



Andrea Putz, BSc.

# Leitfaden zur Bewertung von realen Schweißnahtenden

## MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Ass.Pof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Moser

Dipl.-Ing. Christian Buzzi

Arbeitsgruppe Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik  
des Instituts für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik

# 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.

Graz, 17.10.2016

.....

Andrea Putz

# 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, 17.10.2016

.....

Andrea Putz

Diese Masterarbeit entstand in enger Zusammenarbeit mit der  
SIEMENS AG in Graz  
und der Arbeitsgruppe für Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik  
des Instituts für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik  
der Technischen Universität Graz.

Mein aufrichtiger Dank gilt folgenden Personen:

Dipl.-Ing. Werner Mößler (SIEMENS AG)

Dipl.-Ing. Markus Hubmann (SIEMENS AG)

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Moser (TU GRAZ)

Dipl.-Ing. Christian Buzzi (TU GRAZ)

Andrea Putz

Graz, November 2016

# Kurzfassung

---

Da Schienenfahrzeuge während ihrer langen Einsatzdauer eine Vielzahl an wechselnden und kombinierten Belastungszuständen erfahren, kommt der Ermüdungsfestigkeit der Fahrwerke besondere Bedeutung zu. Diese Fahrwerke bestehen u.a. aus einem geschweißten Rahmen und diversen angeschweißten Konsolen. Für die Bewertung dieser Schweißkonstruktionen werden bestimmte Normen, Richtlinien und Regelwerke herangezogen, welche Kataloge mit sogenannten Bauteilklassen beinhalten. Diese werden auch Kerbfallklassen genannt und zeigen unterschiedliche Schweißnahtdetails mit dem jeweiligen zulässigen Festigkeitswert. Die Zuordnung des einzelnen Schweißnahtdetails zu einer solchen Kerbfallklasse stellt sich auch für erfahrene Berechnungsingenieure nicht immer als eindeutig dar. Da eine falsche Auslegung von Schienenfahrzeugen gravierende Folgen für Mensch und Umwelt haben kann, muss sichergestellt werden, dass die Schweißnähte richtig bewertet werden.

Zu diesem Zweck wurden in vorliegender Masterarbeit Untersuchungen zur Bewertung von Schweißnahtenden vollzogen. Diese sogenannten Abbindenähte liegen quer zu den Längsnähten von Anschweißteilen und schützen vor einer stirnseitigen Risseinleitung. Mit Hilfe von Schwingversuchen von Kleinproben wird einerseits die Qualität der betriebsinternen Fertigung festgestellt und andererseits eine Anpassung der Bewertungsvorschrift begründet. Weil Schwingversuche jedoch kostspielig und aufwendig sind, kann nicht jede Kombinationsmöglichkeit von Blechstärken, Schweißnähten etc. geprüft werden.

Deshalb wird mit Hilfe des Kerbspannungskonzepts eine FEM-Simulation der Versuchsproben generiert. Anschließend wird die numerische Untersuchung auf bestimmten Einflussfaktoren, wie Blechdicke, Schweißnahtart bzw. Schweißnahtgröße, Einbausituation, Lastrichtung, etc. ausgedehnt. In einem nächsten Schritt werden Verbesserungen des Ermüdungsverhaltens durch Nachbehandlung simuliert. Dies wird sowohl für eine ausgewählte Probenform als auch für ein reales Beispiel aus der laufenden Projektarbeit der Siemens AG durchgeführt. Diese Nahtnachbehandlung hat zur Folge, dass das Kerbspannungskonzept eventuell seine Gültigkeit verliert. Deshalb wurde ein Vorschlag zur Anpassung des Kerbspannungskonzepts erarbeitet. Zum Schluss werden die notwendigen Auswirkungen auf die aktuelle Bewertungsmethodik erläutert.

# Abstract

---

Since rail vehicles experience a variety of changing and combined load conditions during their long service life, the fatigue strength of the bogie is of particular importance. These bogies consist, among other things, of a welded frame and various welded brackets. For the assessment of these welded constructions, certain standards, guidelines and regulations are used which include catalogues with classified structural details. These are also called fatigue classes (FAT) and show different welded details with their fatigue resistance value. The assignment of the individual weld detail to such a fatigue class is not always clear even for experienced engineers. Since an incorrect design of rail vehicles can have serious consequences for man and the environment, it must be ensured that the weld seams are correctly evaluated.

For this purpose, examinations for the assessment of welds around ends have been carried out in this master thesis. These seams at the end lie transversely to the longitudinal seams of welded parts and prevent against crack initiation at the end. With the help of vibration tests of small samples, the quality of the in-house production is ascertained and an adjustment of the standard and recommendations is justified. However, since vibration tests are costly, not every possibility of combining sheet metal thicknesses, weld seams, etc. can be tested.

Therefore, an FEM simulation of the test samples is generated using the “effective notch stress concept”. Subsequently, the numerical examination is extended to certain influencing factors, such as sheet thickness, weld seam type or weld seam size, structural detail, load direction, etc. In the next step, improvements of the fatigue behavior by post-treatment are simulated. This is done for a selected sample form as well as for a real example from the ongoing projects of Siemens AG. This post-treatment of the weld seam has the effect that the stress concept may lose its validity. Therefore, a proposal was developed to adjust the effective notch stress concept. Finally, the necessary adaptations on the current assessment methodology are explained.

# Inhaltsverzeichnis

---

1	Einleitung .....	1
2	Theorie.....	4
2.1	Materialermüdung .....	4
2.1.1	Experimentelle Grundlagen der Ermüdungsfestigkeit.....	5
2.1.2	Ermüdungsfestigkeit von Schweißnähten .....	7
2.2	Spannungskonzepte .....	9
2.2.1	Nennspannungskonzept .....	10
2.2.2	Strukturspannungskonzept .....	10
2.2.3	Kerbspannungskonzept .....	11
2.3	FKM-Richtlinie .....	12
3	Ziel .....	15
3.1	Aufgabenstellung .....	15
3.2	Methode.....	16
4	Kleinprobenversuche.....	17
4.1	Prüfkörper .....	17
4.2	Fertigung .....	18
4.3	Versuchsdurchführung und Auswertung .....	22
4.4	Mittelspannungsempfindlichkeit .....	22
4.5	Ergebnisse des Schwingversuchs.....	26
4.5.1	Probenserie C1.....	27
4.5.2	Probenserie C2.....	28
4.5.3	Probenserie C4.....	29
4.5.4	Probenserie C7.....	30
4.6	Diskussion der Ergebnisse des Schwingversuchs.....	31
4.6.1	Probenserie C1 & C2.....	31
4.6.2	Probenserie C4.....	35

4.6.3	Probenserie C7.....	36
4.6.4	Worst-Case.....	37
5	Schwingversuch Drehgestell .....	38
6	Numerische Untersuchung.....	40
6.1	Modellbildung und Simulation .....	40
6.2	Proben und Varianten .....	42
6.3	Einbausituation .....	49
6.3.1	Mit Steg .....	49
6.3.2	Ohne Steg .....	51
6.4	Nachbehandlung.....	52
6.5	Realer Abbinder.....	53
6.6	Schalenmodell .....	54
7	Ergebnisse numerische Untersuchung.....	55
7.1	Proben.....	55
7.2	Varianten .....	63
7.2.1	Längsnaht Doppelkehlnaht .....	63
7.2.2	Längsnaht HY mit Gegenlage.....	68
7.2.3	Längsnaht K-Naht.....	72
7.3	Einbausituation .....	76
7.3.1	Mit Steg .....	76
7.3.2	Ohne Steg – einseitige Längssteife.....	79
7.4	Nachbehandlung.....	84
7.5	Realer Abbinder.....	89
7.6	Schalenmodelle .....	90
8	Vergleich Kleinprobenversuch Simulation .....	101
9	Zusammenfassung und Fazit .....	102

# 1 Einleitung

---

Die Forderung nach Leichtbau und die damit einhergehende betriebsfeste Auslegung verlangt die genaue Kenntnis der Ermüdungsfestigkeit von schwingbeanspruchten Bauteilen. Vor allem die Bewertung von sicherheitsrelevanten Produkten, wie zum Beispiel von Verkehrsmitteln, muss penibel durchgeführt und die Ergebnisse kritisch hinterfragt werden. Der Ermüdungsbruch von Strukturbauteilen ist generell ein äußerst lokaler Prozess verglichen mit der globalen Belastungssituation. Die lokalen Parameter Geometrie, Lasten und Material bestimmen wesentlich die Ermüdungsfestigkeit bzw. Lebensdauer und müssen für die Bewertung so wirklichkeitsnah wie möglich berücksichtigt werden. (1)

Insbesondere Schienenfahrzeuge erfahren eine Vielzahl an komplexen und hohen Belastungen während ihrer langen Einsatzdauer von bis zu 40 Jahren. Grundsätzlich kann ein solches Fahrzeug in die Baugruppen Wagenkasten und Fahrwerk eingeteilt werden. Das Fahrwerk überträgt die Antriebs- und Bremskräfte auf die Schienen und wird Drehgestell genannt, wenn es sich gegenüber dem Wagenkasten um einen definierten Punkt verdrehen kann. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, setzt sich ein solches Drehgestell aus den Komponenten Radsatz mit Radsatzlagerung, Radsatzführung, Brems- und Antriebseinrichtung, Primär- und Sekundärfederungen, Abstützung und Anlenkung des Fahrzeugkastens und Fahrwerkrahmen (siehe Abbildung 2) zusammen.



Abbildung 1 Drehgestell der Fa. Siemens AG (2)



Der Rahmen besteht aus ebenen oder gebogenen Blechen bzw. gegossenen, geschmiedeten oder gefrästen Formteilen und wird mittels geeigneter Schweißverfahren hergestellt. (3)

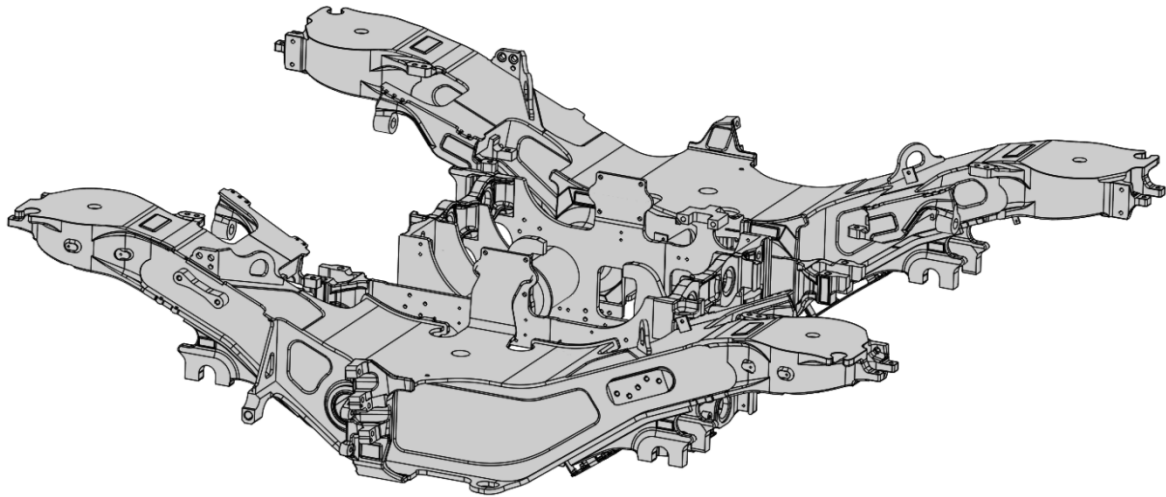


Abbildung 2 Drehgestellrahmen der Fa. Siemens AG (2)

Dabei werden die Enden von Längsschweißnähten mit so genannten Abbindenähten quer zu ihrer Längsrichtung verschweißt (siehe Abbildung 3). Diese Abbinde sollen vor einer stirnseitigen Risseinleitung und vor Korrosion an den Blechenden schützen.

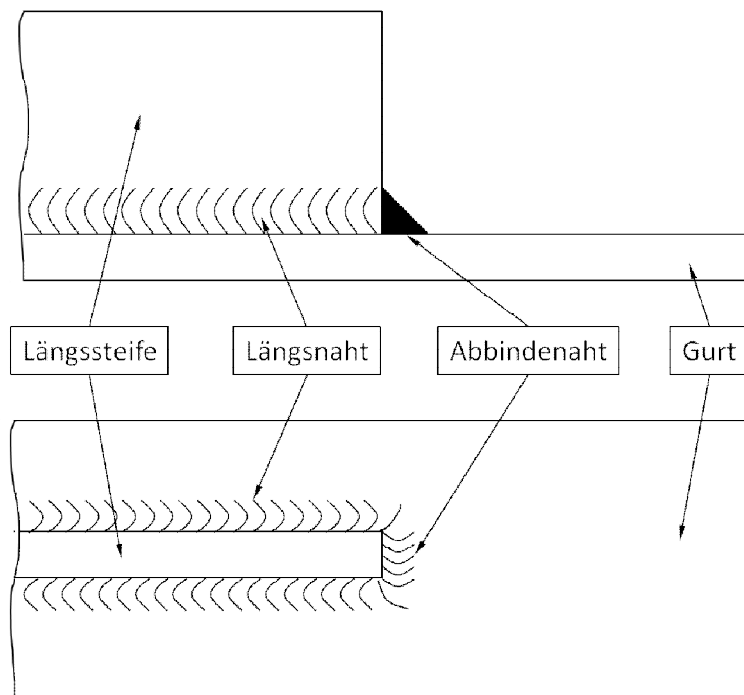


Abbildung 3 Skizze Abbinde (4)

Sie können entweder als Kehlnähte oder als HY-Nähte gefertigt werden (siehe Abbildung 4)  
Sie erhöhen die dynamische Festigkeit der Rahmenstruktur durch Spannungsreduktion und verminderte Kerbwirkung wesentlich. (4)

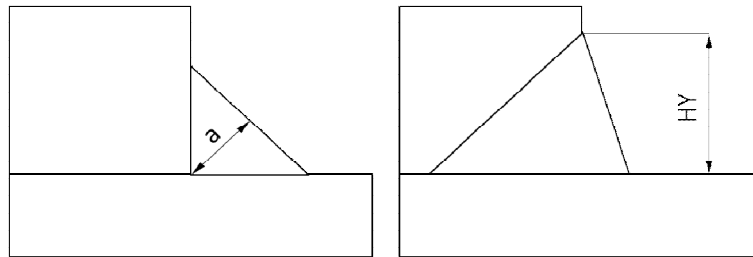


Abbildung 4 Kehlnaht (links) und HY-Naht (rechts)

Für die Bewertung der Schweißnähte beinhalten die unterschiedlichen Regelwerke sogenannte Kerbfallkataloge, in denen typische Strukturen mit einem zulässigen Festigkeitswert vorgeschlagen werden. Es besteht jedoch die Gefahr, dass das bestimmte Bauteil keinem Kerbfall eindeutig zugeordnet werden kann bzw. dass das abstrahierte Schweißnahtdetail aus dem Katalog eventuell schwingfester ist, als das reale Bauteil in der konkreten Einbausituation.

Um sich Gewissheit über die Ermüdungsfestigkeit zu verschaffen, empfiehlt es sich, Schwingversuche durchzuführen. Dafür werden Kleinproben gefertigt und anschließend nach bestimmten Prüfvorschriften untersucht. Das Ziel solcher Versuche ist eine realistische Bewertung der Schweißnähte garantieren zu können. Diese Schwingversuche sind im Allgemeinen jedoch sehr aufwendig und es können nur ausgewählte Probenformen geprüft werden. Deshalb ist es für eine detaillierte Analyse sinnvoll, eine numerische Simulation zu generieren.

Ziel dieser Arbeit ist es, mit Hilfe eines geeigneten Modells und Spannungskonzeptes, den Einfluss bestimmter Faktoren auf die Festigkeit von Schweißnahtabbindern festzustellen und diese Ergebnisse sowohl mit den Resultaten des Schwingversuchs zu vergleichen als auch die Auswirkungen auf die aktuelle Bewertungsmethodik zu erörtern.

## 2 Theorie

In diesem Kapitel werden die theoretischen Hintergründe vorliegender Arbeit behandelt. Zunächst werden die Materialermüdung, ihre experimentellen Grundlagen und die Anwendung für Schweißnähte erläutert. Anschließend folgen die unterschiedlichen Bewertungskonzepte und zum Schluss eine kurze Einführung in die verwendete Richtlinie.

### 2.1 Materialermüdung

Unter dynamischer Beanspruchung entstehen an metallischen Bauteilen und Werkstoffen Anrisse, die bei weiterer Belastung wachsen und zu Schädigung oder Versagen führen können. Der Riss entsteht vorzugsweise an Fehlstellen, Kerben oder Querschnittsübergängen und vergrößert sich bis ein Restbruch eintritt. Dabei sind die ertragbaren Spannungsmaxima deutlich unter jenen Kennwerten, die von statischen Versuchen (Streckgrenze  $R_e$ , Zugfestigkeit  $R_m$ ) bekannt sind. (5)

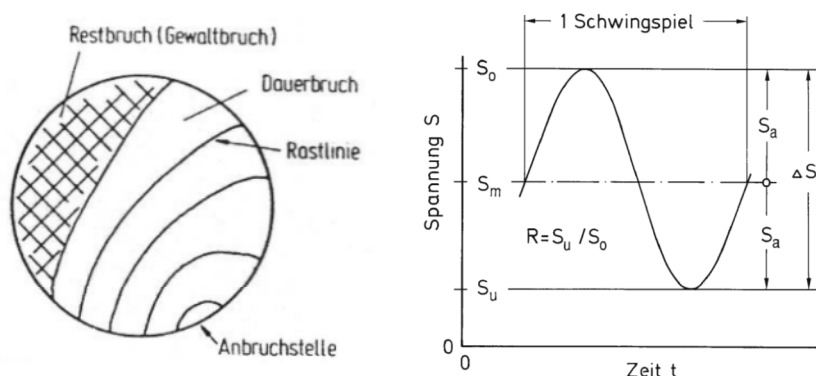


Abbildung 5 schematische Darstellung einer Bruchfläche (links) (5); Beanspruchungskennwerte im Dauerschwingversuch (rechts) (6)

Ermüdungsfestigkeit wird als Überbegriff für Schwingfestigkeit (periodisch wiederholende Belastung) und Betriebsfestigkeit (zufallsartig oder aperiodisch deterministischer Lastablauf) verwendet und beschreibt die ertragbare Beanspruchungsamplitude  $S_a$  oder  $\sigma_a$  bei definiertem Versagenskriterium unter begrenzter oder unbegrenzter Schwingspielzahl. (6)

Vor allem an geschweißten Strukturen entstehen an den Nahtübergängen scharfe Kerben, welche lokal zu einer Überschreitung der ertragbaren Beanspruchungen führen und somit maßgeblichen Einfluss auf die Schwingfestigkeit haben. Weiters befinden sich Kerben mit sehr kleinen Radius oder sogar rissförmiger Geometrie in den Fügespalten des Schweißstoßes von nicht voll durchgeschweißten Verbindungen. (7)

### 2.1.1 Experimentelle Grundlagen der Ermüdungsfestigkeit

Der Wöhlerversuch dient als Ausgangspunkt zur Beschreibung der Ermüdungsfestigkeit. Bei diesem meist sinusförmigen Schwingversuch werden identische Proben bei gleicher Mittelspannung  $S_m$  bzw.  $\sigma_m$ , aber unterschiedlicher Spannungsamplitude  $S_a$  oder  $\sigma_a$  bis zum Bruch in einer Schwingprüfanlage geprüft. Je nach Probenform werden die Versuche in ungekerbte Bauteile, gekerbte Bauteile (Berücksichtigung von Formzahl und Kerbradius) und Wöhlerversuch unter Berücksichtigung von Größen und Oberflächeneinfluss („Bauteil-Wöhler-Linie“) eingeteilt. Die Berechnung erfolgt vereinfacht mit Nennspannungen.

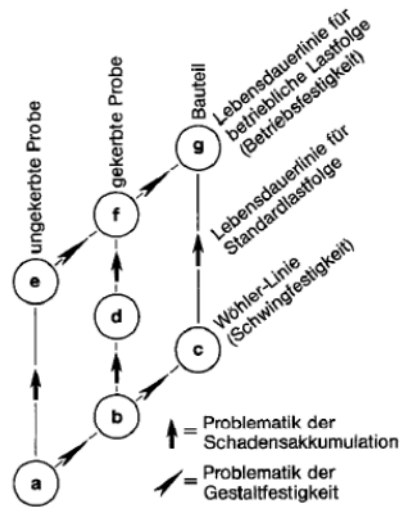


Abbildung 6 Problemfeld der Ermüdungsfestigkeit, Strukturierung hinsichtlich ertragbarer Beanspruchungen (8)

Außerdem unterscheidet man die Versuche je nach Lastablauf in die Bereiche Druckschwell-, Wechsel- und Zugschwellbeanspruchung, wobei folgende Zusammenhänge bzgl. Oberspannung  $S_o$ , Unterspannung  $S_u$ , Spannungsverhältnis  $R$ , Spannungsamplitude  $S_a$  und Mittelspannung  $S_m$  gelten (analog für  $\sigma$ ):

$$R = \frac{S_u}{S_o}$$

$$S_m = \frac{S_o + S_u}{2}$$

$$S_a = \frac{S_o - S_u}{2}$$

Formel 1 math. Zusammenhang der Spannungs-kennwerte

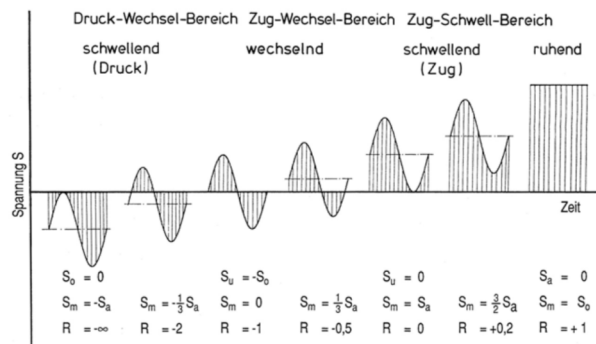


Abbildung 7 Beanspruchungsbereiche im Schwingversuch (9)

Je nach ertragbarer Schwingspielzahl  $N$  erfolgt eine Unterteilung in die Bereiche Kurzzeitfestigkeit (bis  $10^4$  Schwingspiele), Zeitfestigkeit (ab ca.  $10^5$  Schwingspiele) und Dauerfestigkeit (ab  $10^6$ - $10^7$  Schwingspiele). Die Zugfestigkeit  $R_m$  stellt dabei die maximal ertragbare Spannung, die Streckgrenze  $R_e$  die ertragbare Beanspruchung an der Verformgrenze dar. Diese Kennwerte werden im einachsigen Zugversuch ermittelt und können dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm entnommen werden. Die Dauerfestigkeit bezeichnet den Beanspruchungsgrenzwert, bis zu dessen Höhe eine schwingende Beanspruchung beliebig oft ohne Bruch ertragen werden kann. Bei Beanspruchungsamplituden größer als dem Dauerfestigkeitswert tritt der Bruch nach einer endlichen Anzahl von Schwingspielen ein. Der Zusammenhang von Spannungamplitude und Schwingspielzahl wird durch die Zeitfestigkeitslinie dargestellt. (9)

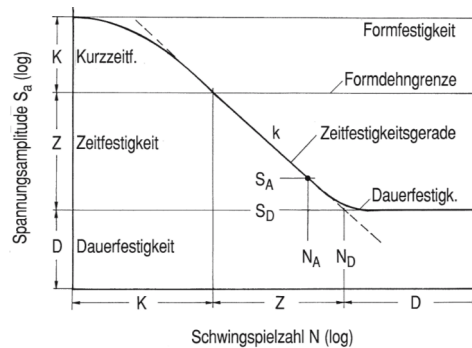


Abbildung 8 Kennwerte einer Wöhlerlinie (9)

Da die Versuchsergebnisse im Schwingversuch stark streuen, werden statistische Verfahren zur Planung und Auswertung angewendet. Überträgt man die Ergebnisse in ein doppellogarithmisches Diagramm, erhält man eine Wöhlerlinie. Das Streuband markiert einen Übergangsbereich zwischen 0% und 100% Bruchwahrscheinlichkeit. Bei Annahme der Gauß-Normalverteilung werden die Grenzwerte erst im Unendlichen erreicht. Je nach Anwendungsbereich werden bestimmte Überlebenswahrscheinlichkeiten angenommen. (5)

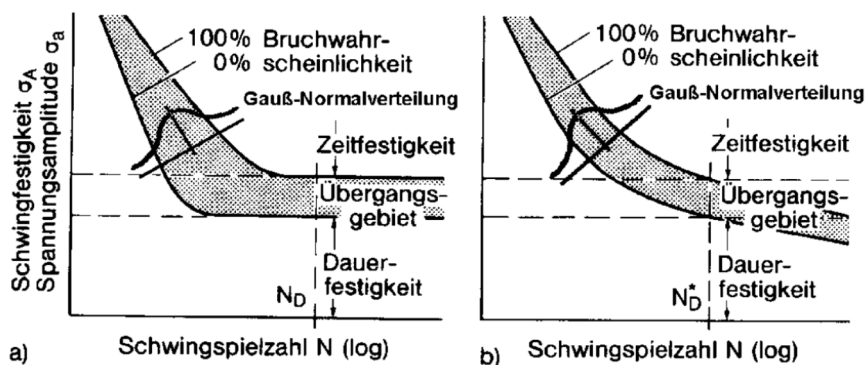


Abbildung 9 Wöhler-Diagramme mit Streuband: mit (links) und ohne (rechts) ausgeprägte Dauerfestigkeit (5)

Bezieht man die streuenden Ergebnisse aus dem Zeitfestigkeitsversuch auf die Dauerfestigkeit, z.B. bei Grenzschwingspielzahl zur Dauerfestigkeit  $N_D=10^6$  und Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_U=50\%$ , ergibt sich für verschiedene Stähle und unterschiedliche Spannungsverhältnisse ein Streuband, welches hinsichtlich Neigung, Breite und Abknickpunkt einheitlich ist – man erhält „normierte Wöhlerlinien“.

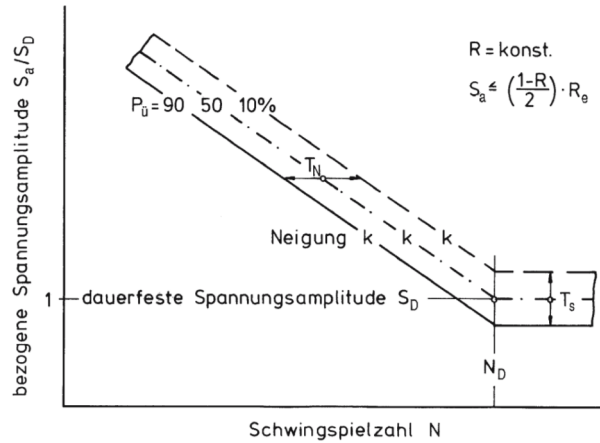


Abbildung 10 normierte Wöhlerlinie für gekerbte Bauteile aus Stahl und Aluminiumlegierungen (9)

### 2.1.2 Ermüdungsfestigkeit von Schweißnähten

Diese Methode wird vor allem für die Bewertung von Schweißverbindungen genutzt und wurde durch eine breite Datenbasis abgesichert. (Auflistung siehe (9 S. 684-685)) Sie ermöglicht eine rechnerische Abschätzung der Wöhlerlinien und die Erstellung sogenannter Kerbfallkataloge. Das Schema der normierten Wöhlerlinien wurde für Schweißverbindungen aus Baustahl für (10) (11) (12) übernommen bzw. erweitert und wird bei Bedarf aktualisiert.

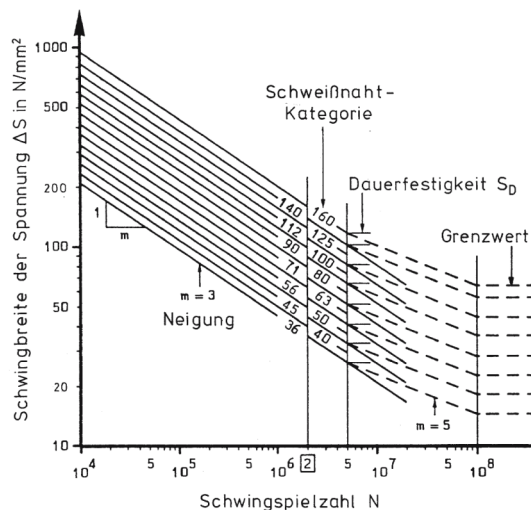


Abbildung 11 Wöhlerlinien für Schweißverbindungen aus Baustahl nach (12)

Wie in Abbildung 11 zu sehen, ist zu beachten, dass nicht die Spannungsamplitude  $\sigma_a$ , sondern die Schwingbreite  $\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma_a$  über die Schwingspielzahl  $N$  aufgetragen wird. Für Normalspannung gilt bis zum Knickpunkt bei  $N=5E6$  Schwingspielen ein Wöhlerlinienexponent von  $k=3$ . Die Annahme einer „Dauerfestigkeit“ – unterhalb derer keine weitere Schädigung auftritt – beschreibt die Kurve nach dem Knickpunkt als Horizontale. Die Schwingbreite bei  $N=2E6$  Schwingspielen dient als Bezeichnung der einzelnen Kerbfälle. Diese werden auch FAT-Klassen, in Anlehnung an die englische Bezeichnung der Ermüdung „Fatigue“, genannt. Ihre Unterteilung erfolgt aufgrund der Normzahlreihe R20. Die vorgegebenen Kerbfallzuordnung berücksichtigt stahlbautypische Formen von Schweißverbindungen mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_u = 97,7\%$  (Mittelwert minus zwei Standardabweichungen). (9)

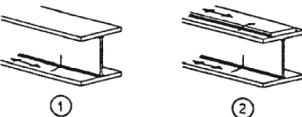
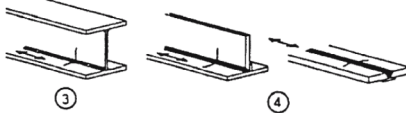
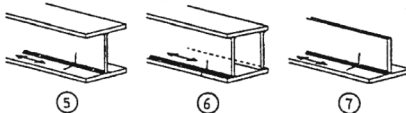
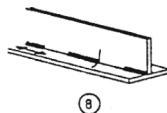
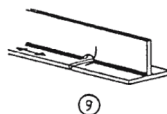
Kategorie	Schweißnaht-Detail
125	
112	
100	
80	
71	

Abbildung 12 Beispiel für die Zuordnung von Schweißnahtdetails zur Kerbfalkategorie (FATKlasse) (9)

## 2.2 Spannungskonzepte

Schweißnähte verursachen eine nicht lineare Spannungsverteilung über die Blechdicke im Bauteil. Diese Kerbspannung  $\sigma_{In}$  kann in Membranspannung  $\sigma_{mem}$ , Biegespannung  $\sigma_{ben}$  und nicht-lineare Spannungsspitze  $\sigma_{nlp}$  aufgeteilt werden.

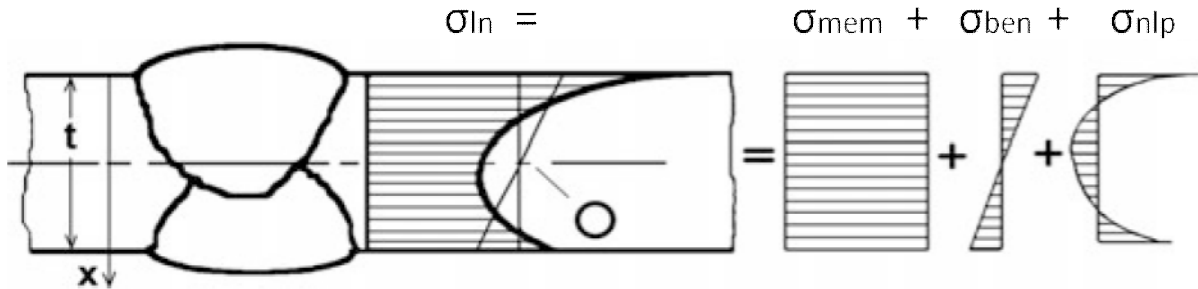


Abbildung 13 Spannungskomponenten der Kerbspannung (12)

Die Membranspannung ist konstant über den Querschnitt, die Biegespannung ist linear verteilt und die nicht lineare Spannungsspitze ist der übrige Anteil. (12)

Folgende Spannungskonzepte können für die Bewertung unterschieden werden:

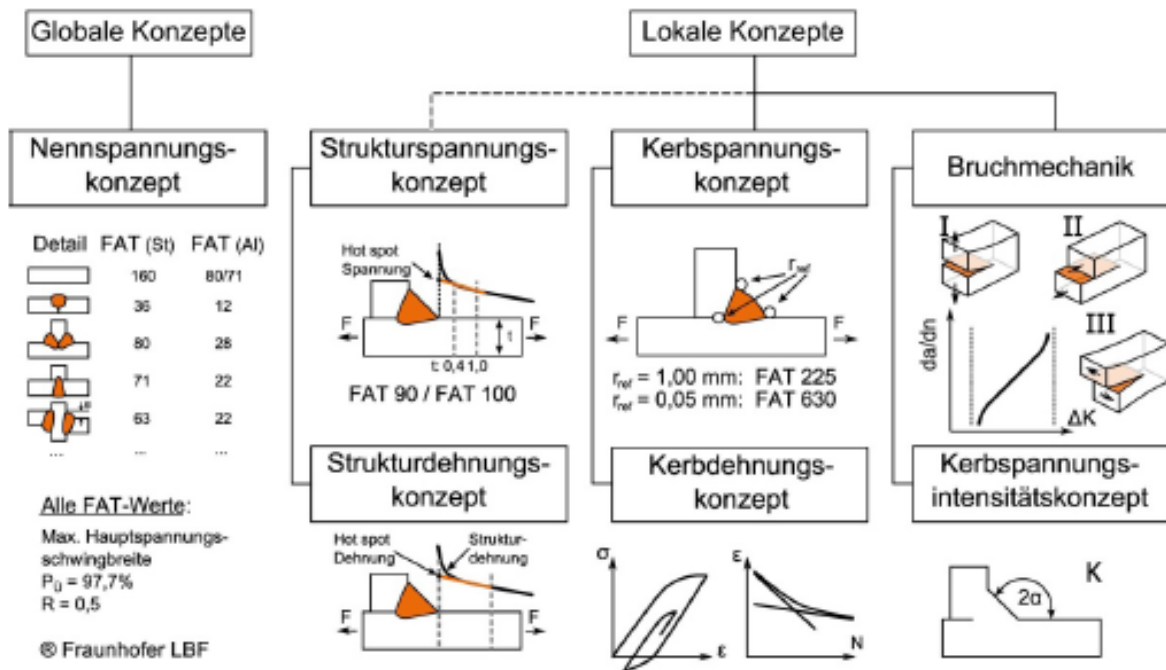


Abbildung 14 Konzepte zur Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen (9)



### 2.2.1 Nennspannungskonzept

Die Nenn- oder auch Nominalspannung  $\sigma_n$  oder  $S_n$  ist die aus den Schnittgrößen errechnete Spannung im betrachteten Querschnitt. Mit Hilfe von Faktoren oder Spannungszuschlägen werden geometrische Einflüsse, wie zum Beispiel große Ausschnitte, berücksichtigt. Spannungserhöhende Effekte aus Schweißverbindungen (Nahtform, Nahtfeingeometrie) oder ihrer Werkstoffkerbe (inhomogenes Gefüge im Nahtbereich) bleiben unberücksichtigt. Die ertragbaren Schwingfestigkeitswerte aus dem Katalog sind „aus den Versuchsergebnissen in gleicher Weise rückgerechnete und statistisch interpretierte Nennspannungen einer Schweißverbindung“. (13) Für einfache Bauteile erfolgt die Berechnung mit den Regeln der elementaren Festigkeitslehre. Bei komplizierteren Strukturen empfiehlt sich die Finite-Elemente-Methode, da Überbestimmtheit oder makrogeometrische Einflüsse problemlos berücksichtigt werden können. Sollen Nennspannungen gemessen werden, muss darauf geachtet werden, dass keine spannungserhöhenden Effekte mit gemessen werden.

Die Methode eignet sich allgemein für stab- oder flächenförmige Bauteile, jedoch nicht für komplexe Querschnitte. Zur Abschätzung der Schwingfestigkeit von geschweißten Strukturen hat sich das lokale Bemessungskonzept durchgesetzt, wobei darauf zu achten ist, dass mit zunehmenden Detaillierungsgrad der Arbeits- bzw. Berechnungsaufwand steigt. (9)

### 2.2.2 Strukturspannungskonzept

Bei diesem Konzept handelt es sich um eine Kombination aus Nennspannungskonzept und nachfolgendem Kerbspannungskonzept. Es wird häufig für die Bewertung des Nahtübergangs von komplexen Schweißkonstruktionen verwendet. Die zusammengefügte Bleche können als vergleichsweise einfaches und grob-maschiges Schalenmodell für die FEM-Simulation generiert werden und bilden dabei gut das globale Spannungsfeld ab. (14) Die Strukturspannung  $\sigma_{hs}$  (Hot-Spot-Spannung) in der Oberfläche beinhaltet alle spannungserhöhenden Effekte des Bauteils, jedoch nicht die der Schweißnaht selbst. Durch eine geeignete lineare Extrapolation des strukturbedingten Spannungsverlaufs wird eine fiktive Strukturspannung am Nahtübergang berechnet. Der Einfluss der Kerbwirkung wird auf der Festigkeitsseite durch Änderung der Wöherlinie berücksichtigt. (11 S. 179) (15)

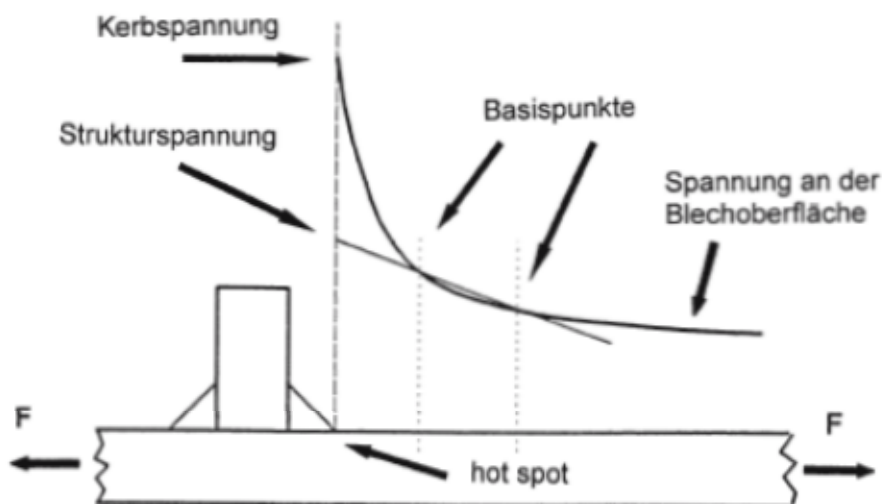


Abbildung 15 Ermittlung der Strukturspannung am Nahtübergang durch Extrapolation ausgehend von Basispunkten in geeignetem Abstand von der Naht (12)

### 2.2.3 Kerbspannungskonzept

Dieses Verfahren unterscheidet sich vom Strukturspannungskonzept dahingehend, dass auch die Schweißnaht modelliert wird und die Bewertung nicht nur am Nahtübergang, sondern auch in der Wurzel möglich ist.

Da die Geometrie der Schweißnaht und ihr nichtlineares Materialverhalten naturgemäß streuen, wird die reale Form der Kerbe durch einen fiktiven Kerbradius ersetzt, welcher für Baustähle  $r=1\text{mm}$  beträgt. (16) (17) (18) (19) (20) Durch diese Idealisierung gilt linear-elastisches Werkstoffverhalten. Generell wird die globale Struktur mit einem relativ groben Netz, welches den Kraftfluss bzw. das Verformungsverhalten realitätsnah wiedergibt, versehen. Es muss jedoch zum Kerbbereich hin stetig feiner werden und darf dabei keine übertriebenen Verzerrungen oder Größenänderungen aufweisen. (13) Die Modellierung nach dem Kerbspannungskonzept fordert an der betrachteten Stelle eine Netzfeinheit, welche den Spannungsanstieg normal und tangential zur Kerboberfläche ausreichend genau erfasst. Für einen Nahtübergang mit einem Nahtanstiegswinkel von  $45^\circ$  werden mindestens drei Elemente mit quadratischem Verschiebungsansatz entlang eines  $45^\circ$  Kreisbogens vorgeschlagen. (21) Die Kerbspannung  $\sigma_e$  ist die maximale Spannung in der idealisierten Kerbe im Kerbgrund.

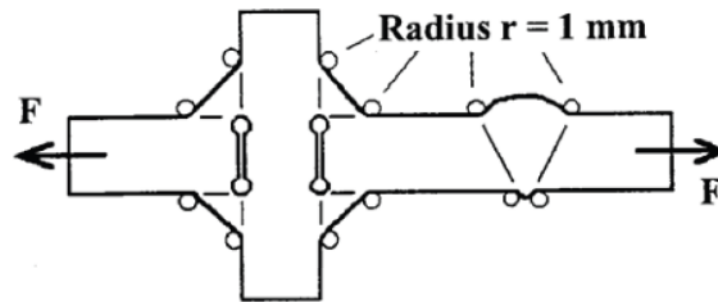


Abbildung 16 fiktive Kerbrundung zur Simulation der I-krostütz Wirkung am Nahtübergang und an der Nahtwurzel (22)

Da die spannungserhöhenden Effekte des Schweißnahtdetails in der Berechnung enthalten sind, müssen keine kerbfallspezifischen Bauteilklassen berücksichtigt werden. Für die IIW-Empfehlungen und die FKM-Richtlinie wurde dieses Konzept an den Berechnungsablauf angepasst. Die Bauteilkategorie für effektive Kerbspannung für geschweißte Verbindungen aus Stahl bei Normalspannungen beträgt FAT225 und entspricht der kerbfreien Bauteilkategorie Nr.121 nach dem Kerbfallkatalog für Nennspannungen. (11)

### 2.3 FKM-Richtlinie

Die Auslegung von geschweißten Stahlkonstruktionen wird durch diverse Normen, Vorschriften und Empfehlungen je nach Industriebereich geregelt – z.B. DIN 15018 für Kräne, Eurocode3 für Stahlbau etc. Zur Bewertung von Schweißnähten von Drehgestellrahmen für Schienenfahrzeuge wird vorwiegend die Richtlinie des Forschungsinstitut für Maschinenbau (FKM) „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“ und damit implizit u.a. die Empfehlung des International Institute of Welding (IIW) angewendet. Die Richtlinie besteht aus vier Hauptkapiteln und unterscheidet je nach verwendetem Spannungskonzept (Nennspannung oder örtliche Spannung) bzw. ob es sich um einen statischen Festigkeitsnachweis oder ob es sich um einen betriebs- bzw. dauerfesten Nachweis handelt.

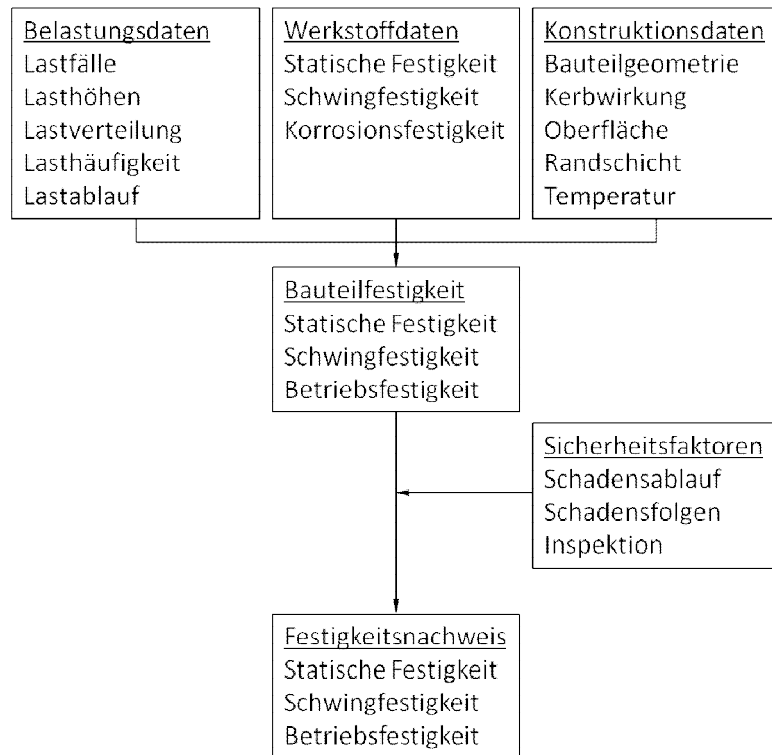


Abbildung 17 Übersicht der Einflussgrößen der FKM-Richtlinie (6)

Für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis werden die auftretenden Spannungen der Bauteilermüdungsfestigkeit unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren gegenübergestellt. Der Nachweis gilt als erbracht, wenn der Auslastungsgrad höchstens 100% beträgt. Der Nachweis muss für alle versagenskritischen Stellen eines Bauteils gemacht werden, deshalb wird bei Schweißverbindungen sowohl die Schweißnahtwurzel als auch der Schweißnahtübergang bewertet.

Für die lokale Betrachtung werden die Spannungskennwerte, Spannungsamplitude und die zugehörige Mittelspannung, in der Kerbe in ihre Komponenten bezüglich eines an der Schweißnaht ausgerichteten Koordinatensystems aufgeteilt.

$\sigma_{  }$	Normalspannungen parallel
$\sigma_{\perp}$	Normalspannungen senkrecht
$\tau$ $\tau_{  }$	Schubspannungen parallel

Für die Ermüdungsfestigkeit geschweißter Bauteile gelten schweißnahtspezifische Wechselfestigkeitskennwerte, welche unabhängig von der Werkstoffsorte sind. Neben der Werkstoffart (Stahl oder Aluminium) sind die konkrete Bauform, also das konstruktive Detail, die Stoßform und die Nahtausführung entscheidend.

Deshalb wird die die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit unter Verwendung von Konstruktionsfaktoren festgelegt. Für die „Bauteil-Wechselfestigkeit“ werden die Bauteilklasse, ein Umrechnungsfaktor von Bauteilklasse auf Bauteil-Wechselfestigkeit, ein Dickenfaktor und ein Randschichtfaktor berücksichtigt (siehe gelbe Box in Abbildung 18). Dabei entspricht die Bauteilklasse (oder Kerbfalklasse) der Doppelamplitude bei der Bezugszyklenzahl  $N_C$ . Anschließend wird mit Hilfe eines Mittelspannungsfaktors und Eigenspannungsfaktors die „Bauteildauerfestigkeit für eine bestimmte Mittelspannung“ berechnet (siehe grüne Box in Abbildung 18). Durch Berücksichtigung des Betriebsfestigkeitsfaktors wird daraus die „Bauteil-Betriebsfestigkeit“ (siehe rote Box in Abbildung 18 ) und der Auslastungsgrad kann wie schon beschrieben hergeleitet werden (siehe blaue Box in Abbildung 18). (11)

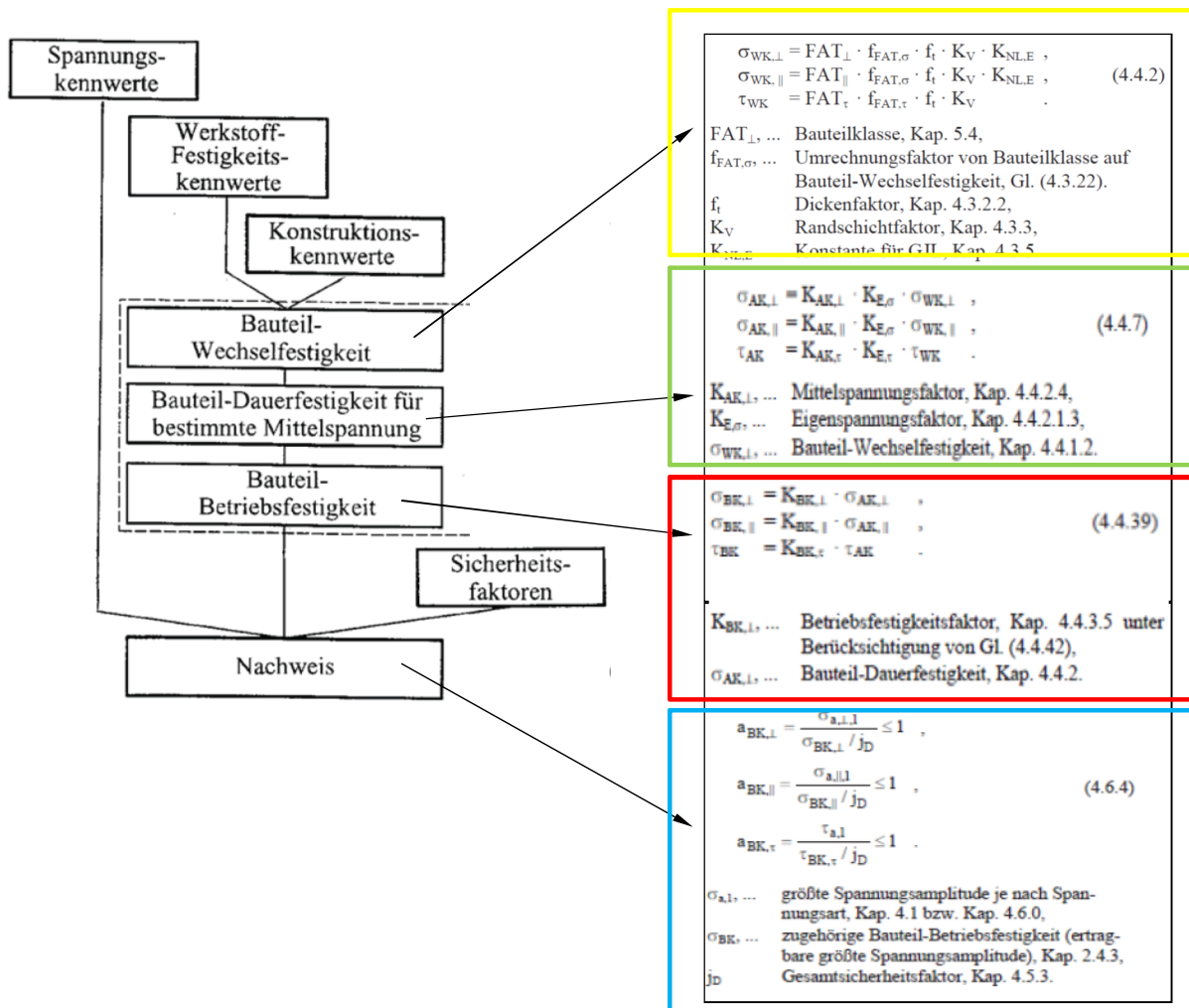


Abbildung 18 Ablauf des Ermüdungsfestigkeitsnachweises mit örtlichen Spannungen für geschweißte Bauteile (11)

### 3 Ziel

---

Das in der Einleitung bereits erwähnte Ziel kann nun konkretisiert werden und lautet:

Mit Hilfe eines 3-dimensionalen Modells soll unter Berücksichtigung des Kerbspannungskonzepts der Einfluss bestimmter Faktoren auf die Festigkeit von Schweißnahttabbindern festgestellt werden. Diese Ergebnisse werden anschließend mit den Resultaten des Schwingversuchs verglichen und die Auswirkungen auf die aktuelle Bewertungsmethodik erörtert.

#### 3.1 Aufgabenstellung

Folgende Aufgabenstellungen lassen sich daraus ableiten:

- Auswertung Kleinprobenversuche
  - Wöhlerlinie und Dauerfestigkeitslinie bestimmen
  - FAT-Klasse nach FKM-Richtlinie berechnen
- Simulation eines Schwingversuchs
  - Netzstudie anfertigen
  - Modellbildung und Simulation der Proben
  - Detaillierte Dokumentation der Ergebnisse
- Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Versuchsergebnissen
- Simulation und Dokumentation ausgewählter Kombinationsmöglichkeiten hinsichtlich:
  - Blechstärken
  - Schweißnahtart der Längsnähte
  - Schweißnahtart des Abbinders
  - Einbausituation
  - Richtung der Belastung
- Vorschläge für verbesserte Nahtgeometrie
  - Simulation Nachbehandlung
  - Schwingversuch Drehgestell
- Vergleich mit aktueller Bewertungsmethodik
  - Netzstudie Schalenmodell
  - Varianten Schalenmodell
  - Vergleich hinsichtlich Ort und Höhe der Strukturspannung

### 3.2 Methode

Die gesuchte Größe für die Bewertung der Abbinde ist die Nahtformzahl  $K_W$  (Formel 2). Sie beschreibt das Verhältnis zwischen maximaler Kerbspannung  $\sigma_e$  und Strukturspannung  $\sigma_{hs}$ .

$$K_W = \frac{\sigma_e}{\sigma_{hs}}$$

Formel 2 Nahtformzahl  $K_W$  (13)

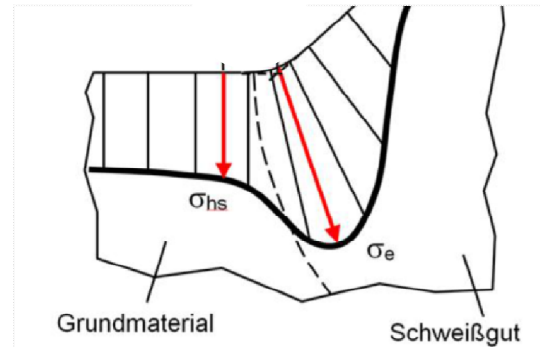


Abbildung 19 Spannungsverteilung am Nahtübergang (13)

Durch ihre Kenntnis kann die Kerbfallklasse bestimmt werden. Die FAT-Klasse wird generell für die Schweißnahtbewertung nach der FKM-Richtlinie benötigt und dient außerdem als Bezugsgröße für den Vergleich mit den Ergebnissen des Schwingversuchs. Dafür wird die Referenzbauteilklasse für geschweißte Strukturen nach dem Kerbspannungskonzept  $FAT_{Kerb}=225\text{MPa}$  durch die Nahtformzahl dividiert (siehe Formel 3). (13)

$$FAT_{Struktur} = \frac{FAT_{Kerb}}{K_W} = \frac{FAT_{Kerb} * \sigma_{hs}}{\sigma_e}$$

Formel 3 Zusammenhang der FAT-Klassen bei Strukturspannungs- und Kerbspannungskonzept (13)

Für die numerische Simulation mittels Finite-Elemente-Methode soll ein 3-dimensionales Modell unter Berücksichtigung des Kerbspannungskonzepts erstellt werden. Der Modellaufbau der Probengeometrie soll durch Parametrisierung automatisch erfolgen. Die Spannungsergebnisse werden als größte Hauptnormalspannungen und, wie in Abbildung 19 dargestellt, als größte Kerbspannung im Nahtübergang und 5mm davor als Strukturspannung dokumentiert. Die daraus berechneten Nahtformzahlen bzw. FAT-Klassen werden in Diagrammen dargestellt.

Die gleiche Vorgehensweise wird für die aktuelle Bewertungsmethodik, welche den Rahmen als Schale modelliert, angewendet. Anstelle der Nahtformzahl wird für die Schale die Strukturspannung dokumentiert. Für beide Elementarten soll zunächst eine Studie bzgl. der notwendigen Diskretisierung gemacht werden.

## 4 Kleinprobenversuche

Dieses Kapitel beinhaltet alle Informationen hinsichtlich der verwendeten Kleinproben und die Ergebnisse aus dem Schwingversuch.

Es handelte sich dabei um Bleche mit symmetrischen Längssteifen und den gängigsten Abbinderformen. Das Ziel der Untersuchung war die Ermittlung von Wöhlerlinien und deren Abknickpunkte, um somit den realen Unterschied zwischen HY-Naht und Kehlnaht zu erfassen. (23)

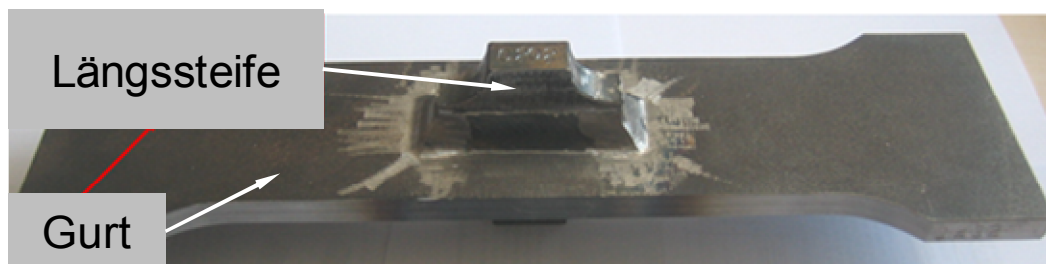


Abbildung 20 Kleinprobe mit Längssteife (2)

### 4.1 Prüfkörper

Die vier verschiedenen Ausführungen von Längssteifen wurden aus dem wetterfesten Konstruktionsbaustahl S355J2W+N bzw. nach DIN EN 10025-5:2005 aus 1.8965+N gefertigt. Die Bleche werden thermisch zugeschnitten und anschließend mechanisch bearbeitet. Die Fertigungszeichnungen und Abkürzungen befinden sich im Anhang.

Bezeichnung	Längsnaht	Abbindenaht	Grundblech	Längssteife	Abkürzung
C1	HY mit Gegenlage	Kehlnaht a=5mm	12mm	16mm	YB-EF
C2	HY mit Gegenlage	HY-Naht HY8	12mm	16mm	YB-EY
C4	Doppelkehlnaht	Kehlnaht a=5mm	12mm	10mm	FD-EF
C7	Doppel-HY-Naht	HY-Naht HY 8	12mm	20mm	YD-EY

Tabelle 1 Übersicht verwendete Proben



Die mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Bezeichnung nach EN 10025	Materialnummer	Mindeststreckgrenze $R_{eh}$ in MPa		Zugfestigkeit $R_m$ in MPa	Probenlage	Temperatur [°C]	Mindestkerbschlagarbeit [J]
		Nennstärke $\leq 16\text{mm}$	Nennstärke $> 16\text{mm}$ $\leq 40\text{mm}$	Nennstärke $> 3\text{mm}$ $< 100\text{mm}$			
S355J2W	1.8965	355	345	470 bis 630	in und quer zur Walzrichtung	-20	27

Tabelle 2 mechanische Eigenschaften S355J2W+N (24)

Die chemische Zusammensetzung nach der Schmelzanalyse ist Tabelle 3 zu entnehmen:

Bezeichnung nach EN 10025	Materialnummer	Desoxidationsart	C [%] max	Si [%] max	Mn [%]	P [%] max	S [%] max	Ni [%] max	Cr [%]	Cu [%]	Mo [%] max	Zr [%] max	Zusatz an Stickstoff abbindenden Elementen
S355J2W	1.8965	vollberuhigter Stahl	0,16	0,5	0,5 bis 1,50	0,03	0,03	0,65	0,40 bis 0,80	0,25 bis 0,55	0,3	0,15	ja

Tabelle 3 chemische Zusammensetzung S355J2W+N (24)

Das Kohlenstoffäquivalent ist ein Maß für die Schweißbarkeit von Stählen und beträgt für S355J2W+N weniger als 0,43%. Der Kohlenstoff und der gewichtete Anteil der Legierungselemente, welche die Schweißbarkeit ähnlich beeinflussen wie der Kohlenstoff, werden zu einer Hilfsgröße zusammengefasst. Wenn diese kleiner als 0,45% ist, dann gilt der Stahl als gut schweißgeeignet und muss nicht vorgewärmt werden.

## 4.2 Fertigung

Die Proben wurden durch das Metall-Aktivgas-Schweißverfahren (MAG) hergestellt. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass die abschmelzende Elektrode gleichzeitig als Lichtbogenträger und als Schweißzusatz dient. (siehe Abbildung 21) (25)



Abbildung 21 Metall-Schutzgasschweißen

Beim stromführenden Schweißzusatz handelt es sich nach EN ISO 14341-A um eine Massivdrahtelektrode G-42-4-M21-G3Si1 von ESAB OK AristoRod 12.50 (siehe Abbildung 22 bzw. Datenblatt im Anhang)

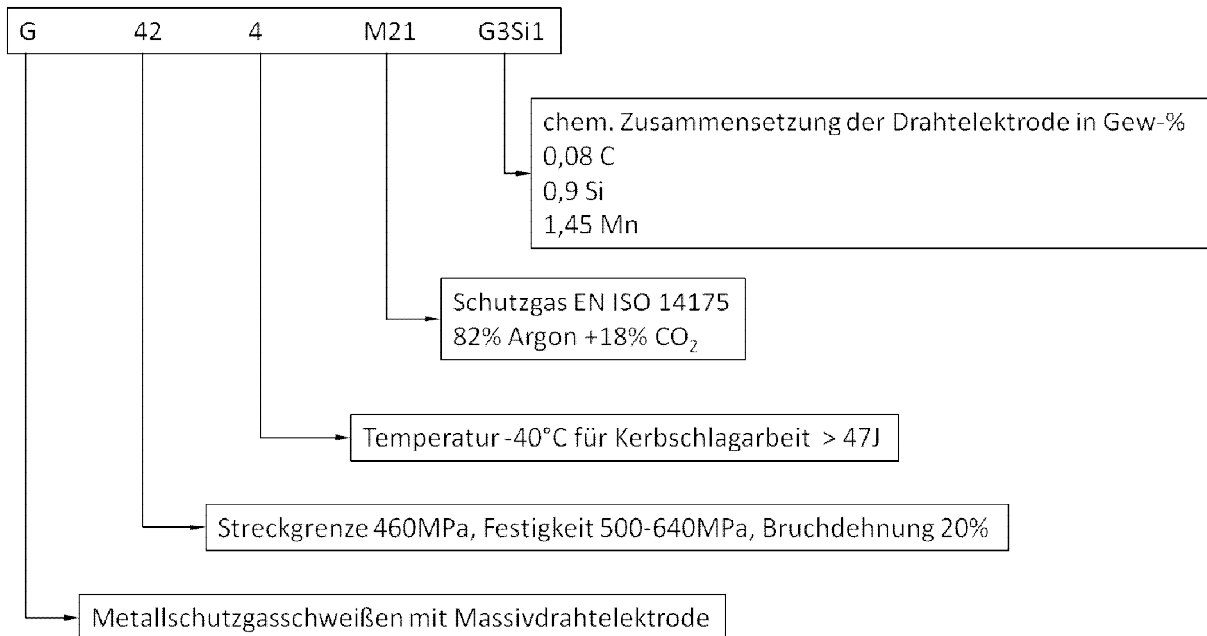
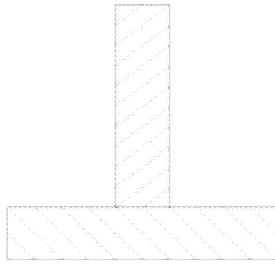


Abbildung 22 Bezeichnung Schweißzusatz

Das verwendete Schutzgas ist ein aktives Mischgas und besteht zu 82% Argon und 18% Kohlendioxid und trägt bei AirLiquide die Bezeichnung ARCAL 5 (siehe Datenblatt im Anhang)

Das MAG-Schweißverfahren eignet sich grundsätzlich sowohl zum Verbindungsschweißen in allen Positionen als auch zum Auftragsschweißen. Das Aktivgas kann für un-, niedrig- und hochlegierter Stähle verwendet werden. Die Vorteile des MAG-Verfahrens sind die hohe Abschmelzleistung, der tiefe Einbrand, die hohe Wirtschaftlichkeit, die leichte Handhabung und die Möglichkeit zur vollkommenen Mechanisierung des Schweißprozesses. (25)



Die einzelnen Fertigungsschritte der Kehlnaht-Abbinder lassen sich nach (4) folgendermaßen einteilen:

1) Nahtvorbereitung der Kehlnaht

Die Bleche müssen metallisch blank sein



2) Längsnähte schweißen

- Doppelkehlnaht
- HY-Naht mit Gegenlage
- Doppel-HY-Naht

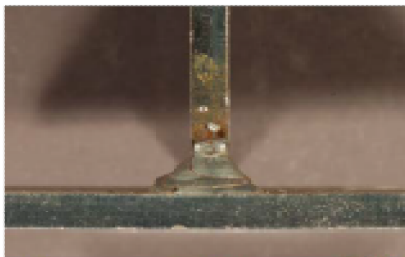


3) Verschleifen des Nahtauslaufs

Zum Entfernen der Endkraterlunker



4) Schweißen des Kehlnaht-Abbinders



5) Auffüllen der Einbrandkerbe

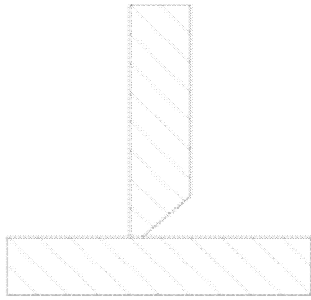
durch gezieltes Setzen von Heftpunkten



6) Verschleifen des Abbinders

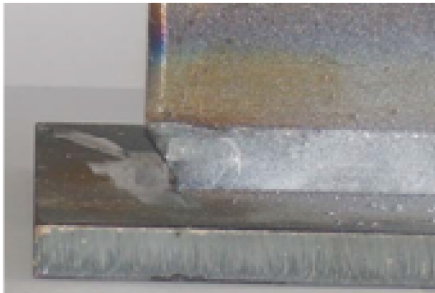
→ Nahtübergang möglichst kerbarm gestalten.

Abbildung 23 Fertigungsschritte  
Kehlnahtabbinder (4)



Für die Fertigung von HY-Abbindern sind folgende Schritte nach (4) notwendig:

- 1) Nahtvorbereitung der HY-Naht  
2mm Reststeg an der Längssteife  
Die Bleche müssen metallisch blank sein



- 2) Längsnähte schweißen
  - Doppelkehlnaht
  - HY-Naht mit Gegenlage
  - Doppel-HY-Naht

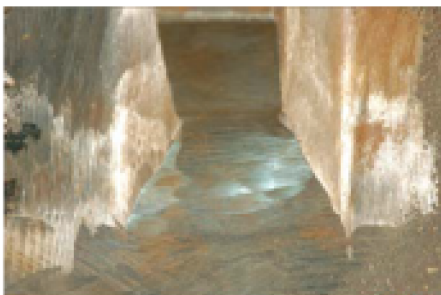
- 3) Verschleifen des Nahtauslaufs  
Zum Entfernen der Endkraterlunker  
Zusätzliches Schleifen der HY-Nahtanarbeitung



- 4) Schweißen des HY-Abbinders



- 5) Auffüllen der Einbrandkerbe  
durch gezieltes Setzen von Heftpunkten



- 6) Verschleifen des Abbinders  
→ Nahtübergang möglichst kerbarm gestalten.

Abbildung 24 Fertigungsschritte HY-Abbinders (4)

### 4.3 Versuchsdurchführung und Auswertung

Der Schwingversuch wurde an einer Resonanzprüfmaschine (60Hz) mit einer Zugschwellbeanspruchung von  $R=0,1$  für je 30 Proben durchgeführt. Der Querschnitt für die Nennspannung ist jener zwischen Einspannung und Schweißnaht. Das Kriterium für den Ausfall war ein detektierbarer Frequenzabfall (1Hz). Proben, die mehr als  $2E7$  Lastwechsel standhielten, galten als Durchläufer. Die Auswertung der Wöhlerlinie erfolgte nach dem ASTM Standard E739 (26) und die Dauerfestigkeitslinie nach dem erweiterten Treppenstufenverfahren nach Hück (27). Für die Darstellung der Zeitfestigkeitslinie wurden alle gerissenen Proben berücksichtigt, also sowohl die Ergebnisse des Wöhlerversuchs nach ASTM wie auch jene des Treppenstufenverfahrens.

Für die Umrechnung des Spannungsverhältnisses  $R=0,1$  (Versuch) auf  $R=0,5$  (Definition der FAT-Klasse – von der FKM-Richtlinie gefordertes Spannungsverhältnis) ist es notwendig, die Mittelspannungsempfindlichkeit  $M_{\sigma}$  zu bestimmen. Dies geschieht unter Berücksichtigung des Eigenspannungsfaktors, welcher den Einfluss der Eigenspannung auf die Ermüdungsfestigkeit geschweißter Bauteile wiedergibt.

### 4.4 Mittelspannungsempfindlichkeit

Zur Abschätzung der Eigenspannungen schlägt (11) folgende Unterteilung vor:

- geringe Eigenspannungen
  - bei Schweißung mit anschließendem Spannungsarmglühen
  - wenn Eigenspannungen nachweislich ausgeschlossen werden dürfen
  
- mäßige Eigenspannungen
  - schlanke Trägern mit Längsnähten und mit Quernähten kürzer 300mm
  - quer beanspruchte Schweißnähte an Bauteilen bis 10mm Blechdicke
  - vorwiegend längsbeanspruchte Schweißnähte an Bauteilen bis 16mm Blechdicke, falls die Querbeanspruchung geringer als die Hälfte der Längsbeanspruchung ist
  
- hohe Eigenspannungen
  - komplexe, ausgeprägte mehrachsige belastete, dickwandige Bauteile
  - vorliegen konstruktionsbedingter globaler Eigenspannungen

Laut (28) wird die Mittelspannungsempfindlichkeit für Normalspannungen bei geschweißten Konstruktionen für den Schienenfahrzeugbau mit mäßigen Eigenspannungen angesetzt.

Die Proben wurden nach dem Schweißen weder spannungsarmgeglüht noch kugelgestrahlt, wie für Schienenfahrzeugrahmen eigentlich üblich. Obwohl die Annahme geringer Eigenspannungen für die Auswertung von Referenzproben konservativ wäre, kann wegen (29) trotzdem von einem mäßigem Eigenspannungszustand ausgegangen werden. Dafür wurde je eine Probe pro Serie mit Dehnmessstreifen (DMS) versehen (siehe Abbildung 25) und die Dehnung während dem Einspannvorgang, dem Aufbringen der statischen Vorlast und dem eigentlichen Schwingversuch gemessen (siehe Abbildung 26)

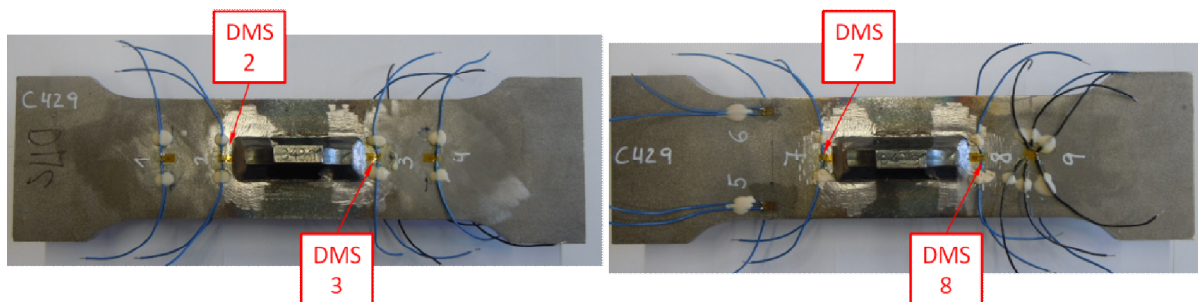


Abbildung 25 DMS-Positionen (29)

Da der Verzug der Längssteifen durch den Schweißprozess nur geringfügig war, ist beim Einspannen, also dem „Geradebiegen“ der Probe, wenig Dehnung detektiert worden. Beim Hochfahren auf das Niveau der statischen Vorlast und dem anschließenden Schwingversuch zeigte sich jedoch, dass die Mitteldehnung in der Probe deutlich wegdriftet. Wie in den nachfolgenden Diagrammen (siehe Abbildung 26) zu erkennen ist, werden Dehnungen von bis zu 10 mm/m gemessen. Dies würde nach dem linearen Materialgesetz aber eine Spannung von 2100MPa ergeben. Die Streckgrenze bzw. sogar die Zugfestigkeit würden also schon am Beginn des Schwingversuchs deutlich überschritten werden. Die hohen Dehnungen können daher nur bedeuten, dass sich die Probe lokal plastisch verformte. Dieser nichtlineare Zusammenhang von Kraft und Dehnung ist ein Indiz für signifikante Eigenspannungen. Der Werkstoff beginnt durch die statische Vorlast und die Lastwechsel im Schwingversuch zu Fließen und die Eigenspannungen werden in der Probe umgelagert.

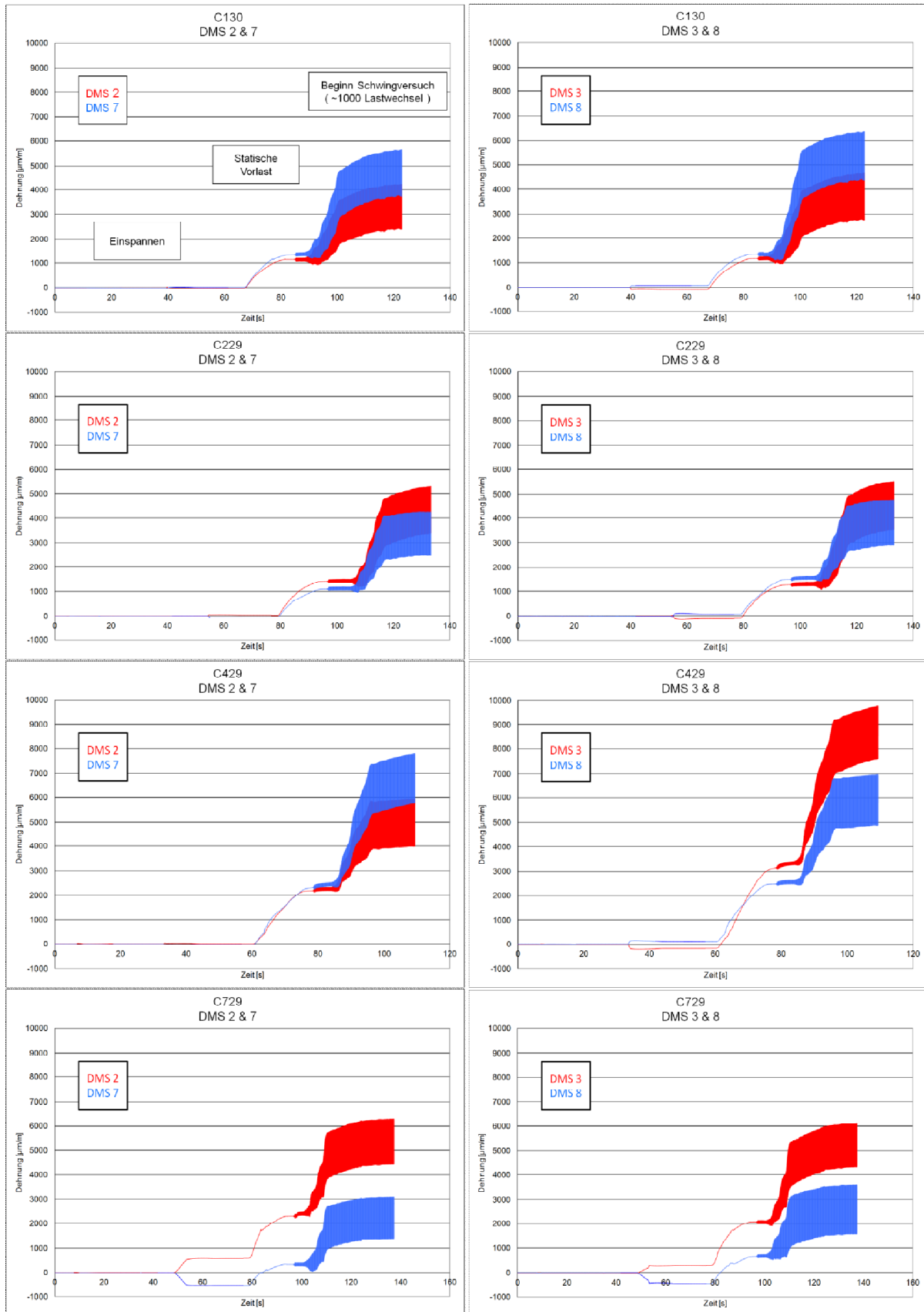


Abbildung 26 gemessene Dehnung während Einspannen, statischer Vorlast und Beginn des Schwingversuchs

Deshalb wird für die Umrechnung von  $R=0,1$  auf  $R=0,5$  zumindest ein mittlerer Eigenspannungszustand angenommen. Laut FKM-Richtlinie ergibt sich somit für die Mittelspannungsempfindlichkeit  $M_\sigma$  der Wert 0,15. Mit Hilfe des Dauerfestigkeitsschaubildes nach Haigh kann nun das Versuchsergebnis in eine FAT-Klasse übersetzt werden.

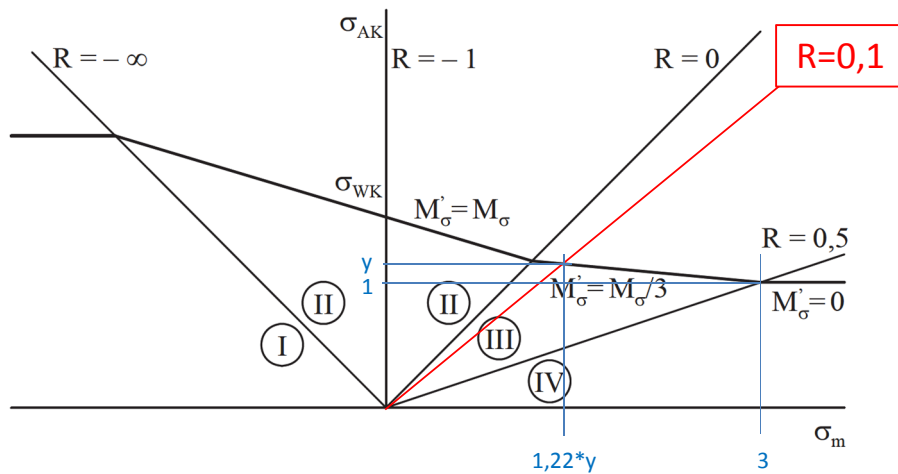


Abbildung 27 normiertes Haigh-Diagramm

Durch die geltenden Zusammenhänge aus Kapitel 2.1.1 und die Geradengleichung kann mit einem normierten Diagramm jener Faktor  $y$  berechnet werden, durch den das Ergebnis bei  $R=0,1$  einfach dividiert werden muss um die FAT-Klasse bei  $R=0,5$  zu erhalten.

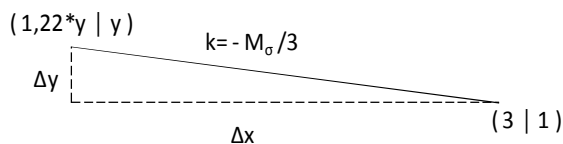


Abbildung 28 graphischer Zusammenhang für Geradengleichung

$$k = \frac{-(y-1)}{3-1,22y}$$

Formel 4 Wöhlerlinienexponent  $k$  in Abhängigkeit der gesuchten Größe  $y$

$$y = \frac{3k-1}{1,2k-1}$$

Formel 5 Gleichung für Faktor zur Berücksichtigung des Spannungsverhältnis

Unter Berücksichtigung des Wöhlerlinienexponenten  $k = -0,05$  erhält man für diesen konkreten Fall einen Faktor von  $y = 1,08378$ .

Die Versuchsergebnisse können somit als FAT-Klassen ausgedrückt werden.



### 4.5 Ergebnisse des Schwingversuchs

Die Ergebnisse des Schwingversuchs werden farblich einheitlich im jeweiligen Diagramm dargestellt. Die Versuchsergebnisse per se sind grau gefärbt, die daraus hergeleitete FAT-Klasse ist rot und in blau wird die Bauteilklasse Nr. 521 mit FAT71 als Referenz geführt.

Die FAT71 wurde durch eine Vielzahl an Schwingfestigkeitsversuchen von Längssteifen ermittelt. In (7) sind vorhandene Schwingergebnisse von 747 Proben, unter Berücksichtigung verschiedener schwingfestigkeitsrelevanter Parametern, zusammengefasst worden. (siehe Abbildung 29)

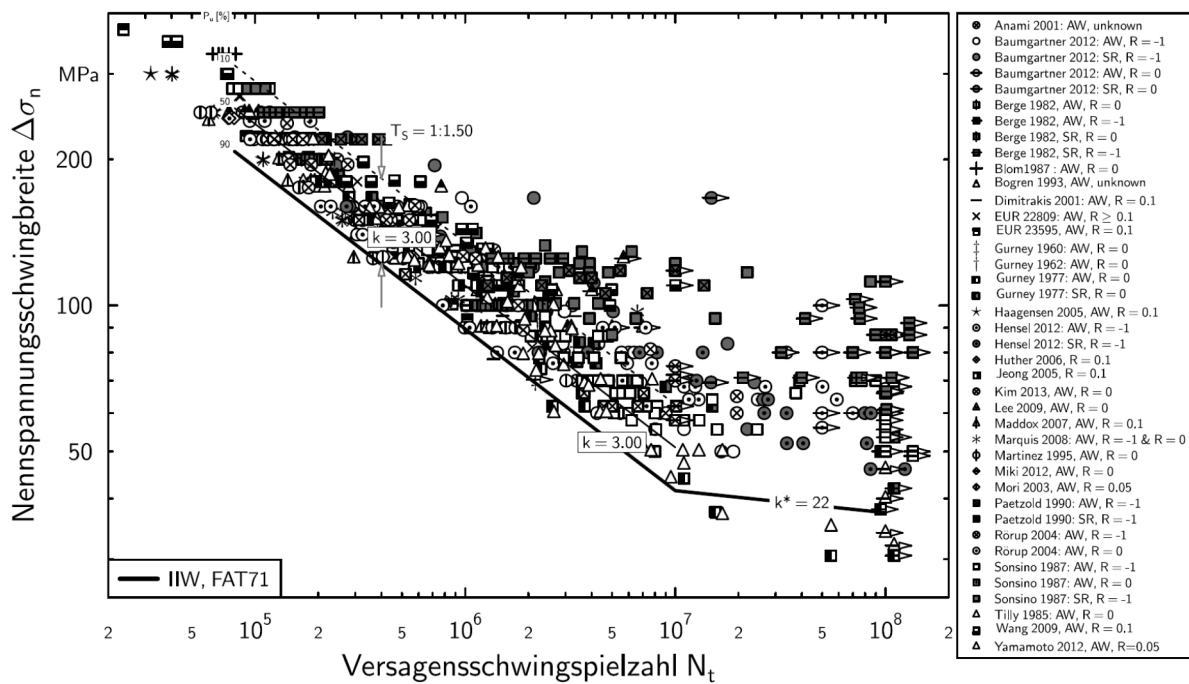


Abbildung 29 Vorhandene Schwingfestigkeitsversuche an Längssteifen (7)

## 4.5.1 Probenserie C1

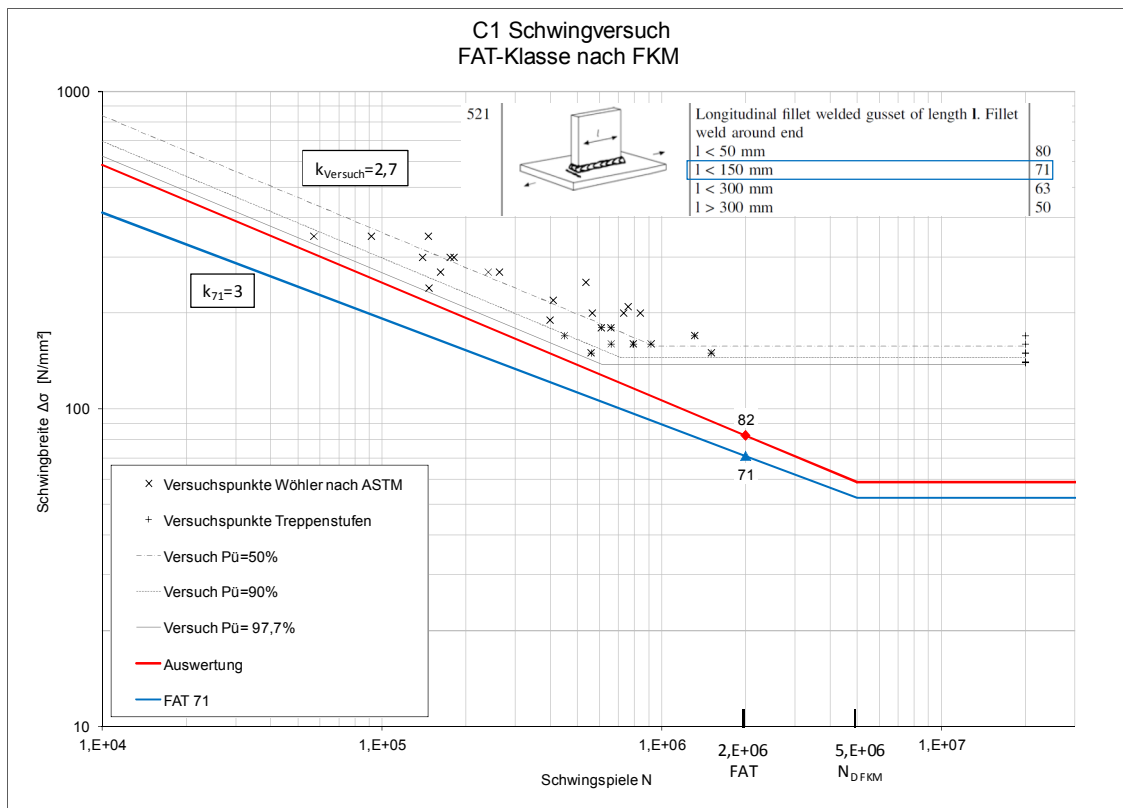


Abbildung 30 Auswertung des Schwingversuchs der Probenserie C1

Für die Probenserie C1, also Längssteife mit HY-Naht und Gegenlage mit einem Kehlnaht-Ab binder, ergab der Schwingversuch bei einem Spannungsverhältnis von  $R=0,1$  eine Schwingbreite  $\Delta\sigma$  von 89MPa bei  $2E6$  Lastwechseln. Die Streuspanne  $1:T_S$  der Ergebnisse ist  $1:1,46$  und der Wöhlerlinienexponent der Wöhlerkurve  $k=2,7$ . Bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von  $P_0=97,7\%$  beträgt die Schwingbreite der Dauerfestigkeit  $\sigma_D=138\text{MPa}$ . Der Knickpunkt der Dauerfestigkeit liegt bei 615.282 Schwingspielen. Es traten ausschließlich Nahtübergangsriss auf.

Nach Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses reduziert sich die Schwingbreite auf 82MPa, dieser Wert entspricht der gesuchten FAT-Klasse.

## 4.5.2 Probenserie C2

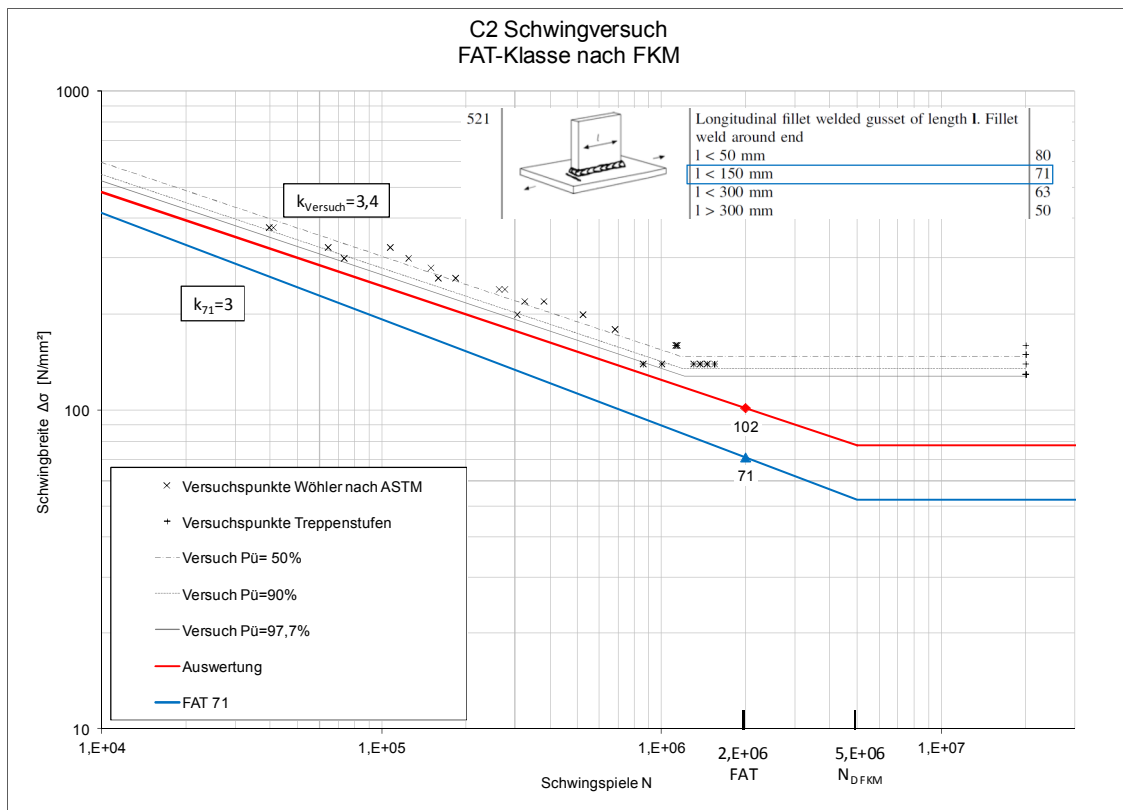


Abbildung 31 Auswertung des Schwingversuchs der Probenserie C2

Die Proben mit HY-Naht und Gegenlage mit einem HY-Abbinde (C2) haben lt. Schwingversuch ( $R=0,1$ ) eine Schwingbreite  $\Delta\sigma$  von 110MPa bei  $2E6$  Lastwechseln und einen Wöhlerlinienexponenten von  $k=3,4$ . Bei  $P_{\bar{\sigma}}=97,7\%$  beträgt die Schwingbreite der Dauerfestigkeit  $\sigma_D=128\text{MPa}$  und der Knickpunkt der Dauerfestigkeit liegt bei 1.207.137 Schwingspielen. Die Streuspanne  $1:T_S$  liegt bei 1:1,19. (grau in Abbildung 31) Es kam ausschließlich nur zu Nahtübergangsrissen.

Die gesuchte FAT-Klasse beträgt für Serie C2 102MPa, nach der Reduktion aufgrund des Mittelspannungseinflusses. (rot Abbildung 31)

## 4.5.3 Probenserie C4

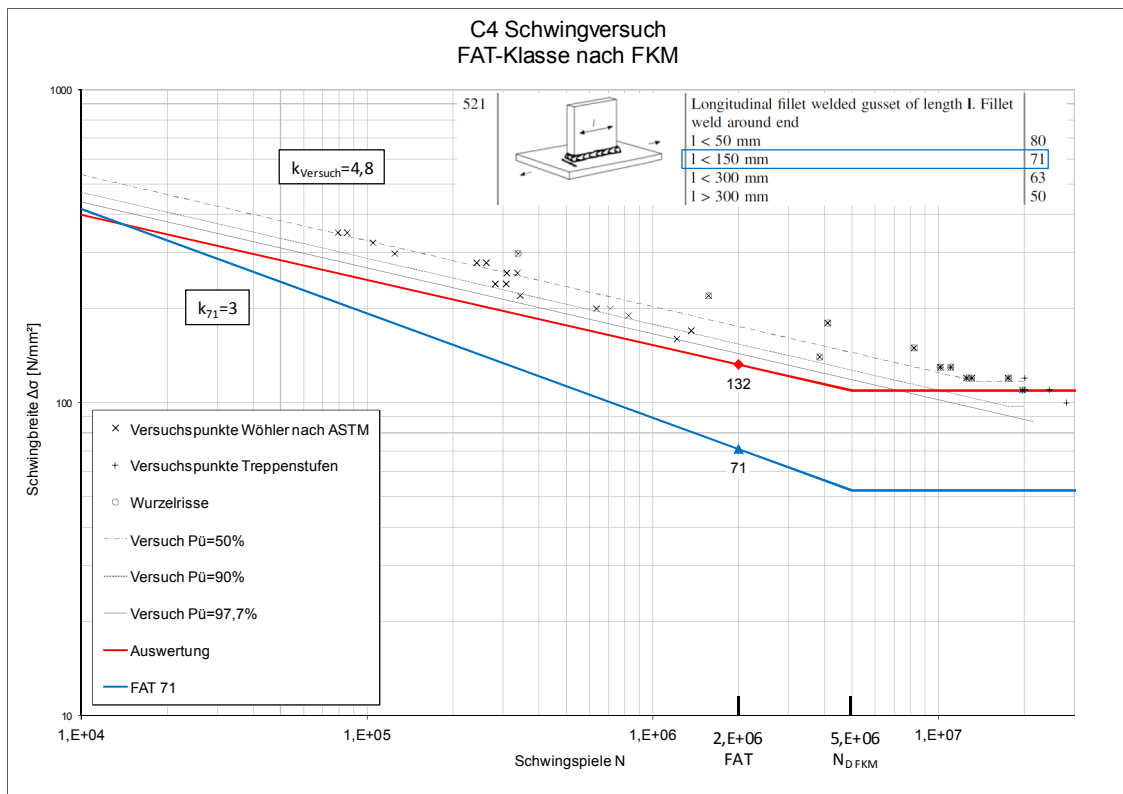


Abbildung 32 Auswertung des Schwingversuchs der Probenserie C4

Die Serie C4, also Längssteife mit Doppelkehlnaht und Kehlnaht-Abbinde, ergab eine Schwingbreite  $\Delta\sigma$  von 143MPa bei 2E6 Lastwechseln und einen Wöhlerlinienexponenten von  $k=4,8$ . Bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von  $P_0=97,7\%$  beträgt die Schwingbreite der Dauerfestigkeit  $\sigma_D=87\text{MPa}$ . Der Knickpunkt der Dauerfestigkeit liegt bei 21.595.821 Schwingspielen und die Streubreite  $1:T_S$  bei 1:1,29. (grau Abbildung 32) Es traten sowohl Nahtübergangsrisse als auch Wurzelrisse auf.

Der Mittelspannungseinfluss reduziert die Schwingbreite auf 132MPa, dieser Wert entspricht der gesuchten FAT-Klasse. (rot Abbildung 32)

## 4.5.4 Probenserie C7

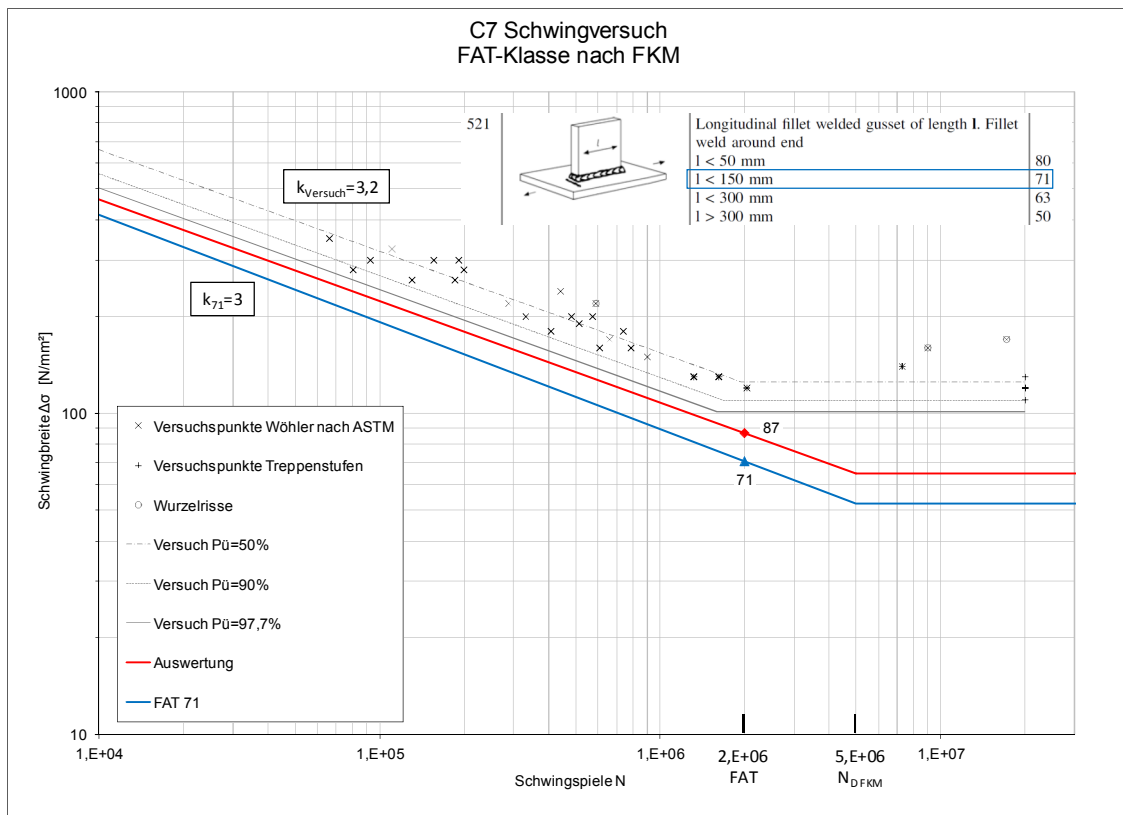


Abbildung 33 Auswertung des Schwingversuchs der Probenserie C7

Die Probenserie C7 ist eine Längssteife mit Doppel-HY-Naht als Längsnäht und eine HY-Naht als Abbindenaht. Beim Schwingversuch ( $R=0,1$ ) wurde eine Schwingbreite  $\Delta\sigma$  von 94MPa bei  $2E6$  Lastwechseln und ein Wöhlerlinienexponent von  $k=3,2$  festgestellt. Unter Berücksichtigung von  $P_{\bar{u}}=97,7\%$  beträgt die Schwingbreite der Dauerfestigkeit  $\sigma_D=101\text{MPa}$ . Der Knickpunkt der Dauerfestigkeit liegt bei 1.594.825 Schwingspielen und die Streuspanne  $1:T_S$  bei 1:1,15. (grau Abbildung 33) Sowohl Nahtübergangsrisse als auch drei Wurzelrisse sind aufgetreten.

Nach Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses reduziert sich die Schwingbreite auf 87MPa, dieser Wert entspricht der gesuchten FAT-Klasse. (rot Abbildung 33)

## 4.6 Diskussion der Ergebnisse des Schwingversuchs

Bezeichnung	$\Delta\sigma$ [MPa] N=2E6 R=0,1 $P_{\bar{0}}=97,7\%$	Wöhlerlinien= exponent k	Streuspanne 1:T <sub>S</sub>	$\sigma_D$ [MPa]	N <sub>Knick</sub>	FAT Klasse
C1 YB-EF	89	2,7	1,46	138	615.282	82
C2 YB-EY	110	3,4	1,19	128	1.207.137	102
C4 FD-EF	143	4,8	1,29	87	21.595.821	132
C7 YD-EY	94	3,2	1,15	101	1.594.825	87

Tabelle 4 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die Schwingversuche der Kleinproben zeigen also, dass die gegenwärtige Methode zur rechnerischen Bewertung der Schweißnahtenden grundsätzlich konservativ ist.

## 4.6.1 Probenserie C1 &amp; C2

Wie in Abbildung 34 zu sehen ist, ist die ertragbare Spannungsschwingbreite der Probenserie C1 (rot) bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50% (strichlierte Linie) an sich geringfügig besser als die Serie C2 (grün). Durch die Darstellung als Ergebnis bei 2Millionen Schwingspielen wird der kleinere Wöhlerlinienexponent jedoch schlagend.

Zusätzlich führt die höhere Streuung der einzelnen Versuchsergebnisse von C1 zu einem deutlichen Unterschied bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von  $P_{\bar{0}}=97,7\%$  (durchgezogene Linie).

Da die Ergebnisstreuung direkt von der Parameterstreuung abhängt, wurde eine geometrische Vermessung der Proben gemacht, mit dem Ziel den Parameter „Übergangsradius“ zwischen Grundblech und Schweißnaht festzustellen.

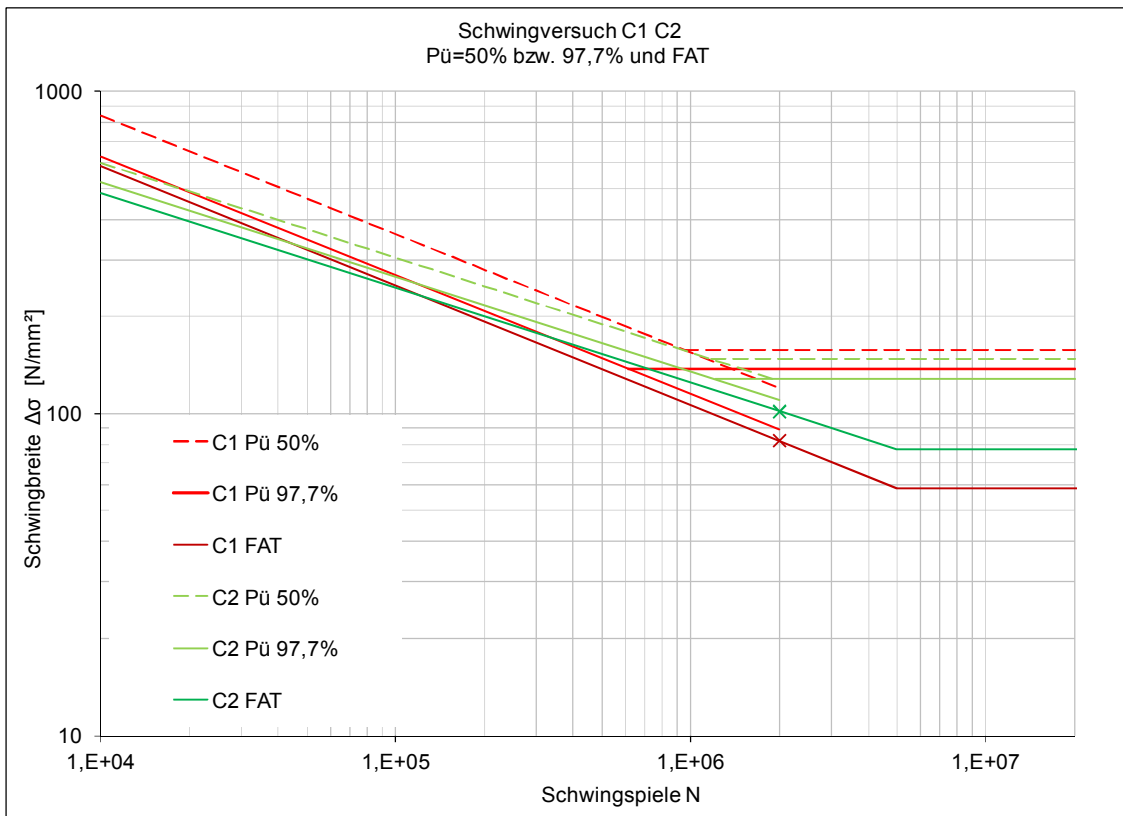
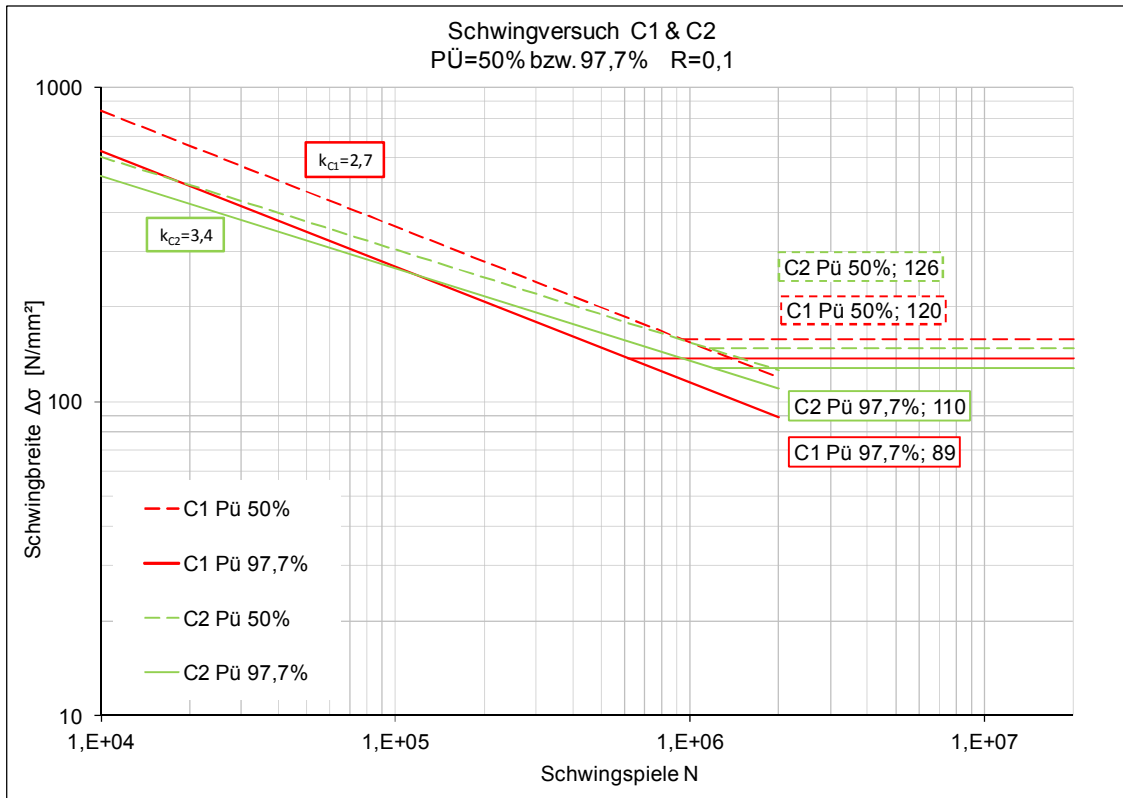


Abbildung 34 Vergleich der Ergebnisse Schwingversuch C1 und C2

Diese geometrische Vermessung zeigte deutlich, dass der stumpfere Nahtanstiegswinkel der Kehlnaht eine größere Streuung des Nahtübergangsradius  $r$  ermöglicht, als der steilere Winkel der HY-Naht. Es besteht also ein Zusammenhang zwischen dem Nahtanstiegswinkel  $\theta$  und dem Nahtübergangsradius  $r$ . (siehe Tabelle 6)

Probe	Abbinder	Nahtanstiegs- winkel $\theta$	Relative Kerbwirkung	Relative Radiusstreuung	Ergebnis- streuung 1:Ts
C1 YB-EF	Kehlnaht	135°	gering	groß	1,46
C2 YB-EY	HY- Naht	110°	groß	gering	1,19

Tabelle 5 Zusammenhang Streuungen

Wie in Abbildung 35 zu sehen ist, existiert außerdem eine Beziehung zwischen der Größe des Übergangsradius und der ertragbaren Lastwechselzahl. Mit zunehmendem Radius wird die Kerbwirkung der Schweißnaht geringer und somit die ertragbare Schwingspielzahl höher. (siehe Tabelle 6)

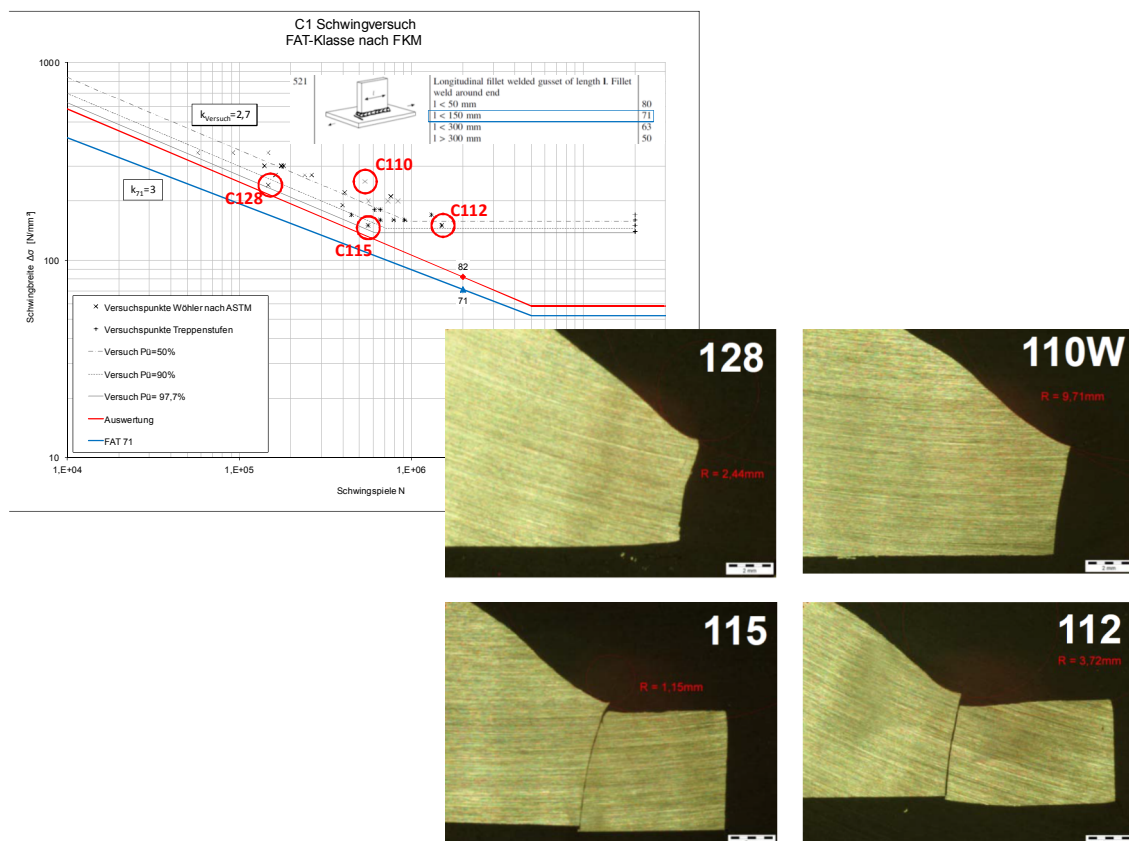


Abbildung 35 Schliffbilder der Serie C1



Probe	$\Delta\sigma$	N	Kerbradius
C128	240	147.287	2,44
C110	250	536.487	9,71
C115	150	560.028	1,15
C112	150	1.505.231	3,72

Tabelle 6 Übersicht Kerbradien Serie C1

Das bedeutet, eine Schweißnaht sollte für eine hohe Schwingfestigkeit einen möglichst stumpfen Nahtanstiegswinkel mit großem Nahtübergangswinkel mit kleiner Radienstreuung besitzen. Dieser Forderung wurde durch eine zusätzliche Probenserie Rechnung getragen.

Die Serie C3 entspricht in ihrer Form der Serie C1 mit dem Unterschied dass eine Nahtnachbehandlung durch Hämmern (PIT) vorgenommen wurde. Durch dieses Verfahren werden hohe Druckeigenstress entlang des Nahtübergangs erzeugt. Dieser hohe Eigenspannungszustand ( $M_\sigma=0$ ) und ein relativ großer Nahtübergangsradius (Werkzeughdurchmesser 4mm) bewirken, dass sich die FAT-Klasse auf FAT136 erhöht. (siehe Abbildung 36 )

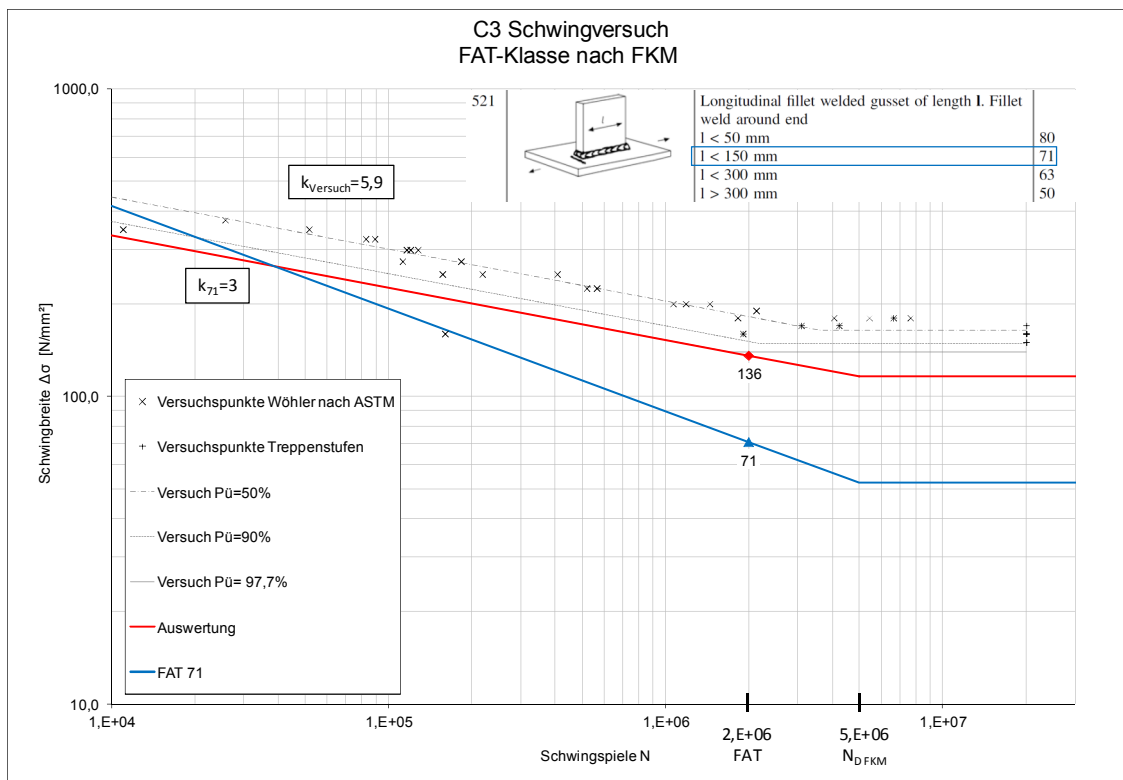


Abbildung 36 Auswertung Schwingversuch C3: FAT-Klasse mit hohem Eigenspannungszustand berechnet

## 4.6.2 Probenserie C4

Wie bereits erwähnt kam es bei Probenserie C4 sowohl zu Wurzelrissen als auch zu Nahtübergangsrissen. (siehe Abbildung 37) Es konnte beobachtet werden, dass ein Zusammenhang zwischen dem Versagensmechanismus und der ertragbaren Lastwechselzahlen besteht, da die wurzelseitigen Anrisse vorwiegend bei niedrigeren und die Nahtübergangsrissen bei hohen Lastniveaus auftraten. (siehe Tabelle 7)



Abbildung 37 Wurzelriss (oben) bzw. Nahtübergangsriss (unten)

Probe	$\Delta\sigma$	N	Anrissort
C403	180	4.088.574	Wurzel
C427	240	280.154	Nahtübergang

Tabelle 7 Schwingbreite und Lastwechselzahl zweier ausgewählter Proben

Wegen dieser Wurzelrisse bei hohen Lastwechselzahlen konnte kein eindeutiger Abknickpunkt (siehe Abbildung 38 rot strichliert) innerhalb der geprüften Lastwechselzahl von  $2E7$  Schwingspielen detektiert werden. Um Wurzelrisse ausschließen zu können empfiehlt sich ein HV-Anschluss.

Der Wöhlerlinienexponent mit  $k=4,8$  entspricht eher jenem, der zur Bewertung des Grundmaterials ( $k=5$ ) von der Richtlinie empfohlen wird. Aus diesem Grund wurde eine weitere Auswertung vorgenommen, bei der nur die Nahtübergangsrisse beurteilt wurden. Es stellt sich heraus, dass die FAT-Klasse in diesem Fall zwar nur noch FAT121 beträgt, aber Steigung ( $k=3,6$ ) und Streuspanne ( $1:T_S=1:1,15$ ) eher ins Bild der Schweißnahtbewertungsmethodik passen. (siehe Abbildung 38) Für die weiteren Betrachtungen wird bewusst die FAT121 für C4 verwendet.

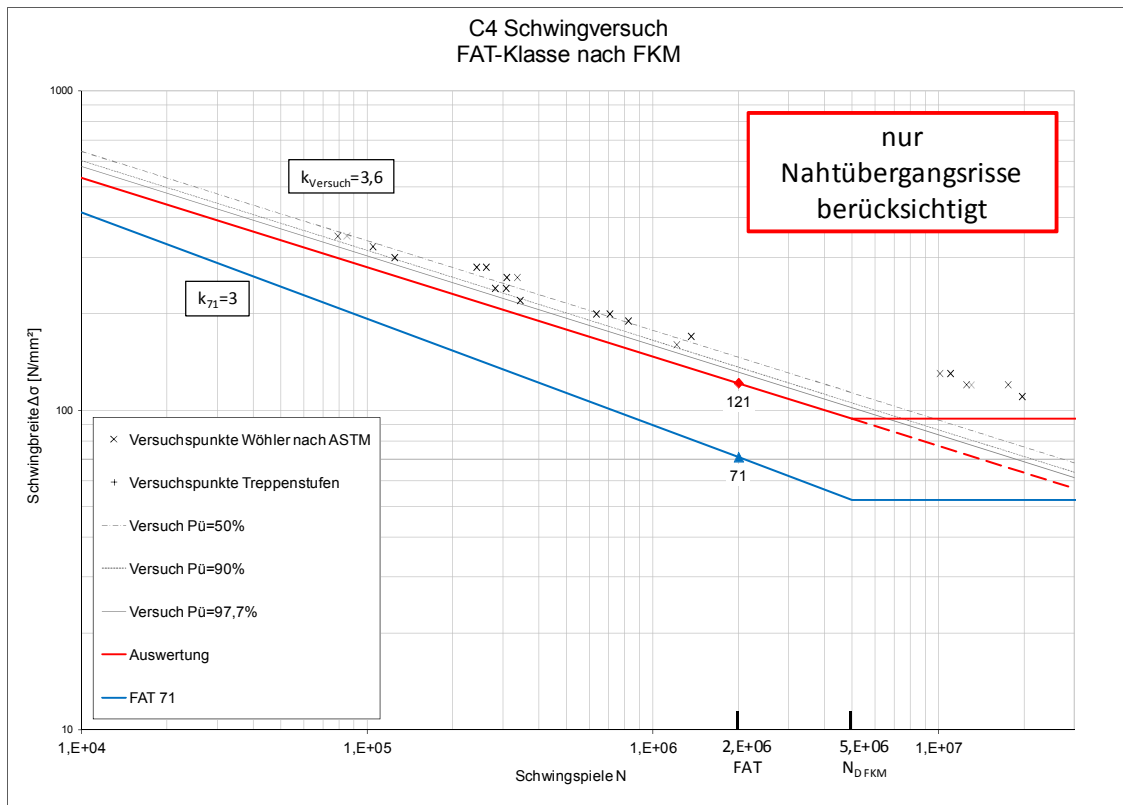


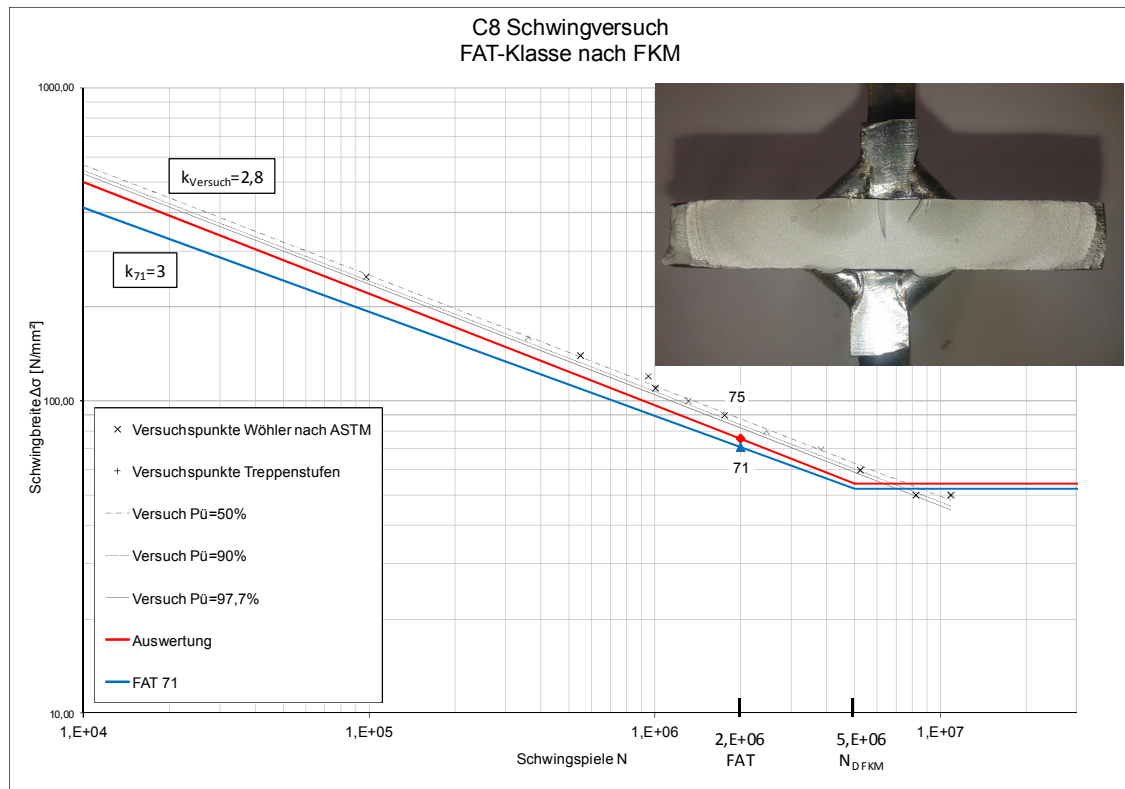
Abbildung 38 Auswertung des Schwingversuchs Probenserie C4 ohne Wurzelrisse

#### 4.6.3 Probenserie C7

Bei dieser Längssteifenserie mit HY-Naht als Längsnaht und HY-Abbinder sind zwar auch Wurzelrisse aufgetreten, jedoch nur 3 aus 28 getesteten Proben. Deshalb würde eine getrennte Betrachtung, wie für Probenserie C7, keine signifikante Änderung des Ergebnisses ergeben.

## 4.6.4 Worst-Case

Um zu zeigen, wie sinnvoll die Abbindenaht trotz ihrem hohen Arbeitsaufwands ist, wurde eine weitere Probenserie mit der Bezeichnung C8 geprüft. Dabei handelt es sich prinzipiell um die gleiche Serie wie C4, jedoch ohne dass eine Abbindenaht gefertigt wurde.



Wie in Abbildung 39 zu sehen ist, reduziert sich die Schwingfestigkeit verglichen mit den Ergebnissen der Serie C4 durch die hohe Kerbschärfe am nicht umschweißten Ende der Längssteife deutlich auf FAT75 bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von  $P_0=97,7\%$ . Der Versuch ergab eine Schwingbreite von  $\Delta\sigma=82\text{MPa}$  bei  $2E6$  Lastwechsel. Der Wöhlerlinienexponent beträgt  $k=2,8$  und die Streuspanne 1:1,15. Brüche treten bis in den zweistelligen Millionenbereich auf. Die Anrisse wachsen, ausgehend von beiden Enden der Schweißnaht, Richtung Mitte.

## 5 Schwingversuch Drehgestell

Bei einem Schwingversuch mit Betriebslasten eines Triebdrehgestellrahmens mit 16 identisch ausgeführten Schweißnahtabbindern, davon zwölf mit Dehnmessstreifen (DMS) versehen, wurde an einer Position eine Anzeige erfasst. Wie in Abbildung 41 zu erkennen ist, lag diese schadhafte Stelle genau vor einem DMS, im Übergang einer Abbindenaht einer angeschweißten Konsole zum Untergurtblech des Langträgers. (siehe Abbildung 40) Bei dieser Konsole handelt es sich um einen sogenannten „Dino“, an welchem die Radsatzführungsbuchse befestigt ist.

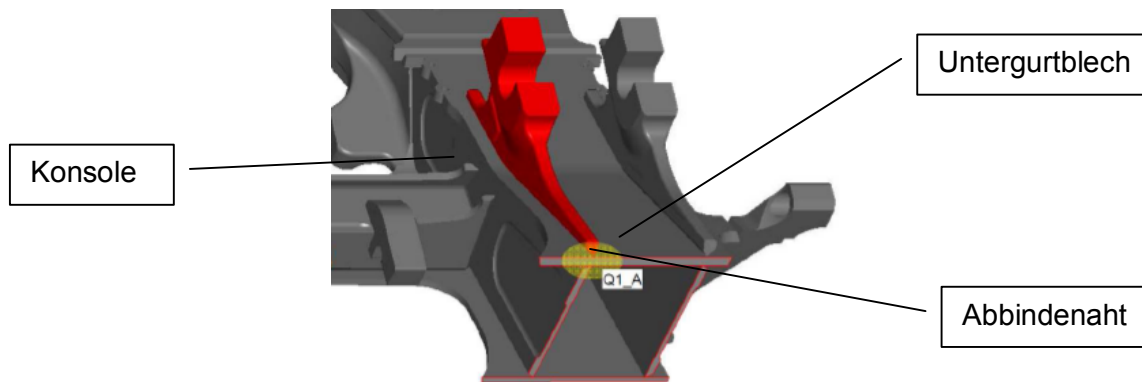


Abbildung 40 Modell einer angeschweißten Konsole auf Längsträger (2)

Der Dehnungsabfall der angerissenen Stelle wurde zu einem unzulässig frühen Zeitpunkt detektiert, während bei den elf weiteren DMS-Messstellen der Versuch zur Gänze ohne Anzeige durchlief. Im weiteren Versuchsablauf stellte sich heraus, dass es sich um einen ersten Ermüdungsriss handelte.

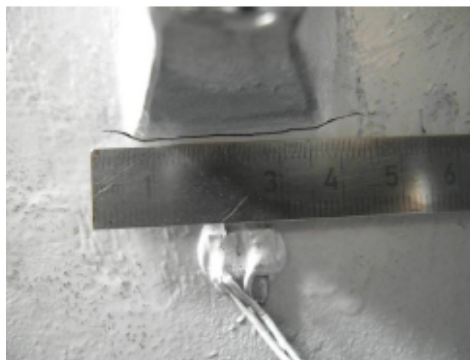


Abbildung 41 Abbinder mit DMS und Riss (2)

Die aus der DMS-Messung ermittelte äquivalente Spannungamplitude am Ort des Anrisses vor Auftreten der Anzeige betrug  $\sigma_a=34\text{MPa}$  auf Basis einer Lastwechselzahl von  $N=5E6$  Schwingspielen. (30) Dies bedeutet eine Schwingbreite von  $\Delta\sigma=90\text{MPa}$  bei  $N=2E6$  Schwingspielen. Da das Spannungsverhältnis im Versuch  $R\sim 0,3$  betrug, muss eine Umrechnung auf das Spannungsverhältnis  $R=0,5$  vorgenommen werden. Somit ergibt sich als lokal-gültige FAT-Klasse für  $R=0,5$  bei  $2E6$  Schwingspielen eine Schwingbreite von  $\Delta\sigma=88\text{MPa}$ .

Um die Rissursache festzustellen, wurde neben anderen Untersuchungen auch eine geometrische Analyse des Schweißnahtdetails vorgenommen. Dabei konnte gezeigt werden, dass die HY-Schweißnaht an diesem gerissenen Abbinder einen Nahtanstiegswinkel von  $123,3^\circ$  und einen Übergangsradius von  $3,6\text{mm}$  hatte (Abbildung 42). Der entsprechende Mittelwert aller Abbinder betrug allerdings  $128^\circ$  bzw.  $4,9\text{mm}$ .

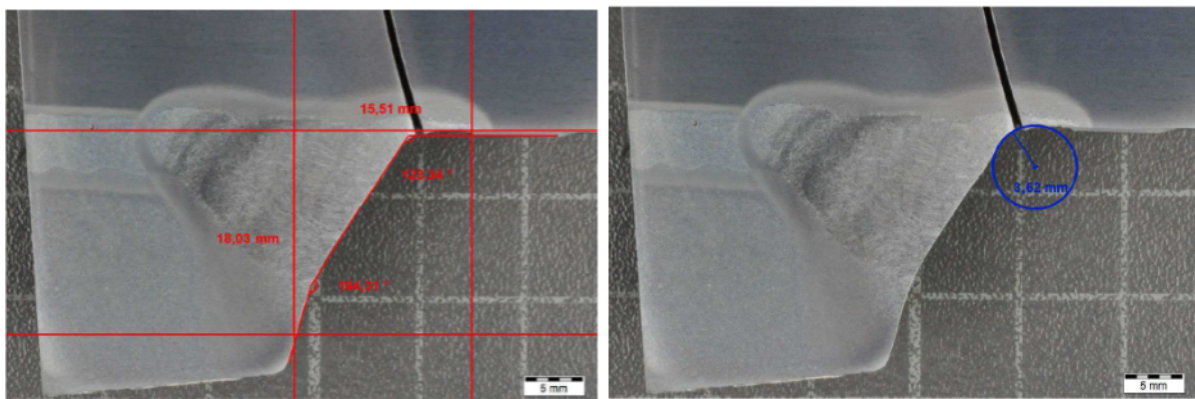


Abbildung 42 Nahtanstiegswinkel (links) und Nahtübergangsradius (rechts) des gerissenen Abbinders (31)

Es konnten keine weiteren schadensrelevanten Fehler in der Schweißnaht bzw. den angrenzenden Werkstoffbereichen festgestellt werden. (31)

Durch eine numerische Simulation soll der Einfluss verschiedener Übergangsradien und Nahtanstiegswinkel untersucht werden.

## 6 Numerische Untersuchung

---

Dieses Kapitel beinhaltet die genaue Beschreibung der Modellbildung und Simulation der vorliegenden Arbeit. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, werden die Proben der Schwingprüfung und ihre Varianten bzgl. Einbausituationen, Änderung der Blechstärken, Nahtkombinationen etc. untersucht. Außerdem werden Beispiele aus der Praxis gezeigt, bei denen die gewonnenen Erkenntnisse bereits angewendet wurden. Zum Schluss folgen die Erläuterungen zur aktuellen Bewertungsmethode mittels Schalenmodell.

### 6.1 Modellbildung und Simulation

Die numerische Untersuchung erfolgt mit Hilfe der Simulationssoftware „Siemens NX10“. Die untersuchten Geometrien werden als 3-dimensionale Modelle nach dem Kerbspannungskonzept generiert. Der Ersatzradius  $r_{\text{Kerbe}}$  an Nahtübergang bzw. Wurzel beträgt 1mm, wobei die Wurzel als U-Kerbe ausgeführt wird. Der Nahtanstiegswinkel  $\theta$  für Kehlnähte wird mit  $\theta=135^\circ$ , jener für HY-Nähte mit  $\theta=110^\circ$  angenommen.

Für die Berechnung wird der Nastran-Solver SOL101 verwendet, da dieser sowohl mit linear-elastischem Materialverhalten als auch mit linearer Kraftaufbringung und Geometrie rechnet. Der Elastizitätsmodul beträgt  $E=2,1E5\text{MPa}$  und die Querkontraktionszahl  $\nu=0,3$ . Die Modelle werden sowohl auf Längszug als auch auf Querkzug mit einer Nominalspannung von 1MPa beansprucht. Für die Bewertung werden die gemittelten Knotenergebnisse als größte Hauptnormalspannung (max. Principal) ausgewertet und als maximale Kerbspannung bzw. 5mm vor der Kerbe an der DMS-Position dokumentiert.

Da es sich prinzipiell um eine Variantenstudie handelt, strebt man eine automatisierte Generierung der Modelle und ein möglichst kurzer Rechenaufwand an. Durch die 3-dimensionale Betrachtung des Schweißnahtdetails, die Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten und die geforderte Netzfeinheit des Kerbspannungskonzepts ist eine Analyse mit 20-knotigen Hexaeder-Elementen nicht wirtschaftlich durchzuführen. Stattdessen werden 10-knotige Tetraeder verwendet. Um eine ausreichend genaue Diskretisierung gewährleisten zu können, wird eine Netzstudie durchgeführt. Dafür wird ein Würfel mit Seitenlänge 10mm modelliert und eine seiner Kanten durch einen Bogen mit Radius 1mm ersetzt. (siehe Abbildung 43) Der Körper wird ein zweites Mal unterteilt, um einen definierten Netz-Zustand in dem interessanten Bereich garantieren zu können.

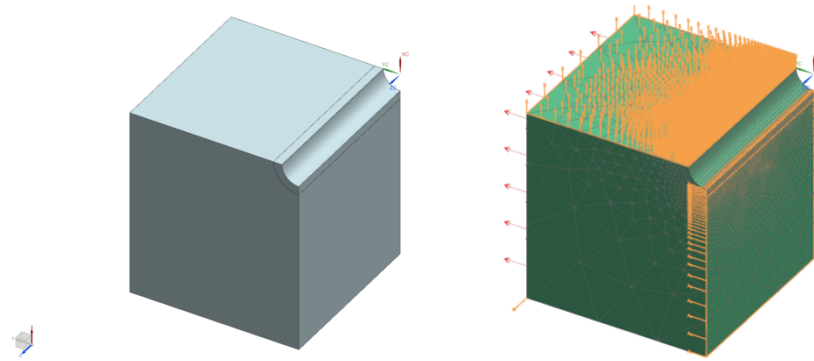


Abbildung 43 Modell zur Untersuchung der nötigen Netzfeinheit

Zunächst wird ein 20-knotiges Hexaeder-Netz aufgebracht und so lange verfeinert bis sich unter einer Zugbelastung von 1MPa ein konvergierendes Ergebnis einstellt. (siehe Abbildung 44) Anschließend erfolgt die gleiche Vorgehensweise mit einem 10-knotigen Tetraeder-Netz. Jenes Tetraeder-Ergebnis, welches innerhalb der geforderten Grenzen von  $\pm 2\%$  vom konvergierten Hexaeder-Ergebnis liegt, gibt die größtmögliche Netzgröße vor.

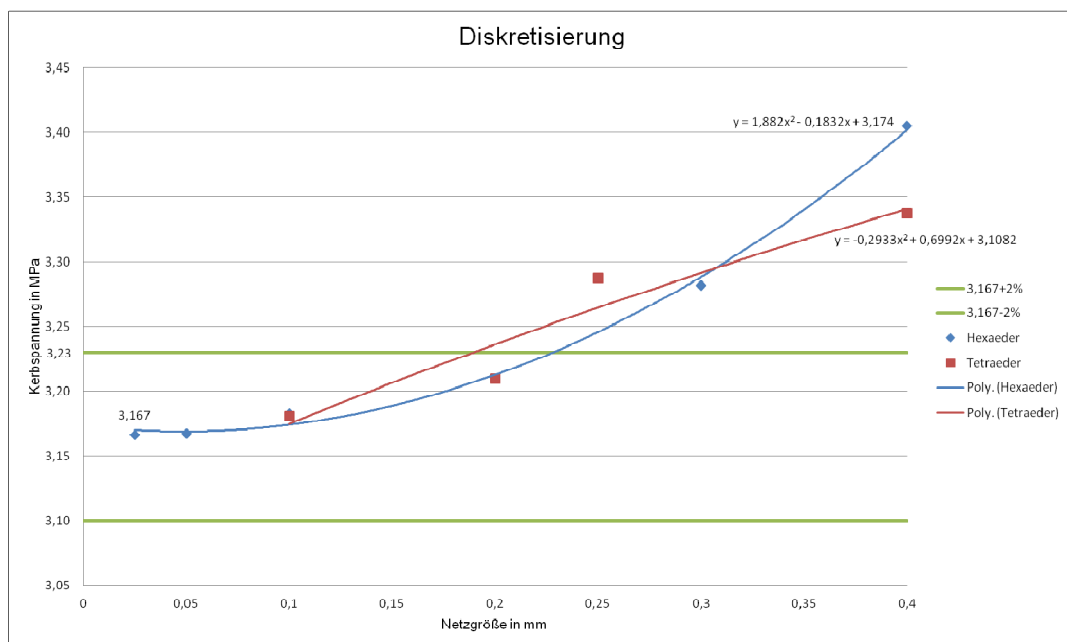


Abbildung 44 Diskretisierung Hexaeder- und Tetraeder-Netz

In diesem Fall zeigt sich, dass ein 10-knotiges Tetraeder mit einer Elementkantenlänge von 0,2mm innerhalb der Toleranz liegt.



## 6.2 Proben und Varianten

Die vier Proben und ihre Varianten sind aufgrund ihrer Symmetrie als Viertelmodelle ausgeführt. (siehe Abbildung 45) Dabei wird auf die Breitenänderung des Gurtbleches von 80mm auf 110mm ebenso verzichtet, wie auf die Verjüngung der Längssteife. Eine vergleichende Rechnung zeigte, dass der Einfluss beider Übergänge auf das lokale Spannungsergebnis in der Auswertestelle bereits abgeklungen ist.

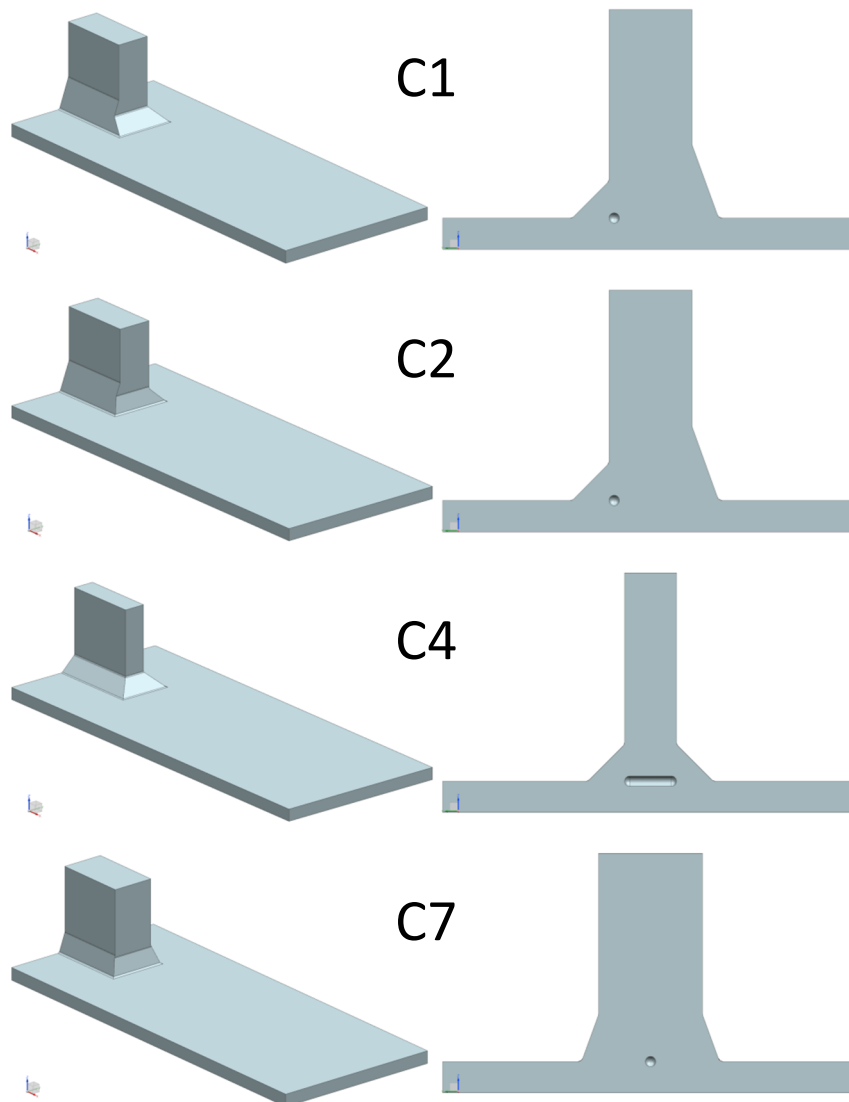


Abbildung 45 Viertelmodelle der Proben (links), Symmetrieebene yz (rechts)

Die Modelle der verschiedenen Varianten werden durch Parametrisierung automatisch generiert. Die Schweißnähte sind als Funktion der Längssteifeblechstärke  $t_s$  definiert. Somit müssen ausschließlich die Blechstärken von Gurt und Längssteife für die Varianten manuell editiert werden. (siehe Tabelle 8)

Variante	Längsnaht	Gegenlage	Abbinder Kehlnaht		Abbinder HY	
			Variante 1	Variante 2	Variante 1	Variante 2
Doppel- Kehlnaht	$t_s / 2$	$t_s / 2$	$a = 5\text{mm}$	$t_s / 2$	$t_s / 2$	-
HY mit Gegenlage	$t_s - 2$	$a = 3\text{mm}$	$a = 5\text{mm}$	-	$t_s / 2$	-
K- Naht	$t_s - 2$	$t_s - 2$	$a = 5\text{mm}$	-	$t_s / 2$	$t_s$

Tabelle 8 Zusammenhang Längssteifenblechdicke  $t_s$  und Schweißnahtgröße

Entlang des Nahtübergangs (N) der Längsnahte bzw. Abbindenähte wird im Kerbmittelpunkt im Abstand von  $r_{NÜ}=1,5\text{mm}$  und  $r_{NR}=3\text{mm}$  eine Unterteilung des Modells vorgenommen. Dadurch kann die Netzgröße im restlichen Volumen möglichst groß gewählt werden kann. Für die Wurzel wird das gleiche Prinzip mit  $r_{WÜ}=2\text{mm}$  bzw.  $r_{WR}=3\text{mm}$  angewendet. (siehe Abbildung 46 und Abbildung 47) Die 3mm Wurzelunterteilung wird bei den Modellen mit den kleinsten Abmessungen aus Platzgründen weggelassen. Diese Teilung bewirkt, dass es aufgrund der unterschiedlichen Nahtkombinationen zu Hinterschneidungen kommen kann. Deshalb müssen alle Modelle manuell kontrolliert und ggf. korrigiert werden.

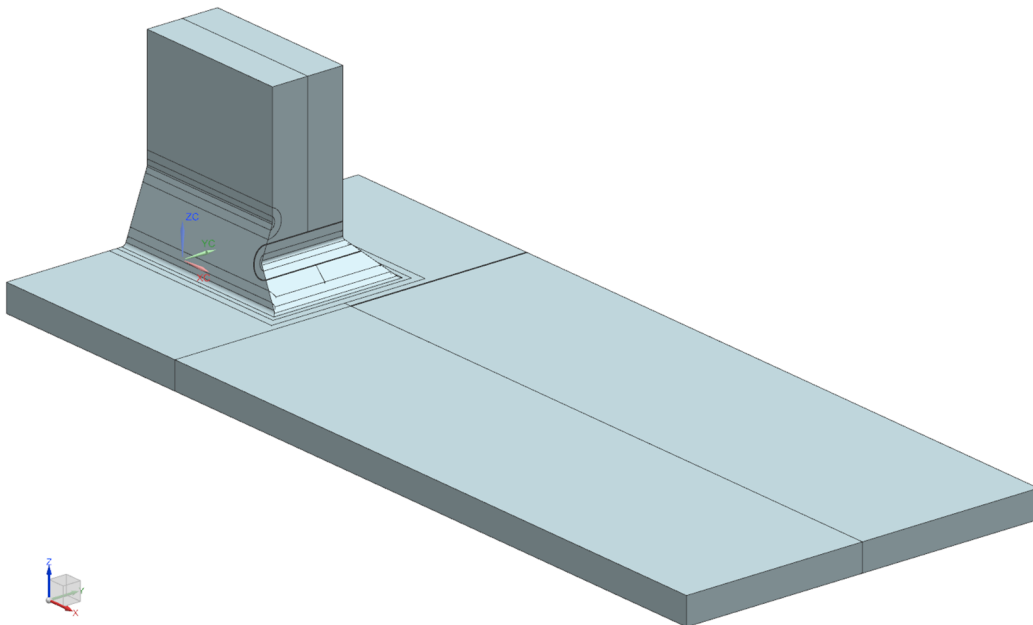


Abbildung 46 Modell Probe C1

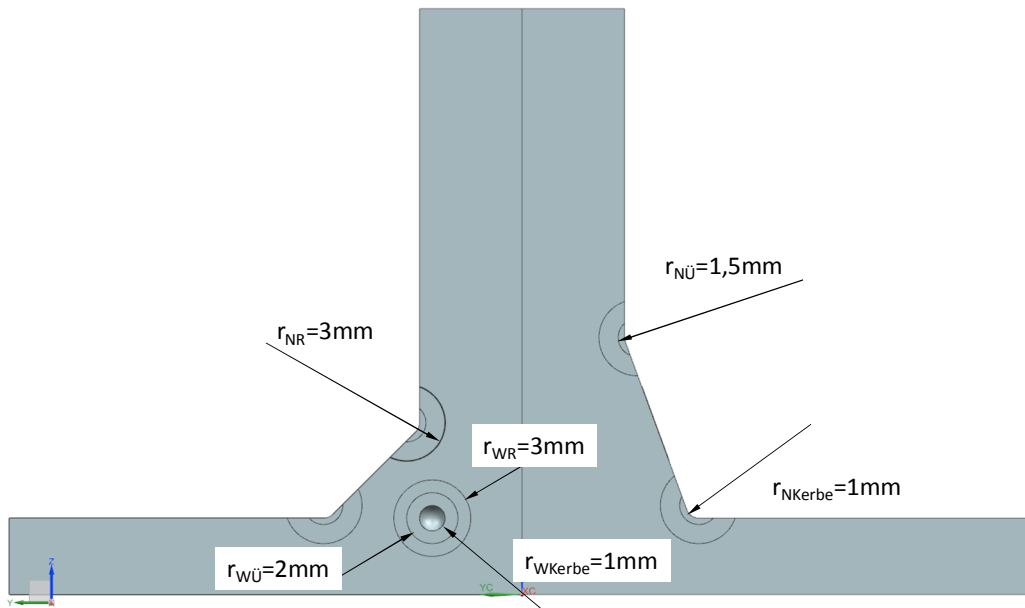


Abbildung 47 Modell Probe C1 Symmetrieebene

Das parabolische Tetraederelement wurde aufgrund von Abbildung 44 im Nahtübergang (N) bzw. in der Wurzel (W) mit 0,2mm, im Übergangsbereich (Ü) mit 1mm und in der restlichen Geometrie (R) mit 5mm realisiert. (siehe Abbildung 48, Abbildung 49, Abbildung 50) Mit Hilfe der Funktion „Mesh-Control“ wird garantiert, dass die gewünschte Netzfeinheit erzeugt wird.

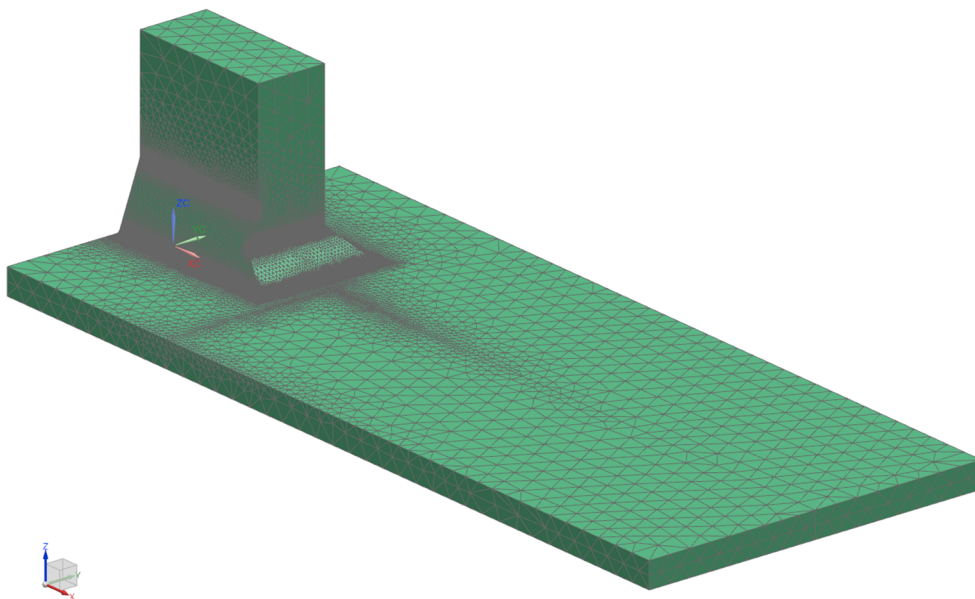


Abbildung 48 Simulation Probe C1

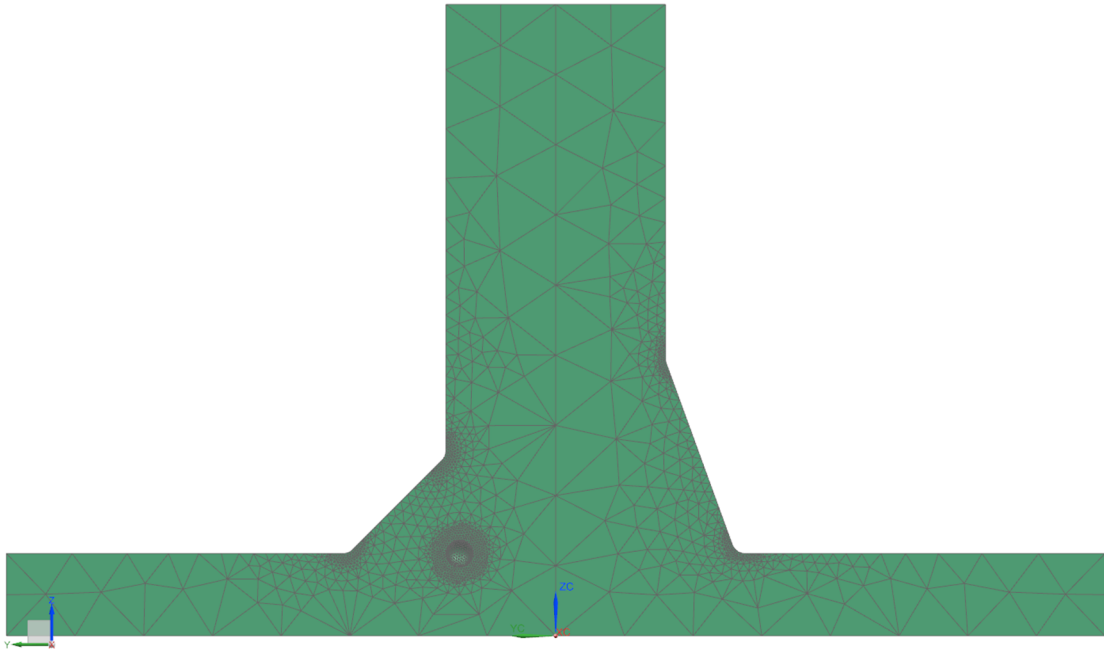


Abbildung 49 Simulation Probe C1 Symmetrieebene

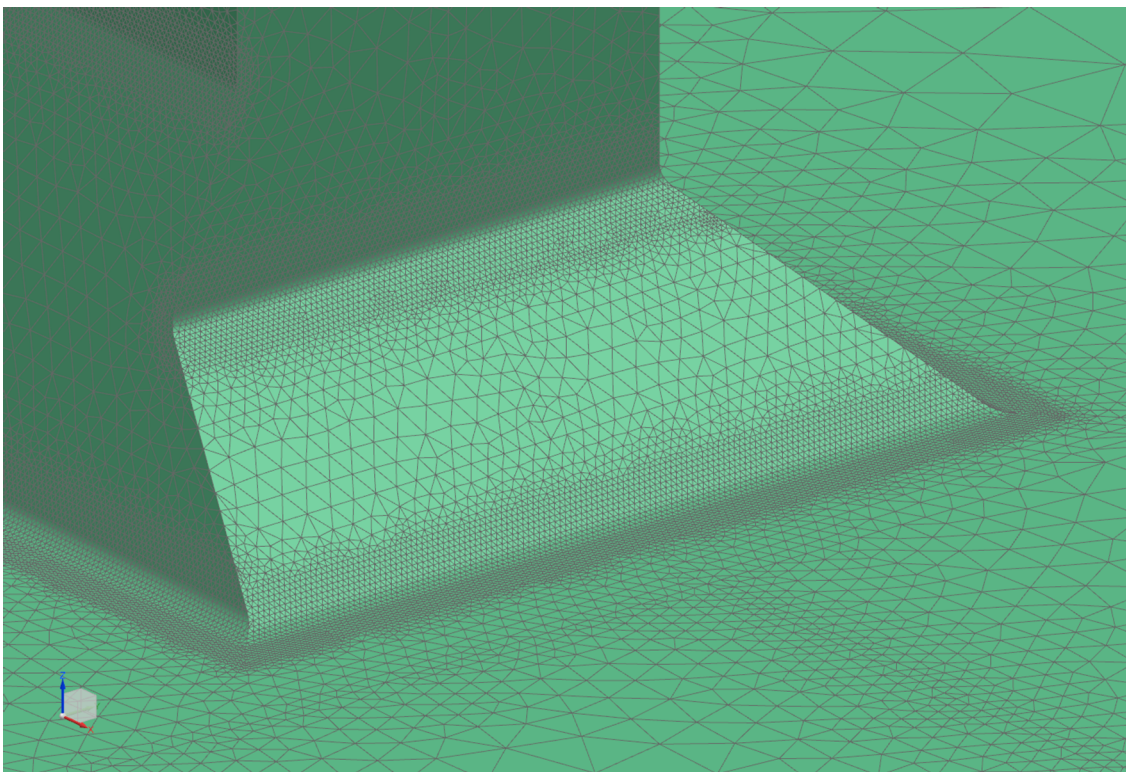


Abbildung 50 Simulation Probe C1 Detailansicht Abbinde

Wegen der Modellierung als Viertel-Modell erfolgt die Einspannung aufgrund der Symmetriebedingungen. (siehe Abbildung 51)

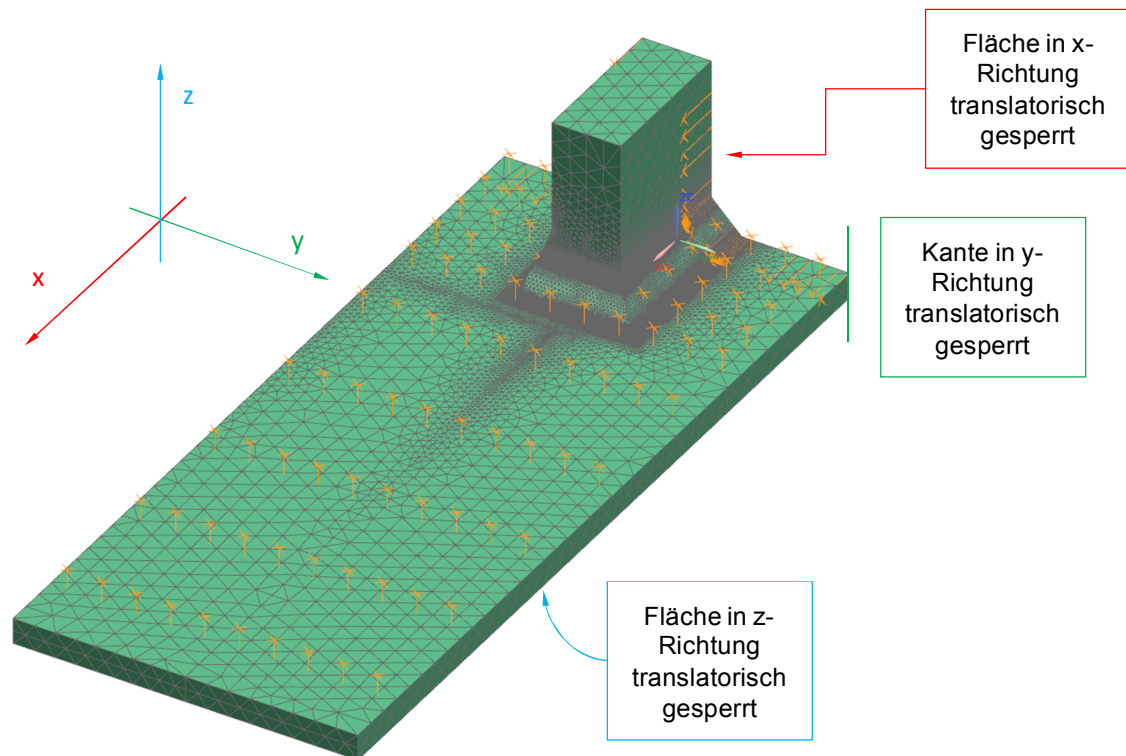


Abbildung 51 Simulation Probe C1 Einspannung

Die Beanspruchung wird als Zugspannung von 1MPa aufgebracht und in x-Richtung als Längszug (Abbildung 52) bzw. in z-Richtung als Querzug (Abbildung 53) definiert.

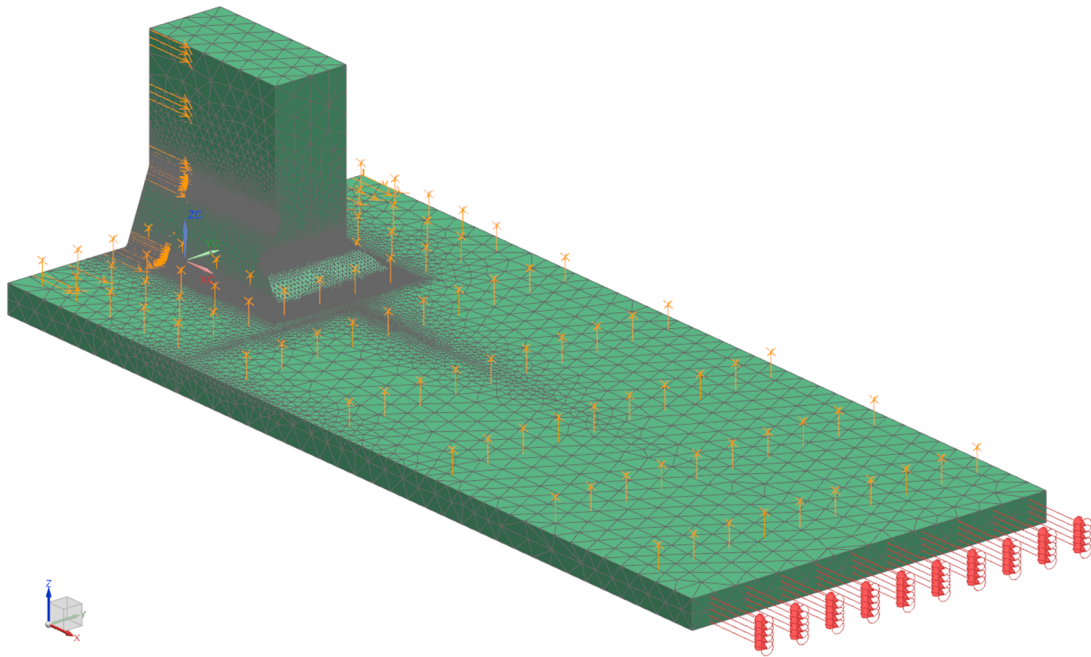


Abbildung 52 Simulation Probe C1 Längszug

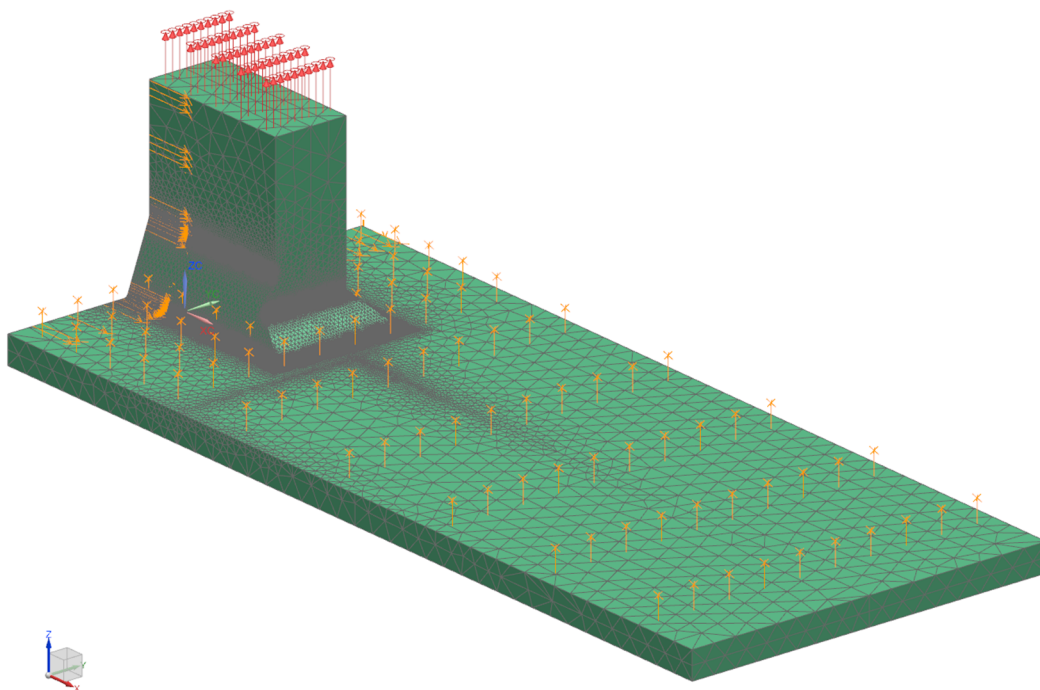


Abbildung 53 Simulation Probe C1 Querzug

Folgende Varianten wurden ausgewählt:

- Längsnaht Doppelkehlnaht
  - Blechstärke Gurt: 12, 16, 20mm
  - Blechstärke Längssteife: 6, 8, 10mm
  - $a_{\text{Längsnaht}} = \text{halbe Blechstärke Längssteife}$
  - Abbinder
    - Kehlnaht „rundum“ = halbe Blechstärke Längssteife
    - Kehlnaht  $a_{\text{Abbinde}} = 5\text{mm}$
    - $HY_{\text{Abbinde}} = \text{halbe Blechstärke Längssteife}$
  
- Längsnaht HY mit Gegenlage
  - Blechstärke Gurt: 12, 16, 20mm
  - Blechstärke Längssteife: 12, 14, 16mm
  - $HY_{\text{Längsnaht}} = \text{Blechstärke Längssteife} - 2\text{mm}$
  - $a_{\text{Gegenlage}} = 3\text{mm}$
  - Abbinder
    - Kehlnaht  $a_{\text{Abbinde}} = 5\text{mm}$
    - $HY_{\text{Abbinde}} = \text{halbe Blechstärke Längssteife}$
  
- Längsnaht Doppel-HY-Naht (K-Naht)
  - Blechstärke Gurt: 12, 16, 20mm
  - Blechstärke Längssteife: 18, 20, 22, 24mm
  - $HY_{\text{Längsnaht}} = \text{halbe Blechstärke Längssteife} - 1\text{mm}$
  - Abbinder
    - Kehlnaht  $a_{\text{Abbinde}} = 5\text{mm}$
    - $HY_{\text{Abbinde}} (\text{hl}) = \text{halbe Blechstärke Längssteife}$
    - $HY_{\text{Abbinde}} (\text{gl}) = \text{Blechstärke Längssteife}$

In Summe ergeben sich 78 Varianten mit je 2 Lastfällen und somit 156 Ergebnisse.

### 6.3 Einbausituation

Die Modelle werden hierfür auf Basis der vier verschiedenen Probenformen modifiziert. Die Modelle werden zunächst mit einem durchgehenden Steg mit variierender Blechdicke versehen und in einer weiteren Variante ohne Steg, also als einseitige Längssteife ausgeführt. Mit Hilfe dieser Untersuchung soll festgestellt werden, ob sich die Ergebnisse des Schwingversuchs der Kleinproben auf andere Strukturen problemlos übertragen lassen.

#### 6.3.1 Mit Steg

Die Probengeometrie wird für eine Seite verwendet. Auf der anderen wird ein durchgehendes Stegblech mit drei unterschiedlichen Blechdicken von 6mm, 10mm und 20mm modelliert. Die Art der stegseitigen Schweißnaht ist die Gleiche, wie auf der Längssteifen-Seite und die Größe der Schweißnaht richtet sich nach Tabelle 8. Die Einspannung erfolgt nach Abbildung 55 und das Modell wird ebenfalls unter Längs- bzw. Querkzug (jeweils 1MPa) beansprucht. (siehe Abbildung 56)

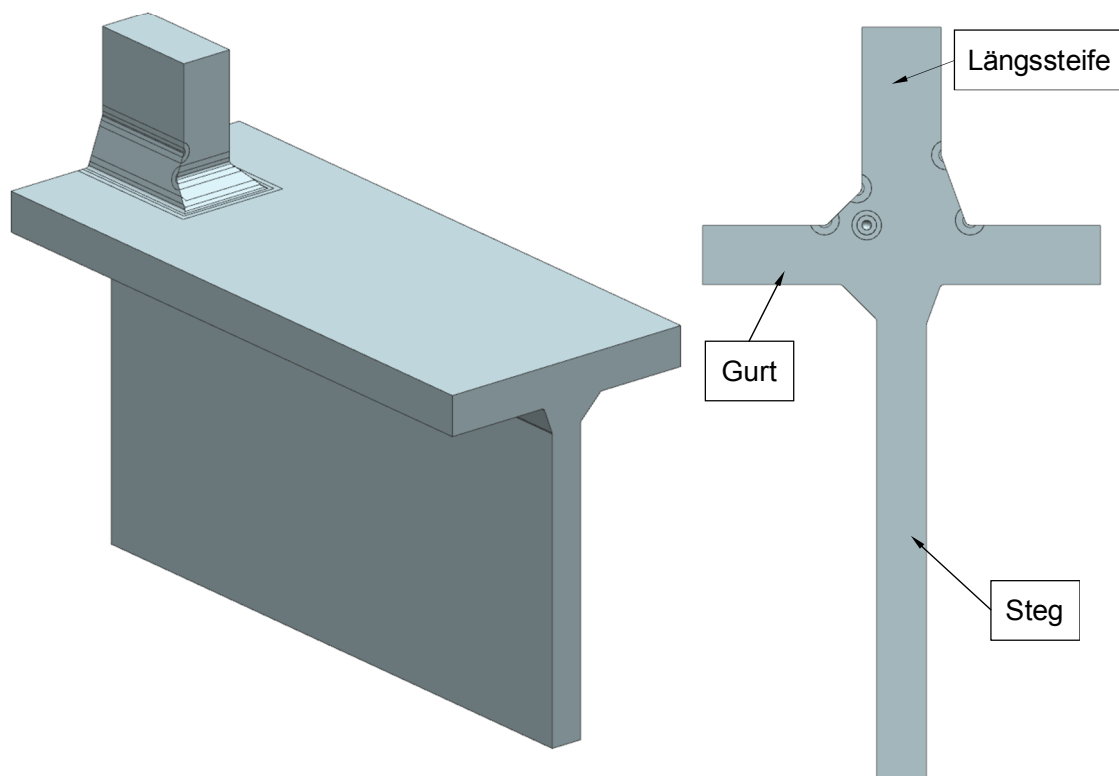


Abbildung 54 Modell Probe C1 mit 10mm Steg



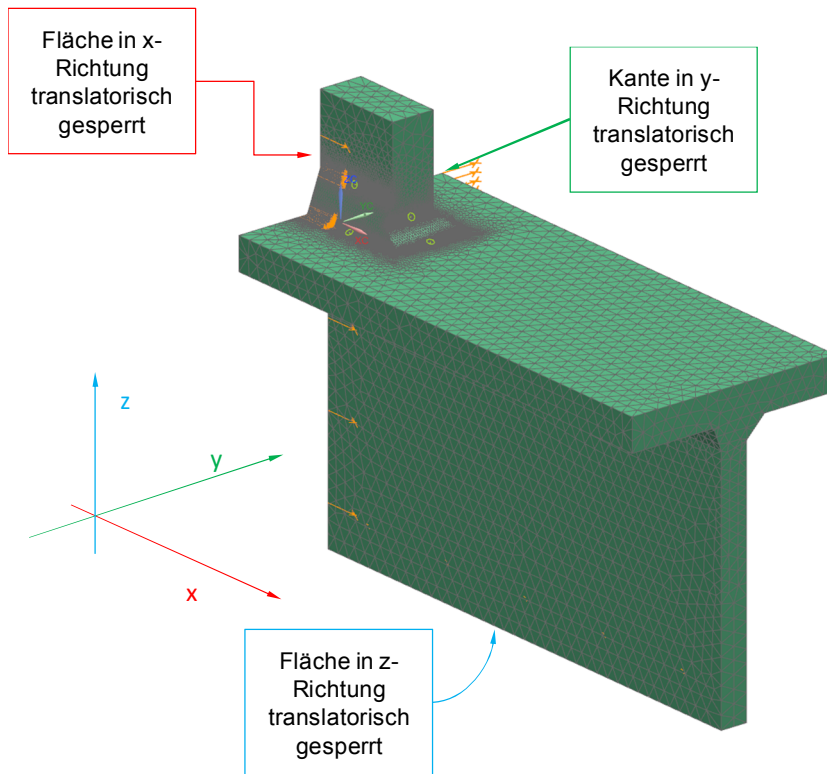


Abbildung 55 Simulation Probe C1 mit 10mm Steg Einspannung

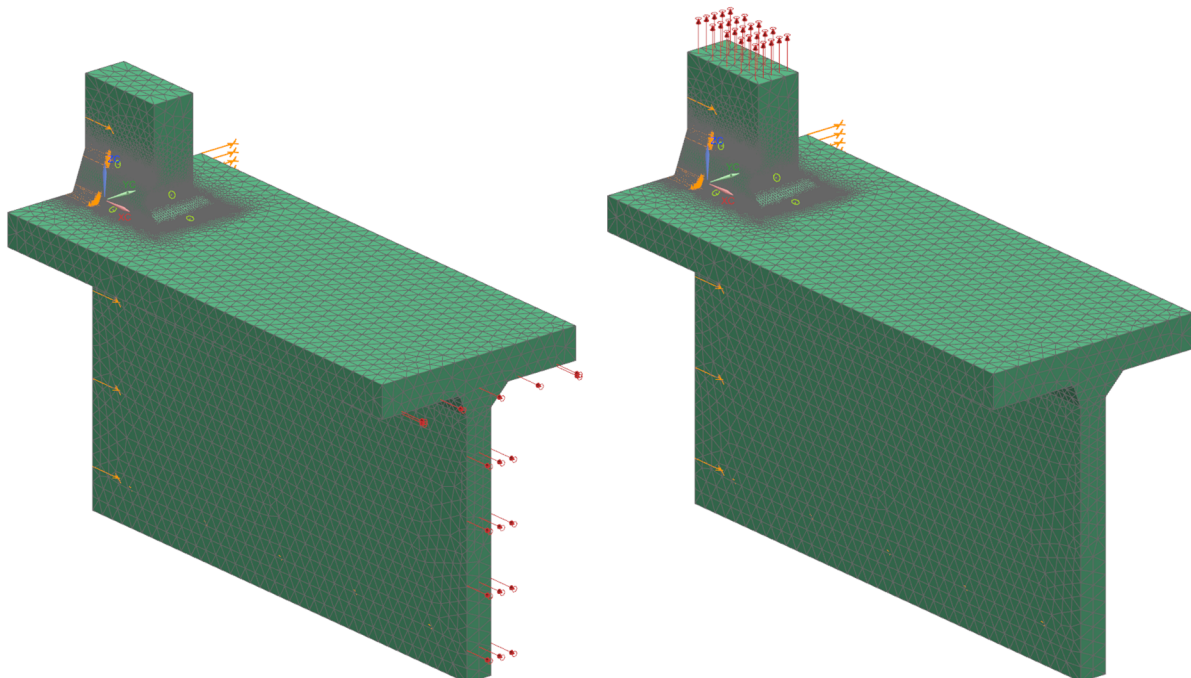
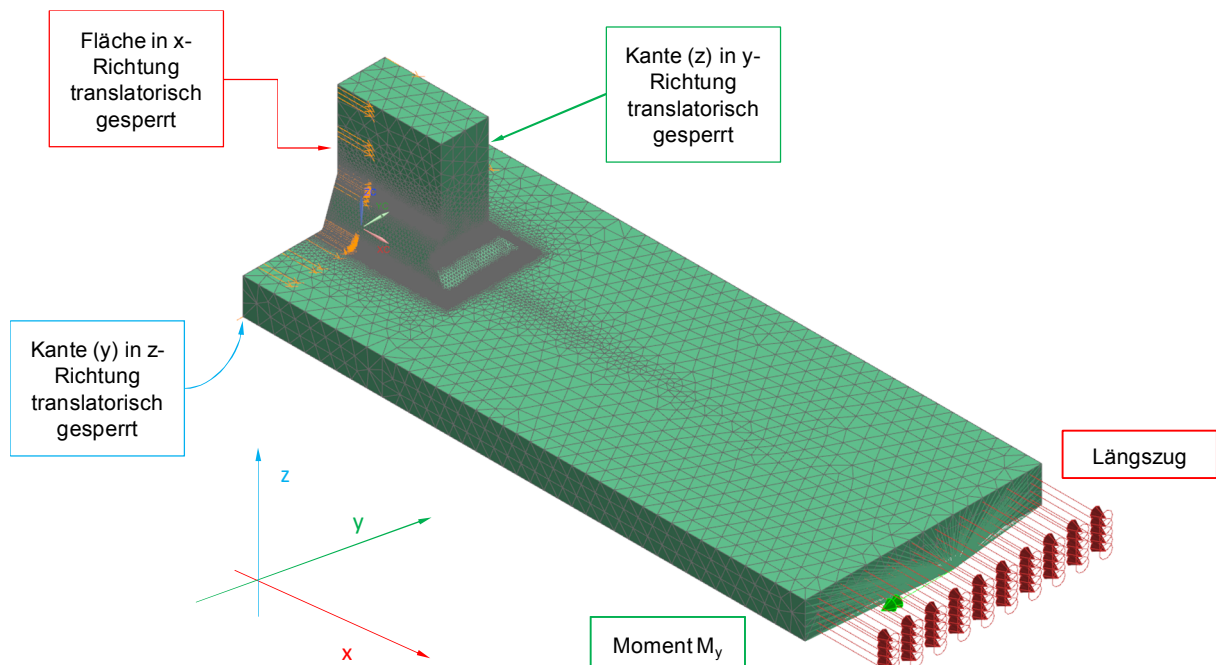


Abbildung 56 Simulation Probe C1 mit 10mm Steg Längszug (links) und Querkzug (rechts)

## 6.3.2 Ohne Steg

Die zweite Variante der Einbausituation beschreibt eine einseitige Längssteife, wie sie auch im Kerbfallkatalog unter Nr. 521 aufscheint. Das heißt, das Modell besteht nur aus dem Gurtblech und einer einseitigen Längssteife. Es wird deshalb als Halbmodell realisiert. Die Einspannung und die aufgebracht Lasten sind in Abbildung 57 zu sehen. Diese Modellvariante hat aufgrund ihrer Einspannung in z-Richtung einen Biegegradienten, welcher bei den anderen Modellen nicht zustande kommt. Um das Modell genauso biegefrei gestalten zu können, wird zusätzlich zur Längszugkraft (1MPa) ein Biegemoment  $M_Y$  aufgebracht. Dieses wird zunächst rechnerisch approximiert und solange angepasst, bis sich ein Ergebnis innerhalb einer 5%-igen Toleranzbreite einstellt. (siehe Tabelle 9 )

Abbildung 57 Simulation Probe C1 ohne Steg Einspannung, Längszug und Moment  $M_Y$ 

Probe	Drehmoment $M_Y$
C1, C2, C4	150 Nmm
C7	200 Nmm

Tabelle 9 Drehmoment  $M_Y$  um Biegespannung der einseitigen Längssteife auszugleichen

## 6.4 Nachbehandlung

Aus den Schwingversuchen ist bekannt, dass es einen Zusammenhang zwischen Nahtübergangsradius und Nahtanstiegswinkel gibt: je stumpfer der Anstiegswinkel ist, desto größer kann der mögliche Radius sein und damit steigt die ertragbare Lastwechselzahl. Zusätzlich zu einer Untersuchung des Übergangsradius soll geprüft werden, wie sich ein nachträgliches Bearbeiten der Längssteife, z.B. durch Schleifen oder Fräsen, auf die Nahtformzahl auswirkt. Dieses Bearbeiten bietet die Möglichkeit zur Gewichteinsparung und folgt somit der Forderung nach Leichtbau. Dazu wird die Probenserie C7 als Modell mit Vollanschluss, also ohne Berücksichtigung der Wurzel, modelliert. In einem nächsten Schritt wird das Bearbeiten der Probe in drei Kategorien simuliert. „Blecheben“ bedeutet, dass die Kontur in der Längssteife keinen vertikalen Abstand zum Gurtblech hat. „1mm Reststeg“ bzw. „5mm Reststeg“ heißt, dass der Konturradius erst im jeweiligen Vertikalabstand vom Gurt die Abbindenaht tangential berührt. (siehe Abbildung 58) Für nachbehandelte Nahtenden muss der Übergangsradius lt. Norm (32) mindestens 3mm betragen. Der Schnittpunkt des Vertikalabstands mit der Kontur der Abbindenaht bildet den horizontalen Mittelpunkt des Konturradius. Die Einspannung erfolgt wiederum aufgrund der Symmetriebedingungen des Viertelmodells und das Modell wird auf Längszug beansprucht. Die ausgewählten Konturradien betragen 6, 12,5, 25, 35, 50 und 100mm. Außerdem wurde eine zusätzliche Variante simuliert, welche die Nachbearbeitung der Schweißnaht mit einem Kugelfräser (Durchmesser 14mm) zeigt. Für die Modellbildung ergibt sich unter Berücksichtigung des Referenzradius (Kerbspannungskonzept) ein Nahtübergangsradius von 4mm für die Modelle mit Reststeg, im blechebenen Modell ist der Referenzradius gleich dem Konturradius bzw. für das Kugelfräser-Modell beträgt der Referenzradius 8mm.

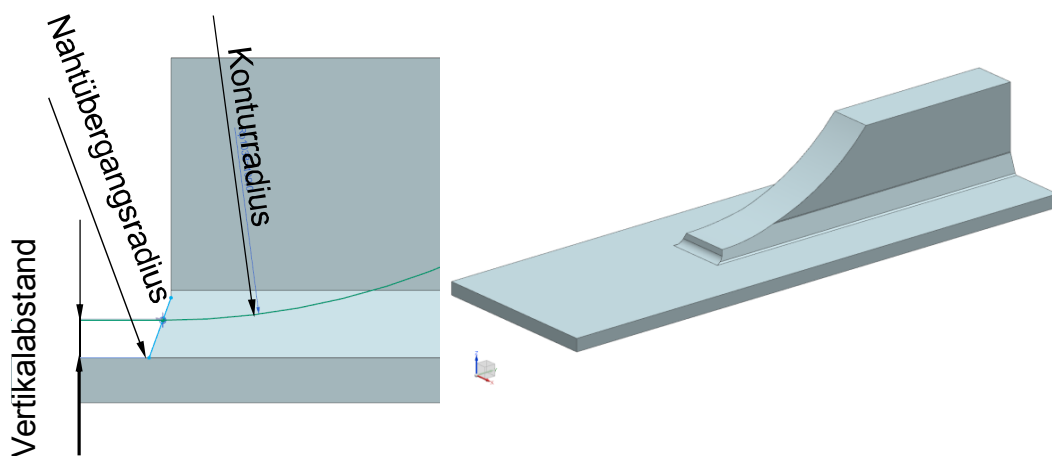


Abbildung 58 Modellbildung bearbeitetes Ende

## 6.5 Realer Abbinder

Wie in Kapitel 5 beschrieben, kam es beim Schwingversuch eines Rahmens zum Riss an einem Abbinder. Dieses Schweißnahtdetail soll mit ausgewählten Nahtanstiegswinkel und Nahtübergangsradien unter Längszug simuliert werden. Dem auftretenden Biegemoment im Schweißnahtbereich wird durch eine entsprechende Konturanpassung des Steges entgegengewirkt. Die Einspannung erfolgt wie in Abbildung 59 zu sehen ist.

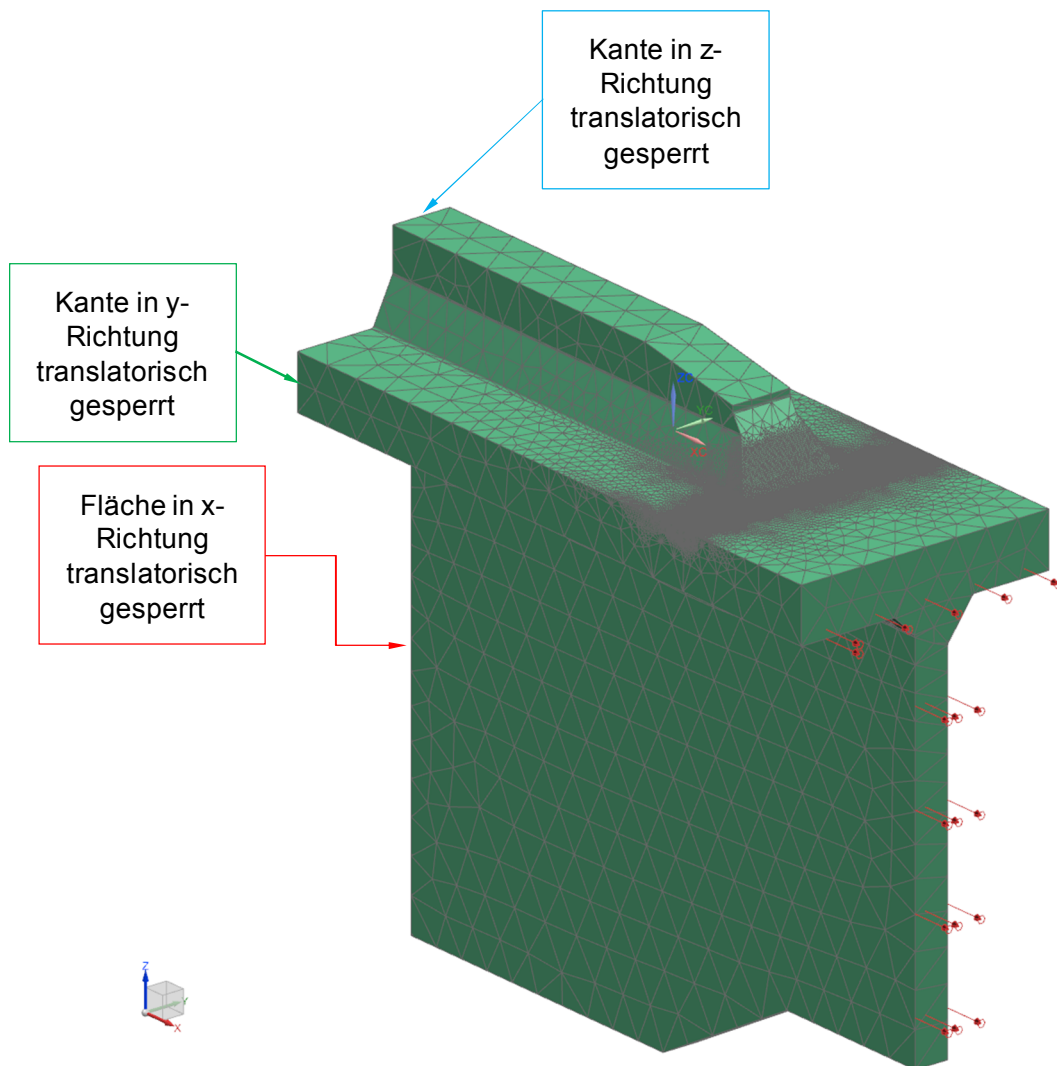


Abbildung 59 Modellbildung realer Abbinder mit Schweißnahtgeometrie von Kapitel 5

## 6.6 Schalenmodell

Um die Ergebnisse mit der aktuellen Methode zur Schweißnahtbewertung vergleichen zu können, werden die Proben und ihre Varianten als Schalenmodell generiert. Diese Modelle zeigen nur das Grundblech und die angeschweißten Bleche, jedoch nicht die Nahtgeometrie.

Zunächst wird eine Netzstudie gefertigt und mit den 3D-Simulationsergebnissen verglichen. Dafür wird die Geometrie der Proben C1 bzw. C2 herangezogen, weil sie die gleichen Blechstärken für Gurt und Längssteife haben und beide Arten von Abbindern vertreten. Die Einspannung erfolgt wiederum aufgrund der Modellierung als Viertelmodell und die Modelle werden auf Längszug beansprucht. Sie werden sowohl mit vier-knotigen als auch mit acht-knotigen Schalenelementen der Größe 1, 5 und 10mm vernetzt.

Der DMS wird für den Schwingversuch in einem Abstand von 5mm vom Nahtübergang entfernt angebracht, deshalb werden diese Abstände (siehe Tabelle 10) in den Diagrammen gekennzeichnet. Somit kann die notwendige Netzfeinheit bestimmt werden.

	Kehlnaht-Abbinder a=5mm	HY-Abbinder HY8
Abstand [mm]	$5 + 5 * \sqrt{2}$	$5 + 8 * \tan(20^\circ)$

Tabelle 10 Abstand zum Abgreifen der Strukturspannung

Um den geeigneten Abstand des Referenzpunktes für die aktuelle Bewertungsmethode zu finden, werden Schalenmodelle der 4 Proben generiert und mit den Strukturspannungsergebnissen aus der Kerbspannungssimulation verglichen. Somit kann der notwendige Abstand bestimmt werden.

Mit den Erkenntnissen aus der Netzstudie wird anschließend die Varianten-Studie für die Schalenmodelle wiederholt und den Strukturspannungsergebnissen der 3D-Modelle gegenübergestellt.

Anschließend wird die Einbausituation für die Probe C1 bzw. C2 mit Steg (6, 10 und 20mm) mit Schalenelementen modelliert und ebenfalls mit der Strukturspannung aus den 3D-Modellen in Beziehung gesetzt.

Zum Schluss wird die aktuelle Bewertungsmethodik mit Hilfe dieser Schalenmodelle und die Auswirkungen auf eben diese erläutert.

## 7 Ergebnisse numerische Untersuchung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der numerischen Untersuchung vorgestellt. Die berechneten Spannungsergebnisse sind an den Element-Knoten ausgegeben und als gemittelte Hauptnormalspannung dargestellt. Sowohl die Kerbspannung (Maximalwert) als auch die Strukturspannung ist in den Modell-Abbildungen angeführt. Die Strukturspannung wird in einem Abstand von 5mm zum Nahtübergang in der Mitte der Gurtoberfläche abgegriffen. Die Dokumentation des daraus berechneten Nahtformfaktors  $K_w$ , also der Kerbspannung dividiert durch die Strukturspannung, bzw. der abgeleiteten FAT-Klasse (225MPa dividiert durch  $K_w$ ) erfolgt anschließend in Diagrammen.

### 7.1 Proben

Es folgen die Simulationsergebnisse der vier unterschiedlichen Probenformen. Da die Visualisierung durch den Post-Processor für alle Modelle im Prinzip ähnlich ist, wird die Vorgehensweise zur Auswertung nur anhand der Probe C1 erläutert.

Wie in Abbildung 60 zu sehen ist, stellt sich unter Längszug die Maximal-Spannung wie zu erwarten in der Nahtübergangskerbe der Abbindenaht ein.

C1, Längszug,  
Spannung: Element-Knoten, gemittelt,  
max. Hauptnormalspannung

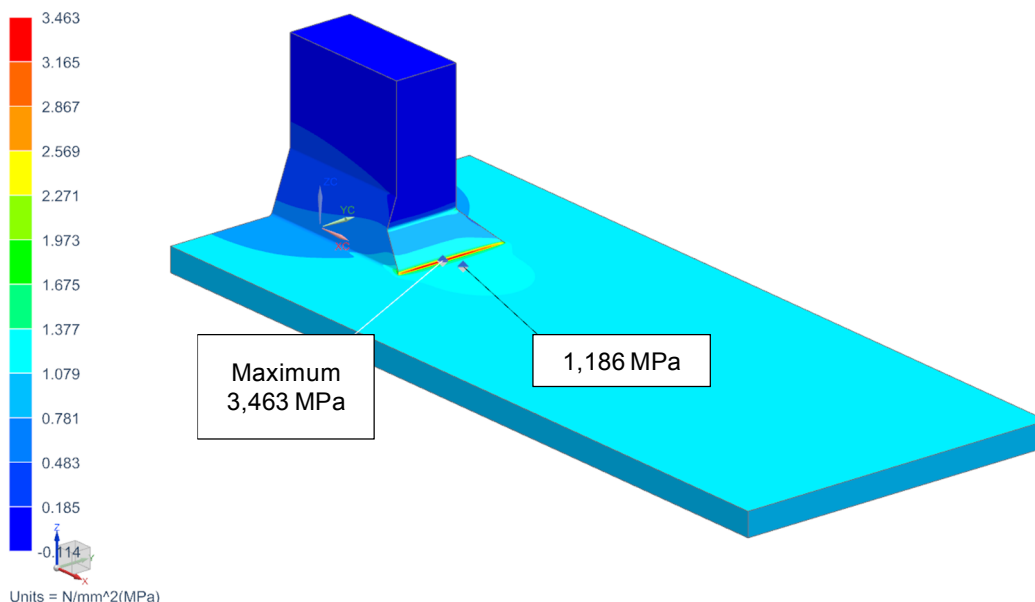


Abbildung 60 Simulationsergebnis Probe C1 Längszug

Für die Auswertung des Querzuges (siehe Abbildung 61) muss beachtet werden, dass die Gegenlage und die Abbindenaht der Serie C1 beides Kehlnähte mit  $a=5\text{mm}$  sind. Dieser Umstand führt dazu, dass sie eine gemeinsame Ecke zur Längssteife bilden. Aufgrund des örtlichen Kräfteflusses ergibt sich eine Spannungskonzentration in dieser gemeinsamen Ecke. (siehe Abbildung 62)

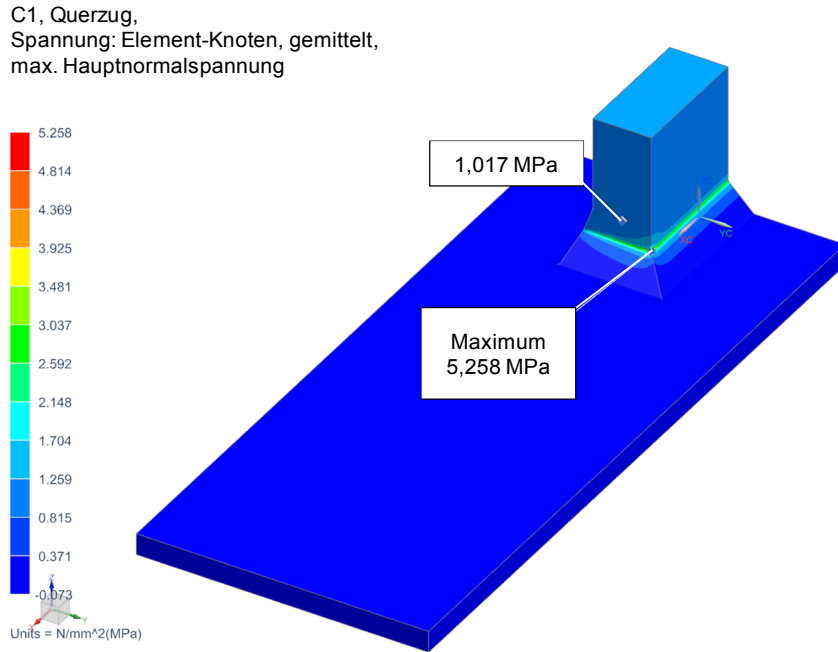


Abbildung 61 Simulationsergebnis Probe C1 Querzug

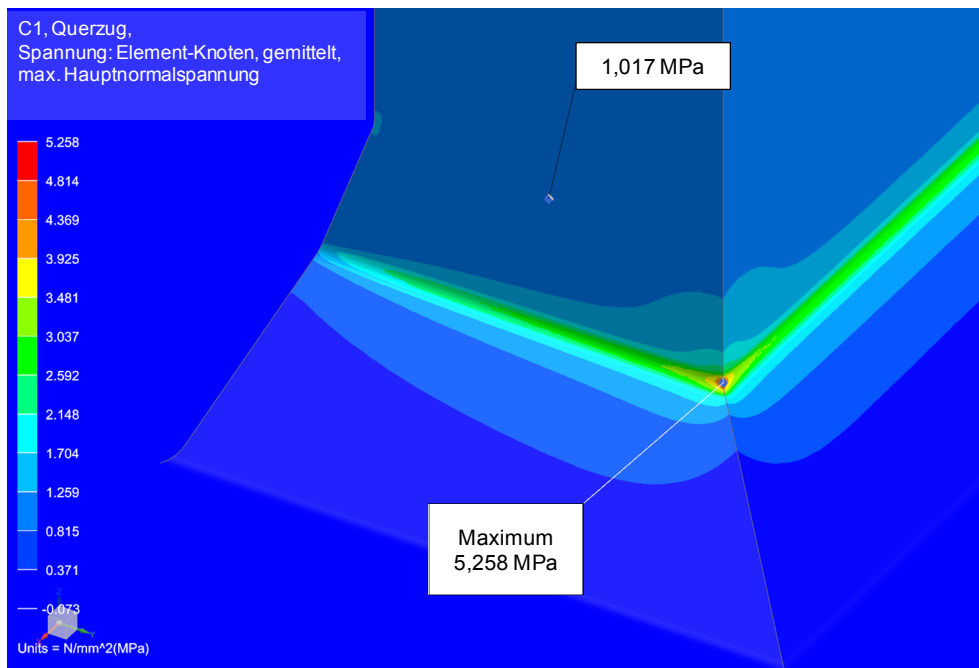


Abbildung 62 Simulationsergebnis Probe C1 Querzug Detailansicht

Die Entstehung eines Anrisses in einer Ecke wird jedoch in Realität äußerst selten beobachtet (siehe Abbildung 63) und somit stellt sich die Frage, ob das vorliegende Ergebnis wirklichkeitsgetreu ist oder ob die Simulation hier ein überzeichnetes Spannungsergebnis generiert. (33)

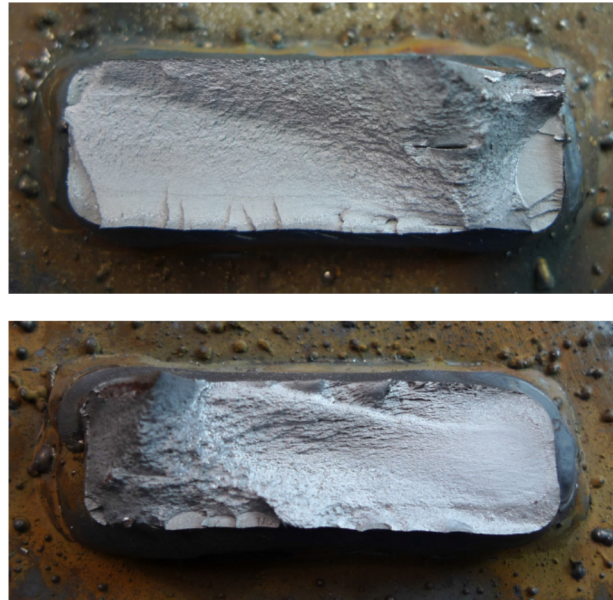


Abbildung 63 Riss entsteht in der Längsnaht (oben), Riss entsteht in der Mitte der Abbindenaht (unten) (33)

Das Kerbspannungskonzept wurde für unendliche lange Schweißnähte entwickelt. Das heißt, es herrscht kein Spannungsgradient in Schweißnahtrichtung und ein ebener Schnitt reicht zur Abbildung der gesamten Geometrie. Für die Schweißnahtenden trifft diese Annahme jedoch nicht zu, da ein 3-dimensionaler Spannungsgradient auftritt.

Aus diesem Grund soll eine Anpassung der Simulationsergebnisse nach (34) berücksichtigt werden. Dafür wird jene Länge  $p$  (siehe Abbildung 64), innerhalb derer die Spannung mehr als 80% des Maximalwertes beträgt, ermittelt und in Formel 6 eingefügt. Als Referenzlänge  $p_{ref}$  werden 70mm, also die Länge der Längssteife, angenommen. Ist der so errechnete reduzierte Spannungswert  $\sigma_{e,a}^*$  größer als die Kerbspannung in der Mitte der Längssteife, bleibt die Ecke der kritische Versagensort. Ist die Spannung in der Mitte der Steife jedoch größer, wird diese als maximale Kerbspannung dokumentiert.

$$\sigma_{e,a}^* = \sigma_{e,a} * \left( \frac{p}{p_{ref}} \right)^{0,12}$$

Formel 6 Reduktion der Kerbspannung



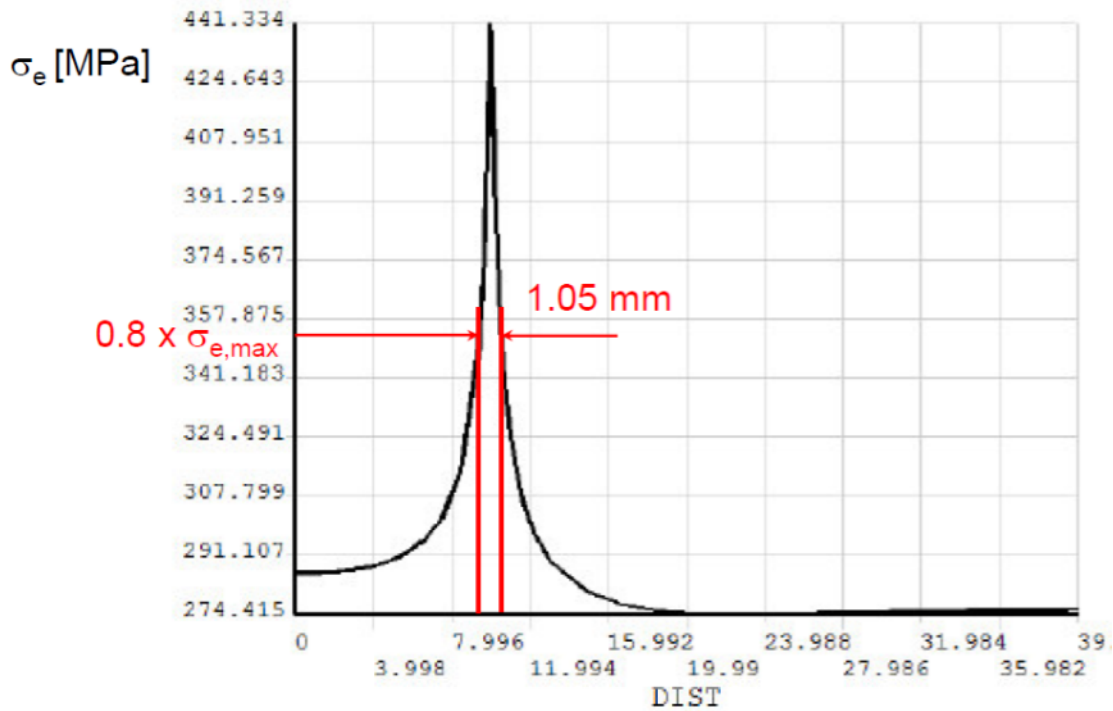


Abbildung 64 Länge  $p$  innerhalb derer die Spannung mehr als 80% des Maximalwertes beträgt

Für die Probe C1 ergibt sich folgender Zusammenhang: (siehe Abbildung 65 und Abbildung 66)

Modell	Ecke						Nahtübergang
	$\sigma_{e,a}$ [MPa]	80% $\sigma_{e,a}$ [MPa]	$p$ [mm]	$p_{ref}$ [mm]	$\sigma_{e,a}^*$ [MPa]		$\sigma$ [MPa]
C1 YB-EF	5,258	4,206	0,43	70	2,854	>	2,738

Tabelle 11 Reduktion der maximalen Kerbspannung der Probe C1

Das bedeutet, dass trotz Reduktion der Maximalspannung, der kritische Ort für die Probenserie C1 noch immer in der Ecke des Nahtübergangs liegt, jedoch mit einem  $\sigma_{e,a}^*$  von 2,854 deutlich geringer als das Simulationsergebnis von 5,258 ist. Dieser Wert lässt sich wesentlich sinnvoller mit den Beobachtungen aus den Versuchen in Einklang bringen.

C1, Querzug,  
Spannung: Element-Knoten, gemittelt,  
max. Hauptnormalspannung

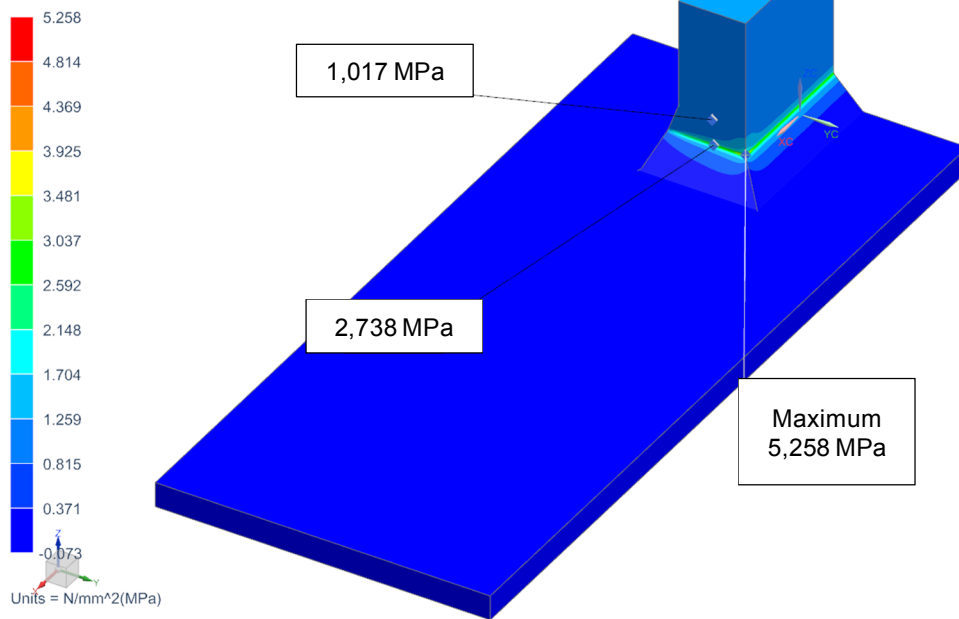


Abbildung 65 Simulationsergebnis Probe C1 Querzug Spannung in Längssteifenmitte

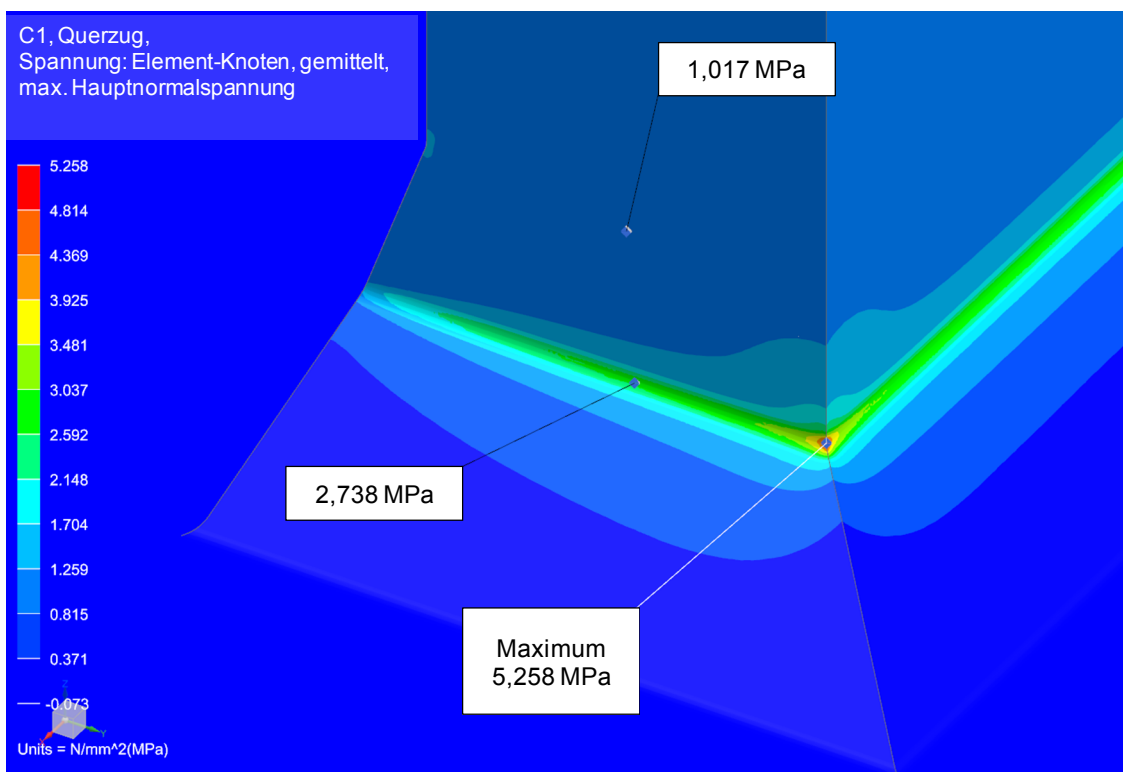


Abbildung 66 Simulationsergebnis Probe C1 Querzug Spannung in Längssteifenmitte Detailansicht

Für die Probeserie C4 unter Querzug ergibt sich, wegen der umlaufenden Kehlnaht mit  $a=5\text{mm}$ , ebenfalls das Spannungsmaximum in einer Ecke. Nach Anwendung von (34) zeigt sich, dass nach der Reduktion der kritische Ort in der Mitte der Längssteife liegt.

Modell	Ecke						Nahtübergang
	$\sigma_{e,a}$ [MPa]	80% $\sigma_{e,a}$ [MPa]	$\rho$ [mm]	$\rho_{\text{ref}}$ [mm]	$\sigma_{e,a}^*$ [MPa]		$\sigma$ [MPa]
C4 FD-EF	6,235	4,988	0,433	70	3,387	<	3,642

Tabelle 12 Reduktion der maximalen Kerbspannung der Probe C4

Dieses Verfahren wird für alle nachfolgenden Simulationsergebnisse angewendet, welche die maximale Kerbspannung in einer der Ecken des Abbinders haben. Je nach Resultat wird anschließend entweder das Simulationsergebnis reduziert oder die Kerbspannung in der Mitte der Längssteife weiter verwendet.

In Tabelle 13 werden die Ergebnisse für den Längszug, exemplarisch für alle weiteren Resultate, gelistet. Zu sehen sind die maximale Kerbspannung  $\sigma_e$ , die Strukturspannung  $\sigma_{\text{hs}}$ , die daraus berechnete Nahtformzahl  $K_W$ , die resultierende FAT-Klasse und die abgerundete FAT-Klasse nach der bekannten Unterteilung des Bauteilkatalogs nach Normzahlreihe R20.

Längszug	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_{\text{hs}}$ [MPa]	$K_W$	FAT	FAT <sub>R20</sub>
C1 YB-EF	3,463	1,186	2,92	77	71
C2 YB-EY	3,819	1,177	3,245	69	63
C4 FD-EF	3,493	1,158	3,016	75	71
C7 YD-EY	3,827	1,182	3,238	69	63

Tabelle 13 Ergebnisse der Simulation Proben unter Längszug

Es zeigt sich, dass der HY-Abbinde unter Längszug eine höhere Nahtformzahl  $K_W$  und damit eine kleinere FAT-Klasse als der Kehlnahtabbinde aufweist. Dies kann dadurch erklärt werden, dass der Nahtanstiegswinkel und somit die Kraftumlenkung der HY-Naht steiler als jener der Kehlnaht ist. (siehe Abbildung 4)

Für die Ergebnisse unter Querkzug stellt sich der Sachverhalt komplexer dar, denn hier tritt die maximale Kerbspannung nicht automatisch im Nahtübergang des Abbinders auf, sondern hängt von der Kombination aus Längs-, Gegen- und Abbindenaht ab. (siehe Tabelle 14) Außerdem ist entscheidend, dass sich zwar der Nahtübergangswinkel der Kehlnaht wegen der Gleichschenkligkeit nicht verändert ( $\theta_{\text{Kehlnaht}}=135^\circ$ ), aber der Nahtanstiegswinkel der HY-Naht in Querrichtung sehr flach wird ( $\theta_{\text{HY}}=160^\circ$ ).

Querkzug	Längsnaht	Gegenlage	Abbinder	Position von $\sigma_e$	Fazit
C1	HY-Naht	Kehlnaht	Kehlnaht	Ecke	Reduktion nach (34)
C2	HY-Naht	Kehlnaht	HY-Naht	Gegenlage	$\Theta_{\text{Kehlnaht}} 135^\circ \rightarrow > k_w$
C4	Kehlnaht	Identisch Längsnaht	Kehlnaht	Ecke	Reduktion nach (34)
C7	HY-Naht	Identisch Längsnaht	HY-Naht	Längsnaht	$\Theta_{\text{HY}} 160^\circ \rightarrow < k_w$

Tabelle 14 Position der maximalen Kerbspannung unter Querkzug für die vier Proben

Die gesuchten Ergebnisse werden in Abbildung 67 graphisch dargestellt. Das Diagramm zeigt die Nahtformzahl  $K_w$  für die vier Proben sowohl für Längszug (links) als auch für Querkzug (rechts).

Abbildung 68 zeigt die durch Formel 2 berechnete FAT-Klasse der Proben für Längszug (links) und Querkzug (rechts). Die Skalierung der Ordinate entspricht jener der üblichen FAT-Klassen-Abstufungen nach der Normzahlreihe R20 und erleichtert somit das Abrunden auf die bekannten FAT-Klassen des Katalogs.

Die FAT-Klasse 71 für den Kerbfall „521-Längssteife unter Längszug“ kann für HY-Abbinder unter Längszug durch die Simulation nicht bestätigt werden. Der Kehlnahtabbinder unter Längszug entspricht dem empfohlenen Wert aus dem Katalog.

Die errechneten FAT-Klassen für den Querkzug unterstreichen nochmals sehr deutlich den Einfluss der Kombinationsmöglichkeiten der Schweißnähte und des Nahtanstiegswinkels.

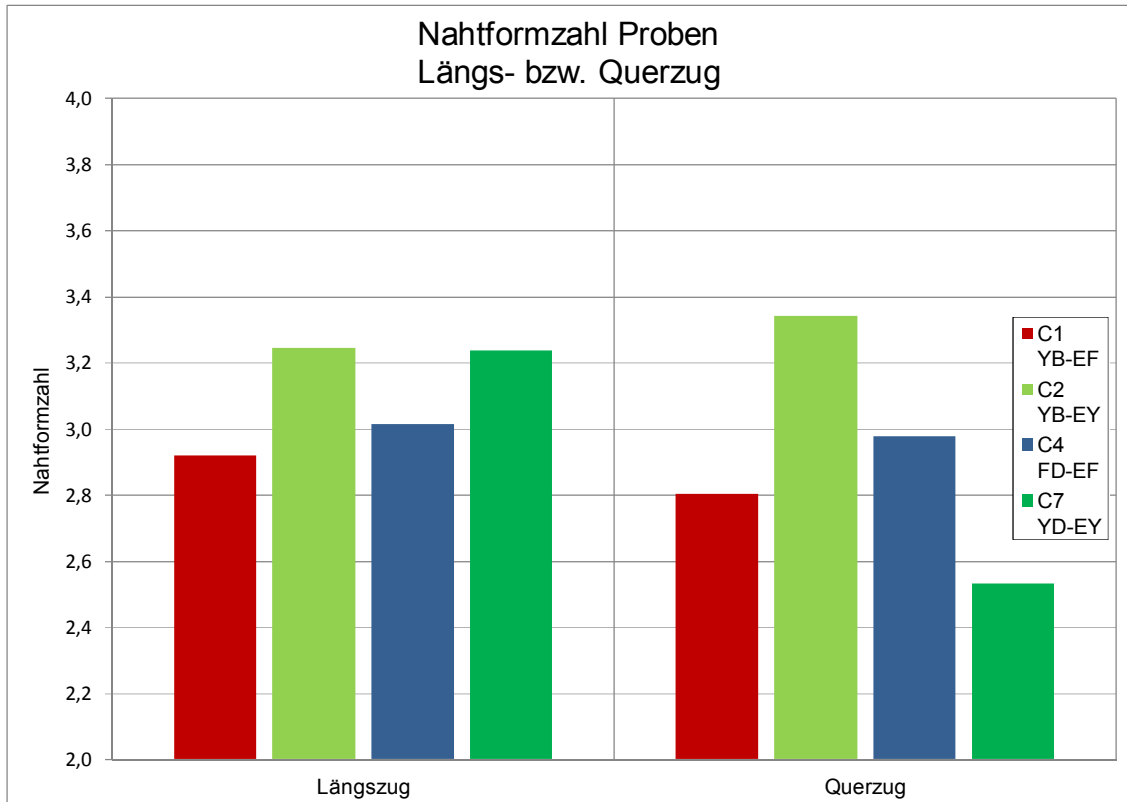


Abbildung 67 Nahtformzahl Proben

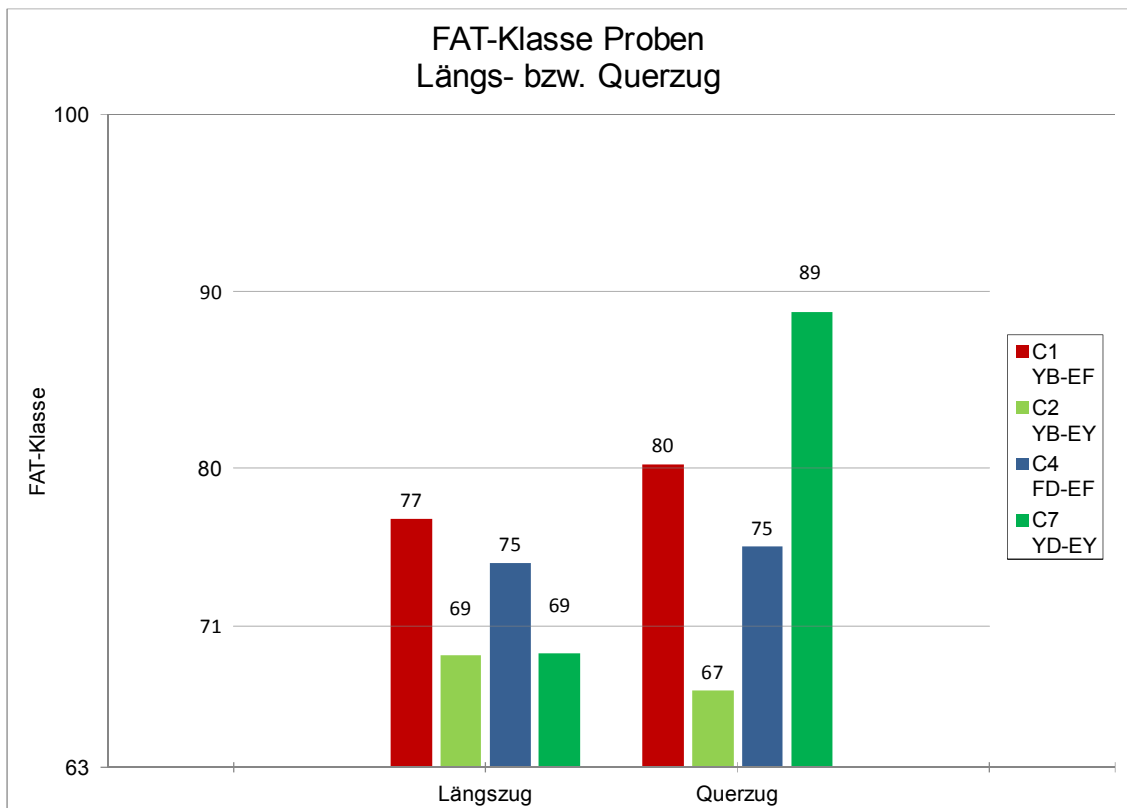


Abbildung 68 FAT-Klasse Proben

## 7.2 Varianten

Es folgen nun die graphischen Auswertungen der Simulationsergebnisse für die Varianten der Kleinproben.

Grundsätzlich sind die Ergebnisse nach folgendem Schema dokumentiert:

### 7.2.x Längsnahtart

#### 7.2.x.y Längszug

- Diagramm Nahtformzahl  $K_w$  über Gurtblechdicke  $t_{\text{Gurt}}$
- Diagramm FAT-Klasse über Gurtblechdicke  $t_{\text{Gurt}}$

#### 7.2.x.z Querzug

- Diagramm Nahtformzahl  $K_w$  über Längssteifenblechdicke  $t_{\text{Längssteife}}$
- Diagramm FAT-Klasse über Längssteifenblechdicke  $t_{\text{Längssteife}}$

Bzgl. der Nomenklatur ist anzumerken, dass die Variante 2 für den Kehlnahtabbinder (siehe Tabelle 8) „Kehlnaht rundum“ genannt wird, da die Größe der Schweißnaht für Längsnaht, Gegenlage und Abbindenaht identisch ist. Für den Fall der Doppel-HY-Naht (auch K-Naht) wird die Variante 1 vom HY-Abbinder mit „hs“ für halbe Längssteifenblechdicke, Variante 2 mit „gs“ für ganze Längssteifenblechdicke abgekürzt.

### 7.2.1 Längsnaht Doppelkehlnaht

#### 7.2.1.1 Längszug

Für den Längszug der Modelle mit Doppelkehlnaht als Längsnaht wird die maximale Kerbspannung für alle Varianten im Nahtübergang zum Gurtblech beobachtet.

Wie schon in 7.1 gut zu sehen ist, zeigt auch Abbildung 69, dass der Kehlnahtabbinder (blau bzw. rot) aufgrund seines flacheren Nahtanstiegswinkels eine kleinere Nahtformzahl als der HY-Abbinder (grün) hat. Mit zunehmender Gurtblechdicke steigt die Nahtformzahl für alle Varianten. Die Nahtdicke des Kehlnahtabbinders spielt eine untergeordnete Rolle, weil die Ergebnisse für „Kehlnaht rundum“ (blau) und „Kehlnaht a=5mm“ (rot) eng beieinander liegen.

Durch die Darstellung der Simulationsergebnisse als FAT-Klassen kann für den Kehlnahtabbinder wiederum die FAT71 aus dem Katalog bestätigt werden. Für den HY-Abbinder ergibt sich eine FAT-Klasse von 63.

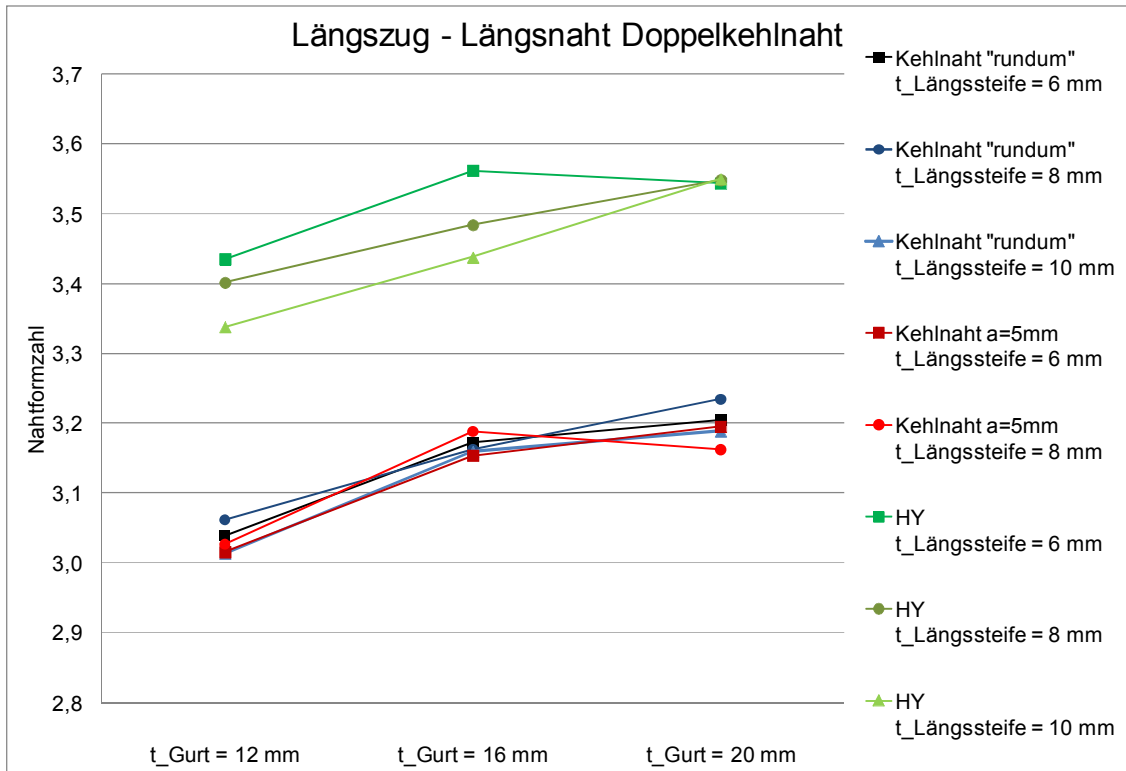


Abbildung 69 Nahtformzahl Doppelkehlnaht Längszug

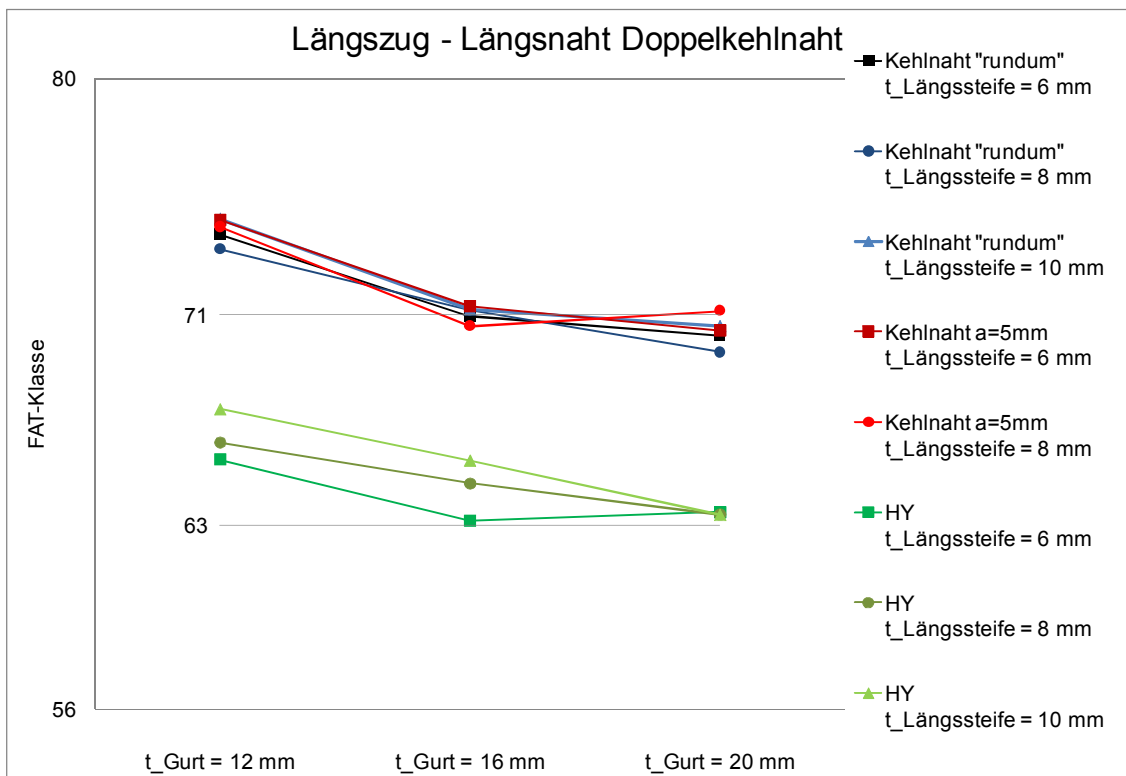


Abbildung 70 FAT-Klasse Doppelkehlnaht Längszug

## 7.2.1.2 Querzug

Für die Auswertung der Variante „Längsnaht Doppelkehlnaht unter Querzug“ müssen folgende Punkte beachtet werden.

1. Für die Kehlnahtabbinder „rundum“ (blau) konzentriert sich die maximale Kerbspannung wieder in einer der Ecken des Abbinders. Das heißt, es muss eine Kontrolle des Ergebnisses nach (34) durchgeführt werden. Die Kerbspannung wird dadurch von im Schnitt 6MPa auf durchschnittlich 3,2MPa reduziert. Vergleicht man diesen Wert nun mit der Kerbspannung in der Mitte der Längssteife zeigt sich, dass die maximale Kerbspannung nicht länger in der Ecke, sondern in der Mitte des Nahtübergangs liegt. In den nachfolgenden Diagrammen ist deshalb die Kerbspannung der Blechmitte angeführt.
2. Bei den HY-Abbindern (grün) stellt sich die Maximalspannung in der Wurzel in Höhe der Längsnaht ein. Der Kraftfluss wird durch die offene Wurzel der Doppelkehlnaht stärker umgelenkt, als am relativ sanften Nahtübergang der HY-Abbindenaht. (vgl. Abbildung 45)

Mit steigender Blechdicke des Zugblechs, also in diesem Fall der Längssteife, nimmt die Nahtformzahl  $K_w$  für „Kehlnaht a=5mm“ (rot) und dem HY-Abbinder (grün) zu. Für den Fall der „Kehlnaht rundum“ (blau) ergibt sich eine Nahtformzahl von ungefähr  $K_w=3$ . Das hat zur Folge, dass die „Kehlnaht rundum“ (blau) um eine Kerbfallklasse höher bewertet werden kann, als „Kehlnaht a=5mm“ (rot). (siehe Abbildung 72) Für den HY-Abbinder wird in Abbildung 72 deutlich, dass die große Kraftumlenkung in der Wurzel die FAT-Klasse mit zunehmender Längssteifen-Blechdicke verringert.

In Abbildung 73 und Abbildung 74 ist für den HY-Abbinder (grün) die Kerbspannung im Nahtübergang dargestellt. Der sanfte Nahtanstiegswinkel und die Symmetrie der Längsnähte bewirken, dass die Nahtformzahl nicht über  $K_w=2$  steigt und sich somit eine FAT-Klasse von FAT112 ergeben würde, müsste die offene Wurzel nicht berücksichtigt werden.



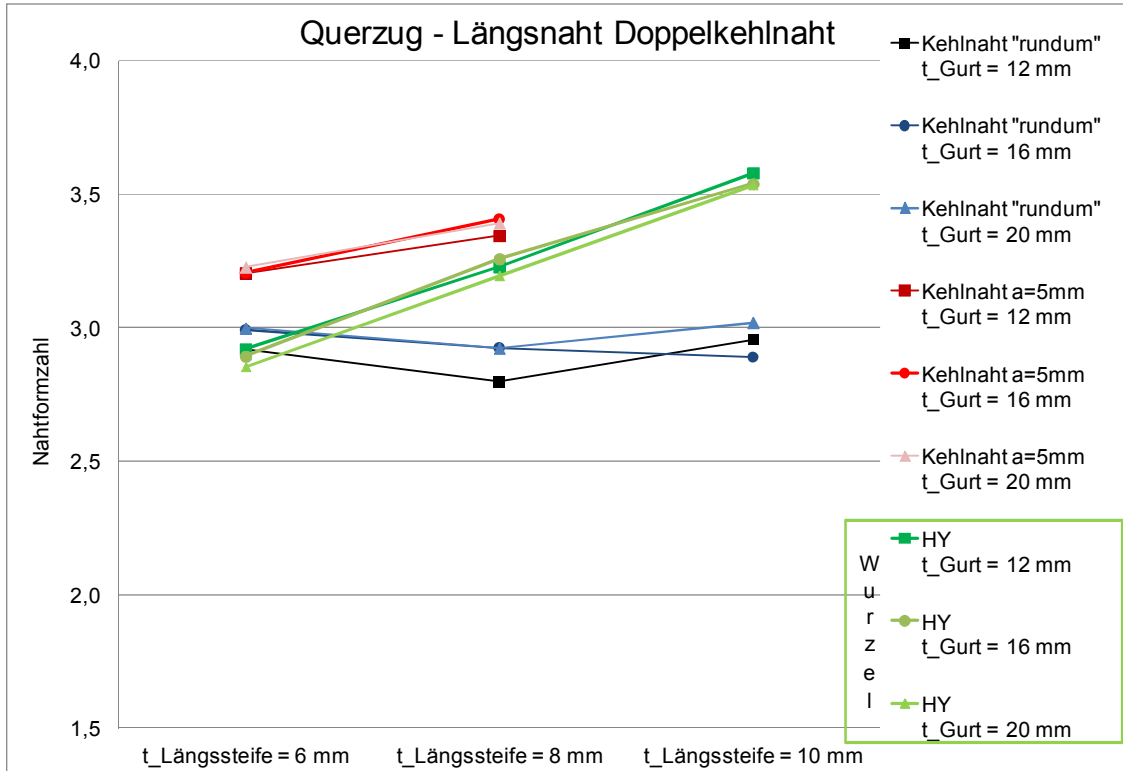


Abbildung 71 Kerbformzahl Doppelkehlnaht Querzug (HY-Wurzel)

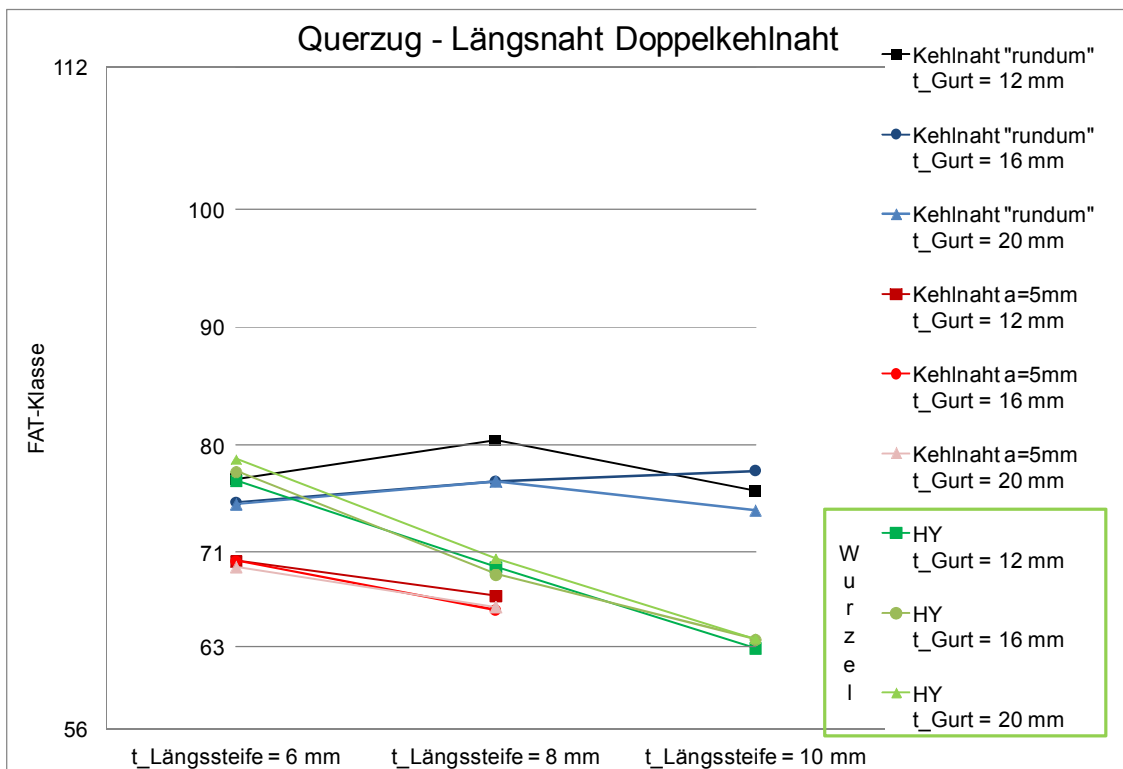


Abbildung 72 FAT-Klasse Doppelkehlnaht Querzug (HY-Wurzel)

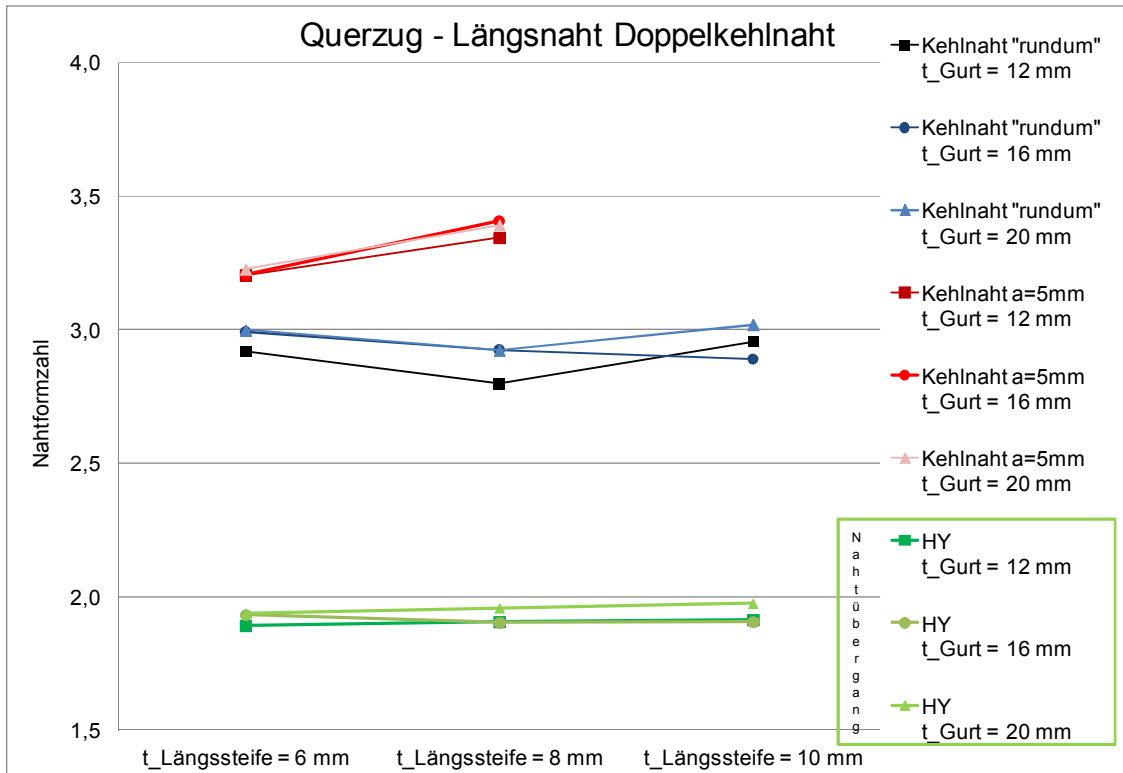


Abbildung 73 Nahtformzahl Doppelkehlnaht Querzug (HY-Nahtübergang)

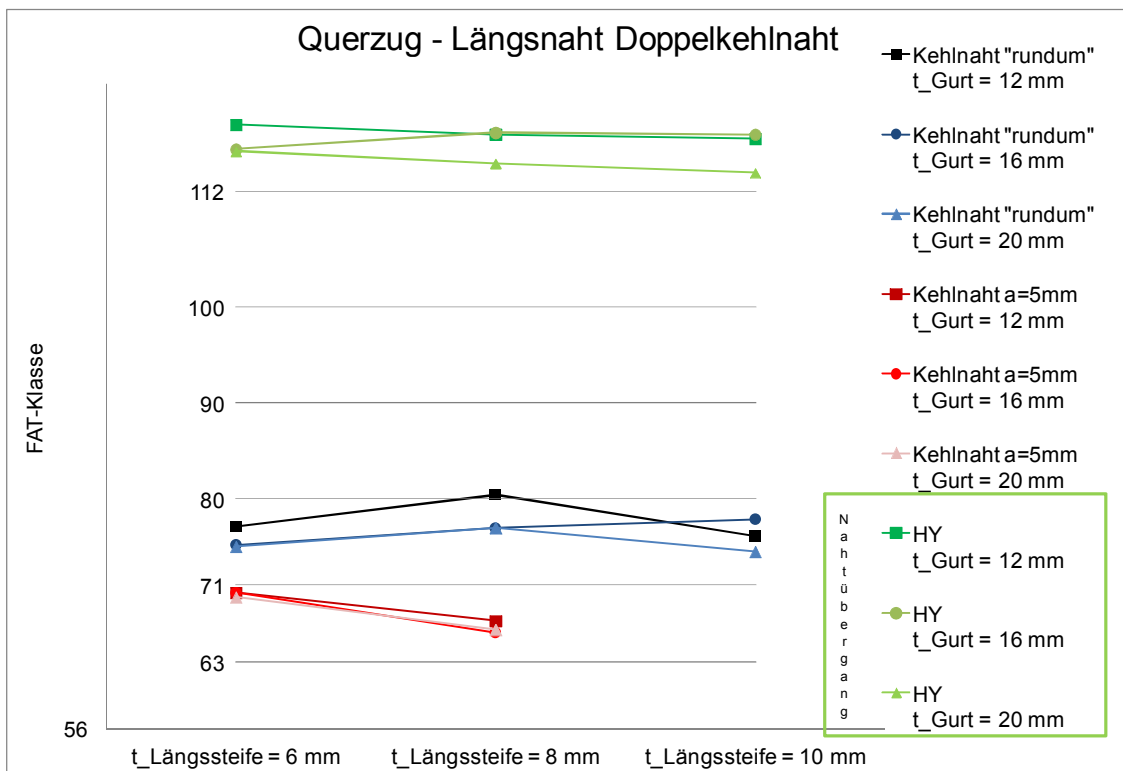


Abbildung 74 FAT-Klasse Doppelkehlnaht Querzug (HY-Nahtübergang)

## 7.2.2 Längsnaht HY mit Gegenlage

### 7.2.2.1 Längszug

Auch für diese Längsnaht-Variante unter Längszug stellt sich die maximale Kerbspannung für alle Modelle im Nahtübergang ein.

Es ist wieder zu beobachten, dass unter Längszug der HY-Abbinder (grün) eine höhere Nahtformzahl als der Kehlnahtabbinder (rot) aufweist. Ebenso wird eine Erhöhung der Nahtformzahl bei zunehmender Gurtblechdicke verzeichnet.

Die FAT-Klasse (siehe Abbildung 76) für den Kehlnahtabbinder verringert sich von FAT71 auf FAT63 mit zunehmender Gurtblechdicke. Für den HY-Abbinder wird wieder FAT63 ermittelt.

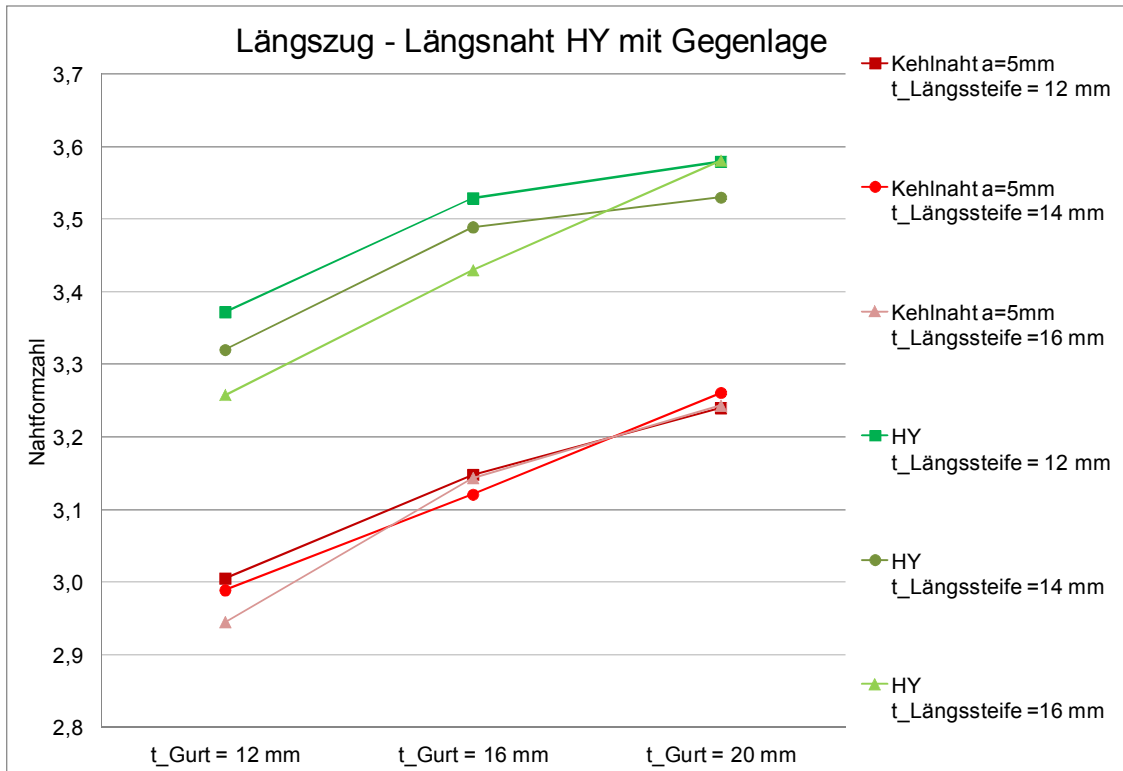


Abbildung 75 Nahtformzahl HY-Naht mit Gegenlage Längszug

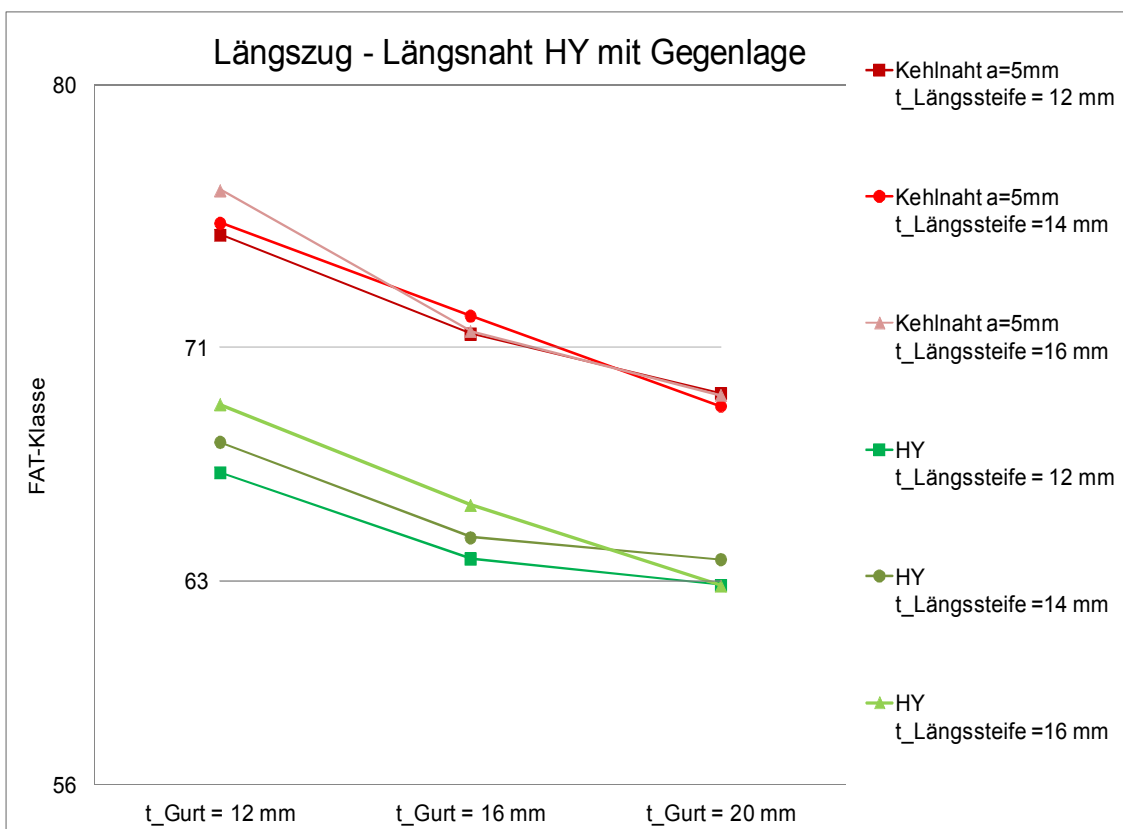


Abbildung 76 FAT-Klasse HY-Naht mit Gegenlage Längszug

#### 7.2.2.2 Querzug

Für den Querzug dieser Variante zeigt sich ebenfalls, dass die HY-Naht (grün) eine geringere Nahtformzahl als der Kehlnahtabbinder (rot) hat.

Aufgrund des flachen Nahtanstiegwinkels des HY-Abbinders ist die maximale Kerbspannung nicht in der Nahtübergangskerbe des Abbinders, sondern im Nahtübergang der Gegenlage ( $a=3\text{mm}$ ). Die Maximalspannung ist jedoch im Bereich der Abbindenaht und wird deshalb übernommen.

Die FAT-Klasse bewegt sich für den HY-Abbinder im Bereich FAT71, für den Kehlnahtabbinder ergibt sich für alle bis auf ein Modell FAT63. (siehe Abbildung 78)

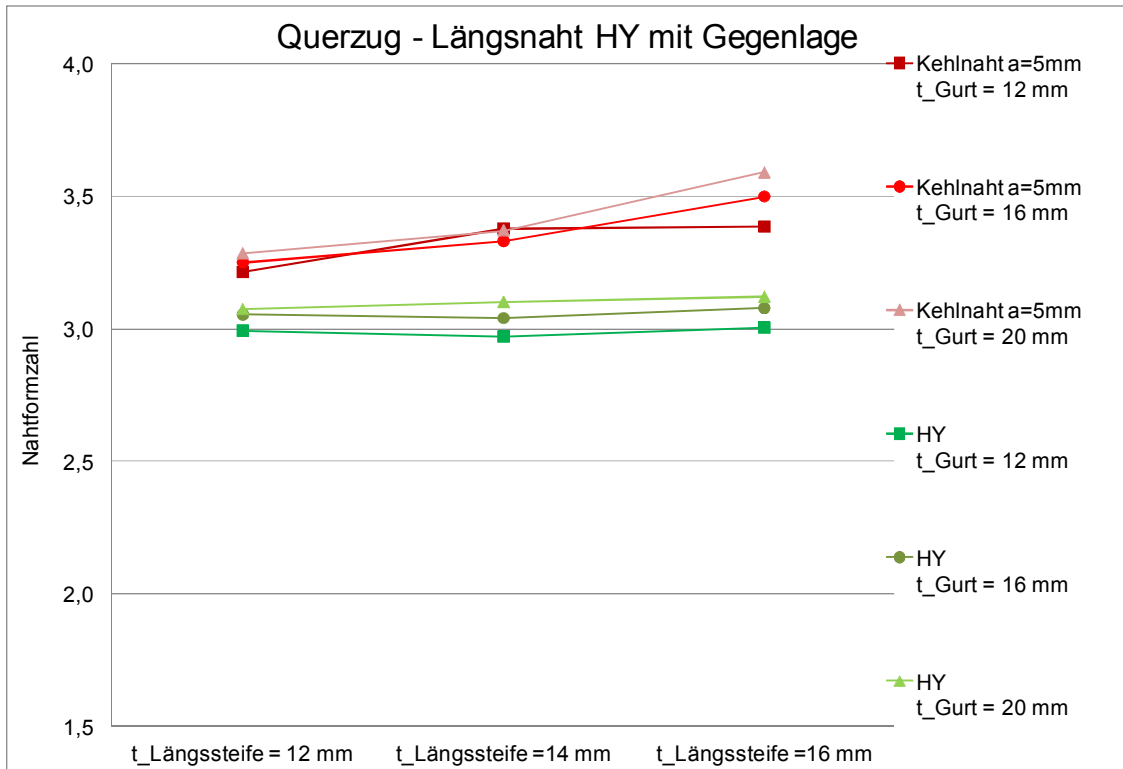


Abbildung 77 Nahtformzahl HY-Naht mit Gegenlage Querzug

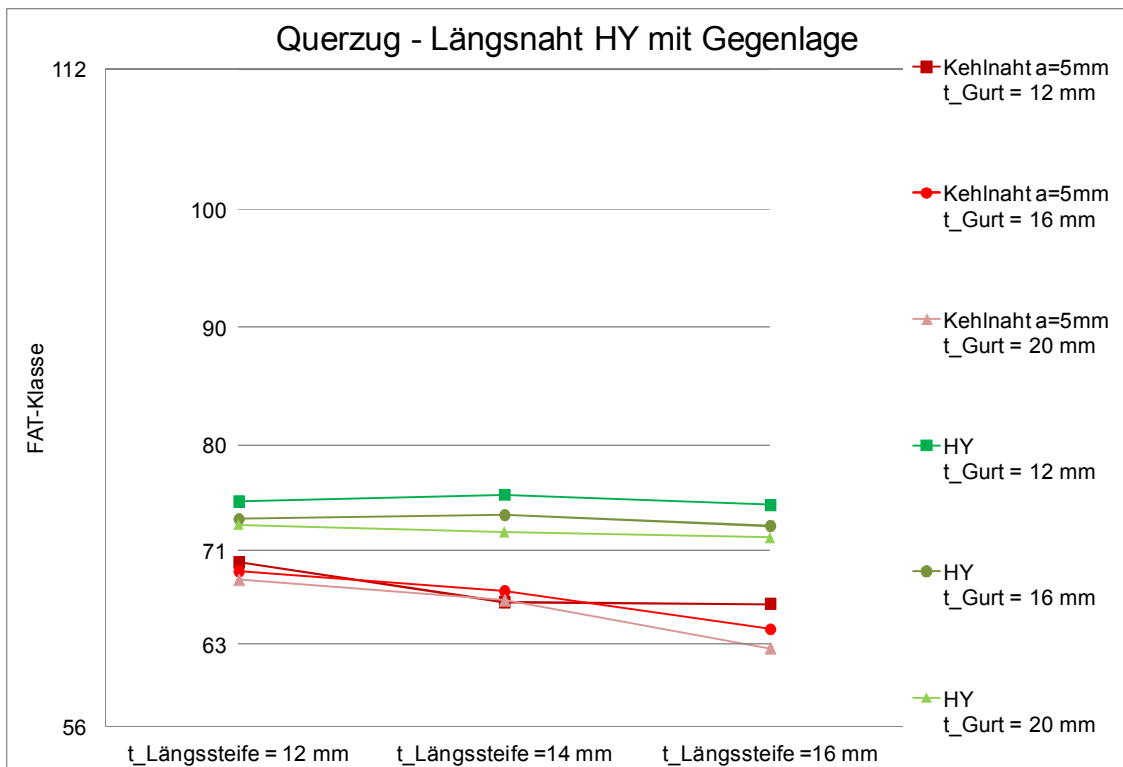


Abbildung 78 FAT-Klasse HY-Naht mit Gegenlage Querzug

### 7.2.3 Längsnaht K-Naht

#### 7.2.3.1 Längszug

Für die letzte Variante mit einer Doppel-HY-Naht als Längsnaht – auch K-Naht genannt – ergibt sich unter Längszug wiederum der gleiche Sachverhalt wie schon zuvor (siehe Abbildung 79):

Die maximale Kerbspannung tritt im Nahtübergang des Abbinders auf.

Der HY-Abbinde (grün bzw. blau) hat eine größere Nahtformzahl als der Kehlnahtabbinde (rot)

Mit steigender Gurtdicke steigt die Nahtformzahl.

Die größere HY-Naht (gs) bewirkt eine größere Nahtformzahl, die sich für die Darstellung als FAT-Klassen für eine Gurtdicke von 20mm auswirkt.

Die FAT-Klasse des Kehlnahtabbinders (rot) beträgt bei relativ dünnem Gurtblech FAT71. Mit zunehmender Blechstärke reduziert sie sich jedoch auf FAT63. Der HY-Abbinde (grün) verhält sich ähnlich und verringert sich von anfänglich FAT63 auf FAT56 für die Modelle mit der größeren HY-Naht. (siehe Abbildung 80)

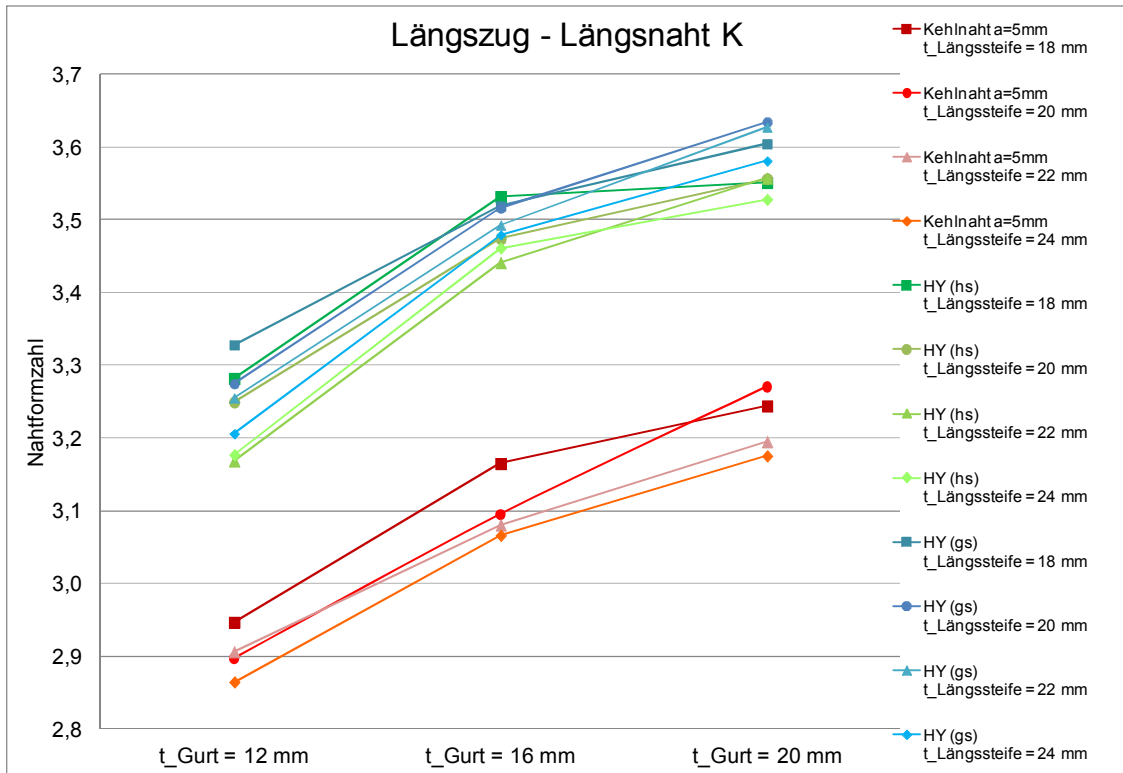


Abbildung 79 Nahtformzahl K-Naht Längszug

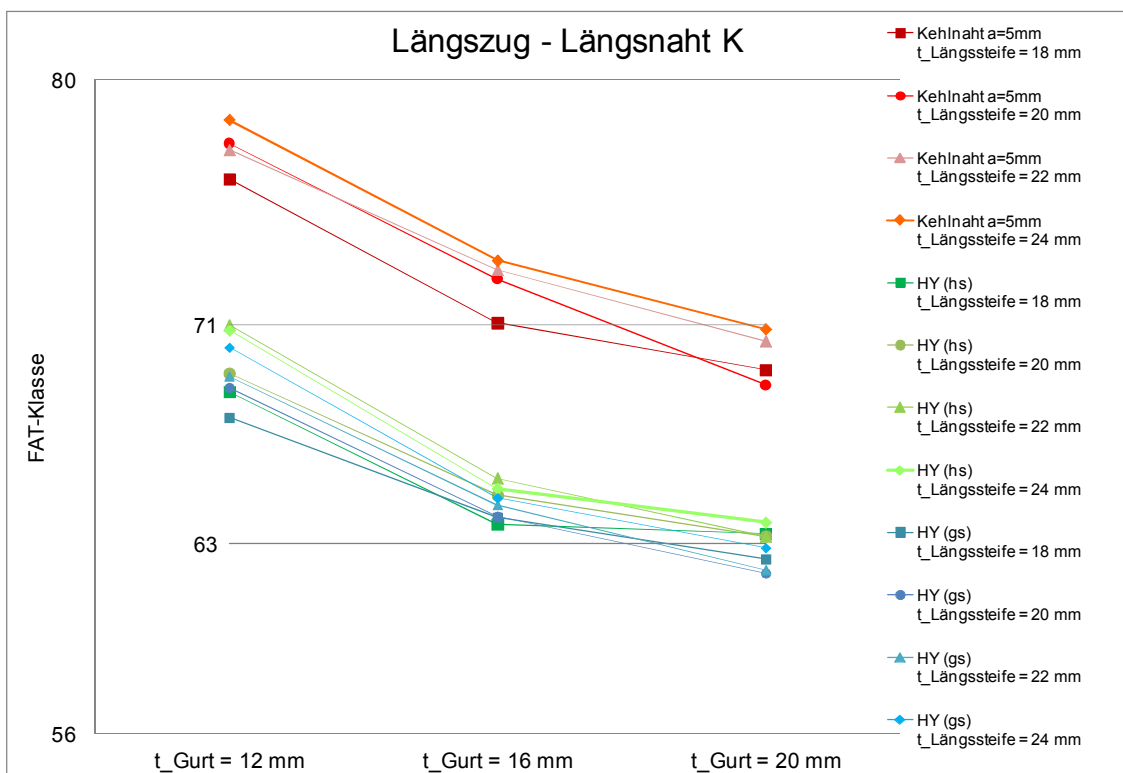


Abbildung 80 FAT-Klasse K-Naht Längszug



### 7.2.3.2 Querzug

Für den Querzug der Varianten der DHY-Längsnaht ergibt sich gewohntes Bild einer geringen Nahtformzahl für HY-Abbinder und höhere Werte für den Kehlnahtabbinder. Die Resultate (siehe Abbildung 81) sind verglichen mit den bisherigen Ergebnissen generell am Geringsten.

Da beide Längsnähte in Querzugrichtung den flachen Nahtanstiegswinkel von  $160^\circ$  haben, ist die Kraftumlenkung im Allgemeinen gering und es kommt für fast alle Modelle zu einem  $K_w < 3$ .

Zu bemerken ist jedoch, dass die maximale Kerbspannung für den Abbinder „HY (hs)“ (grün) in der Wurzel liegt. Bei genauerer Betrachtung und einem Vergleich der Kerbspannungen im Nahtübergang und in der Wurzel zeigt sich, dass der Unterschied zwischen 0-10% beträgt. Dies entspricht im konkreten Fall einem Unterschied von maximal einer FAT-Klasse. Die maximale Kerbspannung für den HY-Abbinder mit HY=ganze Stegblechdicke (gs) (blau) liegt jedoch schon wieder im Nahtübergang und nicht in der Wurzel. Die Nahtformzahl ist für diese Modelle am Geringsten und ergibt eine FAT-Klasse von 100.

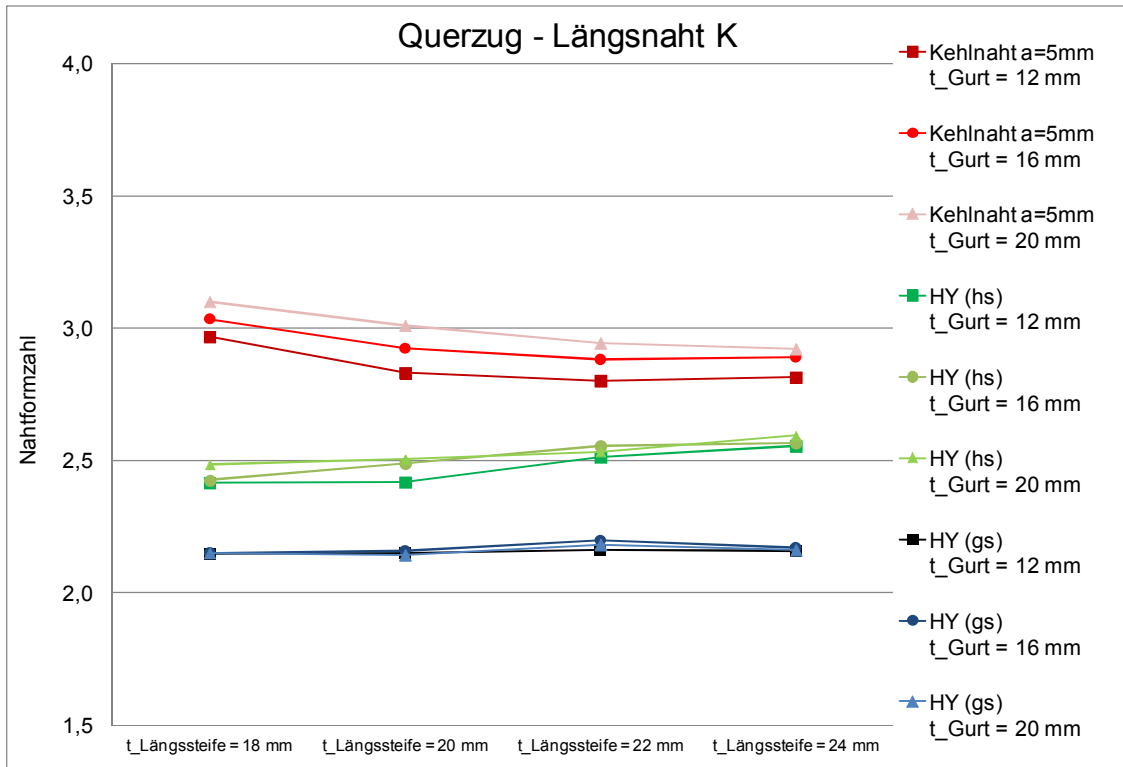


Abbildung 81 Nahtformzahl K-Naht Querzug

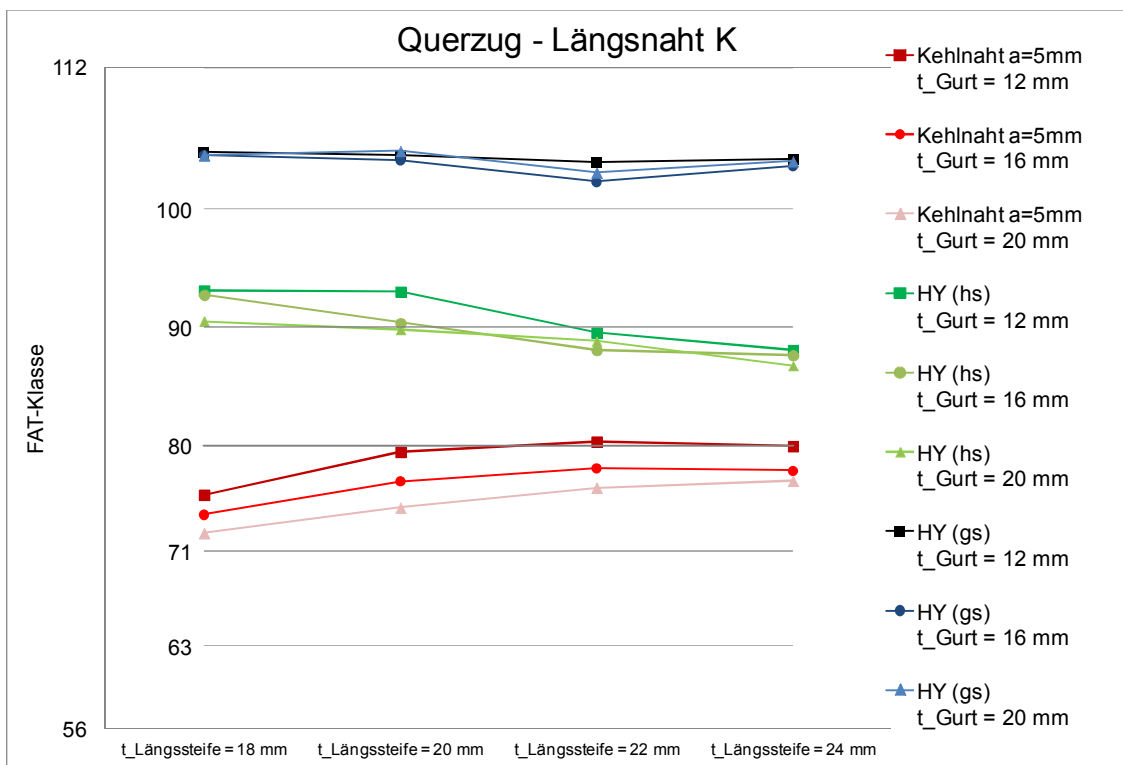


Abbildung 82 FAT-Klasse K-Naht Querzug

## 7.3 Einbausituation

Es folgt die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse für die unterschiedlichen Einbausituationen. Die Auswertung entspricht der bisherigen Vorgehensweise. Zunächst werden die einzelnen Spannungsplots kurz erläutert und anschließend die Nahtformzahl bzw. FAT-Klasse in einem gemeinsamen Diagramm dargestellt.

### 7.3.1 Mit Steg

Exemplarisch für alle Lösungen werden die Ergebnisse der Konfiguration „C1 mit 10mm Steg“ vorgestellt.

#### 7.3.1.1 Längszug

Unter Längszug stellt sich für dieses Modell das gewohnte Bild, der maximalen Kerbspannung im Nahtübergang des Abbinders, ein. (siehe Abbildung 83) Die Nahtformzahl wird in diesem Fall zu  $K_W=2,988$  und damit zu einer FAT-Klasse von 75. Im Sinne des Kerbfallkatalogs reduziert sie sich zu FAT71.

C1 mit 10mm Steg, Längszug,  
Spannung: Element-Knoten, gemittelt,  
max. Hauptnormalspannung

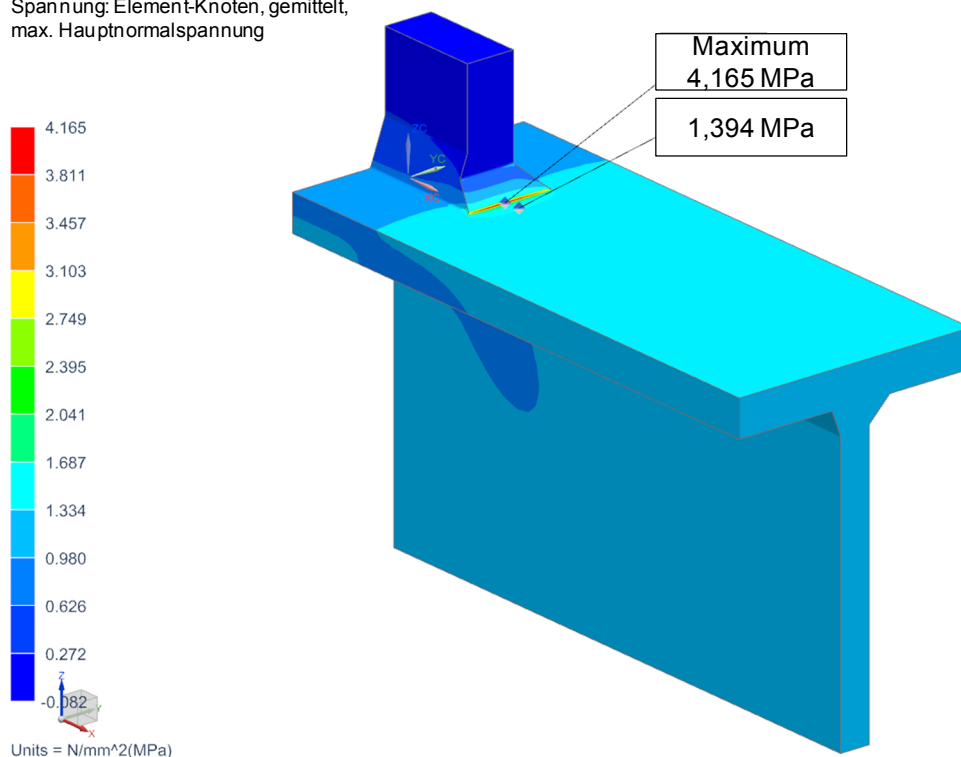


Abbildung 83 Simulationsergebnis Probe C1 mit 10mm Steg Längszug

7.3.1.2 Querzug

Unter Querzug tritt das Maximum der Kerbspannung für alle Varianten von „C1 mit Steg“ und „C4 mit Steg“ wieder in den gemeinsamen Ecken der Kehlnähte auf. (siehe Abbildung 85). Deshalb wird hier ebenfalls die Korrektur nach (34) vorgenommen.

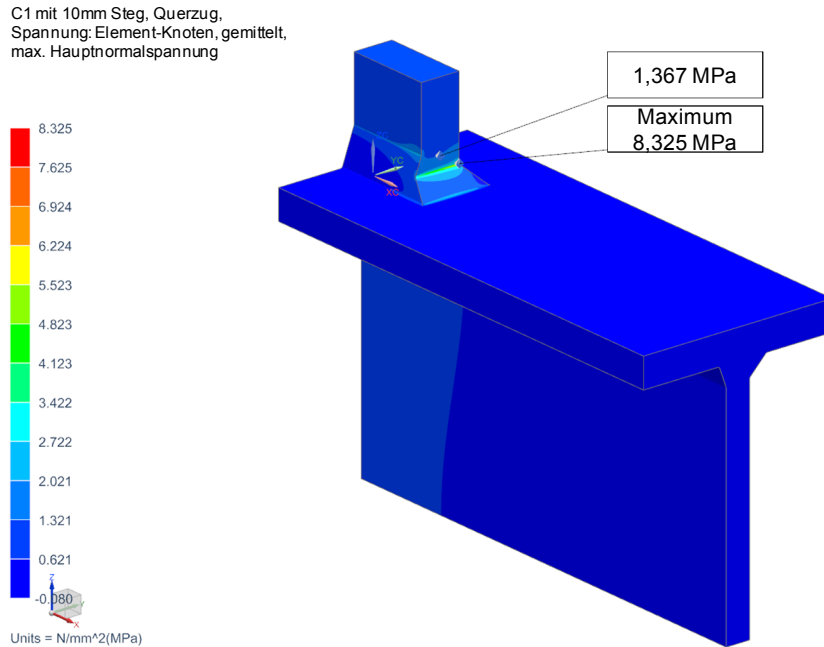


Abbildung 84 Simulationsergebnis Probe „C1 mit 10mm“ Steg Querzug

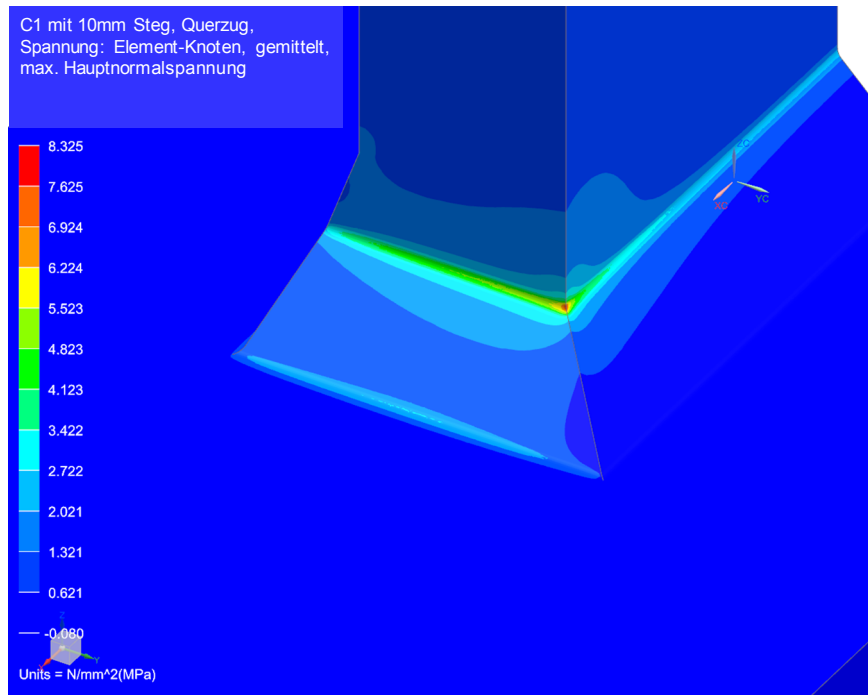


Abbildung 85 Simulationsergebnis Probe „C1 mit 10mm Steg“ Querzug Detailansicht

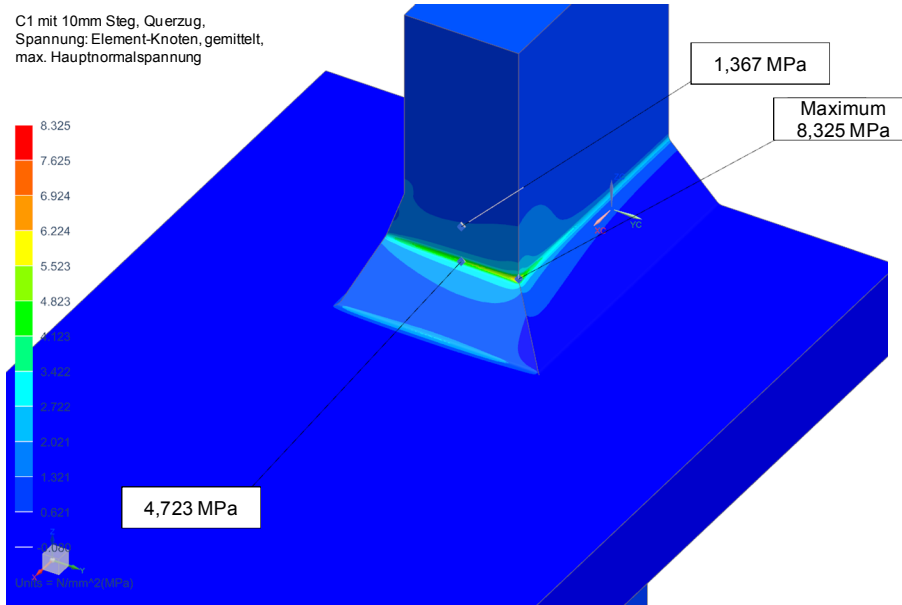


Abbildung 86 Simulationsergebnis Probe „C1 mit 10mm Steg“ Querkzug Spannung in Längssteifenmitte  
Detailansicht

In Tabelle 15 sind die Zwischenergebnisse für die Reduktion der maximalen Kerbspannung aufgelistet. Einheitlich für alle Varianten ist, dass das Maximum nicht mehr in der Ecke der Abbindenähte, sondern im Nahtübergang in der Mitte des Stegbleches zu finden. Diese Spannungswerte sind für die weiteren Auswertungen verwendet worden.

Modell + Stegbreite	Ecke						Naht-übergang
	$\sigma_{e,a}$ [MPa]	80% $\sigma_{e,a}$ [MPa]	$\rho$ [mm]	$\rho_{ref}$ [mm]	$\sigma_{e,a}^*$ [MPa]		$\sigma$ [MPa]
C1 6mm	9,396	7,517	0,435	70	5,106	<	5,544
C1 10mm	8,325	6,660	0,431	70	4,520	<	4,723
C1 20mm	7,473	5,978	0,428	70	4,053	<	4,071
C4 6mm	9,515	7,612	0,415	70	5,143	<	5,791
C4 10mm	8,596	6,877	0,415	70	4,645	<	5,152
C4 20mm	7,635	6,108	0,414	70	4,125	<	4,454

Tabelle 15 Reduktion der maximalen Kerbspannung für „C1 mit Steg“ und „C4 mit Steg“

### 7.3.2 Ohne Steg – einseitige Längssteife

Die abschließende Variante wurde gleich ausgewertet wie die bisherigen Modelle. Wie in Abbildung 87 gut zu sehen ist, tritt aufgrund des zusätzlich aufgebrachten Biegemoments kein Biegegradient im Abbindebereich auf. Die maximale Kerbspannung befindet sich, wie üblich unter Längszug, wieder in der Nahtübergangskerbe.

C1 ohne Steg, Längszug,  
Spannung: Element-Knoten, gemittelt,  
max. Hauptnormalspannung

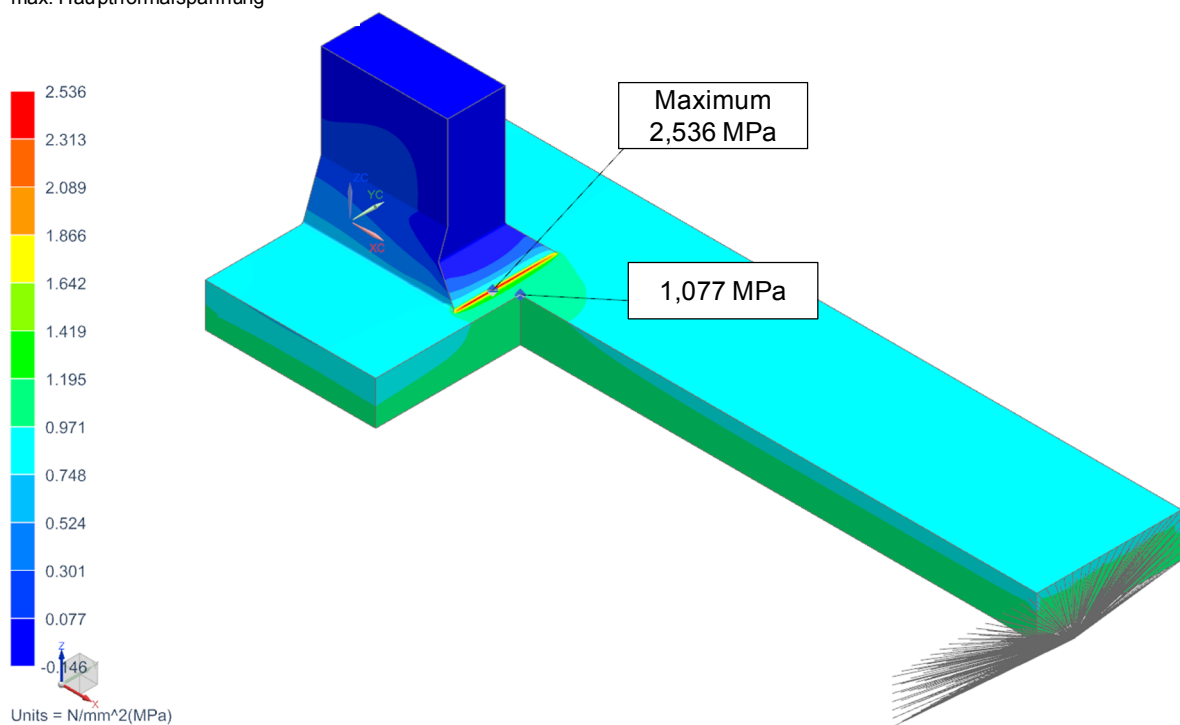


Abbildung 87 Simulationsergebnis Probe C1 ohne Steg Längszug Detail „biegefrei“

Für eine einfachere Gegenüberstellung beinhalten die Diagramme für Nahtformzahl und FAT-Klasse nicht nur die Ergebnisse der Modelle mit und ohne Steg, sondern auch die bekannten Resultate der symmetrischen Längssteife. Die Ergebnisse sind nach der Bauform sortiert und einheitlich nach ihrer Probenbezeichnung eingefärbt.

Längszug:

Abbildung 88 zeigt, wie unter Längszug die Nahtformzahl  $K_w$  mit zunehmender Stegblechdicke höher und dadurch die FAT-Klasse (siehe Abbildung 89) geringer wird. Die Variante ohne Steg ergibt für Längszug eine einheitliche Bauteilklasse von FAT90.

Längszug	FAT Probe	FAT Ohne Steg	FAT 6mm Steg	FAT 10mm Steg	FAT 20mm Steg
C1 YB-EF	77	96	78	75	73
C2 YB-EY	69	97	75	71	68
C4 FD-EF	75	93	78	76	74
C7 YD-EY	69	96	76	73	69

Tabelle 16 Zusammenfassung FAT-Klasse Einbausituation Längszug

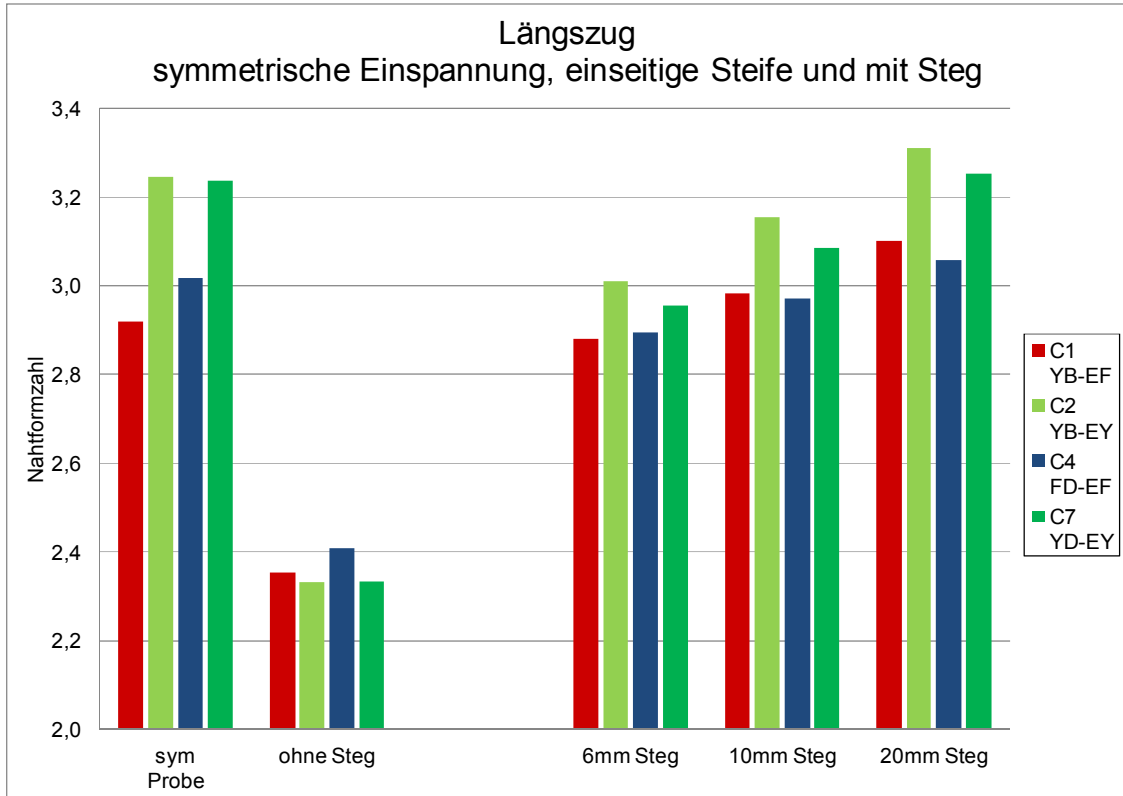


Abbildung 88 Nahtformzahl Einbausituation Längszug

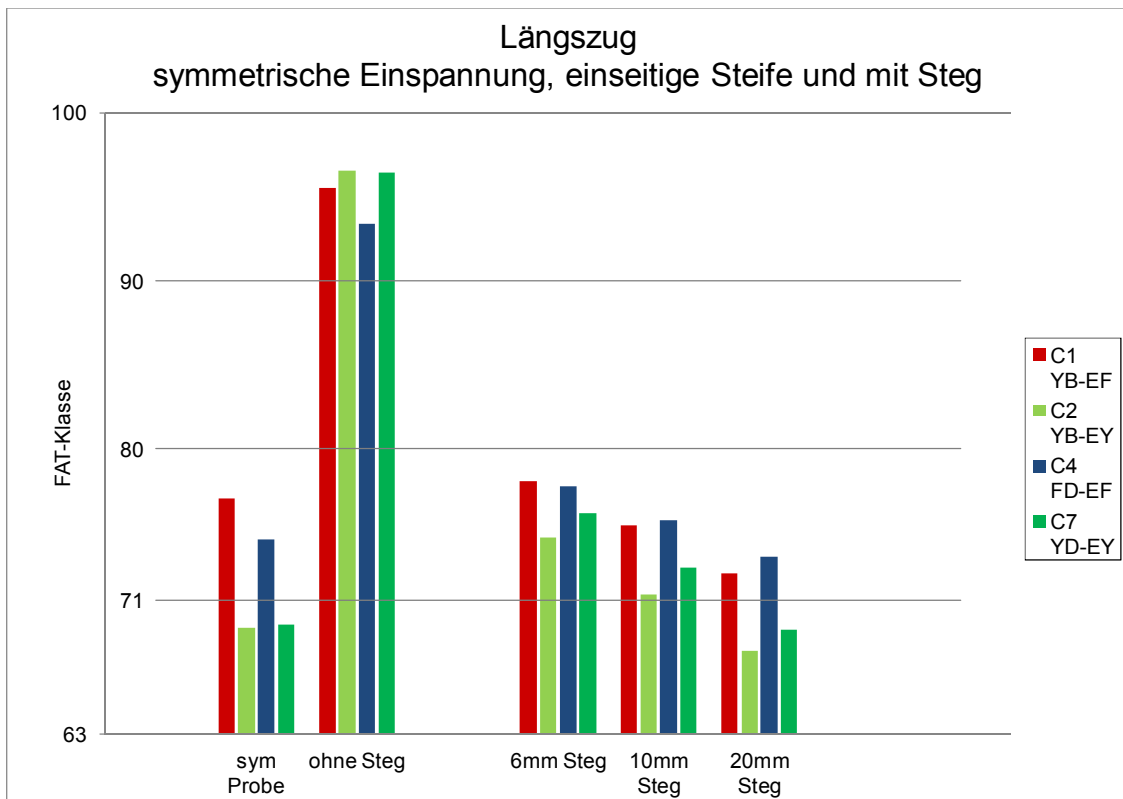


Abbildung 89 FAT-Klasse Einbausituation Längszug



Querzug:

Wie in Abbildung 90 zu sehen ist, stellt sich unter Querzug eine relativ hohe Nahtformzahl  $K_w$  für die Proben mit Steg ein. Mit zunehmender Blechstärke des Stegs sinkt die Nahtformzahl bzw. steigt die FAT-Klasse. (siehe Abbildung 91)

Während die maximale Kerbspannung für die Proben C4 noch in der Längsnaht in Nähe des Abbinders lag, ist sie für die Proben mit Steg im Nahtübergangsbereich des HY-Abbinders.

Querzug	FAT Probe	FAT 6mm Steg	FAT 10mm Steg	FAT 20mm Steg
C1 YB-EF	80	61	65	68
C2 YB-EY	67	57	58	58
C4 FD-EF	75	60	63	68
C7 YD-EY	89	51	59	71

Tabelle 17 Zusammenfassung FAT-Klasse Einbausituation Querzug

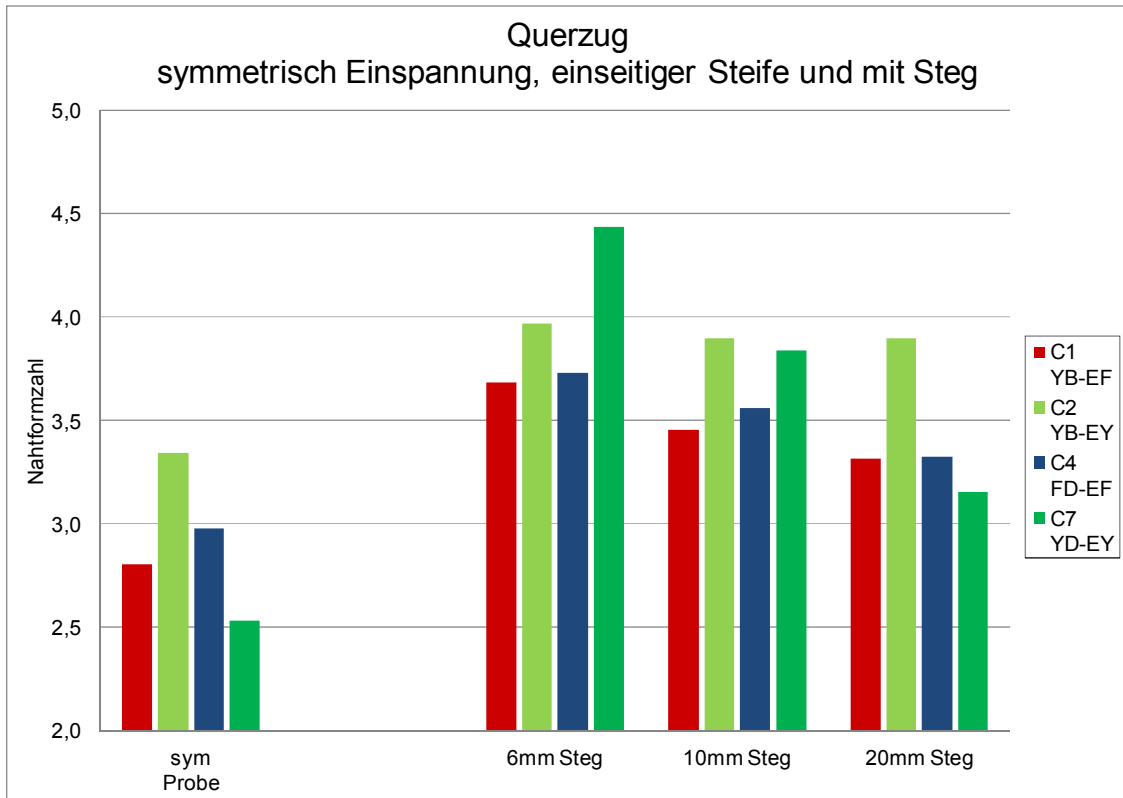


Abbildung 90 Nahtformzahl Einbausituation Querzug

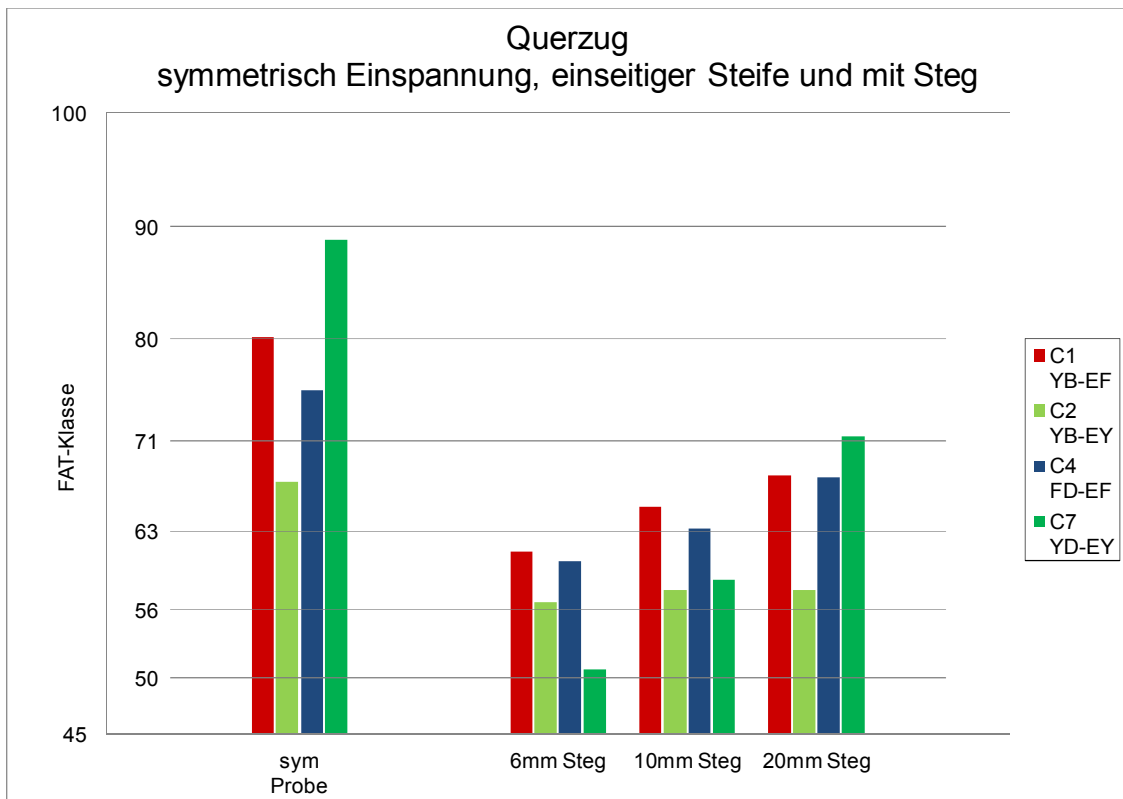


Abbildung 91 FAT-Klasse Einbausituation Querzug

## 7.4 Nachbehandlung

Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden in den folgenden Diagrammen wiederum als Nahtformzahl  $K_w$  bzw. FAT-Klasse geführt. Der Konturradius wird auf der Abszisse aufgetragen und bedeutet im Nullpunkt, dass die Längssteife nicht bearbeitet wurde, sondern lediglich je nach Versuchsreihe der Nahtübergangsradius angepasst ist.

Die Simulation der Probenform „C7 mit Vollanschluss“ ergab – unter Längszug und ohne nachträgliches Bearbeiten – im Prinzip die gleiche Nahtformzahl wie für jene mit offener Wurzel. (siehe Tabelle 18) In Abbildung 92 wird das Ergebnis als „Kerbradius 1mm“ (violett) angeführt und dient als Bezugswert um das Verbesserungspotential zu verdeutlichen.

C7	Original: Längsnaht DHY	Variante: Vollanschluss
Nahtformzahl $K_w$	3,238	3,224

Tabelle 18 Änderung der Nahtformzahl aufgrund Vollanschluss für bearbeitetes Ende

Die Nachbearbeitung mit einem Kugelfräser mit einem Durchmesser von 16mm (hellblau) senkt die Nahtformzahl beträchtlich. Ein weiteres Bearbeiten der Probe verbessert dieses Ergebnis nicht und wird deshalb nicht angeführt.

Die Modelle mit einem Reststeg (rot bzw. grün) zeigen, durch den geforderten größeren Nahtübergangsradius (3+1mm), eine Reduktion der Nahtformzahl auf  $K_w=2$ . Durch Bearbeiten kann die Nahtformzahl für beide Varianten zusätzlich gesenkt werden, bis die Ergebnisse konvergieren und keine weiteren Verbesserungen erzielt werden können.

Den positivsten Effekt auf die Nahtformzahl hat die Versuchsreihe „blecheben“ (blau). Da die Kerbe für diese Variante gänzlich „verschliffen“ wird, ist die Kraftumlenkung mit zunehmenden Konturradius derart gering, dass die Nahtformzahl gegen  $K_w=1,1$  konvergiert.

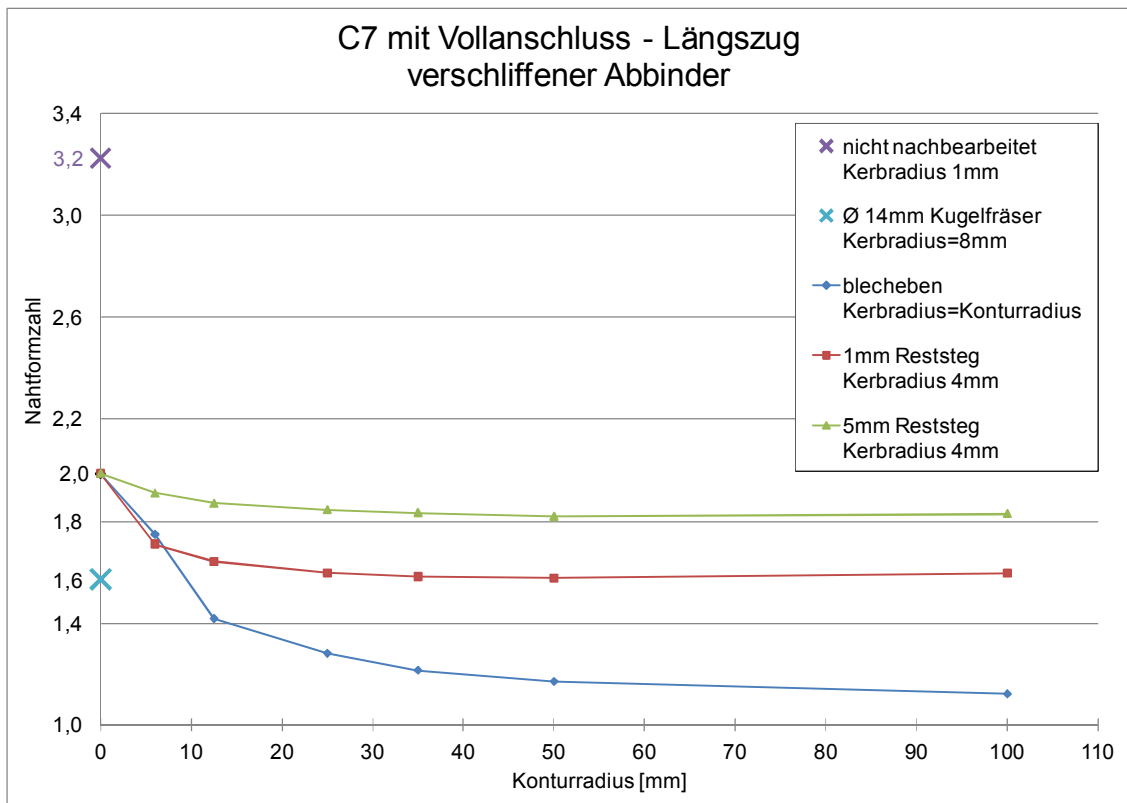


Abbildung 92 Nahtformzahl Nahtnachbehandlung Abbindenahnt Längszug

Durch den größeren Nahtübergangsradius entsteht eine milde Kerbe mit wenig Kerbwirkung. Das Kerbspannungskonzept setzt für seine Gültigkeit jedoch ein Mindestmaß dieser Kerbwirkung am Nachweisort voraus. Bei einem Referenzradius von  $r_{ref}=1\text{mm}$  und FAT225 beträgt der Mindestwert des Nahtformfaktors  $K_W=1,6$ . Wird dieser Wert unterschritten, muss entweder die verwendete Spannung für den Festigkeitsnachweis erhöht oder der Referenzradius und damit die FAT-Klasse nach Abbildung 93 geändert werden.

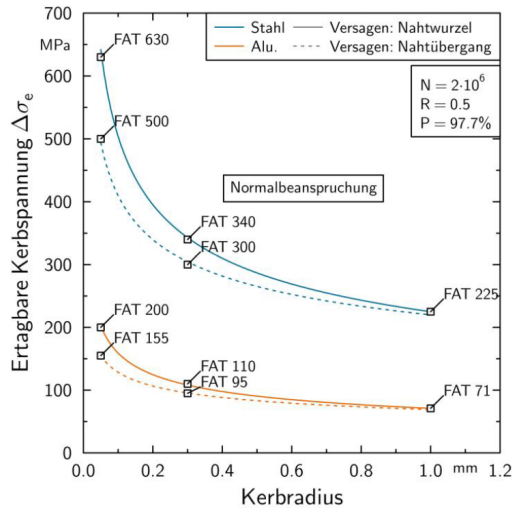


Abbildung 93 Bezugswerte der FAT-Klassen für den Kerbspannungsnachweis mit Normalspannungen von Schweißverbindungen aus Stahl und Aluminiumlegierungen (13)

Dieses Konzept der Beziehung zwischen Referenzradius und FAT-Klasse wird aufgegriffen und führt, unter Berücksichtigung von Tabelle 19, zu folgendem Vorschlag.

Kerbradius [mm]	FAT-Klasse bei Normalspannung [MPa]
0,05	500
0,3	300
1	225

Tabelle 19 FAT-Klasse für Kerbspannungsnachweis mit Normalspannung von Schweißverbindungen aus Stahl mit maximaler Beanspruchung im Nahtübergang (13)

Für geschliffene Stumpfstoßverbindungen beträgt die FAT-Klasse FAT112. Unter der Annahme von Biegespannungen, infolge von Verformungen in der Höhe von ca. 15-30%, ergibt sich für eine geschliffene Stumpfstoßverbindung ohne Versatz eine FAT140. (13)

Die gültigen Bezugswerte (dunkelblau) aus (13) werden so extrapoliert (hellblau), dass sie bei unendlich großem Radius die FAT140 (grau) als Bezugs-FAT-Klasse erreichen. (siehe Abbildung 94) Als neue Referenzwerte für Radien  $r_{ref} > 1\text{mm}$  werden die Zwischenergebnisse in 5er-Schritten (schwarz) abgerundet und in Tabelle 20 aufgelistet.

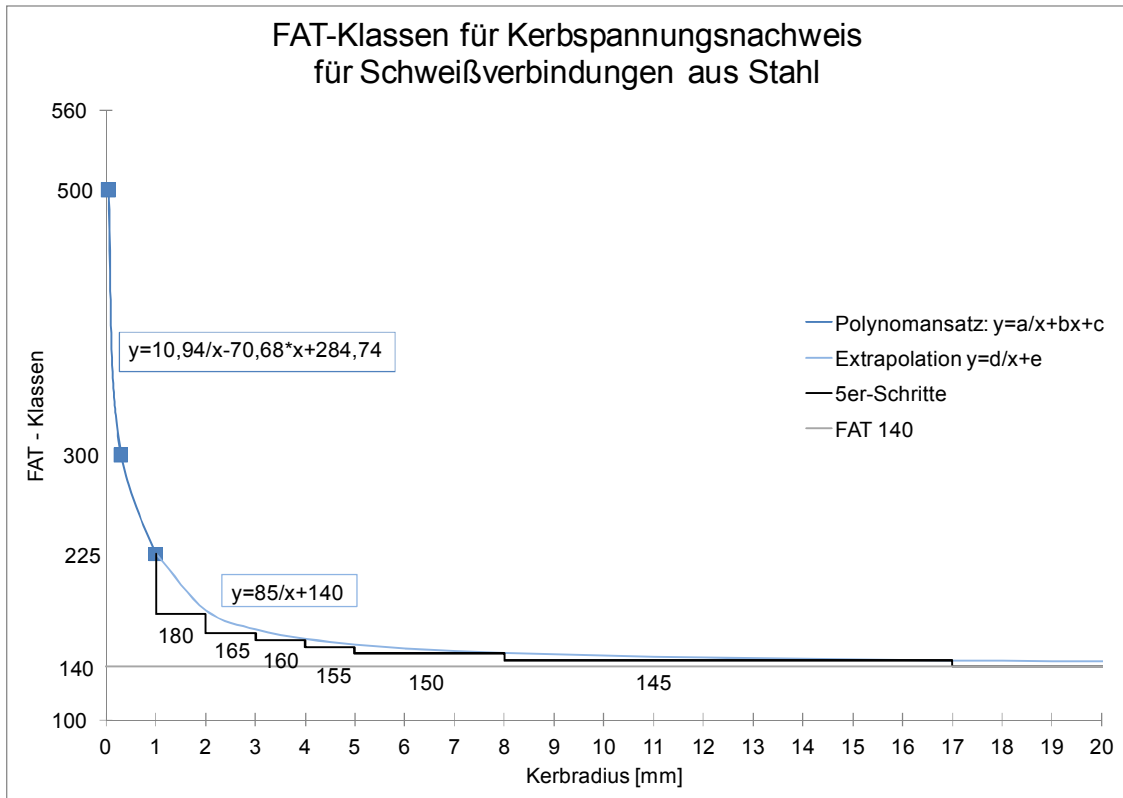


Abbildung 94 Vorschlag Referenz-FAT-Klassen bei Referenzradius  $r_{ref} > 1\text{mm}$

Kerbradius in mm	FAT
0,05	500
0,3	300
1	225
2	180
3	165
4	160
5	155
$5 < x \leq 8$	150
$8 < x \leq 17$	145
$> 17$	140

Tabelle 20 Vorschlag Referenz-FAT-Klassen bei Nahtformzahlen  $r_{ref} > 1\text{mm}$

Für die Berechnung der FAT-Klassen wird, anstelle der FAT225, die neue Bezugs-FAT-Klasse je nach Übergangsradius verwendet. (siehe Abbildung 95) Das bedeutet für die Modelle mit Reststeg und einem Kerbradius von 4mm eine neue Bezugs-FAT-Klasse von FAT160, für das Modell „Kugelfräser“ eine FAT150 und für die blechebenen Modelle siehe Tabelle 20.

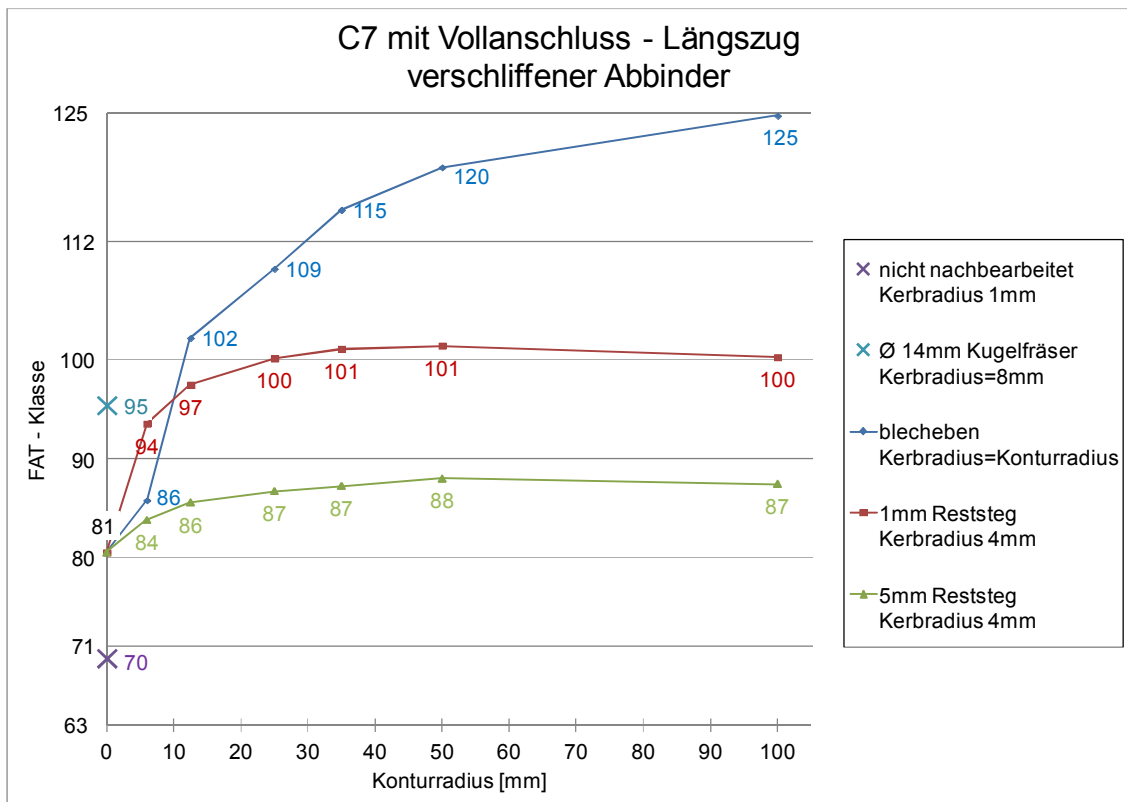


Abbildung 95 FAT-Klasse Nachbearbeitung der Abbindenahrt Längszug

## 7.5 Realer Abbinder

Der Riss trat wie in Kapitel 5 besprochen bei einem Kerbradius von 3,62mm und einem Nahtanstiegswinkel von  $123,34^\circ$  auf. Wie in Abbildung 96 zu sehen, liegt die Nahtformzahl für die gerissene Geometrie (rot) bei ca.  $K_W=2,29$ . Durch Vergrößern des Kerbradius auf 4mm bzw. 5mm kann dieser Wert auf 2,18 bzw. 2,05 reduziert werden. Bei zusätzlichen Verflachen des Nahtanstiegswinkels kann die Nahtformzahl im günstigsten Fall sogar auf  $K_W < 1,9$  verringert werden. Die Erkenntnisse dieser Arbeit wurden für das laufende Projekt übernommen und führten dazu, dass die Abbinder wie in Abbildung 97 gefertigt werden.

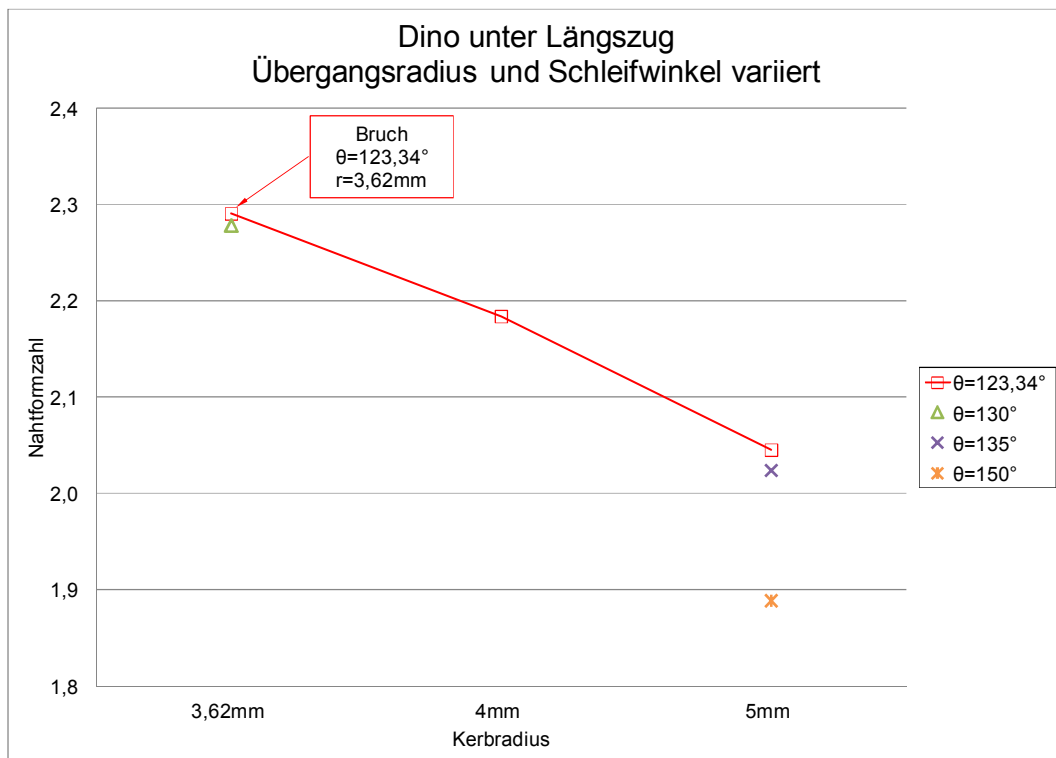


Abbildung 96 Nahtformzahl realer Abbinder Dino unter Längszug

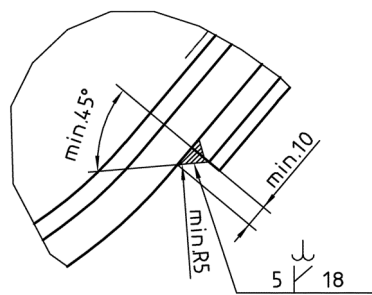


Abbildung 97 Fertigungszeichnung Detailansicht Abbinder neue Geometrie



## 7.6 Schalenmodelle

Die Simulationsergebnisse werden wiederum als maximale Hauptnormalspannungen an den Element-Knoten ausgegeben. Für den Spannungsplot werden auf beiden Seiten der Schale (oben und unten) die jeweiligen Ergebnisse dargestellt – wegen der Biegefreiheit treten für beide Schalenseiten die gleichen Spannungswerte auf. Die Knotenspannungen werden innerhalb des jeweiligen Bleches gemittelt.

Da die Schalenmodelle keine Schweißnaht und damit Kerbe berücksichtigen, wird nicht länger der Nahtformfaktor, sondern die Strukturspannung dokumentiert. Auf der Abszisse wird die Längskoordinate  $x$  aufgetragen. Im Ursprung ( $x=0$ ) tritt in der Längssteife eine Spannungserhöhung auf. (siehe Abbildung 98)

Schale C1 bzw. C2, Längszug,  
Spannung: Element-Knoten, gemittelt,  
max. Hauptnormalspannung  
oben und unten

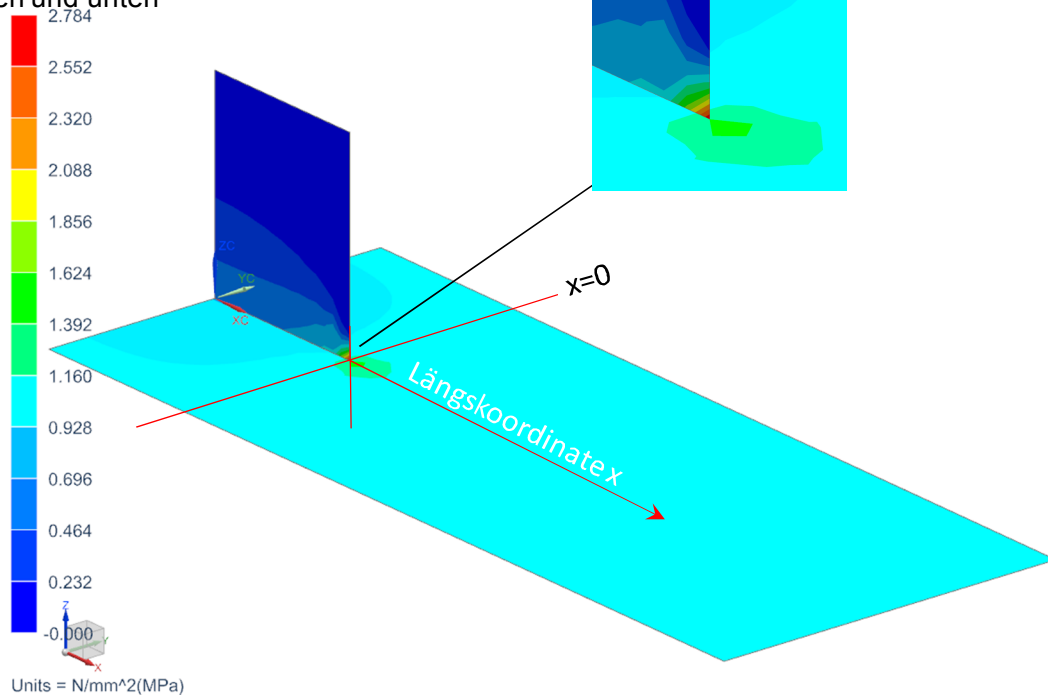


Abbildung 98 Simulationsergebnis Schale Probe C1 bzw. C2 Längszug

Für die Auswertung wird die Spannung in der Mitte des Gurtbleches für alle Knoten von  $x=0$  bis zum Ende des Gurts ausgegeben.

- Netzstudie

Die Spannung im Gurt wird für alle Netztypen und Größen in Abbildung 99 dargestellt. Zusätzlich wird die Strukturspannung für Probe C1 bzw. C2 aus Kapitel 7.1 am jeweiligen Auswertepunkt eingefügt.

Für die Wahl des geeigneten Netztyps und der Netzgröße sind 4 Punkte zu berücksichtigen:

1. Die Strukturspannung darf jene, aus den 3-dimensionalen Modellen keinesfalls unterschreiten → konservative Betrachtung
2. Es soll am Auswertepunkt ein Knoten vorhanden bzw. in der Nähe sein → Netz nicht zu groß wählen
3. Die Berechnung soll wirtschaftlich durchgeführt werden → Netz nicht zu fein wählen
4. Die Strukturspannung soll nicht innerhalb der ersten Elementreihe liegen

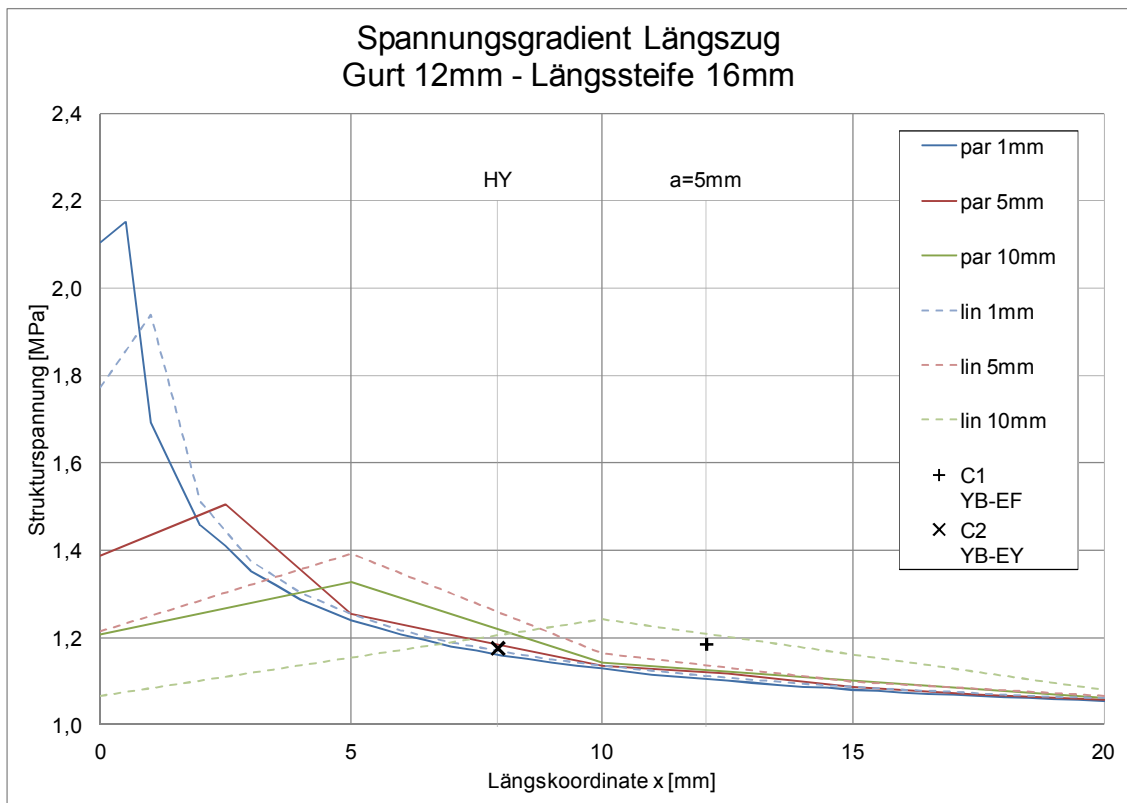


Abbildung 99 Netzstudie Schale Gurt 12mm Längssteife 16mm

Diese Forderungen erfüllt grundsätzlich das parabolische Schalenelement mit einer Netzgröße von 5mm (rot durchgezogen) in einem Abstand von  $x=5\text{mm}$ . In diesem Punkt beträgt der Unterschied zu den 3-dimensionalen Modellen ungefähr 6%. Alle weiteren Schalenmodelle werden deshalb mit parabolischen, vierseitigen Schalenelementen und einer Netzgröße von 5mm vernetzt.

- Proben

Um den optimalen Auswertepunkt für die Schalenmodelle bestimmen zu können, werden die Spannungsergebnisse der 4 Proben entlang der Längskoordinate  $x$  aufgetragen und mit den Strukturspannungen der 3D-Modelle verglichen. (siehe Abbildung 100)

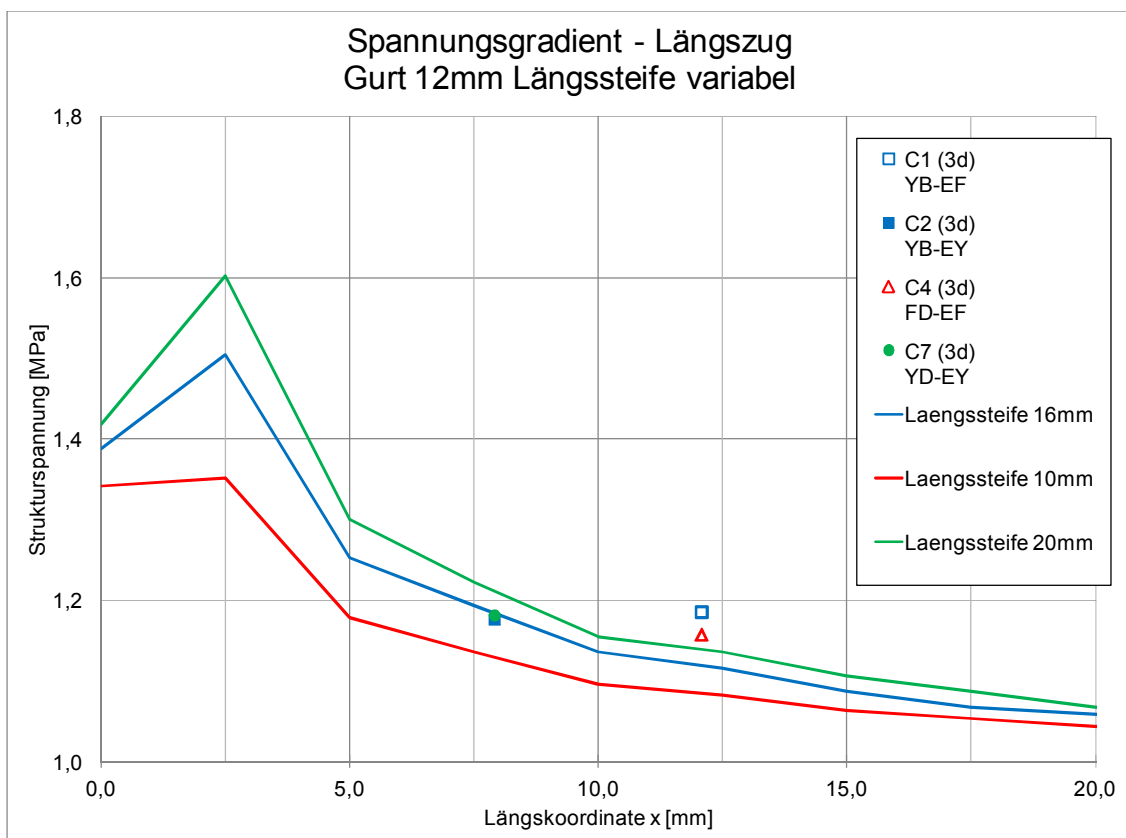


Abbildung 100 Spannungsgradient Schale und Strukturspannung 3D-Modell

Dabei zeigt sich, dass der relative Fehler in einem Abstand von  $x=7,5\text{mm}$ , also im 4. Knoten, prinzipiell am geringsten wäre. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Strukturspannung der Schale für eine konservative Bewertung nicht kleiner sein darf, als jene des 3D-Modells. (siehe Tabelle 21)

Es kann kein einheitlicher Referenzpunkt unabhängig von den Schweißnähten bestimmt werden, ohne eine große Abweichung in Kauf zu nehmen.

Für Schweißnahtkombinationen wie für C1, C2 und C7 empfiehlt sich für einen möglichst geringen Fehler der 4. Knoten, also bei  $x=7,5\text{mm}$  als Referenzpunkt. Bei Schweißnähten wie bei C4 sollte der Referenzpunkt innerhalb von 5mm liegen, da ansonsten eine zu geringe Strukturspannung verwendet werden würde.

Probe	Strukturspannung $\sigma_{hs}$ [MPa] 3D-Modell Referenzpunkt	$\sigma_{hs}$ [MPa] Schale $x=5\text{mm}$	Relativer Fehler	$\sigma_{hs}$ [MPa] Schale $x=7,5\text{mm}$	Relativer Fehler
C1 YB-EF	1,186	1,252	~6%	1,194	~1%
C2 YB-EY	1,177	1,252	~6%	1,194	~1%
C4 FD-EF	1,158	1,178	~2%	1,136	~ -2% $\sigma_{hs\_Schale} < \sigma_{hs\_3D}$
C7 YD-EY	1,182	1,301	~10%	1,223	~3%

Tabelle 21 Ergebnisse Strukturspannung Proben

- Varianten

Die Strukturspannungen aller Blechdicken-Variationen von Gurt und Längssteife, modelliert mit parabolischen Schalenelementen mit 5mm Elementkantenlänge, sind in Abbildung 101 (oben) für Längskoordinate  $x=5\text{mm}$  und in Abbildung 102 (oben) für Längskoordinate  $x=7,5\text{mm}$  dargestellt. Die Strukturspannung steigt dabei mit zunehmender Blechstärke der Längssteife, was auch prinzipiell in den Kerbspannungsmodellen beobachtet werden konnte. Mit zunehmender Blechdicke des Gurtes sinkt sie jedoch, was insofern interessant ist, da im 3D-Kerbspannungsmodell genau das Gegenteil der Fall ist. (siehe Abbildung 101 und Abbildung 102 unten) Der Fehler bewegt sich dabei zwischen +10% bei Längssteifen  $t < 12\text{mm}$  und -15% bei Längssteifen  $t > 16\text{mm}$ .

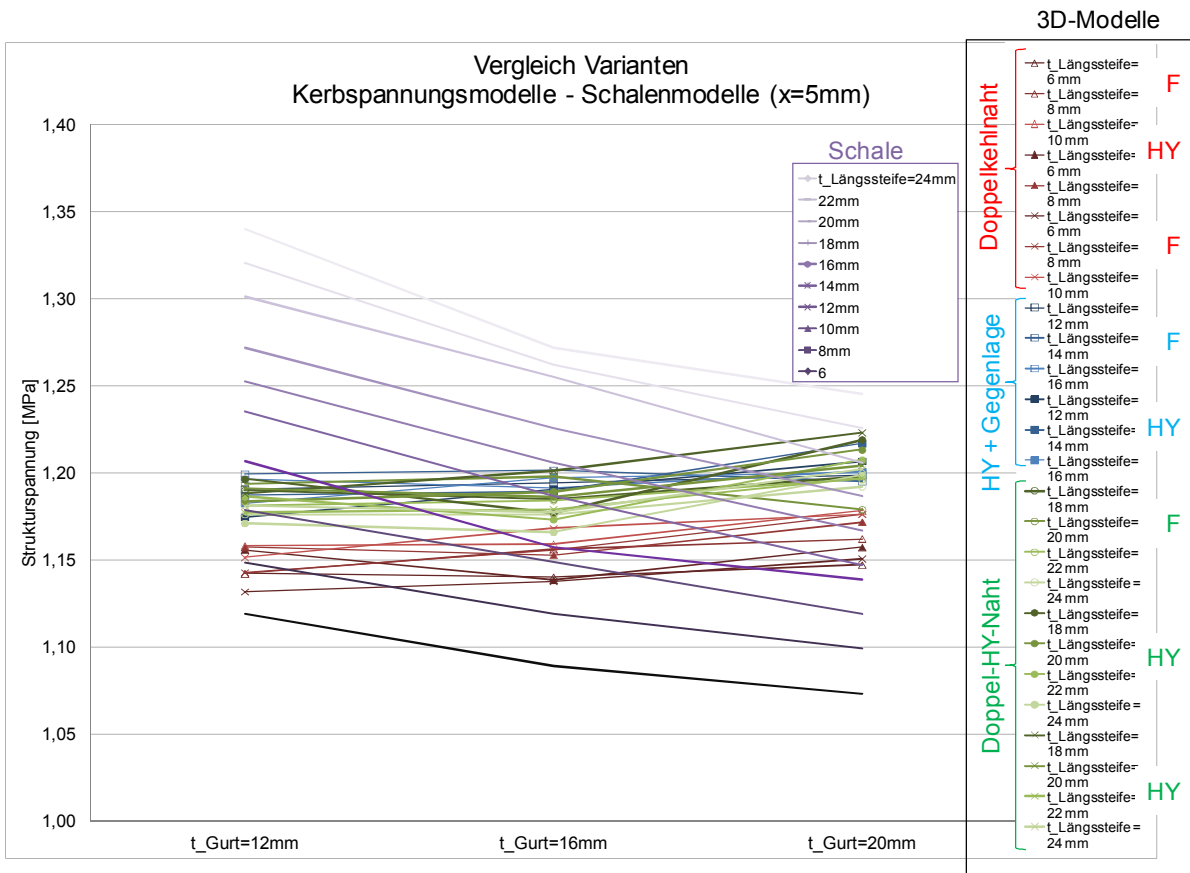
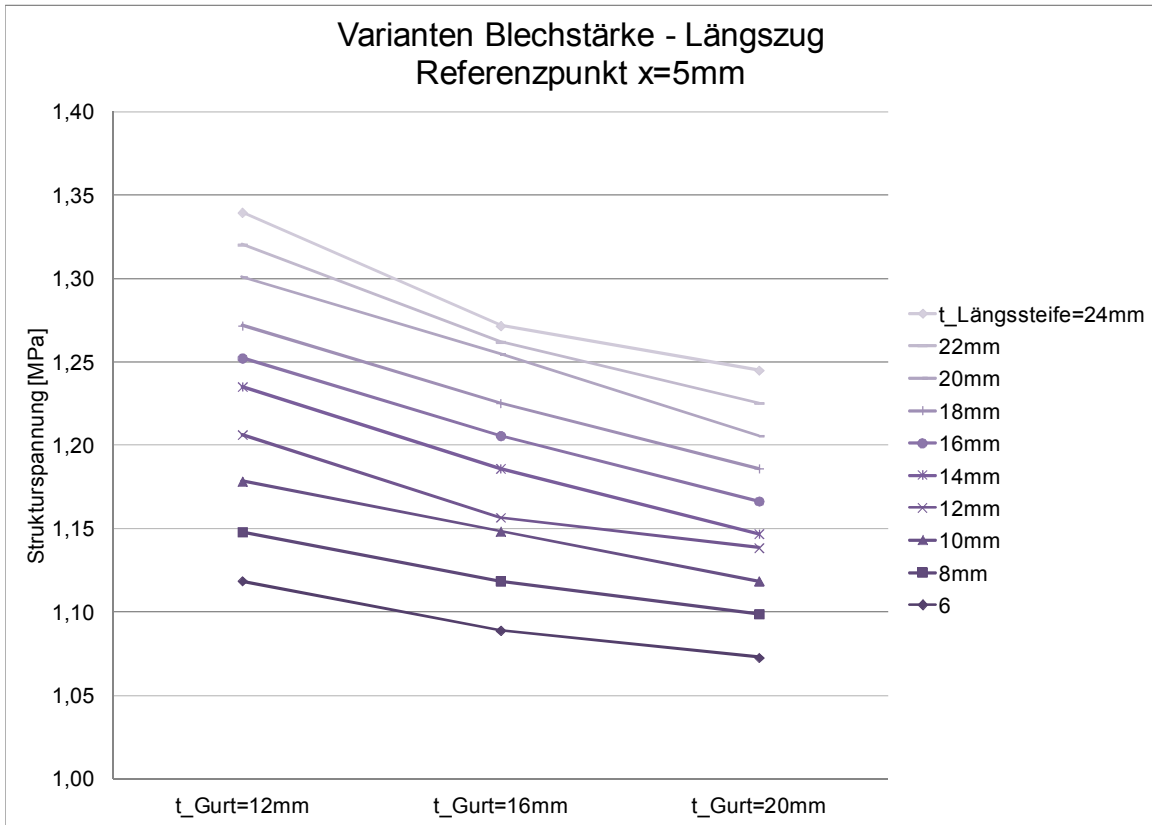


Abbildung 101 Strukturspannung Varianten x=5mm (oben), Vergleich 3D-Schale (unten)

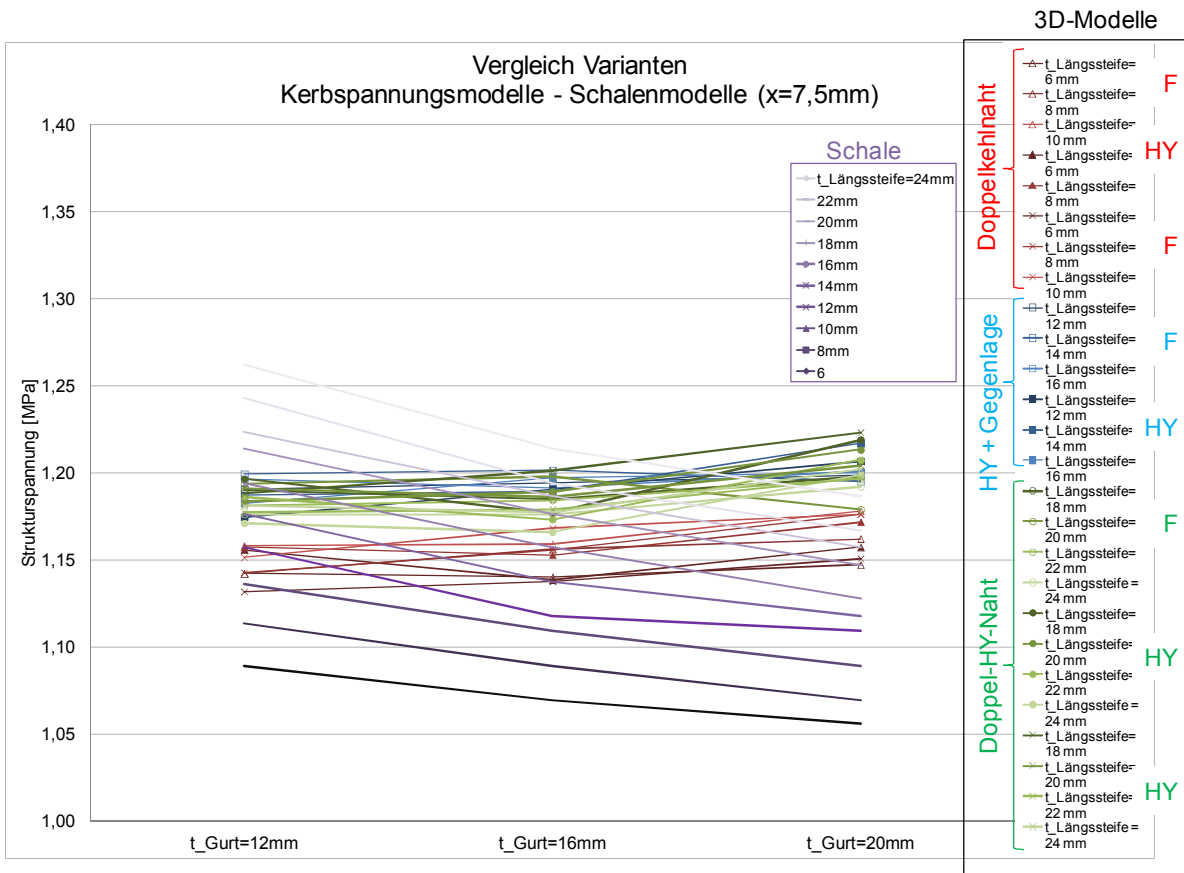
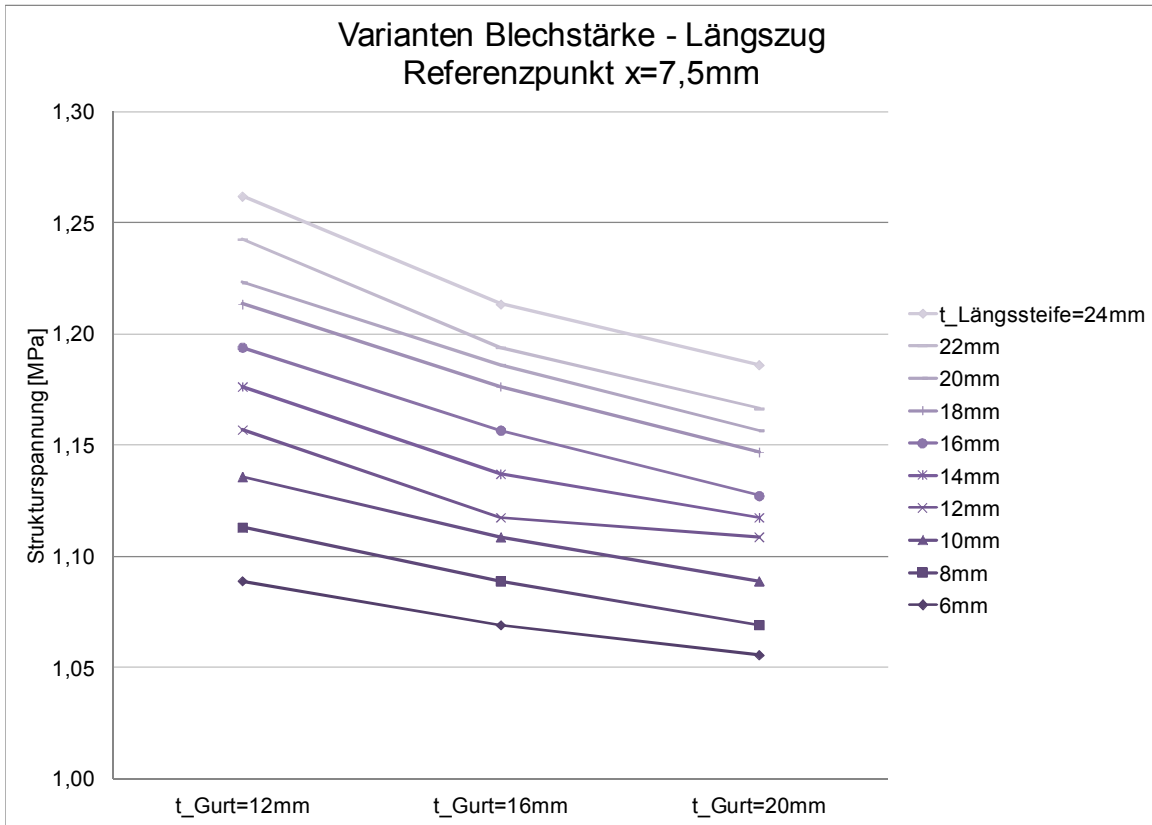


Abbildung 102 Strukturspannung Varianten x=7,5mm (oben), Vergleich 3D-Schale (unten)

- Einbausituation

Für die Netzstudie der Geometrie der Proben C1 bzw. C2 mit durchgehendem Steg ergibt sich kein „optimaler“ Referenzpunkt entlang der Längskoordinate x, da kein Spannungswert innerhalb der ersten Elementreihe und keine Elementkantenlänge von weniger als 5mm verwendet werden soll.

Keine der verwendbaren Knotenspannungen des Schalenmodells erreicht die Strukturspannung aus dem Kerbspannungsmodell. Der Fehler in dem DMS-Auswertestellen beträgt bis zu -20%

In den vorgeschlagenen Abständen von  $x=5\text{mm}$  bzw.  $x=7,5\text{mm}$  liegt der Fehler zum parabolischen, 5mm-großen Schalenelement immerhin nur noch bei -7% bzw. -12%.

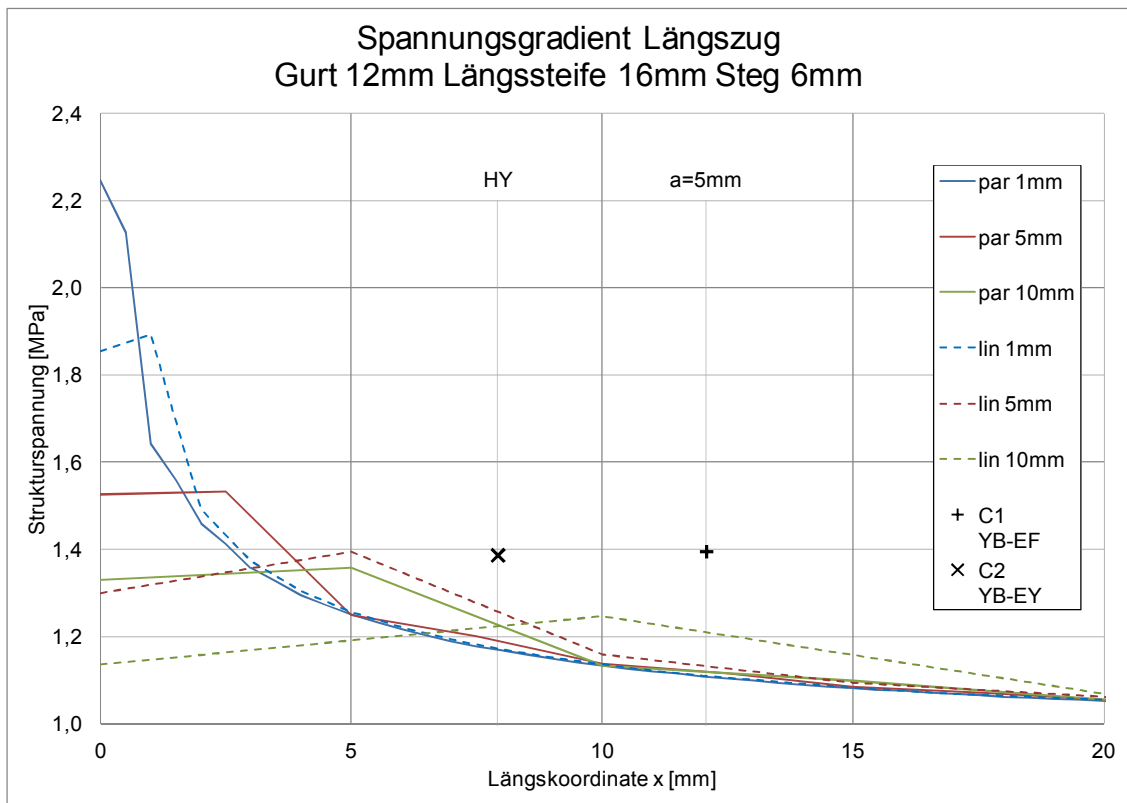


Abbildung 103 Netzstudie Schale Gurt 12mm Längssteife 16mm Steg 6mm

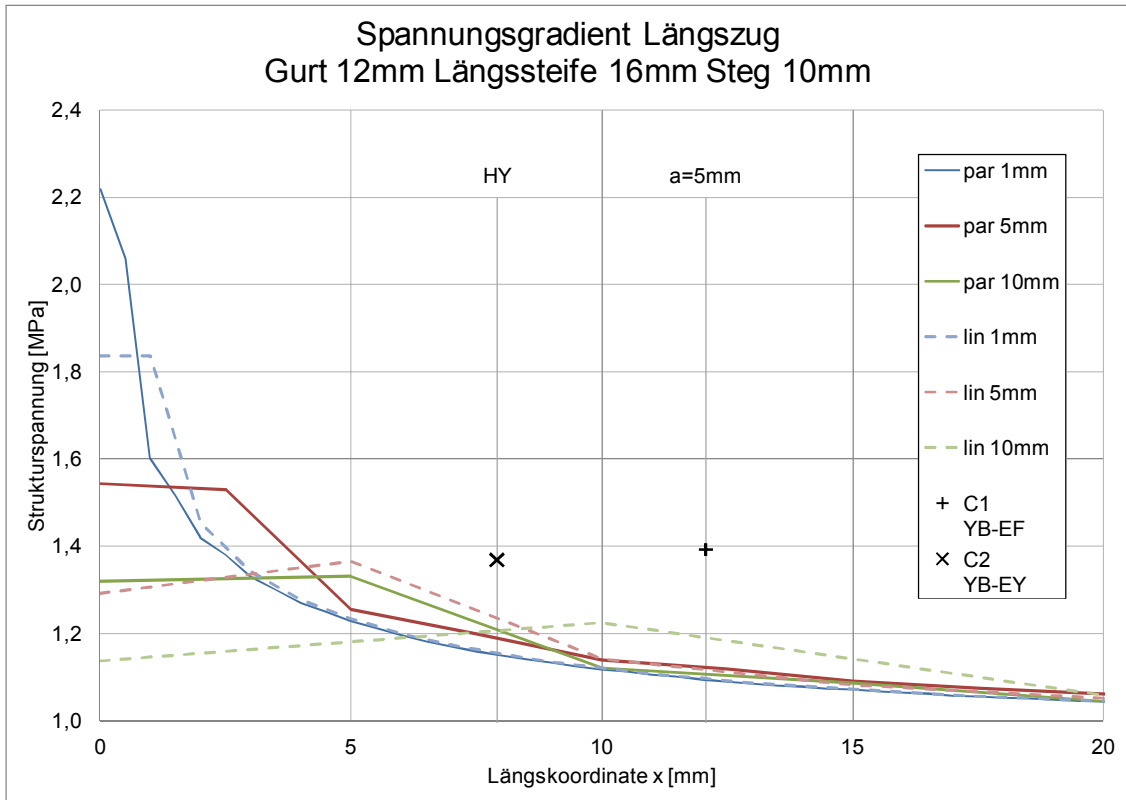


Abbildung 104 Netzstudie Schale Gurt 12mm Längssteife 16mm Steg 10mm

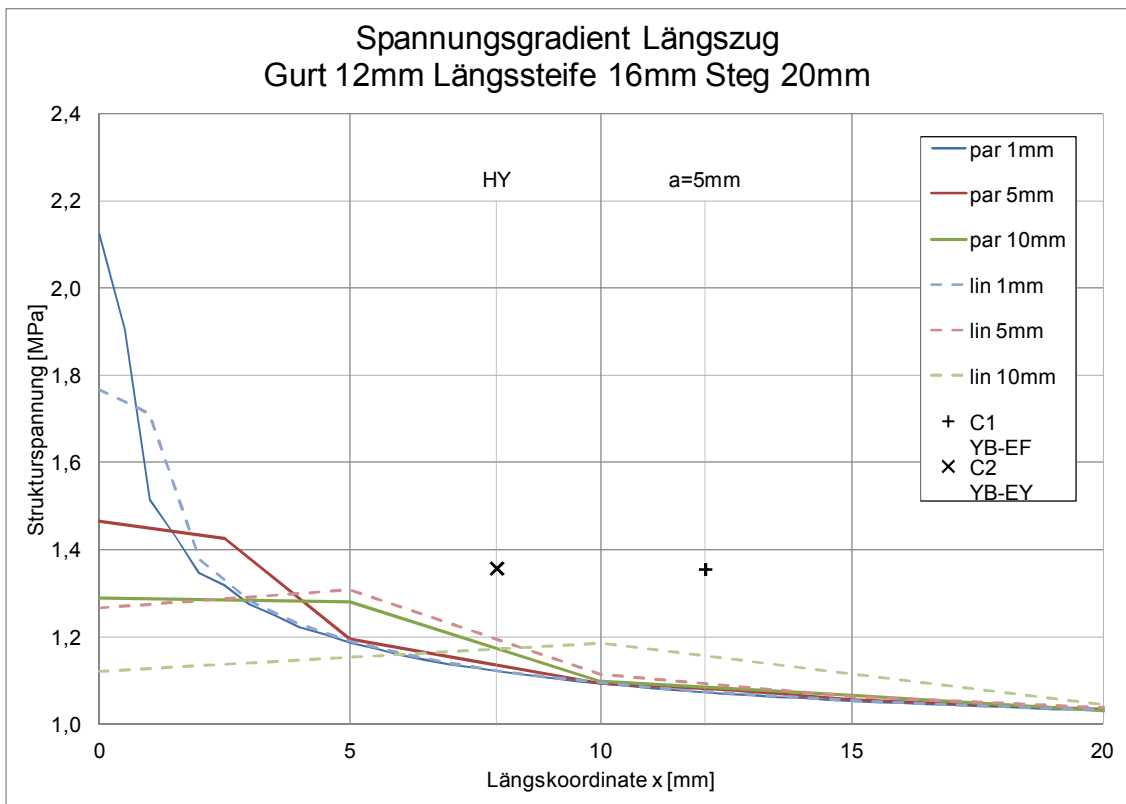


Abbildung 105 Netzstudie Schale Gurt 12mm Längssteife 16mm Steg 20mm



- Auswirkung auf aktuelle Bewertungsmethodik

Die aktuelle Bewertungsmethode mit Hilfe der Software „Fatigue-Assessment“ berücksichtigt die tatsächliche Geometrie der Abbindenaht nicht. (siehe Abbildung 107) Stattdessen wird von der Blechdicke der Längssteife ausgehend, ein Viertelbogen (gelb) „abgeschlagen“ und an jedem Schnittpunkt mit dem Netz ein Spannungswert auf Basis der angrenzenden Knotenspannungen interpoliert. Dieser dient als Strukturspannung mit der jeweiligen FAT-Klasse zur Bewertung.

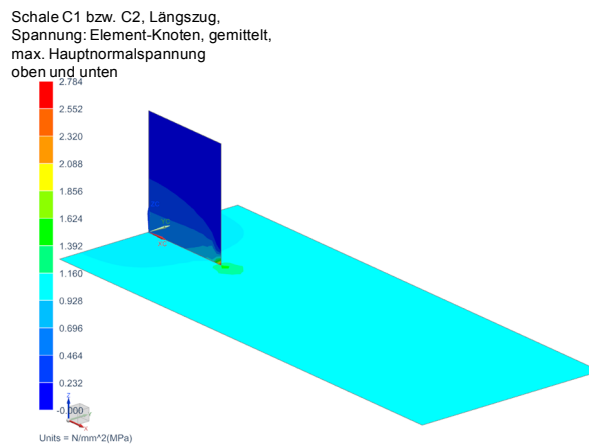


Abbildung 106 Simulationsergebnis Schale Probe C1 bzw. C2 Längszug

In Abbildung 107 ist die Methode schematisch für die symmetrische Längssteife C1 bzw. C2 (siehe Abbildung 106) dargestellt. Das Modell wurde wiederum mit parabolischen Schalenelementen mit einer Kantenlänge von 5mm vernetzt. Die aktuell verwendeten Spannungen (gelber Viertelbogen) liegen um ungefähr 10-17% unter der Strukturspannung aus dem Kerbspannungsmodell (C1  $\sigma_{hs}=1,186\text{MPa}$  und für C2  $\sigma_{hs}=1,177\text{MPa}$ ). Die Strukturspannung in den neuen Referenzpunkten (grüner Rahmen) bei Längskoordinate  $x=5\text{mm}$  und  $x=7,5\text{mm}$  würden diesen Fehler auf 6% bzw. 1% drücken und zusätzlich eine konservative Bewertung ergeben.

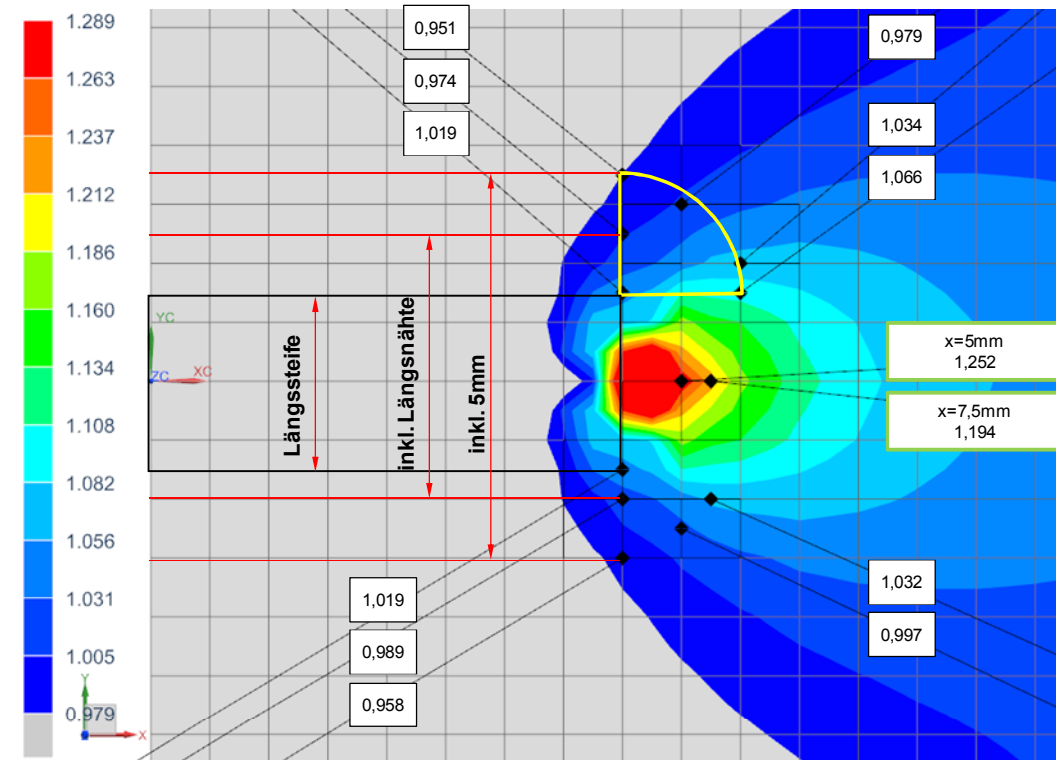


Abbildung 107 Schema Spannungsbewertung Probe C1 bzw. C2

Für die Proben mit Steg (siehe Abbildung 108) liegt der Fehler zwischen aktueller Bewertungsmethode und Strukturspannung des Kerbspannungsmodells noch höher. Exemplarisch wird hier das Modell C1 bzw. C2 mit 10mm Steg gezeigt. (siehe Abbildung 109) Während die Strukturspannung aus dem 3D-Modell für C1  $\sigma_{hs}=1,394\text{MPa}$  bzw für C2  $\sigma_{hs}=1,370\text{MPa}$  beträgt, liegen die aktuell verwendeten Spannungswerte zwischen 15% und 20% darunter. Dieser Fehler könnte zumindest halbiert werden, wenn als Auswertepunkt die neuen Abstände (grüner Rahmen) bei 5 bzw. 7,5mm gewählt werden würden.

C1 bzw. C2 mit 10mm Steg, Längszug  
 Spannung: Element-Knoten, gemittelt  
 max. Hauptnormalspannung

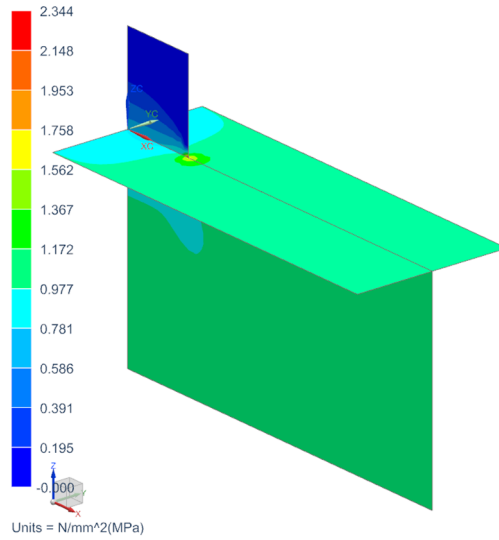


Abbildung 108 Simulationsergebnis Schale Probe mit 10mm Steg C1 bzw. C2 Längszug

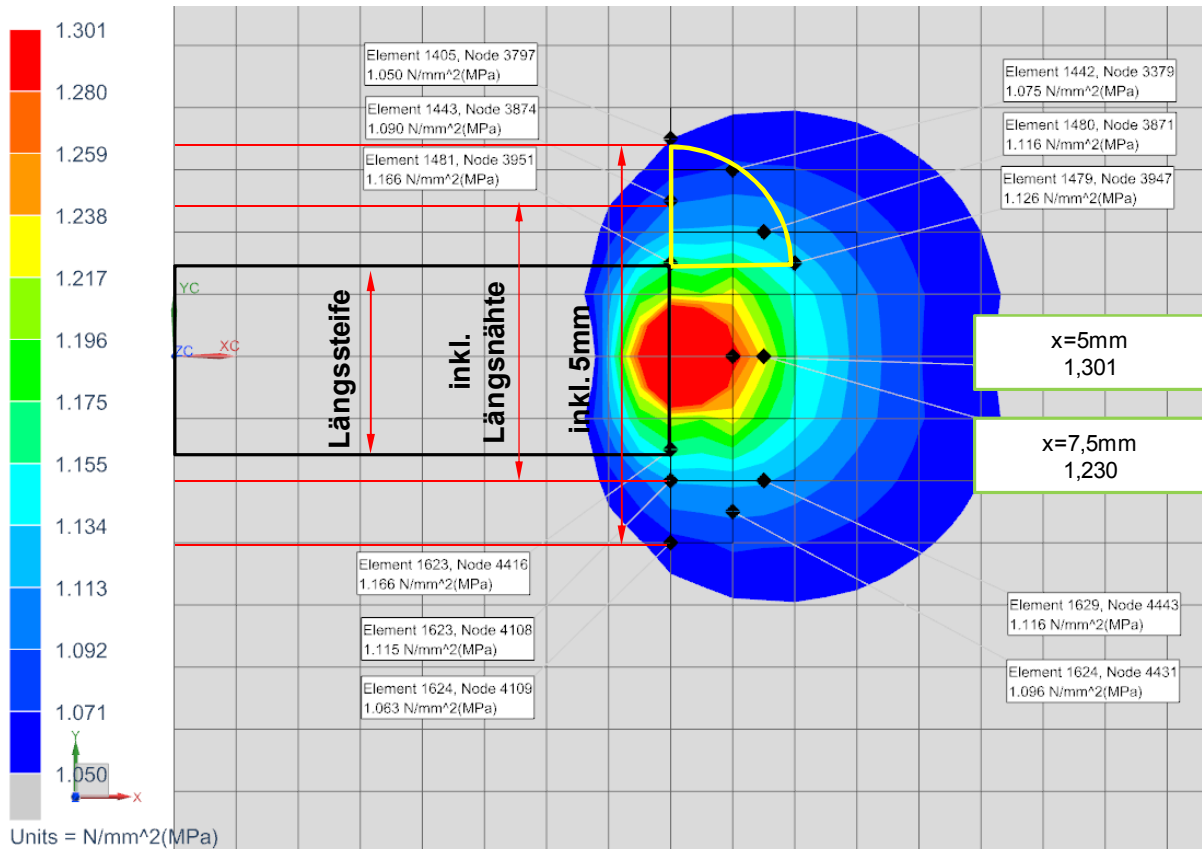


Abbildung 109 Schema Spannungsbewertung Probe mit 10mm Steg C1 bzw. C2

## 8 Vergleich Kleinprobenversuch Simulation

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Schwingversuchs und der Simulation verglichen. Diese Gegenüberstellung ist grundsätzlich nur für Längszug möglich, da keine Versuche bei Querkzug durchgeführt wurden. Die, dem Kerbspannungskonzept zu Grunde liegende, Streuspanne beträgt 1:1,48 (9) und der Wöhlerlinien-Exponent liegt bei  $k=3$ .

In Tabelle 22 sind die Ergebnisse aus Schwingversuch und Simulation gegenübergestellt und anschließend mit Anmerkungen versehen.

Probe	Schwingversuch			Simulation			Anmerkung
	FAT	1:T <sub>s</sub>	k	FAT	1:T <sub>s</sub>	k	
C1 YB-EF	82	1:1,46	2,7	77	1:1,48	3	(1)
C2 YB-EY	102	1:1,19	3,4	69	1:1,48	3	(2)
C4 FD-EF	121	1:1,15	3,6	75	1:1,48	3	(3)
C7 YD-EY	87	1:1,15	3,2	69	1:1,48	3	(4)

Tabelle 22 Vergleich Ergebnisse Schwingversuch Simulation

(1) Die FAT-Klassen sind ähnlich, da die Streubreite des Schwingversuchs gleich groß ist, wie die Streubreite des Kerbspannungskonzepts.

(2) Die FAT-Klassen sind unterschiedlich, weil die geringe Streubreite des Schwingversuchs eine deutlich höhere FAT-Klasse als die Streubreite des Kerbspannungsmodells ergibt.

(3) Die FAT-Klasse des Versuchs ist nicht vertrauenswürdig, da kein Abknickpunkt im Schwingversuch detektiert wurde.

(4) Der Schwingversuch zeigt eine geringere Streubreite als das Kerbspannungsmodell. Deshalb ergibt sich eine höhere FAT-Klasse aus dem Versuch.

Generell zeigt sich, dass die Simulation verglichen mit dem Schwingversuch konservative Ergebnisse liefert. Deshalb können die Simulationsergebnisse für Querkzug problemlos für die Bewertung verwendet werden.

## 9 Zusammenfassung und Fazit

---

Ausgangspunkt vorliegender Arbeit ist die Forderung nach einer sicheren Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißnahtenden. Dafür wurden zunächst bestehende Schwingversuchsdaten von unterschiedlichen Kleinproben mit Längssteifen ausgewertet und daraus im Sinne der FKM-Richtlinie FAT-Klassen berechnet. Um den Einfluss bestimmter Faktoren auf die Ermüdungsfestigkeit untersuchen zu können, wurde eine FEM-Simulation generiert. Unter Berücksichtigung des Kerbspannungskonzepts und einer Netzstudie sind zunächst die vier Kleinproben und anschließend verschiedene Varianten für einen Relativvergleich simuliert worden. Diese Varianten beinhalten verschieden Blechdicken-Kombinationen, verschiedene Längsnähte und Abbindenähte, unterschiedliche Beanspruchungsrichtungen und modifizierte Einbausituationen. Ebenso wurde eine numerische Untersuchung bzgl. einer Nahtnachbehandlung durchgeführt. Dabei konnte eindeutig gezeigt werden, dass die Ermüdungsfestigkeit der Abbindenähte deutlich erhöht werden kann, wenn der Übergangsradius z.B. durch Verschleifen vergrößert und damit die Nahtformzahl verringert wird. Diese Erkenntnisse wurden zur Verbesserung eines konkreten Beispiels, dem Bruch der lokalen Struktur vor einem Abbinde im Schwingversuch eines Drehgestells, angewendet. Zum Schluss wurden die Auswirkungen auf die aktuelle Bewertungsmethode untersucht. Dabei stellte sich nicht nur heraus, dass die aktuelle Methode um einen zusätzlichen Auswertepunkt erweitert werden soll, um die Diskrepanz zwischen Schalenmodell und 3D-Modell möglichst gering zu halten, sondern auch, dass die Diskretisierung mit parabolischen Schalenelemente für eine konservative Bewertung unerlässlich ist.

Das Ziel vorliegender Arbeit mit Hilfe eines 3-dimensionalen Modells unter Berücksichtigung des Kerbspannungskonzepts den Einfluss bestimmter Faktoren auf die Ermüdungsfestigkeit von Schweißnahtabbindern festzustellen, konnte somit erreicht werden. Durch den Vergleich der Ergebnisse aus Schwingversuch und Simulation werden anschließend Auslegungswerte definiert, welche für die aktuelle Bewertungsmethodik verwendet werden können.

In Tabelle 23 wird die Herleitung der zulässigen Auslegungswerte für Abbindenähte unter Längszug dargestellt. Sie sind sowohl für symmetrische Längssteifen als auch für die Varianten der Einbausituation mit durchgehendem Steg gültig. (siehe Abbildung 89) Dafür werden die Ergebnisse aus dem Schwingversuch auf FAT-Klassen im Sinne des Kerbfallkatalogs reduziert. Zunächst aufgrund der Stufung durch die Normzahlreihe ( $FAT_{R20}$ ) und anschließend wegen ihrer Blechdicke. Die Reduktion auf die typischen Katalog-FAT-

Klassen wird bewusst gewählt, um eine konservative Berechnungsmethodik mit bekannten Werten nachweisen zu können. Die zweite Reduktion muss vorgenommen werden, da der Gurt der verwendeten Proben eine Blechstärke von 12mm hat. Für die FKM-Richtlinie wird die FAT-Klasse jedoch auf Basis einer Blechstärke von 25mm verwendet und mit einem Dickenfaktor modifiziert, falls dünnere Bleche bewertet werden sollen. (siehe Abbildung 110) Dabei ist Fall A zu verwenden wenn branchenspezifischen Erfahrungen nicht und Fall B wenn sie vorliegen, wie z.B. Im Schienenfahrzeugbau.

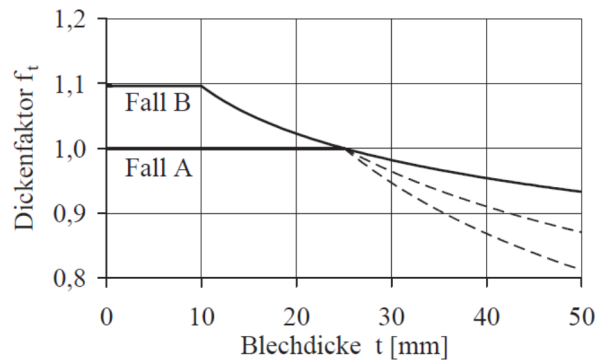


Abbildung 110 Dickenfaktor FKM-Richtlinie (11)

In der Regel entspricht dieser Dickenfaktor von  $f_t=1,1$  für den Fall B einer Verbesserung der FAT-Klasse um ungefähr eine Stufe. Dieser Zusammenhang konnte in der Variantenstudie dieser Masterarbeit beobachtet werden.

Als Auslegungswert wird jene FAT-Klasse bezeichnet, welche im Algorithmus verwendet wird und deshalb in die Bewertungssoftware implementiert werden kann.

Probe	Schwingversuch				Abminderung	Auslegungswerte
	FAT	1:Ts	k	FAT <sub>R20</sub>	FAT-Klasse	FAT
C1 YB-EF	82	1:1,46	2,7	80	1	71
C2 YB-EY	102	1:1,19	3,4	100	1	90
C4 FD-EF	121	1:1,15	3,6	63	1	56
C7 YD-EY	87	1:1,15	3,2	80	1	71

Tabelle 23 Herleitung der zulässigen Werte für Längszug

Da aufgrund des nicht detektierbaren Abknickpunktes der Probenserie C4 das Ergebnis des Schwingversuchs nicht mit dem Abknickpunkt der FKM Richtlinie bei  $N_{\text{Knick}}=5E6$  Lastwechseln kompatibel ist, wird eine Reduktion der  $FAT_{R20}$  auf 63MPa vorgenommen. (siehe Abbildung 111) Der Auslegungswert FAT56 gewährleistet eine sichere Bewertung des Kehlnahtabbinders bei einer Doppelkehlnaht als Längsnaht, im Hinblick auf typische schädigungswirksame Schwingspiele im Schienenfahrzeugbau von ca.  $1E8$  Lastwechsel.

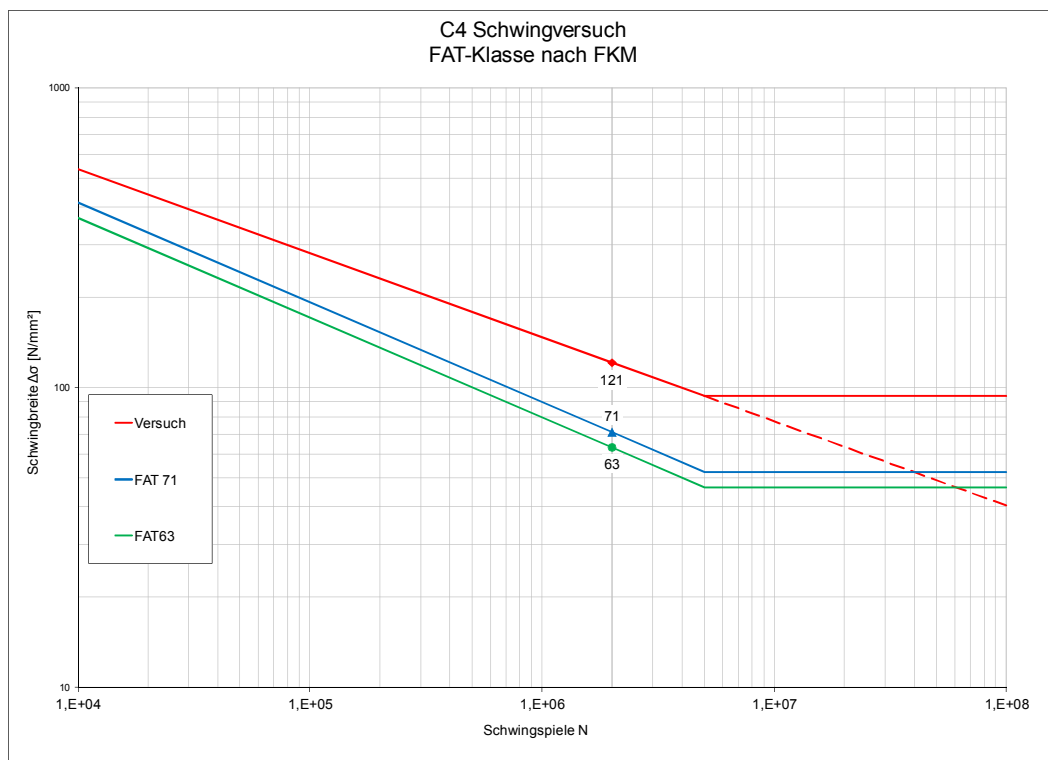


Abbildung 111 Schwingversuch C4 Reduktion auf FAT63

Für Abbindenähte unter Querkzug können, aufgrund der konservativen Simulationsergebnisse unter Längszug verglichen mit den Schwingversuchsergebnissen, die Werte aus den jeweiligen Diagrammen für die Bewertung verwendet werden.

Durch Nachbehandlung der Abbindenaht kann die Nahtformzahl deutlich reduziert und somit die FAT-Klasse erhöht werden. (siehe Abbildung 95) Im Gegensatz zur FKM-Richtlinie, welche keine Verbesserung durch Nachbehandlungsverfahren berücksichtigt, führt die IIW-Richtlinie (12 S. 68) einen Faktor von 1,3 für verschliffene Schweißnähte an. Das bedeutet, eine Längssteife würde durch Verschleifen anstelle von FAT 71 mit FAT92 bewertet werden. Dieser pauschale Faktor korrespondiert gut mit dem Vorschlag der modifizierten Referenz-FAT-Klasse, welche deshalb durchaus realistische Ergebnisse liefern. Der Ansatz muss vor seiner Anwendung jedoch durch Versuche überprüft werden.

Die Abweichung der Strukturspannungen zwischen Schalenmodell und 3D-Modell kann durch einen zusätzlichen Bewertungsknoten reduziert werden. Dieser sollte in einem Abstand von  $x=5\text{mm}$  bzw.  $x=7,5\text{ mm}$  direkt vor der Längssteife und zumindest in der zweiten Elementreihe liegen. Es wird empfohlen die Modelle mit parabolischen, vierseitigen Schalenelementen mit einer Elementkantenlänge von 5mm zu vernetzen. Größere Netze würden den Fehler vergrößern und aufgrund der zu geringen Strukturspannung keine konservative Bewertung garantieren.



# Literaturverzeichnis

---

1. **Radaj, D., Sonsino, C.M. and Fricke, W.** *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*.
2. **Siemens Aktiengesellschaft, Österreich.** Graz : SAGÖ, 2015.
3. **Haigermoser, A.** *Schienenfahrzeuge*. Graz : TU Graz, 2002.
4. **Berghold, P.** Optimierung der Fertigung von stirnseitigen Schweißnähten an Drehgestellrahmen. *Diplomarbeit*. TU Graz : Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, 2009.
5. **Sommitsch, C.** Werkstoffkunde. *Vorlesungsskriptum*. Technische Universität Graz : Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, 2016.
6. **Radaj, D. and Vormwald, M.** *Ermüdungsfestigkeit - Grundlagen für Ingenieure*. Berlin : Springer, 2007. 978-3-540-71458-3.
7. **Baumgartner, J.** Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen unter Berücksichtigung von Schweißeigenstress und Größeneinflüssen. *Dissertation*. TU Darmstadt : Deutschland, 2013.
8. **Haibach, E.** *Betriebsfeste Bauteile*. Berlin : Springer, 1992. 978-3-540-54815-7.
9. —. Betriebsfestigkeit. Berlin Heidelberg : Springer, 2006. ISBN-10 3-540-29363-9.
10. **DIN EN 1993, Eurocode 3.** Design of Steel structures. Part 1.1: General rules for building; Chapter 9: Fatigue s.l. : Deutsche Norm, 1992.
11. **FKM-Richtlinie.** Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen. Frankfurt : Forschungskuratorium Maschinenbau, 2012. 6. Auflage. ISBN 978-3-8163-0605-4.
12. **Hobbacher, A.F.** *Recommendation for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. Heidelberg : Springer, 2016. ISBN 978-3-3319-23756-5.
13. **DVS AG Q 1.1, Leitung Kaßner.** DVS-Merkblatt: Industrielle Anwendung des Kerbspannungskonzepts für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen. Kiel Deutschland : Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren, 2015.

14. **Eichseder, W.** Betriebsfestigkeit II. *Skriptum*. Leoben : Montanuniversität Leoben.
15. **AiF-Cluster.** Anwendbarkeit von Festigkeitskonzepten für schwingbelastete geschweißte Bauteile. *Abschlussbericht*. Köln, Deutschland : Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen AiF, 2005-2008.
16. **Radaj, D.** Näherungsweise Berechnung der Formzahl von Schweißnähten. s.l. : Schweißen und Schneiden, 1969. Vol. 21, 3.
17. **Olivier, R., Köttgen, V.B. and Seeger, T.** Schwingfestigkeitsnachweise für Schweißverbindungen auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen. Frankfurt/M : Forschungskuratorium Maschienebau, 1989. Vol. Forschungsheft 43.
18. —. Untersuchungen zur Einbindung eines neuartigen Zeit- und Dauerfestigkeitsnachweises von Schweißverbindungen aus Stahl in Regelwerke. Frankfurt/M : Forschungskuratorium Maschinenbau, 1994. Vol. Forschungsheft 84.
19. **Olivier, R.** *Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Bemessung schwingbeanspruchter Schweißverbindungen auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen*. Technische Hochschule Darmstadt : Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, 2000.
20. **Radaj, D. and Möhrmann, W.** Kerbwirkung querbeanspruchter Schweißstöße. s.l. : Schweißen und Schneiden, 1984. Vol. 36, Heft 2.
21. **Baumgartner, J. and Bruder, T.** An efficient meshing approach for the calculation of notch stresses. Berlin : Springer-Verlag, 2013. Vol. 57, pp. 137-145.
22. **Radaj, D, Sonsino, C.M. and Fricke, W.** Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches. Cambridge : Woodhead Publ., 2006. 2. Auflage.
23. **Leitner, M.** Local fatigue assessment of welded and high frequency mechanical impact treated joints. *Dissertation*. Montanuniversität Leoben : Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, 2013.
24. **DIN EN 10025-5, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen.** Abschnitt 7.2. *Teil 5: Technische Lieferbedingungen für wetterfeste Baustähle*. s.l. : Deutsche Norm, 2005.
25. **WIFI, Österreich.** MIG/MAG-Schutzgasschweißen. Wien : Wirtschaftsförderungsinstitut der Wirtschaftskammer Österreich, 2007.

26. **ASTM, Standard.** Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life and Strain-Life Fatigue Data. USA : ASTM International, 1998.
27. **Hück, M.** Ein verbessertes Verfahren für die Auswertung von Treppenstufenversuchen. Deutschland : s.n., 1983.
28. **DIN Taschenbuch 491/2, Schienenfahrzeuge 2.** Bahnanwendungen Radsätze und Dregestelle. Berlin : DIN Deutsches Institut für Normung, 2013. 978-3-410-24262-8.
29. **Putz, Andrea.** Einfluss von geometrischen Imperfektionen von Schweißnahtkleinproben auf das Versuchsergebnis. Bachelorarbeit : Technische Universität Graz, 2013.
30. **Siemens AG, Österreich.** Bericht Betriebsmessung. *Bericht Datenanalyse und Festigkeitsbewertung der Streckenversuche nach DIN EN 13749.* Graz : Siemens AG, 2016.
31. **Prior, F.** Bericht Rissursachenanalyse. Klingenberg : Prior, 2015.
32. **DIN EN, 15085-3:2010-01.** Bahnanwendungen: Schweißen von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen: Teil 3 Konstruktionsvorgaben. Deutschland : DIN, 2010.
33. **Fricke, W.:** Fatigue Assessment of Fillet-Welded Stiffener End with the Effective Notch Stress Approach. *IIV Interim Meeting of XIII-WG3.* Technische Universität Hamburg-Harburg : s.n., 2016.
34. **Baumgartner, J., Bruder, T. and Hanselka, H.** Fatigue strength of laser beam welded automotive components made of thin steel sheets considering size effects. s.l. : International Journal of Fatigue, 2012. Vol. 34.
35. **DIN 323-1, Normzahlen und Normzahlreihen.** Hauptwerte, Genauwerte, Rundwerte. Deutschland : s.n., 1974.
36. **ESAB, Welding & Cutting GmbH.** [http://www.esab-okhandbuch.de/files/1A50126910\\_B55.pdf?u1474012410](http://www.esab-okhandbuch.de/files/1A50126910_B55.pdf?u1474012410). [Online] [Cited: September 16, 2016.]
37. **AIR LIQUIDE, Deutschland GmbH.** <http://produkte.airliquide.de/gasekatalog/pdb/arcal5.pdf>. [Online] [Cited: September 16, 2016.]

38. **Olivier, R. and Ritter, W.** Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen. *DVS-Berichte*. Düsseldorf : Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1979-1985. Band 56 I bis V.
39. **Ritter, W.** Kenngrößen der Wöhlerlinien für Schweißverbindungen aus Stählen. Technische Hochschule Darmstadt : Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, 1994. Heft 53.
40. **Hanneforth, W.** *Laufwerke*. 1. Berlin : Transpress, 1986. ISBN 9783344000370.

# Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1 Drehgestell der Fa. Siemens AG (2).....	1
Abbildung 2 Drehgestellrahmen der Fa. Siemens AG (2).....	2
Abbildung 3 Skizze Abbinder (4) .....	2
Abbildung 4 Kehlnaht (links) und HY-Naht (rechts) .....	3
Abbildung 5 schematische Darstellung einer Bruchfläche (links) (5); Beanspruchungskennwerte im Dauerschwingversuch (rechts) (6) .....	4
Abbildung 6 Problemfeld der Ermüdungsfestigkeit, Strukturierung hinsichtlich ertragbarer Beanspruchungen (8).....	5
Abbildung 7 Beanspruchungsbereiche im Schwingversuch (9) .....	5
Abbildung 8 Kennwerte einer Wöhlerlinie (9) .....	6
Abbildung 9 Wöhler-Diagramme mit Streuband: mit (links) und ohne (rechts) ausgeprägte Dauerfestigkeit (5).....	6
Abbildung 10 normierte Wöhlerlinie für gekerbte Bauteile aus Stahl und Aluminiumlegierungen (9) .....	7
Abbildung 11 Wöhlerlinien für Schweißverbindungen aus Baustahl nach (12) .....	7
Abbildung 12 Beispiel für die Zuordnung von Schweißnahtdetails zur Kerbfallkategorie (FATKlasse) (9).....	8
Abbildung 13 Spannungskomponenten der Kerbspannung (12) .....	9
Abbildung 14 Konzepte zur Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen (9).....	9
Abbildung 15 Ermittlung der Strukturspannung am Nahtübergang durch Extrapolation ausgehend von Basispunkten in geeignetem Abstand von der Naht (12).....	11
Abbildung 16 fiktive Kerbrundung zur Simulation der Ikrostützwirkung am Nahtübergang und an der Nahtwurzel (22).....	12
Abbildung 17 Übersicht der Einflussgrößen der FKM-Richtlinie (6) .....	13

Abbildung 18 Ablauf des Ermüdungsfestigkeitsnachweises mit örtlichen Spannungen für geschweißte Bauteile (11).....	14
Abbildung 19 Spannungsverteilung am Nahtübergang (13) .....	16
Abbildung 20 Kleinprobe mit Längssteife (2).....	17
Abbildung 21 Metall-Schutzgasschweißen .....	18
Abbildung 22 Bezeichnung Schweißzusatz.....	19
Abbildung 23 Fertigungsschritte Kehlnahtabbinder (4).....	20
Abbildung 24 Fertigungsschritte HY-Abbinder (4) .....	21
Abbildung 25 DMS-Positionen (29) .....	23
Abbildung 26 gemessene Dehnung während Einspannen, statischer Vorlast und Beginn des Schwingversuchs .....	24
Abbildung 27 normiertes Haigh-Diagramm.....	25
Abbildung 28 graphischer Zusammenhang für Geradengleichung .....	25
Abbildung 29 Vorhandene Schwingfestigkeitsversuche an Längssteifen (7) .....	26
Abbildung 30 Auswertung des Schwingversuchs der Probenserie C1.....	27
Abbildung 31 Auswertung des Schwingversuchs der Probenserie C2.....	28
Abbildung 32 Auswertung des Schwingversuchs der Probenserie C4.....	29
Abbildung 33 Auswertung des Schwingversuchs der Probenserie C7.....	30
Abbildung 34 Vergleich der Ergebnisse Schwingversuch C1 und C2 .....	32
Abbildung 35 Schliffbilder der Serie C1 .....	33
Abbildung 36 Auswertung Schwingversuch C3: FAT-Klasse mit hohem Eigenspannungszustand berechnet .....	34
Abbildung 37 Wurzelriss (oben) bzw. Nahtübergangsriss (unten) .....	35
Abbildung 38 Auswertung des Schwingversuchs Probenserie C4 ohne Wurzelrisse .....	36

Abbildung 39 Auswertung Schwingversuch Probenserie C8 .....	37
Abbildung 40 Modell einer angeschweißten Konsole auf Längsträger (2) .....	38
Abbildung 41 Abbinder mit DMS und Riss (2) .....	38
Abbildung 42 Nahtanstiegswinkel (links) und Nahtübergangsradius (rechts) des gerissenen Abbinders (31) .....	39
Abbildung 43 Modell zur Untersuchung der nötigen Netzfeinheit.....	41
Abbildung 44 Diskretisierung Hexaeder- und Tetraeder-Netz.....	41
Abbildung 45 Viertelmodelle der Proben (links), Symmetrieebene yz (rechts).....	42
Abbildung 46 Modell Probe C1.....	43
Abbildung 47 Modell Probe C1 Symmetrieebene .....	44
Abbildung 48 Simulation Probe C1.....	44
Abbildung 49 Simulation Probe C1 Symmetrieebene.....	45
Abbildung 50 Simulation Probe C1 Detailansicht Abbinder .....	45
Abbildung 51 Simulation Probe C1 Einspannung .....	46
Abbildung 52 Simulation Probe C1 Längszug .....	47
Abbildung 53 Simulation Probe C1 Querzug .....	47
Abbildung 54 Modell Probe C1 mit 10mm Steg.....	49
Abbildung 55 Simulation Probe C1 mit 10mm Steg Einspannung .....	50
Abbildung 56 Simulation Probe C1 mit 10mm Steg Längszug (links) und Querzug (rechts)	50
Abbildung 57 Simulation Probe C1 ohne Steg Einspannung, Längszug und Moment $M_y$ ...	51
Abbildung 58 Modellbildung bearbeitetes Ende.....	52
Abbildung 59 Modellbildung realer Abbinder mit Schweißnahtgeometrie von Kapitel 5.....	53
Abbildung 60 Simulationsergebnis Probe C1 Längszug.....	55
Abbildung 61 Simulationsergebnis Probe C1 Querzug.....	56

Abbildung 62 Simulationsergebnis Probe C1 Querzug Detailansicht.....	56
Abbildung 63 Riss entsteht in der Längsnaht (oben), Riss entsteht in der Mitte der Abbindenaht (unten) (33) .....	57
Abbildung 64 Länge p innerhalb derer die Spannung mehr als 80% des Maximalwertes beträgt .....	58
Abbildung 65 Simulationsergebnis Probe C1 Querzug Spannung in Längssteifenmitte .....	59
Abbildung 66 Simulationsergebnis Probe C1 Querzug Spannung in Längssteifenmitte Detailansicht .....	59
Abbildung 67 Nahtformzahl Proben.....	62
Abbildung 68 FAT-Klasse Proben .....	62
Abbildung 69 Nahtformzahl Doppelkehlnaht Längszug .....	64
Abbildung 70 FAT-Klasse Doppelkehlnaht Längszug.....	64
Abbildung 71 Kerbformzahl Doppelkehlnaht Querzug (HY-Wurzel).....	66
Abbildung 72 FAT-Klasse Doppelkehlnaht Querzug (HY-Wurzel).....	66
Abbildung 73 Nahtformzahl Doppelkehlnaht Querzug (HY-Nahtübergang) .....	67
Abbildung 74 FAT-Klasse Doppelkehlnaht Querzug (HY-Nahtübergang).....	67
Abbildung 75 Nahtformzahl HY-Naht mit Gegenlage Längszug .....	69
Abbildung 76 FAT-Klasse HY-Naht mit Gegenlage Längszug .....	69
Abbildung 77 Nahtformzahl HY-Naht mit Gegenlage Querzug .....	71
Abbildung 78 FAT-Klasse HY-Naht mit Gegenlage Querzug.....	71
Abbildung 79 Nahtformzahl K-Naht Längszug.....	73
Abbildung 80 FAT-Klasse K-Naht Längszug .....	73
Abbildung 81 Nahtformzahl K-Naht Querzug .....	75
Abbildung 82 FAT-Klasse K-Naht Querzug .....	75



Abbildung 83 Simulationsergebnis Probe C1 mit 10mm Steg Längszug .....	76
Abbildung 84 Simulationsergebnis Probe „C1 mit 10mm“ Steg Querzug.....	77
Abbildung 85 Simulationsergebnis Probe „C1 mit 10mm Steg“ Querzug Detailansicht.....	77
Abbildung 86 Simulationsergebnis Probe „C1 mit 10mm Steg“ Querzug Spannung in Längssteifenmitte Detailansicht.....	78
Abbildung 87 Simulationsergebnis Probe C1 ohne Steg Längszug Detail „biegefrei“ .....	79
Abbildung 88 Nahtformzahl Einbausituation Längszug.....	81
Abbildung 89 FAT-Klasse Einbausituation Längszug .....	81
Abbildung 90 Nahtformzahl Einbausituation Querzug .....	83
Abbildung 91 FAT-Klasse Einbausituation Querzug.....	83
Abbildung 92 Nahtformzahl Nahtnachbehandlung Abbindenaht Längszug .....	85
Abbildung 93 Bezugswerte der FAT-Klassen für den Kerbspannungsnachweis mit Normalspannungen von Schweißverbindungen aus Stahl und Aluminiumlegierungen (13).	86
Abbildung 94 Vorschlag Referenz-FAT-Klassen bei Referenzradius $r_{ref} > 1\text{mm}$ .....	87
Abbildung 95 FAT-Klasse Nachbearbeitung der Abbindenaht Längszug.....	88
Abbildung 96 Nahtformzahl realer Abbinder Dino unter Längszug .....	89
Abbildung 97 Fertigungszeichnung Detailansicht Abbinder neue Geometrie.....	89
Abbildung 98 Simulationsergebnis Schale Probe C1 bzw. C2 Längszug.....	90
Abbildung 99 Netzstudie Schale Gurt 12mm Längssteife 16mm .....	91
Abbildung 100 Spannungsgradient Schale und Strukturspannung 3D-Modell.....	92
Abbildung 101 Strukturspannung Varianten $x=5\text{mm}$ (oben), Vergleich 3D-Schale (unten) ..	94
Abbildung 102 Strukturspannung Varianten $x=7,5\text{mm}$ (oben), Vergleich 3D-Schale (unten)	95
Abbildung 103 Netzstudie Schale Gurt 12mm Längssteife 16mm Steg 6mm .....	96
Abbildung 104 Netzstudie Schale Gurt 12mm Längssteife 16mm Steg 10mm .....	97

Abbildung 105 Netzstudie Schale Gurt 12mm Längssteife 16mm Steg 20mm .....	97
Abbildung 106 Simulationsergebnis Schale Probe C1 bzw. C2 Längszug.....	98
Abbildung 107 Schema Spannungsbewertung Probe C1 bzw. C2 .....	99
Abbildung 108 Simulationsergebnis Schale Probe mit 10mm Steg C1 bzw. C2 Längszug	100
Abbildung 109 Schema Spannungsbewertung Probe mit 10mm Steg C1 bzw. C2 .....	100
Abbildung 110 Dickenfaktor FKM-Richtlinie (11) .....	103
Abbildung 111 Schwingversuch C4 Reduktion auf FAT63 .....	104
Abbildung 112 (36).....	xxviii
Abbildung 113 (37).....	xxix

# Formelverzeichnis

---

Formel 1 math. Zusammenhang der Spannungskennwerte .....	5
Formel 2 Nahtformzahl $K_w$ (13).....	16
Formel 3 Zusammenhang der FAT-Klassen bei Strukturspannungs- und Kerbspannungskonzept (13).....	16
Formel 5 Gleichung für Faktor zur Berücksichtigung des Spannungsverhältnis .....	25
Formel 4 Wöhlerlinienexponent $k$ in Abhängigkeit der gesuchten Größe $y$ .....	25
Formel 6 Reduktion der Kerbspannung.....	57

# Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1 Übersicht verwendete Proben.....	17
Tabelle 2 mechanische Eigenschaften S355J2W+N (24).....	18
Tabelle 3 chemische Zusammensetzung S355J2W+N (24).....	18
Tabelle 4 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse .....	31
Tabelle 5 Zusammenhang Streuungen .....	33
Tabelle 6 Übersicht Kerbradien Serie C1 .....	34
Tabelle 7 Schwingbreite und Lastwechselzahl zweier ausgewählter Proben.....	35
Tabelle 8 Zusammenhang Längssteifenblechdicke $t_s$ und Schweißnahtgröße.....	43
Tabelle 9 Drehmoment $M_Y$ um Biegespannung der einseitigen Längssteife auszugleichen	51
Tabelle 10 Abstand zum Abgreifen der Strukturspannung .....	54
Tabelle 11 Reduktion der maximalen Kerbspannung der Probe C1 .....	58
Tabelle 12 Reduktion der maximalen Kerbspannung der Probe C4 .....	60
Tabelle 13 Ergebnisse der Simulation Proben unter Längszug .....	60
Tabelle 14 Position der maximalen Kerbspannung unter Querkzug für die vier Proben .....	61
Tabelle 15 Reduktion der maximalen Kerbspannung für „C1 mit Steg“ und „C4 mit Steg“ ...	78
Tabelle 16 Zusammenfassung FAT-Klasse Einbausituation Längszug .....	80
Tabelle 17 Zusammenfassung FAT-Klasse Einbausituation Querkzug.....	82
Tabelle 18 Änderung der Nahtformzahl aufgrund Vollanschluss für bearbeitetes Ende.....	84
Tabelle 19 FAT-Klasse für Kerbspannungsnachweis mit Normalspannung von Schweißverbindungen aus Stahl mit maximaler Beanspruchung im Nahtübergang (13).....	86
Tabelle 20 Vorschlag Referenz-FAT-Klassen bei Nahtformzahlen $r_{ref} > 1\text{mm}$ .....	87
Tabelle 21 Ergebnisse Strukturspannung Proben .....	93

Tabelle 22 Vergleich Ergebnisse Schwingversuch Simulation.....	101
Tabelle 23 Herleitung der zulässigen Werte für Längszug .....	103

# Anhang

---

## *Abkürzungen der Schweißnaht-Bezeichnung*

---

### Längsnähte:

YB	Partial Penetration, Backing Run; HY-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht und Gegenlage
FD	Fillet Double, Doppelkehlnaht
YD	Partial Penetration, Double Sided; K-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht

### Abbindenähte:

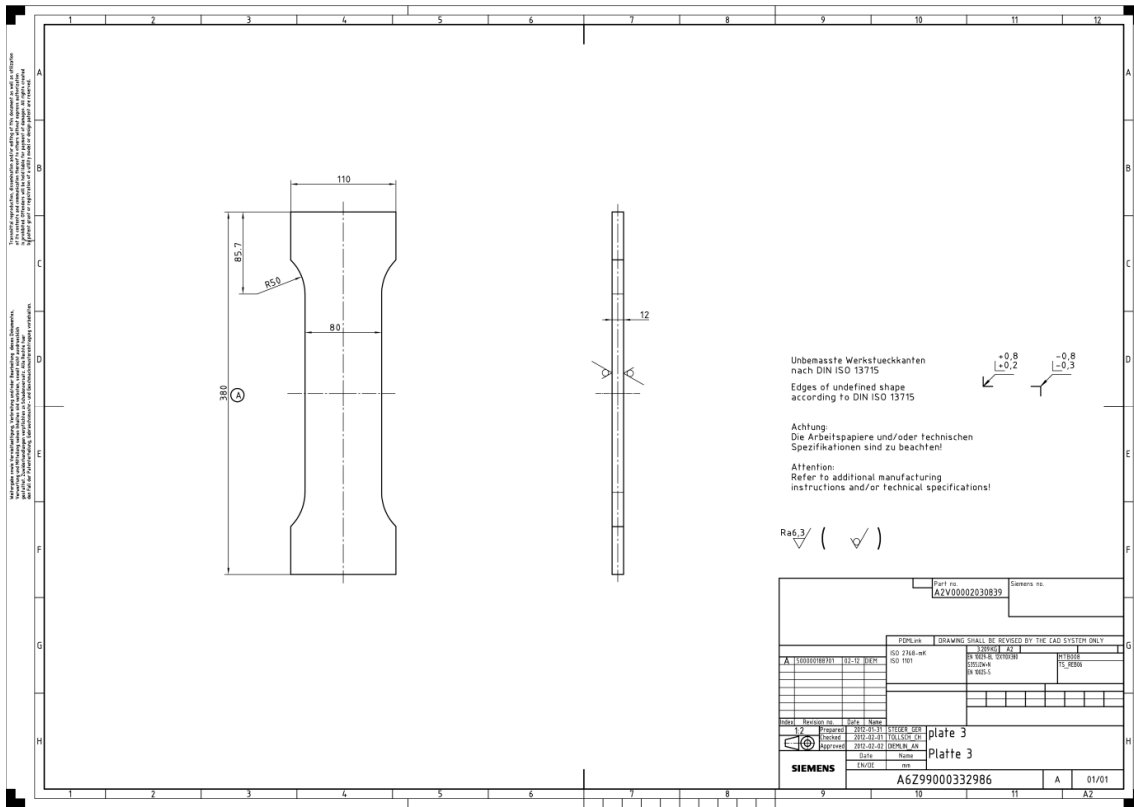
EY	End, Partial Penetration; Abbinder HY-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht
EF	End, Fillet; Abbinder Kehlnaht

## *Zeichnungen*

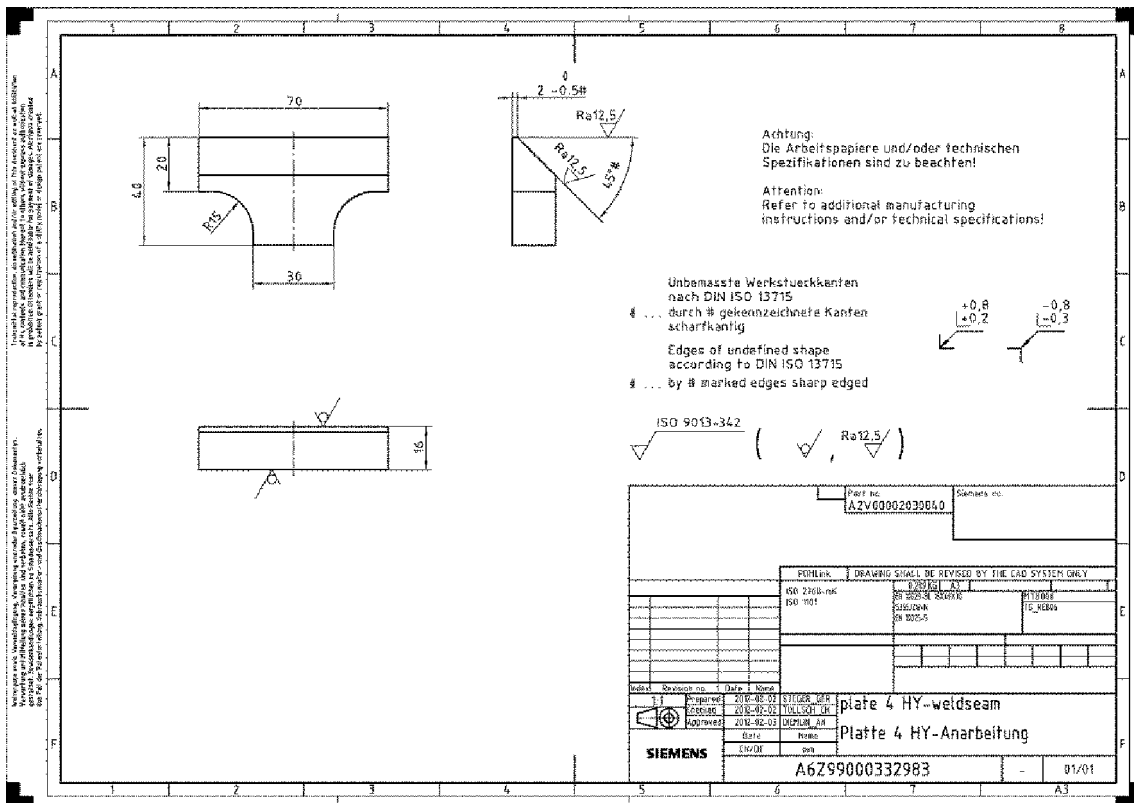
---



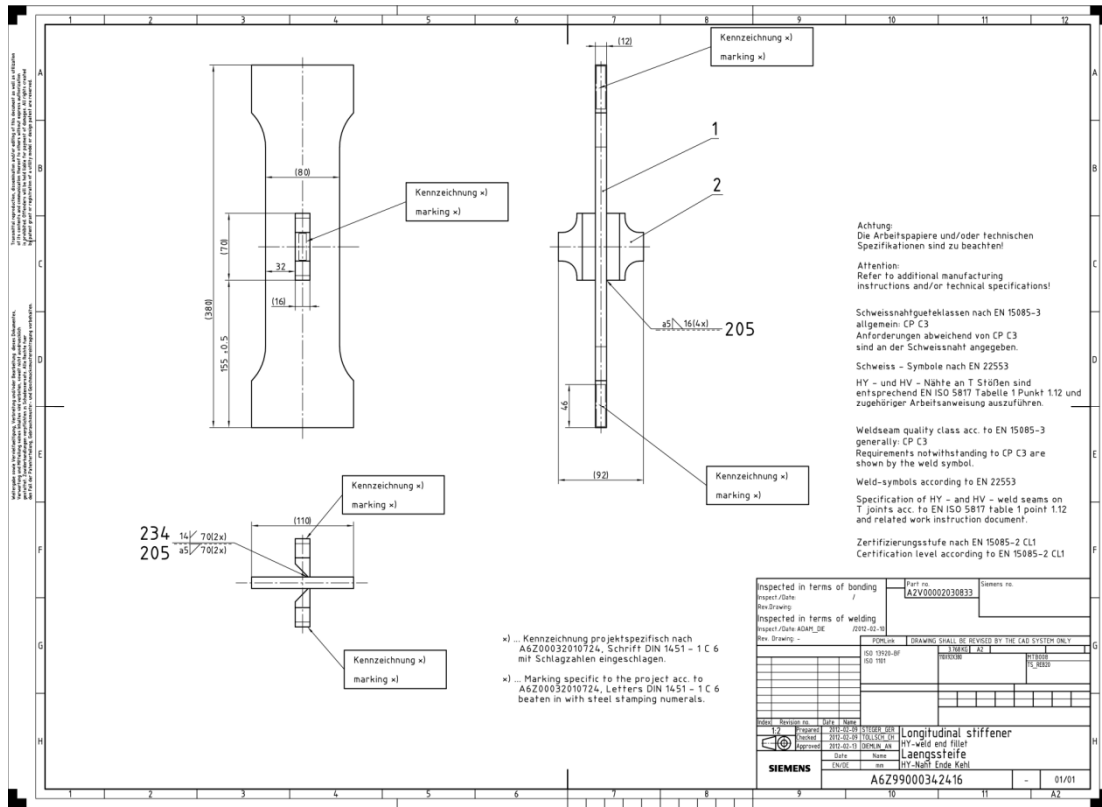
C1 C2 C4 C7 (2)



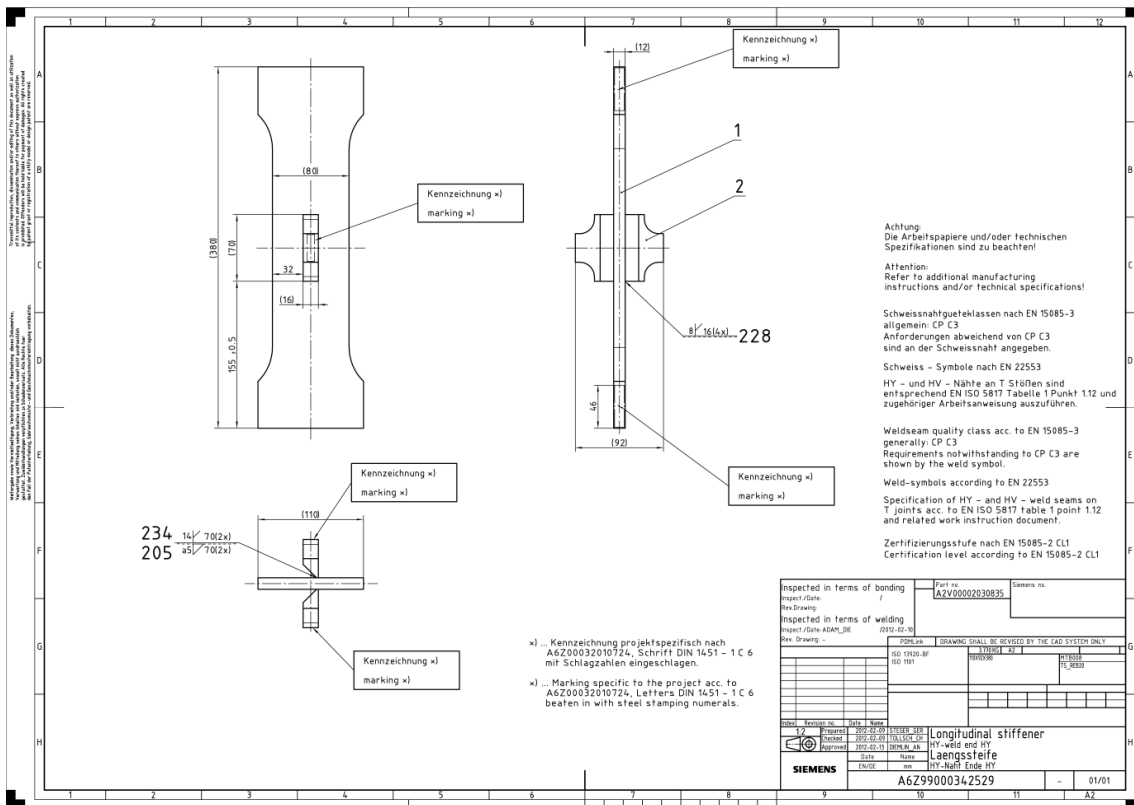
C1 & C2 (2)

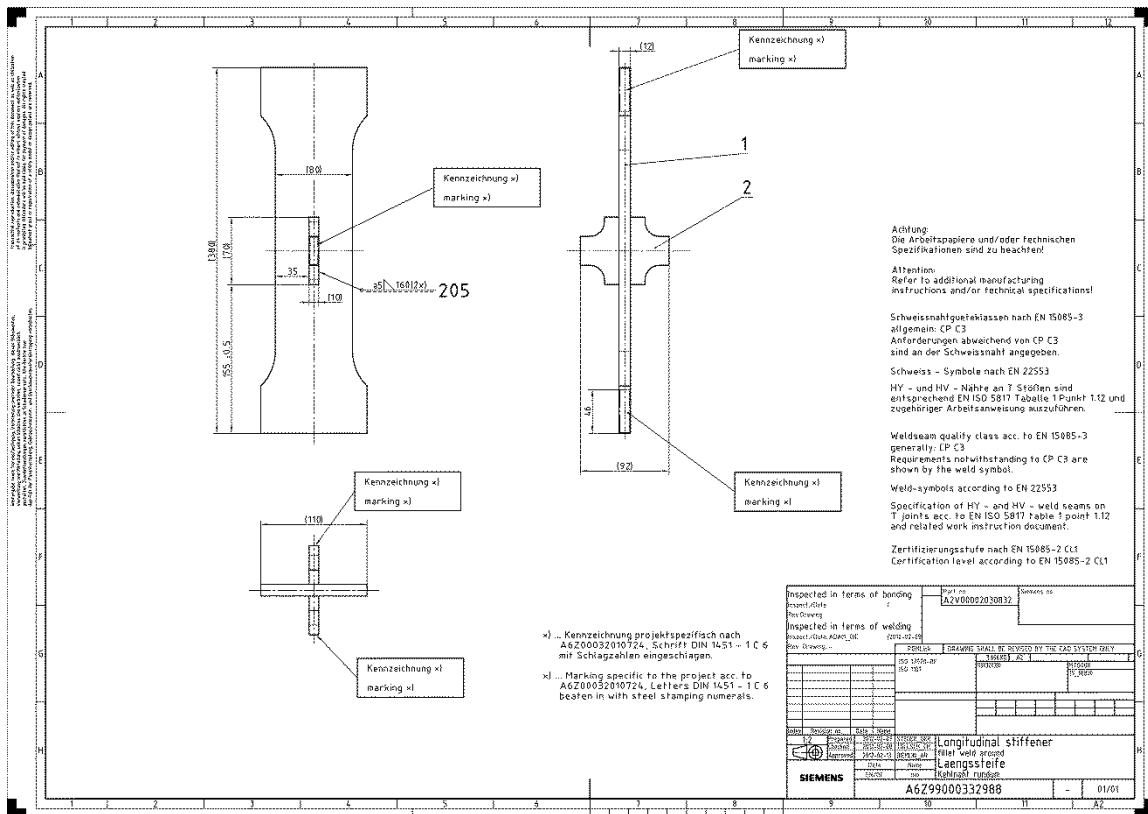
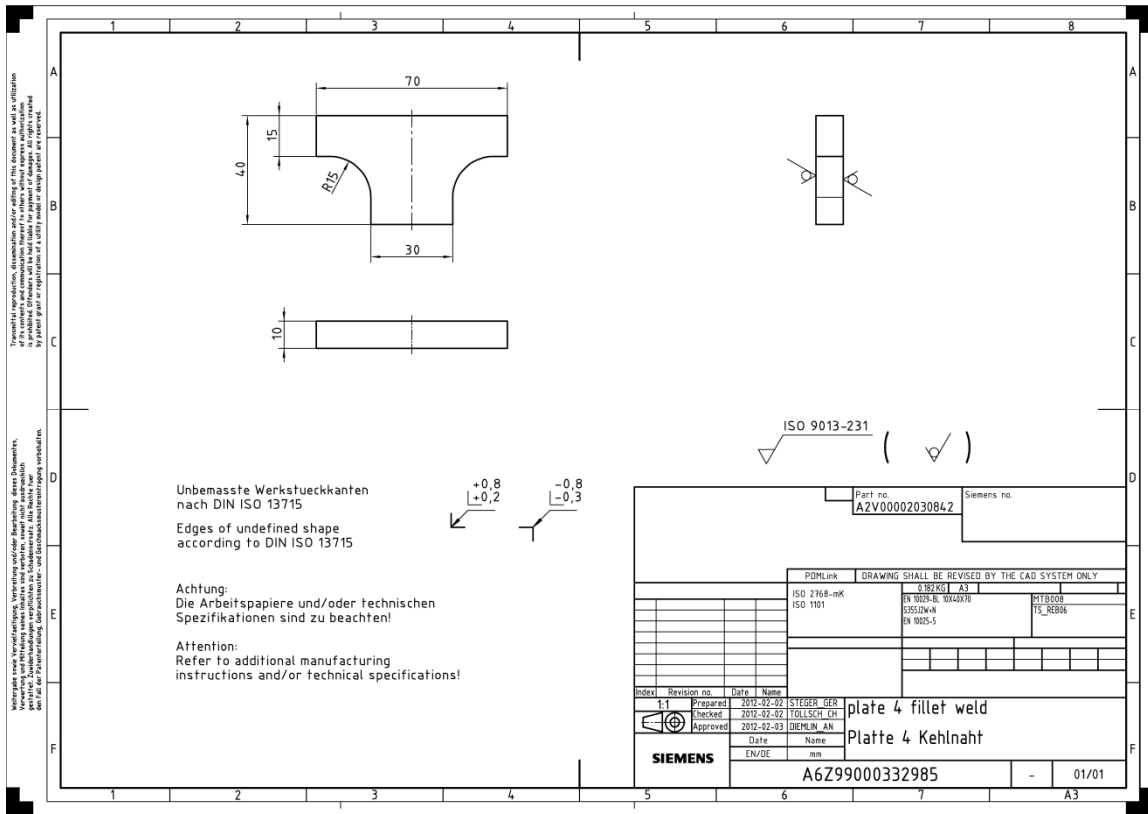


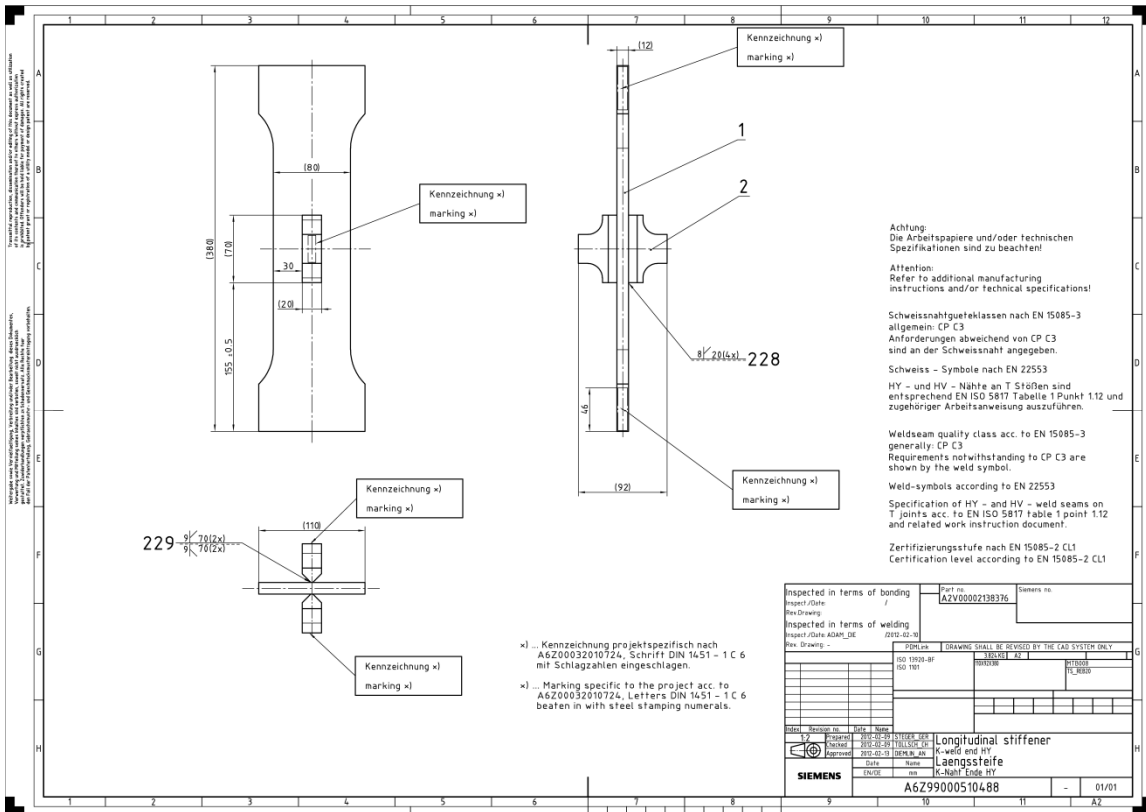
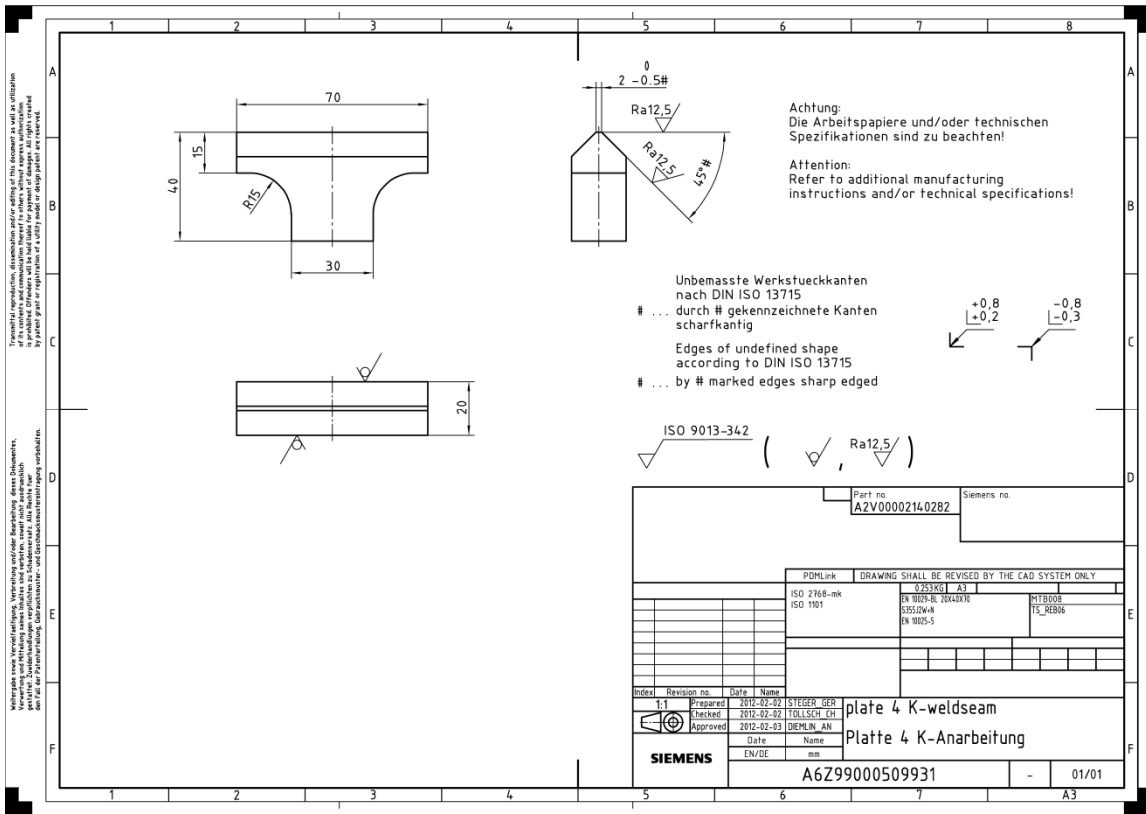
C1 (2)



C2 (2)







## Normzahlen – Renard-Serie (35)

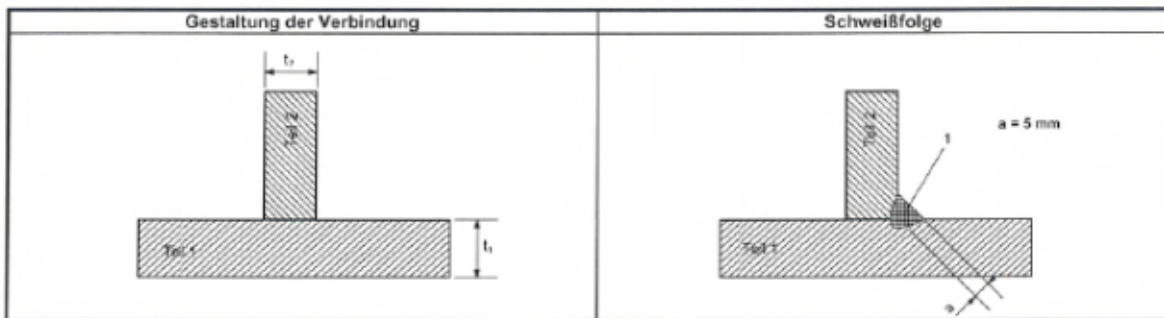
wenig gerundet				gerundet			stark gerundet									
R5	R10	R20	R40	R'10	R'20	R'40	R''5	R''10	R''20	---						
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0	1,0	1,0	---						
			1,06						1,05	---						
		1,12	1,12		1,1	---										
		1,18	1,20		---											
	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25		1,25	1,2	1,2	---					
			1,32							1,30	---					
		1,40	1,40		1,40	1,40			1,40	1,40	1,40	1,4	---			
					1,50								---			
			1,60		1,60				1,60	1,60		1,60	1,60	1,60	1,6	---
									1,70							---
1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,8	---								
		1,90						---								
	2,00	2,00		2,00	2,00		2,00	2,00	2,00	2,0	---					
				2,12							2,10	---				
2,24	2,24	2,24	2,24	2,20	2,20	2,20	2,2	---								
		2,36						2,40	---							
2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,5	2,5	2,5	---						
			2,65						2,60	---						
		2,80	2,80		2,80	2,80			2,80	2,80	2,8	---				
					3,00							3,00	---			
	3,15	3,15	3,15	3,20	3,20	3,20		3,20	3,0	3,0	---					
			3,35							3,40	---					
		3,55	3,55		3,55	3,60			3,60	3,60	3,5	---				
					3,75							3,80	---			
	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00		4,00	4,0	4,0	4,0	---				
				4,25							4,20	---				
4,50			4,50	4,50		4,50	4,50	4,50			4,5	---				
				4,75								4,80	---			
5,00		5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,0		5,0	---					
			5,30							5,30	---					
		5,60	5,60		5,60	5,60		5,60		5,60	5,5	---				
					6,00							6,00	---			
6,30		6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,0		6,0	6,0	---				
				6,70							6,70	---				
	7,10		7,10	7,10		7,10	7,10		7,10		7,0	---				
				7,50								7,50	---			
	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00		8,0	8,0	---					
			8,50							8,50	---					
		9,00	9,00		9,00	9,00			9,00	9,00	9,0	---				
					9,50							9,50	---			
	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0		10	10	10	---				

## *Welding Procedure Specification (WPS) (2)*

---

## Schweißanweisung WPS (Welding procedure specification)

Ort.: <b>SIEMENS AG Werk Graz</b>	Prüfer oder Prüfstelle: <b>Franz Kogler - EWE</b>
Schweißverfahren der Herstellers: <b>135-MAGM</b>	Art der Vorbereitung und Reinigung: <b>Metallisch blank</b>
Beleg-Nr.: <b>135-a5-01</b>	Spezifikation des Grundwerkstoffs: <b>1.1, 1.2, 1.4</b>
WPQR No.: <b>V-135/W01/102</b>	<b>(Werkstoffgruppe nach ISO/TR 15608:2005-10-01)</b>
Hersteller: <b>SIEMENS AG Österreich</b>	Werkstückdicke (mm):
Schweißprozeß: <b>Metall-Aktivgasschweißen</b>	Außendurchmesser (mm):
Nahtart: <b>a5 Kehlnaht</b>	Schweißposition: <b>PB acc. ISO 6947</b>
Einzelheiten der Fugenvorbereitung (Zeichnung)*:	



Einzelheiten für das Schweißen:

Schweißraupe	Prozeß	Durchmesser des Zusatzwerkstoffes	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Stromart/ Polung	Drahtvorschub	Vorschubgeschwindigkeit*	Wärmeeinbringung*
1	135	1,0	240-250	28-29	=+	14 m/min		

Bezeichnung des Zusatzwerkstoffes:  
**DIN EN ISO 14341-A - G 42 4 M G3Si 1**  
 Sondervorschriften für Trocknung: ----  
 Schutzgas / Schweißpulver:  
 - Schutzgas: **EN ISO 14175 – M2.1; 82% Ar + 18% CO2**  
 - Wurzelschutz: ----  
 Gasdurchflußmenge - Schutzgas: **14 l/min**  
 - Wurzelschutz: ----  
 Schweißbadsicherung: ----  
 Vorwärmtemperatur:  
**gem. Vorwärmanweisung A6Z00375067988**  
 Zwischenlagentemperatur: ----  
 Wärmenachbehandlung und / oder Aushärten: ----  
 Zeit, Temperatur, Verfahren: ----  
 Erwärmung und Abkühlungsrate\*: ----

Weitere Informationen \*):  
 z.B. Pendeln (maximale Raupenbreite):  
 Pendeln: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit:

Einzelheiten für das Pulsschweißen: ----

Kontaktdüsenabstand / Werkstück: **15 - 20 mm**  
 Einzelheiten für das Plasmaschweißen: ----  
 Brenneranstellwinkel: **0° bis 10° schleppend**

Hersteller  
 Franz Kogler; 19.07.2010

Prüfer oder Prüfstelle  
 Franz Kogler; 19.07.2010

Name, Datum und Unterschrift

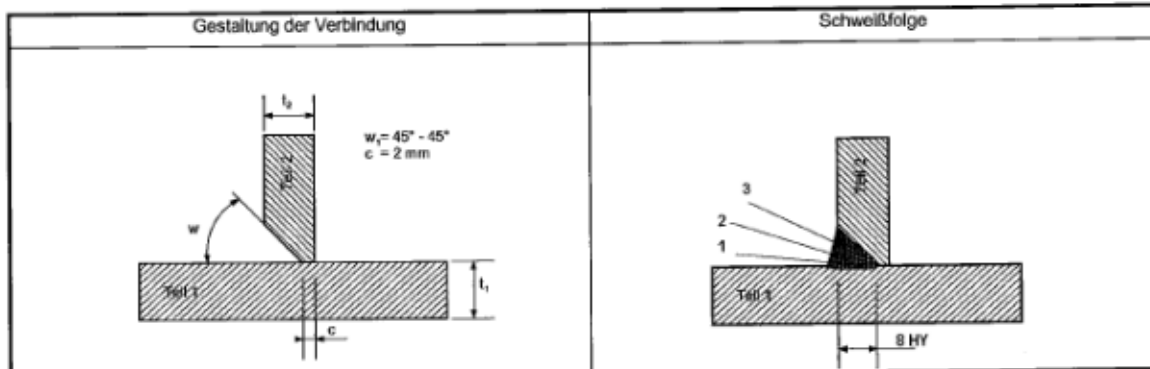
Name, Datum und Unterschrift

\* Falls gefordert

## Schweißanweisung WPS (Welding procedure specification)

Ort.: **SIEMENS AG Werk Graz**  
 Schweißverfahren der Herstellers: **135-MAGM**  
 Beleg-Nr.: **135-hy8-01**  
 WPQR No.: **V-135/W01/201**  
 Hersteller: **SIEMENS AG Österreich**  
 Schweißprozeß: **Metall-Aktivgasschweißen**  
 Nahtart: **HY8/(a3) T-Stoß**  
 Einzelheiten der Fugenvorbereitung  
 (Zeichnung)\*:

Prüfer oder Prüfstelle: **Franz Kogler - EWE**  
 Art der Vorbereitung und Reinigung: **Metallisch blank**  
 Spezifikation des Grundwerkstoffs: **1.1, 1.2, 1.4**  
**(Werkstoffgruppe nach ISO/TR 15608:2005-10-01)**  
 Werkstückdicke (mm):  
 Außendurchmesser (mm):  
 Schweißposition: **PB acc. ISO 6947**



Einzelheiten für das Schweißen:

Schweiß-raupe	Prozeß	Durchmesser des Zusatzwerkstoffes	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Stromart/ Polung	Drahtvorschub	Vorschubge-schwindigkeit*	Wärmeein-bringung*
1	135	1,0	255-265	29-30	==	14 m/min		
2	135	1,0	255-265	29-30	==	14 m/min		
3	135	1,0	255-270	30-31	==	13,5 m/min		

Bezeichnung des Zusatzwerkstoffes:  
**DIN EN ISO 14341-A - G 42 4 M G3Si 1**  
 Sondervorschriften für Trocknung: ----  
 Schutzgas / Schweißpulver:  
 - Schutzgas: **EN ISO 14175 – M2.1; 82% Ar + 18% CO2**  
 - Wurzelschutz: ----  
 Gasdurchflußmenge - Schutzgas: **14 l/min**  
 - Wurzelschutz: ----  
 Schweißbadsicherung: ----  
 Vorwärmtemperatur:  
**gem. Vorwärmanweisung A6Z00375067988**  
 Zwischenagentemperatur: ----  
 Wärmenachbehandlung und / oder Aushärten: ----  
 Zeit, Temperatur, Verfahren: ----  
 Erwärmung und Abkühlungsrate\*: ----

Weitere Informationen \*:  
 z.B. Pendeln (maximale Raupenbreite):  
 Pendeln: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit:

Einzelheiten für das Pulsschweißen: ----

Kontaktdüsenabstand / Werkstück: **15 - 20 mm**  
 Einzelheiten für das Plasmaschweißen: ----  
 Brenneranstellwinkel: **0° bis 10°schleppend**

Hersteller  
 Franz Kogler; 19.07.2010

Prüfer oder Prüfstelle  
 Franz Kogler; 19.07.2010

Name, Datum und Unterschrift

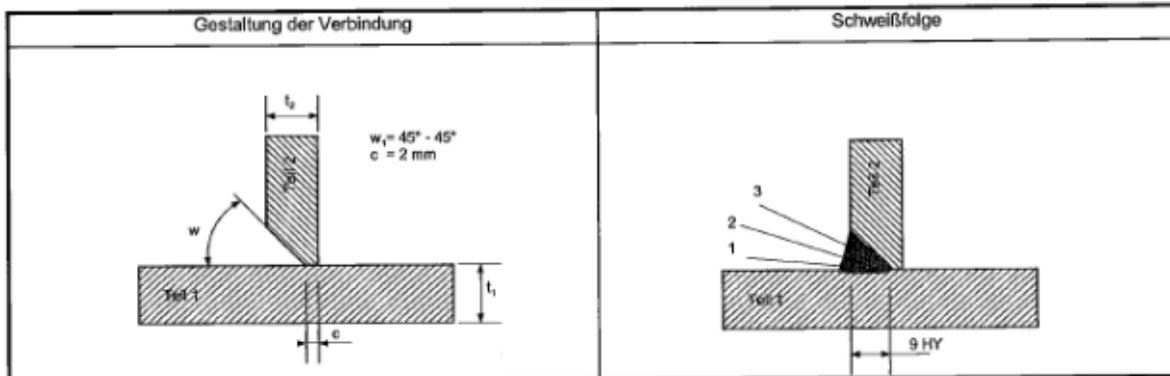
Name, Datum und Unterschrift

\*Falls gefordert



## Schweißanweisung WPS (Welding procedure specification)

Ort.: **SIEMENS AG Werk Graz** Prüfer oder Prüfstelle: **Franz Kogler - EWE**  
 Schweißverfahren der Hersteller: **135-MAGM** Art der Vorbereitung und Reinigung: **Metallisch blank**  
 Beleg-Nr.: **135-hy9-01** Spezifikation des Grundwerkstoffs: **1.1, 1.2, 1.4**  
 WPQR No.: **V-135/W01/201** (**Werkstoffgruppe nach ISO/TR 15608:2005-10-01**)  
 Hersteller: **SIEMENS AG Österreich**  
 Schweißprozess: **Metall-Aktivgasschweißen** Werkstückdicke (mm):  
 Nahtart: **HY9/(a3) T-Stoß** Außendurchmesser (mm):  
 Einzelheiten der Fugenvorbereitung Schweißposition: **PB acc. ISO 6947**  
 (Zeichnung)\*:



Einzelheiten für das Schweißen:

Schweißraupe	Prozess	Durchmesser des Zusatzwerkstoffes	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Stromart/Polung	Drahtvorschub	Vorschubgeschwindigkeit*	Wärmeeinbringung*
1	135	1,0	255-265	29-30	==	14 m/min		
2	135	1,0	255-265	29-30	==	14 m/min		
3	135	1,0	255-270	30-31	==	13,5 m/min		

Bezeichnung des Zusatzwerkstoffes:  
**DIN EN ISO 14341-A - G 42 4 M G3Si 1**

Sondenvorschriften für Trocknung: ----

Schutzgas / Schweißpulver:

- Schutzgas: **EN ISO 14175 - M2.1; 82% Ar + 18% CO2**

- Wurzelschutz: ----

Gasdurchflußmenge - Schutzgas: **14 l/min**

- Wurzelschutz: ----

Schweißbadsicherung: ----

Vorwärmtemperatur:

**gem. Vorwärmanweisung A6Z00375067988**

Zwischenlagentemperatur: ----

Wärmenachbehandlung und / oder Aushärten: ----

Zeit, Temperatur, Verfahren: ----

Erwärmung und Abkühlungsrate\*: ----

Weitere Informationen\*:

z.B. Pendeln (maximale Raupenbreite):

Pendeln: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit:

Einzelheiten für das Pulsschweißen: ----

Kontaktdüsenabstand / Werkstück: **15 - 20 mm**

Einzelheiten für das Plasmaschweißen: ----

Brenneranstellwinkel: **0° bis 10°schleppend**

Hersteller  
 Franz Kogler; 19.07.2010

Prüfer oder Prüfstelle  
 Franz Kogler; 19.07.2010

Name, Datum und Unterschrift

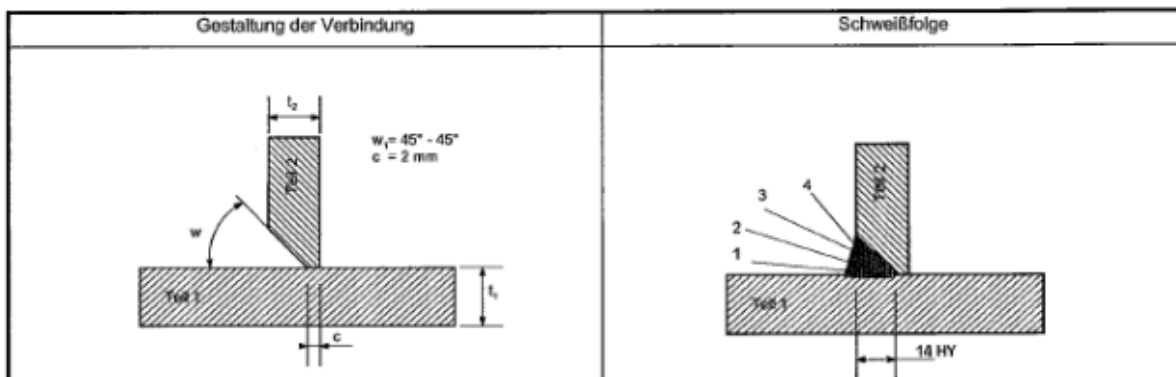
Name, Datum und Unterschrift

\*Falls gefordert

## Schweißanweisung WPS (Welding procedure specification)

Ort.: **SIEMENS AG Werk Graz**  
 Schweißverfahren der Herstellers: **135-MAGM**  
 Beleg-Nr.: **135-hy14-01**  
 WPQR No.: **V-135/W01/201**  
 Hersteller: **SIEMENS AG Österreich**  
 Schweißprozeß: **Metall-Aktivgasschweißen**  
 Nahtart: **HY14/(a3) T-Stoß**  
 Einzelheiten der Fugenvorbereitung  
 (Zeichnung)\*:

Prüfer oder Prüfstelle: **Franz Kogler - EWE**  
 Art der Vorbereitung und Reinigung: **Metallisch blank**  
 Spezifikation des Grundwerkstoffs: **1.1, 1.2, 1.4**  
**(Werkstoffgruppe nach ISO/TR 15608:2005-10-01)**  
 Werkstückdicke (mm):  
 Außendurchmesser (mm):  
 Schweißposition: **PB acc. ISO 6947**



Einzelheiten für das Schweißen:

Schweißraupe	Prozeß	Durchmesser des Zusatzwerkstoffes	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Stromart/ Polung	Drahtvorschub	Vorschubgeschwindigkeit*	Wärmeeinbringung*
1	135	1,0	255-265	29-30	=+	14 m/min		
2	135	1,0	255-265	29-30	=+	14 m/min		
3	135	1,0	255-270	30-31	=+	13,5 m/min		
4	135	1,0	255-270	30-31	=+	13,5 m/min		

Bezeichnung des Zusatzwerkstoffes:  
**DIN EN ISO 14341-A - G 42 4 M G3Si 1**

Sondervorschriften für Trocknung: -----

Schutzgas / Schweißpulver:

- Schutzgas: **EN ISO 14175 - M2.1; 82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>**
- Wurzelschutz: ----

Gasdurchflußmenge - Schutzgas: **14 l/min**  
 - Wurzelschutz: ----

Schweißbadsicherung: ----

Vorwärmtemperatur:

**gem. Vorwärmanweisung A6Z00375067988**

Zwischenlagentemperatur: ----

Wärmenachbehandlung und / oder Aushärten: ----

Zeit, Temperatur, Verfahren: ----

Erwärmung und Abkühlungsrate\*: ----

Weitere Informationen\*:

z.B. Pendeln (maximale Raupenbreite):

Pendeln: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit:

Einzelheiten für das Pulsschweißen: ----

Kontaktdüsenabstand / Werkstück: **15 - 20 mm**

Einzelheiten für das Plasmaschweißen: ----

Brenneranstellwinkel: **0° bis 10°schleppend**

Hersteller  
 Franz Kogler; 19.07.2010

Prüfer oder Prüfstelle  
 Franz Kogler; 19.07.2010

Name, Datum und Unterschrift

Name, Datum und Unterschrift

\*Falls gefordert



**OK AristoRod 12.50**



**Drahtelektrode**

EN ISO 14341-A G 42 4 M G3Si1 / G 38 2 C G3Si1  
 SFA/AWS A5.18 ER70S-8  
 Werkstoffnummer 1.5125  
 (EN 440) (G 42 4 M G3Si1 / G 38 2 C G3Si1)

**Kurzcharakteristik**

Unverkupferte Drahtelektrode der Güte G3Si1 für das MAG-Schweißen mit den Schutzgasgruppen M2, M3, oder C1. Geeignet für das Verbindungsschweißen von allgemeinen Baustählen, Rohrstählen, Schiffbaustählen und Feinkombustählen mit Streckgrenzen bis 420 MPa, eignungsgeprüft für Einsatztemperaturen bis -50°C. Besonders geeignet für die Anwendungen mit hohen Schweißströmen. Im MarathonPac hervorragend für den Betrieb am Roboter geeignet.

**Grundwerkstoffe**

siehe Schweißweiser Abschnitt

P235 / S235 - P420 / S420 u. ä.

**Schutzgase nach EN ISO 14175**

M2, M3, C1

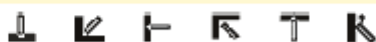
**Durchmesser [mm]**

0,8 1,0 1,2 1,6

**Stromeignung**

**=+**

**Schweißposition**



**Richtanalyse des Drahtes [%]**

C	Si	Mn
0,1	0,85	1,5

**Gütwerte des reinen Schweißgutes**

Wärmebehandlung	Schutzgas	Streckgrenze ReL N/mm <sup>2</sup>	Festigkeit R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	Dehnung A <sub>5</sub> %	Kerbschlagarbeit ISO-V	
					-20°C	-40°C
U	M21	≥ 420	500-640	≥ 20	≥ 47	≥ 47
U	C1	≥ 380	470-600	≥ 20	≥ 47	≥ 47
S(620°C/15h)	M21	≥ 355	440-570	≥ 22	≥ 47	≥ 47

**Leistungsdaten**

Durchmesser 1,0 mm			Durchmesser 1,2 mm			Durchmesser 1,6 mm		
Schweißstrom A	Spannung V	Abschmelzleistung kg/h	Schweißstrom A	Spannung V	Abschmelzleistung kg/h	Schweißstrom A	Spannung V	Abschmelzleistung kg/h
80	18	1,0	120	18	1,3	225	28	2,1
300	32	5,5	380	35	8,0	550	38	11,4

**Spulentyp**

46 (S 200); 69 (BS 300); 93 (MarathonPac); 93-7 (endless MarathonPac); 94 (Jumbo MarathonPac)

**Zulassungen (siehe auch Draht/Pulver-Kombination)**

siehe Abschnitt Q

CE, PRS, ABS, BV, (CWB), LR, DNV, GL, DB, TÜV

Abbildung 112 (36)

# ARCAL 5



**ARCAL**, die Lösung von Air Liquide zum manuellen und maschinellen MAG-Schweißen von unlegierten und niedriglegierten Stählen

● **Anwendungen**

Schutzgas zum manuellen und maschinellen MAG-Schweißen von unlegierten und niedriglegierten Stählen

● **Angaben zum Landtransport**

Druckgasflaschen

Bezeichnung: Verdichtetes Gas, n.a.g.  
UN Nr.: UN 1958  
ADR/RID: Klasse 2 Ziffer 1 A

● **Transportkennzeichen**



2.2: Nicht entzündbare, nicht giftige Stoffe

● **Sicherheitsdatenblätter**

ARCAL 5: Nr. 208022  
Bitte abrufen unter: [produkte.airliquide.de](http://produkte.airliquide.de)

● **Produktspezifikation**

Produktname: ARCAL 5

● **Physikalische Eigenschaften**

Aussehen: farblos  
Geruch: geruchlos  
Relative Dichte, gasf. (Luft = 1): 1,41

● **Eigenschaften**

Zündgrenzen: nicht brennbar  
Gefahrenhinweise: erstickend in hohen Konzentrationen  
Persönliche Schutzmaßnahmen: beim Umgang mit dem Produkt für ausreichende Belüftung sorgen

● **Zylindersaustattung**

Schulterfarbe: leuchtendes Grün (RAL 6018)  
Flaschenventil (200 bar): DIN 477 Nr. 6  
Flaschenventil (300 bar): DIN 477 Nr. 54



Reinheit	Fremdgase	Lieferform	Behälter Bezeichnung	Druck	Inhalt	Materialnummer
18 ± 1,8 % CO <sub>2</sub> in Ar						
k.A.	H <sub>2</sub> O (5 bar) ≤ 40 ppmv	flüssig				I2555NO
	N <sub>2</sub> ≤ 200 ppmv	Zylinder	S10	200 bar	2,38 m <sup>3</sup>	I2505S10R2A001
	O <sub>2</sub> ≤ 50 ppmv		S10	300 bar	3,37 m <sup>3</sup>	I2505S10R3A001
k.A.			M20 ALTOP	200 bar	4,8 m <sup>3</sup>	I2505M20A2A001
			M20 SMARTOP	200 bar	4,8 m <sup>3</sup>	I2505M20S2A001
			L33 ALTOP	300 bar	11,0 m <sup>3</sup>	I2505L33A3A001
			L50 ALTOP	200 bar	11,9 m <sup>3</sup>	I2505L50A2A001
			L50 SMARTOP	200 bar	11,9 m <sup>3</sup>	I2505L50S2A001
			V12	200 bar	143,2 m <sup>3</sup>	I2505V12R2A001
			V12	300 bar	202,4 m <sup>3</sup>	I2505V12R3A001

Produkt ist deutschlandweit verfügbar. Produkt entspricht der Norm DIN EN ISO 14175. Gruppe: M21. Bezeichnung: M21-ArC-18.