0,08	0,08	0,68	0,12
62	2	5	22/1b	0,09	0,18	0,00	0,08	0,41	0,08	0,08	0,43	0,11
63	9	2	17/2t	0,06	0,61	0,22	0,38	0,13	0,15	0,06	0,67	0,23
64	10	2	17/2b	0,09	0,78	0,56	0,60	0,32	0,17	0,05	0,72	0,30
65	11	2	17/2t	0,04	1,95	0,92	0,88	0,85	0,12	0,12	1,00	0,44
66	12	2	17/2b	0,06	0,27	0,15	0,35	0,14	0,13	0,13	0,49	0,17
67	13	2	17/2t	0,20	1,66	0,82	0,87	0,85	0,17	0,17	1,02	0,40
68	14	2	17/2b	0,08	0,15	0,00	0,16	0,85	0,10	0,12	0,43	0,14
69	15	2	17/2t	0,28	1,28	0,51	0,82	0,78	0,14	0,12	1,00	0,31
70	16	2	17/2b	0,28	0,32	0,00	0,38	0,43	0,12	0,09	0,57	0,17
71	49	1	6/2t	0,23	1,31	0,87	0,73	1,13	0,24	0,24	1,35	0,38
72	50	1	6/2b	0,18	0,61	0,41	0,69	0,96	0,19	0,19	0,84	0,26
73	51	1	6/2t	0,23	1,37	0,89	0,37	1,18	0,25	0,25	1,44	0,40
74	52	1	6/2b	0,14	0,58	0,47	0,63	0,86	0,14	0,14	0,72	0,26
75	53	1	6/2t	0,09	0,05	0,00	0,04	1,11	0,08	0,19	0,23	0,13
76	54	1	6/2b	0,30	0,50	0,00	0,32	0,53	0,27	0,11	0,44	0,19
77	55	1	6/2t	0,33	0,15	0,00	0,14	1,11	0,08	0,12	0,57	0,24
78	56	1	6/2b	0,27	0,22	0,00	0,26	1,27	0,19	0,19	0,46	0,19
79	57	1	6/2t	0,31	0,09	0,00	0,09	1,08	0,10	0,12	0,51	0,23
80	58	1	6/2b	0,28	0,16	0,00	0,22	1,27	0,15	0,15	0,53	0,20
81	59	1	6/2t	0,36	0,13	0,00	0,07	1,10	0,13	0,13	0,58	0,26
82	60	1	6/2b	0,29	0,09	0,00	0,14	1,11	0,11	0,11	0,56	0,20
83	61	1	6/2t	0,24	0,30	0,34	0,11	0,81	0,17	0,17	0,94	0,18
84	3	5	22/1b	0,42	0,97	0,36	1,04	0,80	0,17	0,13	1,05	0,17
85	62	1	6/2t	0,20	0,43	0,26	0,35	1,13	0,19	0,19	0,71	0,21
86	63	1	6/2b	0,19	0,18	0,00	0,35	0,47	0,20	0,20	0,57	0,16
87	64	1	6/2t	0,24	0,86	0,62	0,42	0,90	0,18	0,16	0,98	0,31
88	4	5	22/2b	0,30	0,65	0,26	0,85	0,46	0,14	0,14	0,89	0,15
89	17	2	17/2t	0,18	0,63	0,46	0,58	0,67	0,24	0,24	0,96	0,19
90	18	2	17/2b	0,16	0,30	0,00	0,53	0,60	0,21	0,21	0,73	0,08
91	65	1	9/2t	0,29	0,87	0,53	0,58	0,65	0,21	0,11	0,70	0,30
92	66	1	9/2b	0,66	0,76	0,40	0,63	0,63	0,20	0,12	0,64	0,29
93	93		25/2t	0,24	1,74	2,15	0,36	1,23	0,13	0,08	0,86	0,30
94	94		12/2t	0,08	3,08	4,50	0,74	0,13	0,08	0,08	1,02	0,37
95	95		12/2b	0,16	0,78	0,56	0,20	0,44	0,06	0,06	0,68	0,18
96	5	5	23/1t	0,06	0,57	0,00	0,21	0,57	0,03	0,06	0,73	0,47
97	6	5	23/1b	0,20	2,55	2,33	0,92	0,57	0,07	0,05	0,88	0,43
98	7	5	23/2t	0,14	2,14	1,40	0,77	0,61	0,06	0,05	0,89	0,38
99	8	5	23/2b	0,16	1,78	0,97	0,74	0,57	0,06	0,06	0,83	0,35
100	9	5	22/2t	0,22	2,52	1,89	1,00	0,54	0,13	0,07	0,96	0,36
101	10	5	22/2b	0,17	0,59	0,00	0,48	0,36	0,06	0,06	0,48	0,17
102	11	5	22/2t	0,18	1,04	0,54	0,39	0,55	0,03	0,06	0,69	0,34
103	12	5	22/2t	0,22	0,53	0,49	0,31	0,61	0,04	0,07	0,74	0,42
104	13	5	22/2b	0,12	0,97	0,99	0,40	0,53	0,05	0,05	0,78	0,32
105	14	5	22/2t	0,24	1,85	3,57	1,02	0,57	0,14	0,08	1,02	0,44
106	15	5	22/2b	0,24	3,22	0,79	1,22	0,46	0,08	0,07	0,70	0,27
107	16	5	22/2t	0,23	1,44	2,84	0,92	0,55	0,13	0,07	0,97	0,41
108	17	5	22/2b	0,24	2,95	0,70	1,12	0,43	0,08	0,06	0,64	0,26
109	18	5	22/2t	0,21	1,23	0,00	0,78	0,56	0,02	0,07	0,67	0,39
110	19	5	22/2b	0,13	0,69	0,70	0,25	0,48	0,05	0,04	0,62	0,26
111	20	5	22/2t	0,19	1,23	0,67	0,66	0,60	0,05	0,06	0,76	0,35
112	21	5	22/2b	0,14	1,32	0,00	0,54	0,45	0,06	0,06	0,58	0,24
113	22	5	22/2t	0,21	0,65	1,12	0,46	0,52	0,13	0,07	0,91	0,32

114	23	5	22/2b	0,16	2,43	0,00	0,90	0,35	0,06	0,06	0,45	0,15
115	1	3	8/2t	0,12	0,51	0,00	0,42	0,10	0,08	0,08	0,40	0,08
116	2	3	8/1b	0,13	0,15	0,00	0,33	0,92	0,07	0,07	0,41	0,09
117	3	3	8/1t	0,01	0,13	0,00	0,32	0,12	0,08	0,08	0,44	0,14
118	4	3	8/2b	0,02	0,19	0,00	0,35	0,47	0,08	0,08	0,47	0,10
119	67	1	6/2t	0,06	0,13	0,26	0,30	0,10	0,24	0,14	0,63	0,23
120	5	3	8/2b	0,11	0,52	0,00	0,55	0,08	0,15	0,14	0,44	0,22
121	6	3	8/1t	0,15	0,31	0,17	0,33	0,76	0,16	0,16	0,70	0,19
122	7	3	8/1b	0,26	0,41	0,38	0,47	1,28	0,16	0,16	0,82	0,12
123	8	3	8/1t	0,07	0,61	0,37	0,55	0,78	0,16	0,16	0,79	0,24
124	9	3	8/1b	0,11	0,58	0,24	0,52	1,25	0,16	0,16	0,74	0,10
125	10	3	8/1t	0,09	0,48	0,48	0,54	0,69	0,15	0,15	0,84	0,27
126	11	3	8/1b	0,06	0,49	0,00	0,62	0,44	0,15	0,15	0,64	0,11
127	68	1	6/2t	0,09	0,27	0,00	0,54	0,46	0,09	0,09	0,53	0,16
128	12	3	8/1b	0,14	0,25	0,00	0,26	0,21	0,09	0,09	0,46	0,08
129	69	1	6/2t	0,01	0,32	0,22	0,30	0,48	0,10	0,10	0,60	0,19
130	13	3	8/1b	0,04	0,34	0,00	0,31	0,24	0,09	0,09	0,50	0,14
131	14	3	8/2t	0,51	0,40	0,61	0,35	0,84	0,21	0,19	0,90	0,32
132	70	1	6/2b	0,33	0,94	0,00	0,92	0,71	0,27	0,16	0,58	0,28
133	1	4	15/2t	0,04	0,54	0,85	0,68	0,51	0,06	0,06	0,69	0,41
134	2	4	15/2b	0,21	0,99	0,67	0,63	0,32	0,05	0,03	0,54	0,35
135	3	4	15/2t	0,01	0,69	0,00	0,50	0,42	0,06	0,06	0,33	0,12
136	4	4	15/2b	0,23	0,14	0,64	0,19	0,41	0,05	0,05	0,56	0,35
137	5	4	16/1t	0,09	0,66	0,00	0,46	0,19	0,13	0,13	0,85	0,26
138	19	2	7/2b	0,18	0,40	0,83	0,88	0,21	0,11	0,11	0,79	0,40
139	20	2	7/2t	0,03	1,27	0,00	0,87	0,52	0,08	0,08	0,82	0,26
140	6	4	16/3b	0,01	0,60	0,00	0,72	0,29	0,07	0,06	0,59	0,29
141	21	2	7/2t	0,28	0,65	0,27	0,58	0,36	0,18	0,18	0,84	0,29
142	22	2	7/2b	0,20	1,93	0,00	0,94	0,27	0,13	0,13	0,70	0,20
143	23	2	7/2t	0,04	0,85	1,00	0,43	0,50	0,12	0,07	0,87	0,50
144	24	2	7/2b	0,04	1,59	0,51	1,04	0,47	0,08	0,08	0,64	0,30
145	24	5	22/2t	0,16	0,81	1,13	0,69	0,25	0,14	0,14	1,00	0,33
146	25	5	22/2b	0,21	2,03	0,00	1,13	0,37	0,11	0,11	0,66	0,18
147	26	5	22/2t	0,15	0,72	1,34	0,75	0,47	0,13	0,13	0,99	0,34
148	27	5	22/2b	0,20	2,22	0,52	1,10	0,43	0,10	0,10	0,70	0,22
149	71	1	6/3t	0,08	1,08	0,37	0,78	0,32	0,08	0,08	0,82	0,44
150	72	1	6/3b	0,22	0,80	0,00	0,87	0,53	0,06	0,08	0,78	0,31
151	73	1	21/2t	0,64	0,58	0,79	0,48	1,01	0,23	0,06	0,58	0,22
152	74	1	21/2b	0,26	1,21	0,00	0,31	0,47	0,25	0,08	0,43	0,19
153	75	1	21/2t	0,31	0,38	1,44	0,27	0,84	0,07	0,07	1,08	0,22
154	76	1	21/2b	0,04	1,35	0,00	0,50	0,43	0,06	0,06	0,36	0,14

In den folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der vorigen Tabelle graphisch dargestellt. Die Ordinate gibt den Auslastungsgrad an, die Abszisse betrachtet die verschiedenen Auswertepunkte.

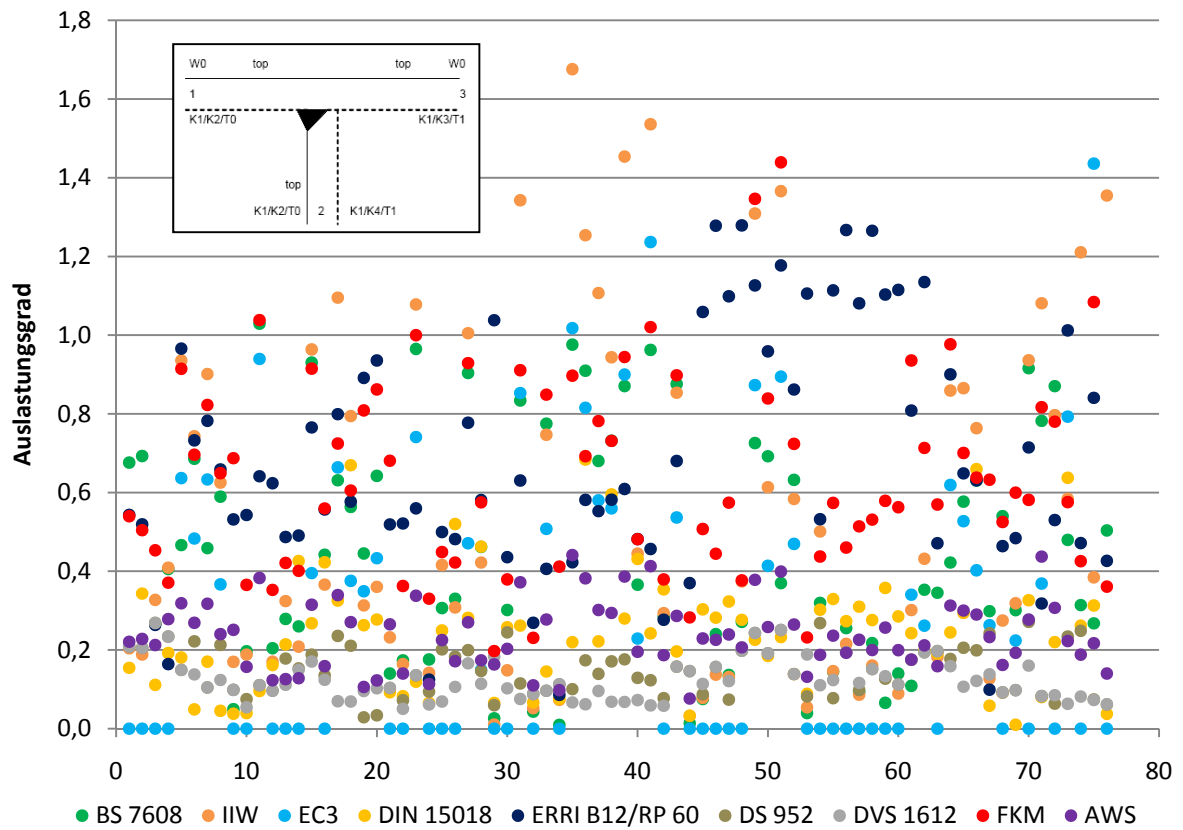


Abbildung 30: Auslastungsgrade für HY Nähte

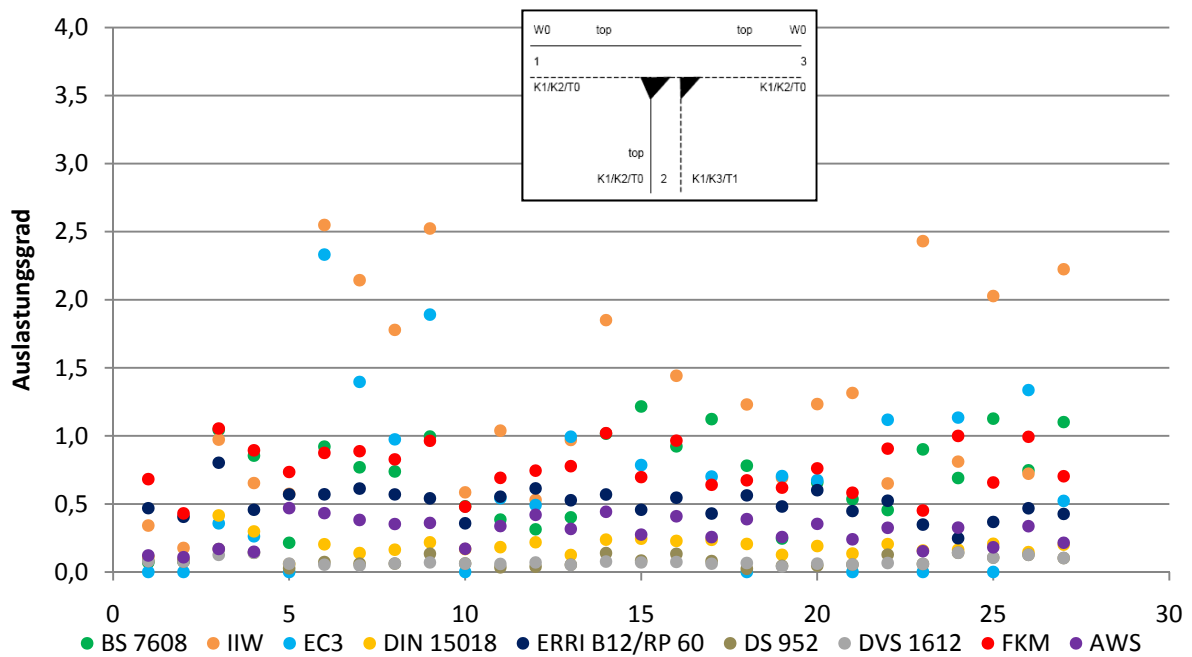


Abbildung 31: Auslastungsgrade für HY Nähte mit Gegenlage

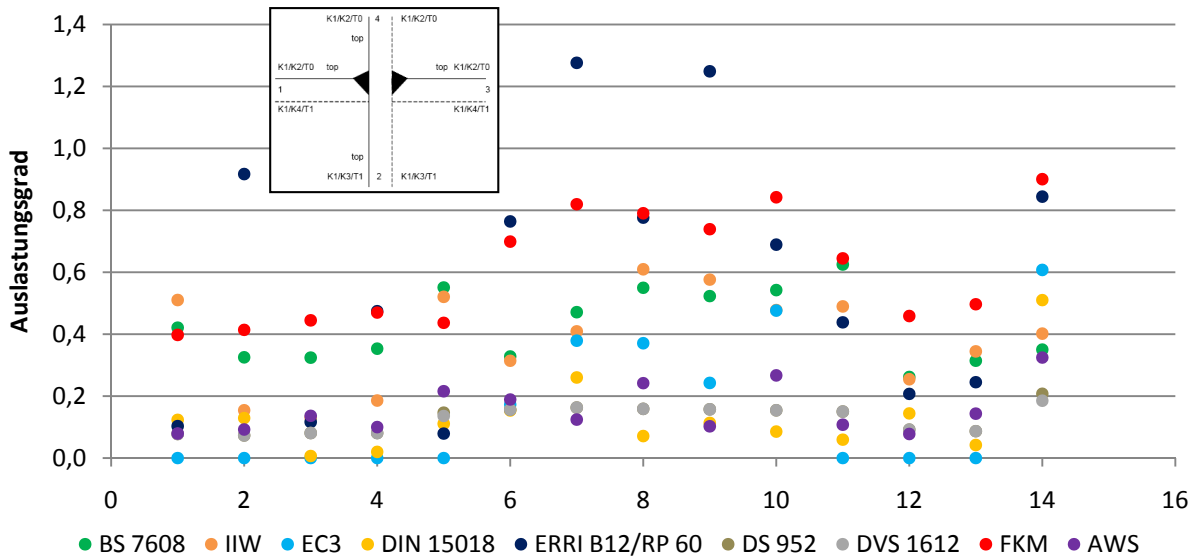


Abbildung 32: Auslastungsgrade für Kreuzstöße mit HY Nähten

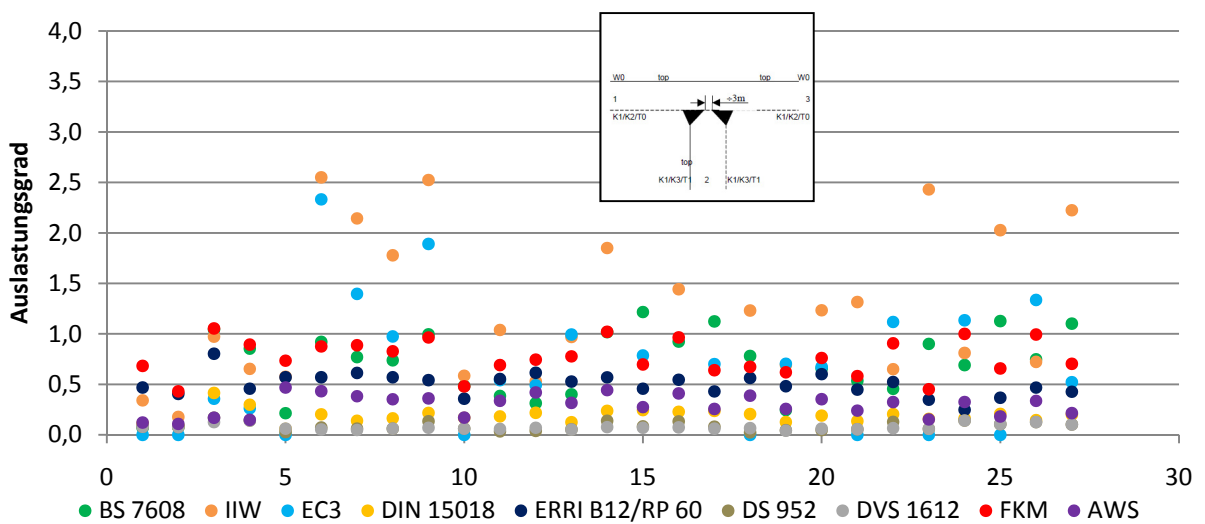


Abbildung 33: Auslastungsgrade für K Nähte

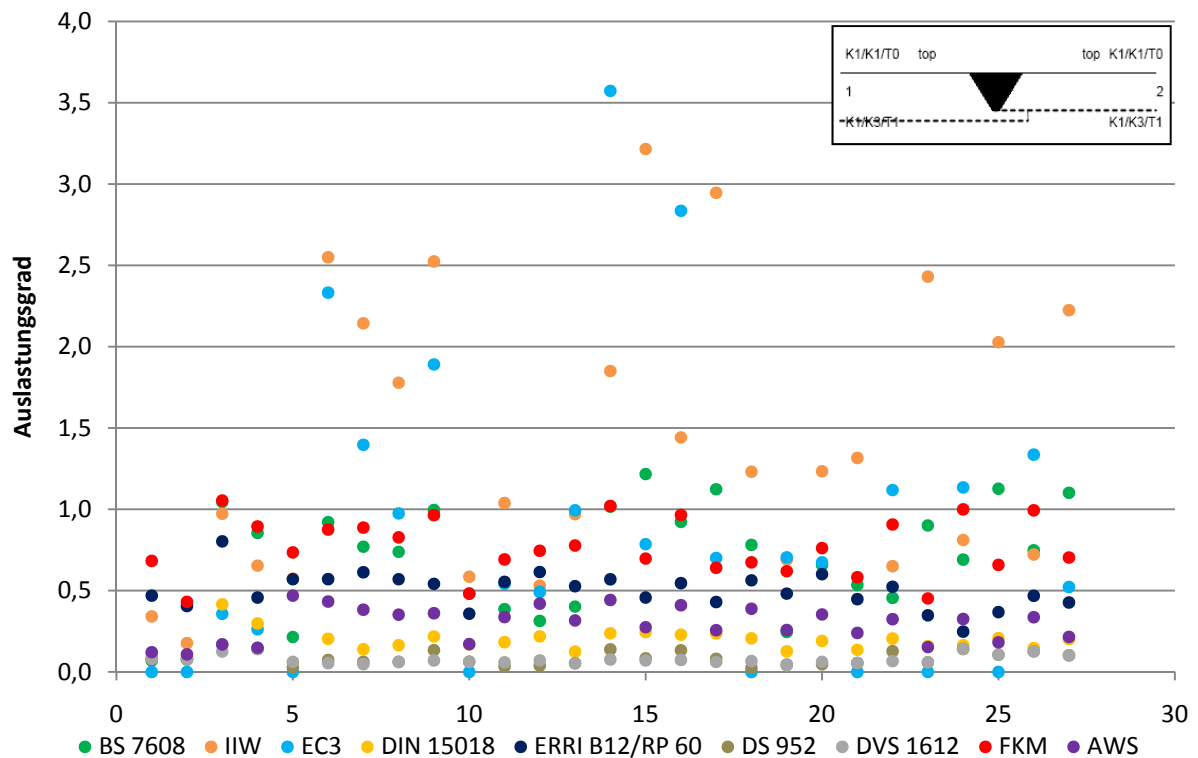


Abbildung 34: Auslastungsgrade für Stumpfstöße

Zusammenfassung:

Die Auswertungen ergeben höchst unterschiedliche Ergebnisse; die Auslastungsgrade variieren gravierend. Die Gründe hierfür sind die Kerbfallzuordnung, die mehraxiale Ermüdung (nur IIW und FKM machen einen Unterschied in der Berechnungsmethodik)

Solange die mehraxiale Beanspruchung keine besondere Berechnungsmethodik hervorruft, liegen die Ergebnisse von Eurocode 3, IIW, FKM und BS 7608 Berechnungen in etwa auf gleichem Niveau. Die FKM bietet für nichtproportionale Beanspruchungen nur eine Näherungslösung an; diese Näherungslösung liefert in allen Punkten einen Auslastungsgrad zwischen 2 und 7; ein solches Rechenergebnis ist nicht repräsentativ.

Die Dauerfestigkeitsberechnungen ergeben aufgrund der verschiedenen Methodik und auch verschiedenen Lastfällen komplett andere Ergebnisse, die Teils weit unter 1 liegen. Man kann also davon ausgehen, dass die UIC Lastfälle nicht repräsentativ für die Belastungssituation während des Betriebes eines Drehgestells sind.

Bei Stumpfstößen wirkt sich die sensible Bewertung durch die FAT Klassen auf die Berechnung aus; die Auslastungsgrade sind hier dementsprechend hoch. Des Weiteren ist bei den verwendeten Stumpfstößen meist eine Dickenkorrektur in der Berechnung notwendig; Berechnungsmethoden, die die Blechstärke nicht berücksichtigen liefern hier unterschiedliche Ergebnisse.

Eine Besonderheit ist auch noch festzutellen:

Der Eurocode 3 ist als einzige Berechnungsmethode in der Lage einen Auslastungsgrad = 0 als Ergebnis zu liefern. Der Grund hierfür ist auch relativ einfach: Bei einem Belastungskollektiv, wo jede einzelne Laststufe unterhalb der Dauerfestigkeit liegt, ist die Schadenssumme Null. Dementsprechend kann die Äquivalentspannungsschwingbreite ebenfalls nur Null sein, und der Auslastungsgrad, definiert als Verhältnis von Äquivalentspannungsschwingbreite zu der zulässigen Spannungsschwingbreite kann auch nur Null sein.

Die Forderung, dass bei mehraxialer Beanspruchung der „Control Value“ kleiner gleich 0,5 sein darf, macht eine Auswertung nach der IIW Richtlinie ebenfalls schwieriger, da in diesem Fall die IIW ebenfalls hohe Auslastungsgrade als Ausgabewerte berechnet.

8 Kerbspannungskonzept

Die effektive Kerbspannung ist die gesamte Spannung im Kerbgrund, wobei ein linear- elastisches Werkstoffverhalten angenommen wird. Um die statistische Natur und die damit verbundene Streuung der Abmessungen der Schweißnaht und das nichtlineare Materialverhalten im Kerbgrund zu erfassen, wird die reale Form der Kerbe durch eine effektive ersetzt. Bei Baustählen wurde nachgewiesen, dass ein effektiver Kerbradius von 1 mm konsistente Ergebnisse ergibt. Zur Schwingfestigkeitsbewertung wird die effektive Kerbspannung mit einer allgemeinen Wöhlerlinie, die bei $2e6$ Schwingspielen eine Spannungsschwingbreite von 225 MPa (FAT Klasse 225) hat verglichen und daraus die Schädigung errechnet.

Diese Methode hat den Vorteil, dass sowohl Schweißnahtübergang, als auch die Schweißnahtwurzel versagen kann. Auch ist es möglich verschiedene Schweißnahtgeometrien zu vergleichen.

Die Kerbfaktoren können mittels der Finiten Element Methode (14) bei Einheitsbelastung berechnet werden.

8.1 Vorteile der Kerbspannungen

- Einfluss der Blechdicke auf das Ermüdungsverhalten
- Abbildung realer Schweißnaht-Geometrie.
- Örtliche Beurteilung der Ermüdung (Auslastungsgrad) an der Schweißnaht

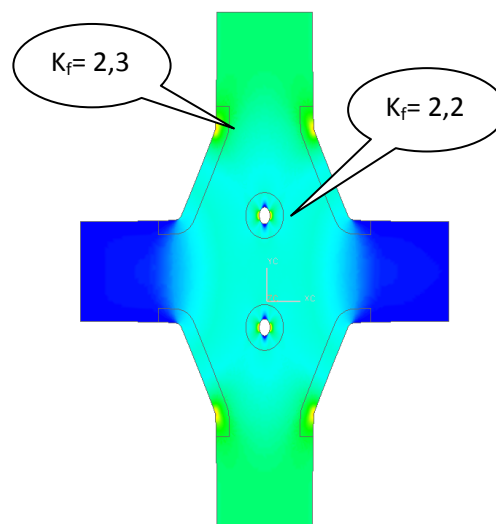
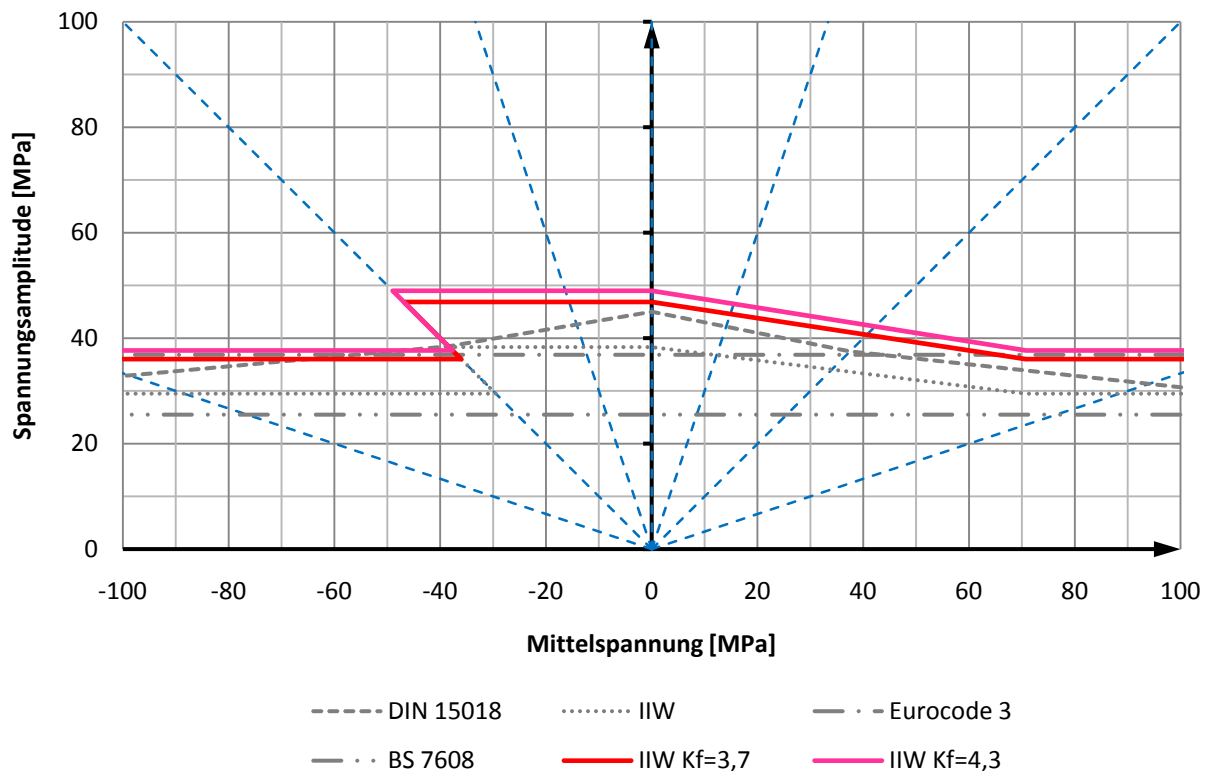


Abbildung 35: Kerbspannungen

Die Vorteile der Kerbspannungsmethode lassen sich im Haigh Diagramm darstellen. Die zulässigen Spannungsamplituden liegen etwas höher, als jene, die nach der Nennspannungsmethode ermittelt wurden.



Die Kerbspannungsmethode kann nun die Auswertung deutlich vereinfachen, jedoch ist gerade hier die Spannungsermittlung das Problem. In den folgenden Absätzen werden verschiedene Methoden zur Ermittlung von effektiven Kerbspannungen betrachtet und deren Anforderungen an das Rechenmodell eruiert.

8.2 Bewertung durch Auswertung eines Submodells

Die Submodelltechnik wird verwendet um einen kleinen Bereich eines großen Modells genauer zu untersuchen, z. B. einen Bereich mit hohen Spannungen. Um ein möglichst genaues Ergebnis zu erhalten ist in den meisten Fällen in dem interessanten Bereich ein feineres Netz erforderlich. Man kann ebenfalls von Schalenelemente auf Volumenelemente wechseln.

Die Submodell Technik wird in zwei Schritten ausgeführt. Erst muss das globale Modell erstellt und berechnet werden, danach wird das Submodell erstellt und mit den Randbedingungen aus dem globalen Modell versehen. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten:

- Die Randbedingungen werden als Verschieberandbedingungen auf das Submodell aufgeprägt
- Durch die Randbedingungen werden die Kräfte, oder Spannungen aus dem globalen Modell auf das Submodell aufgeprägt.

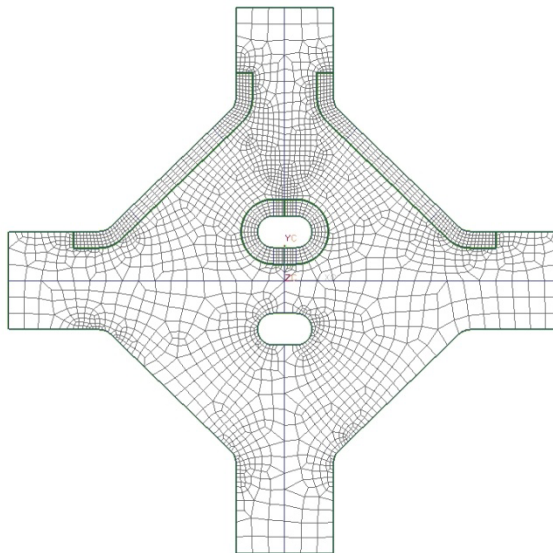
Die Submodelltechnik wird nicht von allen Finiten Element Programmen unterstützt. Aufgrund des Ablaufs, dass das Submodell erst nach dem globalen Strukturmodell zu lösen ist, stellt diese Technik keinerlei Anforderung an den „Finite Element Solver“, sondern vielmehr eine Anforderung an den „Pre Processor“ und „Post Processor“, der in die Randbedingungen des Submodells die Lösung des globalen Strukturmodells einbringen muss.

Geeignete Programme für die Submodell Technik sind:

- Abaqus CAE
- Ansys Structural Mechanics
- FEMFAT fedis

8.3 Bewertung durch Auswertung eines gekoppelten 3D Modells

Das Problem der Kopplung von 2D Elementen mit 3D Elementen ist die große Anzahl an Elementen im globalen Strukturmodell.



Ein Schalenmodell nach Radaj hat ca. 4000 Elemente (Beispiel Kreuzstoß). Bei Extrusion des Modells und der Einhaltung einer „aspect ratio“ im Kerbgrund von 5 (d. h. im Kerbgrund bei 0,2 mm Elementkantenlänge ergibt dies eine maximale Extrusion von 1 mm) ergeben sich 40 000 Volumenelemente vom Typ Hex20 pro 10 mm. Eine globale Auswertung durch Koppelung ist deshalb äußerst schwer zu realisieren

8.4 Bewertung durch vorher ermittelte Kerbfaktoren

Die Methode, die Bewertung durch vorher ermittelte Kerbfaktoren durchzuführen ist die beste Möglichkeit um eine automatisierte Auswertung aus einem Strukturmodell zu bekommen. Aber die Tatsache, dass effektive Kerbspannungen nicht messbar sind, bringt die gleichen Probleme, wie sie auch bei der Bewertung durch ein Submodell auftreten. Man kann die Kerbfaktoren ermitteln für Verschiebungen, als auch für Kräfte. Das Problem liegt darin, dass das globale Strukturmodell aus Schalelementen besteht und über das Blech bis mitten in den Schweißstoß eine konstante Dicke, und daraus resultierend eine konstante Steifigkeit hat. Deshalb existiert ein Steifigkeitsunterschied zwischen der realen Schweißnahtgeometrie unter Belastung und dem idealisierten Strukturmodell.

Für die Auswertung nach der Kerbspannungsmethode ist deshalb noch eine Methode zu entwickeln wie man diese ermüdungsrelevanten Spannungen am sichersten ermittelt. Es ist ebenfalls notwendig einen Erfahrungsschatz aufzubauen aufgrund der Unmöglichkeit Messungen durchzuführen.

9 Ergebnis

Zusammenfassend kann man sagen, dass die verschiedenen Bewertungsvorschriften durch ihre unterschiedlichen Berechnungsmethoden deutlich sichtbar verschiedene Ergebnisse produzieren. Die größten Unsicherheiten liegen meiner Meinung nach bei der Kerbfallzuordnung und der Berechnungsmethodik bei mehraxialer Beanspruchung.

Ein wichtiger Punkt für die Zulassung eines Drehgestelles ist die Erfüllung der DIN EN 13749. Um den Anforderungen der DIN EN 13749 gerecht zu werden sind geeignete Lastannahmen zu treffen für die Auslegung von Drehgestellrahmen. Durch einen Prüfstandsversuch ist die Simulation zu verifizieren; durch einen Betriebsversuch sind die Lastannahmen zu verifizieren.

Aus der Betriebsmessung erhält man einen Spannungs- Zeitverlauf. Für die Auswertung von Messdaten gibt es ebenfalls verschiedene Methoden und die derzeit gebräuchlichste Methode dafür ist eine Rainflow Klassierung. Die DIN 15018, DS 952, DVS 1612 und AWS - Structural Welding Code Steel bieten keine Methode an, um Betriebsversuchsmessungen für eine Betriebsfestigkeitsrechnung wieder zu verwenden. Deshalb ist es mit diesen Normen rechtlich gesehen schwierig die DIN EN 13749 zu erfüllen. Auch die ERRI B 12/RP 60 schreibt Lasten direkt vor, jedoch erlaubt die Berechnungsmethode (lineare Schadensakkumulationsrechnung) eine Bemessung auch mit anderen Lasten (zB Betriebslasten)

Die FKM Richtlinie hingegen ist ein sehr umfassendes Werkzeug zur Auslegung. Sowohl die Berechnungsmethoden als auch die mathematischen Ausformulierungen sind sehr präzise und ermöglichen einen Festigkeitsnachweis, der keine Fragen offenlässt. Einen Nachteil sehe ich bei der Berechnung nichtproportionaler, nichtsynchrone Spannungen (bei mehraxialer Beanspruchung der materialermüdendste Fall). Die Berechnungsmethode liefert hier, wie ebenfalls in der Richtlinie beschrieben, eine überproportional sichere Auslegung. Diese Methode wird auch nur als Näherungslösung bezeichnet. Aufgrund der Akkumulation der Auslastungsgrade kann bei vielen Stufen innerhalb eines Lastkollektives, relativ schnell, ein sehr hoher Gesamtauslastungsgrad berechnet werden. Ein solches Ergebnis kann nicht zielführend sein.

Alle Berechnungsmethoden, die die Kerbfallklassierung auf Basis der Spannungsschwingbreite bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln definieren (in der IIW als FAT Klasse definiert) haben den Nachteil, dass verschiedene Schweißnahtdetails sehr schnell überbewertet werden. In den verglichenen Haigh- Diagrammen für ein Schweißnahtdetail nach den unterschiedlichen Berechnungsmethoden lässt sich erkennen, dass jene die ihre Kerbe nach FAT Klassen klassieren, stets die geringsten Spannungsamplituden zulassen.

Meine Empfehlung lautet, zukünftige Berechnung auf Basis der IIW Richtlinie nach der Kerbspannungsmethode durchzuführen. Sie genügt den Anforderungen, die die DIN EN 13749 für die Zulassung eines Drehgestell Rahmens stellt und ist international anerkannt. Der Betriebsfestigkeitsnachweis berücksichtigt ebenfalls mehraxiale Beanspruchungen – wenngleich diese Methoden, obwohl sie nicht ausgeschlossen sind, eher für Nennspannungen geeignet sind, als für Kerbspannungen. Die Methode der Unterscheidung von mehraxialer Beanspruchung ist in der Berechnung einfach zu realisieren, jedoch ist das Ergebnis bei nichtproportionalen Spannungen, ähnlich wie bei der FKM- Richtlinie sehr konservativ.

Generell habe ich den Eindruck gewonnen, dass die Ermüdungswirksamkeit zyklischer mehraxialer Beanspruchungen ein aktuelles Thema ist, das noch zur Diskussion steht. Vor allem die verschiedenen Methoden, welche deutliche Unterschiede in den Ergebnissen liefern, lassen mich zu diesem Schluss kommen.

Als weiteres Ergebnis meiner Arbeit kann man die automatisierte punktuelle Auswertung eines Drehgestellrahmens unter zyklischen Belastungen nach 9 verschiedenen Bewertungsmethoden betrachten. Die Automatisierung war aufgrund der vielen verschiedenen Lastfälle, Lastfallkombinationen und betrachteten Stellen notwendig, kann aber nun bei speziellem Kundenwunsch auch von Siemens Mobility weiter verwendet werden. Die Auswertung erfordert nur die Eingabe der verschiedensten Parameter und als Ergebnis wird direkt der Auslastungsgrad in das selbe Tabellenblatt geschrieben.

10 Literaturverzeichnis

1. **Haibach, Erwin.** *Betriebsfestigkeit*. s.l. : Springer, 2005.
2. **Eichseder, Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wilfried.** *Vorlesung Betriebsfestigkeit*.
Montanuniversität Leoben : s.n.
3. Ermüdungsschäden im Übergang zwischen HCF und VHCF. [Online] Universität Siegen. [Zitat vom: 4. 11 2009.] <http://vhcf-paketantrag.uni-siegen.de/index.html>.
4. **Thomas Ummenhofer, Prof. Dr.-Ing. , Imke Weich, Dipl.-Ing. , Thomas Nitschke-Pagel, Dr.-Ing.**
Lebens- und Restlebensdauererlängerung geschweißter Windenergieanlagentürme und
anderer Stahlkonstruktionen durch Schweißnahtnachbehandlung. *Stahlbau*. 2005, Bd. 74, 6.
5. **Hobbacher.** *Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile*. s.l. :
International Institute of Welding, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1996.
6. **Deutsches Institut für Normung.** *DIN 15018 Teil 1, Krane - Grundsätze für Stahltragwerke -
Berechnung*. 1984.
7. —. *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9 Ermüdung*. 2005.
8. **British Standards Institutions.** *BS 7608 - Code of practice for fatigue design and assessment of
steel structures* . 1993.
9. **Europäisches Institut für Eisenbahnforschung.** *ERRI B12/RP 60 Versuche zum Festigkeitsnachweis
an Schienenfahrzeugen*. 2001.
10. **Deutsche Bundesbahn.** *DV 952 - Schweißen an Schienenfahrzeugen und maschinentechnischen
Anlagen*. 1989 : s.n.
11. **DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren.** *Gestaltung und
Dauerfestigkeitsbewertung von schweißverbindungen mit Stählen im Schienenfahrzeugbau,
Richtlinie DVS 1612*. August 2009.
12. **Forschungskuratorium Maschinenbau.** *FKM- Richtlinie, rechnerischer Festigkeitsnachweis für
Maschinenbauteile*. 2003.
13. **American Welding Society.** *Structural Welding Code Steel, AWS D1.1/D1.1M:2008*.
14. **Deutsches Institut für Normung.** *Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion, DIN 18800 Teil 1*.
1990.
15. **Fahrenwaldt, Hans J. und Schuler, Volkmar.** *Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Verfahren,
Fertigung*. 2003.

16. **Wolmersdorfer, Franz.** *Diplomarbeit: Entwicklung eines Kerbspannungskonzeptes für Schweißverbindungen.*
17. ESDEP Course, Improvement Techniques in Welded Joints. [Online] <http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/ESDEP/master/wg12/l0500.htm>.
18. **Deutsches Institut für Normung.** *Kranbahnen, Stahltragwerke; Grundätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung.* 1981.
19. —. *Spezifikationsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen, Deutsche Fassung EN 13749:2005.* 2005.

Anhang A

Berechnungsparameter:

- Streckgrenze R_e

355	z.B. für S355
-----	---------------

- Eigenspannungsfall

1	Grundwerkstoff und Walzprodukte mit vernachlässigbarer Eigenspannung ($< 0,2 \cdot R_e$), entspannte Bauteile, in denen die Effekte von erzwungenen Verformungen und sekundären Spannungen bei der Berechnung berücksichtigt wurden
2	Dünnwandige geometrisch einfache Bauteile mit kurzen Schweißnähten. Teile oder Bauteile mit thermisch geschnittenen Kanten
3	Komplexe zwei- oder dreidimensionale Bauteile, Bauteile mit globalen Eigenspannungen, dickwandige Bauteile

- Faktor für Schleifen („Grinding“)

1,0	Keine Schweißnahtnachbehandlung
1,3	Faktor bei Schleifen

- Faktor für TIG Dressing

1,0	Keine Schweißnahtnachbehandlung
1,3	Faktor bei TIG Dressing

- Faktor für Hämmern („Hammer Peening“)

1,0	Keine Schweißnahtnachbehandlung
1,3	Faktor für Stähle mit $R_e < 355$ MPa bei Hämmern
1,6	Faktor für Stähle mit $R_e \geq 355$ MPa bei Hämmern

- Faktor für Nageln („Needle Peening“)

1,0	Keine Schweißnahtnachbehandlung
1,3	Faktor für Stähle mit Re < 355 MPa bei Nageln
1,6	Faktor für Stähle mit Re >= 355 MPa bei Nageln

Berechnungsalgorithmus:

```

Sub iiw_assessment(iRcount, iAnzGLF, staux, stNotchF1, stNotchF2, stNotchF3, stNotchF4, thickness)

Dim iCount As Integer           'Laufvariable
Dim iCountGrp As Integer       'Zählt die Lastgruppen
Dim iCountLF As Integer        'Zählt die Lastfälle innerhalb einer Gruppe
Dim groupLC As String          'Bezeichnung der Lastfallgruppe
Dim Sxx_max As Single          'Maximale Normalspannung in x-Richtung im LC
Dim Sxy_max As Single          'Maximale Schubspannung im LC
Dim Syy_max As Single          'Maximale Normalspannung in y-Richtung im LC
Dim S11_max As Single          'Maximale 1. HNS im LC
Dim S22_max As Single          'Maximale 2. HNS im LC
Dim Sxx_min As Single          'Minimale Normalspannung in x-Richtung im LC
Dim Sxy_min As Single          'Minimale Schubspannung im LC
Dim Syy_min As Single          'Minimale Normalspannung in y-Richtung im LC
Dim S11_min As Single          'Minimale 1. HNS im LC
Dim S22_min As Single          'Minimale 2. HNS im LC
Dim Sxx As Single              'Spannung in x-Richtung
Dim Syy As Single              'Spannung in y-Richtung
Dim Sxy As Single              'Schubspannung
Dim S11 As Single              '1. HNS
Dim S22 As Single              '2. HNS
Dim Sxym As Single             'Schubspannung unter 45° zur HNS
Dim R_Sxx As Single            'Spannungsverhältnis in x-Richtung
Dim R_Syy As Single            'Spannungsverhältnis in y-Richtung
Dim R_Sxy As Single            'Spannungsverhältnis in xy-Richtung
Dim R_S11 As Single            'Spannungsverhältnis der 1. HNS
Dim R_S22 As Single            'Spannungsverhältnis der 2. HNS
Dim angle As Single            'Winkel in Grad der Rotation der HNS über alle Lastfälle
Dim AG As Single               'Auslastungsgrad: Verhältnis Schädigung zu zulässiger Schädigung
Dim nload As String            'Lastwechsel
Dim N As Single                'Lastwechsel gesamt
Dim D11 As Single              'Schädigung in HNS Richtung
Dim Dxx As Single              'Schädigung in x Richtung
Dim Dxy As Single              'Schädigung für Schub

'IIW Spezifische Variablen
Dim gammaM As Single           'Teilsicherheitsfaktor
Dim gammaF As Single           'Teilsicherheitsfaktor
Dim FAT_S As Single            'FAT Klasse, Normalbeanspruchung
Dim FAT_T As Single            'FAT Klasse, Schubbeanspruchung
Dim m As Single                'Neigung der Wöhlerlinie
Dim tce_n As Single            'Thickness Correction Exponent

Dim S11_r As Single             'Stress Range der betragsmäßig größten Hauptnormalspannung
Dim S_r As Single              'stress range der Normalspannung quer zur Schweißnaht
Dim T_r As Single              'Stress Range der Schubspannung

Dim CV As Single               'Control Value
Dim Seq_11 As Single            'Äquivalentenspannung in HNS-Richtung
Dim Seq_xx As Single            'Äquivalentenspannung in x-Richtung

```

```

Dim Seq_xy As Single      'Äquivalentsspannung in xy Richtung
Dim stressR As Integer   'Typ Stress Ratio
Dim feiT As Single       'fatigue enhancement factor for thickness

'Umwandlung der in Textform vorliegenden Kerbfälle in Zahlenwerte vom Typ Single
FAT_S = CSng(stNotchF1)
FAT_T = CSng(stNotchF2)
m = CSng(stNotchF3)
tce_n = CSng(stNotchF4)
stressR = iiw_ratiotyp
gammaM = iiw_gammaM
gammaF = iiw_gammaF

```

```

'Berechnung des Dickenkorrekturfaktors
feiT = (25 / thickness) ^ tce_n

```

```

'Faktor für "Grinding"
If FAT_S <= 90 And iiw_fefGrind = 1.3 Then
    FAT_S = FAT_S * iiw_fefGrind
    If FAT_S >= 112 Then
        FAT_S = 112
    End If
End If

```

Nachbehandlung durch Schleifen

```

'Faktor für "TIG Dressing"
If FAT_S <= 90 And iiw_Re <= 900 And thickness >= 10 And iiw_fefTIG = 1.3 Then
    FAT_S = FAT_S * iiw_fefTIG
    If FAT_S >= 112 Then
        FAT_S = 112
    End If
End If

```

Nachbehandlung durch TIG Dressing

```

'Faktor für "Hammer Peening"
If FAT_S <= 90 And thickness >= 10 And iiw_Re <= 900 And iiw_fefHP = 1.3 Then
    FAT_S = FAT_S * iiw_fefHP
    If FAT_S >= 112 Then
        FAT_S = 112
    End If
End If

```

Nachbehandlung durch Hämmern

```

If FAT_S <= 90 And thickness >= 10 And iiw_Re <= 900 And iiw_fefHP = 1.6 Then
    FAT_S = FAT_S * iiw_fefHP
    If FAT_S >= 125 Then
        FAT_S = 125
    End If
End If

```

```

'Faktor für "Needle Peening"
If FAT_S <= 90 And iiw_fefNP = 1.3 Then
    FAT_S = FAT_S * iiw_fefNP
    If FAT_S >= 112 Then
        FAT_S = 112
    End If
End If

```

Nachbehandlung durch Nageln

```

If FAT_S <= 90 And iiw_fefNP = 1.6 Then
    FAT_S = FAT_S * iiw_fefNP
    If FAT_S >= 125 Then
        FAT_S = 125
    End If
End If

```

```

'Header Beschriftung
Cells(iAnzGLF + 12, 18).Value = "ni/Ni für S11"
Cells(iAnzGLF + 12, 19).Value = "ni/Ni für Sxx"
Cells(iAnzGLF + 12, 20).Value = "ni/Ni für T"
Cells(iAnzGLF + 12, 21).Value = "Angle in deg"
Cells(iAnzGLF + 12, 22).Value = "ni"

iCount = 0
iCountGrp = 0

'Schädigungsrechnung
Do
    iCountGrp = iCountGrp + 1
    iCountLF = 0
    groupLC = Trim(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 1, 2).Text)

    Do
        'Untersuchung der Lastfallgruppe nach Lastfällen
        iCount = iCount + 1
        iCountLF = iCountLF + 1

        'Einlesen der Spannungen
        Sxx = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 4).Value
        Syy = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 6).Value
        Sxy = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 5).Value
        S11 = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 12).Value
        S22 = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 13).Value
        Sxym = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 14).Value

        'Berechnung des Winkels der betragsmäßig größeren HNS zur Bezugsrichtung x
        Select Case Sxy
            Case 0
                Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 21).Value = ""
            Case Is <> 0
                angle = 0.5 * Atn(2 * Sxy / (Sxx - Syy)) * 180 / WorksheetFunction.Pi
                Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 21).Value = angle
        End Select

    Loop Until groupLC <> Trim(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 1, 2).Text)

    Select Case LCase(staux)
        'Schreiben der Spannungswerte auf richtige Koordinaten
        'Die x Richtung bedeutet quer zur Naht, y Richtung bedeutet längs zu Naht
        Case "xx"
            Sxx_max = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 4), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 4)))
            Sxx_min = WorksheetFunction.Min(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 4), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 4)))
            Sxy_max = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 5), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 5)))
            Sxy_min = WorksheetFunction.Min(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 5), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 5)))
            Syy_max = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 6), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 6)))
            Syy_min = WorksheetFunction.Min(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 6), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 6)))
        Case "yy"
            Sxx_max = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 6), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 6)))
            Sxx_min = WorksheetFunction.Min(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 6), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 6)))

```

Winkelberechnung der HNS

```

    Sxy_max = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 5), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 5)))
    Sxy_min = WorksheetFunction.Min(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 5), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 5)))
    Syy_max = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 4), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 4)))
    Syy_min = WorksheetFunction.Min(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 4), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 4)))
    Case Else
        Sxx_max = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 4), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 4)))
        Sxx_min = WorksheetFunction.Min(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 4), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 4)))
        Sxy_max = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 5), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 5)))
        Sxy_min = WorksheetFunction.Min(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 5), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 5)))
        Syy_max = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 6), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 6)))
        Syy_min = WorksheetFunction.Min(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 6), Cells(iAnzGLF
+ 12 + iCount, 6)))
    End Select

'Hauptnormalspannungen einlesen
S11_max = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 12), Cells(iAnzGLF +
12 + iCount, 12)))
S11_min = WorksheetFunction.Min(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 12), Cells(iAnzGLF +
12 + iCount, 12)))
S22_max = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 13), Cells(iAnzGLF +
12 + iCount, 13)))
S22_min = WorksheetFunction.Min(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount - iCountLF + 1, 13), Cells(iAnzGLF +
12 + iCount, 13)))

'Berechnung des Spannungsverhältnisses
If Sxx_max = 0 Then
    R_Sxx = Sxx_min / 1E-34
Else:
    R_Sxx = Sxx_min / Sxx_max
End If
If Syy_max = 0 Then
    R_Syy = Syy_min / 1E-34
Else:
    R_Syy = Syy_min / Syy_max
End If
If Sxy_max = 0 Then
    R_Sxy = Sxy_min / 1E-34
Else:
    R_Sxy = Sxy_min / Sxy_max
End If
If S11_max = 0 Then
    R_S11 = S11_min / 1E-34
Else:
    R_S11 = S11_min / S11_max
End If
If S22_max = 0 Then
    R_S22 = S22_min / 1E-34
Else:
    R_S22 = S22_min / S22_max
End If

'Einlesen der Lastwechselzahl und Schreiben in Spalte 22
nload = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 1).Value

```

<p>Spannungsverhältnis berechnen</p>
--

```

Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 22).Value = nload

'Berechnung der Spannungsschwingbreite für HNS, NS und T
S11_r = WorksheetFunction.Max(S11_max - S11_min, S22_max - S22_min)
S_r = Sxx_max - Sxx_min
T_r = Sxy_max - Sxy_min

'Schreiben der Teilschädigungen pro Lastfallgruppe in das Sheet zuerst für HNS, dann NS und dann
Schubspannungen
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 18).Value = CSng(nload) / iiw_Ni_S(FAT_S * iiw_fefR(stressR, R_S11) * feft
/ gammaM, m, S11_r * gammaF)
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 19).Value = CSng(nload) / iiw_Ni_S(FAT_S * iiw_fefR(stressR, R_Sxx) * feft
/ gammaM, m, S_r * gammaF)
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 20).Value = CSng(nload) / iiw_Ni_T(FAT_T * iiw_fefR(stressR, R_Sxy) * feft
/ gammaM, T_r * gammaF)

Loop Until Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 1, 2) = ""

'Berechnung der Schadenssumme
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 1, 1).Value = "Schadenssumme, Winkeländerung der HNS in Grad und
Lastspielzahlen"
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 1, 18).Value = WorksheetFunction.Sum(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 18),
Cells(iAnzGLF + 12 + 1, 18)))
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 1, 19).Value = WorksheetFunction.Sum(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 19),
Cells(iAnzGLF + 12 + 1, 19)))
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 1, 20).Value = WorksheetFunction.Sum(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 20),
Cells(iAnzGLF + 12 + 1, 20)))
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 1, 21).Value = WorksheetFunction.Max(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 21),
Cells(iAnzGLF + 12 + 1, 21))) - WorksheetFunction.Min(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 21), Cells(iAnzGLF
+ 12 + 1, 21)))
angle = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 1, 21).Value
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 1, 22).Value = WorksheetFunction.Sum(Range(Cells(iAnzGLF + 12 + iCount, 22),
Cells(iAnzGLF + 12 + 1, 22)))
N = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 1, 22).Value

'zulässige Schadenssumme ist per Definition für variable Amplitudenbelastung =0.5 => schreiben in die
nächste zeile
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 2, 1).Value = "Korrigierte Schadenssumme für variable Amplitudenbelastung"
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 2, 18).Value = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 1, 18).Value / 0.5
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 2, 19).Value = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 1, 19).Value / 0.5
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 2, 20).Value = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 1, 20).Value / 0.5
D11 = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 2, 18).Value
Dxx = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 2, 19).Value
Dxy = Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 2, 20).Value

'Berechnung der Äquivalentspannung für die berechnete Schädigung. Spannung ist ohne Sicherheitsfaktor
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 3, 1).Value = "Berechnung der Äquivalentspannung für die berechnete Schädigung"
Seq_11 = iiw_DS_N(FAT_S / gammaM, N, D11, m) / gammaF
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 3, 18).Value = Seq_11
Seq_xx = iiw_DS_N(FAT_S / gammaM, N, Dxx, m) / gammaF
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 3, 19).Value = Seq_xx
Seq_xy = iiw_DT_N(FAT_T / gammaM, N, Dxy) / gammaF
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 3, 20).Value = Seq_xy

'Berechnung des Auslastungsgrades
Select Case angle
Case Is <= 20
CV = 1
Case Is > 20
CV = 0.5
End Select

```

Spannungsschwing-
breite berechnen

Teilschädigungen
berechnen

```

AG = ((Seq_xx / iiw_DS_N(FAT_S, N, 1, m) * gammaM * gammaF) ^ 2 + (Seq_xy / iiw_DT_N(FAT_T, N, 1) * gammaM *
gammaF) ^ 2) / CV

Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 5, 1).Value = "Auslastungsgrad"
Cells(iAnzGLF + 12 + iCount + 5, 20).Value = AG

'Result in die Tabelle zurückschreiben
ActiveWorkbook.Sheets("stress_evaluation").Cells(iRcount, 15).Value = AG

End Sub
Function iiw_Ni_S(FAT As Single, m As Single, S_r As Single)
'Diese Funktion gibt die zulässige Lastwechselzahl bis zur Wöhlerlinie bei einer bestimmten Normalspannung
an

Dim C1 As Single 'Wöhlerlinienkonstante C vor dem Knickpunkt
Dim C2 As Single 'Wöhlerlinienkonstante C nach dem Knickpunkt
Dim S_KP As Single 'Spannungsschwingbreite am Knickpunkt der Wöhlerlinie

S_KP = ((2 / 10) ^ (1 / m)) * FAT
C1 = 1 * 10 ^ 7 * S_KP ^ m
C2 = 1 * 10 ^ 7 * S_KP ^ (2 * m - 1)

Select Case S_r
Case Is >= S_KP
iiw_Ni_S = C1 / (S_r ^ m)
Case Is < S_KP
iiw_Ni_S = C2 / (S_r ^ (2 * m - 1))
End Select

End Function
Function iiw_Ni_T(FAT As Single, S_r As Single)
'Diese Funktion gibt die zulässige Lastwechselzahl bis zur Wöhlerlinie bei einer bestimmten Schubspannung an

Dim C1 As Single 'Wöhlerlinienkonstante C vor dem Knickpunkt
Dim C2 As Single 'Wöhlerlinienkonstante C nach dem Knickpunkt
Dim S_KP As Single 'Spannungsschwingbreite am Knickpunkt der Wöhlerlinie
Dim m As Single 'Wöhlerlinienneigung vor dem Knickpunkt

m = 5
S_KP = ((2 / 100) ^ (1 / m)) * FAT
C1 = 1 * 10 ^ 8 * S_KP ^ m
C2 = 1 * 10 ^ 8 * S_KP ^ (2 * m - 1)

Select Case S_r
Case Is >= S_KP
iiw_Ni_T = C1 / (S_r ^ m)
Case Is < S_KP
iiw_Ni_T = C2 / (S_r ^ (2 * m - 1))
End Select

End Function
Function iiw_DS_N(FAT As Single, N As Single, D As Single, m As Single)
'Diese Funktion gibt die Spannungsschwingbreite bis zur Wöhlerlinie bei einer bestimmten Lastwechselzahl an

Dim C1 As Single 'Wöhlerlinienkonstante C vor dem Knickpunkt
Dim C2 As Single 'Wöhlerlinienkonstante C nach dem Knickpunkt
Dim S_KP As Single 'Spannungsschwingbreite am Knickpunkt der Wöhlerlinie

S_KP = ((2 / 10) ^ (1 / m)) * FAT
C1 = 10 ^ 7 * S_KP ^ m
C2 = 10 ^ 7 * S_KP ^ (2 * m - 1)

```



```

Select Case N
  Case Is >= 10 ^ 7
    iiw_DS_N = (C2 * D / N) ^ (1 / (2 * m - 1))
  Case Is < 10 ^ 7
    iiw_DS_N = (C1 * D / N) ^ (1 / m)
End Select

End Function
Function iiw_DT_N(FAT As Single, N As Single, D As Single)
'Diese Funktion gibt die Spannungsschwingbreite der Schubspannung bis zur Wöhlerlinie bei einer bestimmten
Lastwechselzahl an

Dim C1 As Single      'Wöhlerlinienkonstante C vor dem Knickpunkt
Dim C2 As Single      'Wöhlerlinienkonstante C nach dem Knickpunkt
Dim S_KP As Single    'Spannungsschwingbreite am Knickpunkt der Wöhlerlinie
Dim m As Single        'Wöhlerlinienneigung vor dem Knickpunkt

m = 5
S_KP = ((2 / 100) ^ (1 / m)) * FAT
C1 = 10 ^ 8 * S_KP ^ m
C2 = 10 ^ 8 * S_KP ^ (2 * m - 1)

Select Case N
  Case Is >= 10 ^ 8
    iiw_DT_N = (C2 * D / N) ^ (1 / (2 * m - 1))
  Case Is < 10 ^ 8
    iiw_DT_N = (C1 * D / N) ^ (1 / m)
End Select

End Function
Function iiw_fefR(typ As Integer, R As Single)
'Diese Funktion berechnet den "fatigue enhancement factor" in abhängigkeit des Spannungsverhältnisses

Select Case typ
  Case 1
    Select Case R
      Case Is < -1
        iiw_fefR = 1.6
      Case Is > 0.5
        iiw_fefR = 1
      Case Else
        iiw_fefR = -0.4 * R + 1.2
    End Select
  Case 2
    Select Case R
      Case Is < -1
        iiw_fefR = 1.3
      Case Is > 0.5
        iiw_fefR = 1
      Case Else
        iiw_fefR = -0.4 * R + 0.9
    End Select
  Case 3
    iiw_fefR = 1
  Case Else
    MsgBox "Wrong definition of fatigue enhancement factor", vbOKOnly, "Error"
End Select

End Function

```

Anhang B

Die Berechnungsparameter für die Auswertung nach der FKM Richtlinie:

- Eigenspannungen und die daraus folgende Mittelspannungsempfindlichkeit

Eigenspannung	$K_{E,\sigma}$	M_σ	$K_{E,\tau}$	M_τ
Hoch	1,00	0,00	1,00	0,00
Mäßig	1,26	0,15	1,15	0,09
Gering	1,54	0,30	1,30	0,17

- Ertragbare Minersumme D

	Nichtgeschweißte Bauteile	Geschweißte Bauteile
Stahl, GS, Alu	0,3	0,5
GGG, GT, GG	1,0	1,0

- Gesamtsicherheitsfaktor j_{ges}

j_D		Schadensfolgen	
		Hoch	Gering
Regelmäßige Inspektion:	Nein	1,5	1,3
	ja	1,35	1,2

- Oberflächenverfestigungswert K_v

Kugelstrahlen	1,10 – 1,50 (1,60 – 2,80)
---------------	------------------------------