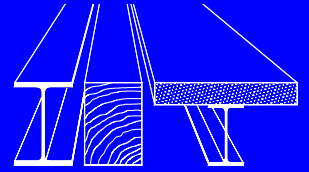


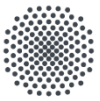
Universität Stuttgart
Institut für Konstruktion und Entwurf
Stahl-, Holz- und Verbundbau



Numerische Untersuchungen von Diagonalrohr-Anschlüssen bei Stahl- und Verbundbrücken

Franz Hägele

Masterarbeit



Numerische Untersuchungen von Diagonalrohr-Anschlüssen bei Stahl- und Verbundbrücken

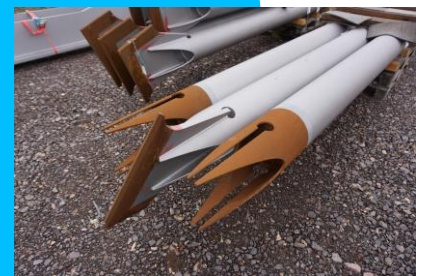
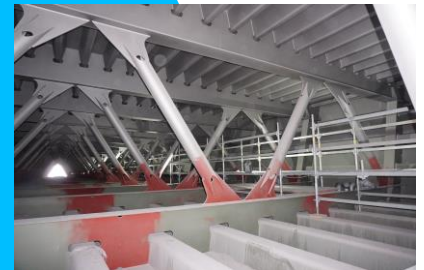
Im Fokus der Masterarbeit stehen Diagonalrohr-Anschlüsse mittels eingestecktem Laschenblech, wie sie üblicherweise bei außen- wie innenliegenden Diagonalen von Brückenquersystemen eingesetzt werden. So kommen derzeit im deutschen Brückenbau verschiedene Ausführungsvarianten zum Einsatz, die grundlegend verschiedene Kerben aufweisen und nicht durch die Normen EN 1993-2 bzw. EN 1993-1-9 geregelt sind.

Innerhalb des aktuellen AiF-DAST-Forschungsprojekts 20452 wurden drei Konstruktionsdetails entwickelt und hinsichtlich der Fertigung optimiert. Ermüdungsversuche wurden dazu bereits an der MPA Stuttgart durchgeführt.

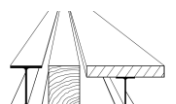
Durch numerische Untersuchungen mit dem Kerbspannungsmodell sollen für die beiden Konstruktionsdetails mit Außendeckel weitere Parameter wie bspw. Rohrdurchmesser, Blechdicke (Knotenblech und Rohrwand), Neigungswinkel der Rohrabschrägung, Geometrie des Knotenblechs und der Knotenblechspitze genauer analysiert werden.

Ziel der Masterarbeit ist die Ableitung von Kerbfaktoren und die Identifikation des Einflusses bestimmter geometrischer Parameter. Die Konstruktionsdetails sollen hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit optimiert werden und die Ergebnisse für die Ausführungs- und Bemessungsempfehlungen aufbereitet werden.

Masterarbeit



Stahlbau



Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit "Numerische Untersuchungen von Diagonalrohr-Anschlüssen bei Stahl- und Verbundbrücken" selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und bei der Erstellung dieser Arbeit die einschlägigen Bestimmungen, insbesondere zum Urheberrechtsschutz fremder Beiträge, eingehalten habe. Es wurden nur die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt.

Soweit meine Arbeit wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen (z. B. Bilder, Zeichnungen, Textpassagen) enthält, erkläre ich, dass diese Beiträge als solche unter Angabe der Quellen an der betreffenden Stelle gekennzeichnet sind (z. B. Zitat, Quellenangabe) und ich eventuell erforderlich gewordene Zustimmungen der Urheber zur Nutzung dieser Beiträge in meiner Arbeit eingeholt habe.

Stuttgart, den 30.06.2021

Franz Hägele

Bewertung

Die vorliegende Arbeit wurde mit der folgenden Note bewertet:

Note

Stuttgart, den 30.06.2021

Institutsstempel

Unterschrift Institutsleitung

Haftungsausschluss

Obwohl die Arbeit nach bestem Wissen und Gewissen erstellt wurde, übernimmt weder der Verfasser dieser Arbeit noch die Universität Stuttgart bzw. das Institut für Konstruktion und Entwurf Haftung für den Inhalt der Arbeit. Sollte direkt durch Nutzung oder indirekt infolge der Nutzung von Ergebnissen oder Teilergebnissen der Arbeit ein Schaden entstehen, ist jeglicher Schadensersatzanspruch ausgeschlossen. Mit der Verwendung von Ergebnissen aus dieser Arbeit gilt dieser Haftungsausschluss als akzeptiert.

Veröffentlichung oder Verbreitung der Arbeit

Weder der Verfasser dieser Arbeit noch die Universität Stuttgart bzw. das Institut für Konstruktion und Entwurf wird die Arbeit ohne schriftliche Zustimmung des Instituts für Konstruktion und Entwurf bzw. des Verfassers veröffentlichen. Insbesondere, aber nicht ausschließlich, sind hiermit kommerzielle Zwecke und eine anderweitige Veröffentlichung oder Verbreitung in digitaler oder gedruckter Fassung gemeint. Die Weitergabe im privaten Rahmen oder zu Bewerbungszwecken des Verfassers ist von dieser Regelung nicht betroffen. Bei Arbeiten, die in Zusammenarbeit mit Dritten entstanden sind, ist auch die Weitergabe an diese von dieser Regelung nicht betroffen.

Danksagung

Mein Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann für die Möglichkeit diese Arbeit am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart durchführen zu dürfen.

Im Laufe der Arbeit konnte ich mir viele fachliche Kenntnisse im Bereich der Finiten-Elementen-Methode und im Bereich des Themas Ermüdung aneignen. Dafür möchte ich mich für die kompetente, freundliche und hilfsbereite Betreuung bei Frau M.Sc. Lisa-Marie Götz bedanken.

Besonderen Dank gilt meiner Familie für die Unterstützung während meiner gesamten Studienzeit.

Inhaltsverzeichnis

SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG	I
BEWERTUNG.....	I
HAFTUNGSAUSSCHLUSS.....	III
VERÖFFENTLICHUNG ODER VERBREITUNG DER ARBEIT	III
DANKSAGUNG	V
INHALTSVERZEICHNIS.....	VII
1 EINFÜHRUNG	1
2 STAND DER TECHNIK UND GRUNDLAGEN.....	3
2.1 Ermüdung	3
2.1.1 Allgemeines	3
2.1.2 Beanspruchung.....	4
2.1.3 Wöhlerkurve.....	5
2.1.4 Kerbwirkung.....	6
2.1.5 Einflüsse	7
2.2 Nachweiskonzepte	10
2.2.1 Nennspannungskonzept.....	10
2.2.2 Strukturspannungskonzept.....	11
2.2.3 Kerbspannungskonzept.....	12
2.3 Richtlinien und Normen	13
2.3.1 DIN EN 1993-1-9, Ermüdung [1]	13
2.3.2 prEN 1993-1-14 Design assisted by finite element analysis Draft Version [3].....	17
2.3.3 DVS-Merkblatt 0905 [2] und Vergleichsmodell nach Radaj [13]	19
2.3.4 Zusammenfassung	25
3 BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN.....	26
3.1 Experimentelle Untersuchungen von Zirn [24]	26
3.2 Experimentelle Untersuchungen von Hanswille [18]	27
3.3 Experimentelle und numerische Untersuchungen von Baptista [16].....	30
4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN DIAGONALROHR-ANSCHLÜSSEN	36
4.1 Allgemeines zum AiF-DASSt Forschungsvorhaben[21]	36
4.2 Geometrie der Versuchsserien.....	36
4.3 Experimentelle Untersuchungen	42
4.4 Numerische Untersuchungen des Versuchskörpers 1	45

5	NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN - MODELLBILDUNG	49
5.1	Auswertung der Makroschliffe	49
5.1.1	Versuchsserie 2	49
5.1.2	Versuchsserie 3	50
5.2	Modellierung	51
5.3	Materialeigenschaften	53
5.4	Kerben	54
5.5	Verifizierung und Validierung.....	55
5.5.1	Sensitivitätsanalyse	55
5.5.2	Vergleichsmodell nach Radaj.....	58
5.5.3	Validierung anhand der experimentellen Untersuchungen	60
6	PARAMETERSTUDIE	66
6.1	Allgemeines	66
6.2	Deckel.....	68
6.3	Schweißnähte	71
6.4	Knotenblech.....	78
6.5	Rohr	94
6.6	FE-Untersuchungen an praxisnahen Beispielen	106
7	AUSFÜHRUNGSVORSCHLAG.....	111
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	113
9	LITERATURVERZEICHNIS	116
10	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	118
11	TABELLENVERZEICHNIS	123
12	ANHANG	124
13	DATEN-CD	125

1 Einführung

In Deutschland entstanden die meisten großformatigen Autobahnbrücken gemäß der wirtschaftlichen Entwicklung in den Sechziger- bis Achtzigerjahren des zwanzigsten Jahrhunderts. Bei einer durchschnittlich vorgesehenen Lebensdauer von 100 Jahren haben die meisten deutschen Brücken diese bereits zur Hälfte erreicht. Hauptsächlich wegen eines ständig ansteigenden Schwerlastverkehrs wird das Nachrechnen, Überprüfen und Instandhalten dieser Brücken in Zukunft eine wichtige Rolle einnehmen. Insbesondere das bei vielen Lastwechseln entstehende Ermüdungsversagen ist von hoher Relevanz. [25]

Besonders beanspruchte Bauteile sind Diagonalrohr-Anschlüsse, die zum Beispiel im Brückenquersystem zur Aussteifung von Hohlkästen oder zur Abstützung der Fahrbahn in großformatigen Stahl- und Verbundbrücken eingesetzt werden, siehe Abb. 1-1. Unter den verschiedenen Ausführungen sind besonders Diagonalen mit runden Querschnitten verbreitet. Die Rohrquerschnitte sind an den Enden geschlitzt. In diesen Schlitz wird ein Knotenblech eingeschoben. Die Verbindung zwischen Knotenblech und Rohr kann mit unterschiedlichen Schweißverbindungen ausgeführt werden. Für außenliegende Anschlüsse werden zur Abdichtung gegen eindringendes Wasser häufig aufgeschweißte Deckel verwendet.



Abb. 1-1 Rohranschlüsse an Brücken, Schiersteinerbrücke (links) [27] und Lenttalbrücke (rechts) [26]

Zyklische Belastung führt zu Ermüdung, die Risseinleitung, Rissfortschritt und damit Werkstoffschädigung bedeutet. Aufgrund von Kerben im Bauteil entstehen lokale Spannungserhöhungen, die besonders anfällig für Ermüdungsrisse sind. Normativ wird die Ermüdungsfestigkeit in der DIN EN 1993-1-9 [1] über das Nennspannungskonzept geregelt. Sie beinhaltet einen Kerbfallkatalog, in welchem verschiedene Details einer maximal aushaltbaren Spannung unter Ermüdungsbeanspruchung zugeordnet werden. Diese wird bei zwei Millionen Schwingspielen dargestellt. Für Diagonalrohr-Anschlüsse werden zwei Kerbfälle definiert, die einen Rohr-Blech-Anschluss mit unterschiedlich abgeschrägtem Rohr angeben, dieser wird mit einem Freischnitt am Ende des Knotenblechs dargestellt. Für einen Abschrägungswinkel des Rohrs von $\alpha \leq 45^\circ$ wird ein Kerbfall von 71, für einen Winkel $\alpha > 45^\circ$ wird ein Kerbfall von 63 angegeben.

Die in der DIN EN 1993-1-9 [1] aufgeführten Kerbfälle sind für praxisnahe Ausführungen unzureichend. Parameter wie Blechdicken, Rohrdurchmesser oder auch die Art der Schweißnaht

sind nicht ausführlich genug beschrieben. Es zeigt sich in bisherigen Untersuchungen, dass die Ermüdungsfestigkeit zu hoch veranschlagt wird, und von einer niedrigeren Ermüdungsfestigkeit ausgegangen werden kann. [16]

Im Rahmen des Forschungsprojekts AiF-DASt „Praxisgerechte Gestaltung von Diagonalrohr-Anschlüssen im Stahl- und Verbundbrückenbau“ [21] wurden experimentelle und numerische Analysen zur Ermüdungsfestigkeit von Diagonalrohr-Anschlüssen durchgeführt. Es wurden drei typische Diagonalrohr-Anschlüsse aus Details des Brückenbaus und bisherigen Forschungen abgeleitet. An der Materialprüfanstalt der Universität Stuttgart wurden jeweils acht fertigungsgleiche Versuchskörper Ermüdungsversuchen unterzogen. Die Durchführung fand bei unterschiedlichen Spannungsschwingbreiten statt. Die Versuche wurden statistisch ausgewertet und für den jeweiligen Versuchskörper in Kerbfallkategorien abgeleitet. Auch konnte durch das Erstellen von Makroschliffen die Bruchmechanik der Diagonalrohr-Anschlüsse untersucht werden.

In dieser Arbeit werden die Diagonalrohr-Anschlüsse numerisch mithilfe des Kerbspannungskonzeptes untersucht. Dafür werden zwei Detailanschlüsse modelliert und mit der Finite-Elemente-Methode untersucht. Der Anschluss der Versuchsserie 1 wurde im Laufe des Forschungsprojekts bereits numerisch untersucht. Dieser bestand aus einem abgeschrägten und geschlitzten Rohr, das mit einem Freischnitt versehen wurde. In das geschlitzte Rohr wurde ein Knotenblech eingeschoben. Die Anschlüsse der Versuchsserie 2 mit einem geraden Deckel und einer HY-Naht und der Versuchsserie 3 mit einem abgeschrägten Deckel und einer HV-Naht, bestanden aus einem geschlitzten Rohr mit eingeschobenem Knotenblech, sie werden in dieser Arbeit modelliert und numerisch untersucht. Anhand eines Vergleichsmodells nach Radaj [13] werden die verwendeten Methoden und die Netzverfeinerung des Modells validiert. In den experimentellen Untersuchungen wurden die Versuchskörper mit Dehnmessstreifen versehen, die zur Validierung der Modelle verwendet werden.

Ziel der Arbeit ist es, Einflussgrößen, die sich auf die Kerbspannung der Details auswirken, zu untersuchen. Dabei sollen mögliche Potentiale zu einer Verbesserung des Ermüdungsverhaltens aufgezeigt werden. Dies wird in einer Parameterstudie durchgeführt. Untersucht werden dabei insbesondere Größen wie Schweißnähte, Blechdicken, Geometrie des Knotenblechs und Rohrabmessungen. Am Ende der Arbeit wird mithilfe der untersuchten Größen ein Ausführungsvorschlag für die Anschlussdetails erarbeitet. Dieser soll als Grundlage für die Planungshilfen der Richtlinie für Ingenieurbauten (RE-ING) [5] der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) dienen.

2 Stand der Technik und Grundlagen

2.1 Ermüdung

2.1.1 Allgemeines

Ermüdung entsteht unter zeitlich veränderlicher Beanspruchung, diese wirkt zyklisch auf das Bauteil. Die Beanspruchung hat einen beliebigen, nicht konstanten Verlauf. Durch wechselnde Spannungen im Bauteil wird dieses geschädigt. Es entstehen Formänderungen, die zu Rissbildungen führen. Die Risseinleitung entsteht an Geometrie-, Belastungs- oder Materialänderungen, die Spannungsspitzen hervorrufen, auch Fehlstellen können für Risseinleitung verantwortlich sein. Auswirkungen auf das Bauteil haben zudem Umgebungseinflüsse wie Rauigkeit, Korrosion und Temperatur. Bei zunehmenden Lastwechseln wird die Risseinleitung durch die Rissausbreitung bis zum Restbruch des Bauteils fortgeführt. Nach der Risseinleitung wächst der Riss, je mehr Schwingspiele auf das Bauteil wirken. Dabei wird von einem Versagen gesprochen, wenn ein Anriss oder ein vollständiges Bauteilversagen durch einen Restbruch oder auch Gewaltbruch stattgefunden hat. Auch schon weit unterhalb der Zugfestigkeit und der Streckgrenze des Materials kann das Versagen eintreten. Es wird davon ausgegangen, dass bei einer höheren Beanspruchung eine kürzere Lebensdauer eintritt. Einflüsse auf die Lebensdauer haben der Werkstoff, die Beanspruchung und die Geometrie des Bauteils. [15, 19]

Das Risswachstum beginnt im Mikrobereich und breitet sich weiter bis in den Makrobereich aus, in dem es sichtbar wird. Im mikroskopischen Bereich bilden sich Risse durch Ermüdung meist an der Oberfläche, es tritt ein zyklisches Fließen auf. In Abb. 2-1 sind die Phasen des zyklischen Fließens dargestellt. Während des ersten Halbzyklus a) erzeugt eine Verschiebung Δs eine Gleitstufe an der Oberfläche. Im darauffolgenden entlastenden Halbzyklus b) wird eine weitere Gleitebene erzeugt und initiiert bei fortlaufenden Zyklen ein Gleitband mit Intrusionen und Extrusionen. [15]

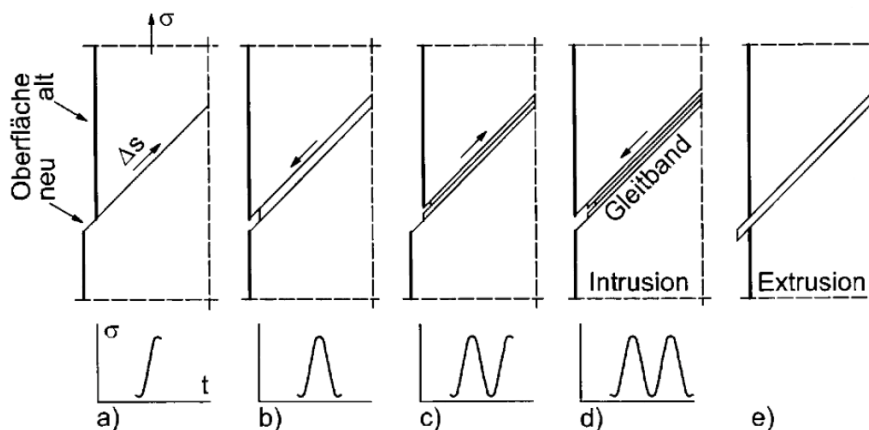


Abb. 2-1 Gleitbänder [15]

Im makroskopischen Bereich prägen sich mehrere Rissansatzstellen aus, die unter radialen Stufen zusammenwachsen. Während der Ausbreitung über die Rissfront bilden sich Rastlinien. Diese breiten sich senkrecht zur zyklischen Hauptspannung bis letztlich zum Versagen des Bauteils aus. [15]

2.1.2 Beanspruchung

Die zeitlich veränderliche Beanspruchungsart der Ermüdung gliedert sich in Ober-, Mittel- und Unterspannung. Die Belastung wiederholt sich determinierend, periodisch oder aperiodisch. Eine Wiederholung der Beanspruchung ist das Schwingenspiel N , siehe Abb. 2-2. Die Oberspannung σ_o beziehungsweise Unterspannung σ_u gibt die maximale und minimale Spannung an, sie berechnet sich nach Gleichung (2.1) und (2.2). Die Mittelspannung σ_m errechnet sich nach der Gleichung (2.3) aus dem Mittelwert von Oberspannung und Unterspannung. Ausgehend von der Mittelspannung ist die Amplitude der zyklischen Belastung der Spannungsausgang σ_a , er errechnet sich nach Gleichung (2.4). Aus der Differenz zwischen Ober- und Unterspannung ergibt sich die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$, siehe Gleichung (2.5). Das Spannungsverhältnis R aus Unter- und Oberspannung wird nach Gleichung (2.6) berechnet. [6, 15]

$$\sigma_o = \sigma_m + \sigma_a \quad (2.1)$$

$$\sigma_u = \sigma_m - \sigma_a \quad (2.2)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_o + \sigma_u) \quad (2.3)$$

$$\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_o - \sigma_u) \quad (2.4)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_o - \sigma_u \quad (2.5)$$

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad (2.6)$$

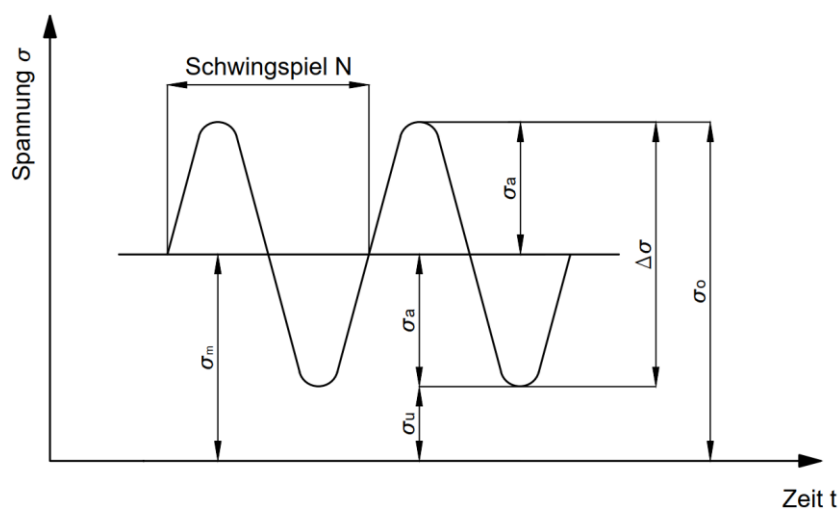


Abb. 2-2 Beanspruchung [6, 15]

Im Dauerschwingversuch wird die Ermüdungsfestigkeit eines Bauteils ermittelt. Die Beanspruchungen des Dauerschwingversuchs unterteilen sich in drei Bereiche, siehe Abb. 2-3. Bei einer negativer Mittelspannung, die größer ist als der Spannungsausschlag, wird der Druckschwellbereich definiert. Tritt eine Wechselbeanspruchung auf, wirkt die Beanspruchung sowohl als Druckspannung als auch Zugspannung. In diesem Fall ist der Wert der Mittelspannung kleiner als der Spannungsausschlag. Im Zugschwellbereich ist die positive Mittelspannung größer als der Spannungsausschlag.

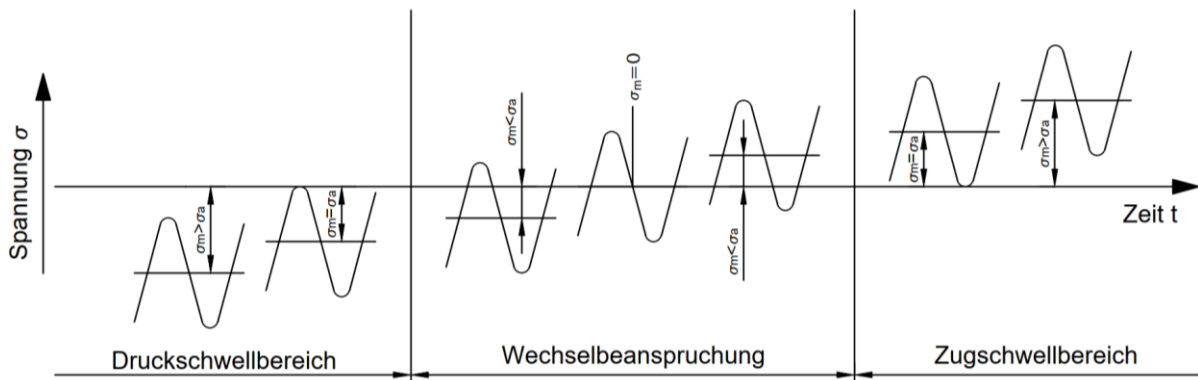


Abb. 2-3 Beanspruchungsbereiche [15]

2.1.3 Wöhlerkurve

Erste Untersuchungen zum Ermüdungsversagen führte A. Wöhler bereits Ende des 19. Jahrhunderts durch. Im Wöhlerversuch werden mehrere Prüfkörper mit gleichen Werkstoff-, Geometrie- und Bearbeitungseigenschaften untersucht. Diese können werkstoffbasierend oder bauteilbasierend sein. Bei einem werkstoffbasierenden Versuch werden Materialeigenschaften untersucht. Bei einem bauteilbasierenden Versuch werden zusätzlich Einflüsse durch Spannungserhöhungen, Schweißimperfectionen und auch materielle Einflüsse miteinbezogen. Der Versuch wird mit unterschiedlichen Spannungsschwingbreiten oder Amplituden durchgeführt. Dabei wird entweder das Spannungsverhältnis R zwischen Ober- und Unterspannung oder die Mittelspannung konstant gehalten. Die zeitlich veränderliche Last wird in einem sinusförmigen Verlauf auf das Bauteil aufgebracht. Der Versuch wird bis zu einem Versagenkriterium des Bauteils durchgeführt, das ein vollständiges Versagen oder ein Riss mit einer bestimmten Länge sein kann.

Aus den Ergebnissen der einzelnen Versuche resultiert durch Zusammenfügen die Wöhlerkurve. Sie wird auf einer doppelt logarithmischen Skala aufgetragen. Auf der Ordinate wird die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ und auf der Abszisse die Anzahl der ertragenen Schwingspiele N bis zum Bruch aufgetragen. [9]

Die Wöhlerlinie definiert sich nach Gleichung (2.7) und gliedert sich in Kurzzeitfestigkeit, Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit, siehe Abb. 2-4.

$$\log N = \log a - m \log \Delta\sigma \quad (2.7)$$

Die Steigung wird mit m , die Lage mit a und die Spannungsschwingbreite mit $\Delta\sigma$ determiniert.

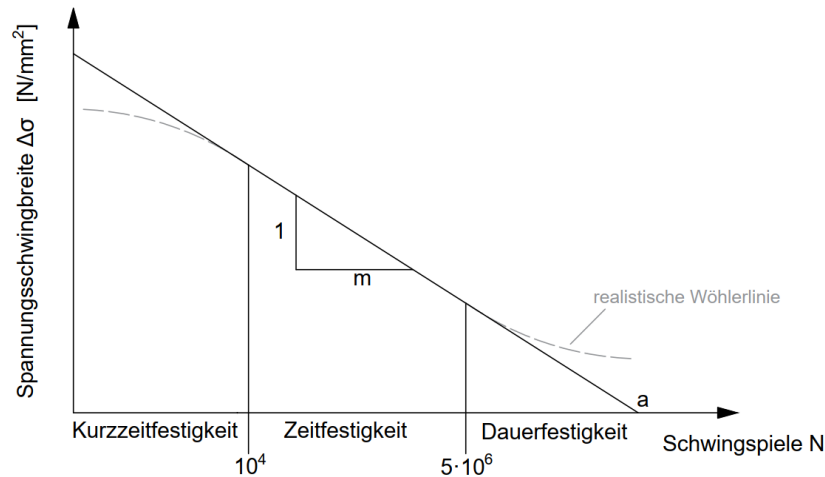


Abb. 2-4 Wöhlerlinie [9]

Wird ein Bauteil mit einer hohen Spannungsschwingbreite belastet, kommt es schon bei geringen Lastwechseln zu einem Versagen. Dieser Bereich ist die Kurzzeitfestigkeit. Sie reicht bis etwa $N = 10^4$ Schwingspiele. In diesem Segment finden größtenteils plastische Dehnungen statt. Die Zeitfestigkeit liegt zwischen $N = 10^4$ und $N = 5 \cdot 10^6$ Schwingspielen, es tritt überwiegend eine elastische Dehnung auf. Bauteile in diesem Bereich ertragen bei geringeren Spannungsschwingbreiten mehr Lastspiele. Die Wöhlerkurve fällt annähernd linear ab. Die Dauerfestigkeit wird ab $N = 5 \cdot 10^6$ Schwingspielen erreicht. Ein Bauteil kann, unterhalb einer gewissen Spannungsschwingbreite, mit theoretisch unendlich vielen Lastwechseln beansprucht werden, vergleiche Abb. 2-4 realistische Wöhlerlinie. In diesem Bereich kommt es zu keinem Versagen. [9, 12]

Die Wöhlerkurve wird von der Steigung m und der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_c$ beschrieben. Dabei wird die charakteristische Ermüdungsfestigkeit bei $N_c = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen definiert. Die Steigung m im Bereich der Zeitfestigkeit ist von mehreren Parametern abhängig, wie zum Beispiel vom Werkstoff oder auch von der Schärfe der Kerbe. Aus einem hohen Spannungsanstieg resultiert eine scharfe Kerbe, eine milde aus einem geringen. Für Schweißverbindungen wird die Steigung der Wöhlerkurve mit $m = 3$ angenommen. [12]

2.1.4 Kerbwirkung

Kerben führen zu Spannungsspitzen im Bauteil und beeinflussen die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils wesentlich. Die Spannungserhöhungen resultieren aus Veränderungen der Geometrie, der Werkstoffeigenschaften oder der Belastung und gliedern sich in Formkerben, Werkstoffkerben und Belastungskerben, siehe Abb. 2-5. Sie können einzeln oder auch in

Kombination auftreten. Ein Beispiel einer Werkstoffkerbe ist die Schweißnaht. An dieser verändern sich die Materialeigenschaften durch thermische Bearbeitung. Die Fließgrenze ist über den Materialübergang nicht konstant. Die Formkerbe wird durch eine Veränderung der Geometrie hervorgerufen. Bei ihr sind große Oberflächenkrümmungen charakteristisch, die zum Beispiel in den in dieser Arbeit untersuchten Anschlussdetails vorkommen können. Es unterscheiden sich milde und scharfe, flache und tiefe oder auch äußere und innere Kerben. Die Belastungskerbe tritt bei konzentrierten Lasten auf. [10, 15]

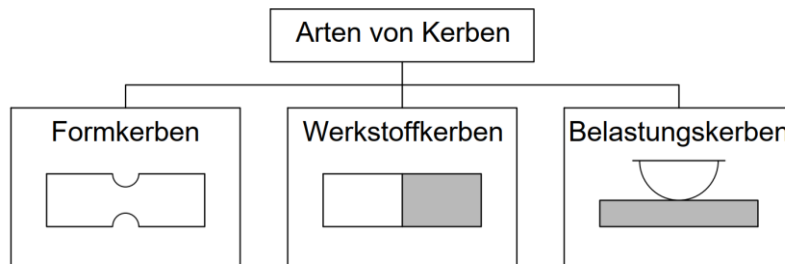


Abb. 2-5 Arten an Kerben [15]

Durch Kerben werden örtliche Spannungserhöhungen hervorgerufen, die zum Versagen des Bauteils führen können. Der Kerbfaktor k_f wird nach Gleichung (2.8) berechnet und gibt das Verhältnis zwischen Kerbspannung σ_k und Nennspannung σ_n an. Die Kerbspannung definiert die Spannungserhöhung mit dem größten Wert an der Kerbe. Die Spannung, die ohne Einflüsse aus Geometrieänderung, Werkstoffeigenschaften oder Belastung im Bauteil wirkt, ist die Nennspannung. Der Kerbfaktor berechnet sich unter Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens. [15]

$$k_f = \frac{\sigma_k}{\sigma_n} \quad (2.8)$$

Der Kerbfaktor kann durch unterschiedliche Methoden bestimmt werden. Über experimentelle Versuche werden Nenn- und Kerbspannungen mittels Dehnmessstreifen bestimmt. Durch numerische Berechnung mit Finite-Elemente-Methoden werden lokale Spannungserhöhungen bestimmt und mit der aufgetragenen Nennspannung zum Kerbfaktor verrechnet. [13]

2.1.5 Einflüsse

Werkstoffeinfluss

Der Werkstoff beeinflusst das Ermüdungsverhalten. Durch eine Erhöhung der Zugfestigkeit kann eine verbesserte Dauerfestigkeit erreicht werden. Es verlängert sich die Rissbildungsphase was eine längere Lebensdauer ermöglicht. Durch eine Kornverfeinerung, Mischkristallbildung, Ausscheidungshärtung und Verformungsverfestigung kann die Zugfestigkeit des Werkstoffes erhöht werden. Bei geschweißten Bauteilen hat die Werkstoffart nur einen geringen Einfluss. Die Lebensdauer geschweißter Bauteile ist maßgeblich von der

Risswachstumsphase abhängig. Der Einfluss des Werkstoffs zeigt sich für das Ermüdungsverhalten als weniger maßgebend. [8, 15]

Größeneinfluss

Auch die Größe beeinflusst die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils negativ. Bauteile mit geringeren Querschnittsabmessungen können eine höhere Ermüdungsfestigkeit als Bauteile mit größeren Querschnittsabmessungen aufweisen. Einen ähnlichen Einfluss auf das Bauteil hat die Länge der Probe. Bei stark gekerbten Bauteilen beeinflussen diese Effekte das Bauteil in größerem Maße. Der Hintergrund für den Größeneinfluss auf die Ermüdungsfestigkeit sind unterschiedliche Gefüge in der Probe. Bei kleineren Bauteilen sind weniger nichtmetallische Einschlüsse, die durch die Herstellung entstehen vorhanden. Bei Bauteilen mit großen Volumen ist die statistische Wahrscheinlichkeit, des Auftretens einer Fehlstelle höher als bei kleinen Proben. Bei spröden und duktilen Werkstoffen hat dies einen großen Einfluss, auch bei einem elastischen Bauteilverhalten wird der Größeneinfluss verstärkt. [11, 20]

Oberflächeneinfluss

Kennwerte von Werkstoffen werden oft an polierten Proben untersucht. Diese Beschaffenheiten können in der Praxis abweichen. Der Oberflächeneinfluss beeinträchtigt das Ermüdungsversagen des Bauteils stark, weil Risse meist an der Oberfläche des Bauteils entstehen. Bei Oberflächen, die durch Korrosion eine große Rauigkeit aufweisen, kann zum Beispiel ein schnelleres Ermüdungsversagen auftreten. Dieser Einfluss kann in Oberflächenbeschaffenheit, mechanische und metallurgische Veränderungen, Eigenspannungen durch Schleifen und Korrosion unterteilt werden. Eine Bearbeitung der Oberfläche kann die Festigkeit steigern. Es verringern sich die Mikrofehler der Oberfläche, was einen positiven Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat. [15]

Korrosionseinfluss

Korrosion ist ein Einfluss, der das Bauteil schädigt und dadurch das Ermüdungsverhalten stark beeinträchtigt. Dabei kommt es an der Oberfläche zu geometrischen Änderungen, deren Ursache chemische oder elektrochemische Vorgänge sind. Der so entstehende Materialabtrag kann zu einem vorzeitigen Versagen des Bauteils führen. [11]

Einfluss durch Eigenspannungen

Durch Zwänge im Bauteil entstehen Eigenspannungen. Diese überlagern sich mit den Schnittgrößen aus äußeren Einwirkungen des Bauteils. Durch Temperaturänderungen im Herstellungsprozess, zum Beispiel durch Schweißen hervorgerufen, entsteht Wärmedehnung, die zu Eigenspannungen führt. Auch weitere Änderungen wie chemische Umsetzung oder Kaltverformung können während des Herstellungsprozesses und des Einbaus zu großen Eigenspannungen führen. Diese können jedoch schlecht kalkuliert werden. Während des Betriebs des Bauteils kann sich durch eine zyklische Last eine Relaxation der Eigenspannungen ergeben. Da sich Risse aus Ermüdung meist an der Oberfläche bilden, haben Eigenspannungen an der

Oberfläche einen großen Einfluss auf das Ermüdungsversagen. Auch kommen Extremwerte an Spannungen häufig im Oberflächenbereich vor. [15]

Temperatureinfluss

Der Einfluss der Temperatur auf das Ermüdungsverhalten kann vernachlässigt werden. Der Anwendungsbereich im Brückenbau liegt außerhalb des Beeinflussungsbereiches von Temperatur auf Stahl und ist nicht maßgebend. [11]

Einfluss der Schweißnaht

Die Schweißnaht ist bei den untersuchten Details einer der maßgebenden Faktoren für die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils. In der Schweißnaht können durch den Schweißprozess Risse, Gaseinschlüsse oder ähnliches entstehen, vergleiche Abb. 2-6 und Abb. 2-7. Es resultieren Imperfektionen in der Schweißnaht, die zu einem schlechteren Ermüdungsverhalten führen können. Zwischen der Schweißnaht und dem Bauteil kann es zu Fehlern in der Verbindung kommen, die sich mindernd auf die Ermüdungsfestigkeit auswirken. Schweißfehler können auch Verbesserungen der Ermüdungsfestigkeit bewirken. Eine nichtanliegende Schweißbadsicherung kann zur Folge haben, dass mehr Schweißgut eingebracht wird. Abb. 2-7 illustriert, die Mehreinbringung von Schweißgut bei fehlender Schweißbadsicherung.

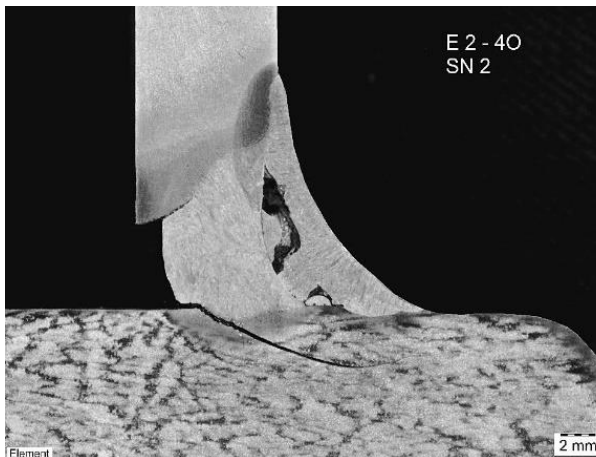


Abb. 2-6 Schweißimperfektionen HY-Naht [21]

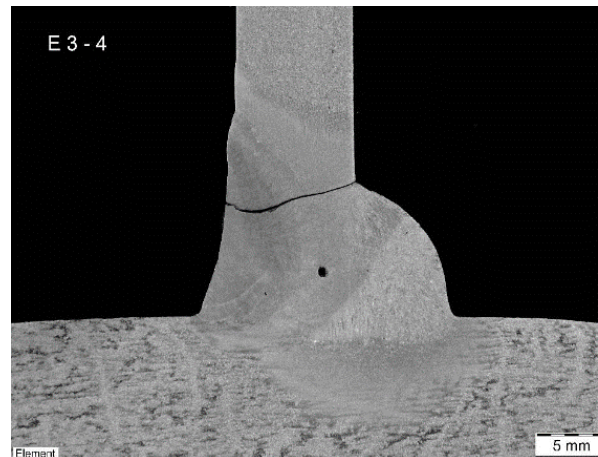


Abb. 2-7 Schweißimperfektionen HV-Naht [21]

Die Geometrie der Schweißnaht variiert in der Praxis stark von den theoretisch angenommenen Werten. Nicht nur bei der Betrachtung von Schweißnähten baugleicher Versuchskörper, sondern auch entlang einer einzelnen Schweißnaht streuen die geometrischen Abmessungen. Diese können zum Beispiel Nahtdicke, Flankenwinkel, Einbrandkerben, Nahtüberhöhung und auch die Werkstoffeigenschaften sein [2]. Besonders an schwer zugänglichen Bereichen entstehen Fehler bzw. Abweichungen häufiger. Ein Beispiel kann eine Umschweißung eines Knotenblechs sein. Nach DVS-Merkblatt 0905 [2] können für eine Berechnung mit der Finite-Elemente-Methode entsprechende Annahmen getroffen werden.

Zusammenfassung

Das Bauteil ist vielen Einflüssen im Hinblick auf die Ermüdungsfestigkeit ausgesetzt, die für Untersuchungen nicht immer genau kalkuliert und dargestellt werden können. Der Einfluss aus Temperatur wird als nicht signifikant für die Ermüdungsfestigkeit eingestuft. Der Größeneinfluss, der Oberflächeneinfluss, der Korrosionseinfluss und der Einfluss aus Eigenspannungen wirken sich auf das Ermüdungsverhalten des Bauteils aus und können die Lebensdauer des Bauteils verringern. Die Schweißnaht hat durch ihre fertigungstechnischen Unsicherheiten den größten Einfluss. Deshalb werden für eine numerische Untersuchung die Nahtgeometrie und deren Imperfektionen den Werkplänen und Makroschliffen entnommen und in einer idealisierten Nahtgeometrie modelliert. Weitere Einflüsse werden im Kerbspannungskonzept über die Material-Wöhlerlinie berücksichtigt, siehe Abschnitt 2.2.3.

2.2 Nachweiskonzepte

Zur Nachweisführung existieren verschiedene Methoden. Im Folgenden werden das Nenn-, Struktur-, und Kerbspannungskonzept näher erläutert. Abb. 2-8 stellt die Nenn-, Struktur-, und Kerbspannung an einem Bauteil dar. Dieses besteht aus zwei Elementen, welche durch Schweißnähte verbunden sind. Eine Kraft F belastet das Bauteil. Die Nennspannung ist konstant, sie wird mit einer elastischen Spannungstheorie errechnet, eine Spannungserhöhung an der Schweißnaht wird nicht mitberücksichtigt. Die Strukturspannung an der Schweißnaht wird über eine Gerade und mithilfe von Referenzpunkten ermittelt. Die Kerbspannung zeigt einen realitätsnahen Spannungsverlauf an der Schweißnaht.

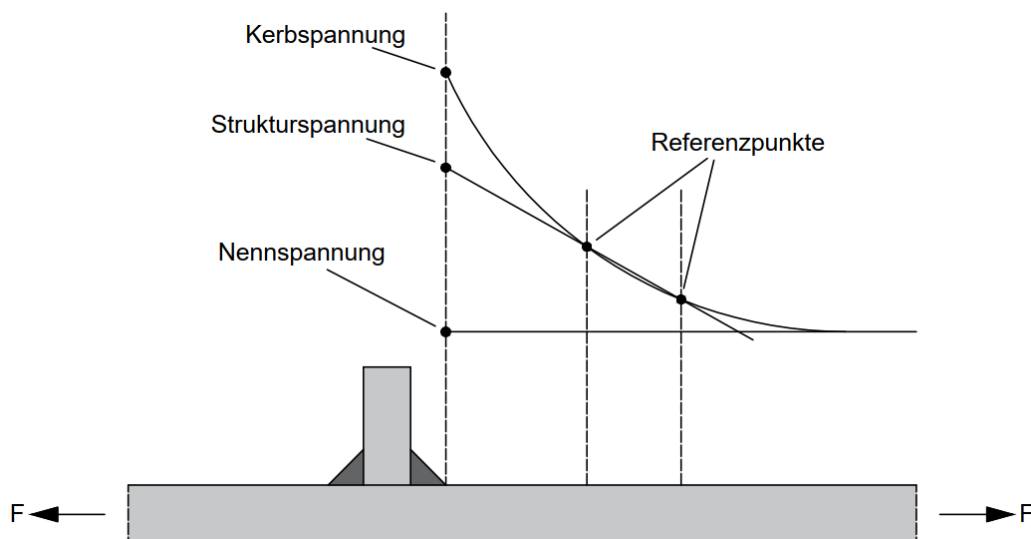


Abb. 2-8 Schematische Darstellung des Nenn-, Struktur-, Kerbspannungskonzeptes [9]

2.2.1 Nennspannungskonzept

Das Nennspannungskonzept wird häufig wegen seiner einfachen Handhabung verwendet. Der Nachweis wird mit der maximal auftretenden Spannungsamplitude σ_{Nenn} im maßgebenden

Querschnitt geführt. Lokale Spannungserhöhungen und eine detaillierte Geometrie werden nicht berücksichtigt. Der Nennspannungsnachweis wird mit der passend zugehörigen Wöhlerlinie geführt, siehe Gleichung (2.9). Aus der Wöhlerlinie ergibt sich die zulässige Spannung $\sigma_{Nenn,zul}$. Diese ist zum Beispiel dem Eurocode 3 Teil 1-9 [1] zu entnehmen, der typische Details mit zulässigen Spannungen enthält. Das Nennspannungskonzept enthält Einflüsse wie Werkstoff, Geometrie und Oberfläche. Diese werden in der Wöhlerlinie berücksichtigt. Jedoch werden Einflüsse aus Defekten oder Schweißnähten nicht in die Betrachtung miteinbezogen. Die Nennspannung wird in der Regel im unbeeinflussten Querschnitt bestimmt und der zulässigen Spannung gegenübergestellt. [15, 17]

$$\sigma_{Nenn} \leq \sigma_{Nenn,zul} \quad (2.9)$$

Der Nachweis kann auch über die Schwingspiele N_{Nenn} und $N_{Nenn,zul}$ geführt werden, siehe Gleichung (2.10).

$$N_{Nenn} \leq N_{Nenn,zul} \quad (2.10)$$

Das Nennspannungskonzept kann einfach angewandt werden und ist in den gängigen Normen vorhanden. Es müssen aber genaue Details in der zugehörigen Norm existieren, eine Anpassung an ähnliche Geometrien ist nicht möglich. Sie erfordert allerdings aufwendige experimentelle Untersuchungen.

2.2.2 Strukturspannungskonzept

Das Strukturspannungskonzept beinhaltet lokale Effekte einer Spannungserhöhung, die zum Beispiel durch geometrische Veränderungen hervorgerufen werden können. Dies umfasst jedoch nur Schweißverbindungen am Nahtübergang, nicht an der Nahtwurzel. Die Strukturspannungen können experimentell an Referenzpunkten mit Dehnmessstreifen ermittelt werden. Auch eine numerische Ermittlung mithilfe von Finite-Elemente-Methoden ist möglich. Alternativ kann eine Berechnung mithilfe von vorgefertigten Ingenieurtafeln erfolgen. Lokale Spannungserhöhungen am Nahtübergang werden im Strukturspannungskonzept nicht berücksichtigt. Es gibt zwei Möglichkeiten die Strukturspannungen zu ermitteln, siehe Abb. 2-9. Einerseits können die Spannungen vor dem Nahtübergang an Referenzpunkten bestimmt und linear extrapoliert werden. Auch durch eine Linearisierung im Querschnitt lassen sich die Strukturspannungen ermitteln. Der Nachweis wird wie beim Nennspannungskonzept mit einem Vergleich zur Wöhlerlinie geführt. [8, 15]

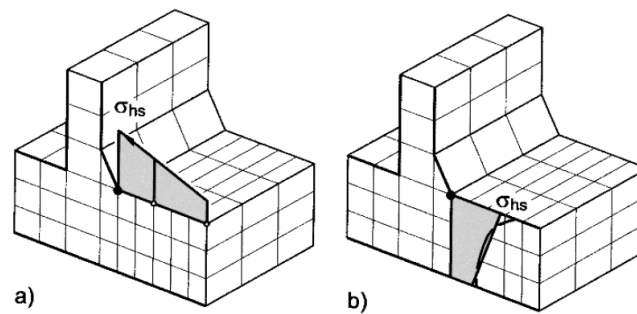


Abb. 2-9 Auswertung der Strukturspannung [15]

2.2.3 Kerbspannungskonzept

Das Kerbspannungskonzept (local notch stress approach) ermittelt die maximal auftretenden Spannungen an der Kerbe. Für die Berechnung werden zusätzlich lokale Kerbeffekte einbezogen. Einen umfangreichen Kerbfallkatalog, wie er im Nenn- und Strukturspannungskonzept benötigt wird, muss nicht verwendet werden. Für den Nachweis werden lediglich Wöhlerlinien für den ungekerbten Werkstoff benötigt. Mit diesem Konzept sind Nachweise mit komplexen Geometrien möglich. Dies setzt jedoch einen großen Aufwand an Modellierung und Berechnung voraus. Durch die Erfassung von örtlichen Spannungserhöhungen kann eine wirtschaftliche und sichere Auslegung erfolgen. [8, 20]

Die Ermüdungsfestigkeit für Bauteile ist stark abhängig vom Kerbeffekt. Dieser initiiert eine Spannungskonzentration und eine Verringerung der Festigkeit. Dabei tritt keine plastische Verformung auf, der Kerbeffekt wird als rein elastisch angenommen. Für das Kerbspannungskonzept spielt die Mikrostützwirkung eine wichtige Rolle. Die Kerbspannung ist für die Dauerfestigkeit nicht entscheidend. Die maßgebende Spannung wird über ein elementares Werkstoffteilchen über eine Länge, die größer als die Abmessungen eines Kristallits ist, gemittelt. Die Mikrostützwirkung sagt aus, dass die Verfestigung innerhalb von kleinen Stoffbereichen unterschiedlich ist. Unter einer Belastung stützen sich die Stoffbereiche auf die Umgebung ab. Die Spannung wird über einen fiktiven Radius ermittelt. Die Mikrostützwirkung tritt nicht nur an scharfen, sondern auch an milden Kerben auf. [13, 14]

Für das Kerbspannungskonzept wird das Bauteil mit Schweißnaht modelliert und mithilfe der Finite-Elemente-Methode die Kerbspannung berechnet. Alternativ kann die Kerbspannung auch durch analytische Methoden ermittelt werden. Für die Schweißnaht sind passende Annahmen zu treffen, da sie in der Praxis Unregelmäßigkeiten aufweist. Die Schweißnahtkerbe ist besonders zu berücksichtigen, da Spannungserhöhungen und Festigkeitsminderungen besondere Effekte hervorrufen.

Die Kerbspannungen werden an den ausgerundeten Kerboberflächen aus der Hauptspannung ausgewertet. Der Kerbfaktor k_f errechnet sich aus der maximalen Spannung im Bauteil und der Nennspannung, siehe Gleichung (2.8). Im Gegensatz zum Nenn- und Strukturspannungskonzept wird der Nachweis mittels Material-Wöhlerlinie geführt. Für Schweißverbindungen mit Stahl findet die Material-Wöhlerlinie 225 N/mm² Verwendung. [13, 15]

Die variable Anwendbarkeit des Kerbspannungskonzeptes erweist sich als vorteilhaft. Es können genaue Aussagen zu lokalen Spannungserhöhungen getroffen werden. Unabhängig von der Nahtgeometrie muss nur eine Wöhlerlinie für die jeweiligen Materialien verwendet werden. Zu beachten sind die idealisierten Kerbradien, welche die Nahtgeometrie schwächen könnten. Große Rechenleistungen sind dennoch für die Berechnung notwendig, diese können aber unter Verwendung der Submodelltechnik vereinfacht werden. [2]

2.3 Richtlinien und Normen

2.3.1 DIN EN 1993-1-9, Ermüdung [1]

Der Eurocode 3 Teil 1-9 [1] behandelt den Nachweis der Ermüdung für Bauteile, Verbindungen und Anschlüsse. Die Nachweisverfahren basieren auf bauteilähnlichen Versuchskörpern. Nachweise können mit dem Nenn- oder Strukturspannungskonzept geführt werden, dabei findet eine Gegenüberstellung der vorhandenen und zulässigen Schwingspiele mithilfe der Wöhlerlinie statt. Diese können für einen Nachweis mit Nennspannungen oder Strukturspannungen angewandt werden. Verschiedene Details werden in Kerbfälle unterteilt, die bei einer Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_c$ bei $N_c = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen definiert sind, siehe Abb. 2-10. In der Kerbklasse ist die wahrscheinliche Stelle des Ermüdungsrisses dargestellt. [1]

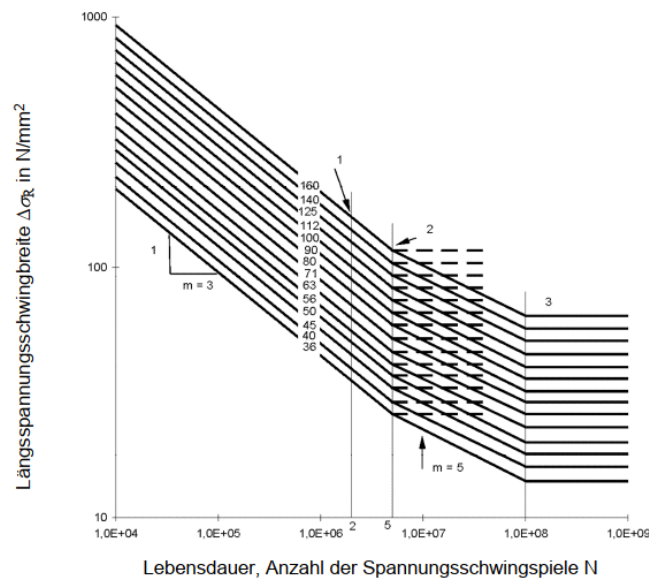


Abb. 2-10 Ermüdungsfestigkeitskurve für Längsspannungsschwingbreiten nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Für den Ermüdungsnachweis existieren zwei Konzepte: das Konzept der Schadenstoleranz und das Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung.

Beim Konzept der Schadenstoleranz müssen regelmäßige Kontrollen der Bauteile während der Nutzungsdauer durchgeführt werden. So ist ein frühzeitiges Erkennen von Schäden möglich, eine gute Zugänglichkeit der Bauteile ist dabei vorausgesetzt. Wenn eine Lastumlagerung

im Querschnitt des Bauteils möglich ist, kann das Konzept der Schadenstoleranz angewandt werden. Bauteile, die nach dieser Norm konstruiert und regelmäßig überwacht werden, sind als schadenstolerant einzustufen. [1]

Im Fall Versagen ohne Vorankündigung ist die Zuverlässigkeit des Bauteils über die Lebensdauer gewährleistet. Es sind keine regelmäßigen Inspektionen für ein frühes Erkennen der Ermüdungsrisse notwendig. Die Konstruktion und die Einwirkung ist so zu wählen, dass die Zuverlässigkeitswerte eingehalten sind. [1]

Für die unterschiedlichen Konzepte wird ein Teilsicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Schadensfolge gewählt, siehe Abb. 2-11.

Bemessungskonzept	Schadensfolgen	
	niedrig	hoch
Schadenstoleranz	1,00	1,15
Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung	1,15	1,35

Abb. 2-11 Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Der Nachweis der Nennspannungen oder Strukturspannungen wird in Gleichung (2.11) und Gleichung (2.12) für die maßgebenden Längs- und Schubspannungen begrenzt. [1]

$$\Delta\sigma \leq 1,5 f_y \quad (2.11)$$

Für Längsspannungen

$$\Delta\tau \leq 1,5 \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (2.12)$$

Für Schubspannungen

Der Nachweis wird nach Gleichung (2.13) für Längsspannungen und nach Gleichung (2.14) für Schubspannungen geführt. [1]

$$\frac{\gamma_{Ff} \sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (2.13)$$

Für Längsspannungen

$$\frac{\gamma_{Ff} \tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (2.14)$$

Für Schubspannungen

Für verschiedene Details existieren Kerbfälle, die die Ermüdungsfestigkeit aufführen. Dabei gibt es in den Details variable Größen wie zum Beispiel Blechdicken oder Winkel für geneigte Bleche.

Die in dieser Arbeit untersuchten Details der Diagonalrohr-Anschlüsse sind im Eurocode 3 Teil-1-9 in zwei Kerbfälle eingeteilt, siehe Abb. 2-12. Die Hohlprofile werden mit einer Blechdicke $t \leq 12,5$ mm begrenzt. Für den Kerbfall 71 ist ein Ringflanschanchluss mit zusammengedrücktem Endquerschnitt und Stumpfnah angegebe. Dieser ist bis auf einen Rohrdurchmesser von 200 mm begrenzt. Der Ermüdungsriss wird an der Schweißnaht dargestellt. [1]

Ein Rohr-Blech-Anschluss stellt einen weiteren Kerbfall dar, in welchem ein geschlitztes Rohr mit einem Knotenblech verschweißt ist. Am Ende des Schlitzes befindet sich ein Freischnitt, der für den Toleranzausgleich notwendig ist. Das Rohrende ist in einem Winkel α abgeschrägt. Für einen Winkel $\alpha \leq 45^\circ$ wird das Konstruktionsdetail in den Kerbfall 71 eingestuft. Das Detail wird in den Kerbfall 63 eingestuft, falls $\alpha > 45^\circ$ ist. Das Auftreten des Ermüdungsrisses wird auf dem Knotenblech angegeben, dieser tritt am Übergang zwischen abgeschrägtem Rohr und Knotenblech auf. [1]

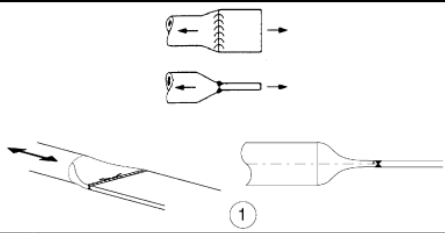
Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
71		1) Ringflanschanchluss mit zusammengedrücktem Endquerschnitt, Stumpfnah (X-Nah).	1) $\Delta\sigma$ ist am Rohrquerschnitt zu berechnen. Rohrdurchmesser <200 mm
71	$\alpha \leq 45^\circ$	2) Rohr-Blech-Anschluss, Rohr geschlitzt und an das Blech geschweißt, Loch am Schlitzende.	2) $\Delta\sigma$ ist am Rohrquerschnitt zu berechnen. Schubrisse in der Schweißnaht sind nach Tabelle 8.5, Kerbfall 8) nachzuweisen.
63	$\alpha > 45^\circ$		

Abb. 2-12 Kerbfälle im Eurocode 3 Teil 1-9 für Hohlprofile $t \leq 12,5$ mm [1]

Zurzeit wird die europäische Norm im Bauwesen, der Eurocode, überarbeitet. Dabei wird in der neuen prEN 1993-1-9 [4] im Anhang C das Kerbspannungskonzept in die Norm mitaufgenommen. Es werden zusätzliche Bestimmungen zur Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Anschlüssen, die durch das Kerbspannungskonzept nachgewiesen werden, gemacht. Die Regelungen befassen sich mit dem Versagen durch Risse am Schweißnahtübergang und an der Schweißnahtwurzel. Informationen zur Modellierung des Kerbspannungskonzeptes mittels Finite-Elemente-Methode finden sich in der prEN 1993 Teil 1-14, siehe Abschnitt 2.3.2. Der Anwendungsbereich liegt bei geschweißten Verbindungen mit einer Wanddicke von $t \geq 5$ mm. Die Kerbspannung wird mithilfe von finiten Elementen berechnet, es wird ein linear-elastisches Materialverhalten und eine idealisierte Geometrie vorausgesetzt. Die Geometrie einer Kehlnah ist mit einem Winkel von 45° zu modellieren, Stumpfstöße mit 30° . Die Kerbe am Nahtübergang und an der Nahtwurzel wird mit einem Radius von 1,0 mm abgerundet. Die Nahtwurzel kann mit einem Schlüsseloch c) (keyhole) oder mit einer U-Form d) (U-shape) modelliert werden, siehe Abb. 2-13. [4]

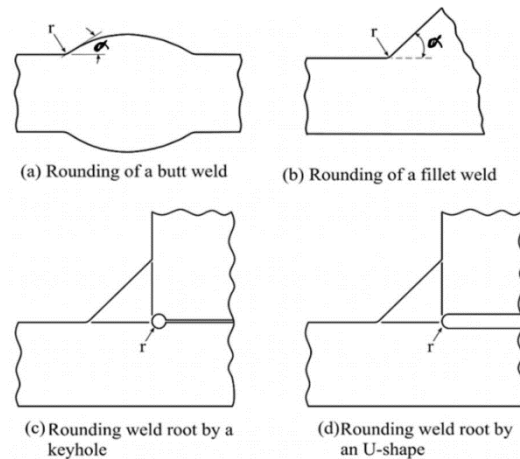


Abb. 2-13 Schweißnahtwinkel und Modellierung der Nahtwurzel [4]

Zur Ermittlung der Kerbspannung wird der Wert der Material-Wöhlerlinie durch den Kerbfaktor k_f dividiert, welcher unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode berechnet wird. Der Eurocode prEN 1993-1-9 Anhang C [4] empfiehlt die Material-Wöhlerlinien 225 oder 200, die eine Kerbspannung bei $N_c = 2 \cdot 10^6$ angeben, siehe Abb. 2-14. Bei $N_D = 10^7$ Schwingspielen beginnt die Dauerfestigkeit. Der Schwellwert der Ermüdungsfestigkeit wird mit $N_L = 10^8$ definiert. [4]

Die Kerbspannung kann nach prEN 1993-1-9 mit zwei unterschiedlichen Methoden berechnet werden. Die PS-Methode (principal stress) wird mit der maximalen Differenz der Hauptspannungen berechnet. Diese darf nur angewandt werden, wenn das Vorzeichen der Hauptspannungen das gleiche ist und wenn die Ebene der Hauptspannung keine signifikanten Änderungen erfährt. Die zweite Methode ist die VM-Methode (von Mises), bei welcher die maximale von Mises Spannung ausgewertet wird. [4]

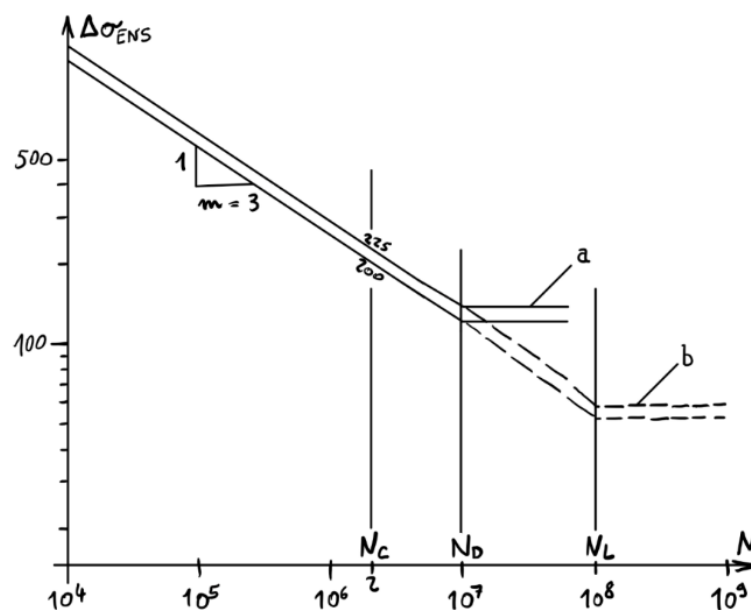


Abb. 2-14 Material-Wöhlerlinien [4]

2.3.2 prEN 1993-1-14 Design assisted by finite element analysis Draft Version [3]

Der Eurocode 3 wird in der Überarbeitung der Norm im Bauwesen um Teil 1-14 [3] erweitert. Dieser regelt die Anwendung der Finite-Elemente-Methode an Stahlkonstruktionen, ein Teil davon befasst sich mit dem Thema Ermüdung.

Bei der Modellierung von finiten Elementen ist im Allgemeinen eine passende Netzdichte, geometrische Komplexität und Lösungsmethode zu verwenden. Das finite Element ist mit einem linearen oder höheren Verschiebungsansatz zu modellieren, dies kann zum Beispiel ein quadratischer Verschiebungsansatz sein. Es wird empfohlen, das Netz an Stellen von hohen Spannungsspitzen zu verfeinern. Die Netzdichte und Verfeinerung sind mit einer Verifizierung zu überprüfen. [3]

Beim Verwenden von Balkenelementen ist es wichtig, das Verhalten der Verbindungselemente miteinzubeziehen. Zum Modellieren von dünnen Bauteilen werden Schalenelemente empfohlen. Auch die Verwendung von Volumenelementen ist möglich. Jeder Knoten hat zwei oder drei Freiheitsgrade zu besitzen. [3]

Die Lagerbedingungen sind realistisch oder konservativ zu modellieren. Unter Verwendung der Submodelltechnik ist es von Bedeutung, die Steifigkeitseigenschaften und das Verformungsvermögen des Modells in Übereinstimmung mit dem Globalmodell zu halten. Lokale Krafteinwirkungen in Schalen- oder Volumenmodellen können zu Spannungsspitzen führen, welche zu untersuchen sind. Lagerbedingungen können mithilfe von Symmetrie vereinfacht werden. Wenn Symmetriebedingungen Randbedingungen oder Krafteinleitungen schneiden, sind diese anzupassen und genauer zu betrachten. [3]

Falls das Modell anhand von Versuchen validiert wird, müssen die Materialeigenschaften, denen der Versuche entsprechen. [3]

Das Auftreten von Imperfektionen durch Abweichungen der perfekten Geometrie darf durch eine Modifikation der Geometrie im Modell angepasst werden. Die Imperfektionen können vom imperfekten Bauteil, beziehungsweise der Geometrie abgemessen werden. Die schädlichste Imperfektion, die im Bauteil auftreten kann, ist anzunehmen. Auch mehrere Imperfektionen können gleichzeitig angewandt werden. Die Imperfektion ist so zu verwenden, dass das Bauteil den niedrigsten Widerstand aufweist. Imperfektionen können beispielweise durch den Herstellungsprozess entstehen. Auch globale Imperfektionen können für das Biegeknicken angewandt werden. [3]

Zur Analyse des Modells stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, siehe Abb. 2-15. Die linear-elastische Analyse (LA) sagt das Verhalten des Bauteils auf der Basis von kleinen Verschiebungen vorher. Sie bezieht sich auf die ideale Struktur. Die Linearisierung der Analyse basiert auf einer linear-elastischen Spannungs-Dehnungsbeziehung und unter Annahme von kleinen Deformationen. Die Eigenwertanalyse (LBA) sagt Eigenwerte der Struktur voraus. Diese kann in verschiedenen Formen knicken, ein linear-elastisches Materialverhalten wird genutzt. Imperfektionen werden nicht miteinbezogen. Die materielle nichtlineare Analyse (MNA) verwendet die Annahme kleiner Verschiebungen und Dehnungen. Es ist ein elastisch-plastisches Materialverhalten vorausgesetzt. Der plastische Widerstand ist das Ergebnis der Analyse. Änderungen der Geometrie werden nicht miteinbezogen. Die geometrisch nichtlineare Analyse (GNA) nutzt eine perfekte Struktur, ein linear-elastisches Materialverhalten und wird unter Einbeziehung geometrischer Nichtlinearitäten angewandt. In der geometrischen und

materiellen nichtlinearen Analyse (GMNA) werden die Bedingungen der MNA und GNA kombiniert. In der geometrisch nichtlinearen elastischen Analyse mit Imperfektionen (GNIA) ist die Anwendung der GNA durch die Verwendung von Imperfektionen aus der Geometrie, den Randbedingungen und den Auswirkungen von Eigenspannungen ergänzt. Die geometrische und materielle nichtlineare Analyse mit Imperfektionen ist die Erweiterung der GMNA unter Verwendung von Imperfektionen. [3]

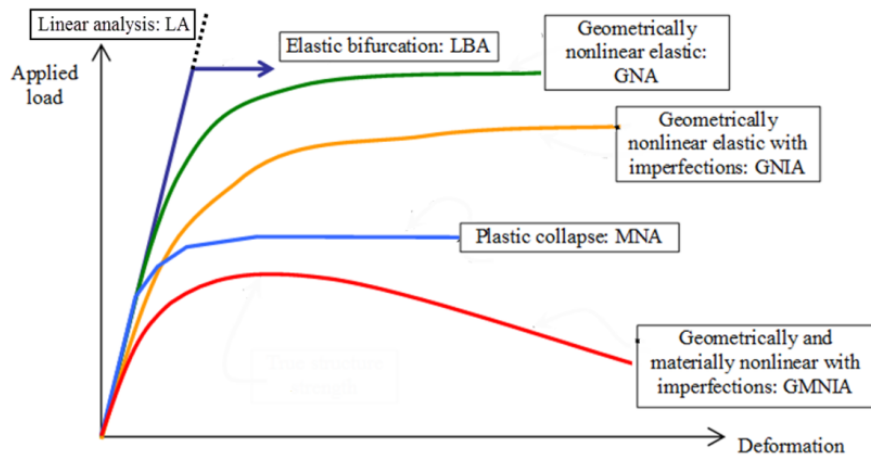


Abb. 2-15 Methoden zur Analyse des Finite-Elemente-Modells [3]

Durch eine Validierung und Verifikation erfolgt der Nachweis, dass das numerische Modell ähnliche Eigenschaften aufweist wie vergleichbare experimentelle Untersuchungen. Die Verifikation beinhaltet die Dichtheit des Netzes, die Sensitivität und eine Überprüfung der Ergebnisse. Die Netzdicke wird mithilfe einer Konvergenzstudie überprüft. Durch Verändern der Eingangsparameter können in der Sensitivitätsanalyse entscheidende Stellen lokalisiert werden. Die Glaubhaftigkeit der Ergebnisse ist zu überprüfen. [3]

Zur Validierung müssen experimentelle oder numerische Vergleichswerte verwendet werden. Dabei können die Unterschiede des numerischen Modells mit einem Faktor beschrieben werden, der die Unsicherheiten des numerischen Modells abdeckt. Der Faktor kann für die MNA-Analyse und die Berechnung der Ermüdung nicht angewandt werden. Bei der Anwendung von experimentellen Versuchsdaten müssen die Geometrien und Abmessungen dieser Untersuchungen verwendet werden. [3]

In Kombination mit einer numerischen linear-elastischen Analyse zur Bestimmung des Ermüdungsversagens können die Nenn-, Struktur oder Kerbspannungsmethode verwendet werden, siehe Abschnitt 2.2.

Zur Bestimmung des Ermüdungsversagens mittels Kerbspannungsmethode können relevante Details und Bestimmungen der prEN 1993-1-9 Anhang C [4] entnommen werden, siehe Abschnitt 2.3.1. Für die Bestimmung der Kerbspannung mittels Finite-Elemente-Analyse sind für unterschiedliche Elementarten bestimmte Elementgrößen zu verwenden, siehe Abb. 2-16. So ist für Hexaeder-Elemente mit quadratischem Verschiebungsansatz eine Elementgröße von 0,25 mm anzuwenden. Für Hexaeder und Tetraeder mit linearem Verschiebungsansatz ist

eine Elementgröße von 0,15 mm heranzuziehen. Bei Verwendung eines dreidimensionalen Modells ist die dritte Richtung mit denselben Eigenschaften zu vernetzt werden. [3]

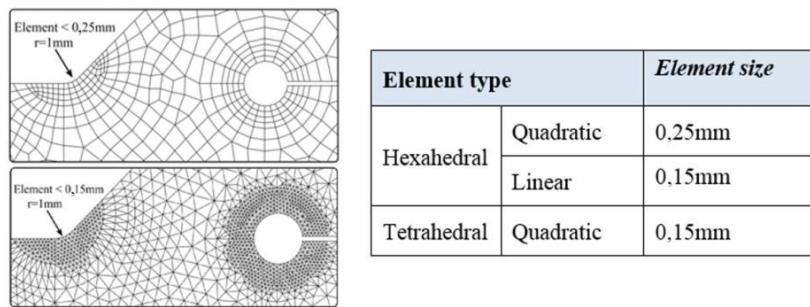


Abb. 2-16 Empfohlene Elementgrößen am Nahtfuß und an der Nahtwurzel [3]

2.3.3 DVS-Merkblatt 0905 [2] und Vergleichsmodell nach Radaj [13]

Der DVS (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren) ist ein Verband, der sich mit der Fügetechnik auseinandersetzt. Von diesem wurde ein Merkblatt [2] veröffentlicht, das die industrielle Nutzung des Kerbspannungskonzeptes für den Ermüdungsnachweis von Schweißverbindungen behandelt. Das Merkblatt befasst sich mit dem Kerbspannungsnachweis von schmelzgeschweißtem oder widerstandsgeschweißtem Stahl und Aluminiumlegierungen. Es werden Empfehlungen für die Ermittlung der Kerbspannung durch die Verwendung der Finite-Elemente-Methode gegeben. Diese gelten für zyklische Lasten mit hohen Schwingspielzahlen, die über $N = 4 \cdot 10^4$ liegen, für niederzyklische Belastungen gilt dies nicht. Auch ist die Blechdicke mit $t \geq 1$ mm begrenzt. Stahl-, Brücken-, Fahrzeug-, Behälter- und Kranbau sind Anwendungsbereiche. Durch die Anwendung des Kerbspannungskonzeptes nach DVS Merkblatt 0905 [2] kann im Gegensatz zum Struktur- und Nennspannungskonzept eine genauere Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit erfolgen. Dies führt zu einer Auslegung von Bauteilen, die sicherer und wirtschaftlicher sind. [2]

Da die Geometrie einer Schweißnaht sehr streut, sind passende Annahmen für diese zu treffen. Dies betrifft die Nahtdicke, den Flankenwinkel, Einbrandkerben, Nahtüberhöhungen und Werkstoffeigenschaften. Die Abweichungen treten bereits entlang einer Schweißnaht eines Bauteils auf. Für die Idealisierung wird die Nahtflanke in einer Ebene modelliert und die Übergänge mit einem Radius. Außerdem sind in der Berechnung ein linear-elastisches Materialverhalten und die Auswertung der maximalen Hauptspannungen, Vergleichsspannungen nach von Mises oder Normal- und Schubspannungen zu beachten. [2]

Die Auswertung der Beanspruchung an den Schweißnähten findet mittels Normalspannungen quer und längs zur Schweißnaht statt. Die Belastung führt zu einer dominierenden Hauptspannung in der Kerbe mit dem Radius r . Diese wird als Kerbspannung $\sigma_{e,\perp}$ ermittelt. Es können Schubspannungen τ_e und Normalspannungen $\sigma_{N,\parallel}$ ausgewertet werden, siehe Abb. 2-17. [2]

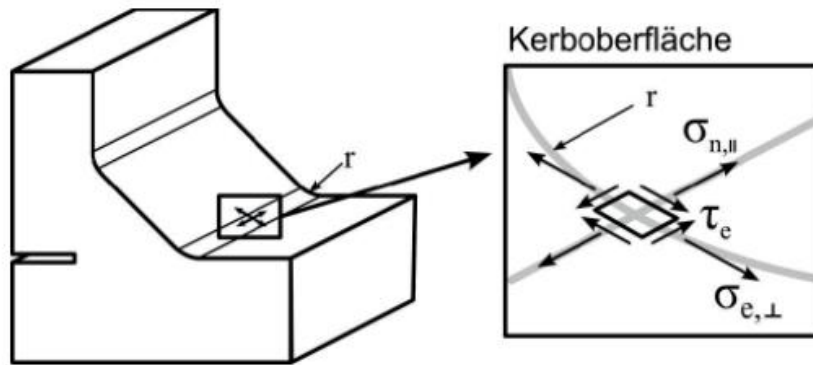


Abb. 2-17 Beanspruchung in der Kerbe [2]

Zur Ermittlung der Spannungen am Kerbgrund wird die Kerbe mit einem fiktiven Kerbradius r_{ref} ausgerundet. Zudem ist es möglich, die Spannung mittels eines Spannungsmittelungsansatzes zu bestimmen. Dabei wird die gemittelte Spannung über eine Ersatzstrukturlänge berechnet. [2]

Für Baustahl und Aluminium und einer Blechdicke $t \geq 5$ mm ist die Schweißnaht mit einem Referenzradius zu versehen. Aufgrund eines veränderten Kraftflusses ist dieser bei dünnwandigen Bauteilen zu begrenzen. Durch den Referenzradius wird der Geometrie der Schweißnaht ein signifikanter Anteil entnommen. Dieser Effekt kommt besonders bei dünnwandigen Bauteilen zum Tragen. Wird der Kraftfluss stark beeinflusst, führt dies zu Verlusten der Schweißnahtsteifigkeiten. Für eine Wanddicke $t \geq 5$ mm wird empfohlen, den Referenzradius für die Wurzel der Schweißnaht nach Gleichung (2.15) und für den Fuß der Schweißnaht nach Gleichung (2.16) in Abhängigkeit der Wanddicke zu begrenzen. [2]

$$\frac{r_{ref}}{t} \leq 0,2 \quad (2.15)$$

Für Nahtübergänge

$$\frac{r_{ref}}{t} \leq 0,1 \quad (2.16)$$

Für Nahtwurzeln

Für Kerben an der Nahtwurzel, die diese Bedingungen nicht einhalten, können alternativ auch Korrekturen vorgesehen werden. Dies kann durch Verschieben der Schlüsselochkerbe und Verkürzen der Wurzelkerbe geschehen. Auch ist eine Korrektur der Kerbspannung aus Nettodicke und tatsächlicher Blechdicke möglich, siehe Abb. 2-18. [2]

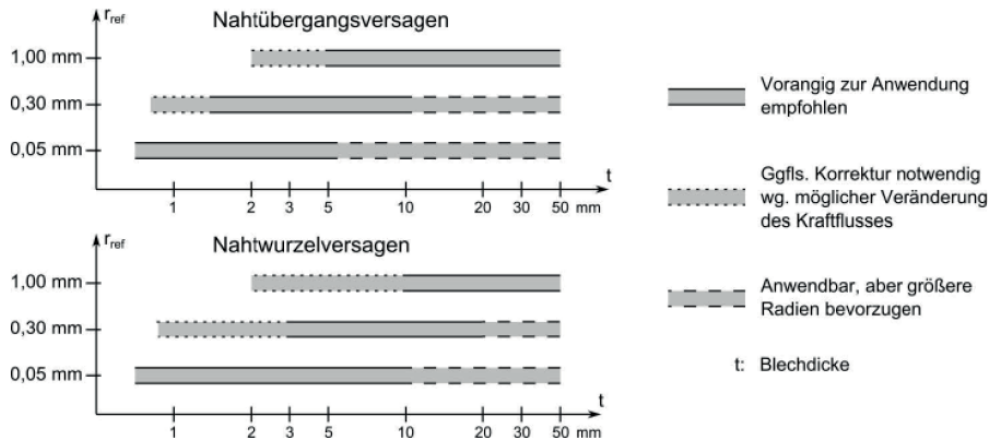


Abb. 2-18 Begrenzung der Blechdicke t [2]

Für eine idealisierte Schweißnaht wird nach DVS-Merkblatt 0905 [2] empfohlen, die Schweißnaht nach Abb. 2-19 zu modellieren, reale Nahtformen können modelliert und mit einem Referenzradius versehen werden. Es können Kehlnähte mit einem Schlüsseloch b) oder mit einer U-Form c) versehen werden. Referenzradien können mit einem Hinterschnitt e) und f) modelliert werden, dies führt zu konservativeren Schwingungsfestigkeitsbewertungen. [2]

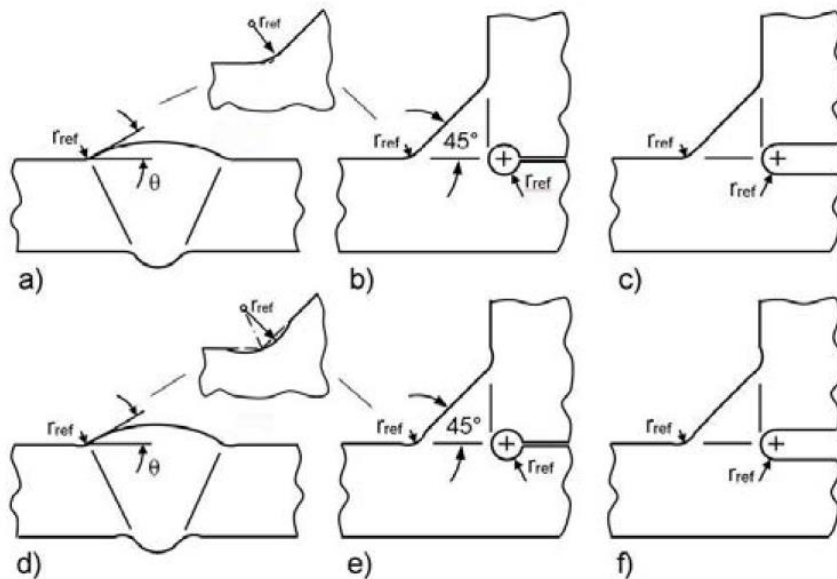


Abb. 2-19 Idealisierung von Schweißnähten [2]

Für einen spitzwinkligen Anschluss wird das Modellieren nach Abb. 2-20 empfohlen. Dabei ist die Tiefe des Wurzelspaltes konservativ zu wählen. [2]

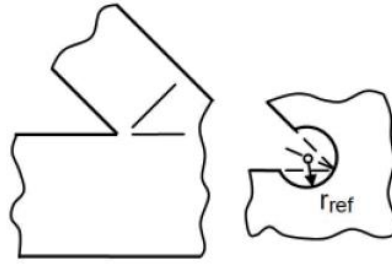


Abb. 2-20 Spitzwinkliger Anschluss [2]

Die Netzverfeinerung ist im globalen Modell grob anzunehmen und zur Kerbe stetig zu verfeinern, unter Vermeidung großer Sprünge in der Elementgröße. Im Kerbbereich wird eine ausreichende Genauigkeit empfohlen, um den Spannungsanstieg in der Kerbe präzise darstellen zu können. [2]

Bei Verwendung eines Referenzradius von $r_{ref} = 1,0$ mm wird eine Elementlänge an der Kerbe von höchstens 0,25 mm empfohlen, siehe Abb. 2-21. [2]

Elementtyp (Verschiebungsansatz)	Relative Länge	Elementlänge bei $r_{ref} = 1$ mm	Elementlänge bei $r_{ref} = 0,05$ mm	Elementzahl entlang eines 45°-Bogens	Elementzahl entlang eines 360°-Bogens	Geschätzter Fehler ¹⁾
quadratisch (z. B. mit Kantenmittel- knoten)	$\leq r_{ref}/4$	$\leq 0,25$ mm	$\leq 0,012$ mm	≥ 3	≥ 24	≈ 2 %
Linear	$\leq r_{ref}/6$	$\leq 0,15$ mm	$\leq 0,008$ mm	≥ 5	≥ 40	≈ 10 %

¹⁾ kann insbesondere durch Verfeinerung in Normalenrichtung verringert werden

Abb. 2-21 Empfehlungen zur Elementgröße [2]

Am Nahtfuß einer Schweißnaht, mit Flankenwinkel von 45°, wird empfohlen mindestens drei Elemente mit einem quadratischen Verschiebungsansatz zu verwenden. Dies bedeutet, dass eine Elementlänge von $r_{ref}/4$ nicht überschritten werden darf, siehe Abb. 2-21. Typische Netze an Nahtfuß und Nahtwurzel sind in Abb. 2-22 und Abb. 2-23 dargestellt. [2]

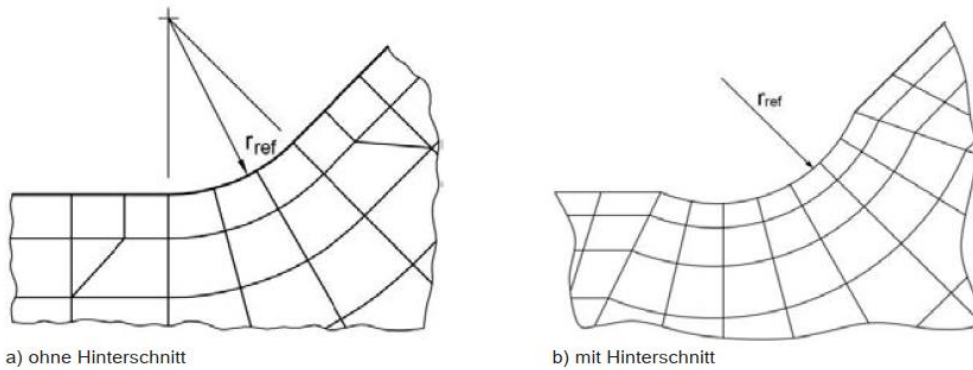


Abb. 2-22 Typische Netze an Nahtfuß ohne Hinterschnitt a), mit Hinterschnitt b) [2]

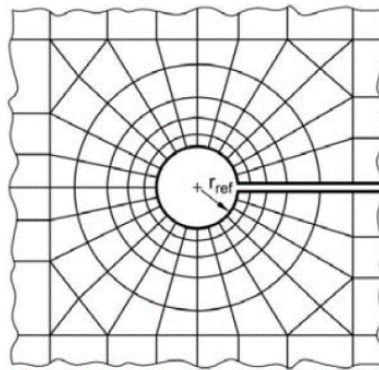


Abb. 2-23 Typisches Netz an der Nahtwurzel [2]

Um einen geringen Rechenaufwand zu ermöglichen, empfiehlt das DVS Merkblatt 0905 [2] die Verwendung der Submodelltechnik. Es wird ein grobes Globalmodell erstellt, aus welchem ein feines Submodell abgeleitet wird. Auf dieses werden die Randbedingungen des Globalmodells aufgebracht, die meist aus den Knotenverschiebungen bestehen. Im Submodell kann bei feinem Netz die Kerbspannung an der ausgerundeten Kerbe berechnet werden. Das Submodell kann zweidimensional oder dreidimensional ausgestaltet sein. Das Globalmodell ist so zu modellieren, dass sich lokale Deformationen ausbilden können und zu keiner Verfälschung der Ergebnisse führen. [2]

Die Ermittlung der charakteristischen Beanspruchbarkeit eines Bauteils ist von den Parametern des Referenzradius, des Werkstoffs und der Art der Beanspruchung abhängig. Für Kerbspannungen wird die Neigung der Wöhlerlinie bei Schweißverbindungen mit einer Wanddicke $t \geq 5$ mm mit $m = 3$ definiert. Der Knick der Wöhlerlinie wird bei $N = 5 \cdot 10^6$ angenommen. Für Schubspannungen wird bei einer Wanddicke von $t \geq 5$ mm die Neigung $m = 5$ verwendet. Der Knickpunkt liegt bei $N = 10^8$. Für einen Referenzradius von $r_{ref} = 1,0$ mm ist die FAT-Klasse an der Nahtwurzel und am Nahtübergang mit 225 N/mm² anzunehmen, siehe Abb. 2-24. [2]

Referenzradius r_{ref} [mm]	Ort maximaler Beanspruchung	Normalspannung			Schubspannung		
		$\Delta\sigma_{e,C}$ [MPa] bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen FAT	$\Delta\sigma_{e,R}$ [MPa] bei $N_k=10^7$ Schwingspielen		$\Delta\tau_{e,C}$ [MPa] bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen FAT	$\Delta\tau_{e,R}$ [MPa] bei $N_k=10^8$ Schwingspielen	
			$k = 3$ $t \geq 5$ mm	$k = 5$ $t < 5$ mm		$k = 5$ $t \geq 5$ mm	$k = 7$ $t < 5$ mm
1,00	NÜ und NW	225	131,6	163,1	160	73,2	91,5
0,30	NÜ	300	175,4	217,4	180	82,3	102,9
	NW	340	198,8	246,4	210	96,0	120,1
0,5	NÜ	500	292,4	362,4	240	109,8	137,2
	NW	630	368,4	456,6	320	146,3	183,0

Neigungsexponent k der Wöhlerlinie für
 - Normalspannungen: $k = 3$ bei Wanddicken $t \geq 5$ mm und $k = 5$ bei $t < 5$ mm
 - Schubspannungen: $k = 5$ bei Wanddicken $t \geq 5$ mm und $k = 7$ bei $t < 5$ mm

NÜ: Nahtübergang; NW: Nahtwurzel

Abb. 2-24 Charakteristische Schwingungsfestigkeitswerte für eine Schweißverbindung aus Stahl [2]

Das im DVS-Merkblatt verwendete Kerbspannungskonzept basiert auf der Mikrostützwirkung, diese wurde von Radaj [13] für Schweißnähte interpretiert [2]. Es können die durch Radaj untersuchten Geometrien für Vergleichsrechnungen herangezogen werden. Er konzipierte eine Zusammenstellung von verschiedenen Geometrien und Schweißnähten. Diese beinhaltet Stumpfnähte, Kehlnähte, HV-Nähte und K-Nähte, siehe Abb. 2-25. Die Geometrien wurden mit der Randelemente-Methode (BE-Methode) und Finite-Elemente-Methode errechnet, dabei entstanden Ergebnisse mit hohen Genauigkeiten. Die untersuchten Ergebnisse zeigten eine annehmbare Übereinstimmung mit Ergebnissen aus Ermüdungsversuchen. Die Vergleichsgeometrien sind nach der Mikrostützwirkung an Nahtfuß und Nahtwurzel mit einem Kerbradius von 1,0 mm versehen. Es wurde jeweils ein Kerbfaktor aus Nenn- und Kerbspannung errechnet und für Nahtfuß β_{kz} und Nahtwurzel β_{kw} angegeben. Anhand der Ergebnisse von Radaj können eigene Berechnungsmethoden überprüft werden. [13]

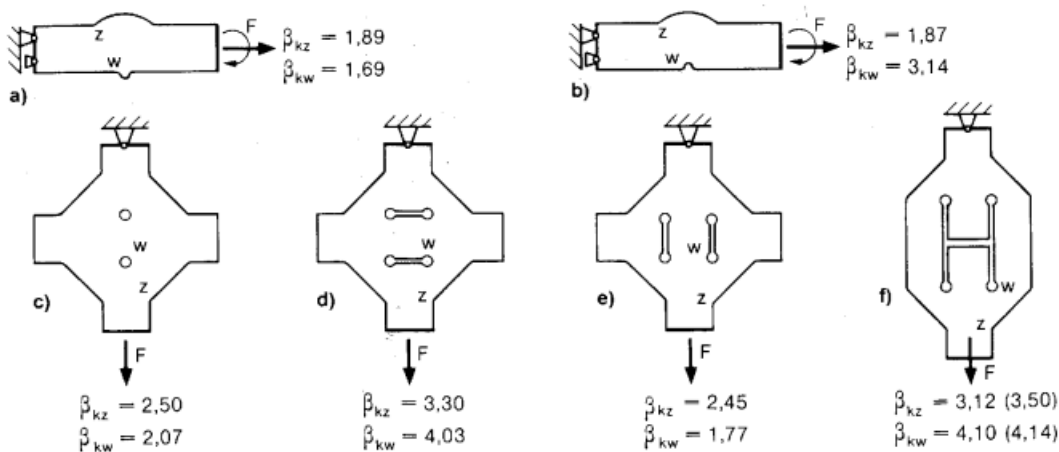


Abb. 2-25 Beispiele an Vergleichsmodellen nach Radaj [13]

2.3.4 Zusammenfassung

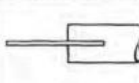
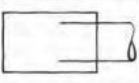



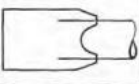






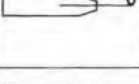



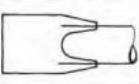

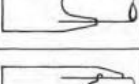

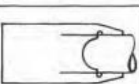



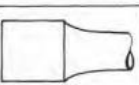
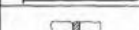
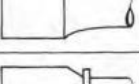




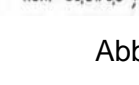
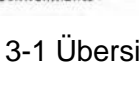


Im bisherigen Eurocode sind nur das Nenn- und Strukturspannungskonzept enthalten. Eine numerische Berechnung der Kerbspannung wird im DVS-Merkblatt 0905 [2] behandelt. In der Erneuerung des Eurocodes 3 Teil 1-9 und 1-14 wird dies mitaufgenommen, die Anwendbarkeit ist mit einer Blechdicke von $t \geq 5$ mm geregelt. Im DVS-Merkblatt sind Blechdicken $t \geq 1$ mm festgelegt, wobei Anpassungen an den Referenzradius zu beachten sind. Der Referenzradius muss die Gleichungen (2.15) am Nahtübergang und Gleichung (2.16) an der Nahtwurzel erfüllen. Der Referenzradius ist im DVS-Merkblatt zu $r_{ref} = 1,0$ mm oder zu $r_{ref} = 0,05$ mm zu wählen. In der prEN 1993-1-9 [4] wird dieser zu $r_{ref} = 1,0$ mm angenommen. Die Elementgröße wird durch eine Sensitivitätsanalyse bestimmt. An der Kerbe ist die Elementgröße vom Elementtyp abhängig und kann bei einem Element mit quadratischem Verschiebungsansatz laut DVS-Merkblatt [2] zu 0,25 mm angenommen werden. In der prEN 1993-1-14 [3] wird empfohlen, die Elementgröße an der Kerbe zu 0,25 mm oder zu 0,15 mm anzunehmen, dies ist abhängig vom Elementtyp und vom Verschiebungsansatz. Sie empfiehlt zur Vereinfachung des Modells die Ausnutzung von Symmetriebereichen und die Anwendung der Submodelltechnik. So werden geringe Rechenzeiten ermöglicht. Ein Nachweis der Kerbspannungen kann mit der Material-Wöhlerlinie der FAT-Klasse 225 geführt werden.

3 Bisherige Untersuchungen

3.1 Experimentelle Untersuchungen von Zirn [24]

Erste experimentelle Untersuchungen zu Diagonalrohr-Anschlüssen hat Zirn [24] 1975 vollzogen. Er führte statische und dynamische Untersuchungen durch. In den statischen sollten erste Erkenntnisse zum Verhalten der Anschlüsse gewonnen werden. In den dynamischen Versuchen wurden Einflüsse aus unterschiedlichen Werkstoffen, Geometrien und Bauformen gewonnen.

Das Versuchsprogramm beinhaltete unterschiedliche Varianten, siehe Abb. 3-1. Zirn [24] verwendete Anschlüsse aus Rohren mit einem Außenrohrdurchmesser von 88,9 mm und einer Rohrwanddicke von 5 mm. Daran waren Knotenbleche mit Blechdicken von 10 mm, 15 mm und 20 mm angeschweißt. Unterschieden wurde in gerade und abgeschrägte Knotenbleche, auch die Ausführung der Schweißnaht wurde in Kehlnaht, HV-Naht und X-Naht variiert. Die Bauformen L1 und L2* waren mit einem geraden Rohrende ausgeführt. Eine weitere Verbindung wurde mit einem abgeschrägten Rohr versehen, vergleiche Abb. 3-1 Bauformen L2, L3 und L4. Die Bauform L5 bestand aus einem breitgedrückten Rohr, mit einem stumpf angeschweißten Knotenblech. Ein weiteres Detail ist ein Rohr, auf welches eine Kopfplatte und ein Knotenblech aufgeschweißt war, vergleiche Abb. 3-1 Bauform L6. [24]

Gestalt		Schweißnahtanschl.		Nr.	Bauform	Faktor c	Knotenblechdicke s_k	Anzahl u. Material			
Rohrende	Knotenblech	Form	Darstellung					St.35	HSB 50	HSB77V	
		A		1	L1	1,5	15	5	5		
		B		2				2	2		
		C		3				2	2		
			C		4	L2*	1,5	15	5		
				5	L2	1,5	15	5	5	5	
				6		1,0	10	3	3		
				7		2,0	20	3	3		
			D		8	L3	1,5	15	4	5	
			D _S		9				3		
			A		10	L3	1,5	15	5	5	5
			B		11				3	3	
			C		12				3	3	
			C		13	L4	1,5	15	5	5	5
				14	1,0		10	3	3		
		B		15				3	3		
		E		16	L5	1,4	15	5	5		
		A		17	L6	1,0	15	4			
		B		18				4			




Rohr: 88,9 x 5,0 ; Schweißnähte:  Kehlnaht $\alpha \approx 3-4$ mm  HV-Naht  X-Naht

Abb. 3-1 Übersicht der Bauformen nach Zirn [24]

Die Ermüdungsfestigkeit der Anschlüsse wurden in einem Zugschwellversuch mit einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ untersucht. Der Versuch erfolgte bis zum Versagen des Bauteils. Dies bedeutet, dass ein vollständiger Riss im Bauteil auftrat und keine Last mehr aufgenommen werden konnte. An den Bauformen L1, L2 und L3 trat der Versagensriss an der Knotenblechspitze auf, siehe Abb. 3-2. Dieser entstand entweder am Übergang der Schweißnaht oder an der Schweißnahtwurzel, dies war abhängig von der Ausführung der Schweißnaht. [24]

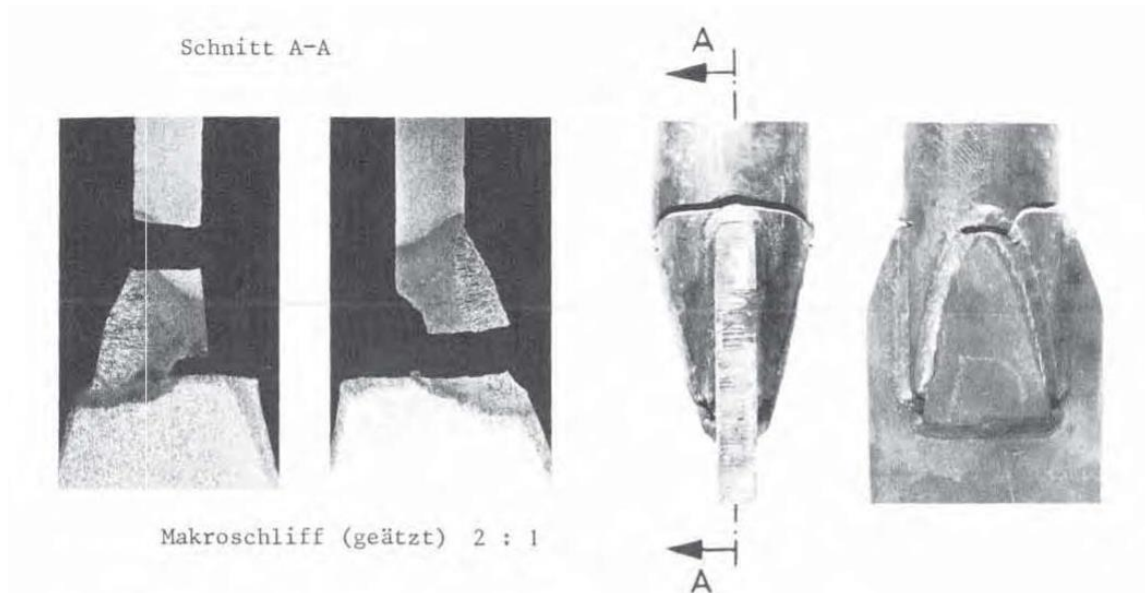


Abb. 3-2 Versagensriss eines Versuchskörpers nach Zirn [24]

Es zeigte sich, dass die Ausführung der Schweißnaht einen großen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hatte. Dabei wurde erkannt, dass die Ausführung mit einer Kehlnaht eine geringere Ermüdungsfestigkeit aufwies als die Ausführung mit einer HV-Naht. Eine Variante, an der eine HV-Naht an der Umschweißung und die restliche Schweißnaht mit einer Kehlnaht ausgeführt wurde, zeigte wenig Verbesserung. Eine Neuauswertung der Ergebnisse von Zirn [24] im Laufe des Forschungsprojekts [21] zeigte, dass eine Ausführung mit einer Kehlnaht in den Kerbfall 36 eingestuft werden konnte. Die Ausführung mit einer HV-Naht zeigte eine Verbesserung auf und wurde in den Kerbfall 50 eingestuft. Das Variieren der Blechdicke des Knotenblechs hatte geringen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit. Jedoch konnte festgestellt werden, dass unterschiedliche Bauformen Verbesserungen erbrachten. Es zeigte sich, dass ein ausgenommenes Knotenblech deutliche Verbesserungen der Ermüdungsfestigkeit erbrachte. Dies war auf das elastischere Verhalten des Knotenblechs zurückzuführen, dadurch konnte sich ein glatterer Spannungsverlauf ausbilden. Ein Abschrägen des Rohrs konnte die Ermüdungsfestigkeit verbessern. Ein Einfluss des Werkstoffes konnte nicht festgestellt werden. [24]

3.2 Experimentelle Untersuchungen von Hanswille [18]

Hanswille [18] veröffentlichte 2017 Untersuchungen zur Talbrücke Rindsdorf. Er untersuchte einen oberen und unteren Diagonalrohr-Anschluss, diese wurden zur Abstützung der

Fahrbahnplatte eingesetzt. Bei einem als oberen Anschluss konzipierte Variante, wurde ein Knotenblech über eine Kopfplatte an ein Rohr angeschweißt, siehe Abb. 3-3. Das Rohr wurde mit einem Durchmesser von 219,1 mm und einer Rohrwanddicke von 16 mm ausgeführt. Die Kopfplatte wurde rund mit dem Durchmesser des Rohrs und in einer Blechdicke von 100 mm ausgeführt. Es wurde eine umlaufende Nut zur Montage- und Schweißbadsicherung verwendet. Außerdem wurden zwei Steifen zwischen Kopfplatte und Knotenblech verwendet. [18]

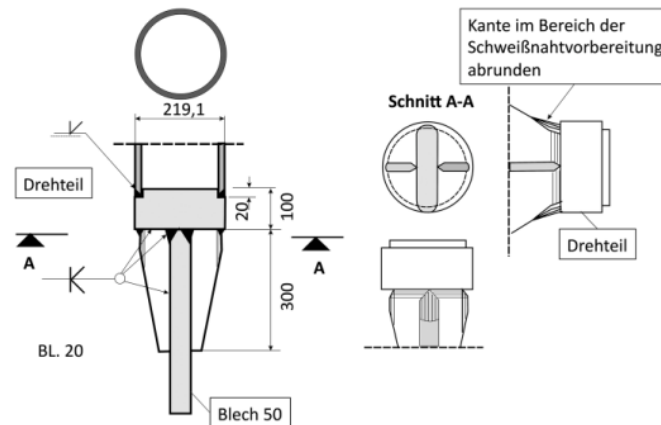


Abb. 3-3 Oberer Anschluss mit Kopfplatte [18]

Die untere Variante war ein abgeschrägtes und geschlitztes Rohr, mit einem Durchmesser von 219,1 mm und einer Rohrwanddicke von 16 mm ausgeführt, siehe Abb. 3-4. Das Rohr war mit einer durchgeschweißten Schweißnaht mit dem Knotenblech verbunden. Die Knotenblechdicke betrug 40 mm. An der Knotenblechspitze wurde durch Überstände eine Schweißbadsicherung angebracht, entlang der restlichen Schweißnaht kam zur Schweißbadsicherung eine Keramikleiste zur Verwendung. Für einen glatteren Spannungsverlauf versah Hanswille [18] das Knotenblech mit einer Ausnehmung. An den Seiten war dieses abgeschrägt und an der Spitze abgerundet. Auf die Abschrägung am Ende des Rohrs wurde ein Deckel aufgeschweißt, dieser war mit einer Blechdicke von 10 mm ausgeführt. [18]

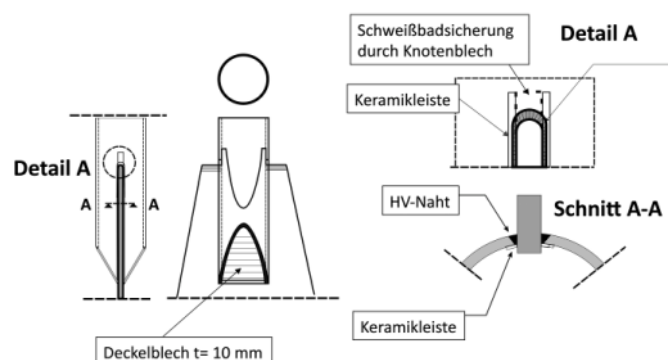


Abb. 3-4 Unterer Anschluss mit abgeschrägtem Rohr [18]

Die Anschlussdetails wurden mit jeweils 10 Ermüdungsversuchen untersucht. Für den oberen Anschluss konnte eine charakteristische Ermüdungsfestigkeit von 52 N/mm^2 ermittelt werden. Der Ermüdungsriss entstand immer an der Verbindung zwischen Rohr und Kopfplatte, siehe Abb. 3-5. Der Riss trat in der Kopfplatte am Spaltende auf, dieser entstand an der Zusammenfügung von Rohr und Kopfplatte. Bei zunehmenden Lastwechseln wanderte der Riss in die Kopfplatte hinein. Ein Sekundärriss trat an der äußeren Nahtüberhöhung auf. [18]

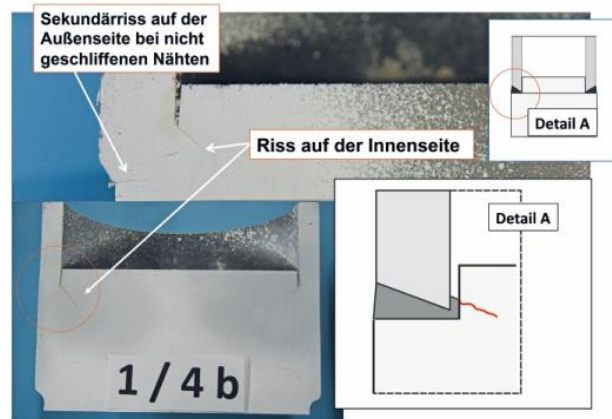


Abb. 3-5 Typische Rissbilder des oberen Anschlusses [18]

Es zeigte sich durch numerische Untersuchungen, dass ein größeres Überstehen der Kopfplatte des oberen Anschlusses zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit führte. Dieser konnte bei einem Erhöhen des Durchmessers der Kopfplatte von 30 mm auf eine Ermüdungsfestigkeit von 56 N/mm^2 erhöht werden. Probleme konnten durch die Passgenauigkeit zwischen Kopfplatte und Rohr bei der Herstellung entstehen. Das Rohr hatte nicht nur Fertigungstoleranzen im Innenradius des Rohrs, sondern auch in der Querschnittsform. Die Kreisform konnte eine Ovalisierung aufweisen, welche unplanmäßige Spalte initiierten, die die Ermüdungsfestigkeit herabsetzten.[18]

Für den unteren Anschluss erkannte Hanswille [18] als kritische Stelle den Übergang zur Längsnaht an der Umschweißung des Knotenblechendes. Deshalb wurde das Knotenblechende abgerundet, um einen stetigen Übergang zu ermöglichen. Der Abstand zwischen Knotenblechende und Ende des Schlitzes sollte dabei klein gehalten werden, damit in diesem Bereich wenig Schweißeigenstress entstehen konnten. Der Überstand des Knotenblechs im Rohrinternen bildete eine Schweißbadsicherung. Aufgrund von Toleranzabweichungen des Innendurchmessers des Rohrs konnte es dabei zu einem Spalt zwischen Rohr und Knotenblech kommen. Dies verschlechterte die Ermüdungsfestigkeit, da in diesem Bereich Spannungskonzentrationen auftraten. Der Riss bildete sich im Inneren des Rohrs, zwischen Schweißbadsicherung und dem Rohr, siehe Abb. 3-6. Die Versuche ergaben für den unteren Anschluss eine charakteristische Ermüdungsfestigkeit von 52 N/mm^2 . [18]

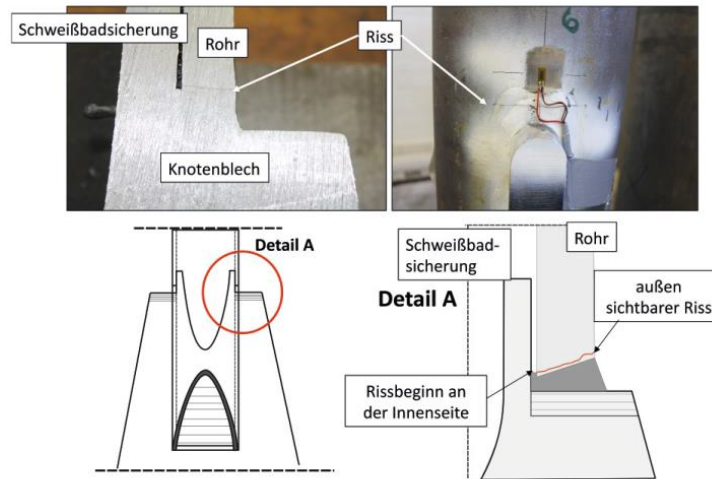


Abb. 3-6 Typische Rissbilder des unteren Anschlusses [18]

Die Wirtschaftlichkeit des Anschlusses wurde mit zwei verschiedenen Querschnittsgrößen untersucht. Eine Variante mit einem Rohrdurchmesser von 457 mm und einer Rohrwanddicke von 30 mm und eine Variante mit einem Rohrdurchmesser von 219,1 mm und einer Rohrwanddicke von 16 mm. Es zeigte sich, dass bei einer Erhöhung der Querschnittsfläche die Ermüdungsfestigkeit nicht linear anstieg. Durch einen größeren Querschnitt wurde die Steifigkeit des Anschlusses erhöht und somit erhöhten sich die Schnittgrößen im Bauteil. Die Querschnittsfläche wurde um den Faktor 3,95 erhöht, dabei verringerte sich der Ermüdungswiderstand vom Kerbfall 71 auf den Kerbfall 36 nur um den Faktor 1,97. [18]

Auf Basis dieser Untersuchungen veröffentlichte 2019 die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten. In dieser sind Planungshilfen veröffentlicht. Auch Verstärkungsmaßnahmen für bestehende Bauwerke wurden aufgeführt. Es waren zwei Details zu Querrahmen an Verbundbrücken mit diagonalen Abstützungen der Fahrbahnplatte aufgelistet. Für den oberen Anschluss wurde die Variante mit Kopfplatte und Knotenblech angegeben. Es erfolgte eine Einstufung in den Kerbfall 50 für den gesamten Anschluss. Bei einem Überstand der Kopfplatte von 30 mm wurde diese in den Kerbfall 56 eingestuft. Der untere Anschluss wurde mit einem Knotenblech und einem abgeschrägten Rohr angegeben. Eine Einstufung fand für den gesamten Anschluss in den Kerbfall 50 statt.[5]

3.3 Experimentelle und numerische Untersuchungen von Baptista [16]

Baptista [16] führte Untersuchungen zu Diagonalrohr-Anschlüssen an Brücken durch. Die Details bestanden aus Rohranschlüssen mit angeschweißtem Knotenblech. Er untersuchte vier Varianten sowohl experimentell als auch numerisch.

Die Verbindung C1 bestand aus einem geschlitzten, am Ende abgeschrägten Rohr. Es hatte einen Durchmesser von 114,3 mm und eine Rohrwanddicke von 5,6 mm. Das Knotenblech war geschlitzt und an den Enden mit einem Winkel von 20° abgeschrägt, dabei wurde eine Blechdicke von 18 mm für das Knotenblech verwendet. Das Rohr war mit dem Knotenblech

mit einer Kehlnaht verbunden. Es wurde kein Deckel verwendet, dies sollte einen weicheren Kraftfluss ermöglichen. Die Variante C2 bestand wie C1 aus einem abgeschrägten und geschlitzten Rohr. Ausgeführt war das Rohr mit einem Außendurchmesser von 114,3 mm und mit einer Rohrwanddicke von 5 mm. Am Ende des Schlitzes hatte dieses einen kreisförmigen Freischnitt, um einen Toleranzausgleich zu ermöglichen. Das Knotenblech war an der innenliegenden Seite mit einer Ausnehmung versehen und hatte eine Blechdicke von 18 mm. Die Schweißnaht zwischen Rohr und Knotenblech bestand aus einer Kehlnaht. Das Detail C3 setzte sich aus einem abgeschrägten und geschlitzten Rohr zusammen, das mit einer HV-Naht mit dem Knotenblech verbunden wurde. Der Rohraußendurchmesser betrug 114,3 mm, die Rohrdicke 5 mm und die Blechdicke des Knotenblechs 18 mm. Die Verbindung C4 war als ein Rohr mit aufgeschweißtem Deckel konzipiert. Das Rohr wies einen Außendurchmesser von 114,3 mm und eine Rohrwanddicke von 5 mm auf. Das Rohr war mit dem Knotenblech durch Kehlnähte verbunden, welches mit einer Blechdicke von 18 mm verwendet wurde. Das Knotenblech war im Bereich des Rohrs ausgenommen und an den Enden in einem Winkel von 30° abgeschrägt. Die Anschlussvarianten C1, C2, C3 und C4 sind in Abb. 3-7 dargestellt. [16]

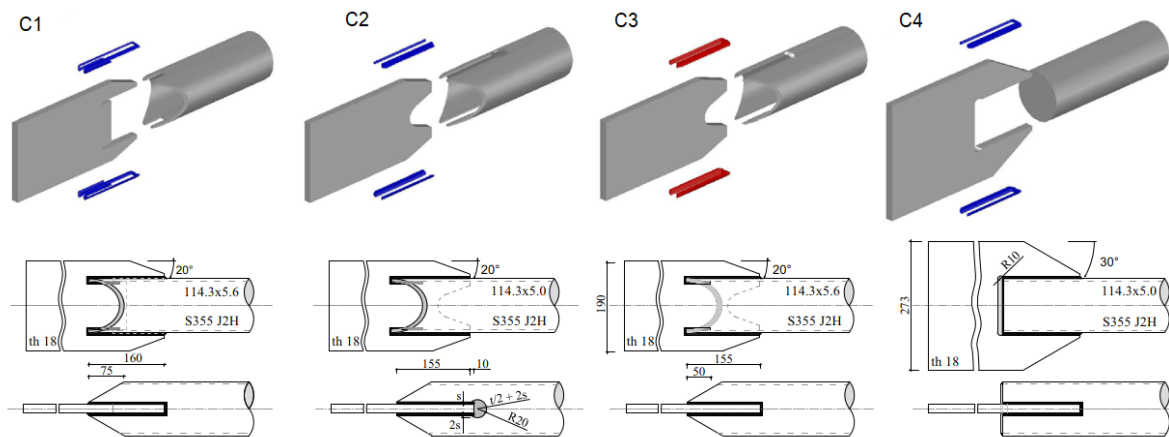


Abb. 3-7 Diagonalrohr-Anschlüsse Baptista [16]

Baptista [16] führte zu den Diagonalrohr-Anschlüssen 24 Ermüdungsversuche durch. Diese untersuchte er bei den jeweiligen Varianten mit unterschiedlichen Spannungsschwingbreiten, unter Verwendung eines konstanten Spannungsverhältnisses von $R = 0,1$. [16]

Aus den experimentellen Untersuchungen wurde für die Verbindung C1 eine Kerbspannung von 64 N/mm^2 ermittelt. Der Ermüdungsrisse entstand an der Umschweißung des Knotenblechs, wobei dieser schwierig zu erkennen war, da dieser an der Wurzel der Schweißnaht entstand. Für das Detail C2 errechnete sich eine Kerbspannung von 55 N/mm^2 . Sie lag unterhalb der im Eurocode 3 Teil 1-9 [1] angegebenen Kerbfallklasse von 71 N/mm^2 für dieses Detail. Der Ermüdungsrisse trat am Freischnitt im Rohr auf. Das Detail C3 wurde in eine Kerbspannung von 52 N/mm^2 eingestuft. Der Ermüdungsrisse trat ebenfalls wie in Detail C1 an der Umschweißung auf und konnte schlecht erkannt werden da dieser an der Nahtwurzel entstand. Eine Kerbspannung von 43 N/mm^2 ergab sich aus der experimentellen Untersuchung für das Detail C4. Es wurden zwei Risse beobachtet, der erste an der Spitze, der zweite am Ende der Ausnehmung des Knotenblechs. [16]

Die vier Verbindungen untersuchte Saad [23] mithilfe der Finite-Elemente-Methode mit der Kerbspannungsmethode nach Radaj [14] numerisch. Um lokale und globale Effekte mit einzu- beziehen, modellierte er den kompletten Anschluss. Damit Singularitäten verhindert werden konnten, war mit einem Referenzradius $r_{\text{ref}} = 1 \text{ mm}$ die Nahtwurzel und der Schweißnahtfuß ausgerundet. Er modellierte das Finite-Elemente-Modell mit Volumenelementen mit einem quadratischen Verschiebungsansatz, eine Spannungsschwingbreite von $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$ wurde aufgebracht. [16, 23]

Die Schweißnähte waren nach abgemessenen Größen modelliert und bestanden aus planen Oberflächen und abgerundeten Nahtübergängen. Die Netzdicke verdichtete Saad an Stellen von Spannungsspitzen, wie zum Beispiel an der Umschweißung des Knotenblechs. [23]

Für die Verbindung C1 errechnete sich ein maximaler Kerbfaktor von $k_f = 7,1$, was einer Kerbkategorie von 32 N/mm^2 entsprach. Die maximale Kerbspannung konnte am Ende des Knotenblechs am Schweißnahtfuß erkannt werden. Das Auftreten einer Exzentrizität zwischen Rohr und Knotenblech führte zu einem hohen Kerbfaktor. Dieser Effekt wurde durch das nicht durchgängige Knotenblech im Rohr hervorgerufen. In diesem Detail untersuchte Saad [23] den Einfluss der Breite des Flügels des Knotenblechs. Dabei zeigte sich ein positiver Effekt. Der Kerbfaktor konnte bei einer Erhöhung der Knotenblechbreite von $k_f = 7,1$ auf $k_f = 6,6$ reduziert werden, siehe Abb. 3-8. [23]

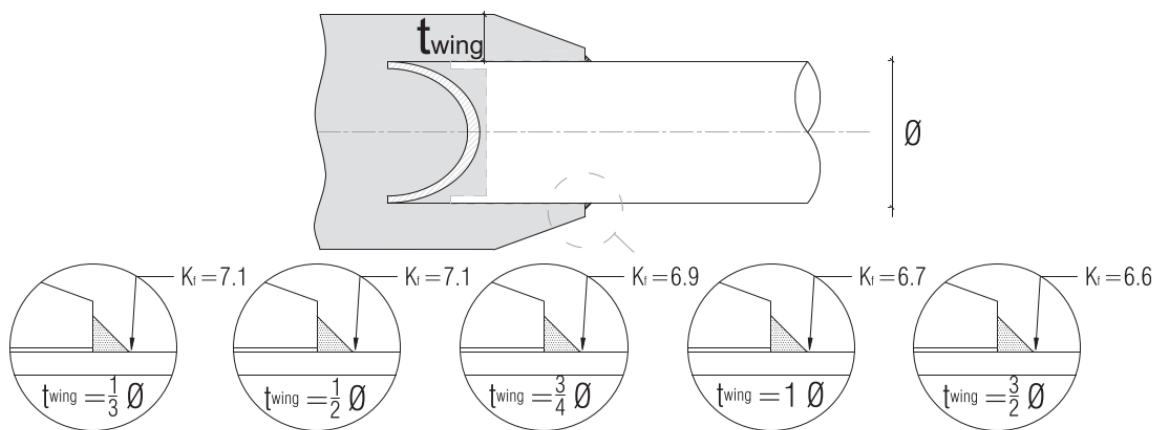


Abb. 3-8 Einfluss der Blechdicke des Knotenblechs [16]

Das Detail C2 gab er mit einem Kerbfaktor von $k_f = 5$ an, was mit einer Material-Wöhlerlinie von 225 eine Kerbkategorie von 45 ergab. Im Finite-Elemente-Modell zeigte sich eine starke Deformation an der Verbindung. Es stellte sich die Frage, ob das Anfasen des Rohres sinnvoll sei. Für die Ermüdungsfestigkeit hatte dies keine Auswirkungen, da sich die Spannungskonzentration an anderer Stelle befand. Durch das Anbringen eines runden Freischnitts wurde der Rohrquerschnitt verkleinert, was zu Spannungskonzentrationen am Rand des Lochs führte. Mit einem außenliegenden Deckel ergab sich eine Verbesserung des Kerbfaktors von $k_f = 5,0$ auf $k_f = 4,7$. Dieser Effekt war auf einen glatteren Spannungsverlauf zurückzuführen. Dies konnte er durch eine Analyse der Untersuchungen von Zirn [24] bestätigen. Eine Verbesserung durch einen Deckel war zu erkennen. Dabei konnte eine Verbesserung der Kerbspannungen von bis zu 12% erreicht werden. Die Verwendung eines Deckels war außerdem zum

Abdichten des Anschlusses notwendig. Als Alternative wurde das Detail mit einem ellipsenförmigen Freischnitt versehen, was zu einer Verbesserung des Kerbfaktors auf $k_f = 3,75$ führte, dabei war kein Deckel vorhanden. Durch ein Verlängern des runden Freischnitts zu einem länglichen Loch konnte der Kerbfaktor von $k_f = 5,0$ auf $k_f = 4,3$ verbessert werden, vergleiche Abb. 3-9. Ein Verkleinern des Verhältnisses zwischen Rohrdurchmesser und Durchmesser des Freischnitts konnte eine Verbesserung des Kerbfaktors von $k_f = 5,0$ auf $k_f = 4,6$ bewirken, siehe Abb. 3-10. [23]

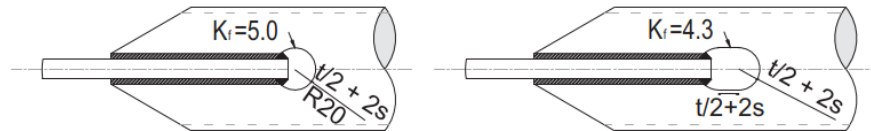


Abb. 3-9 Einfluss eines länglichen Freischnitts [16]

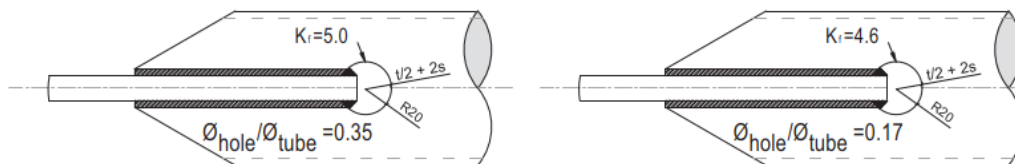


Abb. 3-10 Einfluss des Verhältnisses von Durchmesser des Freischnitts zu Rohrdurchmesser [16]

Aus den Berechnungen zu Detail C3 ergab sich eine Kerbe am Ende des Knotenblechs mit einem Kerbfaktor am Schweißnahtfuß von $k_f = 3,9$ und an der Schweißnahtwurzel von $k_f = 7,8$. Eine weitere Variante wurde ohne Ausnehmung im Knotenblech durchgeführt. Der Kerbfaktor erhöhte sich dabei an der Nahtwurzel auf $k_f = 8,3$, siehe Abb. 3-11. Es zeigte sich, dass die Ausnehmung im Knotenblech einen geglätteten Spannungsverlauf erzeugte und sich positiv auf die Ermüdungsfestigkeit auswirkte. [23]

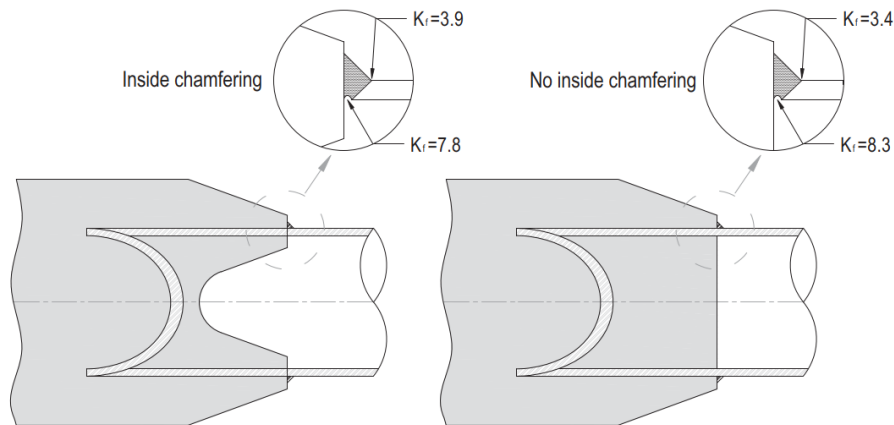


Abb. 3-11 Einfluss der Ausnehmung im Knotenblech [16]

Für die Verbindung C4 wurde aus der numerischen Untersuchung ein Kerbfaktor von $k_f = 9,98$ berechnet, siehe Abb. 3-12. Mit einer Material-Wöhler-Linie 225 ergab dies eine Kerbspannung von 22 N/mm^2 . Die Spannungserhöhung trat am Schweißnahtfuß auf. Dabei wurde die Spannungserhöhung am Ende der Schweißnaht ignoriert. In den durchgeführten experimentellen Untersuchungen von Baptista zeigte sich, dass sowohl am Schweißnahtende, im Knotenblech als auch am Schweißnahtfuß Risse auftraten. Diese ergaben eine Kerbspannung von 45 N/mm^2 , was oberhalb der numerischen Untersuchungen lag. [23]

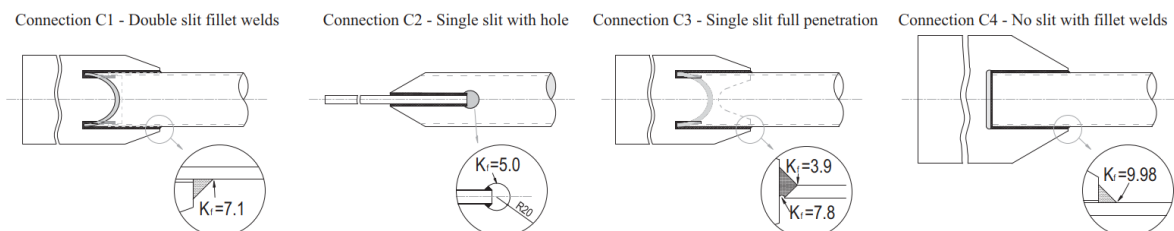


Abb. 3-12 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen nach Baptista [16]

Baptista schlug drei Diagonalrohr-Anschlüsse vor, siehe Abb. 3-13. Alle konnten in eine Kerbfallklasse 56 eingegliedert werden, sie lagen unterhalb der Kerbfallklassen 63 und 71 aus dem Eurocode 3 Teil 1-9 [1]. Zwei konnten die Anforderungen an Wasserdichtheit einhalten. Die Ausführung mit einem Freischnitt am Ende des Knotenblechs ist gegen äußere Einflüsse nicht geschützt. Es zeigte sich, dass die Anwendung eines Deckels die Ermüdungsfestigkeit verbesserte. Baptista verwendete bei allen Ausführungsvorschlägen einen Deckel. Eine weitere Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit erbrachte die Ausnehmung des Knotenblechs. Durch die Ausnehmung konnte ein glatter Spannungsverlauf erreicht werden. Dies hatte einen positiven Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit. [16]

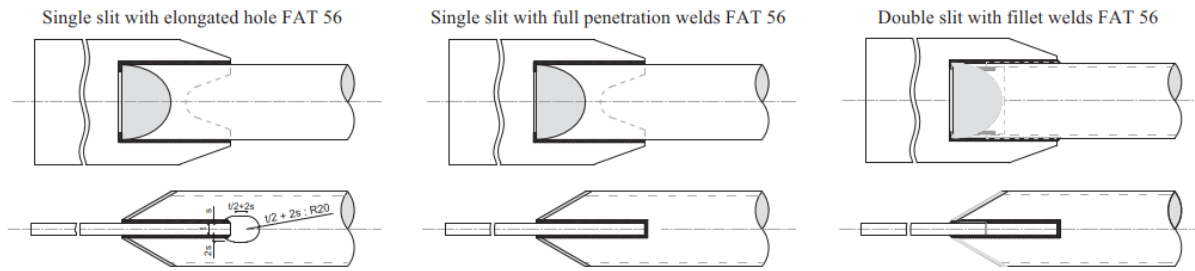


Abb. 3-13 Ausführungsvorschläge von Baptista [16]

Die numerischen Untersuchungen zeigten, dass der Ort des Ermüdungsrisses durch die numerischen Modelle sehr gut vorhergesagt werden konnte. Aus den Ergebnissen konnte geschlossen werden, dass die Ermüdungsrisse der Verbindung C1 nur schwer zu erfassen waren, da diese im Rohrinernen an der Nahtwurzel auftraten. Die Biegesteifigkeit des Flügels des Knotenblechs sollte minimiert werden. Für die Verbindung C2 zeigte sich, dass eine Verwendung eines Freischnitts eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit erbrachte, dies ermöglichte einen Toleranzausgleich. Dabei wurde die Umschweißung des Knotenblechs vermieden, was eine Schwachstelle beim Schweißprozess darstellte. Auch zeigte sich, dass bei einer Ausführung mit einem Freischnitt der Ermüdungsriss genau zu erkennen war. Für Inspektionen konnte der Riss damit leicht erkannt werden. Durch ein Verlängern des Freischnitts erhöhte sich die Ermüdungsfestigkeit weiter. Die Ausführung C3 mit einer durchgeschweißten Naht zeigte, dass der Ermüdungsriss an der Wurzel entstand. Dadurch ließ sich dieser erst lokalisieren, wenn er bis zur Oberfläche reichte. Eine Ausnehmung im Knotenblech im Rohrinernen war notwendig, dadurch konnte ein definierter Übergangsbereich der Steifigkeiten geschaffen werden. Die Ausführung C4 mit einfachen Kehlnähten zeigte die schlechteste Ermüdungsfestigkeit der Untersuchungen auf. Dabei konnten die Ermüdungsrisse an zwei verschiedenen Stellen entstehen, an der Knotenblechspitze und am Ende des Rohrs. [16, 23]

4 Experimentelle Untersuchungen an Diagonalrohr-Anschlüssen

4.1 Allgemeines zum AiF-DASt Forschungsvorhaben[21]

Im Forschungsprojekt „Praxisgerechte Gestaltung von Diagonalrohr-Anschlüssen im Stahl- und Verbundbau“ [21] wurden 2020 experimentelle Untersuchungen an Diagonalrohr-Anschlüssen durchgeführt. Aus bisherigen Untersuchungen nach Zirn [24], Hanswille [18] und Baptista [16] und den 2019 veröffentlichten Planungshinweisen RE-ING [5] wurden für das Forschungsprojekt drei praxisnahe Diagonalrohr-Anschlüsse abgeleitet. Die Versuchskörper 1, 2 und 3 sind in Abb. 4-1, Abb. 4-2 und Abb. 4-3 zu erkennen.



Abb. 4-1 Versuchskörper der Serie 1 [21]



Abb. 4-2 Versuchskörper der Serie 2 [21]



Abb. 4-3 Versuchskörper der Serie 3 [21]

4.2 Geometrie der Versuchsserien

Im folgenden Kapitel werden die Geometrien der Versuchskörper beschrieben. Insbesondere wird auf die Geometrien und Schweißnähte der in dieser Arbeit untersuchten Versuchskörper 2 und 3 eingegangen.

Die drei Versuchsserien wurden mit einem Rohr hergestellt, welches einen Außendurchmesser $d_t = 168,3$ mm und eine Wanddicke von $t_t = 8$ mm hatte. Dieses war aus dem Werkstoff S355J2H gefertigt. Das Knotenblech war aus dem Werkstoff S355J2+N hergestellt und wies

bei allen Versuchskörpern eine Breite von $b_p = 210$ mm, eine Länge von $l_p = 610$ mm und eine Blechdicke von $t_p = 20$ mm auf. Die Knotenbleche wurden im Rohrrinneren für ein elastischeres Verhalten ausgenommen. Die Geometrie des Knotenblechs ist in Abb. 4-4 veranschaulicht. Alle Schweißnähte wiesen eine Dicke von $a_w = 8$ mm und eine Länge von $l_w = 265$ mm auf. Der Deckel war in einer Blechdicke von $t_s = 10$ mm ausgeführt und aus dem Werkstoff S355J2+N hergestellt. Die Abmessungen der Versuchskörper sind in Tab. 4-1 aufgelistet.

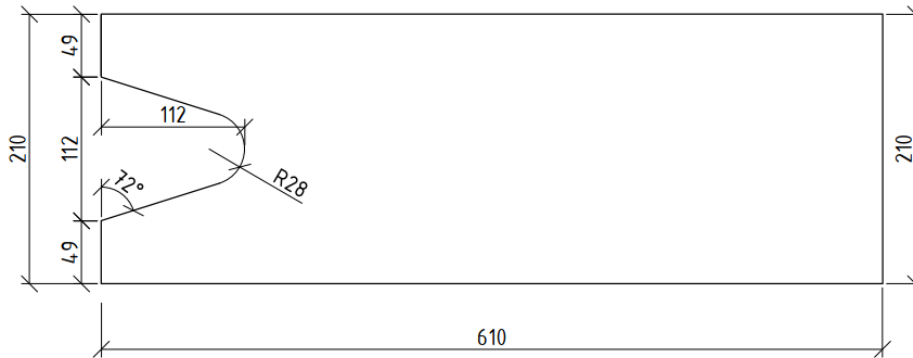


Abb. 4-4 Geometrie des Knotenblechs [21]

Tab. 4-1 Abmessungen der Versuchskörper

Bauteil	Abmessung
Knotenblech	$l_p = 610$ mm
	$b_p = 210$ mm
	$t_p = 20$ mm
Rohr	$d_t = 168,3$ mm
	$l_t = 685$ mm
	$t_t = 8$ mm
Schweißnaht	$l_w = 265$ mm
	$a_w = 8$ mm
Deckel	$t_s = 10$ mm

Versuchsserie 1

Der Versuchskörper 1 bestand aus einem geschlitzten, an den Enden abgeschrägt Rohr. Dies war notwendig, um eine Zugänglichkeit der innenliegenden Schweißnaht zu ermöglichen. Das Rohr hatte am Ende des Schlitzes einen Freischnitt. Durch diesen wurde ein Toleranzausgleich für die Montage möglich. Innenliegend war zur Abdichtung gegenüber eindringendem Wasser ein Deckel angebracht. Das Knotenblech wurde in das geschlitzte Rohr eingeschoben und mit innen- und außenliegenden Kehlnähten an das Rohr geschweißt. Für einen weicheren Kraftfluss wurde das Knotenblech mit einer Ausnehmung versehen. Der Versuchskörper 1 ist in Abb. 4-1 zu sehen.

Versuchsserie 2

Die Versuchsserie 2 bestand aus einem geschlitzten Rohr, mit einem eingeschobenen Knotenblech. Das Rohrende war mit einem geraden, aufgeschweißten Deckel ausgeführt und musste nicht abgeschrägt werden. Das Knotenblech, welches in das geschlitzte Rohr eingeschoben wurde, wurde für einen glatteren Spannungsverlauf innenliegend ausgenommen, siehe Abb. 4-4. Für ein ermüdungsarmes Verhalten war die Spitze des Knotenblechs mit zwei 45°-Fasen versehen, die ein Drittel der Blechdicke einnahmen, die Kanten der Fasen wurden mit einem Radius von 2 mm abgerundet, vergleiche Abb. 4-6. Das Knotenblech war mit dem Rohr mittels einer HY-Naht Verbunden. Diese verlief umlaufend am Knotenblech. Eine Schweißbadsicherung musste nicht verwendet werden. Am Ende des Rohrs war ein außenliegender Deckel mithilfe von umlaufenden Kehlnähten angebracht. Er dient zur Abdichtung gegenüber eindringendem Wasser. In Abb. 4-5, Abb. 4-6 und Abb. 4-7 ist die Seitenansicht und ein Horizontalschnitt des Versuchskörpers 2 veranschaulicht.

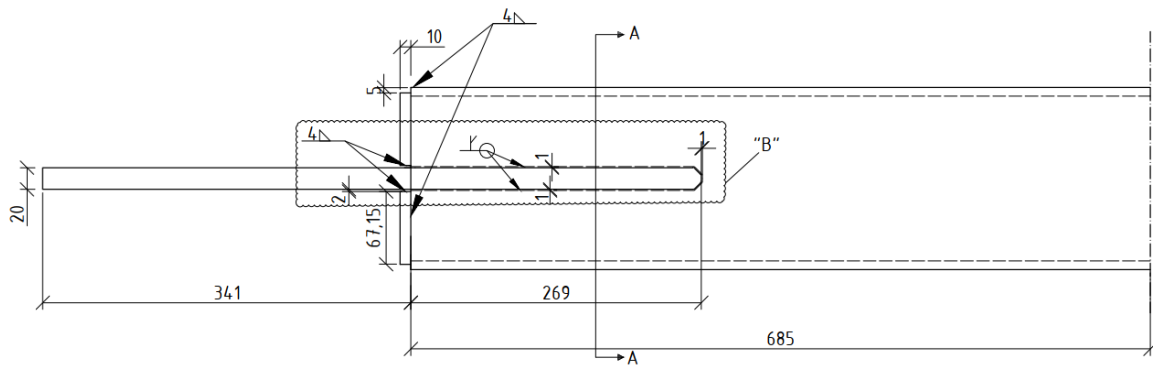


Abb. 4-5 Seitenansicht des Versuchskörpers 2 [21]

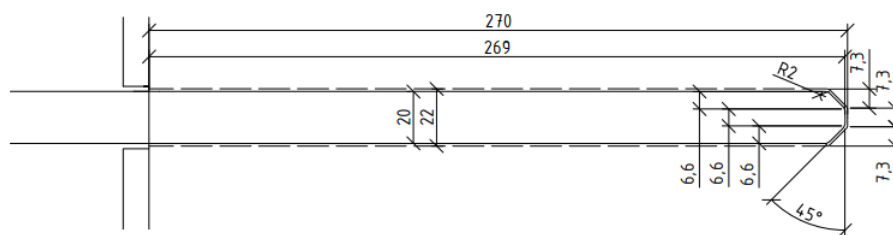


Abb. 4-6 Detail B der Seitenansicht des Versuchskörpers 2 [21]

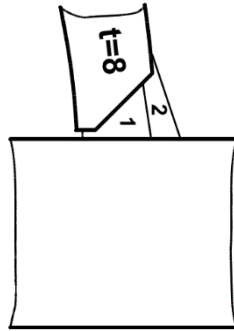


Abb. 4-9 Geometrie der HY-Naht aus der Schweißanweisung [21]

Versuchsserie 3

Der Versuchskörper 3 wird charakterisiert durch ein abgeschrägtes Rohr mit einem aufgeschweißten Deckel. Das Rohr war, wie in Versuchsserie 2, geschlitzt ausgeführt, mit einem in diesen Schlitz eingeschobenen Knotenblech. Das Knotenblech war an der Spitze mit einem Radius von 10 mm abgerundet. Die Verbindung zwischen Rohr und Knotenblech wurde mittels einer HV-Naht hergestellt. Für diese musste eine Schweißbadsicherung an der Innenseite des Rohrs eingelegt werden. Das abgeschrägte Rohr machte eine Zugänglichkeit der Innenseite des Rohrs möglich. Das Rohr war mit einem Winkel von 30° abgeschrägt. Der Deckel des Versuchskörpers wurde nach dem Montieren des Anschlusses aufgeschweißt. Die Schweißnähte waren mit umlaufenden Kehlnähten ausgeführt. Die Deckel hatten aufgrund des abgeschrägten Rohrs eine elliptische Form. Sie ermöglichten die Abdichtung gegenüber eindringendem Wasser. Im Inneren des Rohres war das Knotenblech, um einen glatteren Spannungsverlauf zu ermöglichen, mit einer Ausnehmung versehen, vergleiche Abb. 4-4.

Die Ausführung des Versuchskörpers 3 ist durch die Verwendung einer HV-Naht aufwendiger im Vergleich zu Versuchskörper 2. Das Anbringen der Rundkeramik und das Verschweißen des Deckels, was auf der Baustelle geschieht, ist dafür verantwortlich. Es kann aber eine bessere Ermüdungsfestigkeit im Vergleich zur Versuchsserie 2 erreicht werden. Dies könnte unter anderem an der HV-Naht, einem abgeschrägten Rohr oder an der runden Spitze des Knotenblechs liegen. In Abb. 4-10 und Abb. 4-11 ist eine Seitenansicht und ein Horizontalschnitt des Versuchskörpers 3 dargestellt.

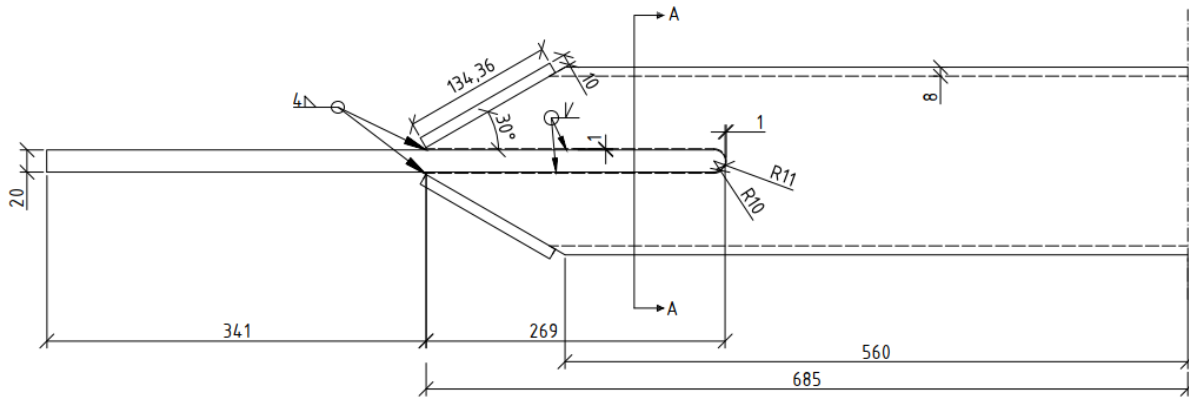


Abb. 4-10 Seitenansicht des Versuchskörpers 3 [21]

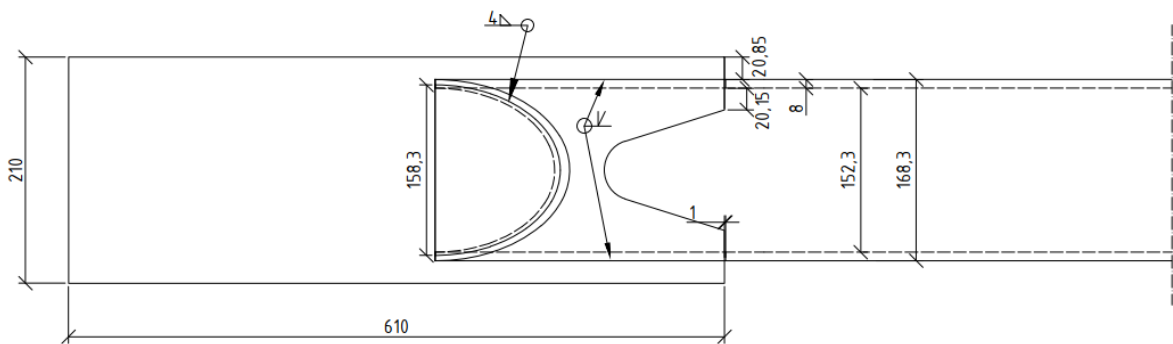


Abb. 4-11 Draufsicht des Versuchskörpers 3 [21]

Es zeigte sich in bisherigen Forschungen, dass die Schweißnaht einen wichtigen Faktor im Hinblick auf die Ermüdungsfestigkeit darstellt. Deshalb wurde die Geometrie der HV-Naht der Versuchsserie 3 genauer untersucht. In Abb. 4-12 ist die theoretische HV-Naht zu erkennen. Dabei liegt an der Innenseite eine Rundkeramik zur Schweißbadsicherung mit dem Durchmesser von 6 mm an. Ein Toleranzspalt zwischen Rohr und Knotenblech war mit einem Millimeter vorgesehen. Die Breite der Schweißnaht wurde mit 8 mm angegeben. In Abb. 4-13 ist die HV-Naht nach Schweißanweisung zu erkennen. Dabei wurde in zwei Schichten geschweißt, eine erste an der Spitze der Fase des Rohrs und eine zweite bis zur Oberfläche des Rohrs.

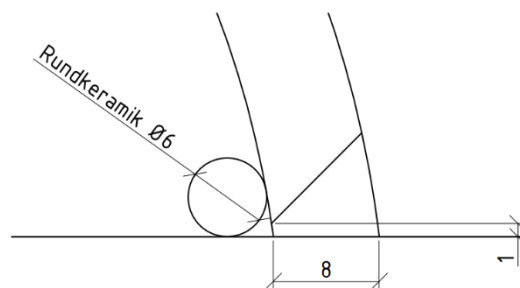


Abb. 4-12 Theoretische Geometrie der HV-Naht [21]

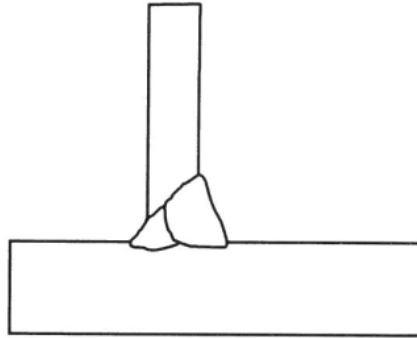


Abb. 4-13 Geometrie der HV-Naht aus der Schweißanweisung [21]

4.3 Experimentelle Untersuchungen

Insgesamt wurden die drei Versuchsserien mit jeweils 8 Versuchskörpern an der Materialprüfungsanstalt in Stuttgart untersucht. Diese fanden bei unterschiedlichen Spannungsschwingbreiten statt, um später Aussagen über eine geeignete Wöhlerlinie treffen zu können. Die Versuche wurden bei einem konstanten Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ im Zugschwellbereich durchgeführt. In Abb. 4-14 ist der Versuchsaufbau des Versuchskörpers 2 zu sehen. Um die Spannungen in numerischen Modellen verifizieren zu können, waren an allen Prüfkörpern Dehnmessstreifen angebracht. Diese wurden in Rohrmitte zur Überprüfung der Nennspannungen und an weiteren Stellen, wie zum Beispiel am Freischnitt der Versuchsserie 1 oder am Ende des Knotenblechs der Versuchsserien 2 und 3, befestigt. Außerdem wurden teilweise Strukturspannungsmessungen durchgeführt, bei denen für die Versuchsserien 2 und 3 am Ende der Knotenbleche Dehnmessstreifen am Rohrquerschnitt angebracht waren, vergleiche Abb. 5-16 und Abb. 5-19. Die Ergebnisse dieser experimentellen Untersuchungen wurden bereits analysiert und ausgewertet [22].



Abb. 4-14 Ermüdungsversuch des Versuchskörpers 2 [21]

Für die Versuchsserie 1 wurde eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 43,5 \text{ N/mm}^2$ ausgewertet, woraus sich ein Kerbfall von 40 ergab. Siehe Abb. 4-15. [22]

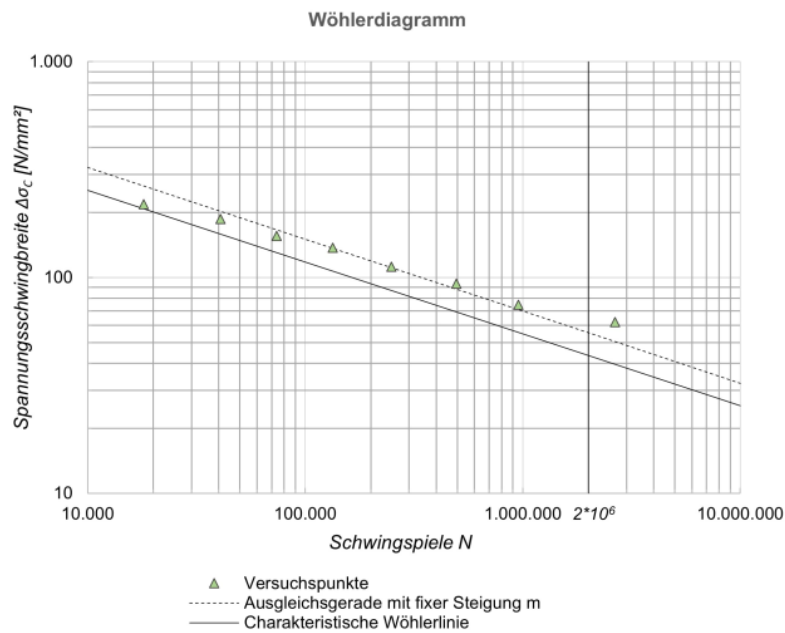


Abb. 4-15 Wöhlerlinie der Versuchsserie 1 [22]

Eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 50,8 \text{ N/mm}^2$ ergab sich für die Versuchsserie 2 was zu einer Einordnung in den Kerbfall 50 führte, siehe Abb. 4-16. [22]

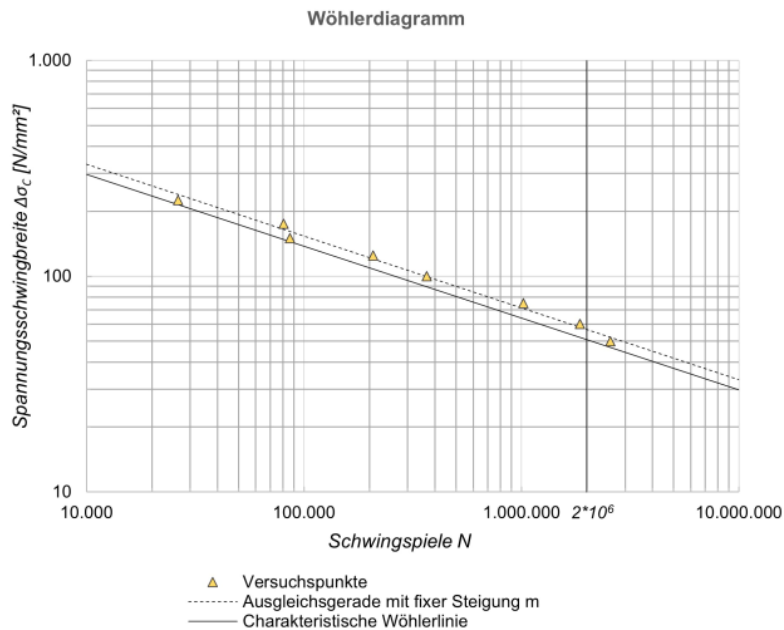


Abb. 4-16 Wöhlerlinie der Versuchsserie 2 [22]

Aus Versuchsserie 3 konnte eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 56,9 \text{ N/mm}^2$ ausgewertet werden, was zu einem Kerbfall von 56 führte, siehe Abb. 4-17. [22]

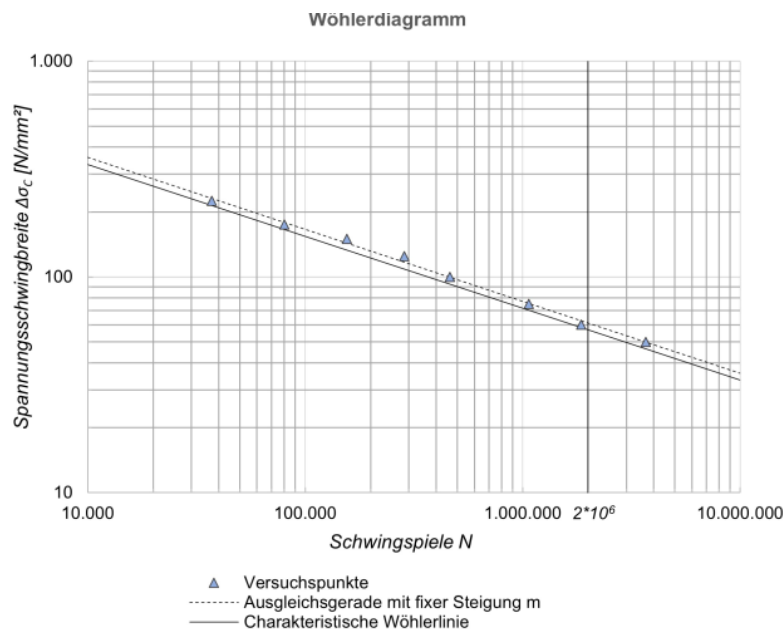


Abb. 4-17 Wöhlerlinie der Versuchsserie 3 [22]

Alle Ergebnisse wurden mit einer fixierten Steigung der Wöhlerlinie von $m = 3$ ausgewertet. Aus den Versuchsergebnissen wird deutlich, dass die Kerbfallkategorien 63 und 71 nach Eurocode 3 Teil 1-9 [1] durch keinen der Versuchskörper erreicht werden konnte. [22]

Die Rissinitiierung fand in der Versuchsserie 1 am Freischnitt statt, dabei wuchs der Riss vom Freischnitt weiter ins Rohr hinein, bis es zum Bruch kam. Bei der Versuchsserie 2 entstand der Ermüdungsriss an der Umschweißung des Knotenblechs. Am Anfang der 45° -Fase des Knotenblechs begann er, teilweise aber auch an der Spitze des Knotenblechs. Dabei zeigte sich, dass der Riss von innen nach außen wuchs. Dies bedeutet, dass er an der Nahtwurzel entstand und bis an die Oberfläche der Schweißnaht wuchs, siehe Abb. 4-18 (links). Die Risse der Versuchsserie 3, wie Serie 2, entstanden an der Spitze des Knotenblechs, im Rohrinternen an der Nahtwurzel. Es ist aber zu erkennen, dass die Risse nicht durch die Schweißnaht liefen, sondern sie entstanden am inneren Nahtübergang, da der Querschnitt an dieser Stelle am geringsten war, vergleiche Abb. 4-18 (rechts) [22]

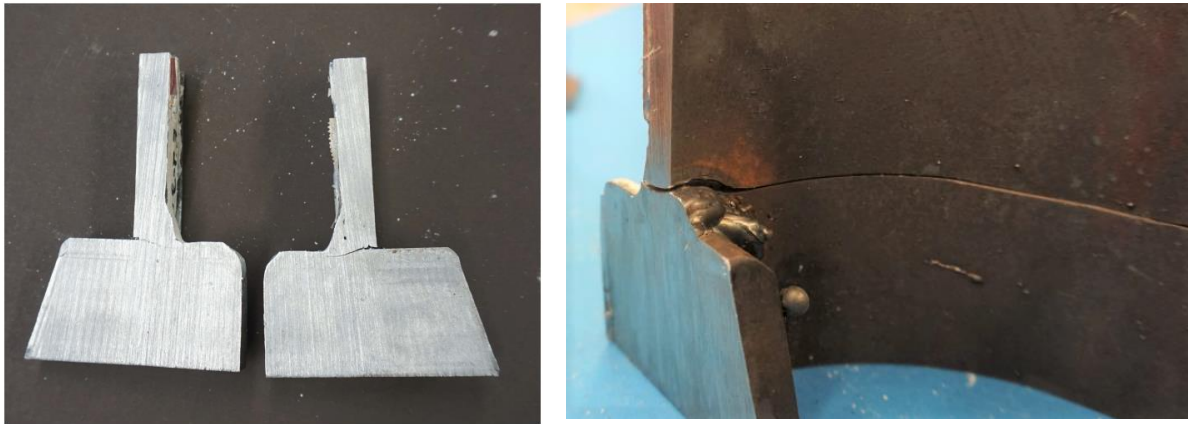


Abb. 4-18 Ermüdungsriß Versuchskörper E 2-3 (links) und E 3-6 (rechts) [21]

Von den Versuchskörpern wurden Makroschliffe angefertigt. Es konnten weitere Rückschlüsse auf das Rissverhalten gezogen werden. Es zeigte sich, dass die Umschweißung des Knotenblechs der Versuchskörper 2 und 3 eine für den Schweißvorgang schwierig auszuführende Stelle ist.

Aus den Makroschliffen ist zu erkennen, dass der Ermüdungsriß der Versuchsserie 2 an der Wurzel der Schweißnaht entstand. Der Riss wuchs zwischen Knotenblech und Schweißnaht nach außen. Die Versuchsserie 2 war mit einer HY-Naht ausgeführt. In den Makroschliffen zeigte sich, dass im Bereich der Umschweißung nicht genug Schweißgut an die Nahtwurzel gelangen konnte. Dadurch wurde die Nahtwurzel nicht vollständig erfasst, es entstand an der Umschweißung eine Schweißnaht mit geringer Blechdicke, was zu einer Schwachstelle führte. [22]

Für die Versuchsserie 3 verdeutlichte sich aus den Makroschliffen, dass die Risse im Inneren des Rohrs entstanden. Die Versuchsserie 3 war mit einer HV-Naht ausgeführt, bei dieser wurde eine Schweißbadsicherung im Inneren des Rohrs angebracht, um ein Eindringen von Schweißgut ins Rohrinne zu verhindern. Die Schweißbadsicherung war mit einer Rundkeramik ausgeführt, diese konnte an der Umschweißung des Knotenblechs nicht angebracht werden, da die Rundkeramik nicht gebogen werden konnte. Durch die fehlende Schweißbadsicherung an der Umschweißung konnte mehr Schweißgut ins Innere des Rohrs fließen, was zu einer größeren Schweißnaht führte. Der Ermüdungsriß entstand oberhalb der Schweißnaht, an welcher der Querschnitt am geringsten war. Dieser wuchs von innen nach außen [22]

4.4 Numerische Untersuchungen des Versuchskörpers 1

Für Versuchsserie 1 wurden im Laufe des Forschungsprojekts numerische Untersuchungen durchgeführt [22] und mit dem Finite-Elemente-Programm ANSYS Workbench [28] realisiert. Zur Vereinfachung des Modells fanden Symmetriebedingungen und die Submodelltechnik Anwendung. Das Modell wurde anhand einer Sensitivitätsanalyse und mit Dehnmessstreifen verifiziert. Es zeigte sich im Vergleich zwischen experimentellen und numerischen Versuchen, dass der Ort der Rissentstehung durch das numerische Modell vorhergesagt werden konnte. Eine maximale Kerbspannung errechnete sich zu 580 N/mm^2 , was einem Kerbfaktor von 5,80 entspricht. Die Spannungskonzentration trat am Freischnitt im Rohr auf. [22]

In einer Parameterstudie wurden verschiedene Einflussgrößen untersucht. Der Innendeckel der Versuchsserie 1 zeigte wenig Einfluss auf den Kerbfaktor. Aus der Berechnung des Finite-Elemente-Modells ohne Deckel ergab sich ein Kerbfaktor von $k_f = 5,87$, was einen geringen Anstieg des Kerbfaktors im Vergleich zur Ausführung mit Deckel mit sich brachte. [22]

Ein weiterer untersuchter Parameter war die Geometrie des Knotenblechs. Dabei wurden unterschiedliche Ausnehmungen getestet, siehe Abb. 4-19. Die Versuchsserie 1 war mit einer spitz zulaufenden, am Ende abgerundeten Ausnehmung ausgeführt. Alternativ wurde eine Ausnehmung in Form eines Halbmondes, einer Ellipse und zum Vergleich ohne Ausnehmung, untersucht. Es zeigte sich, dass durch eine Ausführung mit einer Ausnehmung geringere Kerbfaktoren erreicht werden konnten. So ergab sich für ein Knotenblech ohne Ausnehmung ein Kerbfaktor von 6,32, was deutlich oberhalb des Kerbfaktors der Versuchsserie 1 lag. Die Ausführung mit einem Halbmond, bei unterschiedlichen Radien, erreichte einen Kerbfaktor zwischen 6,05 und 6,07. Eine Ausnehmung mit einer Ellipse bei verschiedenen Längen der Ellipse ergab einen Kerbfaktor zwischen 5,81 und 5,86. Es war zu erkennen, dass ein elastischeres Knotenblech mit einer Ausnehmung das Ermüdungsverhalten des Bauteils verbesserte. [22]

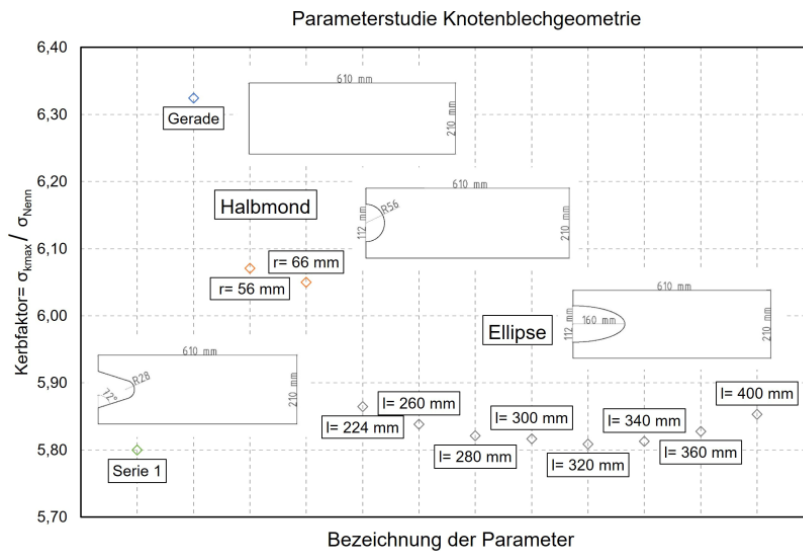


Abb. 4-19 Ergebnisse der Geometrie des Knotenblechs der Versuchsserie 1 [22]

Des Weiteren wurde der Rohrzschnitt untersucht. Um eine Zugänglichkeit der Innenseite zu ermöglichen war das Rohr der Versuchsserie 1 auf einer Länge von $l = 265$ mm ellipsenförmig abgeschragt. Dies hatte eine Schwächung des Querschnitts zufolge. Die Länge l wurde schrittweise verkürzt. Dadurch ergab sich eine steilere Abschragung des Rohrs. Durch Verkürzen des Rohrzschnitts verringerte sich die Kerbspannung im Globalmodell am Freischnitt von $578,69$ N/mm² auf $462,63$ N/mm² bei einer Länge von $l = 45$ mm. Ab dieser Länge verlagerte sich die maximale Kerbspannung zum oberen Ende der Kehlnaht. [22]

Es fand auch eine Untersuchung der Geometrie des Freischnitts am Ende des Knotenblechs statt. Die untersuchten Geometrien der Freischnitte sind in Abb. 4-20 dargestellt. Aufgrund des Freischnitts wurde zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit der Nettoquerschnitt des Versuchskörpers 1 angesetzt. Um diesen zu berücksichtigen, blieb die Breite des Freischnitts

gleich. Variiert wurde die Länge, der Radius und die Form. Bei der Längenänderung fand ein konstanter Radius von $r = 22$ mm Verwendung. Zur Veränderung des Radius wurde die Länge zwischen den Abrundungen in gleicher Weise modifiziert. Außerdem wurden die Varianten eines ovalen und runden Freischnitts untersucht. Durch Verkürzen der Länge des Freischnitts auf 2 mm stieg der Kerbfaktor auf 6,56 an. Ein ähnlicher Effekt war bei einer Verkleinerung des Radius zu erkennen. Bei einem Radius von $r = 14$ mm stieg der Kerbfaktor auf 6,07. Ein ovaler Freischnitt ergab einen Kerbfaktor von 8,89. Bei einem runden Freischnitt ergab sich ein maximaler Kerbfaktor von 5,59. Es zeigte sich, dass ein länglicher Freischnitt geringere Kerbfaktoren zur Folge hatte. [22]

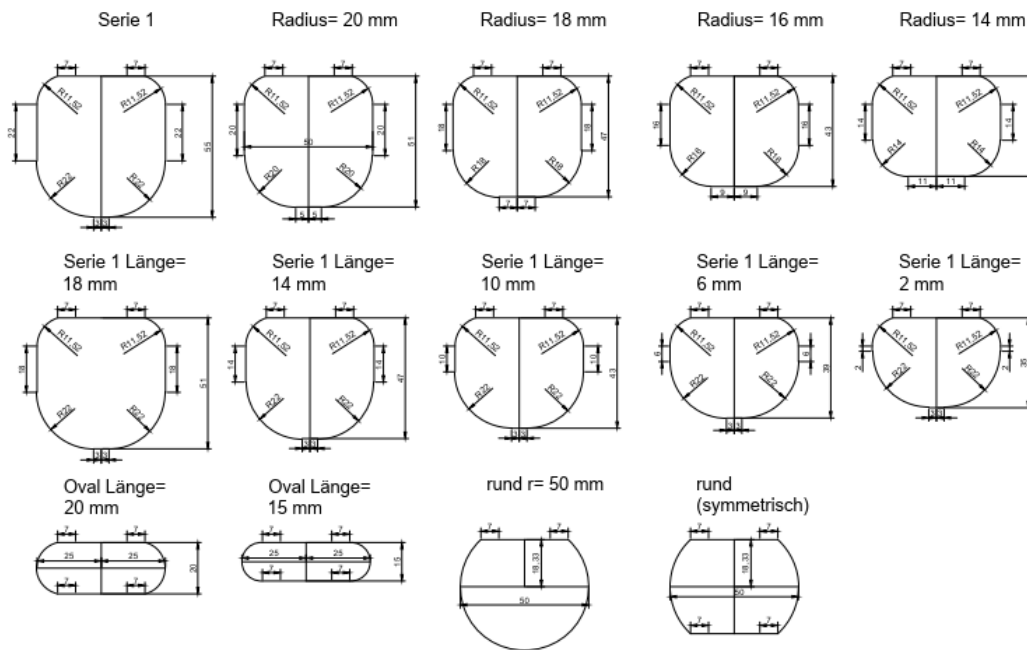


Abb. 4-20 Geometrien des Freischnitts der Versuchsserie 1 [22]

In Tab. 4-2 sind die Ergebnisse der Parameterstudie dargestellt. Eine Ausführung ohne einen Deckel zeigt geringe Verschlechterungen im Kerbfaktor. Eine Ausnehmung im Knotenblech ist vorteilhaft, eine Ausführung ohne diese ergab eine Verschlechterung des Kerbfaktors. Eine Ausnehmung in Form einer Ellipse zeigte mit einer Länge von 320 mm geringe Verschlechterungen gegenüber der Serie 1. Bei der Ausführung mit einem Halbmond mit dem Radius von 66 mm errechnete sich eine geringe Verschlechterung des Kerbfaktors. Der geringste Kerbfaktor ergab sich in der Ausführung der Ausnehmung der Serie 1. Durch einen kleineren Rohr-zuschnitt verkleinerte sich der Kerbfaktor deutlich, bei einer Länge des Zuschnitts von 45 mm konnte der geringste Kerbfaktor erreicht werden. Durch eine Verkleinerung des Zuschnitts wurde die Zugänglichkeit der innenliegenden Schweißnaht erschwert. Bei einer Veränderung der Geometrie des Freischnitts zeigte sich, dass bei einer Verkürzung des Freischnitts der Kerbfaktor anstieg. Durch eine Veränderung des Radius konnte eine geringe Verschlechterung festgestellt werden. Bei einer Ausführung in der Form eines Ovals wurde eine Verschlechterung des Kerbfaktors errechnet. Eine Verbesserung gegenüber der Versuchsserie 1 konnte bei einer Ausführung in Form eines runden Freischnitts mit einem Radius von $r = 50$ mm ermöglicht werden konnte.

Tab. 4-2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Parameterstudie des Versuchskörpers 1

Bauteil	Parameter	Kerbfaktor [-]
Versuchsserie 1	-	5,80
Deckel	ohne	5,87
Knotenblech Ausnehmung	gerade	6,32
	Halbmond r = 66 mm	6,05
	Ellipse b = 112 mm l = 320 mm	5,81
Rohrzuschnitt im Globalmodell	l = 45 mm	4,62
Freischnitt Geometrie	Radius = 14 mm	6,07
	Länge = 2 mm	6,56
	oval länge = 15 mm	8,89
	rund r = 50 mm	5,59

5 Numerische Untersuchungen - Modellbildung

Zur Untersuchung der Einflussgrößen des Ermüdungsverhaltens von Diagonalrohr-Anschlüssen wurden numerische Untersuchungen zu den Versuchskörpern 2 und 3 durchgeführt. Im Folgenden wird die Erstellung des Finiten-Elemente-Modells, die Verifizierung und Validierung beschrieben.

5.1 Auswertung der Makroschliffe

Zur Modellierung der Schweißnähte der Versuchskörper wurden zur Bestimmung der Abmessungen der Schweißnähte Makroschliffe aus den experimentellen Untersuchungen des Forschungsprojekts zu Diagonalrohr-Anschlüssen [21] ausgewertet. Diese wurden nach der Versuchsdurchführung für die Versuchsserien 2 und 3 angefertigt.

5.1.1 Versuchsserie 2

Die Makroschliffe der HY-Naht aus Versuchsserie 2 sind in Abb. 5-1, Abb. 5-2 und Abb. 5-3 illustriert. Die Geometrien der HY-Naht wichen von der theoretischen Schweißausführung ab, insbesondere im Bereich der Umschweißung des Knotenblechs. In diesem Bereich konnten die Maße der Schweißanweisung und der theoretischen Schweißnaht nicht eingehalten werden. Dies lag an der schwierigen Geometrie der Umschweißung. Es musste in der Ausführung um das gefaste Knotenblech als auch um das gekrümmte Rohr geschweißt werden. Dies führte zu Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht. Es gelangte teilweise nur sehr wenig Schweißgut an die Innenseite der Schweißnaht der Umschweißungen, was zu Schwachstellen in der Schweißnaht führte. In der Auswertung der experimentellen Untersuchungen [22] zeigte sich, dass die Ermüdungsrisse an der Stelle der Umschweißung entstanden und von innen nach außen wuchsen. Wenn viel Schweißgut ins Innere gelangte, entstand der Ermüdungsriss an der Knotenblechspitze. Bei wenig Eindringen von Schweißgut trat der Ermüdungsriss an der 45°-Fase des Knotenblechs auf. Für eine praxisingere Darstellung der Schweißnähte wurden die Makroschliffe ausgewertet und vermessen, um geeignete Annahmen zur Modellierung der Schweißnähte zu erlangen.

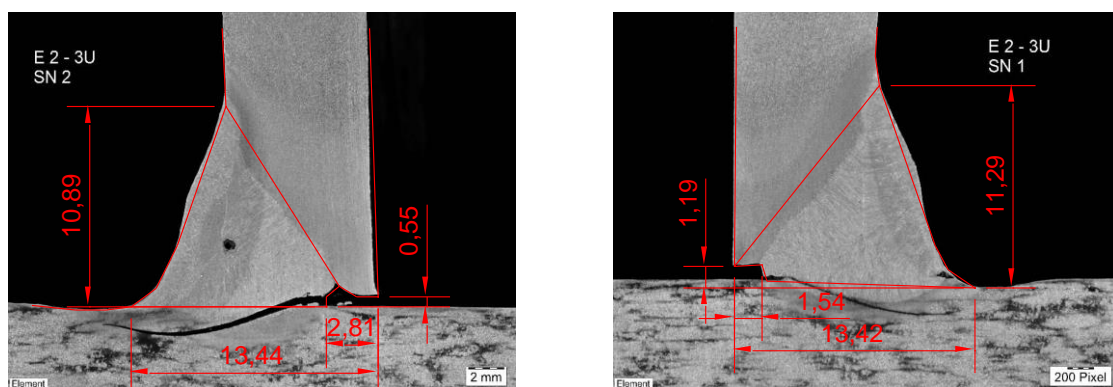


Abb. 5-1 Makroschliffe Versuchskörper E2-3U [21]

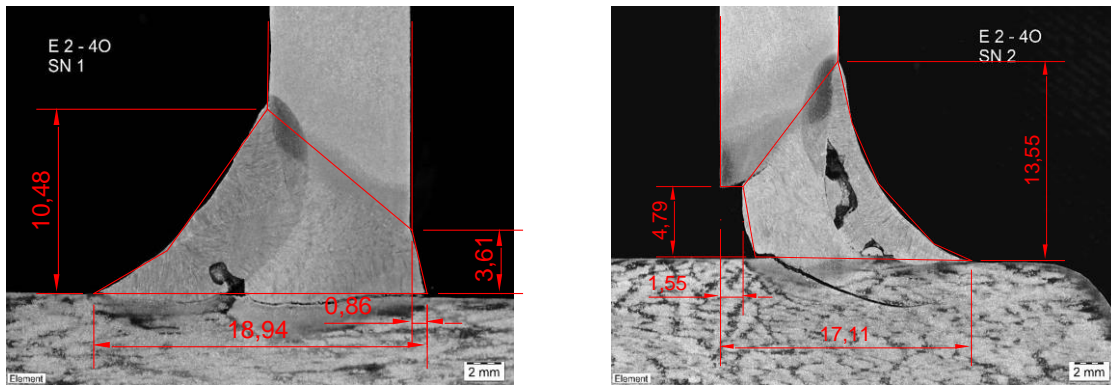


Abb. 5-2 Makroschliffe Versuchskörper E2-40 [21]

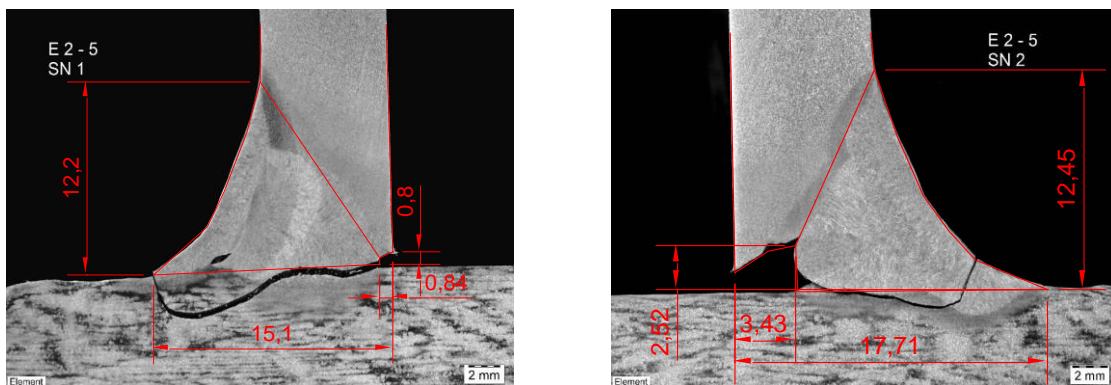


Abb. 5-3 Makroschliffe Versuchskörper E2-5 [21]

5.1.2 Versuchsserie 3

Für die Versuchsserie 3 wurden nach den Versuchen Makroschliffe erstellt. In den experimentellen Untersuchungen wurde die HV-Naht an der Innenseite mit einer Schweißbadsicherung versehen. In den angefertigten Makroschliffen wird deutlich, dass diese im Bereich der Umschweißung am Knotenblechende nicht anlag, was auf den Radius zurückzuführen ist, da die Rundkeramik nicht gebogen werden kann. So zeigt sich in den Makroschliffen, dass Schweißgut an der Innenseite der Schweißnaht einlief. Für eine praxisnahe Modellierung der Schweißnähte wird die Geometrie der Makroschliffe genauer untersucht und vermessen. Dies ist in Abb. 5-4, Abb. 5-5 und Abb. 5-6 zu sehen. Daraus werden geeignete Annahmen zur Modellierung der Schweißnähte getroffen.

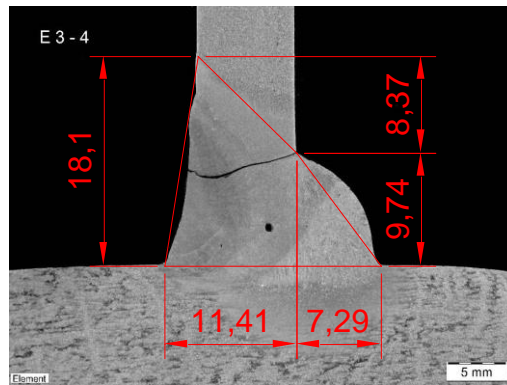


Abb. 5-4 Makroschliffe Versuchskörper E3-4 [21]

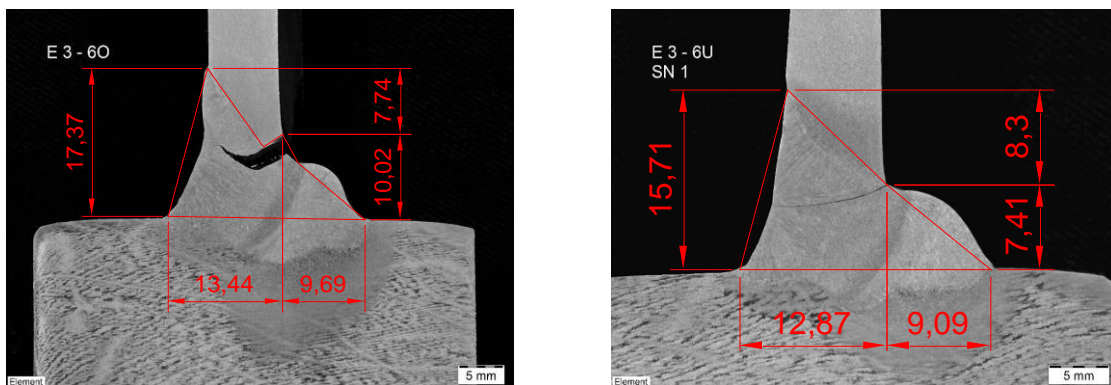


Abb. 5-5 Makroschliffe Versuchskörper E3-6 [21]

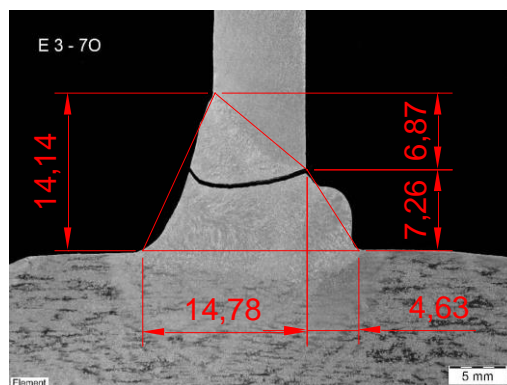


Abb. 5-6 Makroschliffe Versuchskörper E3-7 [21]

5.2 Modellierung

Die numerischen Untersuchungen wurden mit dem Finite-Elemente-Programm ANSYS Workbench [28] durchgeführt. In diesem wurde ein dreidimensionales Modell mithilfe eines Netzes in endlich viele kleine dreidimensionale Elemente unterteilt. Sie waren an den Eckknoten, und falls vorhanden, an den Mittelknoten verbunden. Nach Aufbringen der Last im Modell wurden die Spannungen zwischen den Knoten der Elemente berechnet. Dadurch konnte eine Näherung des realen Spannungsverlaufs dargestellt werden. Je feiner das Netz ist, desto genauer

ist die Darstellung der Spannungen. Dies setzt eine Überprüfung der Netzfeinheit voraus, was in einer Sensitivitätsanalyse untersucht wird, siehe Abschnitt 5.5.1. Die Berechnungen wurden mithilfe von Volumenelementen durchgeführt. Diese waren Tetraeder-Elemente und hatten eine quadratische Elementansatzfunktion. [7]

Für die Berechnung mit ANSYS Workbench [28] musste ein dreidimensionaler Volumenkörper modelliert werden. Dieser wurde mit dem Programm Autodesk Inventor [29] erstellt und über eine Schnittstelle mit ANSYS Workbench [28] verknüpft. Die einzelnen Komponenten der Diagonalrohr-Anschlüsse wurden als Bauteile modelliert und zu einer Bauteilgruppe zusammengefügt. Die Bauteile wurden parametrisiert, Abmessungen, wie zum Beispiel die Knotenblechdicke wurden in jedem Bauteil hinterlegt und als Variable definiert. Dies ermöglichte eine schnelle Anpassung der Versuchskörper an verschiedene Abmessungen. Um eine geringere Rechenzeit zu erreichen, konnten Symmetriebedingungen des Details ausgenutzt werden [7]. Insgesamt konnten drei Symmetrieebenen verwendet werden, in x-, y und z-Richtung. Eine Ansicht des vereinfachten Globalmodells ist in Abb. 5-7 dargestellt.

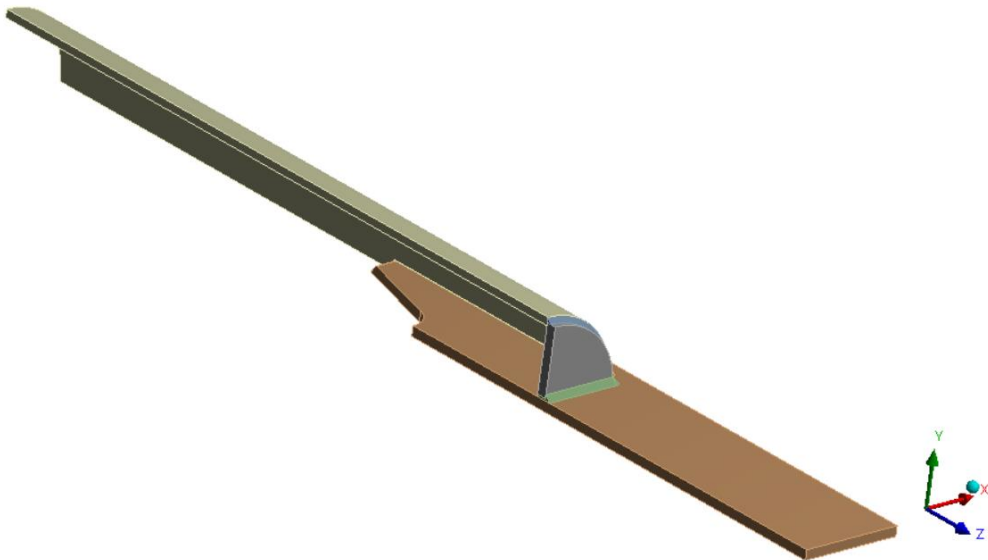


Abb. 5-7 Vereinfachtes Globalmodell des Versuchskörpers 2

An den untersuchten Kerben waren Netze mit einer sehr kleinen Elementlänge notwendig. Da diese kleinen Elementlängen im Globalmodell zu sehr langen Rechenzeiten führen, wurde die Submodelltechnik angewendet. Es wurde ein Globalmodell modelliert, in dem alle Bauteile vorhanden waren. Dies ist zur Berechnung von Nenn- und Strukturspannungen geeignet. Zuerst wurden im Globalmodell die Verformungen und Spannungen mit einem groben Elementnetz berechnet. Die Stelle der maximalen Spannung wurde im Globalmodell identifiziert. Daraufhin wurde aus dem Globalmodell ein Submodell abgeleitet, das die Stelle der maximalen Spannung beinhaltet, siehe Abb. 5-8. Auf das Submodell wurden die Randbedingungen des Globalmodells aufgebracht. Im Anschluss konnte das Submodell mit einer feineren Elementlänge untersucht werden. Zwischen Globalmodell und Submodell kam es zu Sprüngen in der Elementgröße. Die Verformungen zwischen den Knoten wurden interpoliert. Es konnten Spannungsspitzen auftreten, die nicht realitätsnahe Ergebnisse darstellen. Dies musste in der

Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Einzelne Flächen wurden ausgewertet und aus diesen die maximale Spannung abgelesen. [7]

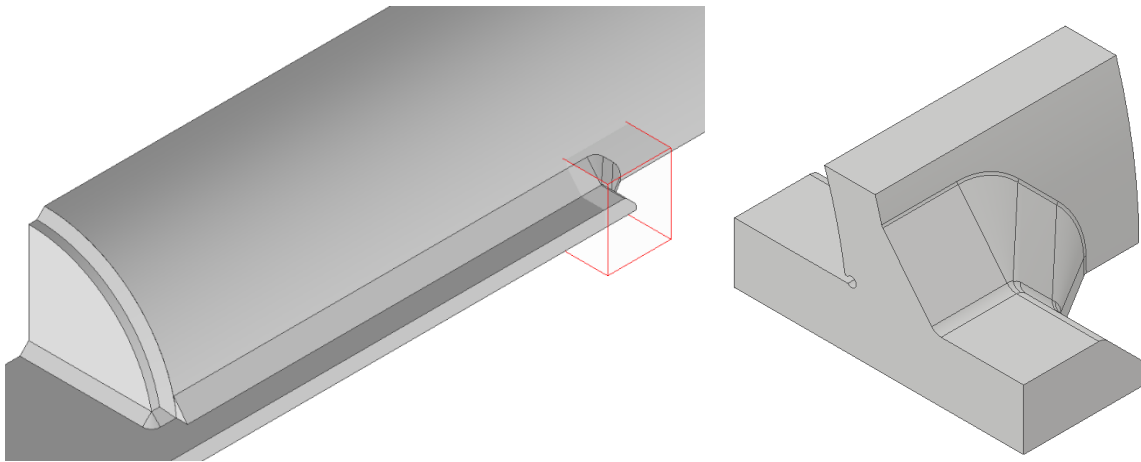


Abb. 5-8 Globalmodell mit Quader des Submodells (links), abgeleitetes Submodell (rechts)

Eine Lagerung des Globalmodells war nicht notwendig, da die Symmetriebedingungen ausreichende Randbedingungen ergaben. Die Schnittstellen zwischen Submodell und Globalmodell bildeten die Lagerbedingungen des Submodells, es waren keine weiteren Randbedingungen notwendig. Kontakte zwischen Bauteilen, die über diese Fläche keine Kraft übertragen sollten, wurden unterdrückt. Es wurden nur Kontakte zugelassen, die zwischen Schweißnähten und Bauteilen vorgesehen waren.

Als Ergebnis wurde der Kerbfaktor dargestellt. Dieser berechnet sich nach Gleichung (2.8), aus dem Verhältnis von Kerbspannung und Nennspannung. Zur vereinfachten Berechnung wurde die äußere Kraft F auf das Globalmodell so aufgebracht, dass sich eine Nennspannung im Rohrquerschnitt von $\sigma_{Nenn} = 100 \text{ N/mm}^2$ ergab. Die äußere Kraft wurde als Zugkraft in Rohrlängsrichtung am Knotenblech aufgebracht. Die Kraft errechnet sich aus der Nennspannung und der Querschnittsfläche des Rohrs, siehe Gleichung (5.1). Durch die Vereinfachungen der zwei Symmetrieebenen des Querschnitts hat dieser nur ein Viertel der Fläche des Gesamtquerschnitts.

$$\begin{aligned}
 F &= \sigma_{Nenn} \cdot A & (5.1) \\
 &= 100 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{4028,78 \text{ mm}^2}{4} \\
 &= 100.719,5 \text{ N}
 \end{aligned}$$

5.3 Materialeigenschaften

Die Werkstoffeigenschaften wurden nach dem Kerbspannungskonzept unter einem isotropen und linear-elastischen Verhalten angenommen. Mit einer Querkontraktionszahl von $\nu = 0,3$

und einem Elastizitätsmodul von $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$. Die Werte wurden auch durch Zugversuche im Rahmen von [21] überprüft.

5.4 Kerben

Da es an den Schweißnahtkerben zu Spannungsspitzen kommt, mussten diese besonders fein modelliert werden. Bei einer Elementgröße von 0,4 mm wurden die Kerben mit einer dreifachen Verfeinerung modelliert. Die Kerbe am Nahtübergang wurde mit einem Referenzradius von $r_{\text{ref}} = 1,0 \text{ mm}$ ausgerundet, siehe Abb. 5-9 (links). Die Nahtwurzel wurde mit einem Toleranzspalt zwischen Rohr und Knotenblech mit einem Millimeter modelliert. Das Ende des Spalts wurde mit einem Referenzradius von $r_{\text{ref}} = 1,0 \text{ mm}$ ausgerundet, siehe Abb. 5-9 (rechts).

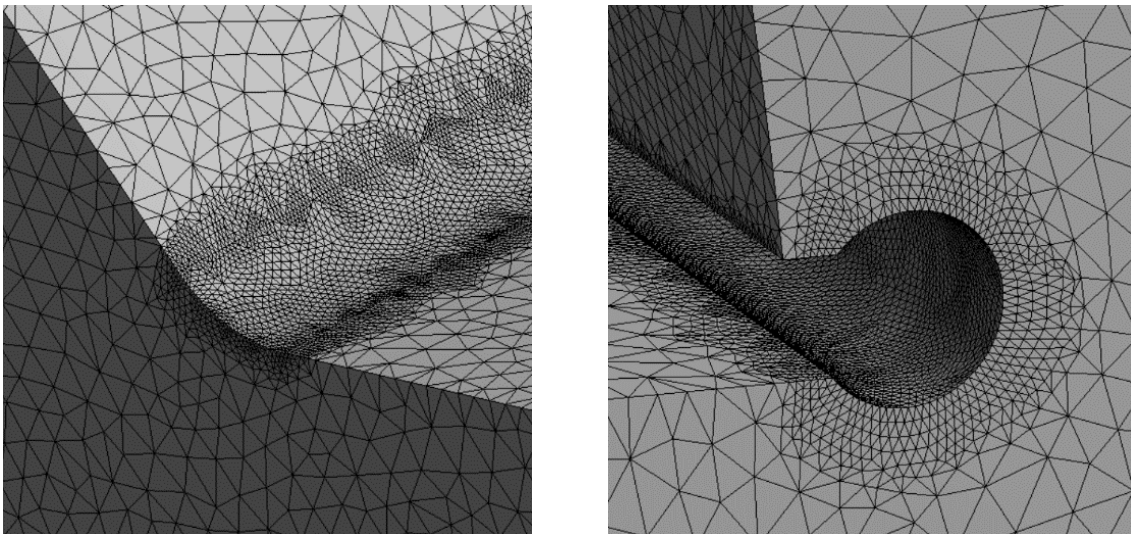


Abb. 5-9 Vernetzung des Nahtübergangs (links) und der Nahtwurzel (rechts)

Nach DVS-Merkblatt 0905 [2] soll der Referenzradius des Nahtübergangs und der Nahtwurzel die Gleichungen (2.15) und (2.16) erfüllen, diese müssen in Abhängigkeit der Blechdicke eingehalten werden. Bei der verwendeten Rohrwanddicke von 8 mm ergibt sich ein Verhältnis von Referenzradius und Rohrwanddicke zu 0,125. Die Gleichung (2.16) wurde an der Nahtwurzel auf die zweite Nachkommastelle nicht erfüllt. Diese Bedingung begründet sich darin, dass bei dünnwandigen Bauteilen ein zu großer Referenzradius das Bauteil in zu hohem Maß schwächt und den Kraftfluss verändert. Wenn ein Referenzradius von 0,8 mm, der die Gleichung (2.16) erfüllt untersucht wird, steigt die maximale Kerbspannung von $946,23 \text{ N/mm}^2$ auf $1069,5 \text{ N/mm}^2$ an. Es zeigt sich, dass eine Stärkung des Querschnitts durch Verringern des Referenzradius zu keiner niedrigeren Kerbspannung führt. Die Vergleichbarkeit mit der Materialwöhlerlinie, welche abhängig vom Referenzradius ist, wird bei einem Referenzradius von 0,8 mm problematisch. Aus Gründen der Vergleichbarkeit und der nur geringen Überschreitung wurde ein Referenzradius von $r_{\text{ref}} = 1,0 \text{ mm}$ trotz der Nichteinhaltung der Bedingung an der Nahtwurzel verwendet.

5.5 Verifizierung und Validierung

Zur Ermittlung der Elementgrößen im Globalmodell und im Submodell wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Zur Überprüfung der verwendeten Methode wird ein Vergleichsmodell nach Radaj [13] erstellt. Dieses wurde mit den gleichen Eigenschaften wie das numerische Modell der Diagonalrohr-Anschlüsse modelliert. Für einen Vergleich zu den experimentellen Untersuchungen werden Dehnmessstreifen ausgewertet und mit den numerischen Modellen verglichen.

5.5.1 Sensitivitätsanalyse

Zur Bestimmung der Elementgrößen der Modelle der Versuchskörper wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Diese wird sowohl für die Globalmodelle als auch für die Submodelle realisiert. Dabei werden die Elementgrößen in den Global- und Submodellen variiert, die jeweilige maximal auftretende Kerbspannung ausgewertet und eine passende Elementgröße ausgewählt. Es gilt zu beachten, dass die Elementgröße an der Kerbe bei einem quadratischen Verschiebungsansatz nach DVS-Merkblatt 0905 [2] kleiner als 0,25 mm zu modellieren ist. Nach prEN 1993 Teil 1-14 [3] muss bei Verwendung von Tetraedern und einem quadratischen Verschiebungsansatz eine Elementgröße an der Nahtwurzel von 0,15 mm eingehalten werden.

Eine Elementgröße zwischen 15 mm und 1,5 mm wurde im Globalmodell des Versuchskörpers 2 variiert, siehe Abb. 5-10. Ab einer Elementgröße von 7 mm sind Schwankungen in der Kerbspannung zu erkennen. Es wurde deshalb eine Elementgröße von 5 mm gewählt, da diese sich den vorherigen Werten am weitesten annähert. Bei einer festen Elementgröße im Submodell von 0,4 mm und einer Variation der Elementgröße im Globalmodell zeigen sich keine Nennenswerten Schwankungen der Hauptspannung im Submodell.

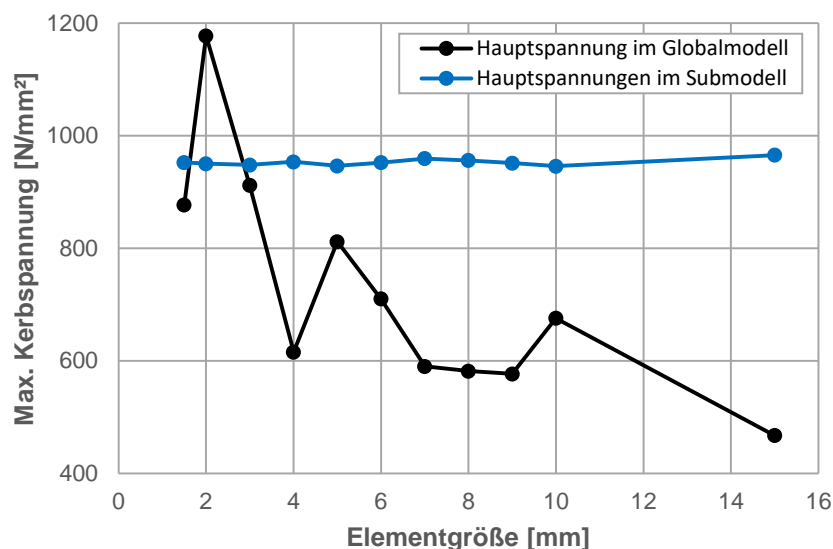


Abb. 5-10 Maximale Kerbspannung des Versuchskörpers 2 im Globalmodell bei Variation der Elementgröße

Im Submodell fand eine Auswertung der Kerbspannung bei einer festen Elementgröße im Globalmodell von 5 mm statt. Es wurde die Elementgröße im Submodell von 1,5 mm bis 0,15 mm variiert, siehe Abb. 5-11. An der Nahtwurzel und dem Nahtübergang wurde eine dreifache Verfeinerung gewählt. Unter Berücksichtigung der Rechenleistung konnte in den letzten Verfeinerungsschritten nur eine zweifache Verfeinerung erreicht werden. Schwankungen ab einer Elementgröße von 0,8 mm sind zu erkennen. Es wurde eine Elementgröße von 0,4 mm gewählt. Die Bedingungen der prEN 1993 Teil 1-14 [3] und des DVS-Merkblattes 0905 [2] an der Kerbe sind mit einer dreifachen Verfeinerung eingehalten. An der Kerbe war eine Elementgröße von 0,13 mm vorhanden. Die Elementgröße, deren Verfeinerung und die maximale Kerbspannung des Submodells des Versuchskörpers 2 sind in Tab. 12-1 aufgelistet.

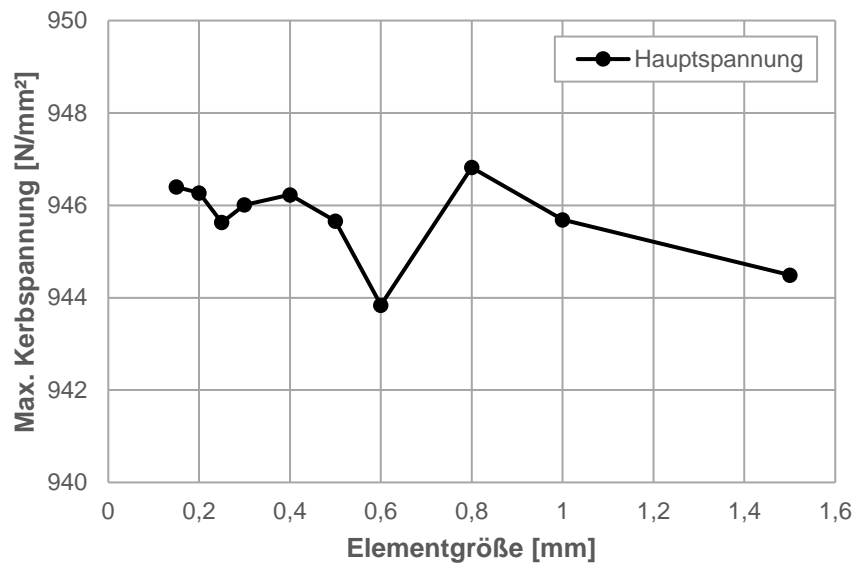


Abb. 5-11 Maximale Kerbspannung des Versuchskörpers 2 im Submodell bei Variation der Elementgröße

In der Sensitivitätsanalyse des Globalmodells des Versuchskörpers 3 wurde eine Elementgröße von 15 mm bis 1,5 mm variiert, siehe Abb. 5-12. Es zeigt sich ein Anstieg der Kerbspannung unterhalb einer Elementgröße von 8 mm. Eine Elementgröße von 5 mm wurde ausgewählt. Ein Auswerten der Hauptspannungen im Submodell bei einer festen Elementgröße ergibt keine nennenswerten Veränderungen bei einer Variation der Elementgröße im Globalmodell.

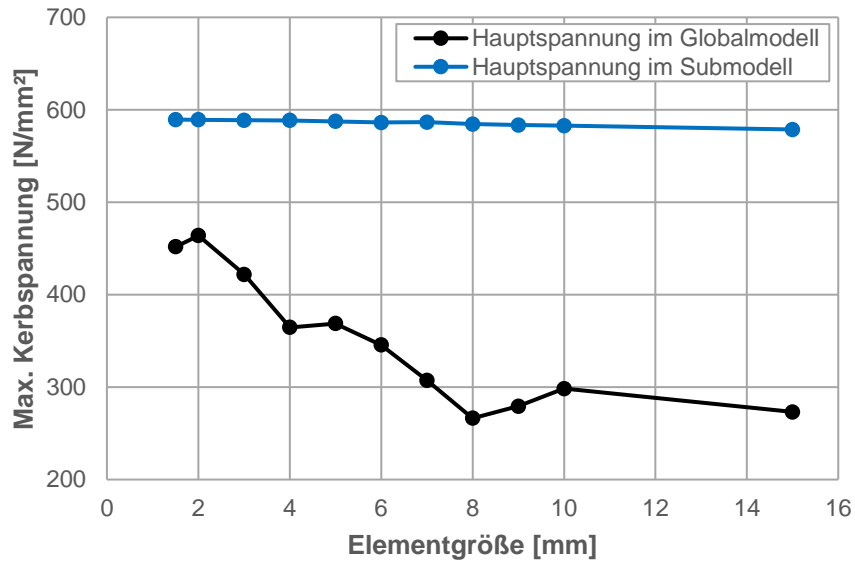


Abb. 5-12 Maximale Kerbspannung des Versuchskörpers 3 im Globalmodell bei Variation der Elementgröße

Im Submodell des Versuchskörpers 3 wurde bei einer festen Elementgröße im Globalmodell von 5 mm die Elementgröße von 1,5 mm auf 0,15 mm verringert, siehe Abb. 5-13. Für eine genaue Darstellung der Kerbspannung an der Kerbe war dort eine dreifache Verfeinerung festgelegt. Unterhalb einer Elementgröße von 0,25 mm konnte wegen des hohen Rechenaufwands nur eine zweifache Verfeinerung an der Kerbe erreicht werden. Durch die Änderung der Verfeinerungsstufe ab einer Elementgröße von 0,25 mm kommt es zu einem Anstieg in der Kerbspannung. Es wurde eine Elementgröße von 0,4 mm ausgewählt. Die Bedingungen der prEN 1993 Teil 1-14 [3] und des DVS-Merkblattes 0905 [2] sind durch die dreifache Verfeinerung eingehalten. An der Kerbe war eine Elementgröße von 0,13 mm vorhanden. Die Elementgröße, deren Verfeinerung und die maximale Kerbspannung des Submodells des Versuchskörpers 3 sind in Tab. 12-2 aufgelistet.

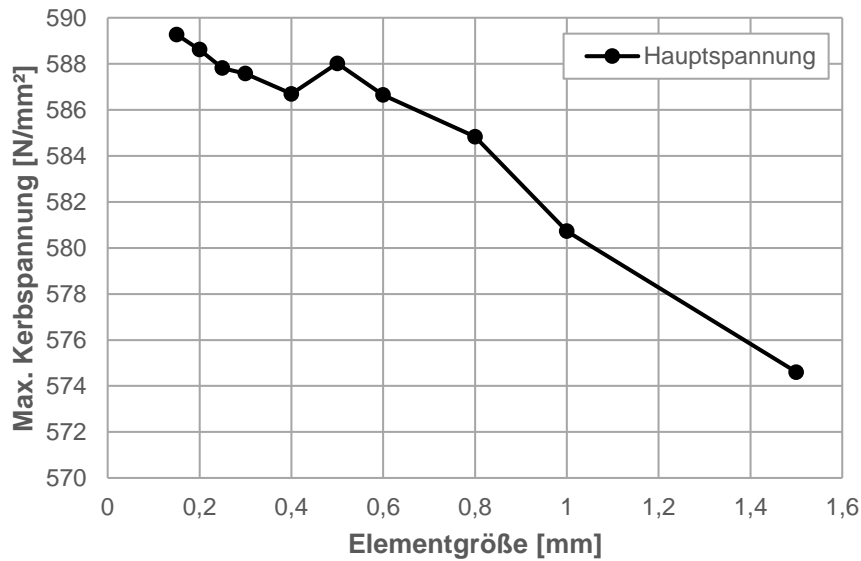


Abb. 5-13 Maximale Kerbspannung des Versuchskörpers 3 im Submodell bei Variation der Elementgröße

5.5.2 Vergleichsmodell nach Radaj

Um die Anwendbarkeit der verwendeten Methoden zu überprüfen, wurde ein Vergleichsmodell nach Radaj [13] erstellt. Dabei sollten die Eingabeparameter des Finite-Elemente-Programms Elementgröße und Verfeinerung an den Kerben überprüft werden. Es wurde eine Geometrie nach Abb. 2-25 mit den vorgegebenen Abmessungen modelliert, siehe Abb. 5-14 und mit den Werten nach Radaj [13] verglichen. Radaj errechneten mit der Randelemente-Methode (BE-Methode) die Ergebnisse und verglich diese mit vorliegenden Versuchswerten, wobei eine gute Übereinstimmung hervorging. Der modellierte Kreuzstoß hatte die Abmessungen 40 mm auf 40 mm und eine Blechdicke von 10 mm. Die Nahtdicke betrug 6 mm. Die Kerben am Nahtübergang wurden mit einem Referenzradius von $r_{\text{ref}} = 1,0$ mm ausgerundet. Die Kerben an der Nahtwurzel wurden mit einem Spalt von 1 mm und Referenzradien von $r_{\text{ref}} = 1,0$ mm versehen. Als Kerbfaktoren wurden β_{kz} und β_{kb} am Nahtübergang und β_{kw} an der Nahtwurzel angegeben. Auf das Vergleichsmodell wurde eine Nennspannung von $\sigma_{\text{Nenn}} = 100$ N/mm² aufgebracht, welche als Zugkraft wirkte. Die Kerbfaktoren β_{k} errechneten sich mit der maximal auftretenden Kerbspannung σ_{k} nach Gleichung (2.8).

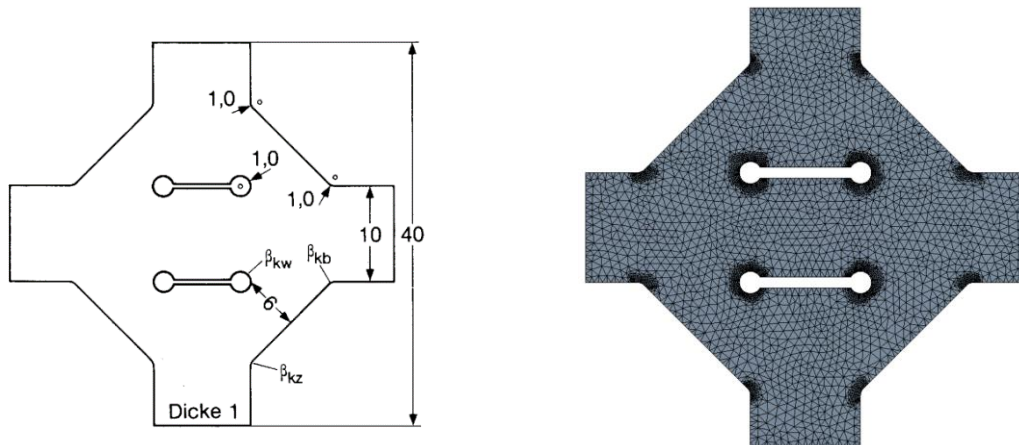


Abb. 5-14 Abmessungen des Vergleichsmodells nach Radaj [13] (links) und Darstellung des numerischen Modells (rechts)

Die Referenzgeometrie nach Radaj wurde anhand eines zweidimensionalen Modells berechnet. Da ANSYS Workbench [28] ein dreidimensionales Finite-Elemente Programm ist, wurde eine Geometrie mit einer Tiefe von 0,25 mm modelliert. Das Vergleichsmodell wurde mit einer Elementgröße von 0,4 mm und einer Verfeinerung am Nahtfuß und an der Nahtwurzel mit dem Faktor drei modelliert. Die Elementgröße an der Kerbe betrug 0,13 mm, die Bedingungen der prEN 1993 Teil 1-14 [3] und des DVS-Merkblattes 0905 [2] sind eingehalten.

Das Referenzmodell von Radaj gibt einen Kerbfaktor am Nahtfuß von $\beta_{kz} = 3,30$ an, im Vergleichsmodell errechnet sich ein Kerbfaktor von $\beta_{kz} = 3,287$ welcher auf eine Nachkommastelle gerundet das Ergebnis widerspiegelt. Radaj gab einen Kerbfaktor von $\beta_{kw} = 4,03$ an der Nahtwurzel an. Im Vergleichsmodell wird ein Wert von $\beta_{kw} = 4,086$ berechnet. Diese Abweichung kann auf die Dreidimensionalität des Vergleichsmodells zurückgeführt werden. Die Ergebnisse der Vergleichsrechnung sind in Abb. 5-15 zu sehen.

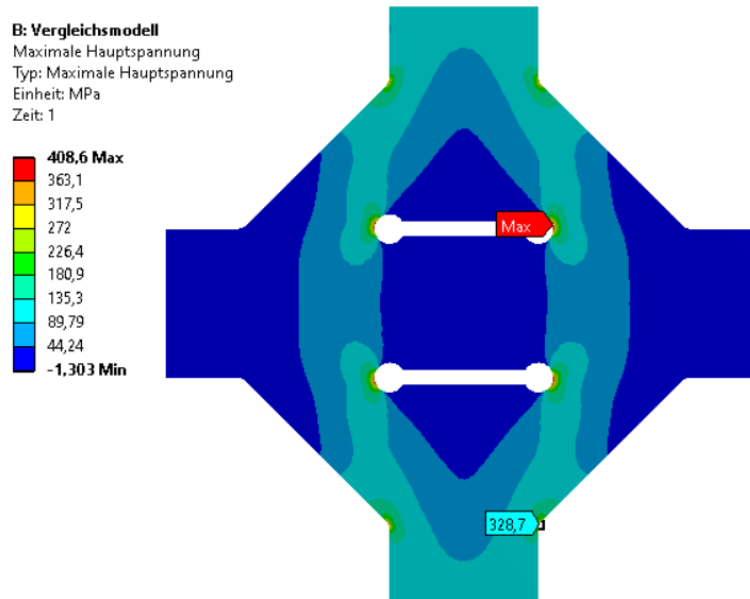


Abb. 5-15 Ergebnis der Vergleichsrechnung

5.5.3 Validierung anhand der experimentellen Untersuchungen

Zur Überprüfung des Finite-Elemente-Modells wird dieses mit den experimentellen Untersuchungen verglichen. In den experimentellen Untersuchungen zu Diagonalrohr-Anschlüssen wurden die Versuchskörper mit Dehnmessstreifen versehen. Zur Bestimmung der Nennspannungen waren diese in Rohrmittre angeklebt. Außerdem wurden Dehnmessstreifen an der Spitze des Knotenblechs mit einem Abstand von ca. 15 mm zur Schweißnaht angebracht. Sie wurden zur Validierung des Modells herangezogen. Es werden die Spannungen des numerischen Modells mit den experimentellen Versuchen verglichen. Die Spannungen können aus den Dehnungen mit einem E-Modul $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$ und den zugehörigen Dehnungen nach Gleichung (5.2) berechnet werden:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (5.2)$$

Für den Versuchskörper 2 wurden acht Dehnmessstreifen angebracht. Die Dehnmessstreifen 5, 6, 7 und 8 waren in Rohrmittre zur Überprüfung der Nennspannung geklebt. Die Dehnmessstreifen 3, 4, 9 und 10 wurden an der Knotenblechspitze mit einem Abstand von ca. 15 mm angebracht, siehe Abb. 5-16.

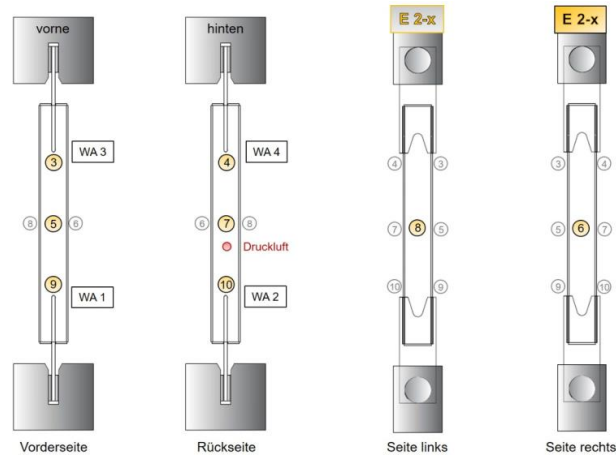


Abb. 5-16 Positionen der Dehnmessstreifen des Versuchskörpers E 2-8 [21]

Tab. 5-1 Dehnungen aus den Dehnmessstreifen (DMS) des Versuchskörpers E 2-8

Dehnungen [$\mu\text{m}/\text{m}$]							
DMS 3	DMS 4	DMS 5	DMS 6	DMS 7	DMS 8	DMS 9	DMS 10
818,77	748,62	471,69	490,15	459,63	458,77	811,39	758,77

Der Versuchskörper E 2-8 war mit einer Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma = 100 \text{ N}/\text{mm}^2$ belastet. Mit der Gleichung (5.2) und den Dehnungen aus Tab. 5-1 konnte die Nennspannung in Rohrmitte zu $99 \text{ N}/\text{mm}^2$ errechnet werden. Das lässt einen Vergleich mit dem numerischen Modell zu, auf welches eine Nennspannung $\sigma_{\text{Nenn}} = 100 \text{ N}/\text{mm}^2$ aufgebracht wurde. Aus den Dehnmessstreifen des Versuchskörpers E 2-8 am Ende des Knotenblechs errechneten sich Spannungen zwischen $157,21 \text{ N}/\text{mm}^2$ und $171,94 \text{ N}/\text{mm}^2$ nach Gleichung (5.2).

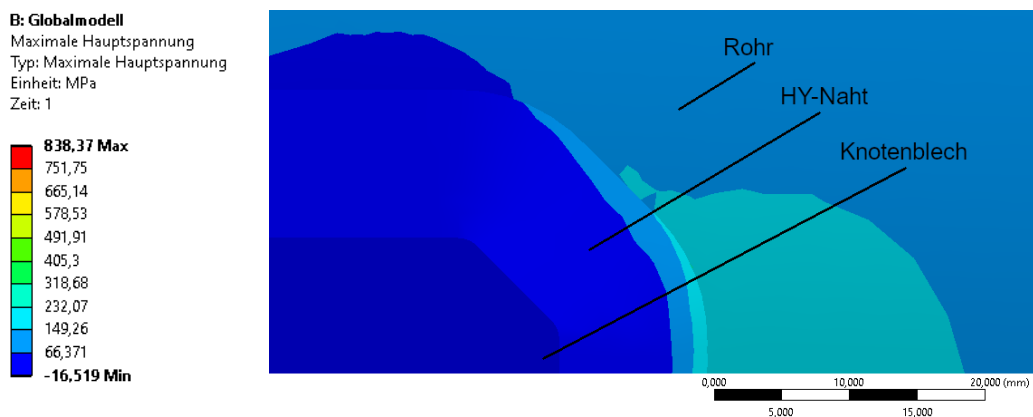


Abb. 5-17 Spannungen an der Knotenblechspitze im Globalmodell des Versuchskörpers 2

In Abb. 5-17 ist die Seitenansicht auf die Knotenblechspitze im Globalmodell des Versuchskörpers 2 zu erkennen, dargestellt sind die maximalen Hauptspannungen. Es wird deutlich, dass in einem Abstand von ca. 15 mm von der Schweißnaht eine Spannung im numerischen

Modell von 149,26 N/mm² bis 232,07 N/mm² im türkisfarbenen Bereich vorhanden ist. Die Spannungen der Dehnmessstreifen liegen in diesem Bereich, woraus eine gute Übereinstimmung hervorgeht.

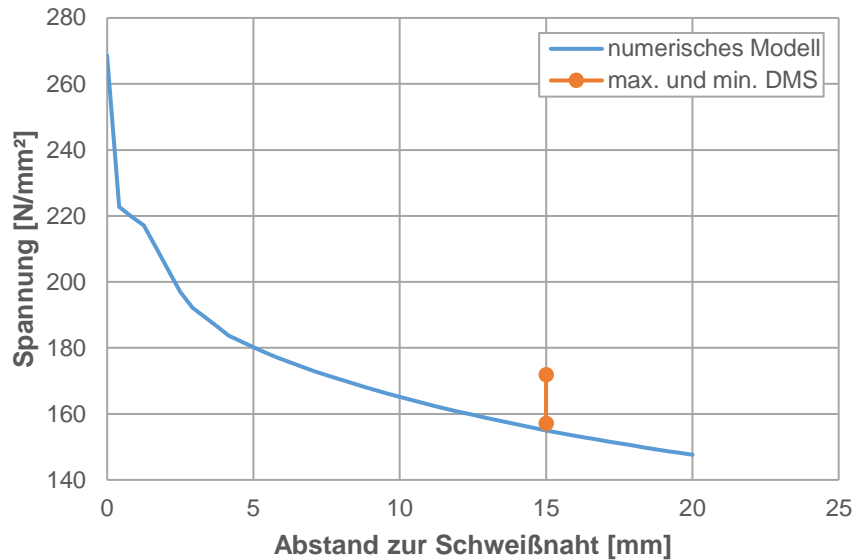


Abb. 5-18 Spannungen an der Spitze der Schweißnaht im numerischen Modell und der Dehnmessstreifen (DMS) der experimentellen Untersuchungen

In Abb. 5-18 sind die Spannungen des Globalmodells in Abhängigkeit des Abstandes an der Knotenblechspitze vom Schweißnahtübergang und die berechneten Spannungen aus den Dehnmessstreifen zu erkennen. Die Spannungen aus den Dehnmessstreifen liegen gering über denen des numerischen Modells

Die Dehnmessstreifen 5, 6, 7 und 8 waren an Versuchskörper E 3-5 sowie an Versuchskörper E 2-8 in Rohrmitte zur Überprüfung der Nennspannung positioniert. Die Dehnmessstreifen 3, 4, 9 und 10 wurden an der Spitze der Knotenblechs in einem Abstand zur Schweißnaht von ca. 15 mm befestigt, siehe Abb. 5-19.

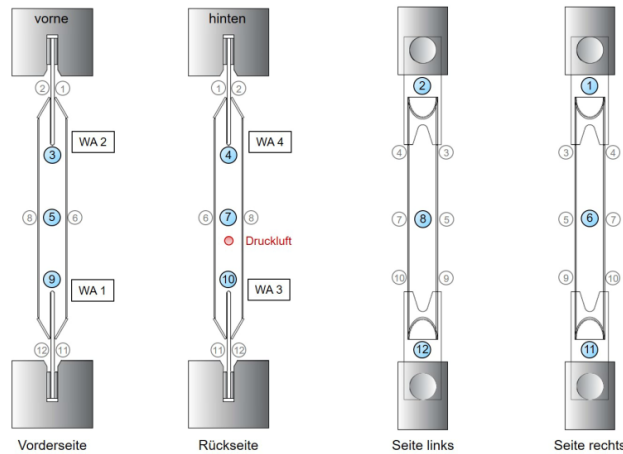


Abb. 5-19 Positionen der Dehnmessstreifen des Versuchskörpers E 3-5

Tab. 5-2 Dehnungen aus den Dehnmessstreifen (DMS) des Versuchskörpers E 3-5

Dehnungen [$\mu\text{m}/\text{m}$]							
DMS 3	DMS 4	DMS 5	DMS 6	DMS 7	DMS 8	DMS 9	DMS 10
483,69	399,69	297,23	295,39	264,92	282,46	465,23	432,00

Aus den Dehnmessstreifen in Rohrmitte ergibt sich eine mittlere Nennspannung im Rohr zu $99 \text{ N}/\text{mm}^2$. Dies lässt einen Vergleich mit dem numerischen Modell zu, auf welches eine Spannung $\sigma_{\text{Nenn}} = 100 \text{ N}/\text{mm}^2$ aufgebracht wurde. Aus den Dehnmessstreifen am Ende des Knotenblechs ergibt sich für den Versuchskörper E 3-5 ein Spannungsbereich von $146,79 \text{ N}/\text{mm}^2$ bis $191,79 \text{ N}/\text{mm}^2$. In Tab. 5-2 sind die Ergebnisse der Dehnmessstreifen aus den experimentellen Untersuchungen des Versuchskörpers E 3-5 aufgelistet.

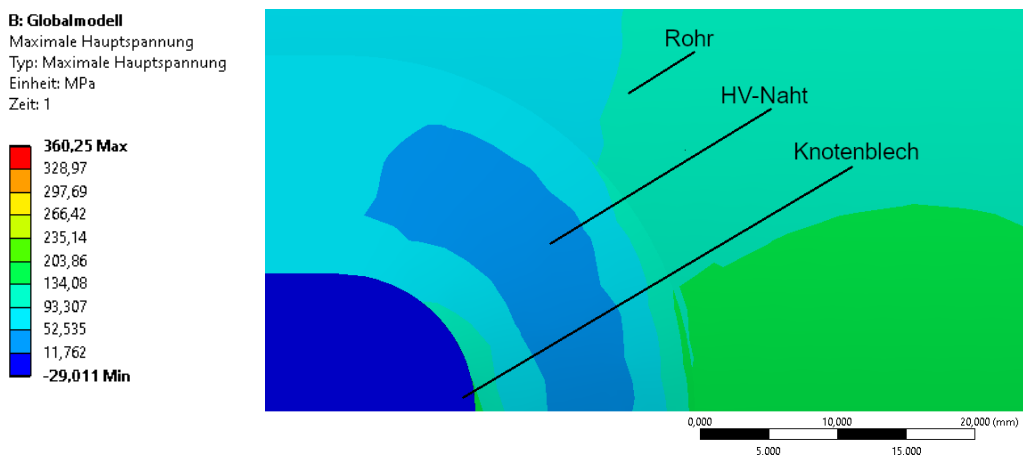


Abb. 5-20 Spannungen an der Knotenblechspitze im Globalmodell des Versuchskörpers 3

Abb. 5-20 zeigt die Seitenansicht der Knotenblechspitze des Globalmodells des Versuchskörpers 3, dargestellt sind die Hauptspannungen. In einem Abstand von ca. 15 mm wurden die

Dehnmessstreifen der experimentellen Untersuchungen positioniert. In diesem Sektor ist im numerischen Modell ein Spannungsbereich von $134,08 \text{ N/mm}^2$ bis $203,86 \text{ N/mm}^2$ zu erkennen, dieser ist grün dargestellt. Die Spannungen sind in annähernder Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den experimentellen Untersuchungen.

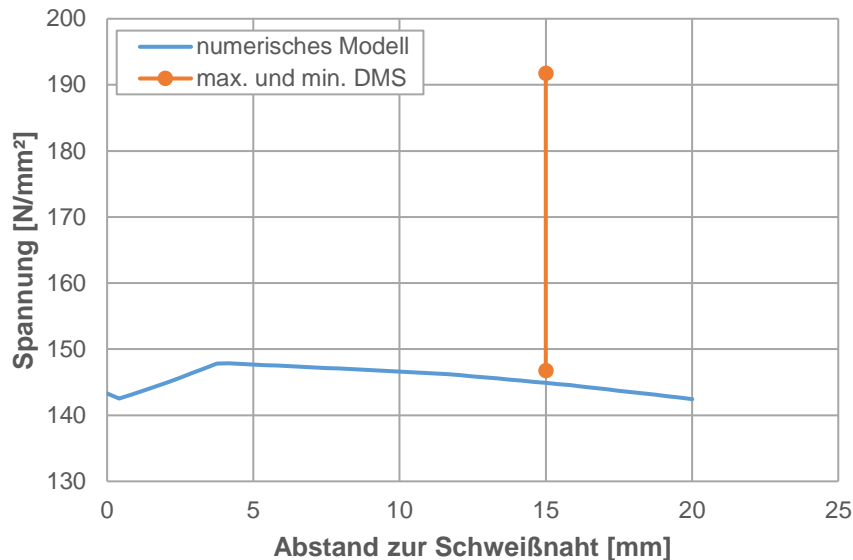


Abb. 5-21 Spannungen an der Spitze der Schweißnaht im numerischen Modell und der Dehnmessstreifen (DMS) der experimentellen Untersuchungen

Um einen genauen Vergleich mit den Dehnmessstreifen zu erlangen, sind in Abb. 5-21 die Spannungen der Dehnmessstreifen und der Spannungen im Globalmodell an der Knotenblechspitze in Abhängigkeit des Abstandes zum Schweißnahtübergang dargestellt. Das Minimum aus den Ergebnissen der Dehnmessstreifen liegt gering oberhalb der Spannungen im numerischen Globalmodell. Das Maximum aus den Ergebnissen der Dehnmessstreifen zeigt einen größeren Unterschied zu den Spannungen im Globalmodell.

Aus der Auswertung der numerischen Ergebnisse der Versuchsserie 2 resultiert ein Kerbfaktor an der Knotenblechspitze von 9,46. Die maximale Spannung tritt im Bereich der Knotenblechspitze an der Nahtwurzel auf, siehe Abb. 5-22. In Abb. 5-23 ist der Ermüdungsriss an der Knotenblechspitze aus den experimentellen Untersuchungen illustriert. Die Position der experimentellen Untersuchungen spiegelt die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen wider.

Für die Versuchsserie 3 berechnet sich ein Kerbfaktor von 5,87, welcher an der Knotenblechspitze auftritt, siehe Abb. 5-24. Es ist zu erkennen, dass die maximale Spannung am oberen Ende der Schweißnaht im Inneren des Rohrs auftritt. In Abb. 5-25 ist ein Horizontalschnitt der Versuchsserie 3 dargestellt, er zeigt den Ermüdungsriss am oberen Ende des Schweißguts im Inneren des Rohrs. Im Vergleich der numerischen und experimentellen Untersuchungen zeigt sich, dass die Position des Ermüdungsrisses widergespiegelt wird.

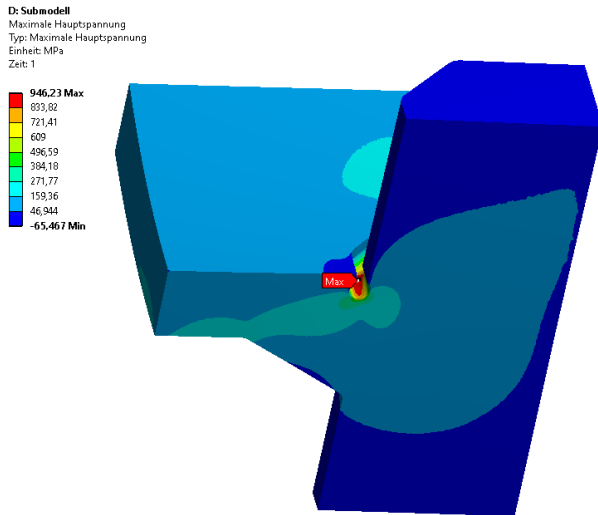


Abb. 5-22 Maximale Hauptspannungen der Versuchsserie 2 an der Nahtwurzel

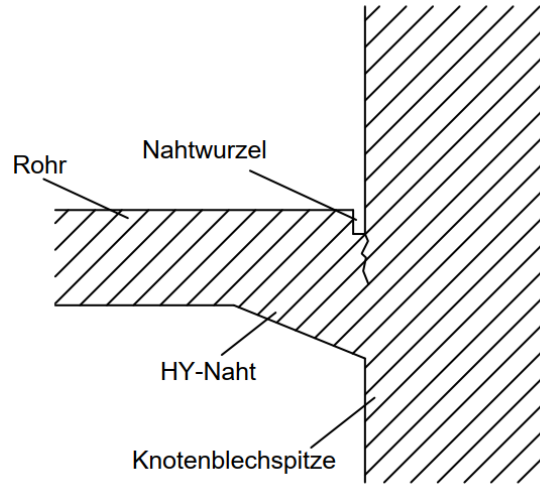


Abb. 5-23 Horizontalschnitt der Serie 2 an der Knotenblechspitze mit Ermüdungsriss

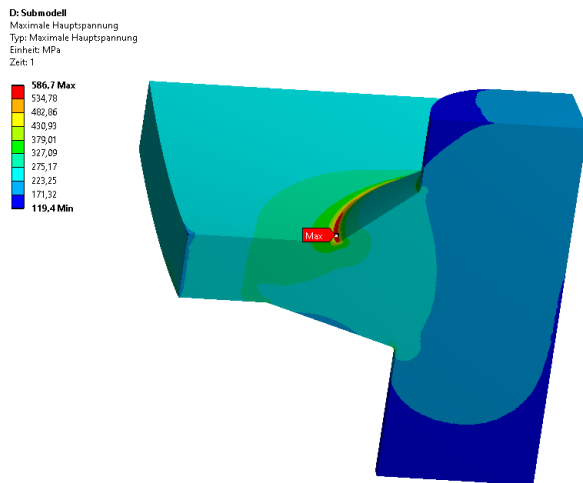


Abb. 5-24 Maximale Hauptspannungen der Versuchsserie 3 am oberen des Schweißguts im Inneren des Rohrs

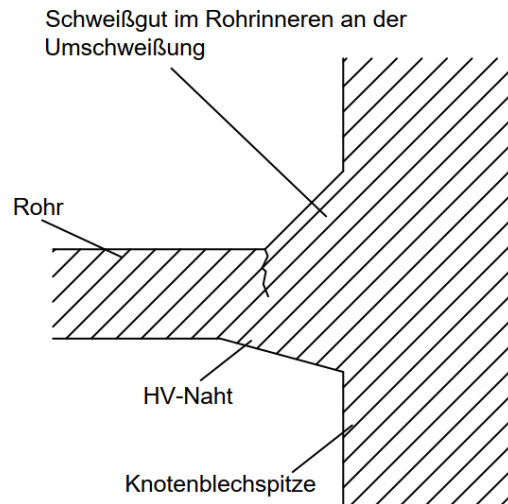


Abb. 5-25 Horizontalschnitt der Serie 3 an der Knotenblechspitze mit Ermüdungsriss

6 Parameterstudie

6.1 Allgemeines

Mit den erstellten Modellen werden unter Zuhilfenahme der Parameterstudie Einflussgrößen auf die Kerbspannungen untersucht. Es werden Ausführungen mit und ohne Deckel, unterschiedliche Schweißnähte, verschiedene Ausnehmungen im Knotenblech, Formen der Spitze des Knotenblechs, Abschrägungswinkel am Rohr, unterschiedliche Blechdicken des Rohrs sowie unterschiedliche Rohrdurchmesser untersucht. Außerdem wird ein Vergleich mit praxisnahen Beispielen durchgeführt.

Aus den Modellen werden die maximalen Kerbspannungen ausgewertet aus welchen sich der Kerbfaktor nach Gleichung (2.8) berechnet. Die Nennspannung im Rohr wird zur maximalen Kerbspannung ins Verhältnis gesetzt. Die Nennspannung im Globalmodell wird auf 100 N/mm² eingestellt, siehe Abb. 6-1 (links). Die maximale Kerbspannung wird im Submodell ausgewertet, siehe Abb. 6-1 (rechts). Dabei kommt es zu Spannungsspitzen an den Rändern des Submodells, die maximale Spannung an der Kerbe muss deshalb teilweise an einzelnen Flächen ausgewertet werden. Die Kerbspannung im Globalmodell kann aufgrund der hohen Elementgröße nicht genau genug ausgewertet werden.

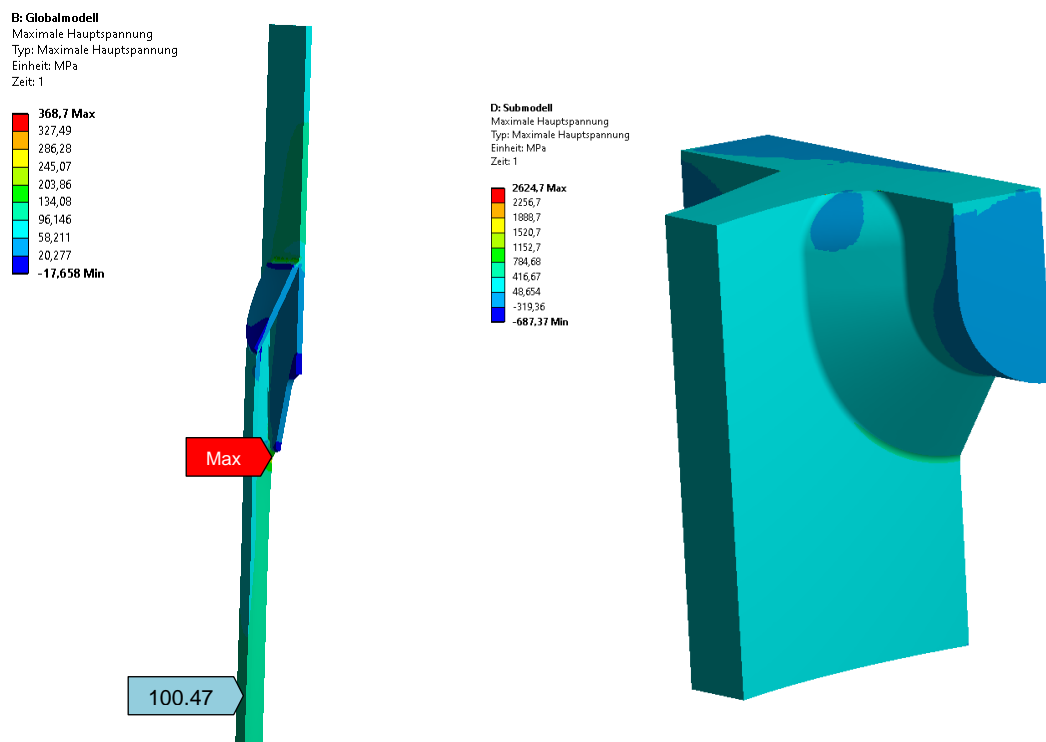


Abb. 6-1 Auswertung der Kerbspannung des Versuchskörpers 3 im Globalmodell (links) und im Submodell (rechts)

Um eine Vergleichbarkeit herstellen zu können, werden als Grundlage für die Parameterstudie die Modelle der Versuchskörper 2 und 3 genutzt. Die Abmessungen können Abschnitt 4.2 entnommen werden, die Bauteile Rohr, Knotenblech und Deckel entsprechen genau den

Abmessungen aus den Werkplänen. Die Schweißnähte zwischen Knotenblech und Rohr wurden mit den Abmessungen aus den Makroschliffen modelliert. Für die HY-Naht wurde die praxisnahe Variante mit einer nicht vollständig erfassten Schweißnahtwurzel an der Umschweißung verwendet. In Abb. 6-2 ist eine Ansicht des Submodells der Versuchsserie 2 veranschaulicht. Links ist ein Teil des Knotenblechs und rechts ein Ausschnitt des Rohrs zu erkennen. Zwischen Knotenblech und Rohr ist die HY-Naht an der Knotenblechspitze zu sehen. Die Schweißnahtübergänge zwischen Rohr und Knotenblech sind abgerundet. An der Innenseite des Rohrs der Schweißnahtwurzel ist die Schlüsselochkerbe zu sehen. Die grau hinterlegt gestrichelten Linien stellen verdeckte Kanten dar. Im Bereich der Umschweißung, an welcher wenig Schweißgut vorhanden war, verspringt die Schlüsselochkerbe an der Nahtwurzel im Vergleich zur restlichen Schweißnaht. Dies ist zwischen der Schlüsselochkerbe an der Längsnaht und der Schlüsselochkerbe an der Umschweißung zu erkennen. Weitere Untersuchungen werden in Abschnitt 6.3 behandelt.

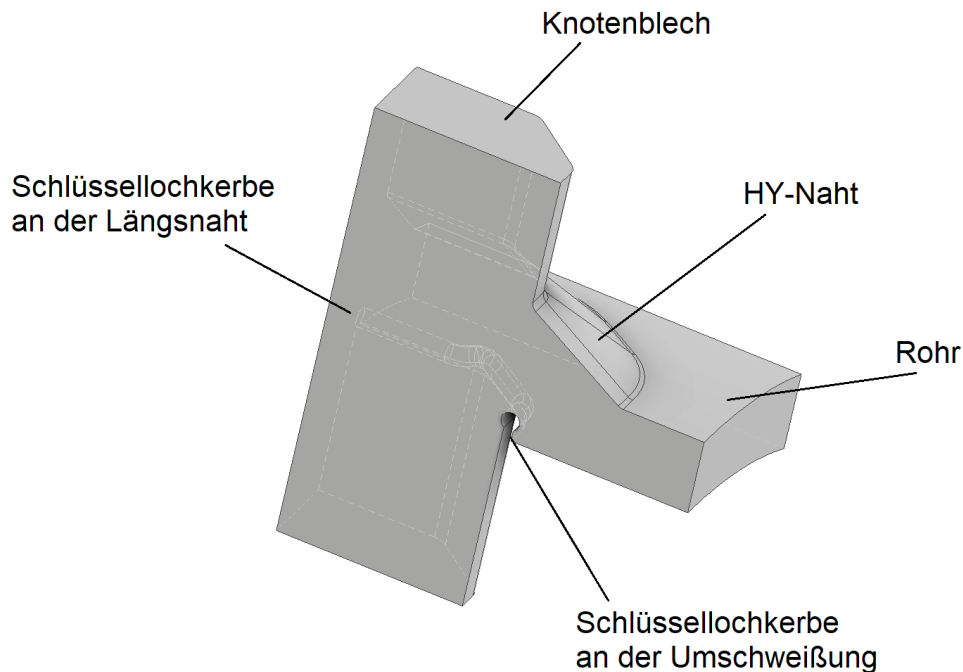


Abb. 6-2 Submodell des Versuchskörpers 2

An der HV-Naht der Versuchsserie 3 zeigt sich, dass an der Umschweißung die Schweißbad-sicherung nicht angelegt werden konnte, da diese aus Keramik bestand und nicht um die Rundung geführt werden konnte. An der Umschweißung konnte mehr Schweißgut ins Rohrinne eindringen. Im numerischen Modell wurde dies mit einer Vergrößerung der Schweißnaht an der Umschweißung im Rohrinne an der Knotenblechspitze berücksichtigt. In Abb. 6-3 ist die Schweißnaht im Inneren des Rohrs im Globalmodell zu erkennen. Dabei wurde diese so modelliert, dass an der Umschweißung des Knotenblechs im Inneren Schweißgut vorhanden ist. Zusätzliche Untersuchungen zur Schweißnaht werden in Abschnitt 6.3 behandelt.

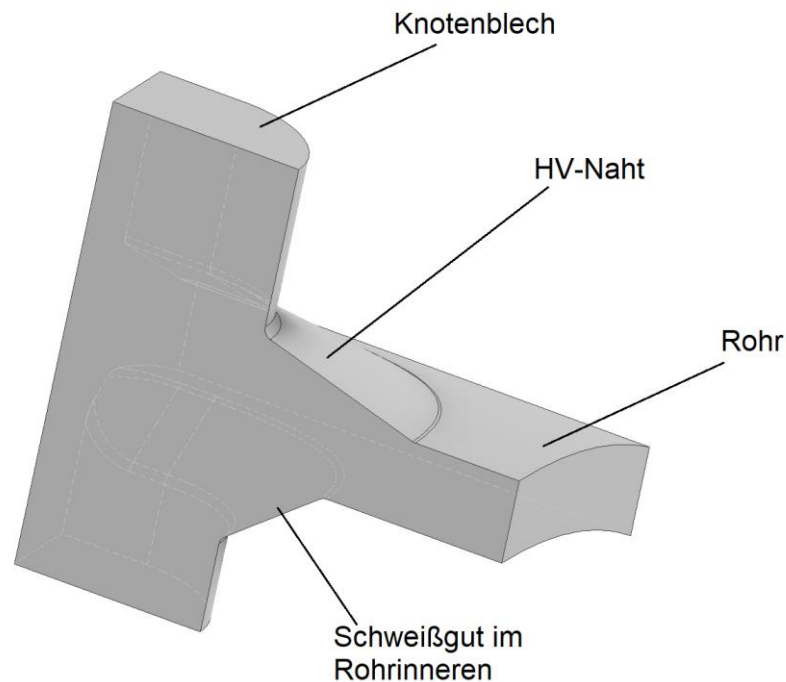


Abb. 6-3 Submodell des Versuchskörpers 3

Weitere Schweißnähte, wie Kehlnähte am Deckel, wurden nach Werkplänen modelliert. In Abschnitt 5.5 wurden die Modelle der Versuchsserien verifiziert und validiert. Daraus ergibt sich für den Versuchskörper 2 eine maximale Kerbspannung von $946,23 \text{ N/mm}^2$, siehe Abb. 5-22. Es errechnet sich ein Kerbfaktor an der Nahtwurzel von $k_f = 9,46$. Für den Versuchskörper 3 wurde eine maximale Kerbspannung von $586,70 \text{ N/mm}^2$ errechnet, woraus sich ein Kerbfaktor im Rohrinne an der Knotenblechspitze von $5,87$ ergibt, siehe Abb. 5-24. Die Kerbfaktoren der Versuchsserie 2 und 3 werden als Referenzwerte für die Parameterstudie verwendet. In dieser werden verschiedene Abmessungen und Bauteilarten variiert und mit den Kerbfaktoren der Versuchsserie 2 und 3 verglichen.

6.2 Deckel

In diesem Kapitel wird der Einfluss eines Deckels untersucht. Dieser ist notwendig, falls der Anschluss außerhalb des Hohlkastens angebracht wird. Das Eindringen von Wasser ins Rohrinne soll verhindert werden, welches zu Korrosion führen kann. Bisherige Forschungen zeigten, dass eine Ausführung mit einem Deckel positive Effekte auf den Kerbfaktor hatte. Dies konnte unter anderem am besseren Spannungsverlauf liegen.

Versuchskörper 2

Die Versuchsserie 2 wurde mit einem außenliegenden Deckel ausgeführt, der bereits im Werk auf das Rohr geschweißt wurde. Dies konnte erreicht werden, da die Schweißnaht zwischen

Knotenblech und Rohr mit einer HY-Naht ausgeführt wurde und nicht von innen zugänglich sein musste. Der Deckel war in einem 90° -Winkel zur Rohrachse angeschweißt, dargestellt in Abb. 4-5 und Abb. 4-7. Das Rohr musste nicht abgeschrägt werden. Die Schweißnähte am Deckel wurden als Kehlnähte ausgeführt. Für den Versuchskörper 2 wurde mit einer Ausführung mit einem Deckel ein Kerbfaktor von 9,46 ermittelt. Aus einer Berechnung ohne einen Deckel, bei welcher das Bauteil Deckel und dessen Schweißnähte unterdrückt wurden, resultiert ein Kerbfaktor von 9,76. Eine Ausführung ohne Deckel hatte einen gering höheren Kerbfaktor bei Versuchskörper 2 zufolge. Der Deckel ist nicht nur für die Abdichtung vorteilhaft. Durch seine Schweißnähte, die mit Rohr und Knotenblech verbunden sind, können Kräfte übertragen werden. Für Versuchskörper 2 hat dieser Effekt aber nur einen geringen Einfluss, da der Deckel in einem Winkel von 90° am Rohr positioniert wurde und somit nur eine schlechte Kraftübertragung im Vergleich zu Serie 3 zwischen Rohr und Deckel und zwischen Deckel und Knotenblech möglich war.

Versuchskörper 3

Die Versuchsserie 3 wurde mit einem am abgeschrägten Rohr angeschweißten Deckel ausgeführt. Der Deckel des Versuchskörpers 3 wurde erst auf der Baustelle aufgeschweißt. Dies war notwendig da der Versuchskörper 3 mit einer HV-Naht realisiert wurde. Ein Zugang zum Rohrrinnen war notwendig, um eine Schweißbadsicherung anzubringen. Auch ist der Deckel zur Abdichtung des Rohrs gegenüber äußeren Einflüssen notwendig. Der Versuchskörper 3 wurde am Rohrende in einem Winkel von 30° abgeschrägt. Das hatte zur Folge, dass der Deckel ellipsenförmig ausgeführt werden musste. Der Deckel wurde am Rohr und am Knotenblech mit einer Kehlnaht angeschweißt. Der Kerbfaktor der Versuchsserie 3 in der Ausführung mit einem Deckel ergibt sich zu 5,87. Zur Berechnung ohne einen Deckel wurde das Bauteil Deckel mit dessen zugehörigen Schweißnähten unterdrückt. Es errechnet sich eine maximale Kerbspannung an der Knotenblechspitze im Submodell von $659,93 \text{ N/mm}^2$, woraus sich ein Kerbfaktor von 6,60 ergibt.

In Abb. 6-4 sind die Hauptspannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 bei einer Ausführung mit einem Deckel dargestellt. Die Hauptspannungen der Versuchsserie 3 ohne einen Deckel sind in Abb. 6-5 zu sehen. Bei einer Ausführung ohne Deckel ist zu erkennen, dass sich die Spannungen am oberen Teil des Rohrs verringern. Dies bedeutet, dass sich der Spannungsfluss in Richtung Knotenblech verlagert. Über den Deckel können keine Spannungen übertragen werden. Dadurch entstand eine Umlagerung von Spannungen zur HV-Naht. Diese hatte größere Spannungskonzentrationen an der HV-Naht und an der Knotenblechspitze zur Folge.

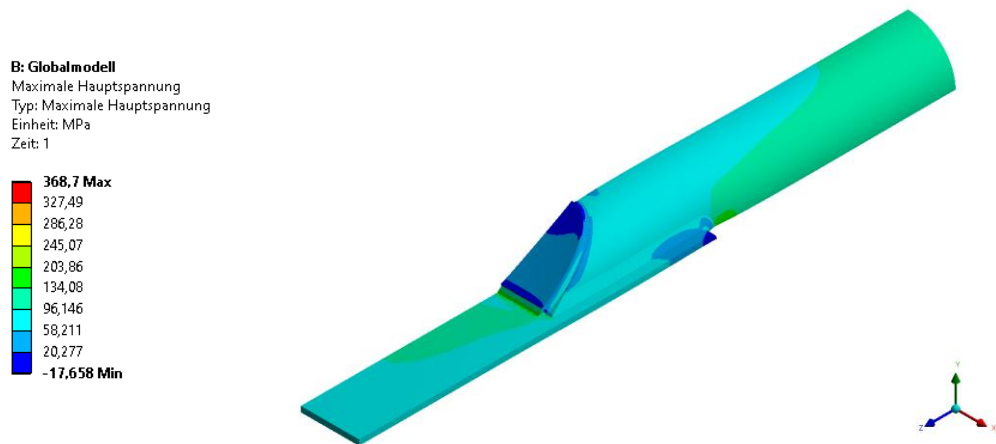


Abb. 6-4 Spannungen im Globalmodell der Versuchsserie 3 mit einem Deckel

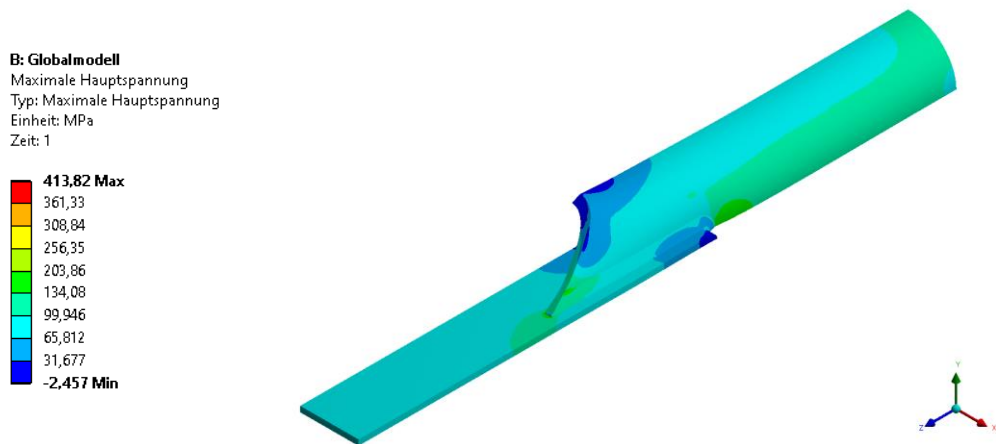


Abb. 6-5 Spannungen im Globalmodell der Versuchsserie 3 ohne einen Deckel

Ein Vergleich von Versuchsserie 2 und 3 zeigt, dass der Einfluss des Deckels bei Versuchsserie 3 größer ist als bei Versuchsserie 2. In Versuchsserie 3 wurde der Deckel in einem Winkel von 30° angebracht. Dies macht einen besseren Kraftfluss möglich. Die Spannungen vom Rohr in den Deckel und vom Deckel ins Knotenblech können bei einem abgeschrägten Rohr besser übertragen werden. In Abschnitt 6.5 werden verschiedene Winkel der Abschrägung des Rohrs behandelt.

Zusammenfassung

Eine Ausführung mit einem Deckel hat sowohl für den Versuchskörper 2, als auch für den Versuchskörper 3, einen positiven Einfluss auf den Kerbfaktor und somit auf die Ermüdungsfestigkeit. Es kann ein gleichmäßiger Spannungsverlauf im Versuchskörper erreicht werden. Ein Abschrägen des Rohrs ist mit einem höheren Fertigungsaufwand verbunden, bei einer Ausführung mit einem schrägen Deckel kann dieser sich in größerem Maße am Kraftabtrag beteiligen als bei einer Ausführung mit geradem Deckel. Die Ergebnisse des Einflusses des Deckels der Versuchskörper 2 und 3 sind in Tab. 6-1 zusammengefasst.

Tab. 6-1 Ergebnisse des Einflusses des Deckels, mit Kerbfaktoren an der Umschweißung

Parameter	Kerbfaktor [-]	
	Versuchskörper 2	Versuchskörper 3
mit Deckel	9,46	5,87
ohne Deckel	9,76	6,60

6.3 Schweißnähte

Die Versuchskörper wurden mit verschiedenen Schweißnähten ausgeführt, der Versuchskörper 2 mit einer HY-Naht und der Versuchskörper 3 mit einer HV-Naht. Im folgenden Kapitel wird auf die verschiedenen Schweißnähte eingegangen und es werden wichtige Parameter untersucht.

HY-Naht

Für die HY-Naht des Versuchskörpers 2 wurde der Schlitz des Rohrs mit einer 45°-Fase realisiert. Dabei betrug der Blechüberstand an der Innenseite des Rohrs 2 mm, siehe Abb. 4-8. So sollte kein Schweißgut ins Rohrinne gelangen. Die Geometrie der HY-Naht des Versuchskörpers 2 wurde anhand von Makroschliffen modelliert. Dabei zeigt sich, dass an der Umschweißung des Knotenblechs nur wenig Schweißgut ins Innere gelangte. Im numerischen Modell wurde eine Schweißnaht modelliert, die an der Wurzel nicht vollständig erfasst war, um diesen Effekt zu berücksichtigen, vergleiche Abb. 6-2. Dieser Einfluss wurde bei unterschiedlichen Erfassungen der Schweißnahtwurzel untersucht, siehe Abb. 6-6. Für die Versuchsserie 2 mit einer nicht vollständig erfassten Schweißnahtwurzel an der Umschweißung ergibt sich ein Kerbfaktor von 9,46. Für eine nach Anweisung geschweißte, über die Längsnaht und die Umschweißung durchgängig gleich erfasste Schweißnahtwurzel wurde ein Kerbfaktor von 9,39 errechnet. Fließt Schweißgut vollständig zwischen Blechüberstand des Rohrs und des Knotenblechs über die gesamte Länge der Schweißnaht errechnet sich ein Kerbfaktor von 8,78. In der Praxis verhindert der Blechüberstand das Eindringen des Schweißguts ins Rohrinne, deshalb ist diese Variante zu vernachlässigen. Es zeigt sich, dass bei einer praxisnahen Ausführung der Kerbfaktor gering ansteigt, die Ergebnisse sind in Tab. 6-2 zusammengefasst.

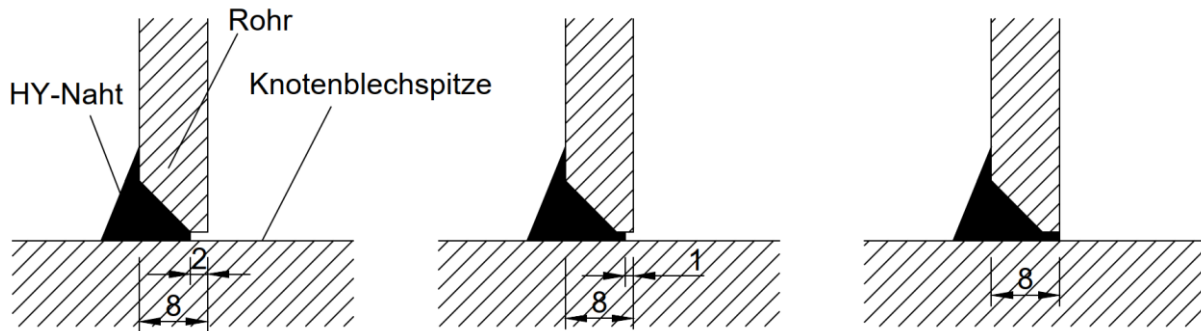


Abb. 6-6 Horizontalschnitt der HY-Naht des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung, nicht erfasst (links), nach Schweißanweisung (Mitte) und vollständig erfasst (rechts)

Tab. 6-2 Ergebnisse des Einflusses der Erfassung der Schweißnahtwurzel der HY-Naht, mit Kerbfaktoren an der Umschweißung

	Kerbfaktor [-]
nicht erfasst	9,46
halb erfasst	9,39
vollständig erfasst	8,78*

* nicht praxisnahe

Blechüberstand der HY-Naht

Der Parameter des Blechüberstands (Überstand der Fase) an der Innenseite des Rohrs wurde variiert. Der Blechüberstand (Fase) des Versuchskörpers 2 beträgt 2 mm, dieser wurde im Folgenden erhöht. Die HY-Naht verschob sich dabei nach außen, d.h. die aufgesetzte Kehlnaht hat sich vergrößert, da die Schweißnahtdicke, von innen nach außen verlagert wurde.

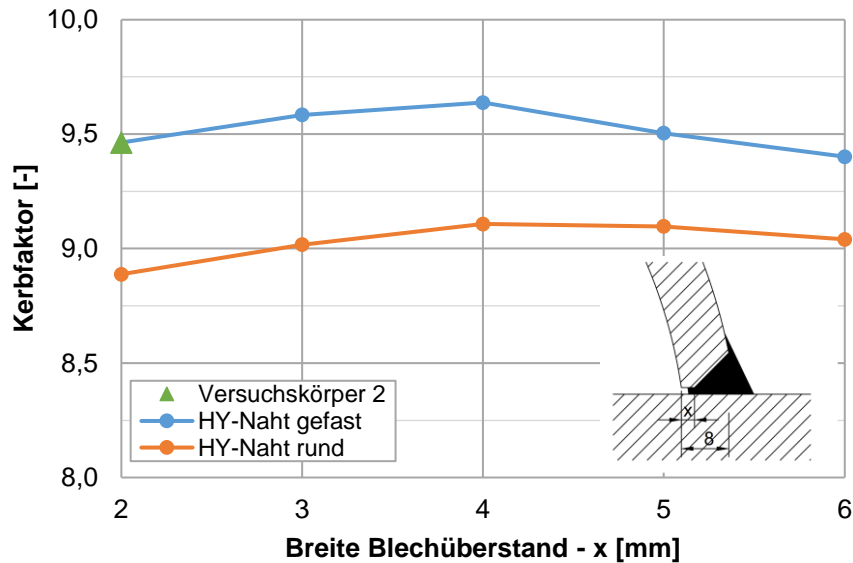


Abb. 6-7 Kerbfaktor an der Umschweißung der Versuchsserie 2 in Abhängigkeit der Breite des Blechüberstands

In Abb. 6-7 ist der Kerbfaktor des Versuchskörpers 2 in Abhängigkeit des Blechüberstands der HY-Naht dargestellt. Für den Versuchskörper 2 ergibt sich ein Kerbfaktor von 9,46 bei einem Blechüberstand von 2 mm. Dies entspricht der Ausführung des Versuchskörpers 2. Bei einer Erhöhung dieses Abstands steigt der Kerbfaktor bis zu einem Abstand von 4 mm auf 9,65. Bei einem größeren Abstand sinkt der Kerbfaktor annähernd linear ab. Ein Kerbfaktor von 9,40 errechnet sich bei einem Abstand von 6 mm. Als Alternative wurde eine HY-Naht am Versuchskörper 2 mit runder Knotenblechspitze untersucht. Der Blechüberstand wurde von 2 mm in mehreren Schritten auf 6 mm erhöht. Bei einem Abstand von 2 mm errechnet sich ein Kerbfaktor von 8,89. Ein Vergrößern des Abstands ergibt eine Steigerung des Kerbfaktors. Bei einem Blechüberstand von 4 mm zeigt sich der Höchstwert des Kerbfaktors mit 9,11. Dies ist in Versuchskörper 2 zu erkennen. Aus einem weiteren Vergrößern des Abstands resultiert ein geringes Sinken des Kerbfaktors. Der Kerbfaktor nimmt bei einem Abstand vom Rohrrinnen bis zum Beginn der Fase von 6 mm einen Wert von 9,04 an. Es zeigt sich, dass die Erhöhung des Blechüberstands der HY-Naht nur einen geringen Einfluss auf den Kerbfaktor hat.

HV-Naht

Der Versuchskörper 3 wurde mit einer HV-Naht ausgeführt. Der Schlitz im Rohr wurde mit einer 45°-Fase versehen, die Fase reichte bis zur Innenseite des Rohrs, d.h. über die komplette Rohrwanddicke. Dadurch konnte leicht Schweißgut ins Innere des Rohrs gelangen. Um dies zu verhindern, wurde die HV-Naht mit einer Schweißbadsicherung versehen. Die Schweißbadsicherung wurde mit einer Rundkeramik ausgeführt, welche an der Innenseite des Rohrs am Knotenblech positioniert wurde, siehe Abb. 4-12. An der Stelle der Umschweißung konnte diese nicht angelegt werden, es trat Schweißgut ins Rohrinne ein. Die Schweißnaht wurde anhand der Abmessungen aus den Makroschliffen modelliert. An der Umschweißung wurde das Fehlen der Schweißbadsicherung bei der Modellierung berücksichtigt. Dies ist in

Abb. 6-8 (oben links) dargestellt. Auch eine durchgängig fehlende und eine durchgängig anliegende Schweißbadsicherung wurde untersucht. Abb. 6-8 (oben rechts) zeigt das Rohrinne des Versuchskörpers 3 bei fehlender Schweißbadsicherung. Entlang der kompletten HV-Naht gelangte Schweißgut ins Rohrinne. Das Modell des Versuchskörpers 3 mit durchgängig anliegender Schweißbadsicherung ist in Abb. 6-8 (unten Mitte) dargestellt. Entlang der kompletten HV-Naht floss kein Schweißgut ins Rohrinne.

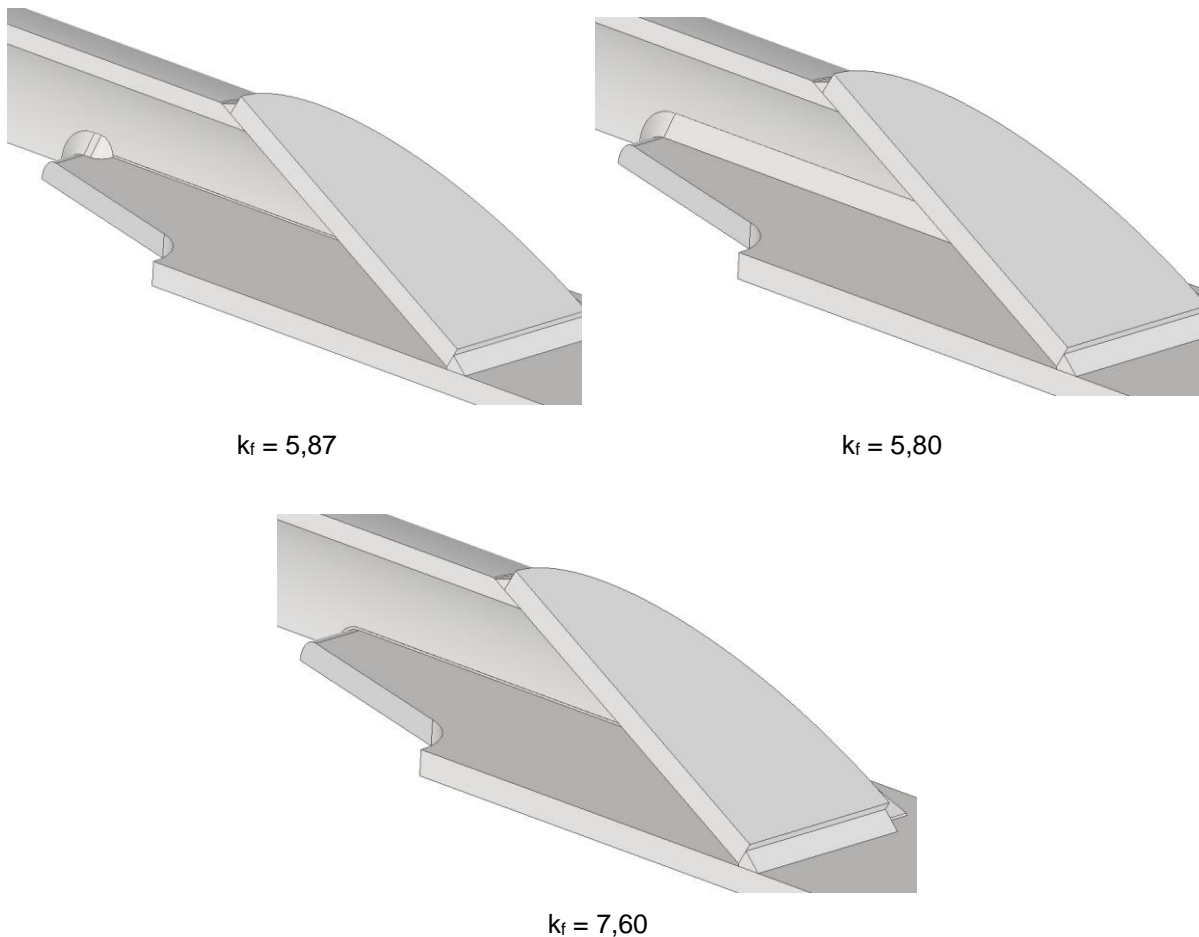


Abb. 6-8 Das Rohrinne des Versuchskörpers 3 bei fehlender Schweißbadsicherung an Umschweißung (oben links), bei durchgängig fehlender Schweißbadsicherung (oben rechts) und bei durchgängiger Schweißbadsicherung (unten Mitte), mit Kerbfaktoren an der Umschweißung

Bei einer fehlenden Schweißbadsicherung an der Umschweißung des Versuchskörpers 3 errechnet sich einen Kerbfaktor von 5,87. Für eine fehlende Schweißbadsicherung über der gesamten Länge der Schweißnaht berechnet sich ein Kerbfaktor von 5,80. Es zeigt sich, dass dies nur einen sehr geringen Effekt auf den Kerbfaktor hat. Für eine durchgehend angebrachte und funktionierende Schweißbadsicherung errechnet sich ein Kerbfaktor von 7,60. Das durchgehende Anbringen der Schweißbadsicherung hat einen großen Einfluss auf den Kerbfaktor. Begründet wird dies mit dem Fehlen des Schweißguts im Rohr. So war eine größere Schweißnaht an der kritischen Umschweißung vorhanden, die durch den größeren Querschnitt die

Spannungen besser aufnehmen kann, dadurch konnten Spannungsspitzen vermieden werden.

Vergleich der Schweißnähte

Für einen Vergleich von unterschiedlichen Ausführungen an Schweißnähten wurden an den Versuchskörpern 2 und 3 verschiedene Schweißnähte untersucht. Es wurde die in Versuchskörper 3 verwendete HV-Naht, die HY-Naht von Versuchskörper 2 und eine außenliegende Kehlnaht analysiert. Die drei Schweißnähte wurden an Versuchskörper 3 mit einer runden Knotenblechspitze und an Versuchskörper 2 mit einer Spitze aus zwei 45°-Fasen untersucht. Ein abgeschrägtes und gerades Rohrende wurde variiert. Die HV-Naht wurde nach den Makroschliffen aus den experimentellen Untersuchungen modelliert. Die HY-Naht wurde nach den Abmessungen des Versuchskörpers 2 modelliert, welche ebenfalls aus den experimentellen Untersuchungen hervorgingen. Die Kehlnaht wurde nach theoretischen Abmessungen modelliert, sie betragen $a_w = 8$ mm. Die Geometrien der Schweißnähte sind in Abb. 6-9 veranschaulicht.

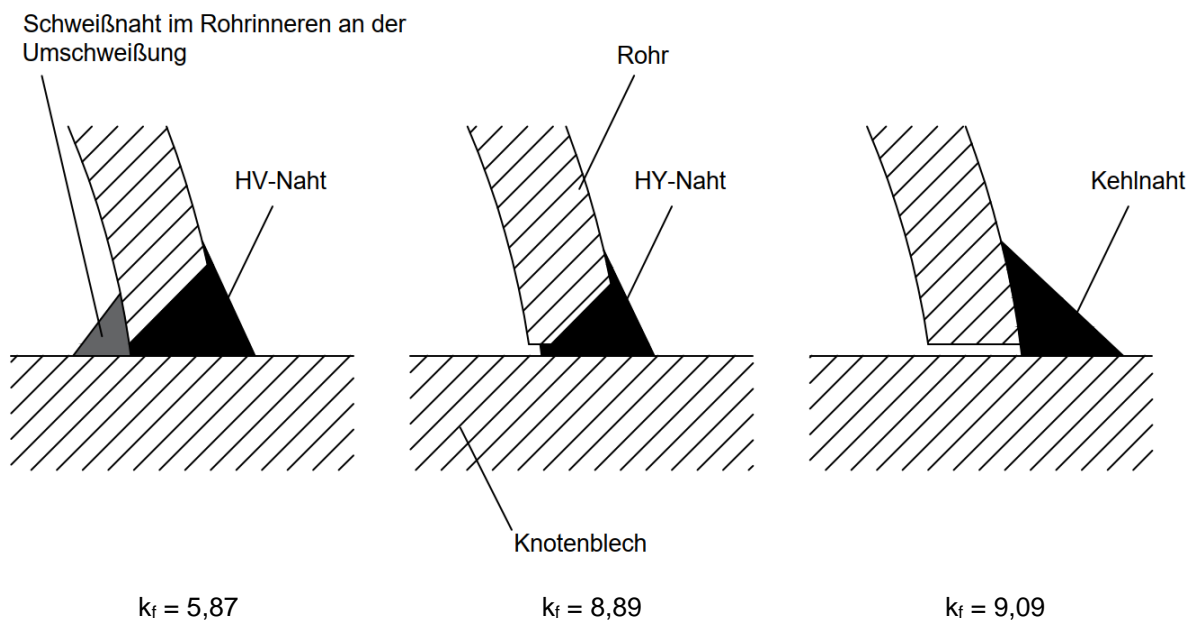


Abb. 6-9 Geometrie der verschiedenen Schweißnähte, HV-Naht (links), HY-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht (Mitte) und Kehlnaht (rechts), mit Kerbfaktoren des Versuchskörpers 3 an der Umschweißung

Für die HV-Naht des Versuchskörpers 3 errechnet sich ein Kerbfaktor von 5,87. Bei einem geraden Deckel erhöht sich der Kerbfaktor auf 6,00. Mit einer theoretisch rundum angelegten Schweißbadsicherung, d.h. es kann kein Schweißgut in das Rohrinne gelangen, ergibt sich ein Kerbfaktor von 7,60. Ein gerader Deckel ergibt einen Kerbfaktor von 7,77. Eine Ausführung des Versuchskörpers 3 mit einer HY-Naht ergibt einen Kerbfaktor von 8,89, ein gerader Deckel weist einen Kerbfaktor von 9,02 auf. Für eine Ausführung mit einer einseitigen Kehlnaht errechnet sich ein Kerbfaktor für die Versuchsserie 3 von 9,09. Bei geradem Deckel ergibt sich ein Kerbfaktor von 9,28.

Die Ergebnisse der verschiedenen Schweißnähte an Versuchskörper 3 sind in Tab. 6-3 dargestellt. Es zeigt sich, dass eine Ausführung mit einer HV-Naht den niedrigsten Kerbfaktor resultiert. Die HV-Naht wurde bis zum Rohrinne durchgeschweißt, es besteht auf der kompletten Rohrwanddicke eine Verbindung zwischen Knotenblech und Rohr. Eine Ausführung mit einer HY-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht ergibt einen höheren Kerbfaktor. Dies liegt unter anderem daran, dass die HY-Naht nicht komplett bis ins Rohrinne durchgeschweißt ist. Es findet keine durchgehende Verbindung zwischen Knotenblech und Rohr statt. Der höchste Kerbfaktor wird mit einer Ausführung als außenliegende Kehlnaht erreicht. Dabei wird die Kehlnaht nur von außen an das Rohr geschweißt. Ein gerader Deckel weist bei allen Schweißnähten einen gering höheren Kerbfaktor auf.

Tab. 6-3 Ergebnisse des Einflusses der Schweißnähte an Versuchskörper 3 an schrägem und geradem Deckel, mit Kerbfaktoren an der Umschweißung

Schweißnaht	Kerbfaktor [-]	
	Knotenblechspitze rund	
	schräger Deckel	gerader Deckel
HV-Naht ohne Schweißbadsicherung an Umschweißung	5,87	6,00*
HV-Naht mit durchgängiger Schweißbadsicherung	7,60	7,77
HY-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht	8,89	9,02
Kehlnaht	9,09	9,28*

* Maximum im Globalmodell in der umlaufenden Kehlnaht des Deckels am Knotenblech

Für einen Vergleich der Schweißnähte wurden diese an Versuchskörper 2 untersucht. Die Ergebnisse sind in Tab. 6-4 dargestellt. Eine HV-Naht ohne eine Schweißbadsicherung an der Umschweißung weist einen Kerbfaktor von 6,17 bei geradem Deckel auf. Bei einem schrägen Deckel konnte ein geringerer Kerbfaktor von 6,06 festgestellt werden. Eine HV-Naht mit durchgängiger Schweißbadsicherung erreicht einen Kerbfaktor bei geradem Deckel von 8,56, bei einem schrägen Deckel berechnet sich ein Kerbfaktor von 8,37. Der Versuchskörper 2 weist mit einer HY-Naht und einem geradem Deckel einen Kerbfaktor von 9,46 auf. Eine Ausführung mit schrägem Deckel zeigt einen geringeren Kerbfaktor von 9,32 auf. Eine Kehlnaht mit einem geradem Deckel zeigt den höchsten Kerbfaktor von 9,61 auf, bei einem schrägen Deckel berechnet sich ein Kerbfaktor von 9,41. Den niedrigsten Kerbfaktor weist eine HV-Naht ohne eine Schweißbadsicherung an der Umschweißung mit schrägem Deckel auf. Ein schräger Deckel hat bei allen Schweißnähten einen geringen positiven Einfluss auf den Kerbfaktor.

Tab. 6-4 Ergebnisse des Einflusses der Schweißnähte an Versuchskörper 2 an schrägem und geradem Deckel, mit Kerbfaktoren an der Umschweißung

Schweißnaht	Kerbfaktor [-]	
	Knotenblechspitze gefast	
	schräger Deckel	gerader Deckel
HV-Naht ohne Schweißbadsicherung an Umschweißung	6,06	6,17
HV-Naht mit durchgängiger Schweißbadsicherung	8,37	8,56
HY-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht	9,32	9,46
Kehlnaht	9,41	9,61

Zusammenfassung

An der HY-Naht des Versuchskörpers 2 zeigt sich, dass der Einfluss der Schweißnahtbefassung an der Umschweißung bei einer praxisnahen Umsetzung gering ist, vergleiche Abb. 6-6 und Tab. 6-2. Das Vergrößern des Blechüberstands der HY-Naht hat wenig Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit. An der HV-Naht des Versuchskörpers 3 zeigt sich, dass das Fehlen der Schweißbadsicherung an der Umschweißung einen positiven Effekt auf die Ermüdungsfestigkeit hat, da mehr Schweißgut ins Rohrinne gelangen kann. Die Umschweißung zeigt sich als maßgebende Stelle für die Ermüdungsfestigkeit. Bei einer fehlenden Schweißbadsicherung über die komplette Länge der Längsnaht sind nur geringe Abweichungen zu erkennen. Der niedrigste Kerbfaktor berechnet sich bei einer durchgehend angelegten Schweißbadsicherung. Im Vergleich der Schweißnähte HV-Naht, HY-Naht und Kehlnaht an den Versuchskörpern 2 und 3 weist die HV-Naht den geringsten Kerbfaktor auf. Ein Vergleich zwischen geradem und schrägem Deckel an den Versuchskörpern 2 und 3 zeigt, dass bei einem schrägen Deckel ein gering niedrigerer Kerbfaktor erreicht werden kann. Der Versuchskörper 2 wurde mit einer 45° gefasteten Knotenblechspitze ausgeführt, der Versuchskörper 3 mit einer runden. Bei einem Vergleich der Versuchskörper ist zu erkennen, dass bei einer runden Knotenblechspitze ein geringerer Kerbfaktor erreicht werden kann. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Schweißnaht sind in Tab. 6-5 zusammengefasst.

Tab. 6-5 Ergebnisse der untersuchten Parameter der Schweißnähte,
mit Kerbfaktoren an der Umschweißung

Parameter	Abmessung	Kerbfaktor [-]			
		Versuchskörper 2		Versuchskörper 3	
		gerader Deckel	schräger Deckel	gerader Deckel	schräger Deckel
HY-Naht	nicht erfasst an Umschweißung	9,46	9,32	9,02	8,89
	halb erfasst an Umschweißung	9,39	-	-	-
	vollständig erfasst	8,78*	-	-	-
	Blechüberstand $b = 2$ mm	9,46	-	-	-
	Blechüberstand $b = 4$ mm	9,64	-	-	-
	Blechüberstand $b = 6$ mm	9,40	-	-	-
HV-Naht	Ohne Schweißbadsicherung an Umschweißung	6,17	6,06	6,00	5,87
	mit Schweißbadsicherung	8,56	8,37	7,77	7,60
Kehlnaht	$a_w = 8$ mm	9,61	9,41	9,28**	9,09

*nicht praxisnahe

**Maximum im Globalmodell in der umlaufenden Kehlnaht des Deckels am Knotenblech

6.4 Knotenblech

Für das Knotenblech wurden die Parameter Blechdicke, Ausnehmung im Rohrinternen, Spitze des Knotenblechs, Breite des Knotenblechs und das Abschrägen des Knotenblechs außerhalb des Rohrs variiert.

Knotenblechbreite

Das Knotenblech des Versuchskörpers 2 wurde mit einer Breite von 210 mm ausgeführt. Um den Einfluss der Knotenblechbreite auf den Kerbfaktor zu untersuchen, wird im Folgenden die Breite des Knotenblechs in Schritten von 20 mm vergrößert. In Abb. 6-10 ist der Kerbfaktor des Versuchskörpers 2 im Submodell in Abhängigkeit der Breite des Knotenblechs dargestellt, die von 210 mm bis 310 mm vergrößert wurde. Bei einer Breite des Knotenblechs von 210 mm errechnet sich für den Versuchskörper 2 ein Kerbfaktor von 9,46. Es zeigt sich, dass bei einer Verbreiterung des Knotenblechs der Kerbfaktor ansteigt, so erreicht der Kerbfaktor bei einer Breite von 310 mm einen Wert von 9,91. Dieser Anstieg kann auf die größere Steifigkeit des Knotenblechs zurückgeführt werden.

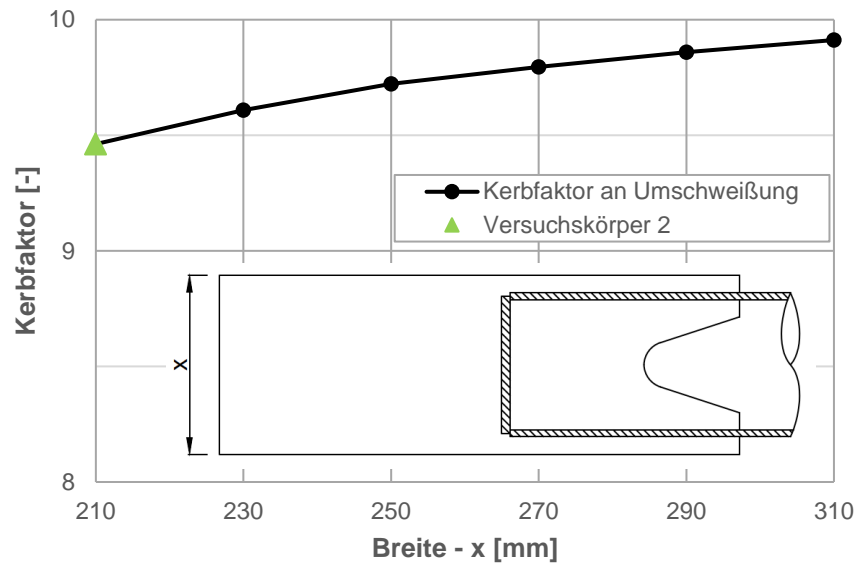


Abb. 6-10 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung in Abhängigkeit der Breite des Knotenblechs

Abschrägungswinkel des Knotenblechs

Für einen weicheren Spannungsverlauf wurde das Knotenblech an den Ecken abgeschrägt. Das Knotenblech des Versuchskörpers 2 hatte eine Breite von 210 mm. Dabei wurde ein Mindestabstand zwischen der Abschrägung des Knotenblechs und des Rohrs von 20,85 mm festgelegt. Dies ist für eine Schweißführung und einen Toleranzausgleich notwendig. Der Winkel der Abschrägung wurde an einem Knotenblech mit 290 mm Breite variiert, da für das Knotenblech mit einer Breite von 210 mm nicht genug Fläche zum Abschrägen vorhanden ist. Für das Knotenblech mit einer Breite von 290 mm errechnet sich ein Kerbfaktor von 9,86, siehe Abb. 6-10. Dies entspricht einem Winkel der Abschrägung von 90° , ein Winkel der Abschrägung von 0° entspricht einem Knotenblech mit einer Breite von 210 mm und einem Kerbfaktor von 9,46. In Abb. 6-11 ist der Kerbfaktor des Versuchskörpers 2, mit einer Breite des Knotenblechs von 290 mm, in Abhängigkeit des Winkels der Abschrägung, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich bei einem Winkel größer als 15° der Kerbfaktor nur gering in der zweiten Nachkommastelle verändert. Bei einem Winkel von 15° endet die Abschrägung ca. auf der halben Höhe der Schweißnaht. Es errechnet sich ein Kerbfaktor von 9,82. Bei einem Winkel von $7,5^\circ$ endet die Abschrägung unterhalb des Deckels, der Kerbfaktor ergibt sich zu 9,70. Unterhalb eines Winkels von 15° fällt der Kerbfaktor ab. Bei einem Winkel von 0° kann der niedrigste Kerbfaktor mit 9,46 erreicht werden.

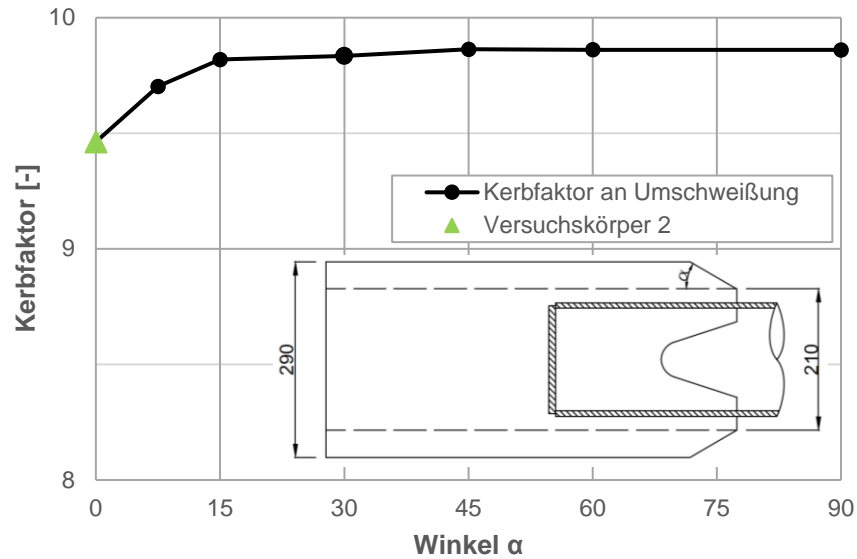


Abb. 6-11 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung in Abhängigkeit des Abschrägungswinkels des Knotenblechs

Es zeigt sich, dass ein Verbreitern des Knotenblechs zu einer Steigerung des Kerbfaktors führt. Ein Abschrägen des breiteren Knotenblechs führt nur ab einem Winkel kleiner als 15° zu geringeren Kerbfaktoren. Dies hat aber nur einen geringen Einfluss. Der niedrigste Kerbfaktor geht aus einer möglichst kleinen Knotenblechbreite hervor. Abstände für Schweißarbeiten und Toleranzausgleiche sind zu beachten.

Ausnehmung des Knotenblechs

Des Weiteren wurde die Ausnehmung des Knotenblechs untersucht, welche sich im Rohrinneren befindet. Die Ausnehmung der Versuchsserien 2 und 3 hat die Form eines Dreiecks deren Spitze abgerundet wurde. Die Breite der Ausnehmung am Ende des Knotenblechs und die Tiefe beträgt 112 mm. Die Abrundung wurde mit einem Radius von 28 mm ausgeführt. Für die Versuchsserie 2 ergibt sich mit dieser Ausnehmung ein Kerbfaktor von 9,46, welcher im Submodell abgelesen wurde. Es wurden verschiedene Varianten der Ausnehmung untersucht, siehe

Abb. 6-12. Ein Knotenblech ohne eine Ausnehmung hat den geringsten Fertigungsaufwand. Eine Ausführung der Ausnehmung mit einem kreisförmigen Ausschnitt wurde mit verschiedenen Radien untersucht. Der kleinste Radius der Ausnehmung betrug $r = 46$ mm. Dieser wurde in Schritten von 10 mm vergrößert, bis zu einem Radius von $r = 76$ mm. Er entsprach ungefähr dem Innenradius des Rohrs. Als weitere Variante wurde eine ellipsenförmige Ausnehmung untersucht, diese wurde unter den Parametern Breite und Länge der Ellipse variiert. Die Länge der Ellipse wurde von $l = 75$ mm bis zu einer Länge von $l = 250$ mm variiert. Wobei bei einer Länge von $l = 250$ mm der Deckel des Versuchskörpers 2 fast erreicht wird.

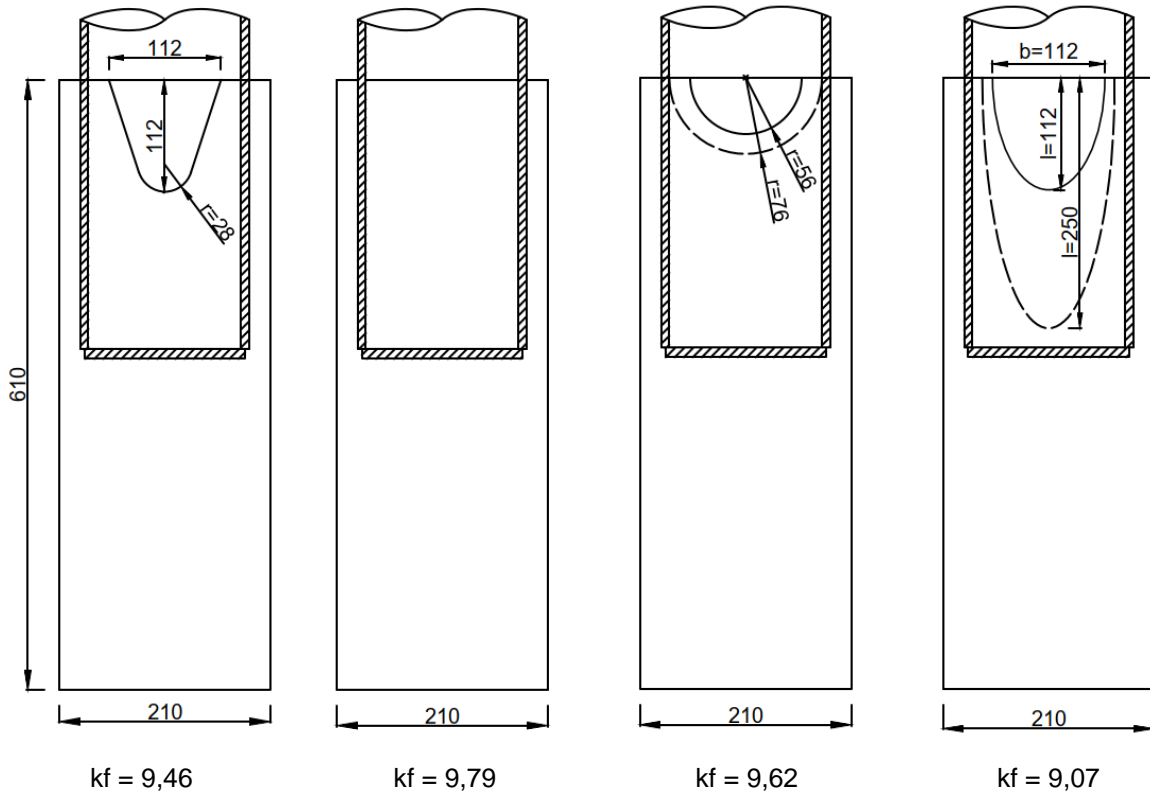


Abb. 6-12 Ausnehmungen im Knotenblech, v.l.n.r Versuchskörper 2 und 3, ohne Ausnehmung, Halbmond, Ellipse mit Kerbfaktoren an der Umschweißung des Versuchskörpers 2

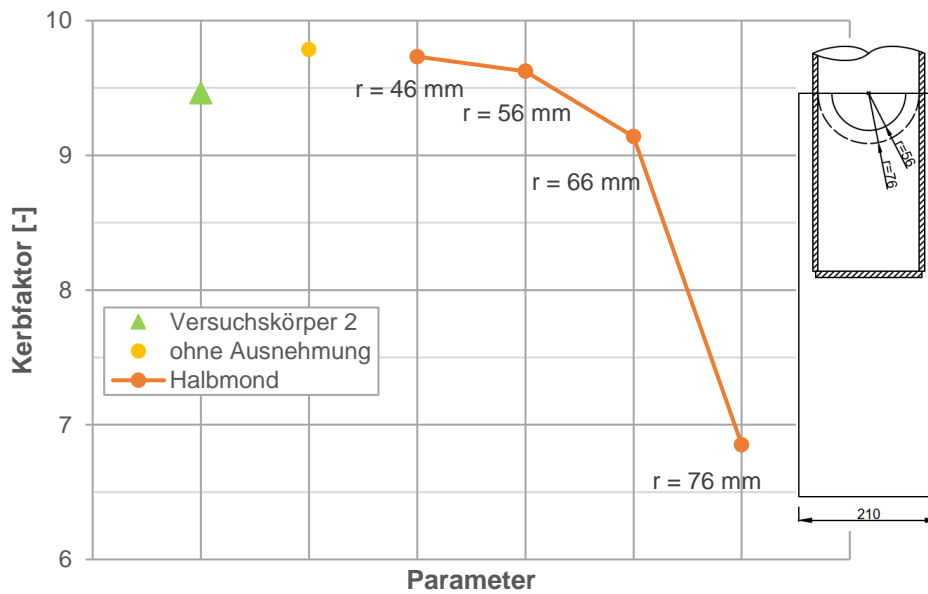


Abb. 6-13 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung bei keiner Ausnehmung und bei einer Ausnehmung mit einem Halbmond

Die Ergebnisse für eine Ausnehmung des Knotenblechs des Versuchskörpers 2, mit geradem Knotenblech und mit einer Ausnehmung in Form eines Halbmonds mit verschiedenen Radien sind in Abb. 6-13 dargestellt. Aus der Variante des Versuchskörpers 2 ergibt sich ein Kerbfaktor von 9,46. Für ein Knotenblech ohne eine Ausnehmung berechnet sich ein Kerbfaktor von 9,76. Im Vergleich zeigt sich, dass eine Ausnehmung im Knotenblech einen positiven Effekt auf den Kerbfaktor hat. Eine Ausnehmung in Form eines Halbmondes zeigt Verbesserungen des Kerbfaktors im Vergleich zum Knotenblech ohne Ausnehmung. Bei $r = 56$ mm, welcher der Breite der Ausnehmung des Versuchskörpers 2 entspricht, errechnet sich ein Kerbfaktor von 9,62, welcher gering höher ist als der Kerbfaktor des Versuchskörpers 2. Es zeigt sich, dass die längliche Ausnehmung des Versuchskörpers 2 einen positiven Effekt auf den Kerbfaktor hat. Bei einer weiteren Vergrößerung des Radius der Ausnehmung sinkt der Kerbfaktor weiter. Bei einem Radius von $r = 76$ mm ergibt sich ein Kerbfaktor von 6,85. Dieser liegt deutlich unterhalb des Kerbfaktors von Versuchskörper 2. Ursächlich kann ein weiches Verhalten des Knotenblechs sein, woraus ein glatterer Spannungsverlauf entsteht und sich die Spannungsspitzen verringern. Der Radius $r = 76$ mm entspricht ungefähr dem Innenradius des Rohrs, bei einer Ausführung mit einer HV-Naht oder mit einer Doppelkehlnaht ist allerdings ein Abstand zwischen Rohrinne und Ausnehmung des Knotenblechs erforderlich. Dieser ist für eine Schweißnahtsicherung oder die innenliegende Kehlnaht notwendig. Auch ein Toleranzausgleich ist nur möglich, wenn die Ausnehmung des Rohrinne nicht bis an die innere Rohrwand reicht.

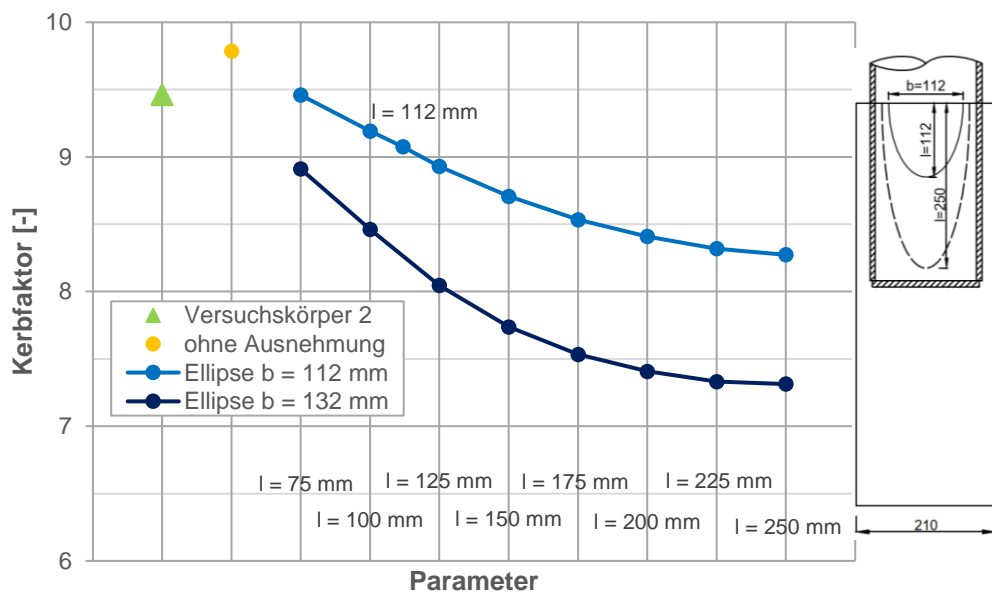


Abb. 6-14 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung bei einer Ausnehmung in Form einer Ellipse

Da der Radius der Ausnehmung auf den Innenradius des Rohrs begrenzt ist, wurde des Weiteren eine Ausnehmung in Form einer Ellipse untersucht. Diese lässt sich nicht nur in der Breite anpassen, sondern auch unabhängig davon in der Länge. Dadurch kann eine größere Ausnehmung erreicht werden. In Abb. 6-14 sind die Ergebnisse des Versuchskörpers 2 dargestellt, es ist die Variante des Versuchskörpers 2, mit geradem Knotenblech und zweier Ellipsen zu

erkennen. Es wurde bei einer Breite der Ellipse von $b = 112$ mm, was der Breite der Ausnehmung von Versuchskörper 2 entspricht, und einer Länge der Ellipse von 75 mm, ein Kerbfaktor von 9,46 erreicht. Als Vergleich zur Ausnehmung des Versuchskörpers 2 wurde eine Ellipse mit den äußeren Abmessungen von $b = 112$ mm und $l = 112$ mm modelliert, daraus errechnet sich ein Kerbfaktor von 9,07. Es zeigt sich, dass bei einer Ausnehmung in Form einer Ellipse ein besser Kerbfaktor resultiert, im Vergleich zur Ausnehmung des Versuchskörpers 2. Dies liegt an der größeren Ausnehmung der Ellipse. Durch die Form der Ellipse ist bei gleichen Abmessungen mehr Material aus dem Knotenblech herausgenommen. Eine Vergrößerung der Länge l der Ellipse bewirkt eine weitere Senkung des Kerbfaktors. Bei einer Länge $l = 250$ mm berechnet sich ein Kerbfaktor von 8,27. Dabei fällt die Kurve des Kerbfaktors anfangs linear ab und flacht ab einer Länge von $l = 175$ mm ab. Als Alternative wurde eine Ellipse mit einer Breite $b = 132$ mm untersucht. Bei ihr ist ein Abstand zum Innenradius des Rohrs vorhanden. Bei einer Länge von $l = 75$ mm ergibt sich ein Kerbfaktor von 8,91, welcher unterhalb der des Versuchskörpers 2 liegt. Bei einer Vergrößerung der Länge l zeigt sich ein ähnlicher Effekt wie bei einer Ausführung der Ellipse mit der Breite $b = 112$ mm. Bei einer Länge $l = 250$ mm der Ellipse wird ein Kerbfaktor von 7,31 erreicht. Es zeigt sich, dass bei einer Vergrößerung der Länge l eine breitere Ellipse einen besseren Effekt auf den Kerbfaktor hat.

Im Globalmodell des Versuchskörpers 2 wurde eine Umlagerung der Spannungen untersucht. In Abb. 6-15 sind die Spannungen des Globalmodells des Versuchskörpers 2, ohne eine Ausnehmung zu erkennen. In Abb. 6-16 sind die Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 2 mit einer ellipsenförmigen Ausnehmung mit einer Breite von $b = 112$ mm und einer Länge $l = 250$ mm zu erkennen. Es zeigt sich im Vergleich der beiden Ausführungen, dass die Spannungen auf der HY-Naht bei einer ellipsenförmigen Ausnehmung am Ende der HY-Naht zunehmen.

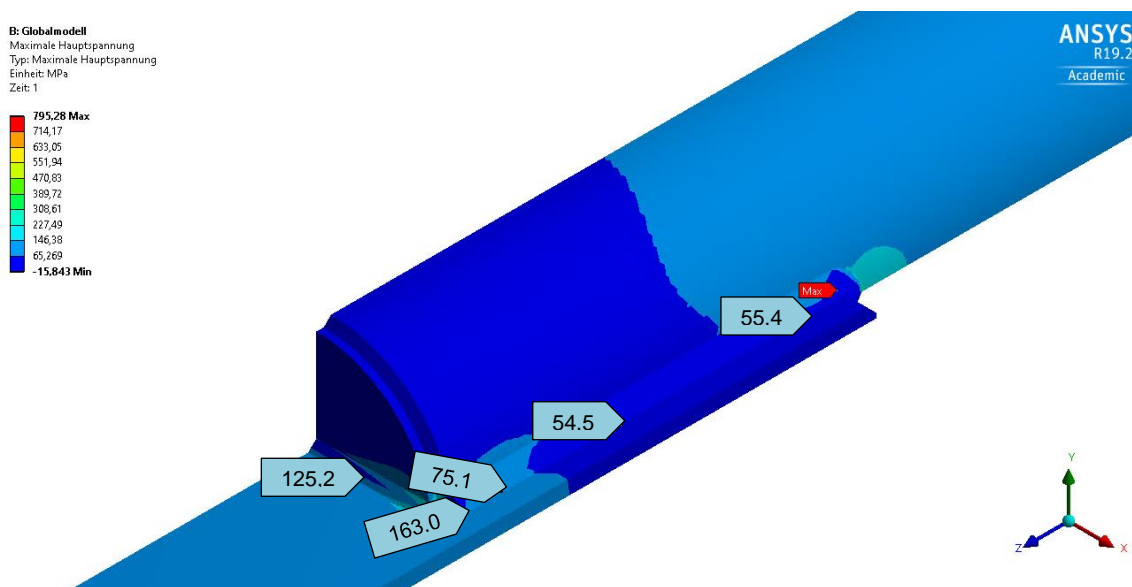


Abb. 6-15 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 2 ohne eine Ausnehmung, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung

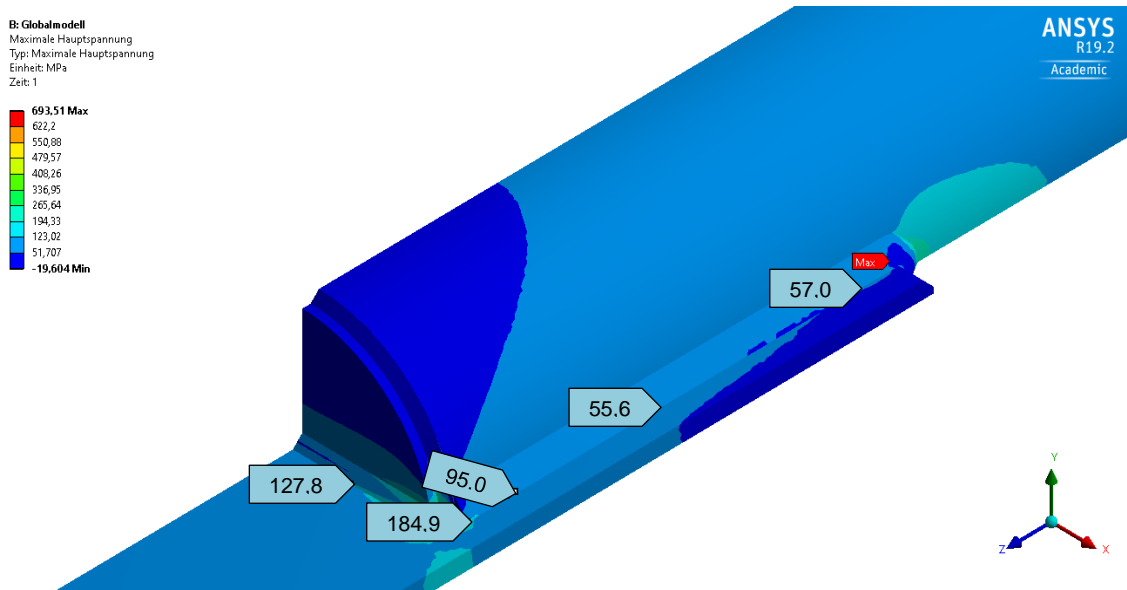


Abb. 6-16 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 2 mit einer ellipsenförmigen Ausnehmung ($b = 112 \text{ mm}$, $l = 250 \text{ mm}$), Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung

Für einen Vergleich wurde der Versuchskörper 3 ohne eine Ausnehmung und mit einer Ausnehmung in Form einer Ellipse untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 6-17 dargestellt.

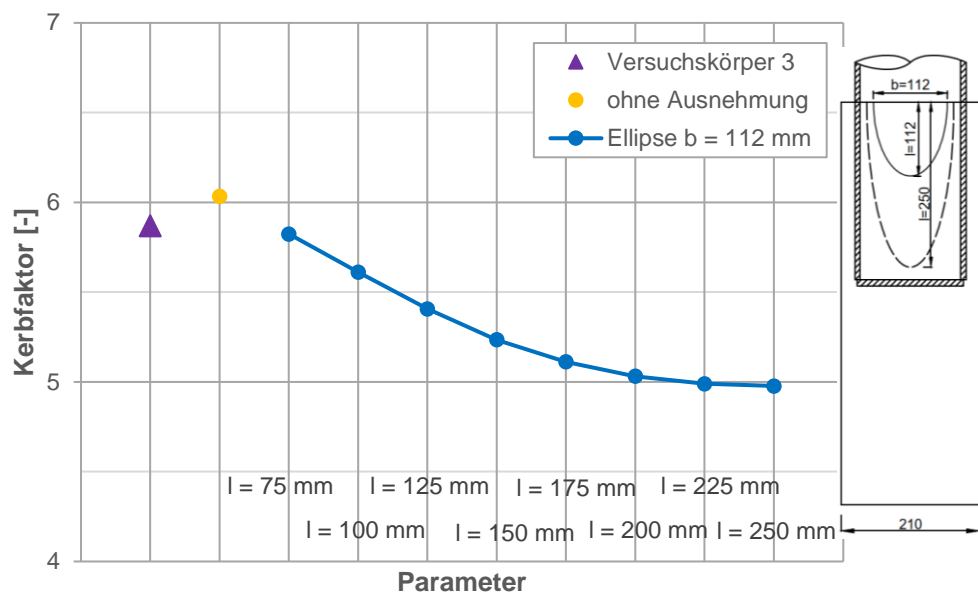


Abb. 6-17 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 3 an der Umschweißung bei einer Ausnehmung in Form einer Ellipse

In Abb. 6-17 ist der Kerbfaktor des Versuchskörpers 3 bei unterschiedlichen Ausnehmungen zu erkennen. Die Ausführung des Versuchskörpers 3 weist einen Kerbfaktor von 5,87 auf. Eine Ausführung ohne eine Ausnehmung im Knotenblech zeigt einen Kerbfaktor von 6,03 auf. Des Weiteren wurde eine Ausnehmung in Form einer Ellipse mit einer Breite von 112 mm und bei

unterschiedlichen Längen untersucht. Bei einer Länge von 75 mm weist der Versuchskörper 3 einen Kerbfaktor von 5,82 auf, welcher gering niedriger ist im Vergleich zur Ausführung des Versuchskörpers 3. Bei zunehmender Länge der Ellipse sinkt der Kerbfaktor annähernd linear. Ab einer Länge von 200 mm flacht die Kurve des Kerbfaktors ab. Der niedrigste Kerbfaktor von 4,98 wird bei einer Länge der Ellipse von 250 mm erreicht.

In Abb. 6-18 sind die Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 ohne eine Ausnehmung dargestellt. Im Vergleich dazu sind in Abb. 6-19 die Spannungen des Versuchskörpers 3 mit einer Ausnehmung des Knotenblechs mit einer Ellipse zu erkennen. An der Schweißnaht wurden Umlagerungseffekte untersucht. Es zeigt sich im Vergleich der beiden Ausführungen, dass bei einer ellipsenförmigen Ausnehmung des Knotenblechs eine Umlagerung der Spannungen ans Ende der HV-Naht erfolgt. Es ist zu erkennen, dass die Spannungen an der Kehlnaht zwischen Deckel und Knotenblech zunehmen.

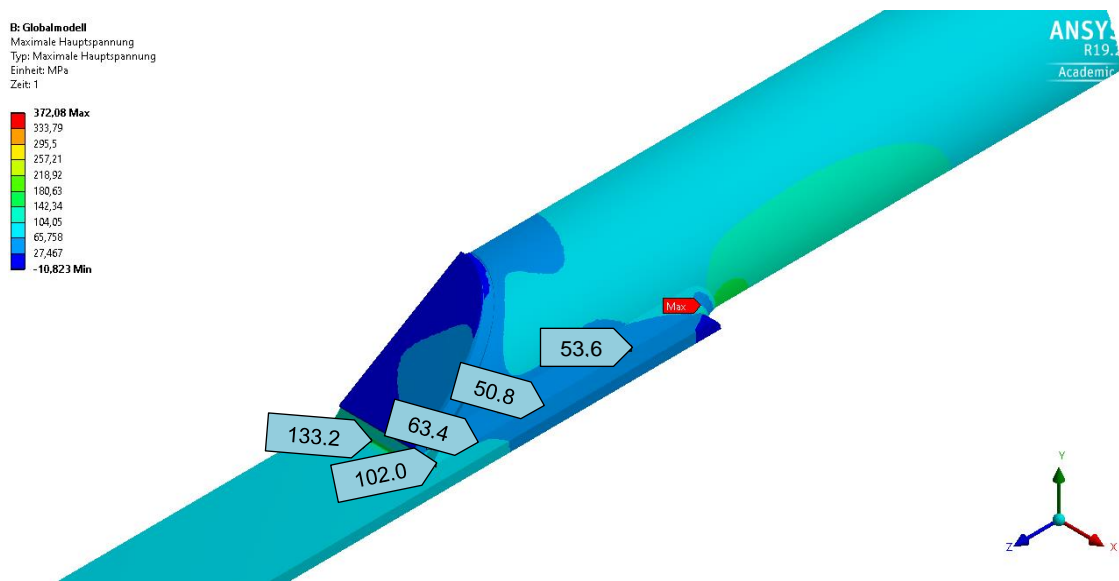


Abb. 6-18 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 ohne eine Ausnehmung im Knotenblech, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung

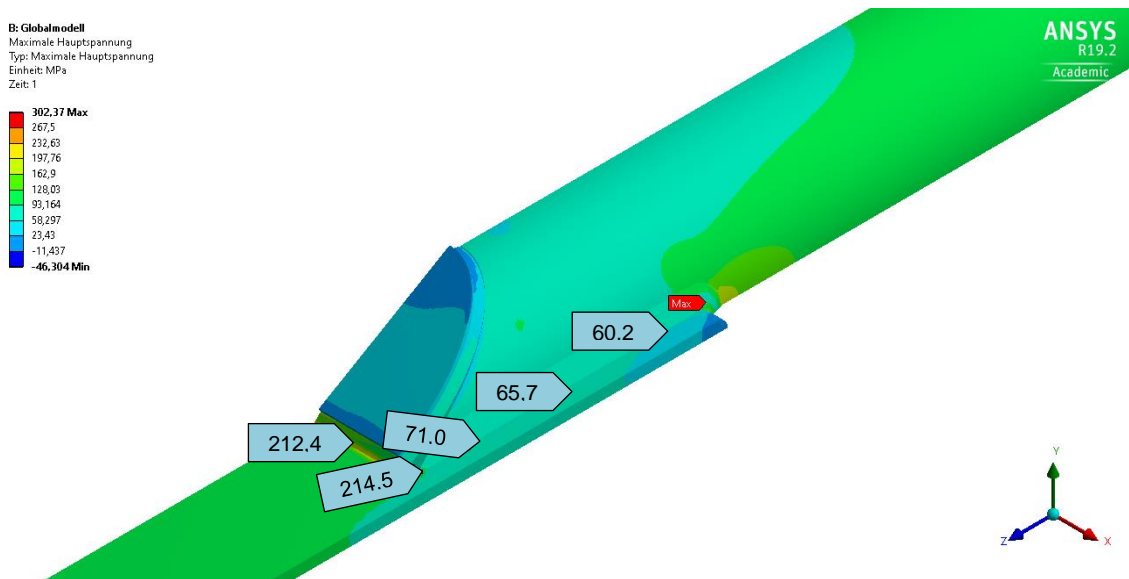


Abb. 6-19 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 mit einer ellipsenförmigen Ausnehmung des Knotenblechs ($b = 112 \text{ mm}$, $l = 250 \text{ mm}$), Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung

Eine größere Ausnehmung hat einen positiven Effekt auf den Kerbfaktor. Dies liegt an der geringeren Steifigkeit des Knotenblechs. Es kann ein weicherer Kraftfluss im Anschluss erreicht werden. Dadurch können Spannungsspitzen verringert werden. Den niedrigsten Kerbfaktor des Versuchskörpers 2 erreicht die Ausführung eines Halbmondes mit $r = 76 \text{ mm}$, wobei dieser für die Ausführung schwierig zu realisieren und ein Radius von $r = 66 \text{ mm}$ zu bevorzugen ist. Bei diesem ist ein Abstand zwischen Ausnehmung und Innenradius des Rohres vorhanden. Bei Vorhandensein eines Abstands zeigt sich die Ellipse am vorteilhaftesten, dabei wird ein Kerbfaktor von 7,31 erreicht. Im Vergleich zum Versuchskörper 2 erbringt das eine große Verbesserung. Für Versuchskörper 3 können ähnliche Effekte festgestellt werden. Ohne eine Ausnehmung im Knotenblech wird ein höherer Kerbfaktor erreicht. Eine Ausnehmung in Form einer Ellipse erbringt große Verringerungen im Kerbfaktor. So hat die Ausnehmung unabhängig von der Ausführung mit schrägem oder geradem Deckel einen positiven Effekt auf den Kerbfaktor und auf die Versuchskörper. Für Versuchskörper 2 und 3 wird festgestellt, dass bei einer Ausführung mit einer Ausnehmung eine Umlagerung der Spannungen ans Ende der Längsnaht stattfindet.

Knotenblechspitze

Die Spitze des Knotenblechs ist ein weiterer Parameter, der untersucht wird. Beim Versuchskörper 2 wurde diese mit zwei 45° -Fasen ausgeführt, die jeweils ein Drittel der Blechdicke des Knotenblechs einnehmen. Um dieses Detail ermüdungsarm auszuführen, wurden die Kanten der Fasen in einem Radius von 2 mm abgerundet. Der Versuchskörper 3 wurde mit einer runden Spitze des Knotenblechs ausgeführt. Diese wurde mit einem Radius von 20 mm abgerundet, was der Blechdicke des Knotenblechs entspricht. Beide Varianten benötigten eine zusätzliche Bearbeitung der Spitze des Knotenblechs. Als Alternative wurde eine eckige Spitze des Knotenblechs untersucht, mit einem Radius von 2 mm wurden die Kanten des

Knotenblechs abgerundet. Geändert wurde jeweils die Form der Knotenblechspitze, die Form der Schweißnaht und die Form des Rohrzuschnitts im Bereich der Umschweißung, angepasst an die Form der Knotenblechspitze rund, gerade oder gefast. Die restlichen Abmessungen des Versuchskörpers wurden beibehalten. Die drei Varianten sind in Abb. 6-20 veranschaulicht.

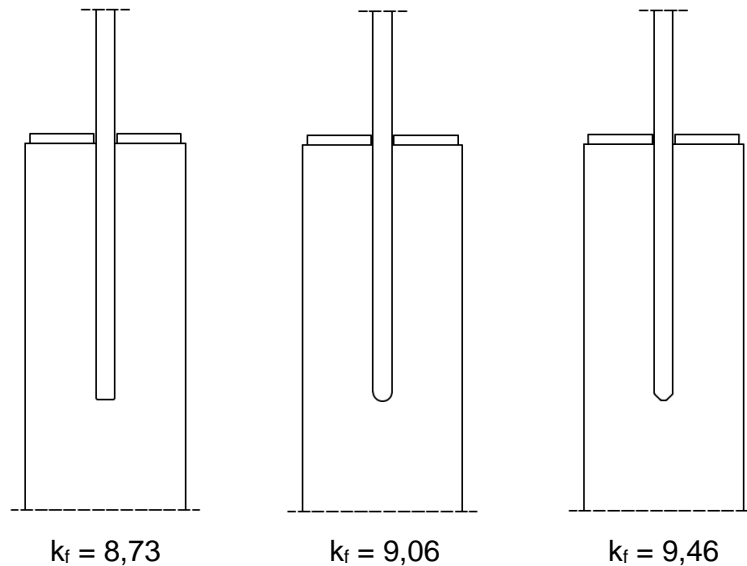


Abb. 6-20 Seitenansicht des Versuchskörpers 2 bei verschiedenen Knotenblechspitzen, v.l.n.r eckig, rund und gefast mit Kerbfaktoren an der Umschweißung

Für den Versuchskörper 2 mit einer Spitze, die aus zwei Fasen bestand, errechnet sich ein Kerbfaktor von 9,46. Die maximale Kerbspannung tritt an der Spitze des Knotenblechs auf. Für eine Ausführung mit einer runden Spitze des Knotenblechs berechnet sich ein Kerbfaktor von 9,06. In Abschnitt 6.3 wurde im Vergleich der Schweißnähte eine HY-Naht am Versuchskörper 3 mit geradem Deckel und runder Knotenblechspitze untersucht. Es errechnet sich ein Kerbfaktor von 9,02, was bis auf die zweite Nachkommastelle in Übereinstimmung mit dem Versuchskörper 2 mit runder Knotenblechspitze steht. In Abb. 6-21 ist die Spitze des runden Knotenblechs im Submodell zu erkennen, es wird deutlich, dass die maximale Kerbspannung an der Spitze des Knotenblechs auftritt. Ein Knotenblech mit einem geradem Abschluss weist einen Kerbfaktor von 8,73 auf. Die Stelle der maximalen Spannung verschiebt sich an die Ecke der Spitze des Knotenblechs, vergleiche Abb. 6-22. Bei einer Ausführung mit einem eckigen Knotenblech steht an der Spitze des Knotenblechs mehr Fläche zur Kraftübertragung zur Verfügung. Es entsteht eine geringere Spannungskonzentration, was zu einem niedrigeren Kerbfaktor führt. In der Praxis ist die Ausführung des Knotenblechs mit geradem Abschluss kritisch zu sehen, da die Ausbildung der Schweißnaht an der Ecke des Knotenblechs schwierig ist. Daher gelangt wenig Schweißgut bis ins Innere des Rohrs, was zu einer Schwächung der Schweißnaht an dieser Stelle führt. Die Ergebnisse bei verschiedenen Knotenblechspitzen sind in Tab. 6-6 zusammengefasst.

Tab. 6-6 Ergebnisse des Einflusses der Knotenblechspitze an Versuchskörper 2, mit Kerbfaktoren an der Umschweißung

Knotenblechspitze	Kerbfaktor [-]
Fase	9,46
rund	9,06
eckig	8,73*

* nicht praxisnahe

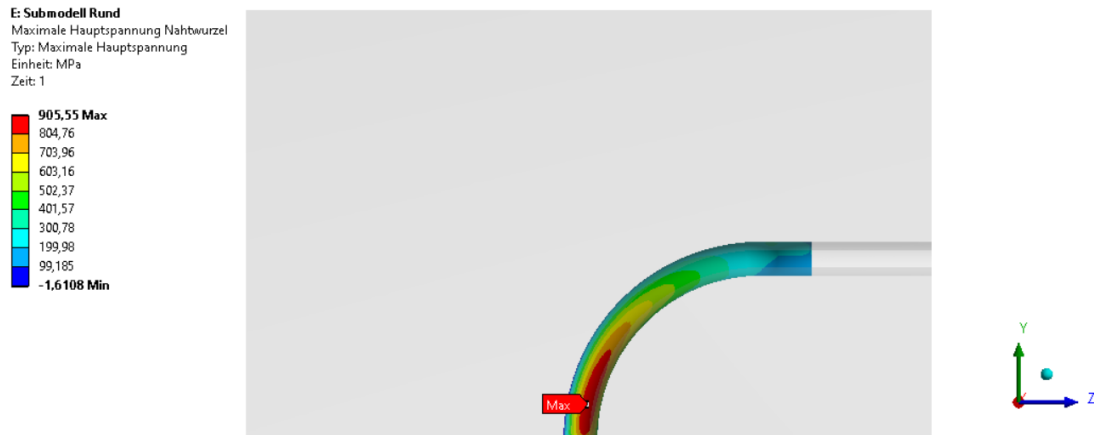


Abb. 6-21 Maximale Kerbspannung an der Nahtwurzel im Submodell mit runder Knotenblechspitze

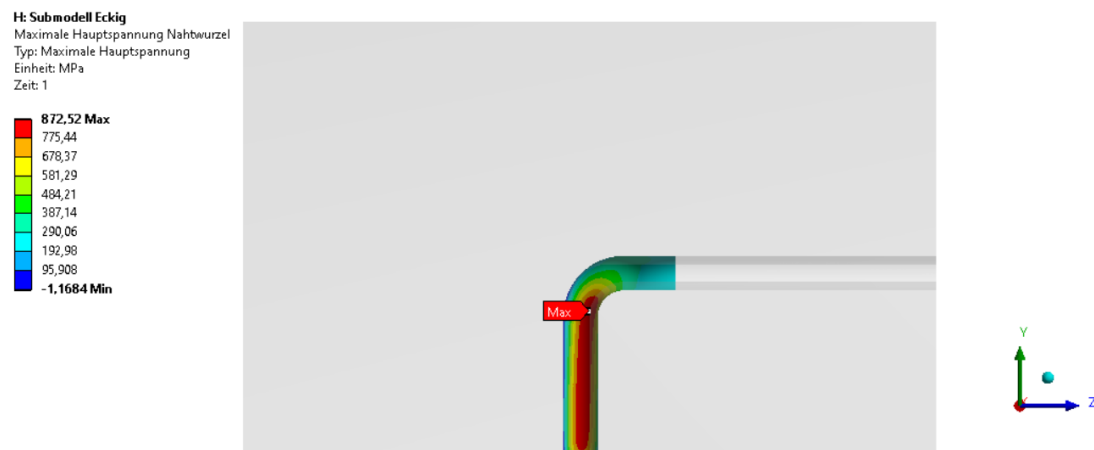


Abb. 6-22 Maximale Kerbspannung an der Nahtwurzel im Submodell mit eckiger Knotenblechspitze

Knotenblechdicke

Im Folgenden werden Auswirkungen auf den Kerbfaktor bei verschiedenen Blechdicken des Knotenblechs untersucht. Die Knotenblechdicke wurde für Versuchskörper 2 und 3 mit 20 mm ausgeführt. In den numerischen Untersuchungen wurde diese für die Versuchskörper 2 und 3 zwischen 10 mm und 40 mm variiert, siehe Abb. 6-23 und Abb. 6-27. Der Schlitz im Rohr, die

Größe des Deckels und die HY-Naht wurden an die jeweilige Blechdicke des Knotenblechs angepasst.

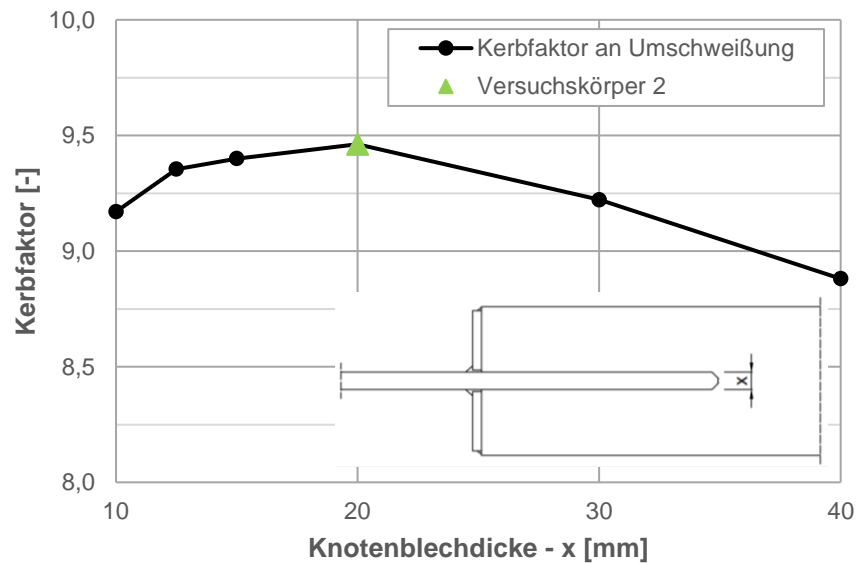


Abb. 6-23 Kerbfaktor des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung in Abhängigkeit der Knotenblechdicke

Die Ausführung des Knotenblechs mit einer Blechdicke von 20 mm für die Versuchsserie 2 ergibt einen Kerbfaktor von 9,46. Bei einer Erhöhung der Blechdicke auf 40 mm verringert sich der Kerbfaktor annähernd linear auf einen Kerbfaktor von 8,88. Eine Reduzierung der Blechdicke des Knotenblechs weist einen annähernd linear sinkenden Kerbfaktor bis zu einer Blechdicke von 12,5 mm auf. Die Blechdicke von 12,5 mm ergibt einen Kerbfaktor von 9,35. Bei einer weiteren Reduzierung wird ein steilerer Abfall des Kerbfaktors festgestellt. Der Kerbfaktor bei einer Knotenblechdicke von 10 mm nimmt einen Wert von 9,17 an. In Abb. 6-25 sind Stichproben der Spannungen auf der HY-Naht bei einer Knotenblechdicke von 20 mm dargestellt, im Vergleich dazu sind in Abb. 6-24 die Spannungen auf der HY-Naht bei einer Knotenblechdicke von 10 mm veranschaulicht. Es zeigt sich, dass bei einer Abnahme der Knotenblechdicke eine Umlagerung der Spannungen ans Ende der HY-Naht stattfindet. Der höchste Kerbfaktor resultiert bei einer Knotenblechdicke von 20 mm. Der niedrigste Kerbfaktor wird bei einer Blechdicke von 40 mm erreicht. In Abb. 6-26 sind die Spannungen des Globalmodells des Versuchskörpers 2 bei einer Knotenblechdicke von 40 mm zu erkennen. Es zeigt sich, dass keine Umlagerung an das Ende der HY-Naht im Vergleich zu einer Ausführung mit einer Knotenblechdicke von 20 mm stattfindet. Die Spannungen werden an der Längsnaht geringer.

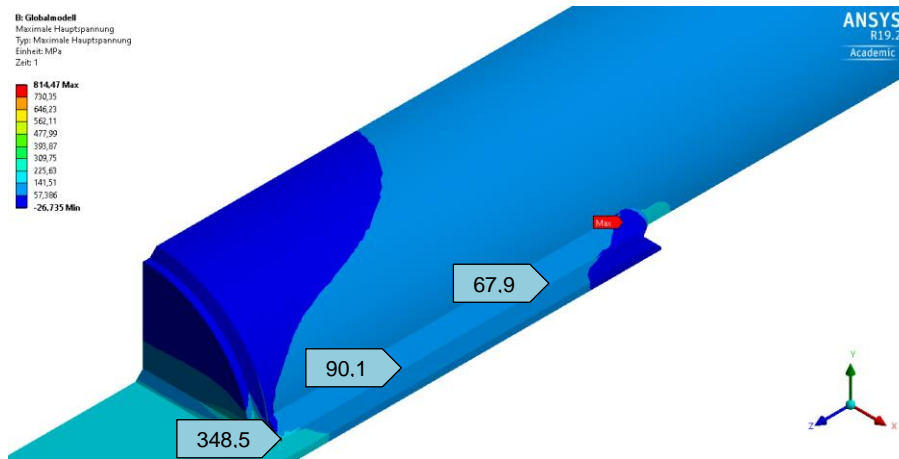


Abb. 6-24 Spannungen im Globalmodell auf der HY-Naht bei einer Knotenblechdicke von 10 mm am Versuchskörper 2, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung

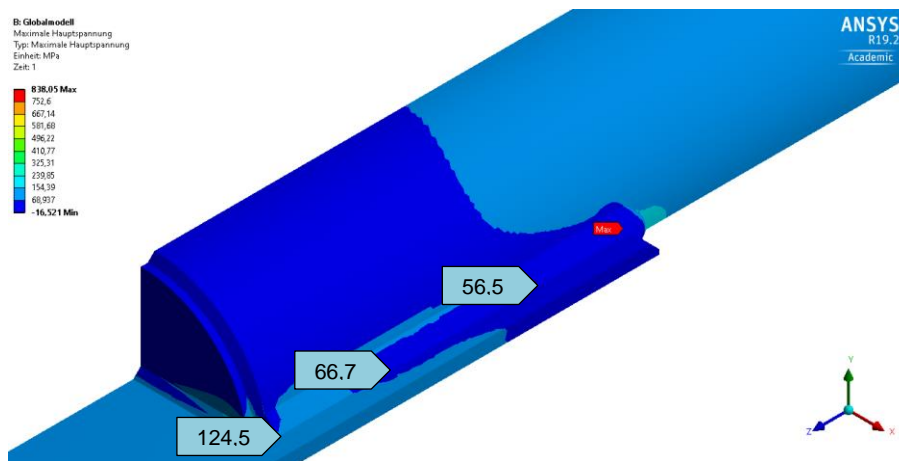


Abb. 6-25 Spannungen im Globalmodell auf der HY-Naht bei einer Knotenblechdicke von 20 mm am Versuchskörper 2, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung

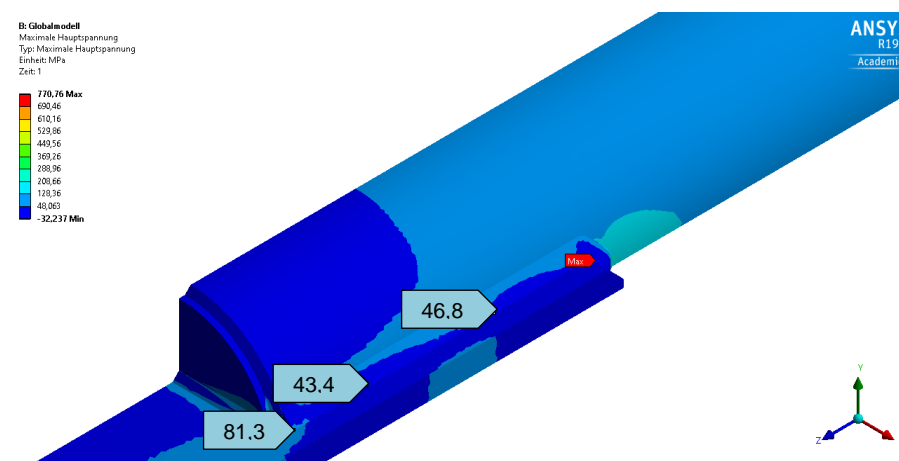


Abb. 6-26 Spannungen im Globalmodell auf der HY-Naht bei einer Knotenblechdicke von 40 mm am Versuchskörper 2, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung

Im Vergleich zur Versuchsserie 2 werden unterschiedliche Knotenblechdicken an Versuchsserie 3 untersucht. Die Abmessungen des Rohrausschnitts, des Deckels und der HV-Naht wurden der Blechdicke angepasst. Diese wurde von 10 mm bis zu einer Knotenblechdicke von 40 mm variiert, siehe Abb. 6-27.

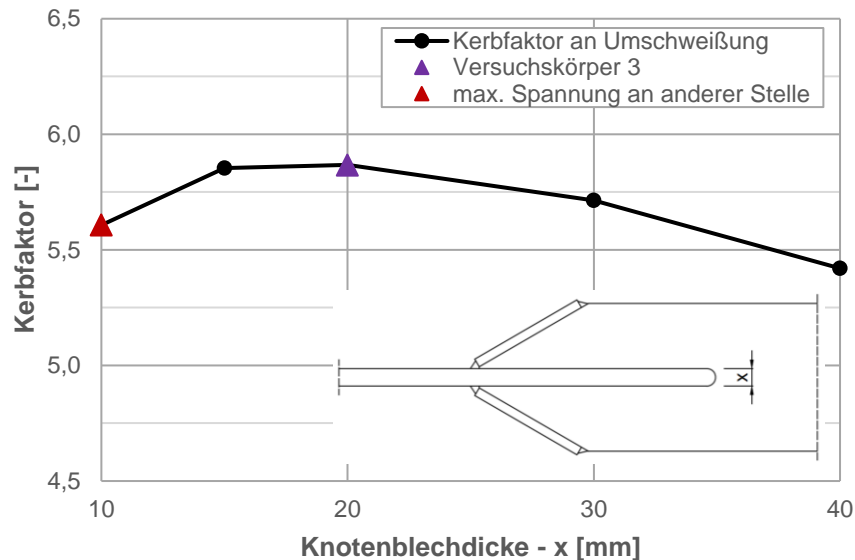


Abb. 6-27 Kerbfaktor des Versuchskörpers 3 an der Umschweißung in Abhängigkeit der Knotenblechdicke

Der Versuchskörper 3 wurde mit einer Knotenblechdicke von 20 mm ausgeführt, dabei erreicht er einen Kerbfaktor von 5,87. Wird die Knotenblechdicke erhöht, sinkt der Kerbfaktor bis auf einen Wert von 5,42 bei einer Knotenblechdicke von 40 mm. Bei einer Reduzierung der Blechdicke des Knotenblechs bleibt der Kerbfaktor zunächst annähernd gleich, unterhalb einer Blechdicke von 15 mm sinkt er auf einen Wert von 5,61 bei einer Blechdicke von 10 mm ab. Bei einer Knotenblechdicke von 10 mm verlagert sich die maximale Spannung der Knotenblechspitze ans Ende der HV-Naht. In Abb. 6-29 sind die Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 auf der HV-Naht bei einer Knotenblechdicke von 20 mm zu erkennen. Im Vergleich dazu sind in Abb. 6-28 die Spannungen auf der HV-Naht bei einer Knotenblechdicke von 10 mm dargestellt. Es wird deutlich, dass bei einer Knotenblechdicke von 10 mm die Spannungen auf der Längsnaht ansteigen und eine Umlagerung von der Knotenblechspitze an das Ende der Längsnaht stattfindet. Die Kehlnaht zwischen Deckel und Knotenblech wird durch die Umlagerung stärker beansprucht, was im Vergleich zwischen Abb. 6-28 und Abb. 6-29 deutlich wird. Der höchste Kerbfaktor wird bei einer Blechdicke von 20 mm erreicht. Der niedrigste bei einer Blechdicke von 40 mm. In Abb. 6-30 sind die Spannungen des Versuchskörpers 3 im Globalmodell bei einer Knotenblechdicke von 40 mm zu erkennen. Es zeigt sich bei einem Vergleich mit einer Knotenblechdicke von 20 mm, dass keine Umlagerung an das Ende der HV-Naht stattfindet. Die Spannungen an der Längsnaht werden im Vergleich zwischen einer Knotenblechdicke von 20 mm und 40 mm geringer.

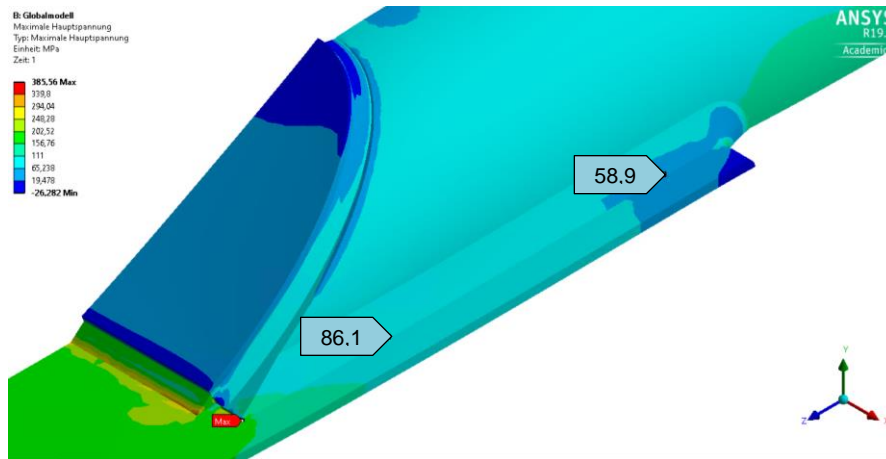


Abb. 6-28 Spannungen im Globalmodell auf der HV-Naht bei einer Knotenblechdicke von 10 mm am Versuchskörper 3, Maximum am Ende der HV-Naht

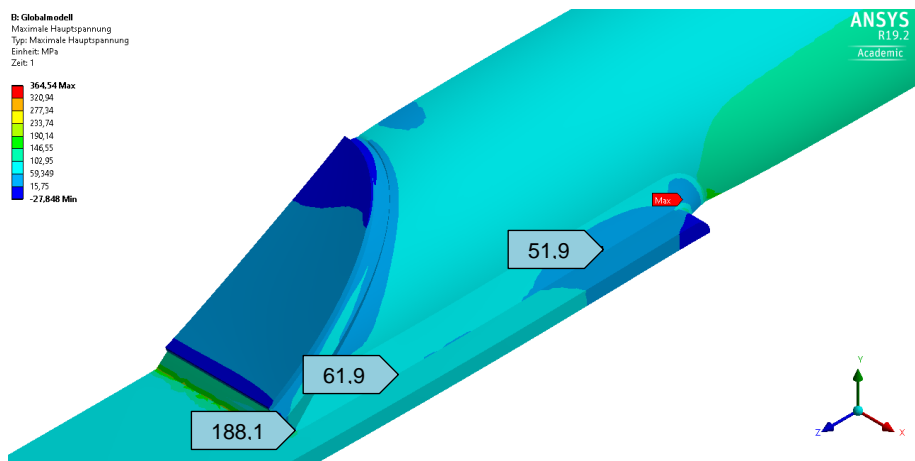


Abb. 6-29 Spannungen im Globalmodell auf der HV-Naht bei einer Knotenblechdicke von 20 mm am Versuchskörper 3, Maximum an der Schweißnahtwurzel der Umschweißung

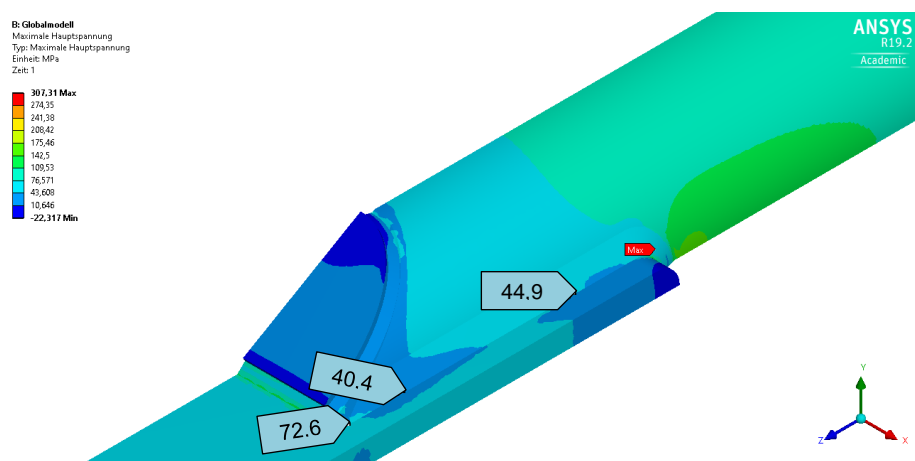


Abb. 6-30 Spannungen im Globalmodell auf der HV-Naht bei einer Knotenblechdicke von 40 mm am Versuchskörper 3, Maximum an der Schweißnahtwurzel der Umschweißung

Es ist zu erkennen, dass sowohl bei Versuchskörper 2 als auch bei Versuchskörper 3 ein Vergrößern der Knotenblechdicke zu einer Verbesserung des Kerbfaktors führt. Bei größeren Blechdicken des Knotenblechs steht mehr Fläche zur Kraftübertragung an der Knotenblechspitze zur Verfügung. Dadurch können sich die Spannungen verteilen, die Spannungsspitzen verringern sich. Auch bei kleineren Blechdicken des Knotenblechs ist sowohl für den Versuchskörper 2 als auch für den Versuchskörper 3 eine Reduzierung des Kerbfaktors zu erkennen, dies ist auf eine Umlagerung der Spannungen zum Schweißnahtende zurückzuführen. Daraus resultiert eine höhere Beanspruchung der Schweißnaht zwischen Deckel und Knotenblech. Bei großen Blechdicken ist keine Erhöhung der Spannungen am Ende der Schweißnähte zu erkennen, die Spannungen nehmen ab.

Zusammenfassung

Durch ein Vergrößern der Breite des Knotenblechs ist eine Steigerung des Kerbfaktors durch eine höhere Steifigkeit des Knotenblechs zu erkennen. Ein Abschrägen eines breiten Knotenblechs erbringt nur bei kleinen Winkeln unter 15° eine nennenswerte Verbesserung des Kerbfaktors. Den größten Effekt auf den Kerbfaktor zeigt die Ausnehmung des Knotenblechs. Eine Ausnehmung zeigt in jeder Geometrie eine Verbesserung gegenüber dem nicht ausgenommenen Knotenblech. Eine Ausnehmung in Form eines Halbmonds zeigt ab einem Radius von 66 mm eine Verbesserung gegenüber dem Versuchskörper 2. Die Form einer Ellipse zeigt die größten Verbesserungen im Kerbfaktor. Die Länge der Ellipse kann zusätzlich zur Breite verändert werden und eine größere Ausnehmung ist möglich. Im Vergleich zwischen einer Ausführung ohne eine Ausnehmung und mit einer Ausnehmung in Form einer Ellipse zeigt sich, dass eine Umlagerung der Spannungen zum Ende der Längsnähte stattfindet. Die Versuchskörper 2 und 3 zeigen bei der Ausnehmung des Knotenblechs ein ähnliches Verhalten. Bei einem Vergleich von Knotenblechspitzen zeigt sich eine abgerundete Spitze als vorteilhafter gegenüber einer gefasteten Spitze mit zwei 45° -Fasen. Jedoch ist der Effekt gering. Bei einer eckigen Knotenblechspitze sind die Modellierung und die Schweißnahtausführung durch die erschwerten Schweißbedingungen an der Umschweißung zu hinterfragen. Eine Veränderung der Knotenblechdicke zeigt geringe Verbesserungen auf. Eine kleinere Knotenblechdicke führt zu Umlagerungen von der Umschweißung der Knotenblechspitze an das Ende der Längsnaht. Bei größeren Blechdicken des Knotenblechs verringern sich die Spannungen am Ende der Längsnaht. Die Ergebnisse der untersuchten Parameter sind in Tab. 6-7 dargestellt.

Tab. 6-7 Ergebnisse der untersuchten Parameter des Knotenblechs,
mit Kerbfaktoren an der Umschweißung

Parameter	Abmessung	Kerbfaktor [-]	
		Versuchskörper 2	Versuchskörper 3
Breite	b = 210 mm	9,46	5,87
	b = 310 mm	9,91	-
Winkel (Flügel)	$\alpha = 0$	9,46	-
	$\alpha = 15$	9,82	-
	$\alpha = 90$	9,86	-
Ausnehmung	ohne	9,79	6,03
	r = 46 mm	9,73	-
	r = 56 mm	9,62	-
	r = 76 mm	6,85	-
	b = 112 mm l = 75 mm	9,46	5,82
	b = 112 mm l = 112 mm	9,07	-
	b = 112 mm l = 250 mm	8,27	4,98
	b = 132 mm l = 75 mm	8,91	-
Knotenblechspitze	gefast	9,46	
	rund	9,06	5,87
	eckig	8,79*	
Knotenblechdicke	$t_p = 10$ mm	9,17	5,61**
	$t_p = 20$ mm	9,46	5,87
	$t_p = 40$ mm	8,88	5,42

*nicht praxisnahe

**Maximum im Globalmodell am Ende der HV-Naht

6.5 Rohr

Abschrägung des Rohrs

In Abschnitt 6.2 zeigt sich, dass der Deckel einen positiven Einfluss auf den Kerbfaktor von Versuchskörper 3 hat. Der Effekt eines schrägen Deckels ist größer als der eines senkrechten Deckels des Versuchskörpers 2. Der Versuchskörper 3 wurde mit einem Deckel ausgeführt, welcher mit einem Winkel von 30° zur Rohrachse angebracht wurde. Bei einem Winkel der Abschrägung von 30° errechnet sich der Kerbfaktor an der Spitze des Knotenblechs im Submodell zu 5,87. Durch Variieren des Winkels verändert sich die Geometrie des Deckels, welche an die ellipsenförmige Abschrägung angepasst wurde. Es wurden Winkel von 15° bis 90° untersucht. Bei einer Abschrägung von 15° verläuft der Deckel bis auf Höhe der Knotenblechspitze, siehe Abb. 6-31 (unten). Ein Winkel von 90° entspricht dem Rohr und Deckel des

Versuchskörpers 2, der Unterschied zu Versuchsserie 2 ist die HV-Naht und die runde Knotenblechspitze.

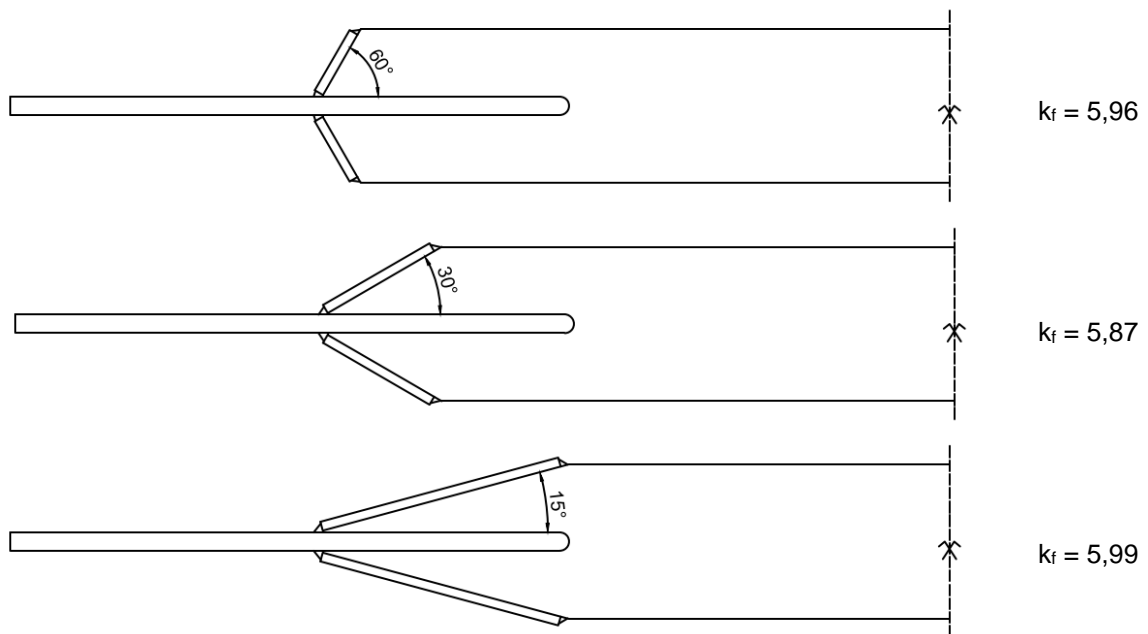


Abb. 6-31 Seitenansicht des Versuchskörpers 3 mit einem Abschrägungswinkel von 15° (unten), 30° (Mitte) und 60° (oben), mit Kerbfaktoren an der Umschweißung

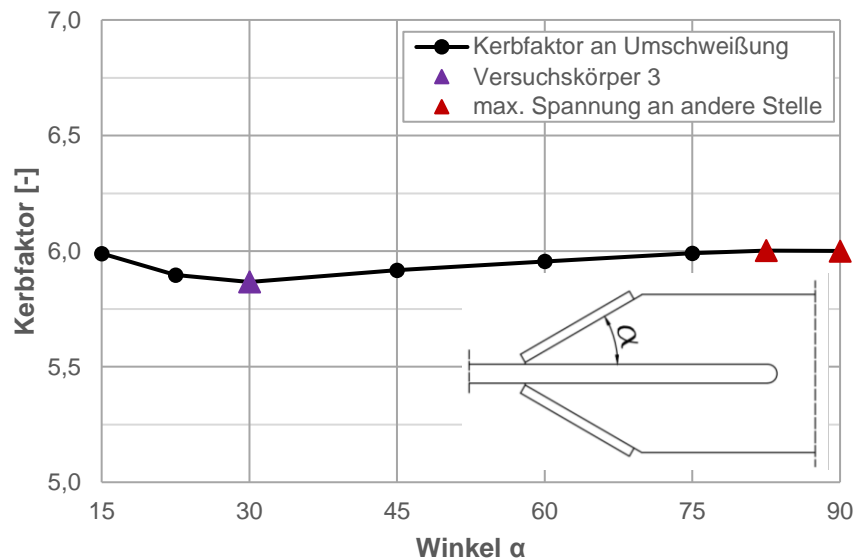


Abb. 6-32 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 3 an der Umschweißung bei unterschiedlichem Winkel der Abschrägung

In Abb. 6-32 sind die Ergebnisse des Versuchskörpers 3 bei einer Variation des Abschrägungswinkels des Rohrs zu erkennen. Dargestellt ist der Kerbfaktor in Abhängigkeit des

Winkels α . Bei einem größeren Winkel als 30° steigt der Kerbfaktor annähernd linear und nähert sich oberhalb von 75° dem Kerbfaktor von 6,00 an. Oberhalb eines Winkels von $82,5^\circ$ verändert sich der Kerbfaktor nur noch gering in der dritten Nachkommastelle. Bei einem Winkel von 90° sinkt der Kerbfaktor leicht, dabei wurde die Schweißnaht zwischen Deckel und Knotenblech aufgrund des Winkels an die Außenseite des Knotenblechs verschoben. Die Verschiebung der Schweißnaht zeigt aber nur eine sehr geringe Wirkung. Bei größer werdenden Winkeln erhöht sich die Steifigkeit des Rohrs, dadurch können höhere Spannungsspitzen entstehen. Ein Winkel unterhalb von 30° zeigt eine Erhöhung des Kerbfaktors. So wird bei einem Winkel von 15° ein Kerbfaktor von 5,99 errechnet. Bei kleiner werdenden Winkeln wird das Rohr durch die Abschrägung geschwächt. Es steht weniger Querschnitt für die Übertragung der Kräfte von Rohr zu Knotenblech zur Verfügung. So werden die Kräfte konzentrierter übertragen, die Spannungsspitze am Knotenblech erhöht sich. Es zeigt sich, dass der Winkel der Abschrägung nur einen geringen Einfluss auf den Kerbfaktor des Versuchskörpers 3 hat.

Die maximale Spannung im Globalmodell ist ab einem Winkel von $82,5^\circ$ an der umlaufenden Schweißnaht des Deckels am Knotenblech zu erkennen. In Abb. 6-33 und Abb. 6-34 sind die Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 bei einem Winkel von 30° und $82,5^\circ$ dargestellt. Im Vergleich der Spannungen auf der HV-Naht zeigt sich, dass das Ende der HV-Naht bei einem Winkel von $82,5^\circ$ höher beansprucht wird.

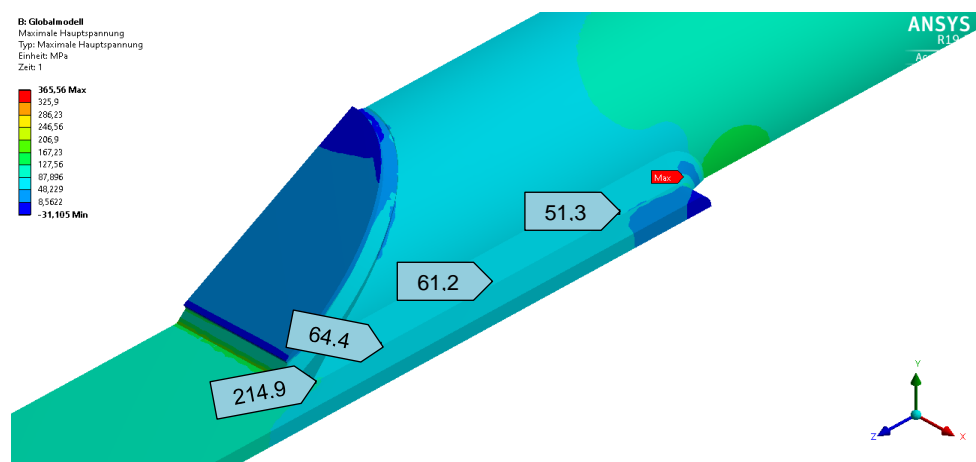


Abb. 6-33 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 bei einem Abschrägungswinkel von 30° , Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung

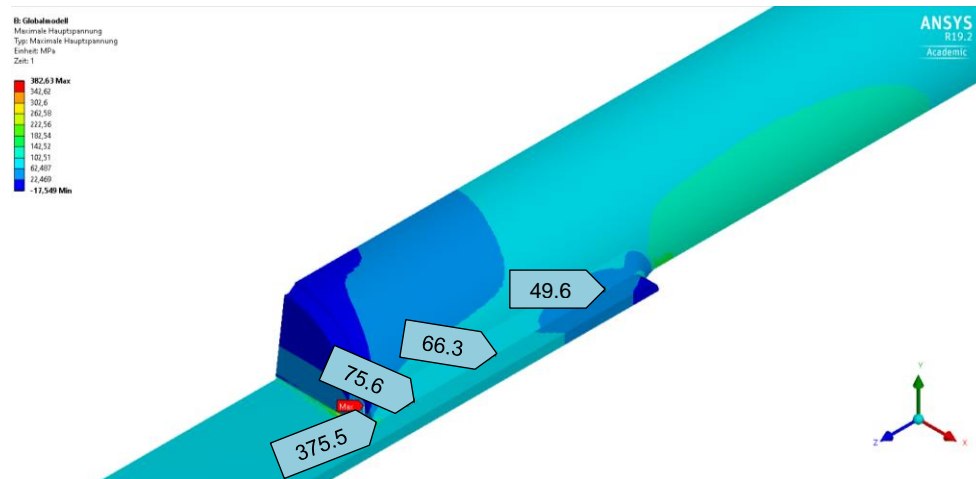


Abb. 6-34 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 bei einem Abschrägungswinkel von $82,5^\circ$, Maximum in der umlaufenden Kehlnaht des Deckels am Knotenblech

Für einen Vergleich des Einflusses des Winkels der Abschrägung wurde der Versuchskörper 2 untersucht. Die Winkel wurden zwischen 15° und 90° variiert.

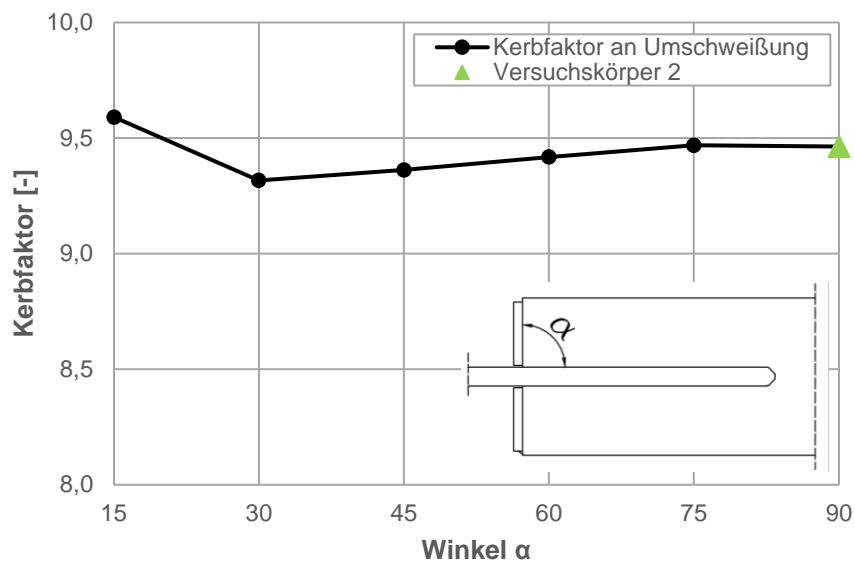


Abb. 6-35 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung bei unterschiedlichem Winkel der Abschrägung

Der Versuchskörper 2 wurde mit einem Abschrägungswinkel von 90° ausgeführt. Es errechnet sich eine Kerbfaktor von 9,46. In Abb. 6-35 sind die Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 bei unterschiedlichen Winkeln der Abschrägung zu erkennen. Bis zu einem Winkel von 30° sinkt der Kerbfaktor leicht auf einen Wert von 9,32. Unterhalb eines Winkels von 30° steigt der Kerbfaktor an, bis auf 9,59 bei einem Winkel von 15° . Es ist zu erkennen, dass der Winkel der Abschrägung auf Versuchskörper 2 einen geringen Einfluss hat.

Rohrwanddicke

Ein weiterer Einfluss, der untersucht wurde, ist die Dicke der Rohrwand. Dies wurde an den Versuchskörpern 2 und 3 untersucht. Es wurden typische Blechdicken, wie sie in der Fertigung vorkommen, untersucht. Dabei wurde der Parameter der Blechdicke des Rohrs verändert, Parameter wie Durchmesser des Rohrs oder die Ausnehmung im Knotenblech wurden beibehalten. Um den Kerbfaktor nach Gleichung (2.8) zu errechnen, wurde eine Nennspannung von 100 N/mm^2 im Rohrquerschnitt festgelegt. Die aufgebrachte Kraft, die auf ein Viertel des Querschnitts wirkt, wurde aus der Nennspannung und der jeweiligen Querschnittsfläche des Rohrs berechnet. Durch Variieren der Rohrwanddicke veränderte sich die Querschnittsfläche. Die auf das Modell aufgebrachte Kraft wurde in Tab. 6-8 nach Gleichung (5.1) berechnet. Die Werte bei einer Rohrwanddicke $t_t = 8 \text{ mm}$ entsprechen dem Versuchskörper 2 und 3.

Tab. 6-8 Rohrwanddicke, Rohrdurchmesser, Querschnittsfläche und aufgebrachte Kraft der Versuchskörper auf ein Viertel des Querschnitts

t_t [mm]	d_t [mm]	A_t [mm ²]	F [N]
4	168,3	2.064,7	51.616,4
5,6	168,3	2.862,4	71.559,2
6,3	168,3	3.206,3	80.157,7
8	168,3	4.028,8	100.719,5
10	168,3	4.973,1	124.328,5
12,5	168,3	6.118,3	152.956,3
14,2	168,3	6.874,5	171.862,4
16	168,3	7.655,4	191.385,8
20	168,3	9.318,0	232.949,1

Die Rohrwanddicke wurde für den Versuchskörper 2 untersucht. Es wurde die HY-Naht nach den Abmessungen der Makroschliffe verwendet. Die Abmessungen der Schweißnaht wurden bei den unterschiedlichen Rohrwanddicken beibehalten. Die Rohrwanddicke wurde ins Rohrinnere vergrößert, dabei wurde die Breite des Blechüberstands der HY-Naht größer. Die Kontaktfläche zwischen Rohr und Schweißnaht und Knotenblech und Schweißnaht blieb dabei konstant. Bei Rohrdicken kleiner als 8 mm wurde die Dicke der Schweißnaht beibehalten, diese wanderte aber weiter an das Rohräußere, da der Blechüberstand der HY-Naht durch die geringere Rohrwanddicke kleiner wurde.

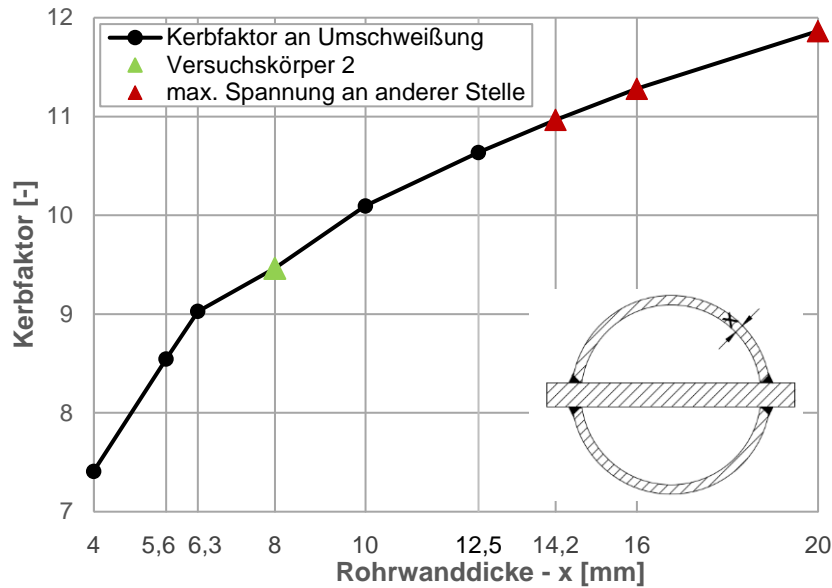


Abb. 6-36 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung bei unterschiedlichem Blechdicken des Rohrs

Für den Versuchskörper 2 errechnet sich bei einer Rohrwanddicke von $t_t = 8$ mm ein Kerbfaktor von 9,46. Wurde die Rohrwanddicke vergrößert, zeigt sich ein Anstieg des Kerbfaktors, siehe Abb. 6-36. Ein annähernd linearer Anstieg ist zu erkennen. Bei der größten untersuchten Rohrwanddicke von 20 mm ergibt sich ein Kerbfaktor von 11,87. Unterhalb einer Rohrwanddicke von $t_t = 8$ mm fällt der Kerbfaktor weiter ab. Bei einer Rohrwanddicke von 6,3 mm erreicht dieser einen Wert von 9,03. Wurde die Rohrwanddicke weiter verringert, fällt der Kerbfaktor steiler, bis auf einen Wert von 7,41 ab, bei einer Rohrwanddicke von 4 mm. Die Blechdicke der untersuchten Bauteile wird bei $r_{ref} = 1,0$ mm im DVS Merkblatt [2] zu $t = 10$ mm begrenzt. Grund dafür ist, dass bei kleinen Blechdicken der Referenzradius die Schweißnaht in zu großem Maße schwächt und höhere Kerbfaktoren berechnet werden können. Dieser Effekt ist an der Knotenblechspitze nicht zu erkennen. Es zeigt sich, dass bei einer kleiner werdenden Blechdicke ab 10 mm der Kerbfaktor stärker sinkt. Dies kann auf die Schwächung der Schweißnaht durch den Referenzradius nach DVS-Merkblatt 0905 [2] zurückzuführen sein. Dies wird jedoch nicht bestätigt, da sich bei der stichprobenartigen Überprüfung mit einer Anpassung des Referenzradius höhere Kerbfaktoren ergeben. Im Globalmodell verlagert sich die Stelle der maximalen Spannung ab einer Rohrwanddicke von 14,2 mm. Diese tritt am Ende des Schlitzes der Innenseite des Rohrs auf, siehe Abb. 6-37. In Abb. 6-38 und Abb. 6-39 sind die Spannungen des Globalmodells des Versuchskörpers 2 bei Rohrwanddicken von 20 mm und 40 mm zu erkennen. Im Vergleich der Rohrwanddicken zeigt sich, dass eine Umlagerung bei einer größeren Rohrwanddicke an das Ende der HY-Naht stattfindet.

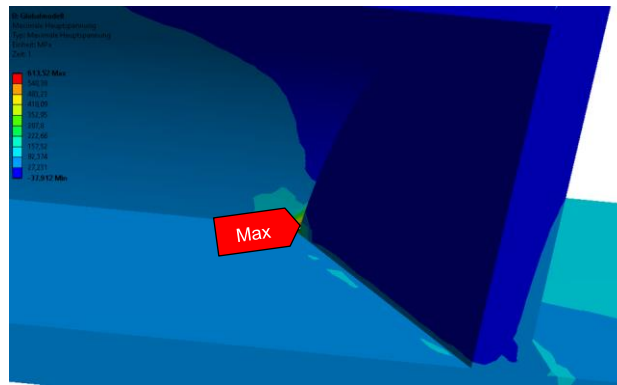


Abb. 6-37 Maximale Spannung des Versuchskörpers 2 im Globalmodell bei $t_t = 14,2$ mm an der Innenseite des Rohrendes

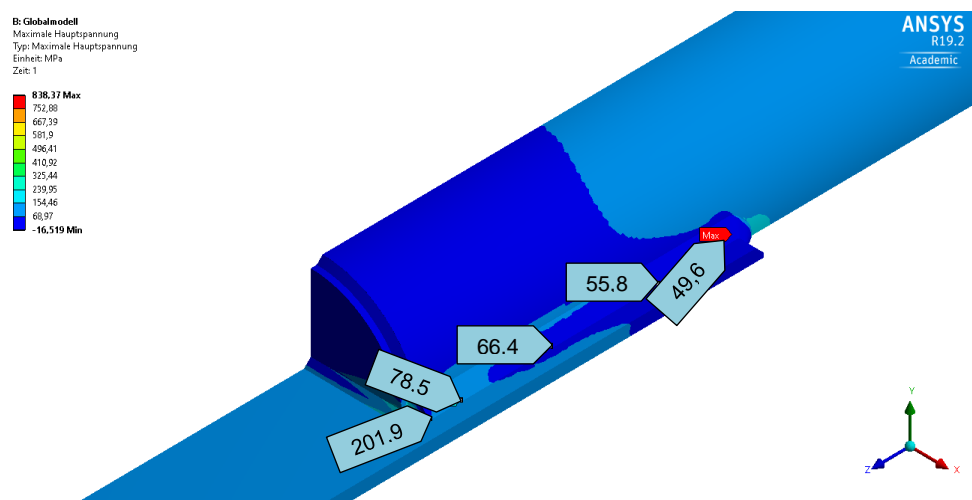


Abb. 6-38 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 bei einer Rohrwanddicke von $t_t = 8$ mm, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung

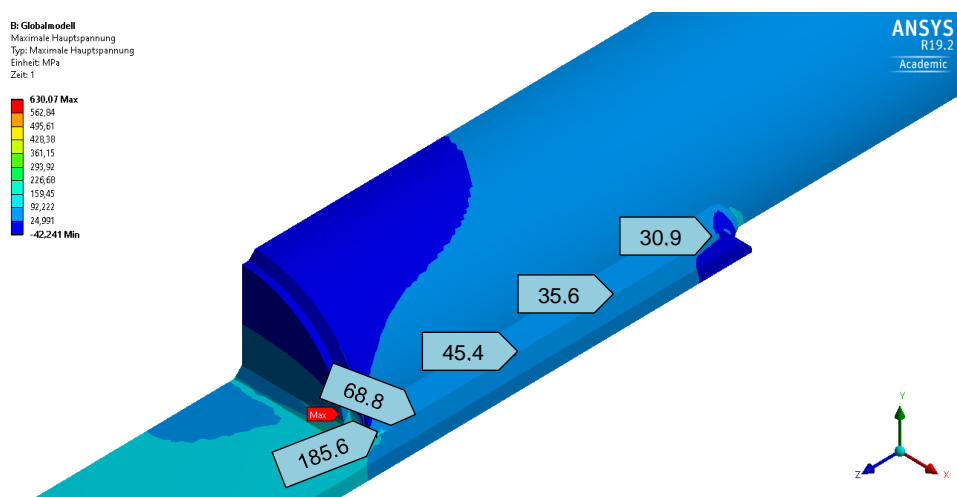


Abb. 6-39 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 bei einer Rohrwanddicke von $t_t = 20$ mm, Maximum am Ende des Rohrschlitzes an der Innenseite

Ein Vergleich zur HY-Naht wird mit der durchgeschweißten HV-Naht an Versuchskörper 3 geführt. Diese ist über die ganze Breite der Rohrwanddicke mit dem Knotenblech verbunden. Bei einer Vergrößerung der Rohrwanddicke vergrößert sich somit auch die Schweißnaht, mit der das Knotenblech mit dem Rohr verbunden ist. Untersucht wurden Rohrwanddicken zwischen 4 mm und 20 mm.

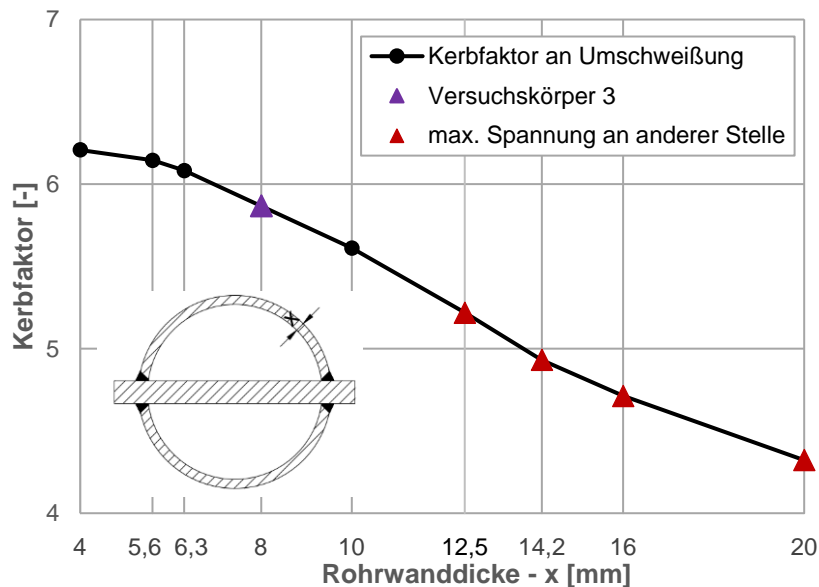


Abb. 6-40 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 3 an der Umschweißung bei unterschiedlichem Blechdicken des Rohrs

In Abb. 6-40 sind die Kerbfaktoren des Versuchskörpers 3 bei unterschiedlichen Rohrwanddicken dargestellt. Der Versuchskörper 3 weist einen Kerbfaktor von 5,87 auf. Bei einer Erhöhung der Rohrwanddicke auf 20 mm sinkt der Kerbfaktor auf 4,32 an der Umschweißung des Knotenblechs annähernd linear ab. Wird die Rohrwanddicke reduziert, steigt der Kerbfaktor auf einen Wert von 6,21 bei einer Rohrwanddicke von 4 mm. Oberhalb einer Rohrwanddicke von 12,5 mm tritt das Maximum der Spannungen im Globalmodell am Ende der HV-Naht am Übergang zur umlaufenden Kehlnaht des Deckels auf. In Abb. 6-41 und Abb. 6-42 sind die Spannungen des Globalmodells des Versuchskörpers 3 bei einer Rohrwanddicke von 8 mm und 20 mm zu sehen. Bei einem Vergleich der Spannungen auf der HV-Naht wird deutlich, dass eine Umlagerung der Spannungen bei einer Reduzierung der Rohrwanddicke zum Ende der Längsnaht stattfindet. Eine Erhöhung der Spannungen an der Kehlnaht zwischen Deckel und Knotenblech ist zu erkennen.

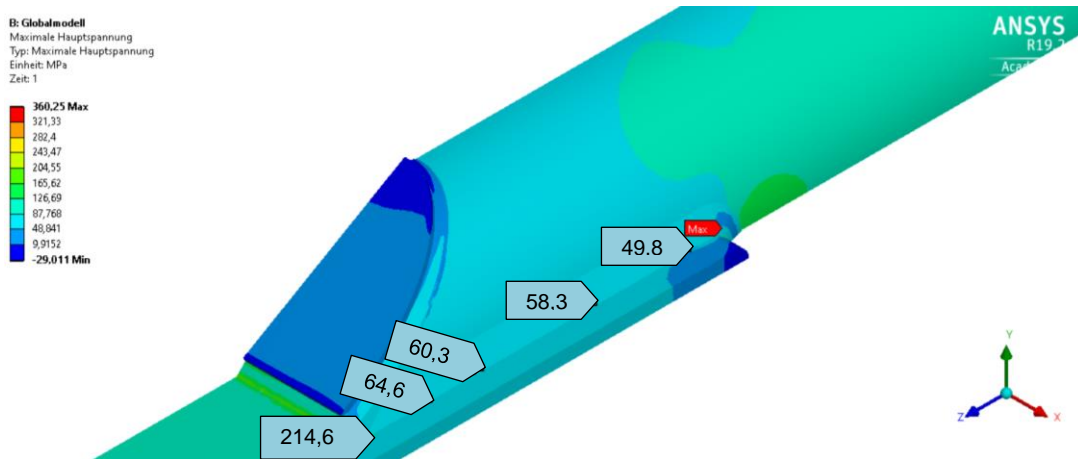


Abb. 6-41 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 bei einer Rohrwanddicke von $t_t = 8$ mm, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung

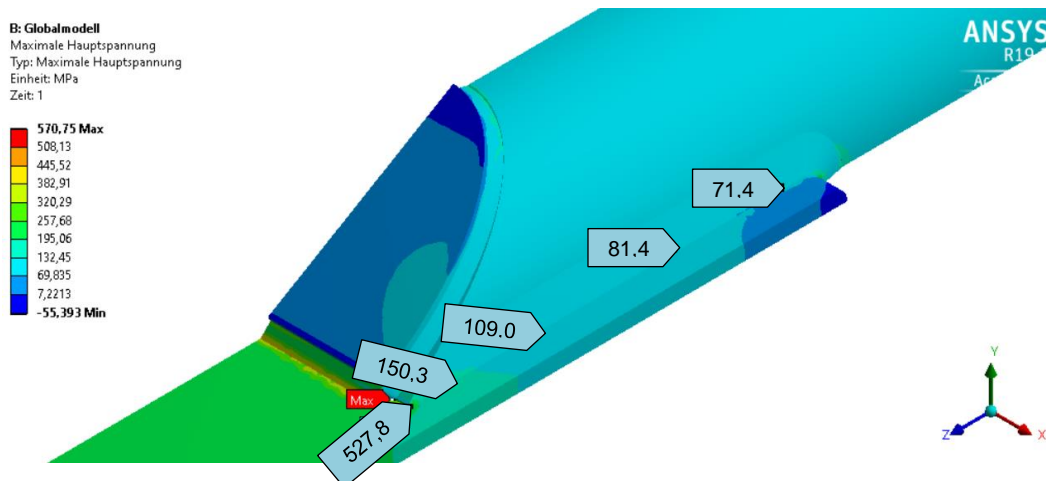


Abb. 6-42 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 bei einer Rohrwanddicke von $t_t = 20$ mm, Maximum in der umlaufenden Kehlnaht des Deckels am Knotenblech

Es zeigt sich, dass bei einer HY-Naht, bei welcher die Nahtdicke konstant gehalten und die Rohrwanddicke vergrößert wird, der Kerbfaktor ansteigt. Dies ist auf die größeren Steifigkeitsverhältnisse des Rohrs zurückzuführen. Durch die höhere Steifigkeit entstehen größere Spannungsspitzen, welche einen größeren Kerbfaktor hervorrufen. Der geringste Kerbfaktor von 7,41 wird bei einer Rohrwanddicke von 4 mm erreicht. Eine Verringerung der Kerbfaktoren bei größerer Rohrwanddicke wird nicht erreicht, da die Fläche zur Übertragung der Spannungen konstant bleibt. Grund dafür ist die konstante Dicke der HY-Naht. Bei einer Ausführung mit einer HV-Naht, die über die Rohrwanddicke durchgeschweißt ist, kann eine Reduzierung des Kerbfaktors bei einer Erhöhung der Rohrwanddicke erreicht werden. Dies ist auf die größere Übertragungsfläche zurückzuführen, bei welcher geringere Spannungsspitzen entstehen.

Rohrdurchmesser

Der Einfluss des Durchmessers des Rohrs auf den Kerbfaktor wurde an Versuchskörper 2 und 3 untersucht. Es wurden typische in der Fertigung verwendete Rohrdurchmesser ausgewählt. Die Durchmesser lagen zwischen 88,9 mm und 508 mm. Abmessungen wie Nahtdicke, Wanddicke des Rohrs und Knotenblechdicke wurden aus den Abmessungen der Versuchskörper 2 und 3 beibehalten. Die Größe des Deckels und die Breite des Knotenblechs wurden dem Durchmesser des Rohrs angepasst. Dabei wurde für die Breite des Knotenblechs ein äußerer Abstand zwischen Rohr und Ende des Knotenblechs von 20,85 mm beibehalten. Dieser war für die Fertigung der Schweißnaht und einen Toleranzausgleich notwendig. Die Breite der Ausnehmung des Knotenblechs wurde daran angepasst.

Bei Durchmessern ab einer Größe von 244,5 mm liegen am Ende des Rohrs an der Symmetrieebene die zur Berechnung des Kerbfaktors erforderliche Nennspannung von 100 N/mm² nicht an. Dies liegt am Verhältnis zwischen dem Durchmesser und der Länge des Rohrs, welches sich bei diesen Untersuchungen vergrößerte. Die Länge des Rohrs von 685 mm reicht dabei nicht aus, um die Spannungen gleichmäßig über den Rohrquerschnitt zu verteilen. So liegt am oberen Rohrende eine Spannung unter 100 N/mm² an und am unteren Ende des Rohrquerschnitts eine Spannung größer als 100 N/mm², siehe beispielsweise Abb. 6-43. Zur Untersuchung dieses Effekts wurde die Rohrlänge vergrößert, bei einer Länge von 1500 mm konnte eine gleichmäßige Nennspannung von 100 N/mm² im Rohrquerschnitt erreicht werden. Dabei gab es keine nennenswerte Veränderung des maximalen Kerbfaktors. Deshalb wurde die Verlängerung des Rohrs vernachlässigt.

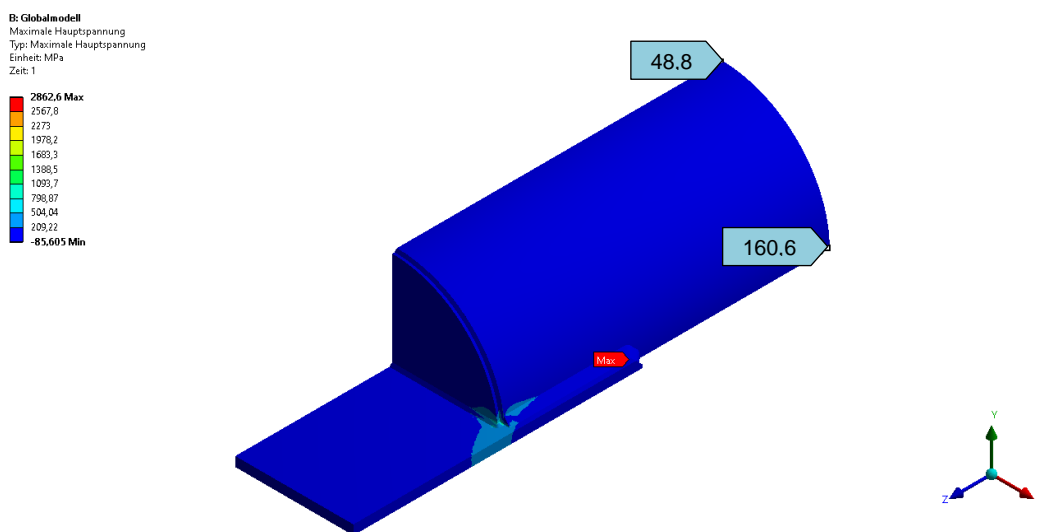


Abb. 6-43 Nennspannungen des Versuchskörpers 2 bei einem Rohrdurchmesser von 323,9 mm, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung

Da sich durch ein Verändern des Durchmessers die Querschnittsfläche veränderte hatte, wurde die aufgebrachte Kraft nach Gleichung (5.1) berechnet siehe Tab. 6-9. Durch diese stellt sich eine Nennspannung im Rohr von 100 N/mm² ein, die zur Berechnung des Kerbfaktors nach Gleichung (2.8) nötig ist.

Tab. 6-9 Rohrdurchmesser, Rohrwanddicke, Querschnittsfläche und aufgebrachte Kraft des Versuchskörpers 2 auf ein Viertel des Querschnitts

d_t [mm]	t_t [mm]	A_t [mm ²]	F [N]
88,9	8	2.033,2	50.831
114,3	8	2.671,6	66.790,3
168,3	8	4.028,8	100.719,5
193,7	8	4.667,2	116.678,8
244,5	8	5.943,9	148.597,3
323,9	8	7.939,4	198.485,8
406,4	8	10.012,9	250.322,1
508	8	12.566,4	314.159,3

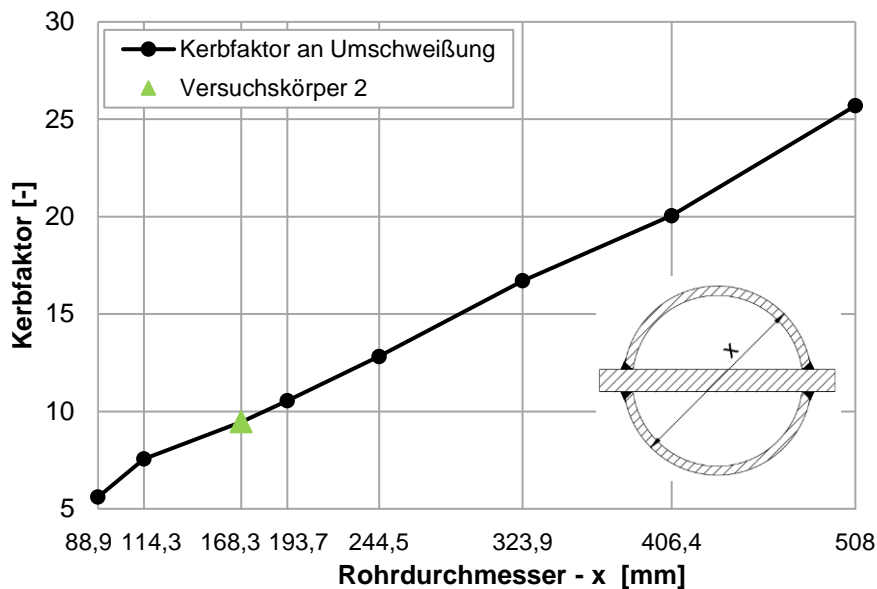


Abb. 6-44 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung bei unterschiedlichem Durchmesser des Rohrs

In Abb. 6-44 ist der Kerbfaktor des Versuchskörpers 2 in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers dargestellt. Für einen Rohrdurchmesser von 168,3 mm, welcher den Abmessungen der Versuchsserie 2 entspricht, errechnet sich ein Kerbfaktor von 9,46. Wird der Durchmesser des Rohrs erhöht, steigt der Kerbfaktor annähernd linear an. Bei einem Durchmesser von 508 mm erreicht der Kerbfaktor einen Wert von 25,69. Bei einer Verkleinerung des Durchmessers sinkt der Kerbfaktor annähernd linear. Bei einem Durchmesser von 88,9 mm sinkt der Kerbfaktor auf 5,60 und erreicht somit den niedrigsten Wert.

Für einen Vergleich wurde der Rohrdurchmesser an Versuchskörper 3 zwischen 88,9 mm und 508 mm variiert. Der Kerbfaktor des Versuchskörpers 3 an der Umschweißung ist in Abb. 6-45 dargestellt.

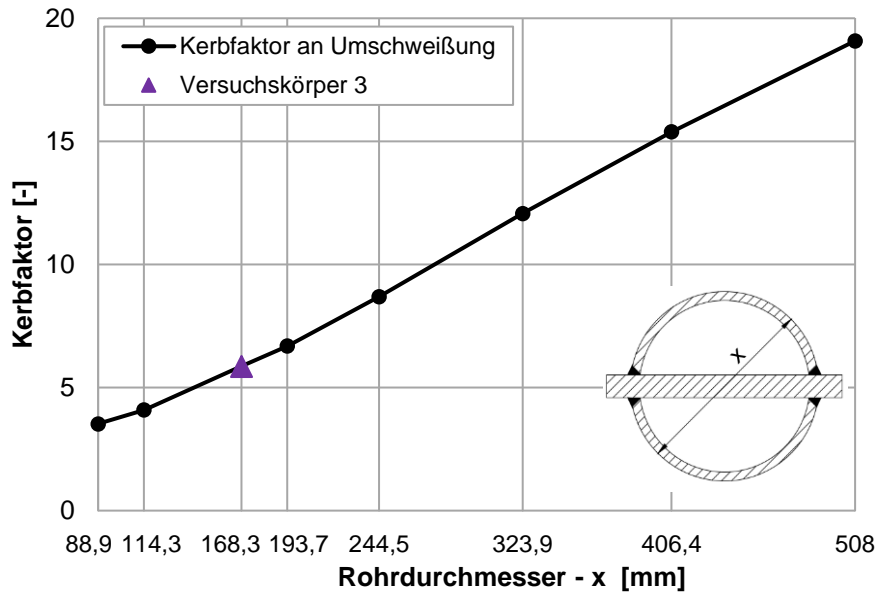


Abb. 6-45 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 3 an der Umschweißung bei unterschiedlichem Durchmessern des Rohrs

Der Versuchskörper 3 weist einen Kerbfaktor von 5,87 bei einem Durchmesser von 168,3 mm auf. Bei einer Erhöhung des Durchmessers auf 508 mm steigt der Kerbfaktor annähernd linear auf 19,09 an. Bei einer Reduzierung des Durchmessers sinkt der Kerbfaktor auf 3,53.

Es zeigt sich an den Versuchskörpern 2 und 3, dass der Kerbfaktor sich zum Rohrdurchmesser annähernd linear verhält. Er steigt bei einem größer werdenden Rohrdurchmesser an und fällt bei einem kleiner werdenden ab. Weitere Parameter wurden nicht verändert. In der Praxis verändern sich Parameter wie die Knotenblechdicke, der Rohrdurchmesser oder auch die Dicke der Schweißnaht. Es werden in Abschnitt 6.6 praxisnahe Beispiele untersucht.

Zusammenfassung

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass der Abschrägungswinkel des Rohrs bei einer Ausführung der Versuchskörper 2 und 3 einen geringen Einfluss auf den Kerbfaktor aufweist. Bei zunehmender Rohrwanddicke ist bei Versuchskörper 2 mit einer HY-Naht zu erkennen, dass der Kerbfaktor annähernd linear ansteigt, dies ist auf die gleichbleibende Nahtdicke und die größer werdenden Steifigkeitsverhältnisse zurückzuführen. Bei einer Ausführung in Form einer HV-Naht, wie in Versuchskörper 3, zeigt sich, dass bei einer Vergrößerung der Rohrwanddicke mehr Fläche zur Spannungsübertragung zur Verfügung steht und somit der Kerbfaktor annähernd linear sinkt. Wird der Durchmesser des Rohrs vergrößert ist ein deutlicher Anstieg des Kerbfaktors zu erkennen. Dieser verhält sich annähernd linear, bei einer Verkleinerung des Durchmessers sinkt der Kerbfaktor. Dies ist an Versuchskörper 2 und 3 zu erkennen. Die Ergebnisse der untersuchten Parameter des Rohrs sind in Tab. 6-10 zusammengefasst.

Tab. 6-10 Ergebnisse der untersuchten Parameter des Rohrs, mit Kerbfaktoren an der Umschweißung

Parameter	Abmessung	Kerbfaktor [-]	
		Versuchskörper 2	Versuchskörper 3
Winkel	$\alpha = 15^\circ$	9,59	5,99
	$\alpha = 30^\circ$	9,36	5,87
	$\alpha = 90^\circ$	9,46	6,00
Rohrwanddicke	$t_t = 4 \text{ mm}$	7,41	6,21
	$t_t = 8 \text{ mm}$	9,46	5,87
	$t_t = 20 \text{ mm}$	11,87*	4,32**
Durchmesser	$d_t = 88,9$	5,60	3,53
	$d_t = 168,3$	9,46	5,87
	$d_t = 508$	25,69	19,09

*Maximum im Globalmodell am Ende des Rohrschlitzes an der Innenseite

**Maximum im Globalmodell in der umlaufenden Kehlnaht des Deckels am Knotenblech

6.6 FE-Untersuchungen an praxisnahen Beispielen

In der Praxis werden nicht nur einzelne Parameter des Anschlusses angepasst, sondern mehrere. Im Folgenden werden praxisnahe Beispiele untersucht.

Für einen Vergleich wurden die Abmessungen der Versuchskörper 2 und 3 an die Abmessungen der Beispiele aus der Praxis angepasst. Die restlichen Eigenschaften der Versuchskörper wurden beibehalten. Verändert wurden der Rohrdurchmesser, die Rohrwalldicke, Knotenblechdicke und die Schweißnahtdicke. Außerdem wurde die Breite des Knotenblechs an den Durchmesser angepasst. Der Überstand des Knotenblechs von 20,85 mm wurde dabei immer eingehalten, aus diesem wurde die Breite des Knotenblechs berechnet. Die Breite der Ausnehmung des Knotenblechs wurde an die Breite des Knotenblechs angepasst und dementsprechend skaliert. Oberhalb der Abmessungen des Rohrdurchmessers von 273 mm konnten die erforderlichen Nennspannungen im Rohrquerschnitt von 100 N/mm² nicht gleichmäßig erreicht werden. Eine Untersuchung zeigte, dass bei einer Verlängerung des Rohrs die Nennspannung erreicht werden konnte, sich aber der Kerbfaktor nicht maßgebend veränderte. Deshalb wurde dies vernachlässigt. Um die praxisnahen Abmessungen der Schweißnähte für Versuchskörper 2 modellieren zu können, wurde der Blechüberstand der HY-Naht auf die Hälfte der Rohrwalldicke festgelegt. Die Abmessungen der praxisnahen Beispiele sind in Tab. 6-11 aufgelistet. Es wurden Rohrdurchmesser zwischen 88,9 mm und 457 mm untersucht. Bei einer Vergrößerung des Durchmessers wurde in den Beispielen die Rohrwalldicke vergrößert, diese nahmen Werte zwischen 5 mm und 20 mm an. Beim größten Durchmesser von 457 mm wurde eine kleinere Rohrwalldicke von 16 mm verwendet, im Vergleich zum Rohrdurchmesser von 406 mm, bei dem eine Rohrwalldicke von 20 mm verwendet wurde. Die Blechdicke des Knotenblechs wurde bei einem größeren Durchmesser erhöht. Es wurden Blechdicken zwischen 15 mm und 40 mm verwendet. Bei einem Rohrdurchmesser von 193,7 mm wurde

im Vergleich zu einem Rohrdurchmesser von 168,3 mm eine kleinere Knotenblechblechdicke verwendet. Die Schweißnahtdicken stiegen mit der Dimension des Anschlusses, die Schweißnähte der Beispiele wiesen eine Dicke zwischen 4 mm und 16 mm auf.

Die Abmessungen des Durchmessers 168,3 mm entsprechen denen der Versuchskörper 2 und 3. Die Schweißnaht der Versuchskörper 2 und 3 wurden, um eine Vergleichbarkeit zu erlangen, nach theoretischen Abmessungen modelliert. Der Rohrdurchmesser von 88,9 mm wies die Abmessungen aus den Untersuchungen von Zirn [24] auf. Aus den Untersuchungen von Baptista [16] wurden die Abmessungen des Anschlusses mit einem Durchmesser von 114,3 mm übernommen. Es konnten keine Angaben zu den Abmessungen der Schweißnaht recherchiert werden, deshalb wurde eine Annahme von $a_w = 6$ mm getroffen.

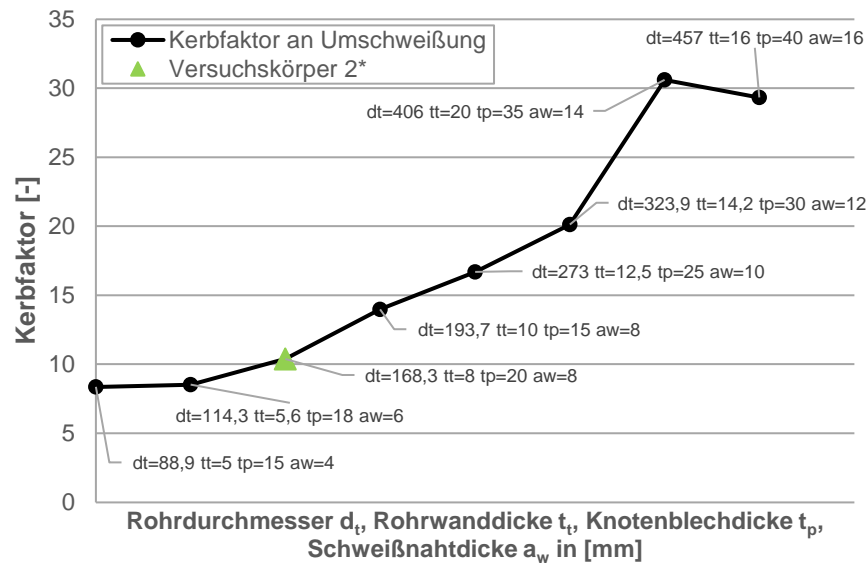
Aufgrund der unterschiedlichen Durchmesser und Rohrwanddicken musste die aufgebrachte Kraft angepasst werden um eine Nennspannung im Rohrquerschnitt von 100 N/mm^2 zu erreichen. Dabei wurde die Querschnittsfläche des Rohrs berechnet und nach Gleichung (5.1) die Kraft auf ein Viertel des Querschnitts, siehe Tab. 6-11.

Tab. 6-11 Abmessungen der praxisnahen Beispiele

d_t [mm]	t_t [mm ²]	t_p [mm]	a_w [mm]	A_t [mm ²]	F [N]
88,9	5	15	4	1.317,9	32.947,5
114,3	5,6	18	6*	1.912,4	47.808,8
168,3	8	20	8	4.028,8	100.719,5
193,7	10	15	8	5.771,1	144.277,6
273	12,5	25	10	10.229,8	255.745,3
323,9	14,2	30	12	13.815,9	345.397,7
406	20	35	14	24.253,1	606.327,4
457	16	40	16	22.167,1	554.176,9

*Annahme

Versuchskörper 2



* HY-Naht wurde nach theoretischen Abmessungen modelliert

Abb. 6-46 Kerbfaktoren der praxisnahen Beispiele an der Umschweißung anhand des Versuchskörpers 2

In Abb. 6-46 ist der Kerbfaktor der praxisnahen Beispiele des Versuchskörpers 2 dargestellt. Es zeigt sich, dass bei einer Vergrößerung der Abmessungen die praxisnahen Beispiele einen höheren Kerbfaktor aufweisen. Es errechnet sich ein Kerbfaktor von 8,36 für den Anschluss mit einem Durchmesser von 88,9 mm. Bei zunehmenden Abmessungen zeigt sich ein Anstieg des Kerbfaktors. Bei einem Durchmesser von 406 mm wird ein Kerbfaktor von 30,6 berechnet. Bei einem Rohrdurchmesser von 457 mm fällt der Kerbfaktor auf 29,33. Durch eine geringere Rohrwanddicke von 16 mm verliert dieser an Steifigkeit, was zu einer geringeren Spannungs-konzentration und damit zu einem kleineren Kerbfaktor führt. Es lässt sich erkennen, dass zwischen einer Ausführung mit einem Durchmesser von 88,9 mm und einem Durchmesser von 114,3 mm nur ein geringer Unterschied im Kerbfaktor liegt. Beide Anschlüsse wurden mit ähnlichen Rohrwanddicken und Knotenblechdicken modelliert. Bei einem Vergleich der Ausführungen mit einem Durchmesser von 168,3 mm und 193,7 mm, bei denen die Blechdicke des Knotenblechs von 20 mm auf 15 mm verkleinert wurde, ist zu erkennen, dass dies auf den Kerbfaktor wenig Einfluss hat, dieser steigt weiter an.

Versuchskörper 3

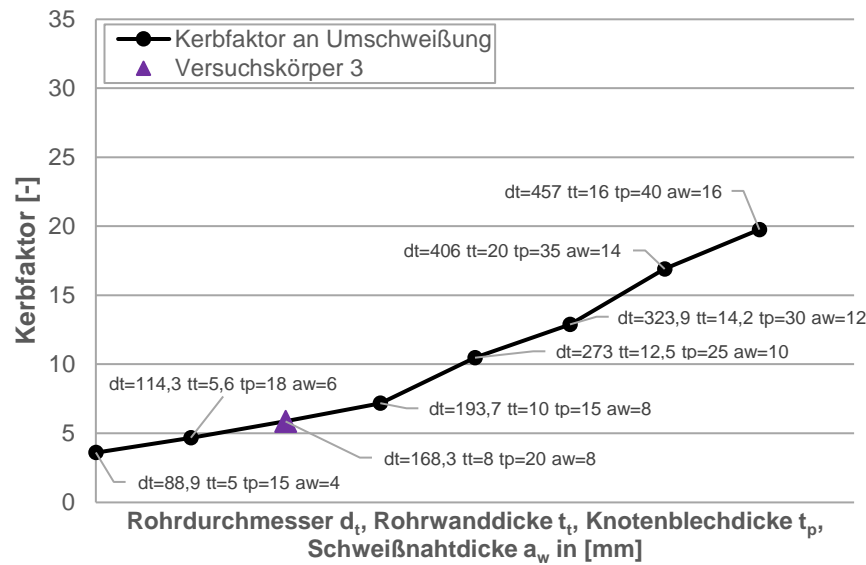


Abb. 6-47 Kerbfaktoren der praxisnahen Beispiele an der Umschweißung anhand des Versuchskörpers 3

Die Abmessungen der praxisnahen Beispiele wurden am Versuchskörper 3 untersucht. Der Kerbfaktor der praxisnahen Beispiele ist in Abb. 6-47 veranschaulicht. Es ist zu erkennen, dass bei zunehmenden Abmessungen der Kerbfaktor des Versuchskörpers steigt. Bei den Abmessungen nach Zirn [24] mit dem Rohrdurchmesser von 88,9 mm errechnet sich ein Kerbfaktor von 3,6. Bis zu einem Rohrdurchmesser von 193,7 mm steigt der Kerbfaktor annähernd linear bis 7,17 an. Bei größer werdenden Abmessungen ist ein größerer Anstieg zu erkennen. Die Abmessungen des Durchmessers 457 mm weisen den größten Kerbfaktor von 19,76 auf. Ein Vergleich zwischen den Ausführungen der Durchmesser von 168,3 mm und 193,7 mm zeigt, dass eine Verkleinerung der Blechdicke des Knotenblechs wenig Einfluss auf den Kerbfaktor hat.

Vergleich der Versuchskörper 2 und 3

Um eine Aussage über den Größeneinfluss machen zu können wird im Folgenden ein Vergleich zwischen den praxisnahen Beispielen des Versuchskörpers 2 und des Versuchskörpers 3 gemacht. Um einen Vergleich der Kerbfaktoren möglich zu machen, wird der Faktor g_f eingeführt, der die Skalierung im Vergleich zum Kerbfaktor der Versuchskörper 2 und 3 angibt, dieser wird nach Gleichung (6.1) berechnet.

$$g_f = \frac{k_{f,d}}{k_{f,168,3}} \quad (6.1)$$

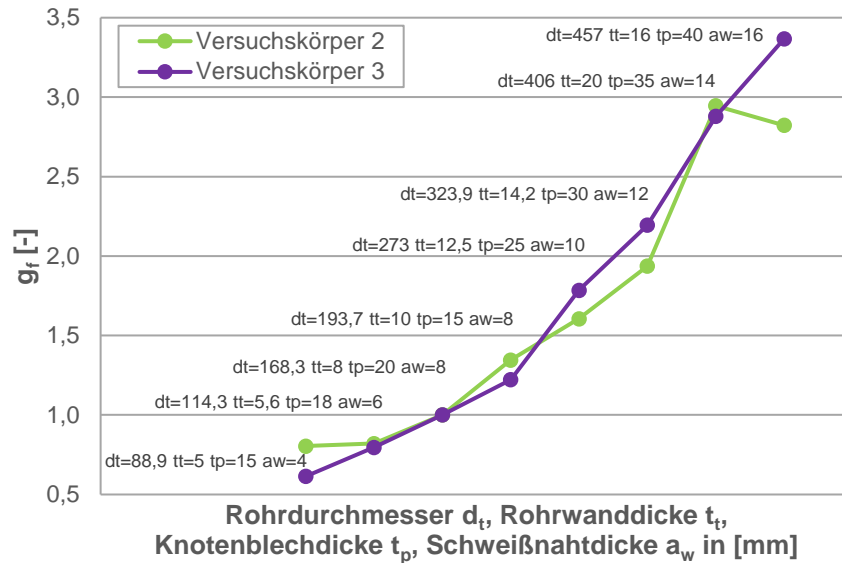


Abb. 6-48 Vergleich der praxisnahen Beispiele von Versuchskörper 2 und 3

In Abb. 6-48 ist der Faktor g_f des Größeneinflusses der Versuchskörper 2 und 3 veranschaulicht. Für die Abmessungen der Versuchskörper 2 und 3 nimmt dieser den Wert 1,0 an. Bei einer Reduzierung der Abmessungen sinken die Faktoren der Versuchskörper. Bei einer Vergrößerung der Abmessungen steigt der Faktor. Es ist bei beiden Versuchskörpern ein exponentieller Anstieg zu erkennen.

Zusammenfassung

Sowohl bei Versuchskörper 2 als auch bei Versuchskörper 3, ist zu erkennen, dass bei zunehmenden Abmessungen wie Schweißnahtdicke, Knotenblechdicke, Rohrdurchmesser und Rohrwanddicke der Kerbfaktor ansteigt. Bei Versuchskörper 2 ist ein stärkerer Anstieg des Kerbfaktors zu beobachten als bei Versuchskörper 3. Der Abfall des Kerbfaktors des Versuchskörpers 2 oberhalb eines Durchmessers von 406 mm ist bei Versuchskörper 3 nicht zu erkennen. Im Vergleich der Versuchskörper zeigt sich ein exponentieller Zusammenhang zwischen den Abmessungen und des Kerbfaktors.

Tab. 6-12 Ergebnisse der untersuchten Parameter der praxisnahen Beispiele, mit Kerbfaktor an der Umschweißung

Abmessung [mm]				Kerbfaktor [-]	
d _t	t _t	t _p	a _w	Versuchskörper 2	Versuchskörper 3
88,9	5	15	4	8,36	3,60
168,3	8	20	8	10,39*	5,87
457	16	40	16	29,33	19,76

* HY-Naht wurde nach theoretischen Abmessungen modelliert

7 Ausführungsvorschlag

Im Folgenden wird ein Ausführungsvorschlag unterbreitet welcher als Grundlage für die Planungshilfen der Richtlinie für Ingenieurbauten (RE-ING) [5] der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) dienen soll. In dieser sind verschiedene Planungshilfen für Ingenieurbauten dargestellt. Sie umfasst Konstruktionsdetails für Querrahmen von Verbundbrücken mit Diagonalabstützung der Fahrbahnplatte.

Im Ausführungsvorschlag in Abb. 7-1 wird ein einzelnes Detail für die Planungshilfen dargestellt. Ein unterer Anschluss einer Abstützung der Fahrbahnplatte ist illustriert. Dieser ist in drei Kerbfälle in Abhängigkeit der Schweißnaht aufgeteilt. Für eine Ausführung mit einer HV-Naht und einer runden Knotenblechspitze wird ein Kerbfall von 56 empfohlen. Die HV-Naht wird mit einer innenliegenden Schweißbadsicherung in Form einer Rundkeramik ausgeführt. Eine HY-Naht wird mit einem Kerbfall von 50 empfohlen. Diese hat eine Knotenblechspitze, welche mit zwei 45°-Fasen versehen ist, die ein Drittel der Knotenblechdicke einnehmen. Um ein Eindringen des Schweißguts ins Rohrinne zu verhindern, wird ein 2 mm großer Blechüberstand der HY-Naht verwendet. Wird der gesamte Anschluss mit Kehlnähten ausgeführt, wird ein Kerbfall von 36 angegeben. Die Kerbfälle wurden aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen nach [21] entnommen.

Der Deckel des Anschlusses, welcher das Eindringen von Wasser verhindern soll, kann gerade oder schräg ausgeführt werden. Bei einer Ausführung mit HV-Naht ist eine Zugänglichkeit der Rohrinne für die Schweißbadsicherung und die Überprüfung der Schweißnaht notwendig. Dies kann durch einen schrägen Deckel erfolgen. Dadurch muss die HV-Längsnaht an Knotenblech und Rohr zuerst geschweißt werden. Im Anschluss der Nahtprüfung kann der Deckel mit Kehlnähten aufgeschweißt werden. Für eine Ausführung mit HY-Naht und einer einfacheren Fertigung wird ein gerades Rohrende empfohlen, auf welches der Deckel aufgeschweißt wird. Dies kann bereits im Werk geschehen, da keine Überprüfung der HY-Naht stattfinden muss.

Für ein elastischeres Verhalten des Knotenblechs sollte dieses mit einer Ausnehmung versehen werden, dies kann parabel-/halbkreisförmig oder ellipsenförmig ausgeführt werden. Die Breite des Knotenblechs ist möglichst schmal auszuführen und es muss keine Steigung besitzen. Die maßgebende Stelle für das Ermüdungsverhalten befindet sich an der Knotenblechspitze. Der Anschluss kann sowohl als unterer als auch oberer Anschluss Verwendung finden.

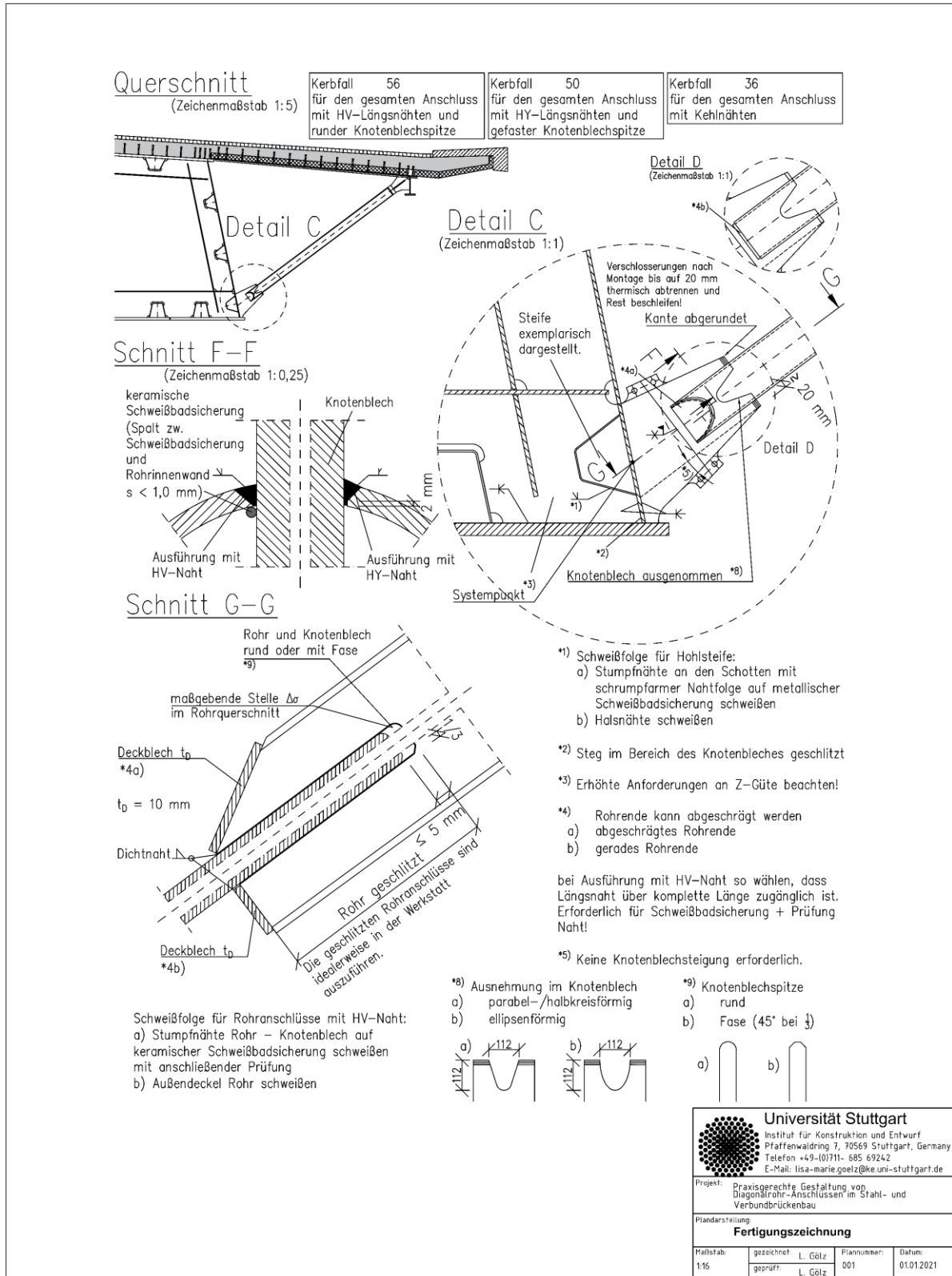


Abb. 7-1 Fertigungszeichnung für den Ausführungsvorschlag zur RE-ING [5, 21]

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden Diagonalrohr-Anschlüsse untersucht, die in großformatigen Stahl- und Verbundbrücken zur Aussteifung und Abstützung der Fahrbahnplatte genutzt werden. Diese stehen häufig unter großer Ermüdungsbeanspruchung. Im ersten Abschnitt der Arbeit wurde auf den Stand der Technik und die Grundlagen eingegangen. Dabei wurde das Thema Ermüdung, dazugehörige Nachweiskonzepte und die normative Situation behandelt. Bisher durchgeführte Untersuchungen zu Diagonalrohr-Anschlüssen wurden zusammengestellt. Diese beinhalten sowohl experimentelle als auch numerische Untersuchungen. Es wurden die experimentellen und numerischen Untersuchungen des AiF-DASt Forschungsvorhabens [21] zu Diagonalrohr-Anschlüssen vorgestellt. Im Laufe des Forschungsvorhabens wurden drei Versuchskörpervarianten mit jeweils acht Ermüdungsversuchen an der Materialprüfanstalt der Universität Stuttgart untersucht. Die an den Versuchskörperserien 1, 2 und 3 durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden beschrieben und deren Ergebnisse aufgezeigt. Es wurde auf die resultierende Wöhlerlinie und die bruchmechanischen Untersuchungen der Versuchskörper eingegangen. Die durchgeführten numerischen Untersuchungen im Laufe des Forschungsvorhabens in [22] am Versuchskörper 1 wurden beschrieben und tabellarisch zusammengefasst, siehe Tab. 4-2.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen an den Versuchskörpern 2 und 3 wurden im Hauptteil beschrieben. Der Versuchskörper 2 bestand aus einem geschlitzten Rohr, in welches ein Knotenblech eingeschoben und mittels einer HY-Naht verschweißt war. Für eine praxisorientiert Ausführung hatte die Knotenblechspitze eine 45°-Fase. Am Ende des Rohrs war ein gerader Deckel aufgeschweißt. Der Versuchskörper 3 hatte eine HV-Naht und einem schrägen Deckel. Das Knotenblech wurde für eine ermüdungsarme Ausführung mit einer runden Knotenblechspitze versehen. Die zur Modellierung der Schweißnähte notwendigen Abmessungen wurden anhand der angefertigten Makroschliffe der experimentellen Untersuchungen der Versuchsserie 2 und 3 analysiert. Die Modellierung, die verwendeten Materialeigenschaften und die Ausbildung der Kerben wurden aufgezeigt. Eine Sensitivitätsanalyse wurde an den Modellen der Versuchskörper 2 und 3 jeweils für das Globalmodell und das Submodell durchgeführt und eine passende Elementgröße festgelegt. Zur Validierung der verwendeten Methoden des Finite-Elemente-Modells wurde eine Gegenüberstellung mit einem Vergleichsmodell nach Radaj [13] durchgeführt. Anhand der angebrachten Dehnmessstreifen der experimentellen Untersuchungen wurden die Spannungen an der Knotenblechspitze berechnet und mit den Spannungen an den numerischen Modellen verglichen. Die Stelle der maximalen Spannung der Modelle wurde mit den Bruchanalysen der experimentellen Untersuchungen verglichen.

Zur Untersuchung der Einflussgrößen auf die Ermüdungsfestigkeit wurde eine Parameterstudie durchgeführt, bei dieser wurde der Kerbfaktor ausgewertet.

Die Ausführung mit einem Deckel des Versuchskörpers 2 beeinflusste den Kerbfaktor gering. Für den Versuchskörper 3 konnte ein größerer Einfluss festgestellt werden, der Deckel wurde in einem Winkel von 30° angebracht und ermöglichte einen besseren Kraftfluss. Eine Ausführung mit einem Deckel hatte einen geringen positiven Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit.

Die wenig erfasste Schweißnahtwurzel der HY-Naht an der Umschweißung zeigte wenig Einfluss im Vergleich zu einer praxisnah erfassten Schweißnaht. Eine Untersuchung des Blechüberstands der HY-Naht an Versuchskörper 2 zeigte nur einen geringen Einfluss auf den

Kerbfaktor. Die fehlende Schweißbadsicherung der HV-Naht an der Umschweißung des Versuchskörpers 3 hatte großen Einfluss auf die maximale Kerbspannung. Es zeigte sich, dass bei einer fehlenden Schweißbadsicherung an der Umschweißung die maximale Kerbspannung geringer war als bei einer durchgängig anliegenden Schweißbadsicherung. Eine Ausführung ohne Schweißbadsicherung über die gesamte Länge zeigte nur einen geringen Einfluss auf den Kerbfaktor. Die Nahtwurzel der Umschweißung erwies sich als maßgebende Stelle. Ein Vergleich der Schweißnähte HV-Naht, HY-Naht und Kehlnaht wurden sowohl am Versuchskörper 2 als auch am Versuchskörper 3 durchgeführt. Es zeigte sich, dass eine Ausführung mit einer HV-Naht und fehlender Schweißbadsicherung an der Umschweißung des Knotenblechs den geringsten Kerbfaktor erbrachte. Die HY-Naht und die Kehlnaht wiesen einen schlechteren Kerbfaktor auf, der sich jeweils nur gering unterschied. Außerdem wurde bei einem Vergleich zwischen schrägem und geradem Deckel deutlich, dass dieser nur wenig Einfluss auf den Kerbfaktor hatte.

Ein breiteres Knotenblech führte zu höheren Kerbfaktoren, ein Abschrägen des Knotenblechs erbrachte nur bei kleinen Winkeln unter 15° eine merkliche Verbesserung. Der geringste Kerbfaktor konnte mit einem möglichst schmalen Knotenblech erreicht werden. Die Ausnehmung des Knotenblechs zeigte sich als effizientes Mittel den Kerbfaktor zu verringern. Eine Ausführung ohne eine Ausnehmung erbrachte Verschlechterungen im Vergleich zu den Ausführungen der Versuchskörper 2 und 3. Bei einer Ausnehmung in Form eines Halbmonds konnten Verbesserungen erreicht werden. Dieser war aber an den Innenradius des Rohrs gebunden, ebenfalls mussten Toleranz- und Schweißabstände zu diesem eingehalten werden. Eine Ausnehmung in Form einer Ellipse, die in Länge und Breite angepasst werden konnte, zeigte sich als geeigneter. So erbrachte eine Ellipse, die die Mindestabstände zum Deckel und zum Innenradius des Rohrs einhielt, die größte Verbesserung. Dies konnte sowohl für Versuchskörper 2 als auch für Versuchskörper 3 nachgewiesen werden. Eine runde Knotenblechspitze zeigte sich als vorteilhafter gegenüber einer 45° gefasteten. Bei einer eckigen Spitze des Knotenblechs wurde ein besserer Kerbfaktor berechnet. Die Modellierung der Schweißnaht ist dabei aber zu hinterfragen. In der Praxis kann an den Ecken der Knotenblechspitze wenig Schweißgut ins Innere eindringen, diese Stelle ist für die Ermüdungsfestigkeit der Anschlüsse von hoher Relevanz. Bei einer Vergrößerung der Blechdicke des Knotenblechs wiesen sowohl Versuchskörper 2 als auch Versuchskörper 3 geringere Kerbfaktoren auf, was an der größeren Fläche zur Spannungsübertragung an der Spitze lag. Bei einer Reduzierung der Knotenblechdicke war ein geringerer Kerbfaktor zu beobachten, es fand eine Umlagerung zum Ende der Längsnaht statt.

Der Versuchskörper 3 wurde mit einem 30° abgeschrägten Deckel ausgeführt. Bei einer Variation des Winkels zwischen 15° und 90° konnte keine nennenswerte Veränderung des Kerbfaktors bei Versuchskörper 2 und 3 erkannt werden. Bei einer Vergrößerung der Rohrwanddicke bei Versuchskörper 2 und der HY-Naht erhöhte sich der Kerbfaktor bei gleichbleibender Schweißnahtdicke annähernd konstant. Bei einer Verkleinerung sank der Kerbfaktor im größeren Maße ab. Dies ist auf die höheren Steifigkeitsverhältnisse zurückzuführen. Ein Vergleich mit Versuchskörper 3, der mit einer durchgeschweißten HV-Naht ausgeführt wurde zeigte, dass der Kerbfaktor bei einer Vergrößerung der Rohrwanddicke abnahm. Dies war auf die größere Übertragungsfläche der HV-Naht zurückzuführen, die bei einer Vergrößerung der Rohrwanddicke anstieg. Bei einer Veränderung des Durchmessers war eine lineare

Beziehung zwischen Durchmesser und Kerbfaktor zu erkennen. Bei einer Vergrößerung des Durchmessers stieg der Kerbfaktor, bei einer Verkleinerung sank er.

Ein Vergleich praxisnaher Beispiele an Versuchskörper 2 und 3 zeigte, dass bei größer werdenden Abmessungen wie Knotenblechdicke, Schweißnahtdicke, Rohrdurchmesser und Rohrwanddicke der Kerbfaktor anstieg. Ein Vergleich zwischen den Versuchskörpern 2 und 3 zeigte eine exponentielle Beziehung des Größeneinflusses der Versuchskörper.

Aus den numerischen Untersuchungen von Baptista [16] ging hervor, dass eine Ausnehmung im Knotenblech einen positiven Effekt auf das Ermüdungsverhalten aufwies. Dies konnte in den durchgeführten Untersuchungen bestätigt werden. Eine Ausnehmung im Knotenblech konnte den Kerbfaktor in großem Maße verbessern. In den experimentellen Untersuchungen von Zirn [24] zeigte sich, dass die Ausführung der Schweißnaht einen großen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten hatte. Es zeigte sich, dass eine Ausführung mit einer HV-Naht Verbesserungen gegenüber einer HY-Naht oder Kehlnaht zeigte. Der Abschrägungswinkel des Rohrs konnte als nicht maßgebend eingestuft werden. Eine Ausführung mit einem Deckel ist für die Ermüdungsfestigkeit gering von Vorteil.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein Ausführungsvorschlag herausgearbeitet und in einer Fertigungszeichnung dargestellt. Dieser soll als Grundlage für die Planungshilfen der Richtlinie für Ingenieurbauten (RE-ING) dienen.

Weitere Untersuchungen sollten für die Spannungsspitzen, die nicht an der Umschweißung aufgetreten sind, durchgeführt werden. Dafür ist eine genaue Untersuchung der Spannungsspitzen mit einer Modellierung weiterer Submodelle notwendig. Der Größeneinfluss der Versuchskörper konnte in dieser Arbeit aufgezeigt werden, dennoch sind genauere Untersuchungen notwendig, um für diesen genaue Aussagen treffen zu können.

9 Literaturverzeichnis

Normungen und Richtlinien

- [1] *DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung* 2010.
- [2] *DVS Merkblatt 0905: Industrielle Anwendung des Kerbspannungskonzeptes für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen*, DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe "Konstruktion und Berechnung", Düsseldorf Feb. 2017.
- [3] *prEN 1993-1-14: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-14: Design assisted by finite element analysis*, Draft, European committee for standardization 2021.
- [4] *prEN 1993-1-9: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue*, Draft, European committee for standardization 2020.
- [5] *RE-ING: Richtlinie für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten*. Dezember 2019.

Fachbücher

- [6] Fahrenwaldt, Hans J. et al.: *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*, 3rd ed. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2009.
- [7] Gebhardt, Christof: *Praxisbuch FEM mit ANSYS-Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik*. München: Hanser 2011.
- [8] Haibach, Erwin: *Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. Berlin: Springer 2006.
- [9] Hobbacher, A. F.: *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. Heidelberg: Springer International Publishing 2016.
- [10] Neuber, Heinz: *Kerbspannungslehre: Theorie der Spannungskonzentration Genaue Berechnung der Festigkeit*, 4th ed. Berlin: Springer 2001.
- [11] Nussbaumer, Alain et al.: *Fatigue design of steel and composite structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-9 Fatigue, Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures*. Brussels, Belgium, s.l.: Wiley-Blackwell 2011.
- [12] Petersen, Christian: *Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2013.
- [13] Radaj, Dieter: *Gestaltung und Berechnung von Schweißkonstruktionen: Ermüdungsfestigkeit*. Düsseldorf: Dt. Verl. für Schweißtechnik 1985.
- [14] Radaj, Dieter; Fricke, Wolfgang: *Fatigue assesment of welding joints by local approaches* 2006.
- [15] Radaj, Dieter; Vormwald, Michael: *Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure* 2007.

Fachzeitschriften

- [16] Baptista, Claudio: Fatigue behaviour of CHS tubular bracings in steel bridges, *International Journal of Fatigue* 2017, S. 127–141.
- [17] Det Norske Veritas: DNV-RP-C203: Fatigue Design of Offshore Steel Structures. 2010.
- [18] Hanswille, Gerhard; Schubart, Ralf: Entwurf der Talbrücke Rinsdorf, *Stahlbau* 2017, 8, S. 674–681.
- [19] Macherauch, Eckard: Strukturmechanische Grundlagen der Werkstoffermüdung, *Zeitschrift für Werkstofftechnik* 1977, 7, S. 213–248.
- [20] Radaj, Dieter: Review of fatigue strength assessment of nonwelded and welded structures based on local parameters, *International Journal of Fatigue* 1996, 3, S. 153–170.

Hochschulschriften

- [21] Gölz, Lisa-Marie; Kuhlmann, Ulrike: Praxisgerechte Gestaltung von Diagonalrohr-Anschlüssen im Stahl- und Verbundbau: AiF-DASt Forschungsvorhaben IGF: 20452N. laufendes Vorhaben seit 02/2019.
- [22] Heinisch, Jasmin: Ermüdungsversuche an praxisgerechten Diagonalrohr-Anschlüssen im Stahl- und Verbundbrückenbau Auswertung und Einordnung. Masterarbeit, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, Stuttgart 2021.
- [23] Saad, Kannuna: Etude à la fatigue d'un pont ferroviaire bipoutre avec entretoises en tubes. Masterarbeit, École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne 2015.
- [24] Zirn, Rainer: Schwingfestigkeitsverhalten geschweißter Rohrknotenpunkte und Rohrflanschenverbindungen. Doktorarbeit, Universität Stuttgart 1975.

Internetquellen

- [25] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Stand der Modernisierung von Straßenbrücken*. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/bericht-stand-der-modernisierung-von-strassenbruecken-2018 (zuletzt aufgerufen: Mai 2021).
- [26] DIAMANT Metallplastic GmbH: *diamant-polymer*. www.diamant-polymer.de/presse/a45-zweiter-einsatz-fuer-metallpolymer-mm1018-bei-der-lennetalbruecke/ (zuletzt aufgerufen: Mai 2021).
- [27] *mainzund*. www.mainzund.de/moderne-kathedrale-aus-stahl-und-beton-im-inneren-der-schiersteiner-bruecke-von-wiesbaden-nach-mainz-unterwegs/ (zuletzt aufgerufen: Mai 2021).

Verwendete Software

- [28] ANSYS, Inc: *ANSYS Workbench. Version 19.2*.
- [29] Autodesk: *Autodesk Inventor Professional. Version 2020*.

10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 Rohranschlüsse an Brücken, Schiersteinerbrücke (links) [27] und Lenntalbrücke (rechts) [26]	1
Abb. 2-1 Gleitbänder [15]	3
Abb. 2-2 Beanspruchung [6, 15]	4
Abb. 2-3 Beanspruchungsbereiche [15]	5
Abb. 2-4 Wöhlerlinie [9]	6
Abb. 2-5 Arten an Kerben [15]	7
Abb. 2-6 Schweißimperfectionen HY-Naht [21]	9
Abb. 2-7 Schweißimperfectionen HV-Naht [21]	9
Abb. 2-8 Schematische Darstellung des Nenn-, Struktur-, Kerbspannungskonzeptes [9]	10
Abb. 2-9 Auswertung der Strukturspannung [15]	12
Abb. 2-10 Ermüdungsfestigkeitskurve für Längsspannungsschwingbreiten nach DIN EN 1993-1-9 [1]	13
Abb. 2-11 Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN EN 1993-1-9 [1]	14
Abb. 2-12 Kerbfälle im Eurocode 3 Teil 1-9 für Hohlprofile $t \leq 12,5$ mm [1]	15
Abb. 2-13 Schweißnahtwinkel und Modellierung der Nahtwurzel [4]	16
Abb. 2-14 Material-Wöhlerlinien [4]	16
Abb. 2-15 Methoden zur Analyse des Finite-Elemente-Modells [3]	18
Abb. 2-16 Empfohlene Elementgrößen am Nahtfuß und an der Nahtwurzel [3]	19
Abb. 2-17 Beanspruchung in der Kerbe [2]	20
Abb. 2-18 Begrenzung der Blechdicke t [2]	21
Abb. 2-19 Idealisierung von Schweißnähten [2]	21
Abb. 2-20 Spitzwinkliger Anschluss [2]	22
Abb. 2-21 Empfehlungen zur Elementgröße [2]	22
Abb. 2-22 Typische Netze an Nahtfuß ohne Hinterschnitt a), mit Hinterschnitt b) [2]	23
Abb. 2-23 Typisches Netz an der Nahtwurzel [2]	23
Abb. 2-24 Charakteristische Schwingungsfestigkeitswerte für eine Schweißverbindung aus Stahl [2]	24
Abb. 2-25 Beispiele an Vergleichsmodellen nach Radaj [13]	24
Abb. 3-1 Übersicht der Bauformen nach Zirn [24]	26
Abb. 3-2 Versagensriss eines Versuchskörpers nach Zirn [24]	27
Abb. 3-3 Oberer Anschluss mit Kopfplatte [18]	28
Abb. 3-4 Unterer Anschluss mit abgeschrägtem Rohr [18]	28
Abb. 3-5 Typische Rissbilder des oberen Anschlusses [18]	29
Abb. 3-6 Typische Rissbilder des unteren Anschlusses [18]	30
Abb. 3-7 Diagonalrohr-Anschlüsse Baptista [16]	31

Abb. 3-8 Einfluss der Blechdicke des Knotenblechs [16]	32
Abb. 3-9 Einfluss eines länglichen Freischnitts [16]	33
Abb. 3-10 Einfluss des Verhältnisses von Durchmesser des Freischnitts zu Rohrdurchmesser [16] ..	33
Abb. 3-11 Einfluss der Ausnehmung im Knotenblech [16]	34
Abb. 3-12 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen nach Baptista [16]	34
Abb. 3-13 Ausführungsvorschläge von Baptista [16]	35
Abb. 4-1 Versuchskörper der Serie 1 [21]	36
Abb. 4-2 Versuchskörper der Serie 2 [21]	36
Abb. 4-3 Versuchskörper der Serie 3 [21]	36
Abb. 4-4 Geometrie des Knotenblechs [21]	37
Abb. 4-5 Seitenansicht des Versuchskörpers 2 [21]	38
Abb. 4-6 Detail B der Seitenansicht des Versuchskörpers 2 [21]	38
Abb. 4-7 Horizontalschnitt des Versuchskörpers 2 [21]	39
Abb. 4-8 Theoretische Geometrie der HY-Naht [21]	39
Abb. 4-9 Geometrie der HY-Naht aus der Schweißanweisung [21]	40
Abb. 4-10 Seitenansicht des Versuchskörpers 3 [21]	41
Abb. 4-11 Draufsicht des Versuchskörpers 3 [21]	41
Abb. 4-12 Theoretische Geometrie der HV-Naht [21]	41
Abb. 4-13 Geometrie der HV-Naht aus der Schweißanweisung [21]	42
Abb. 4-14 Ermüdungsversuch des Versuchskörpers 2 [21]	42
Abb. 4-15 Wöhlerlinie der Versuchsserie 1 [22]	43
Abb. 4-16 Wöhlerlinie der Versuchsserie 2 [22]	43
Abb. 4-17 Wöhlerlinie der Versuchsserie 3 [22]	44
Abb. 4-18 Ermüdungsriss Versuchskörper E 2-3 (links) und E 3-6 (rechts) [21]	45
Abb. 4-19 Ergebnisse der Geometrie des Knotenblechs der Versuchsserie 1 [22]	46
Abb. 4-20 Geometrien des Freischnitts der Versuchsserie 1 [22]	47
Abb. 5-1 Makroschliffe Versuchskörper E2-3U [21]	49
Abb. 5-2 Makroschliffe Versuchskörper E2-4O [21]	50
Abb. 5-3 Makroschliffe Versuchskörper E2-5 [21]	50
Abb. 5-4 Makroschliffe Versuchskörper E3-4 [21]	51
Abb. 5-5 Makroschliffe Versuchskörper E3-6 [21]	51
Abb. 5-6 Makroschliffe Versuchskörper E3-7 [21]	51
Abb. 5-7 Vereinfachtes Globalmodell des Versuchskörpers 2	52
Abb. 5-8 Globalmodell mit Quader des Submodells (links), abgeleitetes Submodell (rechts)	53
Abb. 5-9 Vernetzung des Nahtübergangs (links) und der Nahtwurzel (rechts)	54

Abb. 5-10 Maximale Kerbspannung des Versuchskörpers 2 im Globalmodell bei Variation der Elementgröße	55
Abb. 5-11 Maximale Kerbspannung des Versuchskörpers 2 im Submodell bei Variation der Elementgröße	56
Abb. 5-12 Maximale Kerbspannung des Versuchskörpers 3 im Globalmodell bei Variation der Elementgröße	57
Abb. 5-13 Maximale Kerbspannung des Versuchskörpers 3 im Submodell bei Variation der Elementgröße	58
Abb. 5-14 Abmessungen des Vergleichsmodells nach Radaj [13] (links) und Darstellung des numerischen Modells (rechts)	59
Abb. 5-15 Ergebnis der Vergleichsrechnung.....	60
Abb. 5-16 Positionen der Dehnmessstreifen des Versuchskörpers E 2-8 [21]	61
Abb. 5-17 Spannungen an der Knotenblechspitze im Globalmodell des Versuchskörpers 2.....	61
Abb. 5-18 Spannungen an der Spitze der Schweißnaht im numerischen Modell und der Dehnmessstreifen (DMS) der experimentellen Untersuchungen.....	62
Abb. 5-19 Positionen der Dehnmessstreifen des Versuchskörpers E 3-5	63
Abb. 5-20 Spannungen an der Knotenblechspitze im Globalmodell des Versuchskörpers 3.....	63
Abb. 5-21 Spannungen an der Spitze der Schweißnaht im numerischen Modell und der Dehnmessstreifen (DMS) der experimentellen Untersuchungen.....	64
Abb. 5-22 Maximale Hauptspannungen der Versuchsserie 2 an der Nahtwurzel	65
Abb. 5-23 Horizontalschnitt der Serie 2 an der Knotenblechspitze mit Ermüdungsriß.....	65
Abb. 5-24 Maximale Hauptspannungen der Versuchsserie 3 am oberen des Schweißguts im Inneren des Rohrs	65
Abb. 5-25 Horizontalschnitt der Serie 3 an der Knotenblechspitze mit Ermüdungsriß.....	65
Abb. 6-1 Auswertung der Kerbspannung des Versuchskörpers 3 im Globalmodell (links) und im Submodell (rechts)	66
Abb. 6-2 Submodell des Versuchskörpers 2	67
Abb. 6-3 Submodell des Versuchskörpers 3	68
Abb. 6-4 Spannungen im Globalmodell der Versuchsserie 3 mit einem Deckel.....	70
Abb. 6-5 Spannungen im Globalmodell der Versuchsserie 3 ohne einen Deckel	70
Abb. 6-6 Horizontalschnitt der HY-Naht des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung, nicht erfasst (links), nach Schweißanweisung (Mitte) und vollständig erfasst (rechts)	72
Abb. 6-7 Kerbfaktor an der Umschweißung der Versuchsserie 2 in Abhängigkeit der Breite des Blechüberstands.....	73
Abb. 6-8 Das Rohrinne des Versuchskörpers 3 bei fehlender Schweißbadsicherung an Umschweißung (oben links), bei durchgängig fehlender Schweißbadsicherung (oben rechts) und bei durchgängiger Schweißbadsicherung (unten Mitte), mit Kerbfaktoren an der Umschweißung	74
Abb. 6-9 Geometrie der verschiedenen Schweißnähte, HV-Naht (links), HY-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht (Mitte) und Kehlnaht (rechts), mit Kerbfaktoren des Versuchskörpers 3 an der Umschweißung	75

Abb. 6-10 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung in Abhängigkeit der Breite des Knotenblechs	79
Abb. 6-11 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung in Abhängigkeit des Abschrägungswinkels des Knotenblechs	80
Abb. 6-12 Ausnehmungen im Knotenblech, v.l.n.r Versuchskörper 2 und 3, ohne Ausnehmung, Halbmond, Ellipse mit Kerbfaktoren an der Umschweißung des Versuchskörpers 2	81
Abb. 6-13 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung bei keiner Ausnehmung und bei einer Ausnehmung mit einem Halbmond	81
Abb. 6-14 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung bei einer Ausnehmung in Form einer Ellipse	82
Abb. 6-15 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 2 ohne eine Ausnehmung, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung	83
Abb. 6-16 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 2 mit einer ellipsenförmigen Ausnehmung (b= 112 mm, l = 250 mm), Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung	84
Abb. 6-17 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 3 an der Umschweißung bei einer Ausnehmung in Form einer Ellipse	84
Abb. 6-18 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 ohne eine Ausnehmung im Knotenblech, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung	85
Abb. 6-19 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 mit einer ellipsenförmigen Ausnehmung des Knotenblechs (b= 112 mm, l = 250 mm), Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung .	86
Abb. 6-20 Seitenansicht des Versuchskörpers 2 bei verschiedenen Knotenblechspitzen, v.l.n.r eckig, rund und gefast mit Kerbfaktoren an der Umschweißung	87
Abb. 6-21 Maximale Kerbspannung an der Nahtwurzel im Submodell mit runder Knotenblechspitze .	88
Abb. 6-22 Maximale Kerbspannung an der Nahtwurzel im Submodell mit eckiger Knotenblechspitze	88
Abb. 6-23 Kerbfaktor des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung in Abhängigkeit der Knotenblechdicke	89
Abb. 6-24 Spannungen im Globalmodell auf der HY-Naht bei einer Knotenblechdicke von 10 mm am Versuchskörper 2, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung	90
Abb. 6-25 Spannungen im Globalmodell auf der HY-Naht bei einer Knotenblechdicke von 20 mm am Versuchskörper 2, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung	90
Abb. 6-26 Spannungen im Globalmodell auf der HY-Naht bei einer Knotenblechdicke von 40 mm am Versuchskörper 2, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung	90
Abb. 6-27 Kerbfaktor des Versuchskörpers 3 an der Umschweißung in Abhängigkeit der Knotenblechdicke	91
Abb. 6-28 Spannungen im Globalmodell auf der HV-Naht bei einer Knotenblechdicke von 10 mm am Versuchskörper 3, Maximum am Ende der HV-Naht	92
Abb. 6-29 Spannungen im Globalmodell auf der HV-Naht bei einer Knotenblechdicke von 20 mm am Versuchskörper 3, Maximum an der Schweißnahtwurzel der Umschweißung	92
Abb. 6-30 Spannungen im Globalmodell auf der HV-Naht bei einer Knotenblechdicke von 40 mm am Versuchskörper 3, Maximum an der Schweißnahtwurzel der Umschweißung	92
Abb. 6-31 Seitenansicht des Versuchskörpers 3 mit einem Abschrägungswinkel von 15° (unten),	95

Abb. 6-32 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 3 an der Umschweißung bei unterschiedlichem Winkel der Abschrägung	95
Abb. 6-33 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 bei einem Abschrägungswinkel von 30°, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung	96
Abb. 6-34 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 bei einem Abschrägungswinkel von 82,5°, Maximum in der umlaufenden Kehlnaht des Deckels am Knotenblech	97
Abb. 6-35 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung bei unterschiedlichem Winkel der Abschrägung	97
Abb. 6-36 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung bei unterschiedlichem Blechdicken des Rohrs	99
Abb. 6-37 Maximale Spannung des Versuchskörpers 2 im Globalmodell bei $t_t = 14,2$ mm an der Innenseite des Rohrendes	100
Abb. 6-38 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 bei einer Rohrwanddicke von	100
Abb. 6-39 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 bei einer Rohrwanddicke von	100
Abb. 6-40 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 3 an der Umschweißung bei unterschiedlichem Blechdicken des Rohrs	101
Abb. 6-41 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 bei einer Rohrwanddicke von	102
Abb. 6-42 Spannungen im Globalmodell des Versuchskörpers 3 bei einer Rohrwanddicke von	102
Abb. 6-43 Nennspannungen des Versuchskörpers 2 bei einem Rohrdurchmesser von 323,9 mm, Maximum an Schweißnahtwurzel der Umschweißung	103
Abb. 6-44 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 2 an der Umschweißung bei unterschiedlichem Durchmesser des Rohrs	104
Abb. 6-45 Kerbfaktoren des Versuchskörpers 3 an der Umschweißung bei unterschiedlichem Durchmesser des Rohrs	105
Abb. 6-46 Kerbfaktoren der praxisnahen Beispiele an der Umschweißung anhand des Versuchskörpers 2	108
Abb. 6-47 Kerbfaktoren der praxisnahen Beispiele an der Umschweißung anhand des Versuchskörpers 3	109
Abb. 6-48 Vergleich der praxisnahen Beispiele von Versuchskörper 2 und 3	110
Abb. 7-1 Fertigungszeichnung für den Ausführungsvorschlag zur RE-ING [5, 21]	112

11 Tabellenverzeichnis

Tab. 4-1 Abmessungen der Versuchskörper.....	37
Tab. 4-2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Parameterstudie des Versuchskörpers 1	48
Tab. 5-1 Dehnungen aus den Dehnmessstreifen (DMS) des Versuchskörpers E 2-8	61
Tab. 5-2 Dehnungen aus den Dehnmessstreifen (DMS) des Versuchskörpers E 3-5	63
Tab. 6-1 Ergebnisse des Einflusses des Deckels, mit Kerbfaktoren an der Umschweißung	71
Tab. 6-2 Ergebnisse des Einflusses der Erfassung der Schweißnahtwurzel der HY-Naht,.....	72
Tab. 6-3 Ergebnisse des Einflusses der Schweißnähte an Versuchskörper 3 an schrägem und geradem Deckel, mit Kerbfaktoren an der Umschweißung	76
Tab. 6-4 Ergebnisse des Einflusses der Schweißnähte an Versuchskörper 2 an schrägem und geradem Deckel, mit Kerbfaktoren an der Umschweißung	77
Tab. 6-5 Ergebnisse der untersuchten Parameter der Schweißnähte,.....	78
Tab. 6-6 Ergebnisse des Einflusses der Knotenblechspitze an Versuchskörper 2,.....	88
Tab. 6-7 Ergebnisse der untersuchten Parameter des Knotenblechs,	94
Tab. 6-8 Rohrwanddicke, Rohrdurchmesser, Querschnittsfläche und aufgebrachte Kraft der Versuchskörper auf ein Viertel des Querschnitts	98
Tab. 6-9 Rohrdurchmesser, Rohrwanddicke, Querschnittsfläche und aufgebrachte Kraft des Versuchskörpers 2 auf ein Viertel des Querschnitts	104
Tab. 6-10 Ergebnisse der untersuchten Parameter des Rohrs, mit Kerbfaktoren an der Umschweißung	106
Tab. 6-11 Abmessungen der praxisnahen Beispiele	107
Tab. 6-12 Ergebnisse der untersuchten Parameter der praxisnahen Beispiele,	110
Tab. 12-1 Elementgrößen, Verfeinerung und Kerbspannung im Submodell Versuchsserie 2	124
Tab. 12-2 Elementgrößen, Verfeinerung und Kerbspannung im Submodell Versuchsserie 3	124

12 Anhang

Tab. 12-1 Elementgrößen, Verfeinerung und Kerbspannung im Submodell Versuchsserie 2

Elementgröße	Verfeinerung	Maximale Spannung
[mm]	[mm]	[N/mm ²]
1,5	0,50	944,49
1	0,33	945,69
0,8	0,27	956,82
0,6	0,20	943,84
0,5	0,17	945,66
0,4	0,13	946,23
0,3	0,10	946,01
0,25	0,08	945,63
0,2	0,10	956,27
0,15	0,08	946,40

Tab. 12-2 Elementgrößen, Verfeinerung und Kerbspannung im Submodell Versuchsserie 3

Elementgröße	Verfeinerung	Maximale Spannung
[mm]	[mm]	[N/mm ²]
1,5	0,50	574,60
1	0,33	580,73
0,8	0,27	584,84
0,6	0,20	586,65
0,5	0,17	588,02
0,4	0,13	586,70
0,3	0,10	587,58
0,25	0,08	587,82
0,2	0,10	587,62
0,15	0,08	589,28

13 Daten-CD

Der Masterarbeit ist eine Daten-CD beigefügt. Folgende Dateien sind auf der CD gespeichert:

- Ausfertigung der Arbeit (.pdf)
- Ausführungsvorschlag (.dwg)
- Verwendete Bilder (.png)
- Auswertungen der Untersuchungen (.xlsx)
- Validierung und Verifizierung (.xlsx)