

Tragfähigkeit von Kehlnaht- und Stumpfnahverbindungen höherfester Baustähle

Jennifer Spiegler

Mitteilungen

Tragfähigkeit von Kehlnaht- und Stumpfnah- verbindungen höherfester Baustähle

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Jennifer Spiegler
aus Sindelfingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Ungermann

Tag der mündlichen Prüfung: 23.03.2022

Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart

2022

Jennifer Spiegler Tragfähigkeit von Kehlnaht- und Stumpfnahverbindungen höherfester Baustähle

Herausgeberin Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart
Telefon: (0711) 685 66245
Telefax: (0711) 685 66236

Redaktion Gloria Hofmann, M. Sc.

D 93

Kurzfassung

Höherfeste Stähle zeichnen sich vor allem durch ihre hohe Beanspruchbarkeit kombiniert mit einem ressourcenschonenden und kosteneffizienten Werkstoffverbrauch aus. Aufgrund der sich bietenden Vorteile ist der Bedarf an höherfesten Stählen zur Erstellung neuer imposanter und zugleich filigraner Bauwerke kontinuierlich gestiegen. Um den Einsatz höherfester Stähle weiter voranzutreiben und zu forcieren, bedarf es jedoch in vielen Fällen die Überprüfung bzw. Weiterentwicklung der zum Teil ausschließlich auf Basis normalfester Stähle entwickelten Bemessungskonzepte. Dadurch wird es möglich eine effiziente und wirtschaftliche Ausnutzung höherfester Stähle zu gewährleisten. Hierzu zählen unter anderem die Modelle zur Bemessung von geschweißten Verbindungen. In der Vergangenheit konnte bereits ein auf höherfeste Stähle speziell angepasstes Modell zur Bemessung von Kehlnahtverbindungen höherfester Stähle entwickelt und in den überarbeiteten Normentwurf *prEN 1993-1-8* [18] integrierten werden. Unklar war jedoch noch die Anwendbarkeit für Mischverbindungen, Verbindungen aus normal- und höherfesten Stählen.

Zur Erschließung der noch offenen Fragestellung dienen die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen und Auswertungen. Anhand der daraus hervorgehenden Versuchsergebnisse an Flanken- und Stirnkehlnähten war es möglich das Tragverhalten von Mischverbindungen nachzuvollziehen und die daraus gewonnenen Erkenntnisse zur Überprüfung bzw. Weiterentwicklung des in der Norm enthaltenen Bemessungskonzepts zu verwenden.

Im Gegensatz zu Kehlnahtverbindungen liegt für durchgeschweißte Stumpfnahntverbindungen höherfester Stähle bisher kein empirisch abgesichertes Bemessungskonzept vor. Deshalb umfasste die Zielsetzung der Arbeit zusätzlich die Entwicklung eines für durchgeschweißte Stumpfnahntverbindungen höherfester Stähle konzipierten Bemessungsansatzes. Aus einer detaillierten Betrachtung der Ergebnisse von Zugversuchen an Stumpfnahntverbindungen höherfester Stähle war es möglich, ein geeignetes Bemessungskonzept zu erarbeiten und statistisch zu kalibrieren, das unter anderem als Nachweisführung gegen das in der Praxis kritisch hinterfragte Versagen in der Wärmeeinflusszone herangezogen werden kann. Damit besteht die Möglichkeit, die in der Norm *prEN 1993-1-8* [18] vorhandenen unvollständigen Regelungen durch ein klar definiertes, sicheres und vor allem wirtschaftliches Konzept zu ersetzen.

Abstract

High strength steel is increasingly used in the design of new structures due to its high strength, economic, environmental and structural demands. In order to realize and ensure the safe design of high-strength steels, the existing rules according to EN 1993-1-8 need to be extended for steel grades up to S700.

Many of the existing design rules in EN 1993-1-8 have been developed exclusively based on investigations on mild carbon steels. They are not capable of ensuring the efficient and economic use of higher strength steels. Therefore, the rules need to be validated or further developed for high-strength steels. Especially for welded connections, the resistance concept needs to be enhanced. A modified design resistance function for fillet welds made of high-strength steels has already been developed and integrated into the draft *prEN 1993-1-8* [18]. The new concept considers the strength of the base metal and the strength of the filler metal. However, the applicability of the new rules of *prEN 1993-1-8* [18] for mixed connections of mild carbon and high strength steel is still not clarified.

The investigations and evaluations carried out in this thesis aim to clarify the ambiguities for mixed connections. The results of tests on longitudinal and cruciform joints were used to understand the structural behaviour of mixed connections and to use the results to validate and further develop the design concept in *prEN 1993-1-8* [18].

In contrast to fillet welds, *prEN 1993-1-8* [18] does not provide a validated design concept for full penetration butt welds made of high-strength steels. Therefore, this thesis additionally aims at the development of a design approach for butt-welded connections of high-strength steels. From a detailed analysis of the results of tensile tests on butt welds made of high-strength steels, it was possible to develop a suitable design concept and calibrate it statistically. The proposal may be applied as verification against failure in the heat-affected zone, which is critically questioned in practice. This provides the opportunity to replace the rules existing in *prEN 1993-1-8* [18] with a clearly defined, safe and, of course, economic design concept.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit im Zeitraum meiner Arbeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart entstanden.

Mein Dank geht vor allem an Frau Prof. Ulrike Kuhlmann, Leiterin des Instituts für Konstruktion und Entwurf, für das entgegengebrachte Vertrauen während meiner gesamten Zeit am Institut und der Annahme des Hauptberichts.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Ungermann, Leiter des Instituts für Stahlbau an der Technischen Universität Dortmund für die Übernahme des Mitberichters und der Interesse an meiner Arbeit.

Weiterhin möchte ich mich bei allen ehemaligen Kollegen und Kolleginnen des Instituts für Konstruktion und Entwurf sowie der Studierenden, die unter meiner Betreuung ihre Abschlussarbeit erstellt haben, für die Zusammenarbeit, Unterstützung und vor allem für die oftmals sehr hilfreichen Diskussionsgespräche bedanken. Hier gilt mein Dank auch allen wissenschaftlichen Hilfskräften die mich während meiner Zeit am Institut in der Durchführung der Forschungsarbeiten unterstützt haben.

Mein größter Dank geht jedoch an meine Freunde, Verwandte und meinen Lebensabschnittsgefährten, die mich immer unterstützt, ermutigt und mir den Rücken frei gehalten haben um meinen bisherigen Weg gehen zu können. Vor allem meiner Mutter möchte ich hier für meinen allergrößten Dank für alles aussprechen.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit.....	2
1.3	Gliederung der Arbeit.....	5
2	WERKSTOFFE.....	7
2.1	Baustahl.....	7
2.1.1	Allgemeines	7
2.1.2	Einteilung der Stähle.....	7
2.1.3	Feinkornbaustähle	9
2.1.4	Herstellung von Feinkornbaustahl	9
2.1.5	Festigkeitssteigernde Maßnahmen	10
2.1.5.1	Allgemeines	10
2.1.5.2	Einfluss von Legierungselementen	11
2.1.5.3	Einfluss durch gezielte Wärmebehandlungen	12
2.2	Schweißzusatzwerkstoff	16
2.2.1	Allgemeines	16
2.2.2	Schweißzusatzwerkstoffe für das Metall-Schutzgasschweißen	17
2.2.2.1	Übersicht.....	17
2.2.2.2	Fülldraht.....	18
2.2.2.3	Massivdraht	19
3	SCHWEIßEN VON HÖHERFESTEN STÄHLEN	21
3.1	Allgemeines	21
3.2	Schweißsicherheit und Schweißmöglichkeit	21
3.3	Werkstoffbedingte Schweißeignung	22
3.4	Metallurgische Vorgänge während des Schweißprozesses.....	22
3.4.1	Allgemeines	22

3.4.2	Wärmeeinflusszone	23
3.4.3	Weiche Zone.....	27
3.5	Schweißprozess	28
3.5.1	Allgemeines	28
3.5.2	Streckenenergie E	28
3.5.3	Abkühlkonzept $t_8/5$	29
3.6	Schweißfehler für höherfeste Feinkornbaustähle	32
3.6.1	Übersicht.....	32
3.6.2	Heißrisse.....	33
3.6.3	Kaltrisse	33
3.6.4	Terrassenbruch.....	35
4	BESTEHENDE BEMESSUNGSKONZEPTE GESCHWEIßTER VERBINDUNGEN ...	37
4.1	Allgemeines	37
4.2	Vorgaben an den Schweißzusatzwerkstoff nach <i>prEN 1993-1-8</i> [18].....	37
4.3	Bemessung von Kehlnahtverbindungen	38
4.3.1	Allgemeines	38
4.3.2	Erläuterung des richtungsbezogenen Verfahrens nach <i>Abschnitt 6.5.3.2</i> [18].....	38
4.3.3	Erläuterung des vereinfachten Verfahrens nach <i>Abschnitt 6.5.3.3</i> [18]	43
4.4	Bemessung von Stumpfnahverbindungen	45
4.4.1	Überblick.....	45
4.4.2	Bemessung einer nicht durchgeschweißten Stumpfnah nach <i>Abschnitt 6.7.2</i> [18].....	46
4.4.3	Bemessung einer durchgeschweißten Stumpfnah nach <i>Abschnitt 6.7.2</i> [18]	46
5	ERGEBNISSE BEREITS ABGESCHLOSSENER UNTERSUCHUNGEN AN KEHLNAHTVERBINDUNGEN	49
5.1	Allgemeines	49
5.2	Forschungsvorhaben <i>FOSTA P652</i> [59].....	49
5.2.1	Zielsetzung	49
5.2.2	Versuchsprogramm.....	50

5.2.3	Ergebnisse.....	50
5.3	<i>Zusatzuntersuchungen</i> [55]	52
5.3.1	Zielsetzung	52
5.3.2	Versuchsprogramm.....	53
5.3.3	Ergebnisse.....	53
5.4	Forschungsvorhaben <i>FOSTA P812</i> [54].....	54
5.4.1	Zielsetzung	54
5.4.2	Versuchsprogramm.....	54
5.4.3	Ergebnisse.....	55
5.5	Dissertation <i>Rasche</i> [67].....	56
5.5.1	Allgemeines	56
5.5.2	Erweiterung der bestehenden Bemessungsregeln nach <i>DIN EN 1993-1-8</i> [3]	56
5.5.3	Neues Bemessungskonzept für höherfeste Stähle nach <i>prEN 1993-1-8</i> [18].....	57
5.6	Europäisches Forschungsvorhaben <i>SAFEBRIC TILE</i> [44].....	59
5.6.1	Zielsetzung	59
5.6.2	Versuchsprogramm.....	59
5.6.3	Ergebnisse.....	60
5.7	Dissertation <i>Kleiner</i> [52].....	61
5.7.1	Allgemeines	61
5.7.2	Angepasstes statistisches Auswerteverfahren für ein Versagen auf Bruch [52]	62
5.8	Forschungsvorhaben <i>FOSTA P1020</i> [73].....	65
5.8.1	Zielsetzung	65
5.8.2	Versuchsprogramm.....	65
5.8.3	Ergebnisse.....	66
6	UNTERSUCHUNGEN AN KEHLNAHTVERBINDUNGEN NORMALFESTER UND HÖHERFESTER STÄHLE.....	69
6.1	Forschungsvorhaben <i>FOSTA P1062</i> [56].....	69
6.2	Experimentelle Untersuchungen an Kehlnähten von Mischverbindungen	69

6.2.1	Allgemeines	69
6.2.2	Verwendete Werkstoffe.....	70
6.2.2.1	Grundwerkstoff.....	70
6.2.2.2	Schweißzusatzwerkstoff	71
6.2.3	Versuchskörperform.....	72
6.2.3.1	Flankenkehlnähte.....	72
6.2.3.2	Stirnkehlnähte	74
6.2.4	Versuchsprogramm.....	75
6.2.5	Schweißprozess	76
6.2.6	Versuchsdurchführung.....	77
6.2.7	Begleituntersuchungen	78
6.2.7.1	Makroschliffe.....	78
6.2.7.2	Härte	79
6.2.7.3	Optischer 3D-Scan der Bruchfläche.....	80
6.3	Diskussion der Ergebnisse der Tragfähigkeit von Mischverbindungen.....	81
6.3.1	Allgemeines	81
6.3.2	Beurteilung des anzusetzenden a-Maßes nach <i>prEN 1993-1-8</i> [18]	82
6.3.2.1	Allgemeines	82
6.3.2.2	Auswertung der Nahtdicken.....	85
6.3.2.3	Auswertung der Bruchwinkel α	89
6.3.2.4	Zusammenfassung	93
6.3.3	Bestimmung der Tragfähigkeit.....	94
6.3.4	Einfluss des Grundwerkstoffs auf die Tragfähigkeit.....	94
6.3.5	Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Tragfähigkeit.....	95
6.3.6	Vergleich des Einflusses aus Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff.....	96
6.3.6.1	Tragfähigkeitssteigerung in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs und des Schweißzusatzwerkstoffs	96
6.3.6.2	Einfluss des Aufmischungsgrads im Schweißgut auf die Tragfähigkeit	97

6.3.7	Einfluss der Einwirkungsrichtung auf die Tragfähigkeit.....	101
6.3.8	Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen an Mischverbindungen	102
6.4	Numerische Untersuchungen an Kehlnahtverbindungen.....	103
6.4.1	Modellfindung	103
6.4.2	Geometrische Abbildung der Schweißnaht.....	104
6.4.3	Materialzuordnung	105
6.4.4	Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse	107
6.4.4.1	Definition des Bruchkriteriums	107
6.4.4.2	Spannungs-Verformungs-Verläufe.....	110
6.4.4.3	Vergleich der Bruchwinkel	111
6.4.4.4	Zusammenfassung	113
6.4.5	Parameterstudie: Schweißgutfestigkeit.....	113
6.4.5.1	Allgemeines	113
6.4.5.2	Parameterstudie: Festigkeit Schweißzusatzwerkstoff	115
6.4.5.3	Parameterstudie: Aufmischung Grundwerkstoff.....	116
6.4.6	Zusammenfassung der numerischen Untersuchungen an Stirnkehlnahtverbindungen 117	
6.5	Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse.....	118
6.5.1	Vorgehen	118
6.5.2	Statistisch zu überprüfendes Bemessungsmodell	119
6.5.3	Basisvariablen	120
6.5.3.1	Grundlagen	120
6.5.3.2	Basisvariable der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs f_u, PM	121
6.5.3.3	Basisvariable der Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs f_u, FM	122
6.5.3.4	Nahtdicke a	123
6.5.4	Erhebung der statistisch auszuwertenden Datenbasis von Tragfähigkeiten an Kehlnahtverbindungen.....	124
6.5.5	Festlegung der Evaluationsgruppen	124
6.5.6	Bewertungskriterien zur Beurteilung der Qualität des Bemessungsmodells	125

6.5.7	Ergebnisse der Evaluationsgruppe G/T/E46.....	127
6.5.7.1	Flankenkehlnahtverbindungen.....	127
6.5.7.2	Stirnkehlnahtverbindungen.....	129
6.5.8	Ergebnisse der Evaluationsgruppe G/T69.....	131
6.5.8.1	Flankenkehlnahtverbindungen.....	131
6.5.8.2	Stirnkehlnahtverbindungen.....	133
6.5.9	Ergebnisse der Evaluationsgruppe G/T89.....	135
6.5.9.1	Flankenkehlnahtverbindungen.....	135
6.5.9.2	Stirnkehlnahtverbindungen.....	136
6.5.10	Bewertung der Anwendbarkeit des Bemessungskonzepts.....	138
6.6	Anpassung des Bemessungsmodells speziell für Stirnkehlnahtverbindungen.....	141
6.6.1	Angepasstes Bemessungsmodell.....	141
6.6.2	Ergebnisse des angepassten Bemessungskonzepts.....	143
6.7	Zusammenfassung der statistischen Auswertungen.....	145
6.8	Empfehlungen für die Bemessung von Kehlnähten an Mischverbindungen.....	146
7	ERGEBNISSE BEREITS ABGESCHLOSSENER UNTERSUCHUNGEN AN DURCHGESCHWEIßTEN STUMPFNAHTVERBINDUNGEN.....	149
7.1	Allgemeines.....	149
7.2	<i>Dissertation Maurer</i> [61].....	149
7.2.1	Zielsetzung.....	149
7.2.2	Versuchsprogramm.....	150
7.2.3	Ergebnisse.....	150
7.3	Untersuchungen an Undermatching-Verbindungen [74], [42].....	152
7.3.1	Zielsetzung.....	152
7.3.2	Versuchsprogramm.....	152
7.3.3	Ergebnisse.....	152
7.4	Statistische Auswertung von Stumpfnahhtverbindungen nach <i>Björk</i> [37].....	155
7.4.1	Zielsetzung.....	155

7.4.2	Versuchsprogramm.....	155
7.4.3	Ergebnisse.....	155
8	UNTERSUCHUNGEN AN STUMPFNAHTVERBINDUNGEN HÖHERFESTER STÄHLE	157
8.1	Forschungsvorhaben HighButtWeld DVS 09.083 [36].....	157
8.2	Experimentelle Untersuchungen an durchgeschweißten Stumpfnahverbindungen	157
8.2.1	Allgemeines	157
8.2.2	Verwendete Werkstoffe.....	158
8.2.2.1	Grundwerkstoff.....	158
8.2.2.2	Schweißzusatzwerkstoff	159
8.2.3	Versuchskörperform.....	160
8.2.4	Abtrag der Nahtüberhöhung	161
8.2.5	Versuchsprogramm.....	162
8.2.5.1	<i>Zusatzuntersuchungen</i> [36]	163
8.2.6	Schweißprozess	164
8.2.7	Versuchsdurchführung.....	165
8.2.8	Begleituntersuchungen	166
8.2.8.1	Makroschliffe.....	166
8.2.8.2	Härte	167
8.3	Diskussion der Ergebnisse der Tragfähigkeit von Stumpfnahverbindungen.....	168
8.3.1	Allgemeines	168
8.3.2	Bestimmung der Tragfähigkeit.....	168
8.3.3	Einfluss des auftretenden Versagens auf die Tragfähigkeit	169
8.3.4	Einfluss des Grundwerkstoffs auf das auftretende Versagen	172
8.3.5	Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs auf das auftretende Versagen	175
8.3.6	Einfluss Energieeintrag.....	178
8.3.7	Zusammenfassung der Auswertung der experimentellen Untersuchungen.....	181
8.4	Numerische Untersuchungen an Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle	183

8.4.1	Modellfindung	183
8.4.2	Geometrische Abbildung der Schweißnaht.....	185
8.4.3	Materialzuordnung	185
8.4.4	Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse	188
8.4.4.1	Allgemeines	188
8.4.4.2	Ergebnisse der Undermatching-Verbindungen	189
8.4.4.3	Ergebnisse der Matching-Verbindungen, geschweißt mit hohem Energieeintrag...	192
8.4.4.4	Ergebnisse der Matching-Verbindungen, geschweißt mit niedrigem Energieeintrag 195	
8.4.5	Zusammenfassung der numerischen Untersuchungen durchgeschweißter Stumpfnahverbindungen	197
8.5	Entwicklung eines angepassten Bemessungskonzepts für durchgeschweißte Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle	198
8.5.1	Vorgehen	198
8.5.2	Abzubildende Versagensmodi	198
8.5.2.1	Allgemeines	198
8.5.2.2	Versagensmodus 1: Grundwerkstoff.....	199
8.5.2.3	Versagensmodus 2: Wärmeeinflusszone.....	199
8.5.2.4	Versagensmodus 3: Schweißgut	202
8.5.3	Versagensunabhängiges Bemessungskonzept	205
8.6	Statistische Auswertung des Bemessungskonzepts.....	206
8.6.1	Vorgehen	206
8.6.2	Zusätzliche Variable der vorhandenen Nahtüberhöhung	207
8.6.3	Erhebung der statistisch auszuwertenden Datenbasis von Tragfähigkeiten an Stumpfnahverbindungen	208
8.6.4	Festlegung der Evaluationsgruppen	209
8.6.5	Ergebnisse der Evaluationsgruppe S690QL.....	209
8.6.6	Ergebnisse der Evaluationsgruppe S700MC	212
8.6.7	Ergebnisse der Evaluationsgruppe S460ML.....	214

8.6.8	Ergebnisse der Evaluationsgruppe S500MC	217
8.6.9	Ergebnisse der Evaluationsgruppen S890QL, S900MC, S960QL und S960MC	219
8.6.10	Empfehlung eines Bemessungsansatzes für Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle	222
8.6.11	Vergleich des Bemessungsvorschlags mit dem derzeit gültigen Konzept nach <i>prEN</i> <i>1993-1-8</i> [18] bzw. <i>prEN 1993-1-1</i> [19]	223
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	229
9.1	Zusammenfassung	229
9.2	Fazit.....	231
9.3	Ausblick	232
	LITERATURVERZEICHNIS.....	233
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	241
	TABELLENVERZEICHNIS.....	251
	ANHANG A – STATISTISCHES AUSWERETVERFAHREN	
A.1:	Statistische Bestimmung eines Widerstandsmodells.....	255
	ANHANG B – FORSCHUNGSVORHABEN FOSTA P1062 [56]	
B.1:	Chemische Zusammensetzungen der	257
B.2:	Begleituntersuchungen.....	259
B.3:	Tragfähigkeiten von Mischverbindungen.....	260
	ANHANG C – FORSCHUNGSVORHABEN HIGHBUTTWELD [36]	
C.1:	Chemische Zusammensetzungen der Werkstoffe.....	262
C.2:	Versuchsprogramm.....	264
C.3:	Tragfähigkeiten durchgeschweißter Stumpfnahverbindungen.....	266
	ANHANG D – FORSCHUNGSVORHABEN ZUSATZUNTERSUCHUNGEN [57]	
D.1:	Versuchsprogramm.....	268
D.2:	Tragfähigkeiten durchgeschweißter Stumpfnahverbindungen.....	269

ANHANG E – NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN AN STUMPFNAHTVERBINDUNGEN

E.1: Materialzuordnung in der Wärmeeinflusszone270

E.2: Ergebnisse der numerischen Untersuchungen an V-Nähten.....272

ANHANG F – STATISTISCHE AUSWERTUNG VON STUMPFNAHTVERBINDUNGEN

F.1 Statistische Kenngrößen der Basisvariablen.....275

Abkürzungen

WEZ	Wärmeeinflusszone
SZW	Schweißzusatzwerkstoff
GW	Grundwerkstoff
WZ	Weiche Zone
FLA	Flankenkehlnaht
STI	Stirnkehlnaht
HMP	Härtemesspunkt
GKZ	Grobkornzone
FKZ	Feinkornzone
IKZ	Interkritische Zone
SKZ	Subkritische Zone
n. E.	niedriger Energieeintrag
h. E.	hoher Energieeintrag
C	Kohlenstoff

Lateinisches Formelverzeichnis

t	Erzeugnisdicke
t_t	Übergangsdicke von zwei- zu dreidimensionaler Wärmeableitung
l_{eff}	effektive Nahtlänge
a	Nahtdicke
a_{EC}	Nahtdicke mit tiefen Einbrand entsprechend prEN 1993-1-8 [18]
$a_{EC,th.}$	Nahtdicke ohne tiefen Einbrand entsprechend prEN 1993-1-8 [18]
$a_{3D-Scan}$	Nahtdicke abgeleitet aus einem Scan der Bruchfläche
a_{max}	Nahtdicke einer Stirnkehlnaht in Abhängigkeit der maximalen Beanspruchung
d	Blechdicke
A	Querschnittsfläche $A = a \cdot l_{eff}$
L_0	Anfangsmesslänge
M	Mismatch-Faktor
U	Spannung
I	Strom
v_s	Schweißgeschwindigkeit
E	Streckenenergie
Q	Wärmeeinbringen
ε	thermischer Wirkungsgrad des Schweißverfahrens
$t_{8/5}$	Abkühlzeit zwischen $800^\circ C$ und $500^\circ C$
T_0	Vorwärmtemperatur
F_2, F_3	Formfaktor
CET	Kohlenstoffäquivalent für höherfeste Stähle
PCM	Kohlenstoffäquivalent für normalfeste Stähle
HD	Gehalt an diffusiblem Wasserstoff
C	Kohlenstoff
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
Ni	Nickel
Si	Silicium
V	Vanadium
B	Bor
H	Wasserstoff
$f_{vw,d}$	Bemessungswert der Scherfestigkeit der Schweißnaht
$F_{w,Ed}$	Bemessungswert der auf die wirksame Kehlnahtfläche einwirkenden Kräfte je Längeneinheit
$F_{w,Rd}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit der Schweißnaht je Längeneinheit
F_{max}	maximal aufgebrachte Prüfkraft
f_u	Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile

$f_{u,PM}$	Zugfestigkeit des schwächeren Grundwerkstoffs
$f_{u,FM}$	Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs
$f_{u,PM1}$	Zugfestigkeit des geringer festen Grundwerkstoffs
$f_{u,PM2}$	Zugfestigkeit des höherfesten Grundwerkstoffs
$f_{u,GW}$	Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
$f_{u,SZW}$	Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs
$f_{wu,k}(t_{8/5})$	Zugfestigkeit der Schweißnaht in Abhängigkeit der $t_{8/5}$ -Zeit
f_y	Streckgrenze des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
$f_{y,GW}$	Streckgrenze des Grundwerkstoffs
$f_{y,SZW}$	Streckgrenze des Schweißzusatzwerkstoffs
x	Erweichungsfaktor in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs
X_{WZ}	relative Breite der Weichen Zone
$r_{e,i}$	experimenteller Wert des Widerstandes für jeden Versuch i
$r_{t,i}$	Wert der theoretischen Widerstandsfunktion bei Einsetzen der gemessenen Parameter X für den Versuch i
b	Mittelwertkorrektur
V_δ	Variationskoeffizient der Streugröße
f_a	einzuhaltender Grenzwert des Teilsicherheitsbeiwerts
N_{Ed}	Einwirkende Normalkraft
X_i	Mittelwert
$V(X_i)$	Einwirkende Normalkraft

Griechisches Formelverzeichnis

α_{EC}	zugehöriger Winkel der Nahtdicke a_{EC}
$\alpha_{3D-Scan}$	Bruchwinkel abgeleitet aus einem Scan der Bruchfläche
α_{max}	Bruchwinkel zugehörig der am stärksten beanspruchten Bruchfläche einer Stirnkehlnaht
$\alpha_{w,k}$	Parameter zur Erfassung der Verbindungsform, der Abmessungsverhältnisse und der Duktilitätsklasse der Schweißverbindung
$\sigma_{\perp}, \tau_{\perp}, \tau_{\parallel}$	Spannungskomponenten einer Schweißnahtverbindung
$\sigma_{v,Rd}$	Bemessungsgrenzspannung
$\sigma_{v,Ed}$	Von-Mises-Vergleichsspannung
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M2} = 1,25$
γ_{M0}	Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M0} = 1,00$
γ_{M}^*	korrigierter Teilsicherheitsbeiwert
β_w	Korrelationsbeiwert für Kehlnahtverbindungen in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs
β_{bw}	Korrelationsbeiwert für Stumpfnahntverbindungen in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs
$\beta_{w,mod}$	Korrelationsbeiwert für Kehlnahtverbindungen in Abhängigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs
δ_{Δ}	Faktor zur Berücksichtigung der Einwirkungsrichtung
ε_{wahr}	wahre Dehnung
σ_{wahr}	wahre Spannung
ε	Thermischer Wirkungsgrad

1 Einleitung

1.1 Motivation

Gerade in der heutigen Zeit steigt, bedingt durch die stark wachsende Weltbevölkerung und einer damit einhergehenden schnellen Urbanisierung, der Bedarf an Gebäuden und funktionierenden Infrastrukturen stetig an. Durch die Realisierung einer zunehmenden Anzahl von immer eindrucksvolleren Brückenbauwerken und Hochhäusern gewinnt vor allem der Stahlbau immer mehr an Bedeutung. Dabei expandiert derzeit besonders das Einsatzgebiet von höherfesten Stählen aufgrund steigender Anforderungen an die Beanspruchbarkeit kombiniert mit dem Wunsch zu schlanken, filigranen Bauwerken, die darüber hinaus möglichst kosteneffizient gefertigt werden können [38].

Für einen ökologischen und ökonomischen Einsatz der Stähle bedarf es daher an das Material angepasste Bemessungsansätze, die für die Praxis aufbereitet und einfach zugänglich sind. Hier unterlag die bisherige Normungsgeneration einem gewissen Defizit, da die gültigen Bemessungsregeln auf Basis von Untersuchungen an Stählen bis zu einer Streckgrenze von $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$ entwickelt und lediglich durch ergänzende Regelungen nach *DIN EN 1993-1-12* [2] auf höherfeste Stähle übertragen wurden. Um das Einsatzgebiet höherfester Stähle im Stahlbau weiter voranzutreiben und zu etablieren, sollten die vorliegenden und teilweise unvollständigen Ergänzungen für höherfeste Stähle durch empirisch gewonnene Bemessungskonzepte ersetzt werden. Entsprechend erarbeitete Normungsentwürfe liegen bereits vor, die neue an das Materialverhalten höherfester Stähle angepasste und weiterentwickelte Konzepte enthalten.

Besonders hervorzuheben ist der Bereich der geschweißten Verbindungen, da sich gerade hier in der Vergangenheit mehrfach gezeigt hat, dass die bisher gültigen Bemessungsregelungen, insbesondere für Kehl- und Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle, unwirtschaftlich und inadäquat sind. Aufgrund dessen ist es oftmals nicht möglich, die bereits genannten Vorteile höherfester Stähle, wie bspw. dem Einsatz geringerer Blechdicken, was eine Realisierung kleinerer Schweißnahtvolumina und somit die Reduzierung der Herstellungskosten einer Konstruktion mit sich bringt, im Bereich der Anschlussdetails auszunutzen.

Als Erweiterung konnte bereits ein für Kehlnahverbindungen höherfester Stähle weiterentwickeltes Bemessungskonzept erarbeitet und in den zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit vorliegenden Normentwurf *prEN 1993-1-8* [18] integriert werden. Da das Modell aus Untersuchungen des Tragverhaltens von Kehlnahverbindungen gleicher Grundwerkstoffe hergeleitet

wurde, steht für eine konsistente und globale Verwendbarkeit für Kehlnahtverbindungen eine Überprüfung bzw. Adaption auf Mischverbindungen noch aus.

Unvollständig sind jedoch noch die im Normentwurf angegebenen Bemessungsregeln für durchgeschweißte Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle. So zeigten beispielsweise Matching-Verbindungen ($f_{y,GW} = f_{y,SZW}$) an höherfesten Stählen ein vermehrtes Versagen im Bereich der Wärmeeinflusszone und einer damit einhergehenden geringeren Tragfähigkeit, weshalb besonders der von der Norm geforderte Nachweis im Querschnitt des angeschlossenen Bauteils und nicht im Nahtbereich selbst zu hinterfragen ist. Gerade hier bedarf es der Entwicklung eines versuchsbasierten Bemessungskonzepts, das vor allem das in der Praxis bekannte kritische Versagen im Bereich der Wärmeeinflusszone höherfester Stähle abdeckt.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Durch den Einsatz höherfester Stähle konnte in der Vergangenheit immer wieder bewiesen werden, dass der in der heutigen Zeit zunehmend wichtiger werdende ressourcenschonende Umgang mit Werkstoffen möglich ist. Durch die bereits zum großen Teil erweiterten Regelwerke werden den Unternehmen Bemessungsansätze zur Verfügung gestellt, die die Vorteile der höherfesten Stähle ideal ausnutzen und den Umgang in der Dimensionierung vereinfachen. Dies umfasst jedoch nicht nur die Querschnittsbemessung, sondern auch die oftmals in der Herstellung kostenintensiven Anschlussdetails, wie beispielsweise geschweißte Verbindungen.

Zur Bemessung, der in der Praxis häufig zum Einsatz kommenden Kehlnahtverbindungen, liegt dem Normentwurf *prEN 1993-1-8* [18] ein angepasstes und wirtschaftliches Konzept für höherfeste Stähle vor. Durch das speziell für höherfeste Stähle entwickelte neue Konzept lassen sich, neben den bisher ausschließlich zulässigen Matching- (Schweißzusatzwerkstoff (SZW) = Grundwerkstoff (GW)) und Overmatching-Verbindungen (SZW > GW), auch Kehlnähte mit einer geringeren Festigkeit im Schweißgut sicher und wirtschaftlich bemessen. Gerade im Hinblick auf die höherfesten Stähle ist die Realisierung einer Undermatching-Verbindungen (SZW < GW) von besonderer Wichtigkeit, da die gängigen Schweißzusätze zum Teil nicht oder nur knapp die Festigkeiten der zu verschweißenden Grundwerkstoffe erreichen und sich somit im Schweißgut gegebenenfalls eine geringere Festigkeit einstellt. Um dies in der Bemessung berücksichtigen zu können, entwickelte *Rasche* [67] ein Konzept, das neben der Festigkeit des Grundwerkstoffs nun auch die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs miteinbezieht. In Anbetracht des auftretenden Versagens im Nahtquerschnitt scheint es schlüssig

ein Bemessungsmodell bereitzustellen, das die im Schweißgut vorliegende Vermischung aus Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff aufgreift. Noch unklar ist jedoch die Anwendbarkeit des neuen Bemessungsansatzes für so genannte Mischverbindungen. Hierbei gemeint sind Verbindungen zwischen normalfesten und höherfesten Stählen, wie sie beispielsweise bei Anbauteilen auftreten, da diese aufgrund der geringeren Beanspruchung aus normalfesten Stählen gefertigt und an stark beanspruchte Hauptträger aus höherfesten Stählen angeschlossen werden.

Die zur Herleitung des angepassten Konzepts verwendete Datenbasis aus Versuchsergebnissen von Tragfähigkeitsuntersuchungen an Kehlnahtverbindungen umfasste lediglich eine geringe Anzahl an Daten von Mischverbindungen. Eine fundierte Analyse des Tragverhaltens speziell von Mischverbindungen sowie eine Abstimmung der Anwendung des Bemessungskonzepts waren bisher nicht möglich. Demzufolge sind Mischverbindungen derzeit auf der sicheren Seite liegend nach *prEN 1993-1-8* [18] unter Berücksichtigung des geringer festen Grundwerkstoffs zu bemessen.

Im Rahmen dieser Arbeit soll an das bereits entwickelte Konzept von *Rasche* [67] angeknüpft und auf seine wirtschaftliche Anwendbarkeit für Mischverbindungen überprüft beziehungsweise adaptiert werden. Zu betrachten sind die für die Tragfähigkeit einer Kehlnaht maßgebenden Materialeigenschaft im Schweißgut von Mischverbindungen, das, im Gegensatz zu Verbindungen gleicher Stahlgüten, zusätzlich durch ein Aufmischen mit dem höherfesten Grundwerkstoff beeinflusst wird, vgl. Abb. 1-1. Die zusätzliche Aufmischung erfordert darüber hinaus eine Kontrolle, der in der Norm verankerten Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,mod}$, die unter anderem eine im Schweißgut vorliegende Unter- bzw. Überfestigkeit berücksichtigen.

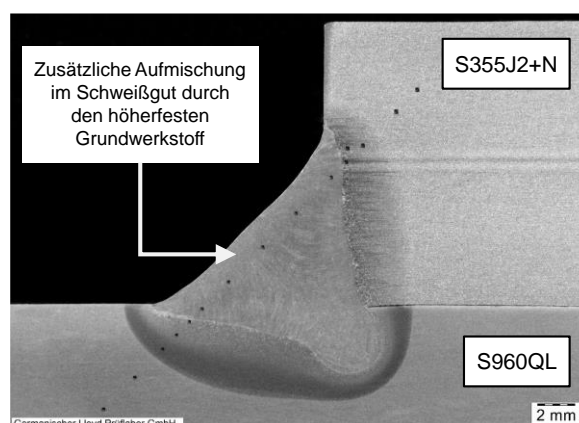


Abb. 1-1: Kehlnaht als Mischverbindung zwischen normalfestem Stahl der Güte S355J2+N und höherfestem Stahl der Güte S960QL

Als wesentlich kritischer sind die im Normentwurf *prEN 1993-1-8* [18] verankerten Bemessungsregeln für durchgeschweißte Stumpfnahverbindungen zu bewerten. Hier wurde der bisher gültige Bauteilnachweis als Bemessungsansatz für Matching- und Overmatching-Verbindungen nach *DIN EN 1993-1-8* [3] übernommen und für höherfeste Stähle lediglich mit einer inadäquaten Nachweisführung für Undermatching-Verbindungen ergänzt. Unter dem Aspekt des in Abb. 1-2 dargestellten und bereits bekannten kritischen Versagens in der Wärmeeinflusszone und einer damit einhergehenden verminderten Tragfähigkeit gerade bei Matching-Verbindungen höherfester Stähle birgt das Bemessungsmodell ein gewisses Sicherheitsrisiko. Als Gegenstand dieser Arbeit soll daher ein Bemessungskonzept für durchgeschweißte Stumpfnahverbindungen entwickelt werden, das neben dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit vor allem einen Nachweis gegen ein frühzeitiges Versagen bereitstellt.

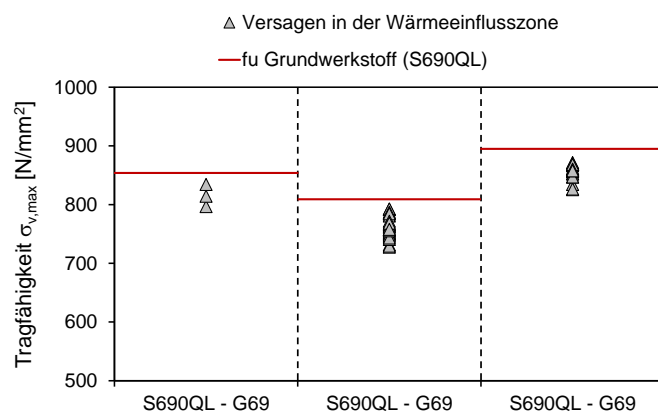
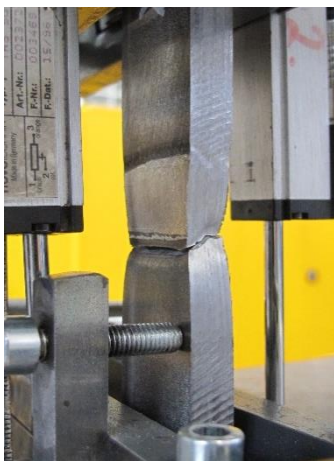


Abb. 1-2: Kritisches Versagen in der Wärmeeinflusszone durchgeschweißter Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle der Güte S690QL

Die Erarbeitung eines entsprechenden Modells setzt voraus, dass in einem ersten Schritt das Tragverhalten von durchgeschweißten Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle erfasst und analysiert wird. Durch die Identifizierung der auf die Tragfähigkeit nehmenden Einflussfaktoren kann ein konsistentes Bemessungskonzept abgeleitet und statistisch bewertet werden, das anschließend als Bemessungsvorschlag aufbereitet wird.

1.3 Gliederung der Arbeit

Einleitend werden in Kapitel 2 die in dieser Arbeit betrachteten höherfesten Grundwerkstoffe und Schweißzusatzwerkstoffe hinsichtlich der für die Auswertung wichtigen Materialeigenschaften vorgestellt. Darüber hinaus ist es für die späteren Diskussionen der aus den Versuchen abgeleiteten Ergebnisse erforderlich, Kenntnisse über die während des Schweißprozesses ablaufenden metallurgischen Vorgänge zu besitzen. Daher werden in Kapitel 3 die grundlegenden Vorgänge sowie das Verhalten der betrachteten Werkstoffe vorgestellt und erläutert.

Die dem Normentwurf *prEN 1993-1-8* [18] zugrunde gelegten Bemessungskonzepte für geschweißte Verbindungen können Kapitel 4 entnommen werden. Hier wird ebenfalls auf das bereits entwickelte und im Rahmen dieser Arbeit zu überprüfende neue Bemessungskonzept nach *Rasche* [67] Bezug genommen. Die zur Erarbeitung des Bemessungskonzepts herangezogenen Forschungsvorhaben an Kehlnahtverbindungen sowie weitere bereits durchgeführte Forschungen an Mischverbindungen werden anschließend in Kapitel 5 zusammengefasst.

In Kapitel 6 folgt eine detaillierte Untersuchung des Tragverhaltens von Mischverbindungen anhand von experimentellen Untersuchungen, die Gegenstand des Forschungsvorhabens *FOSTA P1062* [56] waren. Mit Hilfe einer durch Mischverbindungen erweiterten Datenbasis erfolgt eine erneute statistische Auswertung des von *Rasche* [67] entwickelten Bemessungskonzepts, um die Anwendbarkeit für Mischverbindungen zu bestätigen bzw. zu modifizieren.

Ein weiterer Teil dieser Arbeit beinhaltet die Entwicklung eines neuen Bemessungsansatzes speziell für Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle. Als Einführung werden in Kapitel 7, die aus der Literatur bekannten Forschungsvorhaben, die sich mit Untersuchungen des Tragverhaltens von Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle beschäftigten, vorgestellt.

Die zur Entwicklung des Bemessungsmodells herangezogenen experimentellen Untersuchungen stammen unter anderem aus dem in Kapitel 8 vorgestellten Forschungsvorhaben *High-ButtWeld* [36] und den *Zusatzuntersuchungen* [57]. Die Herleitung sowie die statistische Kalibrierung des Konzepts werden in Kapitel 8 ausführlich beschrieben.

Als Resümee wird in Kapitel 9 die Arbeit noch einmal kurz zusammengefasst, bevor mit einem Ausblick über weiteren Forschungsbedarf abgeschlossen wird.

2 Werkstoffe

2.1 Baustahl

2.1.1 Allgemeines

In der heutigen Zeit bietet der Markt dem planenden Anwender die Möglichkeit aus einer Vielzahl von ca. 2500 unterschiedlichen Stahlsorten einen für die jeweilige Anwendung maßgeschneiderten Stahl auszuwählen. Neben den erforderlichen mechanischen Eigenschaften, wie Festigkeit und Duktilität, sind als weitere Auswahlkriterien oftmals die für den Stahl geplanten Fertigungsprozesse zu berücksichtigen. Hierbei sind vor allem Bearbeitungsschritte, die einer Wärmebehandlung unterliegen, wie beispielsweise das Fügen zweier Stähle durch Schweißen, besonders zu beachten. Während des Schweißprozesses unterliegt der Stahl einer meist sehr hohen Aufheiz- und anschließender Abkühlgeschwindigkeit, die im angrenzenden Bereich der Schweißnaht eine Gefügeumwandlung zur Folge hat. Wird dieser Umwandlungsprozess bei der Wahl der Stahlgüte nicht berücksichtigt, kann aufgrund einer ungünstigen chemischen Zusammensetzung des Stahls das entstehende Gefüge negative Auswirkungen auf das Tragverhalten des Bauteils haben.

Ein weiterer wichtiger Aspekt neben der chemischen Zusammensetzung, sind die gezielt zur Erreichung der gewünschten mechanischen Eigenschaften im Herstellungsprozess zum Einsatz kommenden Wärmebehandlungen der Stähle. Diese können infolge einer erneuten Wärmebehandlung während des Schweißprozesses stark beeinflusst bzw. verändert werden, so dass sich im angrenzenden wärmebeeinflussten Bereich der Naht abweichende Materialeigenschaften im Grundwerkstoff einstellen. Diese Aspekte gilt es in der richtigen Werkstoffwahl zu bedenken, um ein wirtschaftliches und vor allem sicheres Bauwerk zu erstellen [72], [38].

2.1.2 Einteilung der Stähle

Nach *DIN EN 10020* [6] werden die im Bauwesen eingesetzten Stähle in Abhängigkeit ihrer chemischen Zusammensetzung in drei Hauptgüteklassen untergliedert:

- Unlegierte Stähle,
- Nichtrostende Stähle,
- Andere legierte Stähle.

Unlegierte Stähle

Als unlegiert werden Stähle bezeichnet, deren chemische Zusammensetzung den in Tab. 2-1 festgelegten Grenzwerten nach *DIN EN 10020 Tabelle 1* [6] entsprechen. Zusätzlich wird unterschieden zwischen unlegierten Qualitätsstählen und unlegierten Edelstählen. Qualitätsstähle unterliegen, im Gegensatz zu den Edelstählen, keinen festgelegten Anforderungen hinsichtlich dem Reinheitsgrad der nichtmetallischen Einschlüsse. Die Anforderungen an die Qualitätsstähle hinsichtlich der Sprödbrechunempfindlichkeit, der Korngröße und der Duktilität sind wiederum sehr hoch, weshalb diese für normalfeste Stähle im Bauwesen oft zum Einsatz kommen [72], [38].

Tab. 2-1: Grenze zwischen unlegierten und legierten Stählen (Schmelzanalyse) nach *DIN EN 10020 Tabelle 1* [6]

Festgelegtes Element	Al	B	Bi	Co	Cr	Cu	La	Mn	Mo	Nb
Grenzwert Massenanteil in %	0,3	0,0008	0,1	0,3	0,3	0,4	0,1	1,65 ^a	0,08	0,06
Festgelegtes Element	Ni	Pb	Se	Si	Te	Ti	V	W	Zr	Sonstige
Grenzwert Massenanteil in %	0,3	0,4	0,1	0,6	0,1	0,05	0,1	0,3	0,05	0,1

^a Falls für Mangan nur ein Höchstwert festgelegt ist, ist der Grenzwert 1,80% und die 70%-Regel gilt nicht.

Nichtrostende Stähle

Unter nichtrostenden Stählen werden Stähle geführt, die einen Mindestanteil von 10,5 % Chrom und einen Anteil von maximal 1,2 % Kohlenstoff aufweisen. Sie werden hinsichtlich ihrer Haupteigenschaften, wie korrosionsbeständig, hitzebeständig oder warmfest, eingeordnet.

Legierte Stähle

Die dritte Güteklasse umfasst die Stähle, die weder den unlegierten noch den nichtrostenden Stählen zugeordnet werden können. Unterschieden wird auch hier zwischen legierten Qualitätsstählen und legierten Edelstählen. Die Abgrenzung der Edelstähle von den Qualitätsstählen erfolgt entsprechend der in Tab. 2-2 aufgeführten Grenzwerte der chemischen Zusammensetzung nach *DIN EN 10020 Tabelle 2* [6]. Im Bauwesen werden für höherfeste Stähle überwie-

gend Edelstähle eingesetzt, da die Qualitätsstähle oftmals nicht gleichmäßig auf die festigkeitssteigernden Wärmebehandlungen ansprechen. Für die Herstellung von Schweißzusatzwerkstoffen werden hingegen überwiegend legierte Qualitätsstähle herangezogen [72], [38].

Tab. 2-2: Grenze der chemischen Zusammensetzung zwischen legierten Qualitätsstählen und legierten Edelstählen nach *DIN EN 10020 Tabelle 2* [6]

Festgelegtes Element	Cr	Cu	Mn	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Zr
Grenzwert Massenanteil in %	0,5	0,5	1,8	0,1	0,1	0,5	0,1	0,12	0,1

2.1.3 Feinkornbaustähle

Unter der Bezeichnung Feinkornbaustähle versteht man Stähle, die ein äußerst feines Korngefüge und einen geringen Kohlenstoffgehalt (C) von unter 0,2 % aufweisen. Die Beeinflussung der chemischen Zusammensetzung durch geeignete Legierungselemente in Kombination mit einer Wärmebehandlung führt zu dem gewünschten feinen Korngefüge im Stahl mit zum Teil hohen Festigkeitseigenschaften. Aufgrund des feinen Gefüges und des geringen C-Gehalts besitzen die Stähle eine sehr gute Schweißbeignung und werden im Bauwesen bevorzugt eingesetzt [38].

In Abhängigkeit der erreichten Festigkeiten werden Feinkornbaustähle in normalfeste Feinkornbaustähle und höherfeste Feinkornbaustähle eingeteilt. Der Begriff „*normalfester Feinkornbaustahl*“ umfasst hierbei Stähle bis zu einer Streckgrenze von $R_{eH} = 355 \text{ N/mm}^2$. Unter „*höherfeste Feinkornbaustähle*“ werden Baustähle ab einer Streckgrenze von $R_{eH} > 355 \text{ N/mm}^2$ geführt [60].

2.1.4 Herstellung von Feinkornbaustahl

Das gewonnene Eisenerz wird zunächst in einem Hochofen zu Roheisen aufbereitet, ist jedoch aufgrund des hohen Anteils an Kohlenstoff, Phosphor und Schwefel extrem spröde und hart. Im anschließenden Prozess, dem sogenannten Frischen, wird das im Hochofen gewonnene Roheisen zu Stahl weiterverarbeitet. Dabei werden nicht erwünschte Verunreinigungen, wie Phosphor, Silizium und Mangan, aus der Schmelze durch Oxidation oder Verschlackung fast vollständig entfernt. Oftmals reicht das Frischen jedoch nicht aus, um den Werkstoff auf die tatsächlich gewünschte chemische Zusammensetzung einzustellen. Für das Trennen der

nach dem Frischen noch vorhandenen Gase und ungewollten Verunreinigungen in der Stahlschmelze kommen deshalb sogenannte sekundärmetallurgische Methoden zum Einsatz, wie das Pfannenverfahren, Vakuumverfahren und Umschmelzverfahren. Erst durch die Sekundärmetallurgie ist es möglich den Stahl präzise auf die angestrebte chemische Zusammensetzung einzustellen.

Im Stahlbau finden in erster Linie die bereits genannten Feinkornbaustähle ihren Einsatz, da diese neben ihren Festigkeitseigenschaften eine sehr gute Schweißeignung und Verformbarkeit aufweisen. Für die Herstellung solcher Stähle wird der Schmelze Aluminium zugegeben, um den

restlichen Sauerstoff und atomaren Stickstoff abzubinden. Dadurch entsteht ein feinkörniger, sehr verunreinigungsarmer, hochwertiger und vor allem schweißgeeigneter Werkstoff, der zusätzlich sehr gute Werkstoffkennwerte aufweist.

Nach Beenden der sekundärmetallurgischen Nachbehandlung der Schmelze kann gegossen werden. Für das Urformen von schweißgeeigneten Feinkornbaustählen wird hierbei ausschließlich das Stranggussverfahren verwendet [72].

2.1.5 Festigkeitssteigernde Maßnahmen

2.1.5.1 Allgemeines

Die reine Eisen-Kohlenstoff-Legierung Stahl besitzt gerade mal eine Festigkeit von ca. 200 N/mm^2 . Um die Festigkeit zu steigern kommen während der Herstellung weitere Maßnahmen zum Einsatz. Dabei ist zu beachten, dass mit einem Anheben der Festigkeit eine Abnahme der Duktilität einhergeht. Dies bedeutet, dass nicht nur Festigkeitssteigernde Maßnahmen, sondern ebenfalls auch Methoden zur Erhöhung der Duktilität zum Einsatz kommen sollten, um ein im Bauwesen unerwünschtes plötzliches Versagen zu vermeiden.

Eine für den feinkörnigen Baustahl zur Verfügung stehende Methode der Festigkeitssteigerung ist der einstellbare, aber begrenzte Kohlenstoffgehalt. Zwar kann die Festigkeit durch den Gehalt an Kohlenstoff (C) stark erhöht werden, jedoch ist zu berücksichtigen, dass Stähle mit einem C-Gehalt von $> 0,22 \%$ bereits als nicht mehr schweißgeeignet gelten. Aufgrund des hohen C-Gehalts kann der Kohlenstoff nicht mehr vollständig als Zementit ausgeschieden werden und es bildet sich vermehrt harter und spröder Martensit. Vor allem bei der Abkühlung während des Schweißens besteht dadurch die Gefahr einer vermehrten Martensitbildung im Bereich der Wärmeeinflusszone (vgl. Abschnitt 3.4) [58].

Weiterhin ist es möglich durch eine gezielte Zugabe von bestimmten Legierungselemente die mechanischen Eigenschaften von Feinkornbaustähle zusätzlich anzupassen bzw. zu verbessern.

Einen wesentlich höheren Einfluss auf die Eigenschaften bzw. Festigkeiten lässt sich mit den sogenannten Wärmebehandlungen und den damit einhergehenden Kornfeinungen (Korngrenzenhärtung) im Stahlgefüge erreichen [60]. Da die Festigkeit im Korn meist geringer ist als an den Korngrenzen selbst nimmt die Festigkeit durch die höhere Anzahl an Korngrenzen bei feinem Korn zu. Darüber hinaus bewirkt das feine Korn als einzige Methode, neben der Festigkeitssteigerung, ebenfalls eine Steigerung der Duktilität [58]. Um Festigkeiten von bis zu 1300 N/mm^2 erreichen zu können, bedarf es jedoch eines genau aufeinander abgestimmten Herstellungsprozesses hinsichtlich der Einstellung der chemischen Zusammensetzung der Stahlschmelze und einer anschließend geeigneten Wärmebehandlung [60].

2.1.5.2 Einfluss von Legierungselementen

Legierungselemente nehmen in mehrerer Hinsicht Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Feinkornbaustähle. Durch die Zugabe der Legierungselemente lagern sich Atome in der Gitterstruktur des Basisgrundwerkstoffs, entweder auf einem normalen Gitterplatz (Substitutions-Mischkristalle) oder auf einem Zwischengitterplatz (Interstitielle-Mischkristalle), ein. Die so eingelagerten Fremdatome führen zu einer Verzerrung der Gitterstruktur und verhindern dadurch ein Abgleiten, sprich ein Versagen des Werkstoffs, wodurch die Tragfähigkeit zunimmt [77], [38], [72].

Ebenfalls können die abgleitenden Vorgänge infolge einer erhöhten Anzahl an Korngrenzen, bedingt durch ein möglichst feines Gefüge, verhindert und dadurch die Streckgrenze gesteigert werden. Die Ausbildung eines solchen feinen Gefüges kann durch die Ausscheidungen geeigneter Legierungselemente gezielt gesteuert werden.

Eine Zugabe von Niob, Titan und Vanadin führt beispielsweise zu fein verteilten Karbiden, Nitriden und Karbonitriden, die positive Effekte auf die Kornfeinung vor allem in Kombination einer Wärmeumformung bzw. einer Wärmebehandlung ausüben. Infolge der Ausscheidungen lässt sich das Kornwachstum sowie die Rekristallisation behindern und somit eine gewünschte Kornfeinung erzeugen, die in Kombination von sich einstellenden Feinstausscheidungen Festigkeitssteigernde Effekte bewirken [77], [38], [72].

2.1.5.3 Einfluss durch gezielte Wärmebehandlungen

Reicht die Zugabe von Legierungselementen nicht mehr aus, um die gewünschten Gefügeeigenschaften und die damit verbundenen mechanischen Eigenschaften zu erreichen, werden zusätzliche Verfahren angewandt. Mit Hilfe sogenannter Wärmebehandlungen kann der Stahl auch noch im festen Zustand metallurgisch beeinflusst werden. Die Wärmebehandlung bewirkt eine nachträgliche Umwandlung sowie eine zweckmäßige Anpassung der Größe, Form und Anordnung des Gefüges. Um die gewünschten Stahleigenschaften zu erreichen durchläuft der Stahl eine oder auch mehrere genau aufeinander abgestimmte Temperatur-Zeit-Folgen. Zur Steigerung der Effektivität der angewendeten Wärmebehandlungen können zusätzliche physikalische sowie chemische Einwirkungen zum Einsatz kommen.

Gerade für höherfeste Feinkornbaustähle spielen die Wärmebehandlungen eine wichtige Rolle, da nur durch diese die guten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften in Kombination mit einer guten Schweißignung erreicht werden können. Je nach chemischer Zusammensetzung und der zu erzeugenden gewünschten Eigenschaften des Stahls können unterschiedliche Verfahren der Wärmebehandlung angewendet werden. Die daraus erzeugten Stahlgüten, lassen sich in drei Stahlgruppen einteilen:

- Normalgeglüht, normalisierend gewalzt nach *DIN EN 10025-3* [8],
- Thermomechanisch gewalzt nach *DIN EN 10025-4* [9] bzw. *DIN EN 10149-2* [11],
- Vergütete Stähle nach *DIN EN 10025-6* [10].

Normalgeglühte / normalisierend gewalzte Feinkornbaustähle nach *DIN EN 10025-3* [8]

Für das Normalglühen wird der Stahl auf eine Temperatur kurz über der A_{c3} -Linie (900 °C bis 1100 °C) erwärmt und anschließend an ruhender Luft langsam wieder abgekühlt, siehe Abb. 2-1. Aufgrund der dadurch erzeugten zweimaligen Umkörnung entsteht ein feinkörniges, gleichmäßiges ferritisch-perlitisches Gefüge, was oft auch als „normales“ Gefüge bezeichnet wird. Diese Art der Kornfeinung ist auch unter dem Begriff Korngrenzenhärtung bekannt. Der gleiche Effekt kann durch normalisierendes Walzen erzeugt werden. Dabei durchläuft der Stahl einen definierten Warmwalzprozess, dessen Endverformung im Temperaturbereich des Normalglühens erfolgt. Durch die Wärmebehandlung und den Walzvorgang können höherfeste Stähle bis zu einer Streckgrenze von $R_{eH} = 500 \text{ N/mm}^2$ mit hervorragender Zähigkeit erzeugt werden.

Normalgeglühte bzw. normalisierend gewalzte Stähle sind nach *DIN EN 10025-3* [8] geregelt und werden im Lieferzustand mit dem Gütekennzeichen „N“ (Bspw. S355N) versehen [38], [60]. Eine zusätzliche Kennzeichnung durch die Angabe „L“ (Bspw. S355NL) erfolgt für Stähle mit einer erreichbaren Kerbschlagarbeit von 27 J nachgewiesen für tiefe Temperaturen bis zu -50 °C [60].

Aufgrund des hohen Gehaltes an nichtmetallischen Einschlüssen besteht für diese Stähle, hinsichtlich des Schweißens, eine erhöhte Gefahr des Terrassenbruchs.

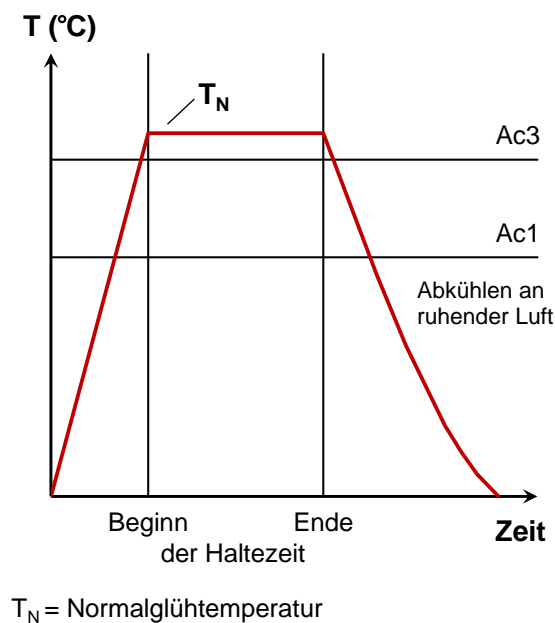


Abb. 2-1: Temperaturverlauf während des Normalglühens [50]

Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle nach *DIN EN 10025-4* [9]

Unter kontrollierten Temperatur- und Umformbedingungen (vgl. Abb. 2-2) in Kombination mit Mikrolegierungselementen sowie angepassten Abkühlbedingungen werden dem Stahl Eigenschaften verliehen, die durch allgemeine Wärmeprozesse nicht erreicht werden können.

Die in der Praxis auch als TM-Stähle bezeichneten Erzeugnisse sind, im Gegensatz zu normalgeglühten Stählen, durch einen geringen Kohlenstoffgehalt gekennzeichnet ohne einen entsprechenden Festigkeitsverlust zu erleiden. Durch die Zugabe von Mikrolegierungselementen, wie Niob und Vanadium, zählt neben dem sich einstellenden feinen Korngefüge die Ausscheidungshärte als weiterer festigkeitserhöhender Mechanismus. Durch das Zusammenwirken der Ausscheidungshärte und des extrem feinen ferritisch-perlitischen Gefüges können

Streckgrenzen bis $R_{eH} = 700 \text{ N/mm}^2$ mit hervorragender Zähigkeit und Schweißbarkeit erreicht werden.

Thermomechanisch gewalzte Stähle sind für normalzähe Güten im Lieferzustand durch das Gütekenzeichen „M“ (Bspw. S460M) und für tieftemperaturzähe Güten durch „ML“ (Bspw. S460ML) gekennzeichnet. Geregelt werden TM-Stähle nach *DIN EN 10025-4* [9]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass TM-Stähle, die besonders für Kaltumformung geeignet sind, nach *DIN EN 10149-2* [11] gesondert geregelt sind. Die Sondereigenschaft der Kaltumformung wird durch ein ergänzendes „C“ gekennzeichnet (Bspw. S700MC) [72], [60], [38], [70]. Aufgrund des Fertigungsprozesses ist bei der Weiterverarbeitung darauf zu achten, dass das Gefüge bei einer Veränderung nicht durch eine einfache Wärmebehandlung rückführbar ist. Gerade während des Schweißprozesses ist daher auf eine hohe Wärmeeinbringung zu verzichten, um die vom Hersteller vorgegebenen Abkühlzeiten nicht zu überschreiten und eine Entfestigung zu vermeiden [38].

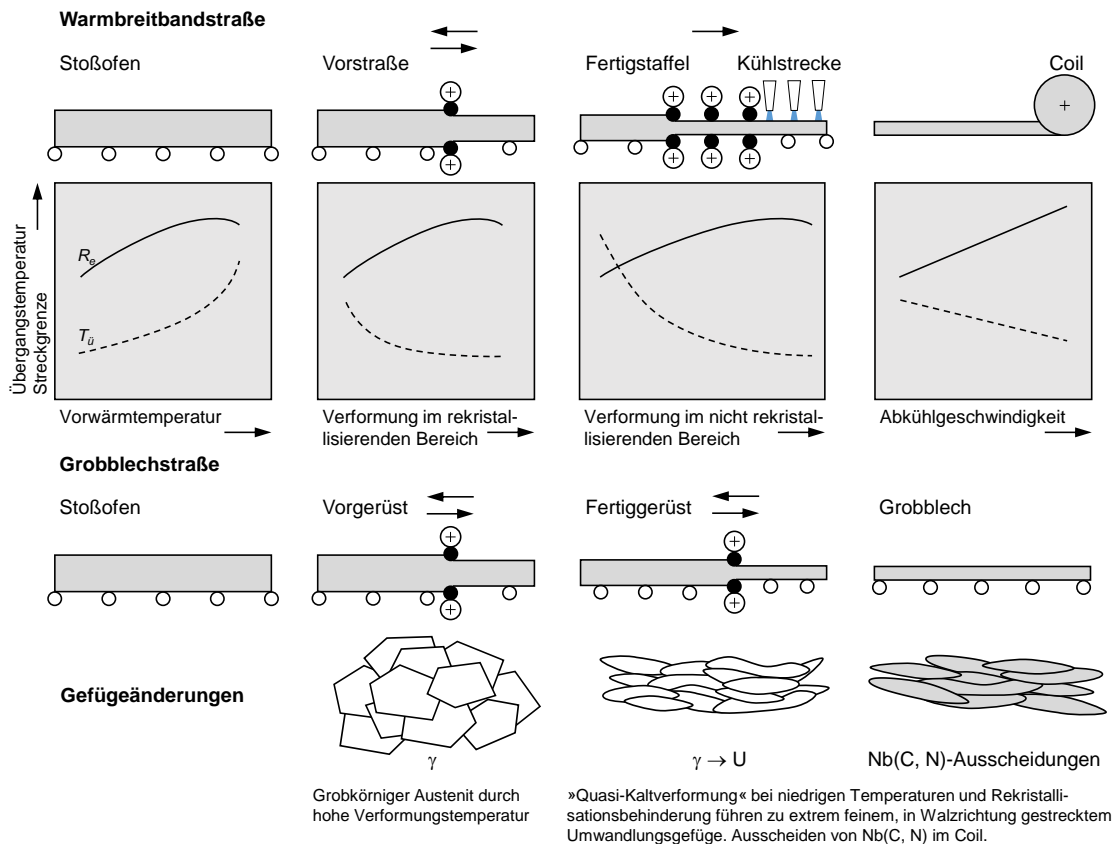


Abb. 2-2: Vorgänge beim thermodynamischen Walzen (Warmband- und Grobblechstraße) [72]

Vergütete Feinkornbaustähle mit höherer Streckgrenze nach *DIN EN 10025-6* [10]

Der vergütete Feinkornbaustahl durchläuft zwei Fertigungsschritte. Im ersten Schritt wird infolge der als Härten bezeichneten Wärmebehandlung ein martensitisches und zum Teil auch bainitisches Gefüge erzeugt. Dabei wird der Werkstoff zuerst auf eine Temperatur oberhalb der A_{c3} -Linie erhitzt und anschließend plötzlich abgeschreckt (vgl. Abb. 2-3). Bedingt durch die extrem schnelle Abkühlung wird im Stahl ein Gefüge erzeugt, das sich nicht mehr im Gleichgewicht befindet und deshalb eine extreme Härte und Sprödigkeit aufweist. Erst durch ein anschließendes Anlassen des Stahls kann der entstandene Martensit entspannt und in ein gleichgewichtsnahes Gefüge überführt werden. Aufgrund des erneuten Erwärmens kurz unter der A_{c1} -Linie (ca. 723 °C) (vgl. Abb. 2-3) kann der durch das schnelle Abkühlen zwangsgelöste Kohlenstoff erneut diffundieren, in dem er durch Carbidausscheidungen das verspannte Gefüge verlässt. Zwar nehmen dadurch Festigkeit und Härte ab, die Zähigkeit wird jedoch merklich verbessert. Die Wahl geeigneter Legierungskombinationen ermöglicht jedoch eine optimal aufeinander abgestimmte Abnahme der Festigkeit und Zunahme der Zähigkeit.

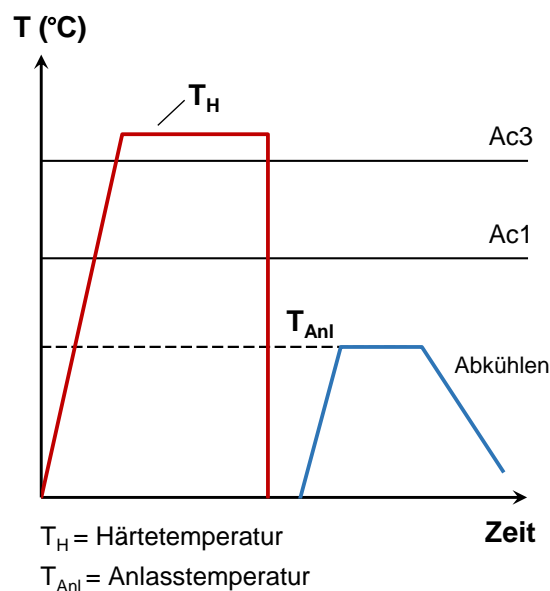


Abb. 2-3: Temperaturverlauf des Vergütens [50]

Die Kennzeichnung von vergüteten Feinkornbaustählen erfolgt durch das Gütekennzeichen „Q“ (Bspw. S690Q). Geregelt werden vergütete Stähle nach der Produktnorm *DIN EN 10025-6* [10]. Eine zusätzliche Kennzeichnung der Stähle erfolgt in Abhängigkeit der Zähigkeitsgütegruppe durch den Buchstaben „L“, bei einer erreichbaren Kerbschlagarbeit von 30 J bei -40 °C (Bspw. S690QL), und durch „L1“, bei einer erreichbaren Kerbschlagarbeit von 30 J bei

–60 °C (Bspw. S690QL1). Mittels der Wärmebehandlung Vergüten können Streckgrenzen bis zu $R_{eH} = 960 \text{ N/mm}^2$ erreicht werden.

Für den Fügeprozess des Schweißens ist die Voraussetzung einer Anlassbeständigkeit der vergüteten Stähle wichtig. Liegt keine ausreichend hohe Anlassbeständigkeit vor, besteht die Gefahr der Bildung eines Härtesacks – Bereich in dem Festigkeit und Härte merkbar abnehmen (vgl. Abb. 3-4) – innerhalb der Wärmeeinflusszone [72], [70], [60].

2.2 Schweißzusatzwerkstoff

2.2.1 Allgemeines

Im Folgenden werden ausschließlich Schweißzusatzwerkstoffe für das Metall-Schutzgasschweißen vorgestellt, da dieses für die Fertigung der Prüfkörper der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Versuche zum Einsatz kam.

Die Fertigung einer Schweißnahtverbindung durch den Schweißprozess des Metall-Schutzgasschweißens erfordert die Verwendung eines Schweißzusatzwerkstoffs. Dabei handelt es sich um eine Drahtelektrode, die für das Fügen zweier Grundwerkstoffe aufgeschmolzen wird. Infolge des Vermischens des teilweise aufgeschmolzenen Grundwerkstoffs mit dem Schweißzusatzwerkstoff wird im Bereich der Schweißnaht ein Kontinuum zwischen den zu verbindenden Grundwerkstoffen erzeugt [48]. Das im Bereich der Naht vorhandene Werkstoffgemisch wird als Schweißgut bezeichnet, dessen metallurgische und mechanische Eigenschaften wesentlich von den vermischten Ausgangswerkstoffen und dem Schweißprozess beeinflusst werden.

Als Schweißzusatzwerkstoff können unterschiedliche Typen und Festigkeitsklassen zum Einsatz kommen. Die Auswahl einer geeigneten Elektrode sollte in Abhängigkeit des verwendeten Grundwerkstoffs, wie auch unter Berücksichtigung des anzuwendenden Schweißprozesses, erfolgen. Hierbei gilt es eine Drahtelektrode zu wählen, die möglichst artgleich oder zumindest artähnlich zu dem zu verschweißenden Grundwerkstoff ist, um möglichst ähnliche Eigenschaften innerhalb des Schweißguts zu erhalten [72].

Empfehlungen hinsichtlich der Wahl des Schweißzusatzwerkstoffs in Abhängigkeit der Stahlgüte können dem *DVS Merkblatts 0916 Tabelle 1* [17] entnommen werden. Tab. 2-3 enthält ausschließlich die daraus hervorgehenden Empfehlungen der Schweißzusatzwerkstoffe für die Grundwerkstoffe der in Kapitel 6 und 8 vorgestellten experimentellen Untersuchungen.

Tab. 2-3: Auszug der Empfehlungen für eine Zuordnung der Schweißzusätze zu den jeweiligen Grundwerkstoffen [17]

Grundwerkstoffe	Temperaturbeanspruchung bis [°C]	Massivdrahtelektroden	Fülldrahtelektroden ³⁾
DIN EN 10025-3		DIN EN ISO 14341-A	DIN EN ISO 17632-A
S355N	-20	G3Si1 oder G4Si1	T 46 4 PM oder T 46 4 MM
DIN EN 10025-4		DIN EN ISO 14341-A	DIN EN ISO 17632-A
S460ML	-50	G3Ni1 oder G2Ni2	T 46 6 1Ni PM oder T 46 6 1Ni MM
DIN EN 10025-6		DIN EN ISO 16834-A¹⁾	DIN EN ISO 18276-A
S690QL	-40	G Mn3Ni1CrMo	T 69 4 Mn2NiCrMo MM
S960QL	-40	G Mn4Ni2CrMo ²⁾	T 89 4 Mn2Ni1CrMo BM ²⁾

¹⁾ Aus dieser Einstufung ist nicht ersichtlich, ob der Schweißzusatz z.B. bei -60°C noch ausreichende Zähigkeit aufweist. Es ist daher entweder die komplette NormEinstufung mit den Werten der Streckgrenze und der Kerbschlagzähigkeit zu verwenden oder mit dem Hersteller Rücksprache zu halten.

²⁾ Die Streckgrenze und Festigkeit des reinen Schweißguts dieser Draht- oder Fülldrahtelektroden liegt unterhalb der Streckgrenze und Festigkeit der Grundwerkstoffe. Daher gilt diese Schweißempfehlung nur für den Fall, dass entweder als Kehlnahtschweißung eine hohe Aufmischung mit dem Grundwerkstoff und damit eine Festigkeitssteigerung erfolgt, oder bei einer Verbindungsschweißung die Schweißnaht in der neutralen Faser liegt. Diese Vorgehensweise wird bevorzugt bei der Herstellung von Autokranen verwendet.

³⁾ Die Wahl, ob ein Rutil-(P-) oder Metallpulver-(M-)Fülldraht verwendet wird, hängt von dem Anwendungsfall ab. Rutil-Fülldrahtelektroden haben ihren Vorteil in der Zwangslage, sie können aufgrund ihrer schnell erstarrenden Schlacke mit einer hohen StromEinstellung in allen Positionen geschweißt werden. Metallpulver-Fülldrahtelektroden haben keine Schlacke und dadurch ihren Vorteil bei mehrlagigen Schweißungen und beim Schweißen mit dem Roboter. Außerdem weisen Sie einen geringen Wasserstoffgehalt im Schweißgut auf, ähnlich den basischen Fülldrahtelektroden. Die Rutil-Fülldrahtelektroden mit geschlossenem Röhrchen haben ebenfalls einen geringen Wasserstoffgehalt im Schweißgut. Basische Fülldrahtelektroden werden vorzugsweise bei dickwandigen und spannungsbehafteten Konstruktionen verwendet.

2.2.2 Schweißzusatzwerkstoffe für das Metall-Schutzgasschweißen

2.2.2.1 Übersicht

Für das Metall-Schutzgasschweißen werden überwiegend Massivdraht- und Fülldrahtelektroden (vgl. Abb. 2-4) verwendet [46].

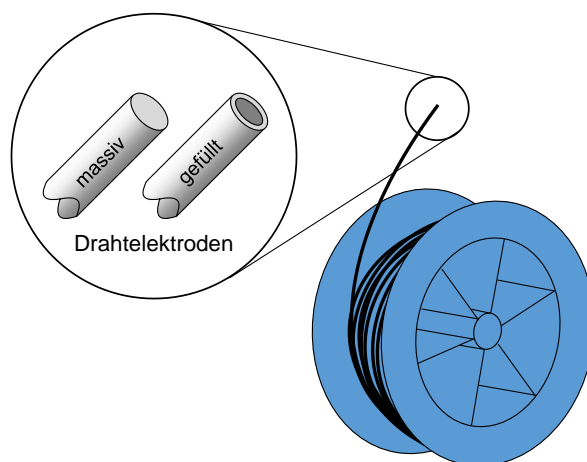


Abb. 2-4: Schweißzusatzwerkstoffe für das Metall-Schutzgasschweißen

Gerade bei Massivdrähten ist während des Schweißprozesses ein Schutzgas zu verwenden, das die erstarrende Naht vor atmosphärischen Einflüssen schützt. Für Fülldrähte ist dies nicht zwingend erforderlich, da der Füllstoff oftmals Stoffe beinhaltet, die während des Schweißens ausgasen und dadurch ebenfalls die erstarrende Naht vor Umwelteinflüssen schützt. Weiterer Vorteile der Fülldrähte sind die im Gegensatz zu den Massivdrähten höhere Abschmelzleistung, die Erzeugung eines tieferen Flankeneinbrands sowie die geringere Porenanfälligkeit und geringere Spritzerneigung [46], [81]. Zwar sind Fülldrähte aufgrund des besseren Schweißbadschutzes für die Baustelle gut geeignet, werden jedoch wegen des höheren Drahtpreises seltener genutzt [72], [46].

2.2.2.2 Fülldraht

Unter einem Fülldraht versteht man einen mit Füllstoff gefüllten, unlegierten Stahlmantel, der verschiedenartig entweder als Röhrendraht oder als gefalzter Draht geformt sein kann. Die verwendeten Füllstoffe sind zumeist ein rutil oder basisches trockenes Pulver, das neben einer hohen Lichtbogenstabilität eine umfangreiche metallurgische Reaktion während des Schweißprozesses erzeugt. In Abhängigkeit der Füllung kann zusätzlich die Anwendung eines Schutzgases erforderlich sein. Genormt sind „Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von unlegierten Stählen und Feinkornstählen“ bis zu einer Festigkeit von 500 N/mm^2 nach *DIN EN ISO 17632* [12]. Für das Schweißen von hochfesten Stählen sind Fülldrähte mit Festigkeiten ab 550 N/mm^2 notwendig. Die hier zum Einsatz kommenden „Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von hochfesten Stählen“ sind nach *DIN EN ISO 18276* [13] genormt.

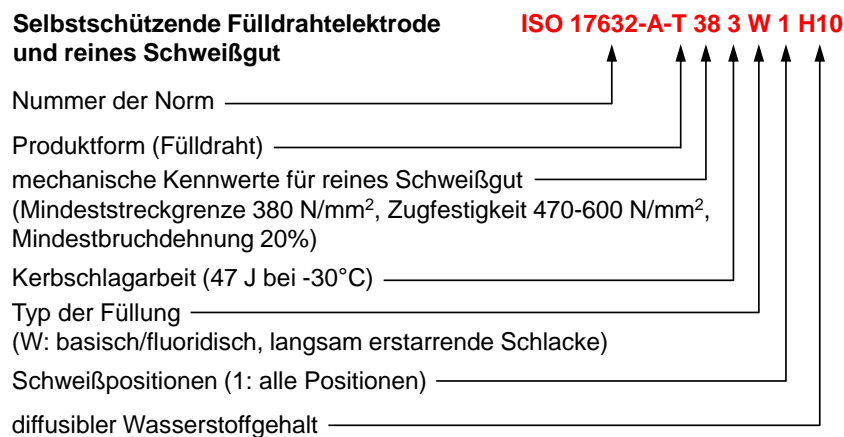


Abb. 2-5: Erläuterung der Bezeichnung einer Fülldrahtelektrode

Gekennzeichnet werden Fülldrähte durch das Kurzzeichen „T“ in Kombination der Streckgrenze sowie weiterer, für die Verarbeitung relevanter, Werkstoffangaben. Die Bedeutung der einzelnen Kurzzeichen können Abb. 2-5 entnommen werden [72], [48].

2.2.2.3 Massivdraht

Der Massivdraht besteht aus einem einzelnen Draht, der ausschließlich unter Verwendung eines Schutzgases geschweißt werden darf. Für das Verhalten während des Schweißprozesses und die sich später in der Naht einstellenden mechanisch-technologischen Eigenschaften ist die chemische Zusammensetzung des Massivdrahtes ausschlaggebend. Diese werden oftmals hochlegiert, um einem starken Abbrennen der Legierungselemente wie Mangan, Silizium und Kohlenstoff während des Schweißprozesses entgegenzuwirken. Bedingt durch den hohen Kohlenstoffanteil und dem während dem Schweißen zusätzlich entstehenden Kohlenstoff beim Zerfall von CO_2 kann es jedoch zu einem Aufkohlen und somit zu einer höheren Härte im Schweißgut kommen.

Massivdrähte, die für das „Metall-Schutzgasschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen“ zum Einsatz kommen, sind nach *DIN EN ISO 14341* [14] genormt. Die für höherfeste Stähle zu verwendenden Massivdrähte können *DIN EN ISO 16834* [15] entnommen werden. Die Kennzeichnung der für Schutzgasschweißen verwendeten Massivdrähte erfolgt durch das Kurzzeichen „G“ in Kombination der Streckgrenze sowie weiteren, für den Schweißprozess wichtigen, Werkstoffkennwerten. Die Erläuterung der einzelnen Kurzzeichen können Abb. 2-6 entnommen werden [72], [48].

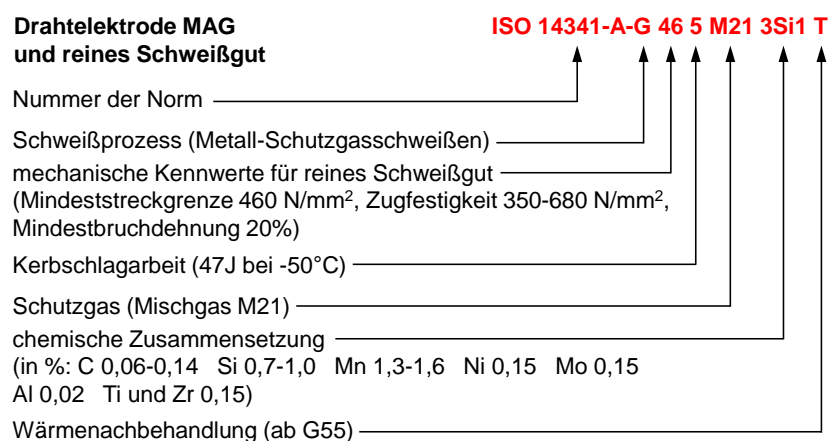


Abb. 2-6: Erläuterung der Bezeichnung eines Massivdrahtes

3 Schweißen von höherfesten Stählen

3.1 Allgemeines

Unter der Bezeichnung Metallschweißen versteht man das Verbinden zweier Stähle unter Verwendung eines artähnlichen Schweißzusatzwerkstoffs. Durch das teilweise Aufschmelzen der Grundwerkstoffe vermischen sich diese im Bereich der Verbindung vollständig mit dem ebenfalls aufgeschmolzenen Zusatzwerkstoff und erzeugen nach dem anschließenden Abkühlen ein Kontinuum. Diese Art der Fügetechnik erfordert somit eine entsprechende Schweißbarkeit von den zu verbindenden Bauteilen, die nicht allein durch die Schweißbeignung des Werkstoffs definiert wird. Zusätzlich muss das Bauteil gewisse Anforderungen an die Schweißsicherheit und Schweißmöglichkeit erfüllen (vgl. Abb. 3-1). Nur durch eine optimale Abstimmung aller drei Eigenschaften zueinander, kann eine sichere und auch wirtschaftliche Schweißnahtverbindung gefertigt werden [47].

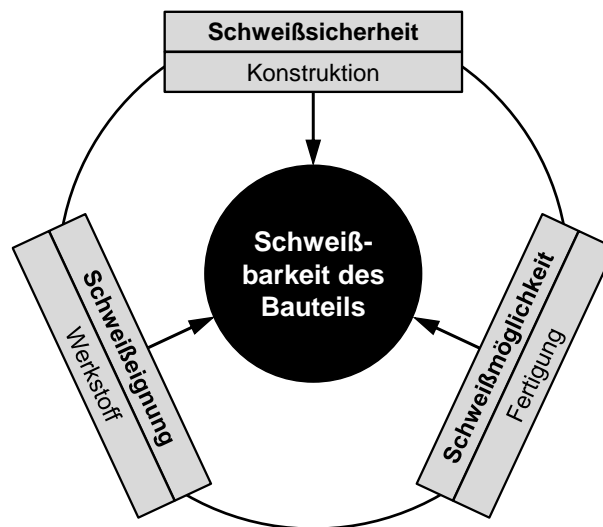


Abb. 3-1: Schweißbarkeit des Bauteils (in Anlehnung an [47])

3.2 Schweißsicherheit und Schweißmöglichkeit

Unter dem Begriff der Schweißsicherheit versteht man die Gewährleistung eines sicheren Betriebsverhaltens, das ausschließlich durch die konstruktive Gestaltung und nicht durch den Werkstoff beeinflusst und daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter erörtert wird. Hingegen beschreibt die Schweißmöglichkeit einen durch die Fertigung bedingten Einfluss auf die

Schweißbarkeit. Dies beinhaltet eine geeignete Schweißnahtvorbereitung, wie sie beispielsweise bei Stumpfnähten nötig ist, die Ausführung der Schweißung sowie eine ggf. notwendige Nachbehandlung der Schweißnaht [47].

3.3 Werkstoffbedingte Schweißung

Die Schweißung ist abhängig vom verwendeten Werkstoff und wird durch dessen chemische Zusammensetzung sowie dessen metallurgische und mechanische Eigenschaften bestimmt. Ein Werkstoff kann als schweißgeeignet eingestuft werden, wenn die durch die Wärmebehandlung infolge des Schweißprozesses stattfindenden Änderungen der mechanisch-technologischen Werkstoffkennwerte innerhalb eines tolerierbaren Bereichs liegen [47].

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Feinkornbaustähle erfüllen aufgrund ihrer Verunreinigungen und der aus dem Herstellungsprozess erzeugten geringen Korngröße diese Kriterien und weisen daher eine äußerst gute Schweißung auf (vgl. Abschnitt 2.1.3). Zusätzlich führt das feine Korn zu einem Anstieg des Verformungsvermögens, der Tragfähigkeit und der Schlagzähigkeit einer Schweißverbindung. Die Feinkörnigkeit bewirkt ebenso eine erhöhte Umwandlungsneigung des Austenits, weshalb sich ein zäheres und rissicheres Gefüge im Bereich der Wärmeeinflusszone einstellt [72]. Die im Bereich dieser Arbeit betrachteten Grundwerkstoffe können daher als allgemein schweißgeeignet eingestuft werden.

3.4 Metallurgische Vorgänge während des Schweißprozesses

3.4.1 Allgemeines

Während des Schweißprozesses unterliegt der Bereich der Naht speziellen Erwärmungs- sowie Abkühlzyklen, die zu entsprechenden Eigenschaftsänderungen führen. Da diese aus metallurgischer und thermischer Sicht sehr schnell und in einem begrenzten Bereich des Werkstücks ablaufen, können die einzelnen Erstarrungsvorgänge und die sich dabei einstellenden Gefüge oftmals nur schwer erfasst werden. Besonders die in dieser Arbeit betrachteten Feinkornbaustähle, weisen eine hohe Umwandlungsfähigkeit auf, die zu wesentlichen Gefüge- und Eigenschaftsänderungen in dem an die Naht angrenzenden wärmebeeinflussten Bereich führen und dadurch die vorhandene Tragfähigkeit eines Bauteils herabsetzen können.

Gerade die Abkühlbedingungen spielen eine große Rolle hinsichtlich des sich ausbildenden Gefüges. Variieren beispielsweise die Abkühlzeiten, kann dies im wärmebeeinflussten Bereich

zu unterschiedlichen Eigenschaften führen. Die Eigenschaften im Schweißgut hängen hingegen vielmehr von der Vermischung des aufgeschmolzenen Grundwerkstoffs mit dem Schweißzusatzwerkstoff ab.

Infolge eines schnellen Abkühlens werden Diffusionsvorgänge stark behindert bzw. unterbunden und somit das Ausbilden von Gleichgewichtsgefüge, wie beispielsweise Austenit, verhindert. Durch eine diffusionskontrollierte Umwandlung stellt sich im wärmebeeinflussten Bereich ein Gefüge aus Perlit und Ferrit ein. Ferrit zeichnet sich durch seine hohe Zähigkeit aus und tritt vor allem an der Schmelzlinie der Naht auf. Als Perlit wird ein lamellenartiges Gefüge bezeichnet, dessen mechanische Eigenschaften durch den Abstand der Lamellen untereinander bestimmt werden. Mit sinkendem Abstand der Lamellen nehmen sowohl Streckgrenze als auch Zähigkeit des perlitischen Gefüges zu.

Nimmt die Abkühlgeschwindigkeit weiter zu, werden die genannten Diffusionsvorgänge immer stärker behindert und ein Gefüge aus Bainit stellt sich ein. Bainit zeichnet sich durch eine erhöhte Festigkeit jedoch geringe Zähigkeit aus. Wird die Abkühlgeschwindigkeit weiter gesteigert, stellt sich schließlich ein martensitisches Gefüge ein. Neben seiner hohen Festigkeit und Härte weist Martensit ein sehr sprödes Verhalten auf, das im Bereich der Naht aufgrund der geringen Zähigkeit oft zu Rissen führen kann [47].

3.4.2 Wärmeeinflusszone

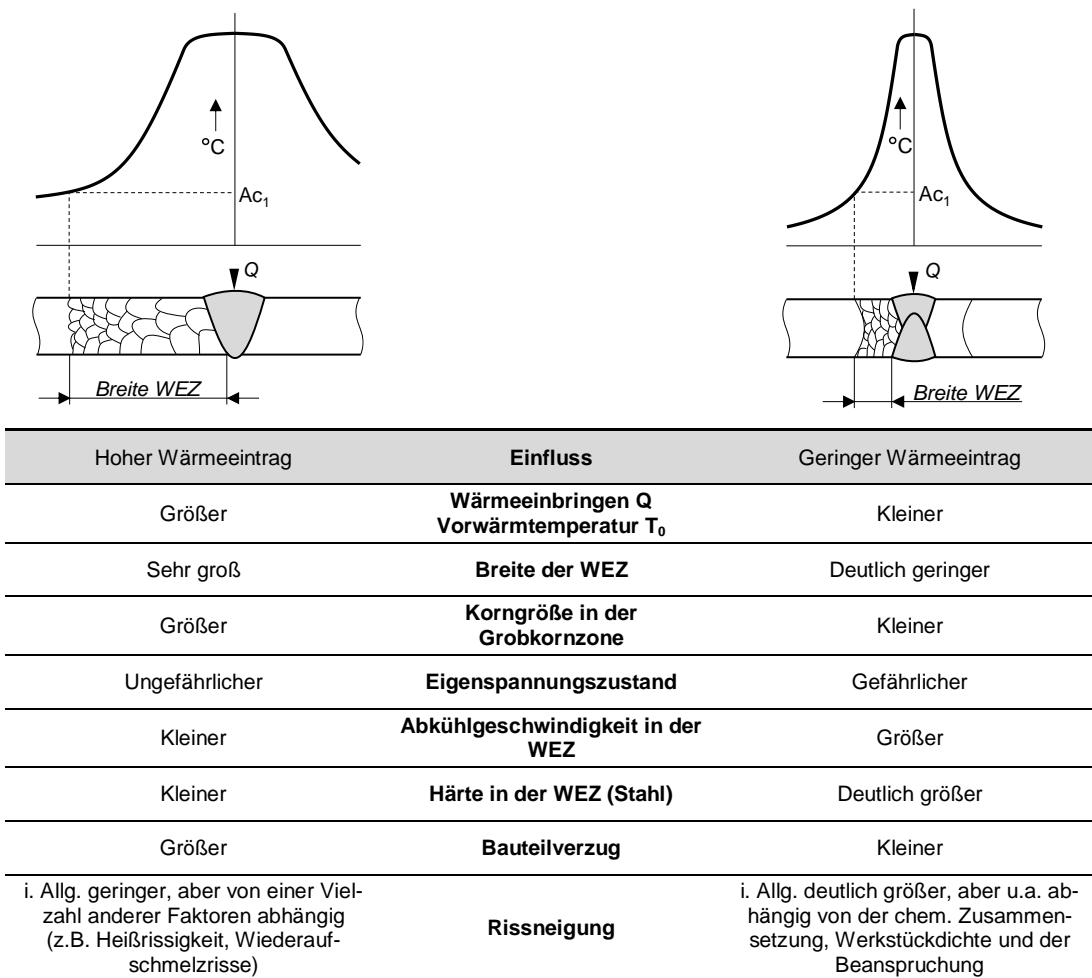
Die zuvor beschriebenen Gefügeumwandlungen im Grundwerkstoff laufen im Bereich einer Erwärmung zwischen der Schmelztemperatur und dem Umwandlungspunkt A_{c1} (ca. 723 °C) ab. Der Bereich im Grundwerkstoff, der einer solchen Erwärmung unterliegt, wird als Wärmeeinflusszone bezeichnet und ist in Abhängigkeit des zunehmenden Abstandes von der Wärmequelle in unterschiedliche lokale Gefügezonen mit jeweils unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften zu untergliedern.

Die Größe der Wärmeeinflusszone und die sich einstellende Abkühlgeschwindigkeit hängen vor allem von der während des Schweißprozesses eingebrachten Wärme ab. Durch den Wärmeeintrag bildet sich rund um die Schweißnaht ein elliptisches Temperaturfeld im Werkstück aus. Quer zur Naht lässt sich die Ausbreitung des Temperaturfeldes anhand einer Gaußschen Verteilung beschreiben. Je größer die dabei eingebrachte Wärme ist, umso breiter bildet sich das beschriebene Temperaturfeld und folglich die Wärmeeinflusszone im Bauteil aus, vgl.

Tab. 3-1. Das sich in den unterschiedlichen Temperaturfeldern einstellende Gefüge wird wiederum durch die jeweils vorliegenden Abkühlbedingungen beeinflusst.

Als weitere Einflussfaktoren hinsichtlich der Ausbildung der Wärmeeinflusszone bzw. der sich dort einstellenden einzelnen Gefügebereiche sind ebenso der Grundwerkstoff, die Geometrie der Naht und die Wärmeleitfähigkeit des zu verschweißenden Werkstücks miteinzubeziehen.

Tab. 3-1: Vereinfachte Darstellung des thermischen Wirkungsgrades auf die Eigenschaften der Wärmeeinflusszone (in Anlehnung an [72])



Durch eine ungeeignete Abstimmung der Einflussnehmenden Parameter besteht die Gefahr der Erzeugung einer unerwünscht großen Wärmeeinflusszone, dessen Gefügezonen zum Teil ungünstige mechanische Eigenschaften aufweisen und dadurch die globale Tragfähigkeit der geschweißten Verbindung herabsetzen [47]. Gerade bei Stumpfnahthverbindungen kann zu einem gewissen Sicherheitsrisiko in Form eines frühzeitigen und somit kritischen Versagens führen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Zonen im Bereich der Wärmeeinflusszone aufgeführt und erläutert. Die beschriebenen Zonen sind ein wichtiger Bestandteil der später durchgeführten numerischen Untersuchungen geschweißter Verbindungen in Abschnitt 6.4 und Abschnitt 8.4.

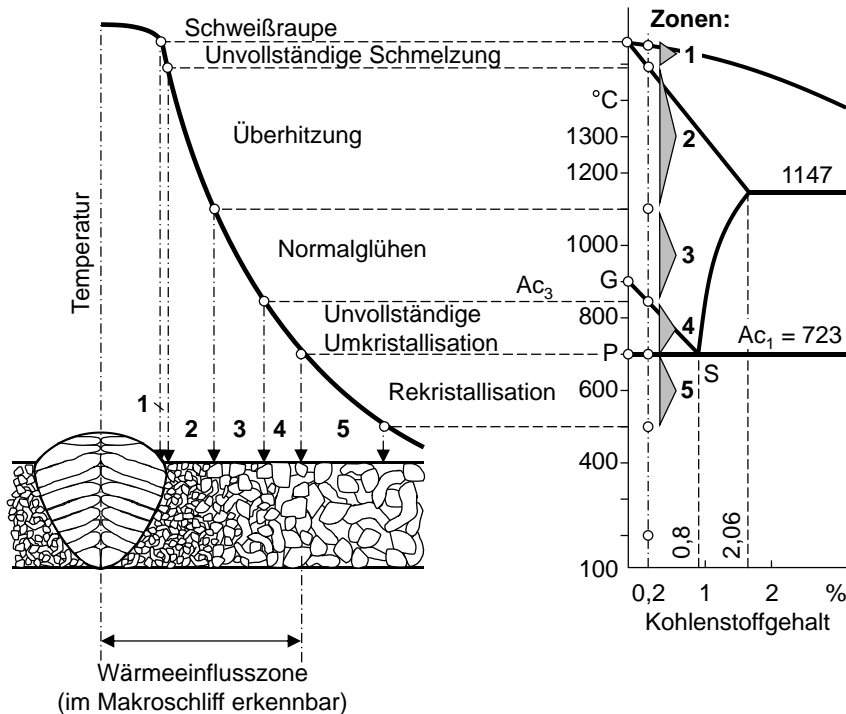


Abb. 3-2: Gefügezonen in der Wärmeeinflusszone von unlegierten und niedriglegierten Stählen (in Anlehnung an [47])

Partiell aufgeschmolzene Zone (Zone 1)

Aufgrund von Temperaturen zwischen der Solidus- und der Liquidustemperatur findet in dem meist nur hundertstel Millimeter breiten Bereich direkt neben der Naht (vgl. Abb. 3-2) ein teilweises Aufschmelzen des Grundwerkstoffs statt. Ein schnelles Abkühlen kann zu submikroskopischen Seigerungen führen, die eine Heißrissneigung begünstigen können [72], [46]. Bedingt durch die geringe Breite ist eine Berücksichtigung in einem FE-Modell nur schwer zu realisieren, weshalb diese in den numerischen Untersuchungen in Abschnitt 6.4 und Abschnitt 8.4 vernachlässigt wird.

Grobkornzone (Zone 2)

Die in Abb. 3-2 dargestellte Grobkornzone (GKZ) zeichnet sich durch ein extremes Kornwachstum, hervorgerufen durch eine Erwärmung auf einen Temperaturbereich über 1100 °C, aus. Die sich dabei einstellende Korngröße hängt von der chemischen Zusammensetzung, der Wärmeeinbringung sowie der Vorwärmtemperatur ab. Infolge des grobkörnigen Gefüges stellt sich eine höhere Härte jedoch ebenfalls eine verringerte Zähigkeit ein [72], [46], [45].

Feinkornzone (Zone 3)

Im Feinkornbereich (FKZ) der Wärmeeinflusszone erfährt der Stahl eine Erwärmung knapp über der A_{c3} -Linie (900 °C bis 1100 °C), die der Normalglühtemperatur entspricht (vgl. Abb. 3-2). Es stellt sich ein feines und zähes Gefüge ein, dessen mechanische Eigenschaften teilweise günstiger sein können als die des reinen Grundwerkstoffs [72], [46], [45].

Interkritisch erhitze Zone (Zone 4)

Im Temperaturbereich der beiden Umwandlungspunkte A_{c3} und A_{c1} in Abb. 3-2 befindet sich die interkritisch erhitze Zone (IKZ). Mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit wächst der Anteil an Martensit, was zu einer Versprödung der Zone führt [72], [46].

Subkritisch erhitze Zone (Zone 5)

Der Bereich des Grundwerkstoffs, der eine Temperatur unterhalb der A_{c1} -Linie (ca. 723 °C) erfährt, findet keine Austenitisierung des Gefüges mehr statt. Die subkritisch erhitze Zone (SKZ) wird daher zwar nicht mehr direkt der Wärmeeinflusszone zugeordnet, jedoch können sich, in Abhängigkeit der Stahlgüte, sogenannte Anlass- und Rekristallisationsvorgänge einstellen. Ein Erwärmen oberhalb der Anlasstemperatur kann zu einem lokalen Erweichen der Zone und infolgedessen zu einer verminderten Festigkeit führen. Überschreitet der erweichte Bereich eine gewisse Höchstbreite, können Stützwirkungen der anliegenden Zonen höherer Festigkeiten nicht mehr greifen und es kommt zu einer Einschnürung der erweichten Zone. Die Zähigkeit wird dabei kaum beeinflusst [72], [46], [45].

3.4.3 Weiche Zone

Neben den bereits erläuterten Zonen innerhalb der Wärmeeinflusszone kann es, gerade bei höherfesten Stählen, zusätzlich zu einer lokalen Erweichung, auch Weiche Zone (WZ) genannt, kommen. Die Erweichung stellt sich vor allem bei Feinkornbaustählen ein, die einen äußerst geringen Kohlenstoffgehalt, wie beispielsweise TM-Stähle (vgl. Abschnitt 2.1.5.3), besitzen. Bedingt durch das schnelle Abkühlen nach dem Schweißprozess können die bereits in Abschnitt 3.4 genannten Diffusionsvorgänge nicht mehr ablaufen. Ein Unterbinden der Diffusionsvorgänge führt normalerweise dazu, dass der Kohlenstoff im Eisengitter zwangsgelöst ist und so ein hartes und sprödes Gefüge aus Martensit erzeugt. Weist jedoch der Stahl einen geringen Kohlenstoffgehalt auf, verringert sich der zwangsgelöste Anteil an Kohlenstoff im Gitter und verhindert somit die Bildung von Martensit, was zu einer lokalen Erweichung führt. In Abhängigkeit der Stahlgüte können die Lage sowie die Breite der lokalen Erweichung variieren. In Abb. 3-3 und Abb. 3-4 sind Härteverläufe (HV2) der Decklagen zweier unterschiedlicher Stahlgüten aufgeführt. Bedingt durch den geringen Kohlenstoffanteil, des für das Kaltumformen geeigneten TM-Stahls S700MC, stellt sich in Abb. 3-3, im Gegensatz zu dem vergüteten Stahl S690QL in Abb. 3-4, ein wesentlich größerer erweichter Bereich innerhalb der Wärmeeinflusszone ein. Bedingt durch eine starke Erweichung besteht die Gefahr, eines frühzeitigen Versagens der geschweißten Verbindung.

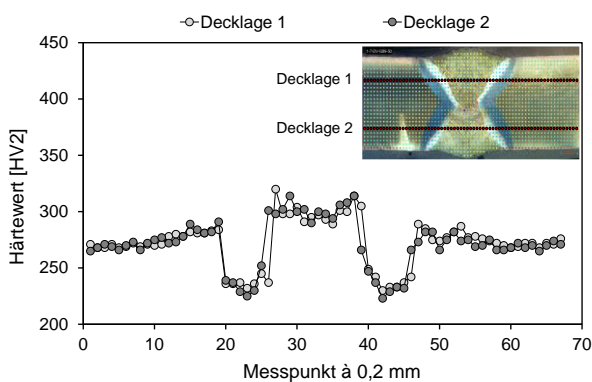


Abb. 3-3: Härteverlauf eines S700MC

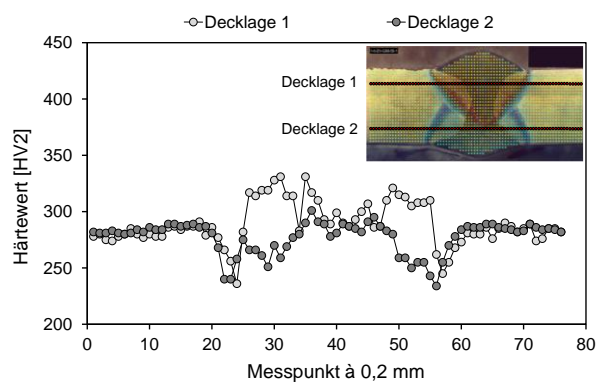


Abb. 3-4: Härteverlauf eines S690QL

3.5 Schweißprozess

3.5.1 Allgemeines

Die im Bauwesen eingesetzten nach DIN EN 10025 genormten höherfesten Stähle können allgemein als schweißgeeignet eingestuft werden. Für den Einsatz höherfester Stähle ist zu berücksichtigen, dass der Schweißprozess entsprechend des zu verschweißenden Grundwerkstoffs individuell angepasst werden muss. Wie bereits in Abschnitt 2.1 erläutert, erhalten höherfeste Feinkornbaustähle ihre hohen Festigkeitswerte sowie ihre guten Zähigkeitseigenschaften aufgrund des feinen Gefüges. Bedingt durch den Einsatz bestimmter Legierungszusätze werden Ausscheidungen erzeugt, die das Kornwachstum des Gefüges von höherfesten Stählen verringert.

Bei höheren Temperaturen besteht jedoch die Gefahr, dass die Ausscheidungen vollständig in Lösung gehen und somit ein verringertes Kornwachstum nicht mehr gewährleistet ist. Infolgedessen kann sich im Bereich der Naht ein unerwünschtes grobkörniges Gefüge mit beeinträchtigten Zähigkeitseigenschaften einstellen. Um dies zu verhindern ist der Schweißprozess hinsichtlich seiner eingebrachten Wärme und der anschließenden Abkühlung an die zu verschweißenden Werkstoffe anzupassen. Dabei sind unter anderem die in Abschnitt 3.4 beschriebenen metallurgischen Vorgänge im wärmebeeinflussten Nahtbereich besonders zu berücksichtigen, die unter anderem die Erzeugung einer unerwünscht großen Weichen Zone bewirken kann.

3.5.2 Streckenenergie E

Ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Schweißprozesses ist die über die Streckenenergie E eingebrachte Energie bzw. Temperatur. Die Streckenenergie E lässt sich aus den Schweißprozessparametern Strom I , Spannung U und Schweißgeschwindigkeit v_s ermitteln und beeinflusst in Kombination mit der Blechdicke t und der eingebrachten Vorwärmtemperatur T_0 die sich einstellende Abkühlgeschwindigkeit [47]. In den späteren Versuchsauswertungen werden daher die sich in der Wärmeeinflusszone einstellenden Eigenschaften in Abhängigkeit der eingebrachten Energie betrachtet und ausgewertet. Bedingt durch eine zu hohe Streckenenergie E kann beispielsweise eine zu langsame Abkühlung der Naht stattfinden, die entsprechend Tab. 3-1 zu einem gröberen Korn und somit zu schlechteren Zähigkeitseigenschaften als auch zu einer verstärkten Erweichung in der Wärmeeinflusszone führt.

Im Gegensatz dazu begünstigt eine zu schnelle Abkühlung, hervorgerufen durch eine geringe Streckenenergie E , die Bildung eines harten Gefüges aus Martensit, was wiederum die Gefahr von Kaltrissen in der Naht erhöht [47]. Da dies jedoch von Grundwerkstoff zu Grundwerkstoff abweichen kann, ist die Streckenenergie E an das jeweilige Verhalten der zu verschweißenden Werkstoffe anzupassen.

Ermitteln lässt sich die Streckenenergie E nach *DIN EN 1011-2* [16] nach Gleichung (3.1).

$$E = \frac{U \cdot I}{v_s} \cdot 1000 \quad (3.1)$$

Dabei ist:

U	Spannung
I	Strom
v_s	Schweißgeschwindigkeit

Zusätzlich ist für die Bestimmung der Wärmeeinbringung Q in die Naht der thermische Wirkungsgrad des Schweißverfahrens über den Beiwert ε zu berücksichtigen. Je nach Literatur weichen die Werte voneinander ab. Die nach Tab. 3-2 berücksichtigten Werte entsprechen den in der Norm *DIN EN 1011-2* [16] festgelegten Werten.

$$Q = \varepsilon \cdot E \quad (3.2)$$

Tab. 3-2: Thermische Wirkungsgrade ε nach *DIN EN 1011-2* [16]

UP	E	MAG
1,00	0,85	0,85

3.5.3 Abkühlkonzept $t_{8/5}$

In Abhängigkeit der Abkühlgeschwindigkeit bildet sich das Gefüge in den in Abschnitt 3.4.2 vorgestellten Bereiche der Wärmeeinflusszone aus und beeinflusst die Eigenschaften der gesamten Schweißnaht, vgl. Tab. 3-1. Infolge einer nicht auf die Verbindung angepassten Abkühlgeschwindigkeit können Gefüge erzeugt werden, die sowohl die Tragfähigkeit als auch Zähigkeit der Verbindung negativ beeinflussen.

Da es sich in der Praxis als äußerst kompliziert erweist die exakte Abkühlgeschwindigkeit zu ermitteln ist man dazu übergegangen, diese anhand der Abkühlzeit $t_{8/5}$ zu erfassen.

Der $t_{8/5}$ - Wert beschreibt die Dauer der Abkühlung im Bereich der Schweißraupe von $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, siehe Abb. 3-5. Speziell dieser Temperaturbereich ist zu betrachten, da hier die wichtigsten Gefügeumwandlungen des Stahls ablaufen [47].

Oftmals werden von den Stahlproduzenten für die jeweiligen Stahlgüten Abkühlzeiten vorgegeben, die zu einer geringen bis keiner Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften in der Wärmeeinflusszone führen. Für den Schweißprozess ist daher die Streckenenergie E so anzupassen, dass die vorgegebenen Abkühlzeiten eingehalten werden können. Unabhängig von der zu verschweißenden Stahlgüte werden hingegen nach *DIN EN 1011-2* [16] für höherfeste unlegierte und niedriglegierte Stähle pauschale Abkühlzeit von 10 s bis 25 s empfohlen.

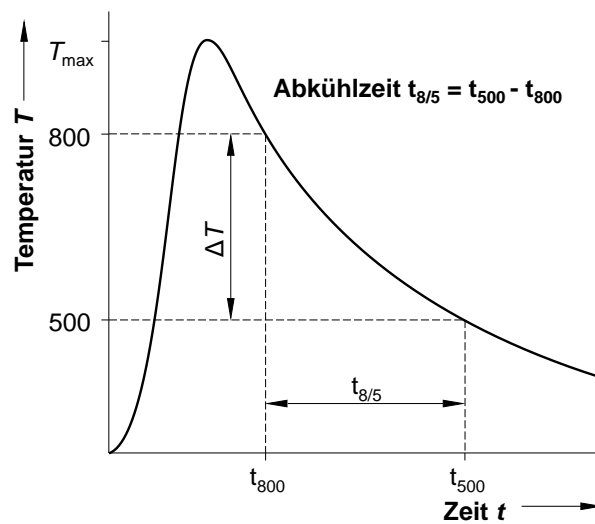
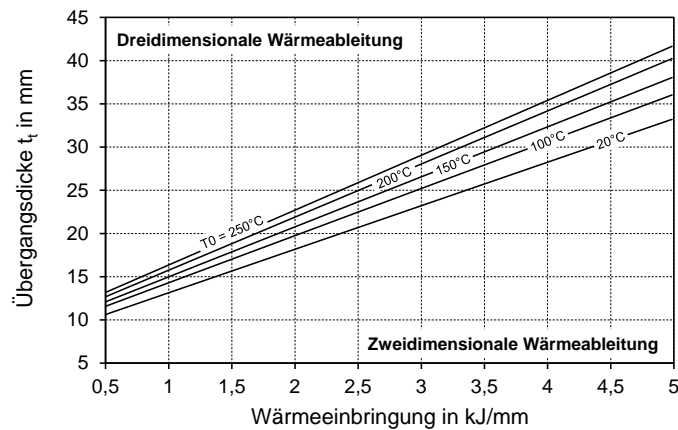


Abb. 3-5: Definition der Abkühlzeit $t_{8/5}$ [72]

Um die sich einstellende Abkühlzeit der Schweißraupen im Vorhinein abschätzen zu können, sind nach Norm *DIN EN 1011-2* [16] empirische Formeln angegeben. Dabei ist zu unterscheiden, ob sich in Abhängigkeit der Blechdicke t der zu verschweißenden Werkstücke eine zweidimensionale oder dreidimensionale Wärmeableitung einstellt. *DIN EN 1011-2* [16] gibt hierfür eine sogenannte Übergangsdicke t_t an, die als Grenzbereich zwischen zweidimensionaler und dreidimensionaler Wärmeableitung festgelegt ist, siehe Abb. 3-6.

Abb. 3-6: Übergangsdicke t_t [16]

Neben der grafischen Ermittlung nach Abb. 3-6 kann die Übergangsdicke t_t mittels der nachstehenden Gleichung ebenfalls bestimmt werden.

$$t_t = \sqrt{(4300 - 4,3 T_0) \cdot \frac{10^5}{(6700 - 5 T_0)} \cdot Q \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0} + \frac{1}{800 - T_0} \right)} \quad (3.3)$$

Dabei ist:

- T_0 Vorwärmtemperatur
 Q Wärmeeinbringen nach Gleichung (3.2)

Die zugehörige Abkühlzeit $t_{8/5}$ für unlegierte und niedriglegierte Stähle kann in Abhängigkeit der Wärmeableitung nach *DIN EN 1011-2* [16] durch die entsprechende Gleichung bestimmt werden.

Zweidimensionale Wärmeableitung:

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 T_0) \cdot 10^5 \cdot \frac{Q^2}{t^2} \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] \cdot F_2 \quad (3.4)$$




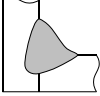
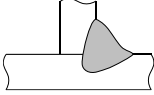
Dreidimensionale Wärmeableitung:

$$t_{8/5} = (6700 - 5 T_0) \cdot Q \cdot \left[\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right] \cdot F_3 \quad (3.5)$$

Dabei ist:

- T_0 Vorwärmtemperatur
- Q Wärmeeinbringen nach Gleichung (3.2)
- F_2, F_3 Formfaktor nach Tab. 3-3

Tab. 3-3: Einfluss der Schweißnahtform auf die Abkühlzeit $t_{8/5}$ nach *DIN EN 1011-2 Tabelle D.1* [16]

Schweißnahtform		Formfaktor	
		F_2 zweidimensionale Wärmeableitung	F_3 dreidimensionale Wärmeableitung
Schweißraupe auf Blech		1	1
Zwischen Schweißraupen in Stumpfnähten		0,9	0,9
Einlagige Kehlnaht an einem Eckstoß		0,9 bis 0,67	0,67
Einlagige Kehlnaht an einem T-Stoß		0,45 bis 0,67	0,67

3.6 Schweißfehler für höherfeste Feinkornbaustähle

3.6.1 Übersicht

Ein weiterer Aspekt, der bei der Schweißung von höherfesten Stählen berücksichtigt werden muss, ist die Erzeugung möglicher Schweißfehler. Hierzu zählen unter anderem Heißrisse, Kaltrisse sowie Terrassenbrüche. Diese können neben den zuvor beschriebenen Einflüssen aus dem sich einstellenden Gefüge, ebenfalls negative Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Naht haben.

3.6.2 Heißrisse

Unter dem Begriff Heißriss werden sowohl Erstarrungs- als auch Wiederaufschmelzungsrisse zusammengefasst. Gerade bei hohen Aufmischungen im Bereich der Naht besteht die Gefahr, dass Mikrolegierungselemente wie Niob in das Schweißgut eindringen und sich dadurch während des Erstarrens kleine Risse im Gefüge ausbilden. Dies konnte bisher nur an Stählen beobachtet werden, die einen sehr hohen Gehalt an Niob aufweisen. Begünstigt wird die Bildung der Erstarrungsrisse zusätzlich durch eine zu hohe Schweißgeschwindigkeit v_s .

Durch den geringen Schwefelgehalt ist die Gefahr von Wiederaufschmelzungsrisse für höherfeste Feinkornbaustähle niedrig. Sie können jedoch durch Mangan und Kohlenstoff begünstigt werden [47].

3.6.3 Kaltrisse

Ein wesentlich größeres Problem beim Schweißen von höherfesten Feinkornbaustählen ist die Gefahr der Entstehung von wasserstoffinduzierten Kaltrissen. Infolge einer ungünstigen Wechselwirkung zwischen Eigenspannungen, dem entstehenden Härtegefüge sowie dem vorliegenden Wasserstoffgehalt können im Bereich der Wärmeeinflusszone Kaltrisse auftreten. Für höherfeste Stähle besteht zusätzlich die Gefahr einer Umlagerung der Kaltrisse in das Schweißgut.

Die Empfindlichkeit der geschweißten Verbindung hinsichtlich der Rissbildung kann anhand des Kohlenstoffäquivalents festgestellt werden. Aus der Literatur liegt eine Vielzahl an unterschiedlichen Gleichungen zur Bestimmung des Kohlenstoffäquivalentes vor.

In Gleichung (3.6) ist das für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten höherfesten Stähle entsprechend den Produktnormen [8], [9], [10] anzusetzende Kohlenstoffäquivalent CEV aufgeführt.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (3.6)$$

Für normalfeste Feinkornbaustähle wird in der Praxis oftmals der „*cracking parameter*“ *PCM* nach *Ito* [51] bevorzugt.

$$PCM = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B + \frac{t}{600} + \frac{H}{6} \quad (3.7)$$

Dabei ist:

<i>C</i>	Kohlenstoff
<i>Mn</i>	Mangan
<i>Mo</i>	Molybdän
<i>Cr</i>	Chrom
<i>Cu</i>	Kupfer
<i>Ni</i>	Nickel
<i>Si</i>	Silicium
<i>V</i>	Vanadium
<i>B</i>	Bor
<i>t</i>	Erzeugnisdicke
<i>H</i>	Wasserstoff

Mit Hilfe des Kohlenstoffäquivalents *CET* kann zwar die Gefahr der Rissbildung bestimmt werden, jedoch sind für die Vermeidung zusätzliche Vorkehrungen im Schweißprozess, wie beispielsweise einer Vorwärmung T_0 , zu treffen. So kann in Abhängigkeit des *CET*-Werts, der Blechdicke t , des Wasserstoffgehaltes HD und des Wärmeeinbringens Q eine benötigte Vorwärmtemperatur T_0 ermittelt werden, die zu einer optimalen Abkühlzeit $t_{8/5}$ und zur Reduzierung der Gefahr von Kaltrissen führt [16], [47]:

$$T_0 = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328 \quad (3.8)$$

Dabei ist:

<i>CET</i>	Kohlenstoffäquivalent
<i>d</i>	Blechdicke
<i>HD</i>	Gehalt an diffusiblem Wasserstoff
<i>Q</i>	Wärmeeinbringen nach Gleichung (3.2)

3.6.4 Terrassenbruch

Als weiterer Schweißfehler an Feinkornbaustählen zählt der Terrassenbruch. Gerade bei gewalzten Blechen besteht aufgrund geringerer Verformbarkeit in Blechdickenrichtung die Gefahr eines Terrassenbruchs. Ausgehend von nichtmetallischen Einschlüssen verläuft der Riss stufen- bzw. terrassenförmig in Dickenrichtung des Bleches. Durch die Einhaltung der aus *DIN EN 1993-1-10* [5] definierten Bedingungen, kann die Gefahr eines Terrassenbruchs reduziert bzw. vernachlässigt werden. Zu berücksichtigen ist hierbei die Wahl eines geeigneten Nahtaufbaus in Kombination eines geeigneten Schweißverfahrens.

4 Bestehende Bemessungskonzepte geschweißter Verbindungen

4.1 Allgemeines

Bisher war der Anwendungsbereich der in der Norm *DIN EN 1993-1-8* [3] festgelegten Regelungen auf Stähle bis zu einer Festigkeit von $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$ begrenzt. Unter Einbezug der zusätzlichen Regelungen nach *DIN EN 1993-1-12* [2] war es möglich, die für normalfeste Stähle entwickelten Konzepte für eine Bemessung von Verbindungen an Stählen höherer Festigkeiten anzuwenden. Um den Einsatz höherfester Stähle in der Praxis voranzubringen und zu etablieren, erfolgte die Überarbeitung und Integrierung der zusätzlichen Regelungen nach *DIN EN 1993-1-12* [2] in den neuen Normentwurf *prEN 1993-1-8* [18]. Dadurch erfasst das Anwendungsgebiet des erarbeiteten Normentwurfs Stähle bis zu einer Festigkeit von $f_y = 700 \text{ N/mm}^2$. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit lag bereits eine Fassung des überarbeiteten Normteils *prEN 1993-1-8* [18] vor. Da die Fassung kurz vor dem offiziellen Zustimmungsprozess steht, werden die Bemessungsregeln für geschweißte Verbindungen entsprechend des vorliegenden Normentwurfs *prEN 1993-1-8* [18] vorgestellt und erläutert.

4.2 Vorgaben an den Schweißzusatzwerkstoff nach *prEN 1993-1-8* [18]

Die Auswahl des Schweißzusatzwerkstoffs unterliegt nach *prEN 1993-1-8 Abschnitt 6.2(2)* [18] gewissen Anforderungen, die an die Festigkeit der zu verschweißenden Grundwerkstoffe geknüpft ist. Differenziert werden muss hierbei in erster Linie zwischen normalfesten und höherfesten Stählen. Für Stähle bis zu einer Güte von S460 ist darauf zu achten, dass die „für das Schweißgut spezifizierten Werte der Streckgrenze, Bruchfestigkeit, Bruchdehnung und Mindestkerbschlagarbeit in der Regel mindestens den spezifizierten Werten für den verschweißten Grundwerkstoff entsprechen“ [18]. Die Einhaltung der Norm ist für die Fertigung einer Schweißnahtverbindung an normalfesten Stählen einfach zu realisieren, da nahezu jeder Schweißzusatzwerkstoff diesen Anforderungen entspricht. Hingegen erweist es sich mit zunehmender Festigkeit des Grundwerkstoffs mitunter schwierig einen gleichwertigen bzw. höherfesten Schweißzusatzwerkstoff zu verwenden. Daher wird im Normentwurf *prEN 1993-1-8* [18] für höherfeste Stähle ab einer Stahlsorte von S460 die Möglichkeit eröffnet, auch Schweißzusatzwerkstoffe mit geringeren Festigkeiten zu verwenden. Es ist jedoch anzumerken, dass der jeweilige Nationale Anhang Einschränkungen in Bezug auf die Verwendung von Schweißzusätzen mit geringerer Güte festlegen darf. Der deutsche Nationale Anhang lag zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht vor, weshalb hier keine weiteren Regelungen genannt werden können.

4.3 Bemessung von Kehlnahtverbindungen

4.3.1 Allgemeines

Nach *prEN 1993-1-8* [18] werden dem Planer zwei alternative Verfahren zur Bemessung einer Kehlnahtverbindung zur Verfügung gestellt:

- das richtungsbezogene Verfahren nach *prEN 1993-1-8 Abschnitt 6.5.3.2* [18] und
- das vereinfachte Verfahren nach *prEN 1993-1-8 Abschnitt 6.5.3.3* [18].

Das richtungsbezogene Verfahren liefert zwar höhere Grenzschweißnahtspannungen, ist jedoch auch als das aufwendigere Verfahren einzustufen. Die Nachweisführung beider Konzepte basiert auf der Zugfestigkeit f_u des Grundmaterials, um dem Versagensverhalten einer Schweißnaht auf Bruch Rechnung zu tragen. Dies ist begründet damit, dass die mit dem Überschreiten der Streckgrenze einhergehenden lokalen plastischen Verformungen in der Schweißnaht für das Verformungsverhalten des Gesamttragwerks in aller Regel unbedeutend sind [76]. Bei der Bemessung einer Mischverbindung zweier unterschiedlicher Stahlgüten, ist die Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile zu verwenden [18], [66]. Da es sich um den Nachweis einer Verbindung unter Berücksichtigung eines Bruchversagens handelt, ist als Teilsicherheitsbeiwert γ_{M2} anzusetzen.

4.3.2 Erläuterung des richtungsbezogenen Verfahrens nach *Abschnitt 6.5.3.2* [18]

Für das richtungsbezogene Verfahren werden die auf die Kehlnaht wirkenden „Kräfte, die je Längeneinheit übertragen werden können, aufgeteilt in Anteile parallel und rechtwinklig zur Längsachse der Schweißnaht und normal und rechtwinklig zur Lage der wirksamen Kehlnahtfläche“ [18]. In Abb. 4-1 sind die sich daraus ergebenden einzelnen Spannungskomponenten dargestellt.

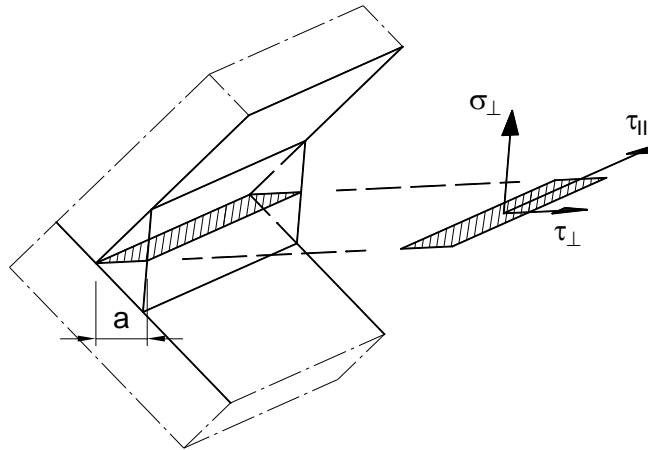


Abb. 4-1: Spannungskomponenten einer Kehlnaht (in Anlehnung an [67])

Es wird unterschieden in:

- Normalspannung senkrecht zur Schweißnahtachse σ_{\perp} ,
- Normalspannung parallel zur Schweißnahtachse σ_{\parallel} ,
- Schubspannung senkrecht zur Schweißnahtachse τ_{\perp} ,
- Schubspannung parallel zur Schweißnahtachse τ_{\parallel} .

Die Normalspannung parallel zur Naht σ_{\parallel} hat, entsprechend dem *Background Document 6.05* [23], keinen signifikanten Einfluss, da diese hauptsächlich über den Querschnitt des Bauteils abgetragen wird und ist daher zu vernachlässigen.

Aus den zu berücksichtigenden Spannungskomponenten aus Abb. 4-1 ist die Vergleichsspannung $\sigma_{v,Ed}$ nach Formel (4.1) zu bestimmen. In Übereinstimmung zur Von-Mises-Vergleichsspannung werden die Schubspannungen mit dem Faktor 3 gewichtet, wodurch sich die in der Naht vorliegende Vergleichsspannung nach *prEN 1993-1-8 Abschnitt 6.5.3.2* [18] berechnet zu:

$$\sigma_{v,Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\parallel}^2 + \tau_{\perp}^2)} \quad (4.1)$$

Dabei ist:

$\sigma_{\perp}, \tau_{\perp}, \tau_{\parallel}$ Spannungskomponenten nach Abb. 4-1

Für den durchzuführenden Nachweis nach *prEN 1993-1-8 Abschnitt 6.5.3.2* [18] ist nach Gleichung (4.2) zu prüfen, ob die nach (4.1) ermittelte Vergleichsspannung unterhalb der berechneten Bemessungsgrenzspannung $\sigma_{v,Rd}$ liegt.

$$\sigma_{v,Rd} \geq \sigma_{v,Ed} \quad (4.2)$$

Ergänzend ist der Nachweis der Begrenzung der Normalspannung σ_{\perp} nach *prEN 1993-1-8 Abschnitt 6.5.3.2* [18] zu führen.

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (4.3)$$

Dabei ist:

f_u	Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M2} = 1,25$

Die in Gleichung (4.2) anzusetzende Bemessungsgrenzspannung $\sigma_{v,Rd}$ ist in Abhängigkeit der verwendeten Werkstoffe zu ermitteln. Zur Differenzierung der Werkstoffkombination aus Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff ist hier der Begriff Mismatch einzuführen. Der Begriff Mismatch beschreibt die in der Realität vorliegenden Zähigkeits- und Festigkeitsunterschiede zwischen dem Grundwerkstoff und der erzeugten Schweißnaht. Hierbei können zum einen Undermatching-Verhältnisse ($f_{y,SZW} < f_{y,GW}$), Matching-Verhältnisse ($f_{y,SZW} = f_{y,GW}$) als auch Overmatching-Verhältnisse ($f_{y,SZW} > f_{y,GW}$) erzeugt werden [64]. Die beschriebenen Verhältnisse werden oftmals auch mit Hilfe des Mismatch-Faktors M nach Gleichung (4.4) erfasst zu:

$$M = \frac{f_{y,SZW}}{f_{y,GW}} \quad (4.4)$$

In Abhängigkeit des verwendeten Grundwerkstoffs und dem Mismatch-Verhältnis des Schweißzusatzwerkstoffs, ist nach *prEN 1993-1-8* [18] die anzusetzende Bemessungsgrenzspannung $\sigma_{v,Rd}$ zu ermitteln. Für Kehlnahtverbindungen von Grundwerkstoffen einer Stahlgüte bis S460 sowie höherfester Stähle kombiniert mit einem Matching-Schweißzusatzwerkstoff, ist die Bemessungsgrenzspannung $\sigma_{v,Rd}$ entsprechend Gleichung (4.5) festzulegen. Hingegen ist

für Kehlnähte an höherfesten Stählen einer Güte > S460, unter Verwendung eines vom Grundwerkstoff abweichenden Schweißzusatzwerkstoffs (Mismatching), die Bemessungsgrenzspannung $\sigma_{v,Rd}$ entsprechend Gleichung (4.7) anzusetzen.

Verbindungen für Grundwerkstoffe der Güte < S460 bzw. Matching-Verbindungen der Güte \geq S460:

Die Bemessungsgrenzspannung $\sigma_{v,Rd}$ ermittelt sich nach folgender Gleichung:

$$\sigma_{v,Rd} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.5)$$

Dabei ist:

f_u	Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
β_w	Korrelationsbeiwert in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs nach Tab. 4-1
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M2} = 1,25$

Der in Gleichung (4.5) anzusetzende Korrelationsbeiwert β_w ist in Abhängigkeit des zu verschweißenden Grundwerkstoffs nach Tab. 4-1 zu wählen. Im Fall der Bemessung von Kehlnahtverbindungen der Festigkeit S235 unterliegt das richtungsbezogene Verfahren einer gewissen Unsicherheit, da durch Einsetzen des Korrelationsbeiwert von $\beta_w = 0,8$ nach Tab. 4-1 $\sigma_{v,Rd} = f_u$ entspricht. Da das Verfahren auch für nicht durchgeschweißte Stumpfnahverbindungen gültig ist (vgl. Abschnitt 4.4.2), ist die Normalspannung σ_{\perp} nach Gleichung (4.3) zu begrenzen. Infolge der Begrenzung der Normalspannung kann der in Gleichung (4.6) abgeleitete Bemessungsgrenzfall berücksichtigt und ein entsprechendes Sicherheitsniveau eingehalten werden.

$$\sigma_{v,Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (0^2 + 0^2)} = \sigma_{\perp} \leq \sigma_{v,Rd} = f_u \quad (4.6)$$

Tab. 4-1: Korrelationsbeiwerte β_w entsprechend des Entwurfs *prEN 1993-1-8 Table 6.1* [18]

Norm und Stahlsorte				Korrelationsbeiwert β_w [-]
EN 10025	EN 10210-1	EN 10219-1	EN 10149-2	
S235 S235 W	S235 H	S235 H		0,8
S275 S275 N/NL S275 M/ML	S275 H S275 NH/NLH	S275 H S275 NH/NLH S275 MH/MLH		0,85
S355 S355 N/NL S355 M/ML S355 W	S355 H S355 NH/NLH	S355 H S355 NH/NLH S355 MH/MLH		0,9
S420 N/NL S420 M/ML	S420 NH/NLH	S420 NH/NLH S420 MH/MLH		0,88
S450				1,05
S460 N/NL S460 M/ML S460 Q/QL/QL1	S460 NH/NLH	S460 NH/NLH S460 MH/MLH		0,85
S500 Q/QL/QL1			S500 MC	0,9
S550 Q/QL/QL1			S550 MC	0,95
S620 Q/QL/QL1			S600 MC	1,05
S690 Q/QL/QL1			S650 MC S700 MC	1,1

Mismatching-Verbindungen an höherfesten Stählen:

Weiterhin wird in der neuen Norm ein Bemessungsmodell für höherfeste Stähle ab einer Stahlgüte von > S460 zur Verfügung gestellt, mit der auch Verbindungen, die eine vom Grundwerkstoff abweichende Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs aufweisen, sicher und wirtschaftlich bemessen werden können. Damit wird die Möglichkeit eröffnet, die Nahtfestigkeit durch höherfeste Schweißzusatzwerkstoffe gezielt zu erhöhen, aber auch, falls das z.B. aus Zähigkeitsgründen gewünscht wird, Nähte mit Unterfestigkeit auszuführen. Für solche Kehlnahtverbindungen ist zusätzlich zur Festigkeit des Grundwerkstoffs auch die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs rechnerisch zu berücksichtigen.

Die Bemessungsgrenzspannung $\sigma_{v,Rd}$ einer Mismatching-Verbindung ist nach folgender Gleichung zu ermitteln:

$$\sigma_{v,Rd} = \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\beta_{w,mod} \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.7)$$

Dabei ist:

$f_{u,PM}$	Zugfestigkeit des schwächeren Grundwerkstoffs
$f_{u,FM}$	Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs nach Tab. 4-2
$\beta_{w,mod}$	Korrelationsbeiwert in Abhängigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs nach Tab. 4-2
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M2} = 1,25$

Die von den Abkühlverhältnissen bzw. von der Geometrie und des Schweißzusatzwerkstoffs abhängende Überfestigkeit oder Unterfestigkeit der Naht geht in Gleichung (4.7) über den Beiwert $\beta_{w,mod}$ in die Bemessung ein. Im Gegensatz zur Bemessungsgrenzspannung für Matching-Verbindungen ist der Korrelationsbeiwert $\beta_{w,mod}$ in Abhängigkeit der Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs zu wählen. Die den verschiedenen Festigkeitsklassen zugeordneten Korrelationsbeiwerte und anzusetzenden Zugfestigkeiten der Schweißzusatzwerkstoffe $f_{u,FM}$ können Tab. 4-2 entnommen werden.

Tab. 4-2: Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,mod}$ in Abhängigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs nach prEN 1993-1-8 Table 6.2 [18]

Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs	42	46	69	89
Bruchfestigkeit $f_{u,FM}$ [N/mm ²]:	500	530	770	940
Korrelationsbeiwert $\beta_{w,mod}$ [-]:	0,89	0,85	1,09	1,19

4.3.3 Erläuterung des vereinfachten Verfahrens nach Abschnitt 6.5.3.3 [18]

Mit dem vereinfachten Verfahren wird die resultierende Kraft $F_{w,Ed}$ aller auf die Kehlnahtfläche wirkender Kräfte mit der aufnehmbaren Tragfähigkeit $F_{w,Rd}$ der Schweißnaht je Längeneinheit verglichen. Die Krafrichtung wird, im Gegensatz zum richtungsbezogenen Verfahren, nicht berücksichtigt.

Nach *prEN 1993-1-8 Abschnitt 6.5.3.3* [18] ist für das vereinfachte Verfahren folgender Nachweis (4.8) zu führen:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a \quad (4.8)$$

Dabei ist:

$f_{vw,d}$	Bemessungswert der Scherfestigkeit der Schweißnaht
a	Nahtdicke

Auch für das vereinfachte Verfahren ist zu unterscheiden, ob es sich um eine Matching-Verbindung höherfester Stähle bzw. einer Verbindung von Grundwerkstoffen geringer S460 oder eine Mismatching-Verbindung an höherfesten Stählen handelt. Dementsprechend ist der Bemessungswert der Scherfestigkeit der Schweißnaht $f_{vw,d}$ nach Gleichung (4.9) bzw. (4.10) festzulegen und für die aufnehmbare Tragfähigkeit $F_{w,Rd}$ anzusetzen.

Verbindungen für Grundwerkstoffe der Güte < S460 bzw. Matching-Verbindungen der Güte \geq S460:

Die Scherfestigkeit der Schweißnaht ermittelt sich zu:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.9)$$

Dabei ist:

f_u	Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
β_w	Korrelationsbeiwert nach Tab. 4-1
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M2} = 1,25$

Mismatching-Verbindungen an höherfesten Stählen:

Die Scherfestigkeit der Schweißnaht ermittelt sich zu:

$$f_{vw,d} = \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,mod} \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.10)$$

Dabei ist:

$f_{u,PM}$	Zugfestigkeit des schwächeren Grundwerkstoffs
$f_{u,FM}$	Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs nach Tab. 4-2
$\beta_{w,mod}$	Korrelationsbeiwert in Abhängigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs nach Tab. 4-2
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M2} = 1,25$

4.4 Bemessung von Stumpfnahverbindungen**4.4.1 Überblick**

In Abhängigkeit der Fugenvorbereitung und des Schweißprozesses können Stumpfnähte als voll durchgeschweißte oder als nicht durchgeschweißte Naht gefertigt werden, siehe Abb. 4-2. Die Einordnung der zu betrachtenden Stumpfnah in durchgeschweißte oder nicht durchgeschweißte ist essentiell, da nach *prEN 1993-1-8 Abschnitt 6.7* [18] für den jeweiligen Nahttyp unterschiedliche Bemessungskonzepte greifen.

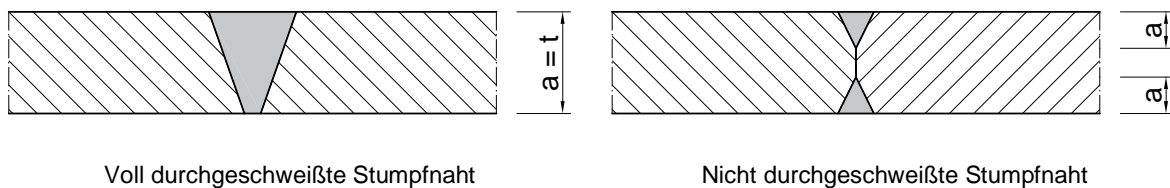


Abb. 4-2: Unterscheidung einer durchgeschweißten und einer nicht durchgeschweißten Stumpfnah [58]

4.4.2 Bemessung einer nicht durchgeschweißten Stumpfnah nach **Abschnitt 6.7.2** [18]

Die Tragfähigkeit einer nicht durchgeschweißten Stumpfnah ist nach *prEN 1993-1-8* [18] gemäß einer Kehlnah mit tiefem Einbrand zu ermitteln. Somit ist auch hier eine Unterscheidung in der Ermittlung der Bemessungsgrenzspannung zwischen Matching-Verbindungen und Mismatching-Verbindungen von Stumpfnähten höherfester Stähle vorzunehmen, vgl. Abschnitt 4.3.

4.4.3 Bemessung einer durchgeschweißten Stumpfnah nach **Abschnitt 6.7.2** [18]

Wird ein Schweißzusatzwerkstoff mit gleicher (Matching) oder höherer Festigkeit (Overmatching) als die des Grundwerkstoffs verwendet, ist nach *prEN 1993-1-1* [19] ein Nachweis im Querschnitt des angeschlossenen Bauteils ausreichend (vgl. Abb. 4-3). Als Querschnittsdicke t ist in Gleichung (4.11) die geringere Dicke der beiden angeschlossenen Bauteile anzusetzen.

$$N_{Ed} \leq \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{M0}} \quad (4.11)$$

Dabei ist:

f_y	Streckgrenze des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
A	Querschnittsfläche $A = t \cdot l_{eff}$
γ_{M0}	Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M0} = 1,0$

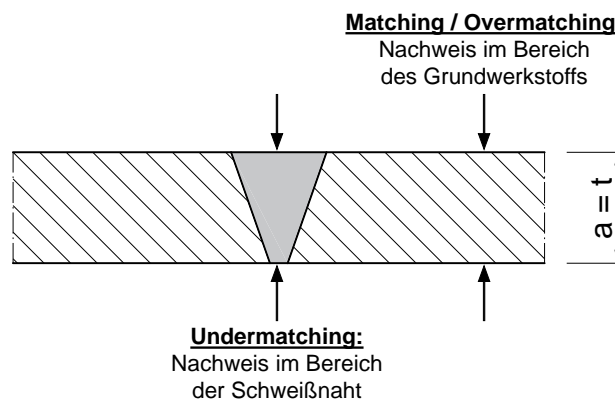


Abb. 4-3: Bemessung einer durchgeschweißten Stumpfnah nach *prEN 1993-1-8* [18]

Da nach *prEN 1993-1-8* [18] für höherfeste Stähle die Verwendung eines Schweißzusatzwerkstoffs mit geringerer Festigkeit erlaubt wird, ist in der Norm eine ergänzende Regelung zur Bemessung von Undermatching-Verbindungen aufgenommen worden. Diese beinhaltet, dass Stumpfnähte an höherfesten Stählen auf Basis der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs nach Tab. 4-2 zu bemessen sind, wenn diese mit einem Schweißzusatzwerkstoff geringerer Festigkeit gefertigt werden. Der Nachweis ist entsprechend Abb. 4-3 im Bereich der Schweißnaht zu führen, ein genaues Vorgehen wird jedoch nicht angegeben.

5 Ergebnisse bereits abgeschlossener Untersuchungen an Kehlnahtverbindungen

5.1 Allgemeines

Der neue Normteil *prEN 1993-1-8* [18] enthält ein von *Rasche* [67] speziell auf Kehlnahtverbindungen von höherfesten Stählen, geschweißt mit einem unter- oder überfesten Schweißzusatzwerkstoff (Mismatching-Verbindung), angepasstes Bemessungskonzept, das bereits in Abschnitt 4.3 vorgestellt wurde.

Die Herleitung des Bemessungskonzepts für Mismatching-Verbindungen an höherfesten Stählen, basiert auf den Ergebnissen mehrerer experimenteller und numerischer Untersuchungen an Kehlnahtverbindungen. Für ein Verständnis des von *Rasche* [67] entwickelten Konzepts werden im Folgenden die zugrunde gelegten Forschungsvorhaben und die daraus hervorgehenden Versuchsergebnisse zusammengefasst. Des Weiteren werden bereits durchgeführte und für die späteren Auswertungen herangezogene Untersuchungen an Mischverbindungen zur Überprüfung der Anwendbarkeit des Konzepts vorgestellt.

5.2 Forschungsvorhaben *FOSTA P652* [59]

5.2.1 Zielsetzung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens *FOSTA P652* [59] wurde das vorhandene Tragfähigkeitspotenzial von geschweißten Kehlnahtverbindungen höherfester Stähle untersucht. Mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen sollte eine Überprüfung bzw. Anpassung der damals gültigen Bemessungsregeln nach DIN EN 1993-1-8:2005-07 erfolgen, da diese nur eine begrenzte Ausnutzung des Tragfähigkeitspotenzials geschweißter Verbindungen höherfester Stähle ermöglichten. Dies erforderte eine detaillierte Untersuchung des Tragverhaltens geschweißter Kehlnahtverbindungen höherfester Stähle, sowie die Identifizierung der auf die Tragfähigkeit nehmenden Einflussparameter. Anhand eines umfangreichen Versuchsprogramms sollte, neben dem Einfluss unterschiedlicher Festigkeitskombinationen von Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff, ebenfalls die Einflüsse aus der geometrischen Abmessung der Naht und der fertigungsspezifischen Prozessparametern betrachtet werden. Ziel des Forschungsvorhabens war es, durch die Entwicklung angepasster Bemessungskonzepte einen ökonomischen Einsatz höherfester Stähle für geschweißte Verbindungen zu ermöglichen und dadurch einen erweiterten Anwendungsbereich zu forcieren.

5.2.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm umfasste Tragfähigkeitsuntersuchungen an nicht durchgeschweißten Flanken- und Stirnkehlnähten. Zur Absicherung der Versuchsergebnisse wurden zusätzliche Untersuchungen an nicht durchgeschweißten Stumpfnähten durchgeführt. Der Hauptanteil der Traglastuntersuchungen erfolgte an rein auf Abscheren beanspruchter Flankenkehlnähte, da diese eine geringere Tragfähigkeit als Stirnkehlnähte aufweisen und dadurch für die Entwicklung eines angepassten Bemessungskonzepts für Kehlnähte maßgebend sind [23], [22]. Es wurden insgesamt 126 Flankenkehlnähte, davon 25 Mischverbindungen, und 52 Stirnkehlnähte, davon 11 Mischverbindungen, sowie 96 Stumpfnähte geprüft. Die Differenzierung zwischen Verbindungen gleicher Stahlgüten und Verbindungen unterschiedlicher Stahlgüten (Mischverbindungen) ist für die spätere statistische Auswertung der Versuchsergebnisse in Abschnitt 6.5 erforderlich. Gefertigt wurden die Versuchskörper aus normalfestem Stahl der Güte S355J2 und aus höherfesten Stählen der Güte S460M/ML und S690Q/QL. Das Schweißen erfolgte teilmechanisiert in mehreren Stahlbauunternehmen.

5.2.3 Ergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen an nicht durchgeschweißten Flankenkehlnähten, Stirnkehlnähten und nicht durchgeschweißten Stumpfnähten zeigten ein einheitliches Bruchverhalten infolge eines Versagens im Bereich der Schweißnaht. Da die Tragfähigkeit der Flankenkehlnähte im Mittel 15 % unter der Tragfähigkeit der Stirnkehlnähte lag, wurden diese als maßgebend für die Beschreibung des Tragverhaltens von Kehlnähten angesehen. Die aus den Versuchsergebnissen der Flankenkehlnähte getroffenen Aussagen wurden auf ihre Gültigkeit anhand der Ergebnisse der Stirnkehlnähte und Stumpfnähte überprüft.

Durch die Versuchsergebnisse der Flankenkehlnähte war es möglich, die auf die Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen nehmenden Einflussgrößen zu ermitteln. Es konnte festgestellt werden, dass die der Norm *DIN EN 1993-1-12* [2] unabhängig vom Schweißzusatzwerkstoff zugrunde gelegte proportional zur Festigkeit des Grundwerkstoffs zunehmende globale Tragfähigkeit von Verbindungen höherfester Stähle nicht vorliegt. Die in Abb. 5-1 aufgeführten Versuchsdaten zeigen [58] eine höher Zunahme der Tragfähigkeit von bis zu 20 % von Verbindungen mit S355J2 (G42) hin zu Verbindungen mit S460M (G46). Die Steigerung der Tragfähigkeit von S460 (G46) auf die Stahlgüte S690 (G69) fällt mit 5 % wesentlich geringer aus.

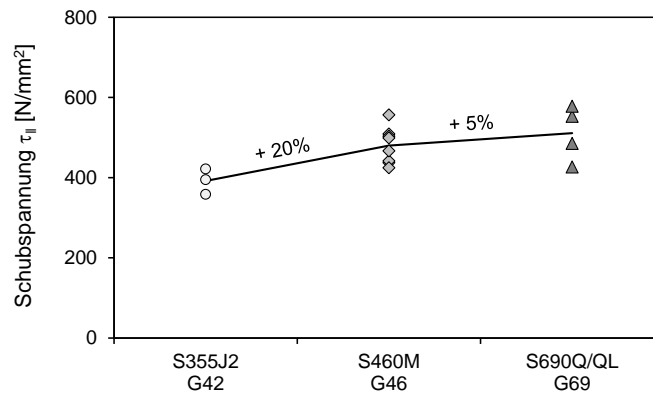


Abb. 5-1: Einfluss der Stahlgüte auf die Tragfähigkeit einer Flankenkehlnaht [59]

Weiterhin lagen die Tragfähigkeiten der Matching-Verbindungen an Stählen der Güte S460 (G46) weitaus höhere, als die anhand der damals gültigen Norm DIN EN 1993-1-8:2005-07 ermittelten Bemessungsgrenzspannungen. Die daraus abgeleitete Tragfähigkeitsdifferenz von ca. 15 % ermöglichte eine Anpassung des in der Norm DIN EN 1993-1-8:2005-07 festgelegten Korrelationsbeiwerts von $\beta_w = 1,0$ auf $\beta_w = 0,85$ und wird bereits im derzeit gültigen Nationalen Anhang [4] geführt.

Die Ergebnisse der Tragfähigkeitsuntersuchungen an Matching-Verbindungen der Stahlgüte S690 (G69) zeigten, dass der bisher angesetzte Korrelationsbeiwert nach *DIN 1993-1-12* [2] mit $\beta_w = 1,0$ tendenziell eher als unsicher zu bewerten ist. Eine genaue Aussage konnte jedoch im Rahmen des Forschungsvorhabens, aufgrund des äußerst großen Streufeldes, nicht getroffen werden.

Signifikante Einflüsse aus der Nahtdicke sowie aus der Blechdicke ließen sich bei keiner Verbindung nachweisen. Lediglich ein leichter Einfluss aus der Nahtlänge wiesen Verbindungen der Güte S690 (G69) auf, siehe Abb. 5-2. Mit zunehmender Nahtlänge, bzw. zunehmenden L/a Verhältnis, kann hier eine abnehmende Tragfähigkeit beobachtet werden. Im Gegensatz dazu nehmen die Tragfähigkeiten in Abb. 5-2 von Verbindungen der Stahlgüte S460 (G46) bis zu einem Verhältnis von $L/a = 150$ leicht zu.

Aufgrund des Versagens im Nahtbereich hängt die Tragfähigkeit einer Kehlnahtverbindung maßgebend von der im Schweißgut vorliegenden Festigkeit ab. Diese wiederum wird von der Aufmischung zwischen Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff beeinflusst, vgl. Abschnitt 2.2.1. Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen konnte hierbei als Haupteinfluss die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs identifiziert werden. Eine Steigerung der Festigkeit

des Schweißzusatzwerkstoffs führte zu höheren Tragfähigkeiten von Verbindungen gleicher Stahlgüten sowie für Mischverbindungen. Ein Anstieg proportional zur Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs konnte jedoch nicht festgestellt werden.

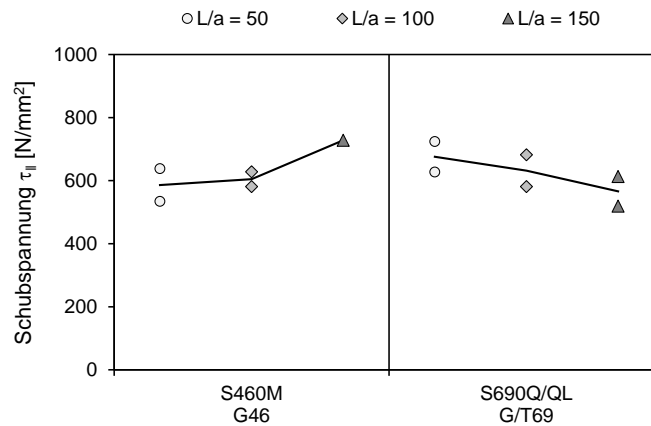


Abb. 5-2: Einfluss der Nahtlänge auf die Tragfähigkeit einer Flankenkehlnaht [59]

Als letzter wesentlicher Einflussparameter ist der Energieeintrag, bzw. die resultierende Abkühlgeschwindigkeit, zu nennen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens ließ sich anhand der Versuche an nicht durchgeschweißten Stumpfnähten feststellen, dass ein höherer Energieeintrag zu einer Verringerung der Tragfähigkeit von Verbindungen der Güte S690 führen kann. Für Stähle der Güte S460 konnte dies nicht beobachtet werden.

5.3 Zusatzuntersuchungen [55]

5.3.1 Zielsetzung

Anlass der *Zusatzuntersuchungen* [55] war das aus dem im Forschungsvorhaben *FOSTA P652* [59] ermittelte Tragverhalten der Kehlnahtverbindungen an höherfesten Stählen der Güte S690. Aufgrund einer relativ großen Streuung der Versuchsergebnisse konnte im Vergleich zur bauaufsichtlichen Zulassung *Z-30-1.1* [21] und der DIN EN 1993-1-8:2005-07 keine eindeutige Aussage über eine erkennbare Steigerung der Tragfähigkeit der Verbindungen abgeleitet werden. Die geplanten *Zusatzuntersuchungen* [55] dienten daher der Absicherung des sich im Forschungsvorhaben *FOSTA P652* [59] abzeichnenden Tragverhaltens von Kehlnahtverbindungen höherfester Stähle der Güte S690. Untersucht werden sollten die auf die Tragfähigkeit nehmenden Einflussfaktoren aus dem Mechanisierungsgrad, der Versuchskörper-

form und der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs. Da nur eine geringe Anzahl an Versuchen durchgeführt wurde, dienen die Ergebnisse lediglich der Bestätigung der betrachteten Einflüsse.

5.3.2 Versuchsprogramm

Insgesamt wurden 8 Flankenkehlnähte an höherfestem Stahl der Güte S690Q und eine Flankenkehlnaht an normalfestem Stahl der Güte S355J2 gefertigt. Mischverbindungen waren im Versuchsprogramm nicht enthalten. Um Einflüsse aus dem Fertigungsprozess ausschließen zu können und dadurch die im vorangegangenen Vorhaben hervorgerufene starke Streuung zu vermeiden, wurden die Versuche ausschließlich vollmechanisiert geschweißt. Die Versuchskörperform wurde so gewählt, dass der zu prüfende Nahtbereich einer intakten und geometrisch homogenen Schweißnaht entsprach. Infolge einer mechanischen Nachbearbeitung konnten die vorliegenden fehlerhaften Nahtanfangs- und Nahtendbereiche entfernt werden, was zu einer weiteren Reduzierung der Streugröße führte. Die daraus hervorgehende Geometrie der Versuchskörper der Flankenkehlnähte wurde ebenfalls für die in Kapitel 6 vorgestellten Untersuchungen an Mischverbindungen verwendet, vgl. Abb. 6-2.

5.3.3 Ergebnisse

Das Versagen der Flankenkehlnähte trat, wie bereits im Forschungsvorhaben *FOSTA P652* [59] beobachtet, ausschließlich im Bereich der Naht auf. Daraus ist abzuleiten, dass die globale Tragfähigkeit einer Kehlnahtverbindung von den im Schweißgut vorliegenden Eigenschaften, die wiederum durch den aufgeschmolzenen Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff bestimmt werden, abhängt. Festgestellt werden konnte auch hier, dass die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs einen wesentlich höheren Einfluss auf die Tragfähigkeit hat. Bestätigt werden konnte dies durch den Vergleich der ermittelten Tragfähigkeiten an Verbindungen unterschiedlicher Schweißzusatzwerkstoffe, siehe Abb. 5-3. Durch die Verwendung eines Schweißzusatzwerkstoffs mit höherer Festigkeit nahm die Tragfähigkeit der Verbindung zu.

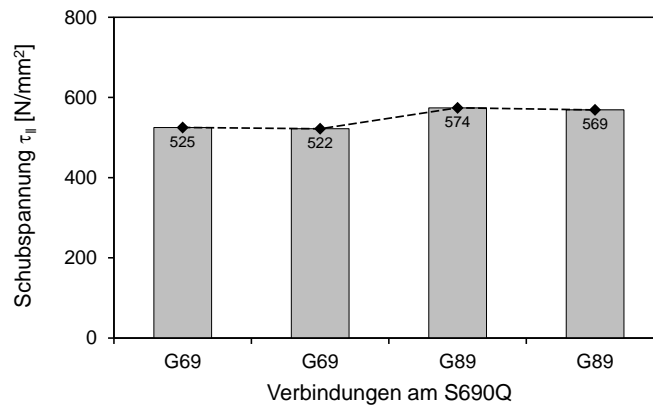


Abb. 5-3: Einfluss der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Tragfähigkeit einer Flankenkehlnaht [55]

Untersuchungen an Schweißnähten, die mit einer variierenden Anzahl von Lagen geschweißt wurden, wiesen geringe Abweichungen in der Tragfähigkeit auf. Mit zunehmender Lagenanzahl nahm die Tragfähigkeit nur leicht ab. Der Einfluss aus der Abkühlzeit konnte bei den Kehlnahtverbindungen als gering eingestuft werden.

5.4 Forschungsvorhaben *FOSTA P812* [54]

5.4.1 Zielsetzung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens *FOSTA P812* [54] sollten weitere ergänzende Untersuchungen hinsichtlich des Tragverhaltens von Kehlnahtverbindungen höherfester Stähle der Güte S690 durchgeführt werden. Der Fokus lag dabei auf einer gezielten Untersuchung der im vorangegangenen Forschungsvorhaben *FOSTA P652* [59] und den *Zusatzuntersuchungen* [55] festgestellten Bedeutung des Schweißzusatzwerkstoffs für die globale Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen.

5.4.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm zielte auf eine systematische Untersuchung des Einflusses der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Tragfähigkeit einer Kehlnahtverbindung ab. Ergänzend wurden Untersuchungen hinsichtlich eines möglichen Einflusses aus den geometrischen Abmessungen, den Schweißparametern und der Krafrichtung durchgeführt. Um die Streuung der Versuchsergebnisse gering zu halten, waren unerwünschte Randbedingungen aus dem Schweißprozess zu vermeiden. Deshalb wurden ausschließlich vollmechanisierte

Kehlnähte gefertigt und dessen fehlerhafte Nahtanfangs- und Nahtendbereiche mechanisch entfernt. Geprüft wurden insgesamt 56 Flankenkehlnähte und 22 Stirnkehlnähte an Stählen der Sorte S460, S690 und S700. Mischverbindungen wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens *FOSTA P812* [54] nicht untersucht.

5.4.3 Ergebnisse

Die Auswertung der Versuchsergebnisse bestätigte den bereits im Vorhaben *FOSTA P652* [59] dokumentierten geringen Einfluss der Nahtlänge bis zu einem Verhältnis von $L/a = 150$ auf die Tragfähigkeit einer Kehlnaht höherfester Stähle. Dies führte zu einer Anhebung der in der derzeit gültigen Norm *DIN 18800-1* [1] angegebenen maximalen Nahtlänge von $L/a = 50$ auf $L/a = 150$, ab der eine Abminderung der Tragfähigkeit aufgrund zu hoher Differenzen zwischen tatsächlichem und angenommenen Spannungsverlauf vorzunehmen ist für Kehlnahtverbindungen an Stählen der Güte S460. Für Verbindungen an Stählen der Güten $> S460$ wurde die Begrenzung der maximalen Nahtlänge von $L/a = 50$ beibehalten.

Ebenfalls bestätigt werden konnte der in den *Zusatzuntersuchungen* [55] festgestellte leichte Einfluss aus der Anzahl der in der Schweißnaht vorhandenen Lagen. Aus den Untersuchungen ging hervor, dass eine zunehmende Anzahl an Lagen die globale Tragfähigkeit der Verbindung leicht herabsetzt.

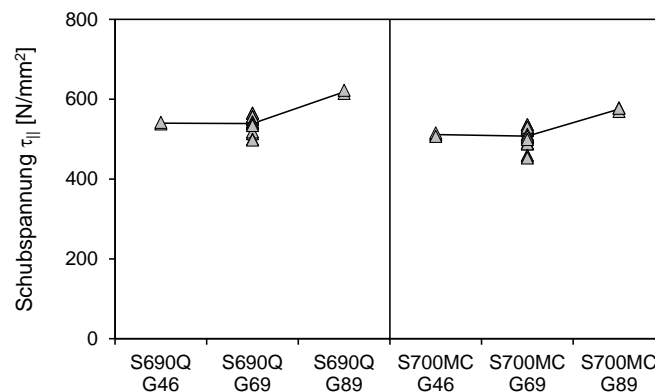


Abb. 5-4: Einfluss der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Tragfähigkeit einer Flankenkehlnaht [54]

Als weiterer Einfluss auf die Tragfähigkeit konnte erneut die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs identifiziert werden, vgl. Abb. 5-4. Anhand einer systematischen Untersuchung zeigte sich, dass beispielsweise die Tragfähigkeit einer Undermatching-Verbindung

(SZW < GW) die Festigkeit des Grundwerkstoffs nicht erreicht. Hingegen ermöglichte eine Overmatching-Verbindung (SZW > GW) eine Steigerung der Tragfähigkeit. Ebenfalls konnte anhand der Versuchsergebnisse bestätigt werden, dass die Festigkeit des Schweißzusatzes einen wesentlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit einer Kehlnahtverbindung hat.

5.5 Dissertation *Rasche* [67]

5.5.1 Allgemeines

Wie bereits in den Abschnitten 4.3.2 und 4.3.3 vorgestellt, ist in Abhängigkeit der Kombination aus Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff, nach *prEN 1993-1-8* [18] die für den Nachweis anzusetzende Bemessungsgrenzspannung für Kehlnahtverbindungen höherfester Stähle zu ermitteln.

Die Erweiterung bzw. Entwicklung der Bemessungskonzepte für Matching- und Mismatching-Verbindungen höherfester Stähle erfolgte im Rahmen der Dissertation von *Rasche* [67] auf Basis der Ergebnisse der in den vorherigen Abschnitten erläuterten Forschungsvorhaben *FOSTA P652* [59], *FOSTA P812* [54] und der *Zusatzuntersuchungen* [55]. Zusätzlich erweiterte *Rasche* [67] den Datenpool aus Versuchsergebnissen aus Tragfähigkeitsuntersuchungen an Kehlnahtverbindungen höherfester Stähle mit den aus der Literatur [22], [53], [41], [65], [69] vorliegenden Daten. Insgesamt lagen *Rasche* [67] 263 Versuchsergebnisse vor, um mit Hilfe von statistischen Auswertungen eine Verbesserung der bereits bestehenden Bemessungsregeln, sowie ein angepasstes Bemessungskonzept für Kehlnähte an höherfesten Stählen zu erarbeiten.

5.5.2 Erweiterung der bestehenden Bemessungsregeln nach *DIN EN 1993-1-8* [3]

Das aufgeführte Konzept für Matching-Verbindungen nach *prEN 1993-1-8* [18] entspricht dem bereits in der derzeit gültigen Norm *DIN EN 1993-1-8* [3] angegebenen Verfahren ergänzt für eine Anwendung für höherfeste Stähle.

Die Erweiterung des Anwendungsbereichs des vorliegenden Bemessungskonzepts auf höherfeste Stähle bis einschließlich einer Stahlgüte S700 erforderte eine versuchsbasierte Ermittlung der für das richtungsbezogene sowie das vereinfachte Verfahren anzusetzenden Korrelationsbeiwerte β_w . Anhand einer statistischen Auswertung der Tragfähigkeiten von Kehlnahtverbindungen mit passendem Schweißzusatzwerkstoff war es *Rasche* [67] möglich, einen ver-

besserten Korrelationsbeiwert β_w für Matching-Verbindungen an Stählen der Güte S460, sowie einen auf Verbindungen der Güte S690 angepassten Korrelationsbeiwert β_w zu ermitteln. Die überarbeiteten Beiwerte für die Stähle S460 ($\beta_w = 0,85$) und S690 ($\beta_w = 1,10$) sind im Entwurf *prEN 1993-1-8* [18] bereits ergänzt worden (vgl. Tab. 4-1).

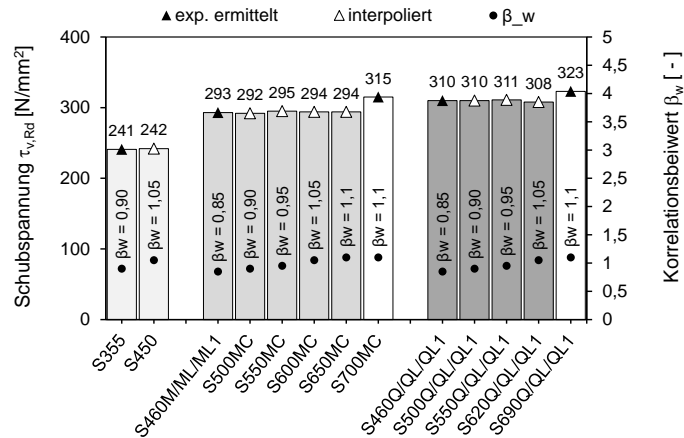


Abb. 5-5: Ermittelte Korrelationsbeiwerte für das richtungsbezogene Verfahren nach *prEN 1993-1-8* [18]

Fehlende Korrelationsbeiwerte für Kehlnahtverbindungen höherfester Stähle, für die keine experimentell ermittelten Daten vorlagen, wurden anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse von Flankenkehlnähten der nächst niedrigeren Stahlgüte abgeschätzt (vgl. Abb. 5-5).

5.5.3 Neues Bemessungskonzept für höherfeste Stähle nach *prEN 1993-1-8* [18]

Zusätzlich entwickelte *Rasche* [67] ein angepasstes Bemessungsmodell speziell für Mismatching-Verbindungen höherfester Stähle, das neben dem Grundwerkstoff ebenfalls die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs berücksichtigt. In den vorangegangenen Abschnitten 5.2, 5.3 und 5.4 wurden bereits die aus den Forschungsvorhaben abgeleiteten, auf die Tragfähigkeit einer Kehlnaht Einfluss nehmenden Parameter vorgestellt. Dazu zählen die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs, die Nahtgeometrie sowie die Vermischung der Werkstoffe im Nahtbereich. Die für die Tragfähigkeit einer Kehlnaht maßgebenden Einflüsse galt es in einem wirtschaftlichen Bemessungskonzept zu erfassen und zu berücksichtigen. Daraus entwickelte *Rasche* [67] ein angepasstes Konzept, das neben den Festigkeiten der Werkstoffe zusätzlich die von den Abkühlverhältnissen bzw. von der Geometrie und dem Schweißzusatzwerkstoff abhängende Über- oder Unterfestigkeit im Schweißgut durch neue Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,mod}$ berücksichtigt.

Die statistisch festgelegten Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,mod}$ sind, im Gegensatz zu den Korrelationsbeiwerten β_w des Konzepts für Matching-Verbindungen, in Abhängigkeit der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs zu wählen, siehe Tab. 4-2.

Rasche [67] ergänzte die Bemessungsgleichung durch den Parameter der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs, da dieser als wesentlicher Einflussfaktor auf die Tragfähigkeit in den vorangegangenen Forschungsvorhaben identifiziert wurde.

Die Vermischung von Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff im Schweißgut und die davon abhängenden mechanischen Eigenschaften, werden über die beiden Zugfestigkeiten $f_{u,PM}$ (PM = Parent Metal) und $f_{u,FM}$ (FM = Filler Metal) und den zugehörigen Gewichtungsfaktoren x und y in Gleichung (5.1) erfasst. Anhand der ermittelten Gewichtung von 75 % der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs $f_{u,FM}$ und 25 % der Festigkeit des Grundwerkstoffs $f_{u,PM}$ wird die Bedeutung des Schweißzusatzwerkstoffs für die Schweißnahttragfähigkeit deutlich.

$$\sigma_{v,Rd} = \frac{x \cdot f_{u,PM} + y \cdot f_{u,FM}}{\beta_{w,mod} \cdot \gamma_{M2}} \quad (5.1)$$

Das bereits im Normentwurf *prEN 1993-1-8* [18] integrierte Bemessungsmodell nach *Rasche* [67] (vgl. Abschnitt 4.3) ermöglicht eine sichere und wirtschaftliche Bemessung von Anschlüssen, deren Tragfähigkeit allein durch eine Steigerung der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs gezielt erhöht werden soll, als auch für Verbindungen die, falls aus Zähigkeitsgründen erforderlich, einen Schweißzusatzwerkstoff mit geringerer Festigkeit erfordern.

Offen war jedoch noch das Vorgehen für Mischverbindungen, wenn beispielsweise ein höherfester Stahl der Sorte S690 an einen normalfesten Stahl der Sorte S355 mittels Kehlnahtverbindung angeschlossen werden soll. Eine in der Praxis standardmäßig auftretende Situation, da aus wirtschaftlichen Gründen der Stahl an die aufzunehmende Beanspruchung angepasst wird und es oftmals auch Anbauteile mit geringeren Beanspruchungen gibt [58]. Aufgrund der zu verschweißenden Grundwerkstoffe unterschiedlicher Festigkeiten kann der Schweißzusatzwerkstoff lediglich einem der beiden Grundwerkstoffe zugehörend ausgewählt werden. Dies hat zur Folge, dass automatisch ein Mismatching-Verhältnis zwischen dem Schweißzusatzwerkstoff und dem zweiten Grundwerkstoff vorliegt. Für eine Aussage hinsichtlich des Tragverhaltens und der Herleitung einer dafür geeigneten Bemessung von Mischverbindungen lagen jedoch aus den vorherigen Forschungsvorhaben nur wenige Versuchsergebnisse vor, was Anlass zu weiteren Untersuchungen an Mischverbindungen gab.

5.6 Europäisches Forschungsvorhaben **SAFEBRITILE** [44]

5.6.1 Zielsetzung

Ein europäisches Forschungsvorhaben, dessen Hauptintention darin lag eine konsistent globale Sicherheitsbeurteilung der drei Versagensmodi duktil, semi-duktil und einem Versagen auf Bruch im konstruktiven Stahlbau zu erarbeiten, ermöglichte die Untersuchung des Trag- und Verformungsverhalten von geschweißten Mischverbindungen. Im Rahmen eines eigenständigen Arbeitspaketes sollten im Forschungsvorhaben **SAFEBRITILE** (Kurzform für: Standardization of **S**afety Assessment Procedure across **B**rittle to **D**uctile Failure Modes) [44] gezielte Untersuchungen an Flankenkehlnähten von Mischverbindungen durchgeführt werden. Ziel war es, das von *Rasche* [67] entwickelte Bemessungskonzept für eine Anwendung auf Mischverbindungen zu überprüfen und ggf. zu erweitern. Der Fokus lag auf der Untersuchung, inwieweit sich das Aufmischen mehrerer Grundwerkstoffe im Schweißgut auf die Tragfähigkeit der Verbindung auswirkt. Darüber hinaus war zu klären, welcher der verwendeten Werkstoffe für die Bemessung einer Mischverbindung maßgebend ist und ob die bereits für Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe ermittelten Einflussgrößen auch für Mischverbindungen zugrunde gelegt werden können.

5.6.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm umfasste hauptsächlich Flankenkehlnähte an Mischverbindungen aus normal- und höherfesten Stählen. Verschweißt wurden hierfür höherfeste Stähle der Güte S690QL mit normalfesten Stählen der Güte S355J2+N bzw. S460ML. Als Referenzversuche wurden ergänzend Flankenkehlnähte gleicher Grundwerkstoffe der Güte S355J2+N, S460ML und S690QL im Versuchsprogramm berücksichtigt. Die Misch- sowie die Referenzverbindungen wurden mit variierenden Festigkeiten des Schweißzusatzwerkstoffs verschweißt.

Die Untersuchung der Beanspruchbarkeit des reinen Schweißzusatzes erfolgte anhand durchgeschweißter Stumpfnähte, dessen Versuchskörpergeometrie dahingehend angepasst wurde, so dass ein Versagen in der Schweißnaht auftrat.

Die Versuchskörper wurden vollmechanisiert und manuell geschweißt. Für die Untersuchung des Einflusses auf die Tragfähigkeit von Mischverbindungen aus dem Schweißprozess wurden die Versuchskörper mit einer hohen und einer niedrigen Schweißgeschwindigkeit ge-

schweißt und dadurch der Energieeintrag variiert. Um auch hier eine definierte Nahtlänge prüfen zu können, entsprach die Versuchskörperform der in den *Zusatzuntersuchungen* [55] gewählten Geometrie, vgl. Abb. 6-2

5.6.3 Ergebnisse

Aus der Auswertung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten ließ sich ein Einfluss aus der verwendeten Schweißgeschwindigkeit feststellen. Versuchskörper, die mit einem hohen Energieeintrag resultierend aus einer langsamen Schweißgeschwindigkeit (vgl. Gleichung (3.1)) geschweißt wurden, erreichten geringere Tragfähigkeiten, als Verbindungen geschweißt mit einem hohen Energieeintrag infolge einer schnellen Schweißgeschwindigkeit. Dies bestätigte den bereits für Kehlnähte gleicher Grundwerkstoffe ermittelten Einfluss aus dem Schweißprozess.

Weiterhin konnte anhand der Gegenüberstellung der ermittelten Tragfähigkeiten ein deutlicher Einfluss aus der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs festgestellt werden, was ebenfalls in den vorangegangenen Untersuchungen an Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe beobachtet wurde.

Durch den Vergleich der Tragfähigkeiten der Mischverbindungen mit den Referenzversuchen konnte nur ein geringer Einfluss aus der Festigkeitszunahme von einem der zu verschweißenen Grundwerkstoffe und bei gleichbleibender Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs festgestellt werden. Auf der sicheren Seite liegend wurde daher für die Bemessung einer Mischverbindung die Berücksichtigung des geringer festen Grundwerkstoffs empfohlen.

Eine erste Aussage hinsichtlich der Anwendbarkeit des angepassten Bemessungskonzepts nach *Rasche* [67] für Flankenkehlnähte an Mischverbindungen konnte durch eine statistische Auswertung als positiv bewertet werden. Jedoch ist für eine abgesicherte statistische Auswertung die Datenmenge der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten von Mischverbindungen noch zu erweitern. Aufgrund der im Forschungsvorhaben *SAFEBRITILE* [44] begrenzten Anzahl an Versuchskörpern konnte beispielsweise ein Einfluss aus der einwirkenden Krafrichtung nicht untersucht werden. Für eine sichere und wirtschaftliche Bemessung von Mischverbindungen bedarf es ebenfalls der Untersuchung von Stirnkehlnähten hinsichtlich ihres Tragverhaltens, um die Anwendbarkeit des von *Rasche* [67] entwickelten Bemessungskonzepts auch hier bestätigen zu können.

5.7 Dissertation *Kleiner* [52]

5.7.1 Allgemeines

In seiner Dissertation untersuchte *Kleiner* [52], anhand der Versuchsergebnissen der Forschungsvorhaben *SAFEBRIC TILE* [44] und *FOSTA P652* [59], das Trag- und Verformungsverhalten speziell von Flankenkehlnähten an Mischverbindungen aus normal- und höherfestem Stahl. Ziel der Arbeit war es, durch die Auswertung der experimentell ermittelten Verformungsfähigkeit von Flankenkehlnähten ein Verfahren zu ermitteln, das eine analytisch basierte Abschätzung der Verformbarkeit weiterer Flankenkehlnähte ermöglicht. Mit Hilfe des von *Kleiner* [52] entwickelten Ansatzes besteht nun die Möglichkeit, durch eine Kapazitätsbemessung zu überprüfen, ob bei der zu betrachtenden Flankenkehlnaht auftretende Spannungsspitzen aufgrund eines ausreichend vorhandenen Verformungsvermögens abgebaut und infolge dessen plastische Dehnungskonzentrationen vermieden werden können. Numerische Voranalysen ermöglichen elastische und plastische Verformungen an Flankenkehlnähten abzuschätzen.

Zusätzlich wertete *Kleiner* [52] das Tragverhalten von Flankenkehlnähten an Mischverbindungen aus und verglich diese mit den Versuchen an Kehlnähten gleicher Grundwerkstoffe. Eine statistische Auswertung der in den Forschungsvorhaben *SAFEBRIC TILE* [44] ermittelten Tragfähigkeiten, unter Ergänzung der Ergebnisse aus weiteren Forschungsvorhaben [54], [55], [59], [69], sollte zeigen, ob das Bemessungskonzept nach *Rasche* [67] auch auf Mischverbindungen angewendet werden kann bzw. erweitert werden sollte. Für die statistische Auswertung nutzte *Kleiner* [52] zum einen das Standardverfahren nach *DIN EN 19930 Anhang D* [24] sowie ein von ihm speziell auf das Versagen auf Bruch konzipiertes statistisches Auswerteverfahren.

Da das von *Kleiner* [52] entwickelte Verfahren in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten statistischen Auswertungen angewendet werden soll, wird im Folgenden kurz darauf eingegangen. Für eine detaillierte Erläuterung der Herleitung des Auswerteverfahrens sei hier auf die Dissertation von *Kleiner* [52] verwiesen.

5.7.2 Angepasstes statistisches Auswerteverfahren für ein Versagen auf Bruch [52]

Das nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24] (vgl. Anhang A.1) standardisierte Vorgehen der statistischen Auswertung beinhaltet mehrere durchzuführende Schritte, die letztendlich in einem korrigierten Teilsicherheitsbeiwert γ_M^* münden. Der statistisch ermittelte Teilsicherheitsbeiwert γ_M^* ist, im Fall der geschweißten Verbindungen, mit dem von der Norm *DIN EN 1993-1-1* [25] geforderten Teilsicherheitsbeiwerts $\gamma_{M2} = 1,25$ für Bruchversagen eines Querschnitts infolge einer Zugbeanspruchung zu vergleichen. Bei einer unzureichend großen Abweichung ist es erforderlich, diesen durch einen Korrekturfaktor anzupassen, um das geforderte Sicherheitsniveau einzuhalten. Eine Einteilung der Versuchsergebnisse in sogenannte Evaluationsgruppen ermöglicht die Ermittlung unterschiedlicher Korrekturfaktoren in Abhängigkeit der jeweils betrachteten Gruppe.

In der von *Kleiner* [52] durchgeführten statistischen Auswertung nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24] wurden die Versuchsergebnisse von Kehlnahtverbindungen in Abhängigkeit der verwendeten Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs in Evaluationsgruppen zusammengefasst. Die aus der Auswertung der Evaluationsgruppen abgeleiteten Korrekturfaktoren entsprechen den im Bemessungskonzept anzusetzenden Korrelationsbeiwerten $\beta_{w,mod}$ und sind daher von der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs abhängig.

Der Vergleich, der von *Kleiner* [52] ermittelten Beiwerte $\beta_{w,mod}^{kl}$ mit den von *Rasche* [67] festgelegten Korrelationsbeiwerten $\beta_{w,mod}$, bestimmt aus Versuchsdaten an Kehlnahtverbindungen gleicher Grundwerkstoffe, bestätigte die Anwendbarkeit des Bemessungskonzepts nach *Rasche* [67] für Mischverbindungen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die von *Kleiner* [52] ausgewertete Datenmenge eine immer noch geringe Anzahl an Mischverbindungen beinhaltete.

Eine detaillierte Untersuchung der sich einstellenden Bruchverläufe an Kehlnahtverbindungen zeigte, dass die vorhandenen Nahtdicken einer nicht vernachlässigbaren Streuung unterliegen. Da die aus den experimentellen Versuchen abgeleiteten Tragfähigkeiten maßgeblich von den angesetzten Nahtdicken abhängen kam *Kleiner* [52] zu dem Fazit, dass die vorhandene Streuung in eine statistische Auswertung ebenfalls miteinbezogen werden sollte.

Das Verfahren nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24] sieht eine Erfassung dieser Streuung nicht vor, da die Nahtdicke nicht als Basisvariable in das Bemessungsmodell eingeht. *Kleiner* [52] kalibrierte das statistische Auswerteverfahren dahingehend, dass die durch die variierende Nahtdicke erzeugte Streuung ebenfalls statistisch erfasst werden kann. Es ist jedoch anzumerken, dass das Verfahren ausschließlich für Bauteile, die ein Versagen auf Bruch aufweisen, konzipiert wurde.

Die beiden Verfahren nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24] und nach *Kleiner* [52] unterscheiden sich in ihrem Vorgehen lediglich in den Schritten 6 und Schritten 7. Für einen Vergleich sind in Tab. 5-1 die Schritte 6 und 7 gegenübergestellt. Das Verfahren nach *Kleiner* [52] ermöglicht bei der Bestimmung des Variationskoeffizienten aller Basisvariablen V_{rt}^2 nicht nur die Variationskoeffizienten der im Bemessungskonzept enthaltenen Basisvariablen X_j , sondern durch Aufaddieren zusätzlich die Variationskoeffizienten aller weiterer wichtiger Einflussfaktoren anzusetzen.

Tab. 5-1: Gegenüberstellung des statistischen Auswerteverfahrens nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24] und des für Bruchversagen angepassten Verfahrens nach *Kleiner* [52]

Differenzierung der Schritte 6 und 7 des Ablaufschemas zur Bestimmung eines Widerstandsmodells nach <i>DIN EN 1990 Anhang D</i> [24] nach <i>Kleiner</i> [52]	
Verfahren nach <i>DIN EN 1990 Anhang D</i> [24]	angepasstes Verfahren nach <i>Kleiner</i> [52]
Variationskoeffizient V_r des Werts der Widerstandsfunktion r_t für kleine Werte V_δ^2 und V_{xt}^2 darf folgende Näherung benutzt werden: $V_r^2 = V_\delta^2 + V_{rt}^2$	
Variationskoeffizient V_{rt} der Basisvariablen X_j Fehlerfortpflanzung der Streuung der Basisvariablen der Widerstandsfunktion r_t	
$V_{rt}^2 = \sum_{j=1}^k V_{X_j}^2$	(für jeden einzelnen Versuch i) $V_{rt,i}^2 = \frac{1}{r_{t,i}(X_{j,m})^2} \cdot \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial r_{t,i}(X_j)}{\partial (X_j)} \cdot \sigma_j \right)^2$ $V_{rt}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{r_{t,i}(X_{j,m})^2} \cdot \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial r_{t,i}(X_j)}{\partial (X_j)} \cdot \sigma_j \right)^2 \right) / n + V_{X_j}^2$
Bestimmung der Standardabweichung	
$Q_{rt} = \sqrt{\ln(V_{rt}^2 + 1)}$	(für jeden einzelnen Versuch i) $Q_{rt,i} = \sqrt{\ln(V_{rt,i}^2 + V_{X_j}^2 + 1)}$
Standardabweichung Q_δ der Streugröße δ	
$Q_\delta = \sqrt{\ln(V_\delta^2 + 1)}$	
Standardabweichung Q der gesamten Widerstandsfunktion r_t	
$Q = \sqrt{\ln(V_\delta^2 + V_{rt}^2 + 1)}$	(für jeden einzelnen Versuch i) $Q_i = \sqrt{\ln(V_\delta^2 + V_{rt,i}^2 + V_{X_j}^2 + 1)}$

5.8 Forschungsvorhaben *FOSTA P1020* [73]

5.8.1 Zielsetzung

In Zusammenarbeit der TU Dresden und der TU Chemnitz sollte im Rahmen des Forschungsvorhabens *FOSTA P1020* [73], die vorhandenen Bemessungs- und Ausführungsregeln für geschweißte Verbindungen von höherfesten Stählen weiterentwickelt werden. Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf geschweißten Verbindungen von Vergütungsstählen sowie thermomechanisch gewalzten Stählen der Festigkeitsklassen S500 bis S960.

Zur Untersuchung des Tragverhaltens sollte in einem ersten Schritt ein technologischer Kleinteilversuch entwickelt werden, der es ermöglicht die Schweißnahtfestigkeit und das vorhandene Verformungsvermögen einer geschweißten Verbindung in Abhängigkeit seiner Werkstoffkombination beurteilen zu können.

Das Ziel des Forschungsvorhabens *FOSTA P1020* [73] bestand darin, das Bemessungskonzept so zu erweitern, dass sowohl die Verbindungsform als auch die Art der Beanspruchung in Zukunft ebenfalls in der Bemessung berücksichtigt werden können. Hierzu war es erforderlich ergänzende Bauteilversuche an geschweißten Flankenkehlnähten, Stirnkehlnähten, durchgeschweißten und nicht durchgeschweißten Stumpfnähten experimentell und numerisch durchzuführen.

5.8.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm im Forschungsvorhaben *FOSTA P1020* [73] umfasste geschweißte Verbindungen an Stählen der Güte S500MC, S500ML, S690QL, S700MC und S960QL, die sowohl automatisiert unter Laborbedingungen als auch manuell bzw. halbautomatisiert im industriellen Maßstab gefertigt wurden.

Zur Identifizierung unterschiedlicher auf die Tragfähigkeit nehmender Einflussfaktoren wurden neben der Grundwerkstofffestigkeit auch die Festigkeit der Schweißzusatzwerkstoffe, die Anzahl der Lagen, die Nahtvorbereitung und die Abkühlgeschwindigkeiten variiert. Des Weiteren erfolgte die Untersuchung der sich einstellenden unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften innerhalb der Wärmeeinflusszone anhand von Dilatometeruntersuchungen.

5.8.3 Ergebnisse

Der im Forschungsvorhaben *FOSTA P1020* [73] entwickelte Kleinteilversuch ermöglichte eine gezielte Untersuchung der auf das Trag- und Verformungsverhalten nehmenden Einflussgrößen unter Vermeidung aufwendiger Bauteilversuche. Anhand der Kleinteilversuche konnte, als Haupteinflussgröße die sich einstellende Abkühlzeit $t_{8/5}$ ermittelt werden. Unter diesem Aspekt erfolgte die Entwicklung eines Regressionsmodell, mit dem sich die Zugfestigkeit und die Streckgrenze einer Schweißnaht in Abhängigkeit der Abkühlzeit $t_{8/5}$ bestimmen lassen. Mit Hilfe des Regressionsmodells war es ebenfalls möglich, die aus den Dilatometeruntersuchungen vorliegenden Versuchsdaten auszuwerten. Es konnte festgestellt werden, dass Herstellungsprozess und Zusammensetzung der Legierungen einen signifikanten Einfluss auf die sich einstellenden mechanischen Eigenschaften in der Wärmeeinflusszone des Grundwerkstoffs haben.

Zuletzt wurde anhand der durchgeführten Bauteilversuche die Beeinflussung der Tragfähigkeit durch die Konstruktionsform betrachtet. Es zeigte sich, dass die Traglast von Flankenkehlnähten, bedingt durch ein verbessertes Verformungsvermögen der Naht, mit zunehmender Abkühlzeit $t_{8/5}$ gesteigert werden kann. Für Stirnkehlnähte ließ sich dieses Verhalten nicht bestätigen.

Aus den Untersuchungen an Stumpfnahverbindungen zeichnete sich ein positiver Effekt infolge einer zunehmenden Festigkeit des Grundwerkstoffs durch eine höhere $t_{8/5}$ - Zeit ab. Infolge der dadurch steigenden Stützwirkung in der Wärmeeinflusszone (vgl. Abschnitt 8.3.4) und einer daraus resultierenden Querdehnungsbehinderung des Schweißguts nahmen die Tragfähigkeiten zu.

Anhand einer statistischen Auswertung konnte abschließend ein Bemessungskonzept entwickelt werden, das, im Gegensatz zu den bisherigen Bemessungskonzepten, auf der Zugfestigkeit der Schweißnaht in Abhängigkeit der $t_{8/5}$ - Zeit $f_{wu,k}(t_{8/5})$ basiert.

Darüber hinaus ermöglicht das in Gleichung (5.2) aufgetragene Konzept eine zusätzliche Berücksichtigung der Belastungsrichtung in Form eines Schweißkonstruktionsfaktors $\alpha_{w,k}$.

$$\sigma_{v,Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\parallel}^2 + \tau_{\perp}^2)} \leq \alpha_{w,k} \frac{f_{wu,k}(t_{8/5})}{\gamma_{M2}} \quad (5.2)$$

Dabei ist:

$f_{wu,k}(t_{8/5})$	Zugfestigkeit der Schweißnaht in Abhängigkeit der $t_{8/5}$ - Zeit in Abhängigkeit Tab. 5-2
$\alpha_{w,k}$	Parameter zur Erfassung der Verbindungsform, der Abmessungsverhältnisse und der Duktilitätsklasse der Schweißverbindung in Abhängigkeit Tab. 5-3
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M2} = 1,25$

Tab. 5-2: Schweißnahtzugfestigkeit $f_{wu,k}(t_{8/5})$

Schweißnahtzugfestigkeit	G35	G42	G62	G79	G89
$f_{wu,k}(t_{8/5})$ [N/mm ²]:	522	585	706	783	899

Tab. 5-3: Schweißkonstruktionsfaktor $\alpha_{w,k}$

Verbindungsform	Schweißnahtkonstruktionsfaktor $\alpha_{w,k}$			
	G35	G42	G62	G79
Flankenkehlnaht	1,19	-	1,12	1,05
Stirnkehlnaht	-	1,25	1,15	1,06
durchgeschweißte Stumpfnah	-	1,17	0,91	0,92
nicht durchgeschweißte Stumpfnah	-	1,22	0,91	-

Ein Vergleich des in der Norm *prEN 1993-1-8* [18] angegebenen Bemessungskonzepts für höherfeste Stähle mit dem im Forschungsvorhaben *FOSTA P1020* [73] entwickelten Konzept ist nicht möglich, da entweder die Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,mod}$ oder die für das Modell nach Gleichung (5.2) benötigten Werte der Schweißnahtzugfestigkeit $f_{wu,k}(t_{8/5})$ bzw. des Schweißnahtkonstruktionsfaktors $\alpha_{w,k}$ für die jeweilige Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs nicht vorliegen.

6 Untersuchungen an Kehlnahtverbindungen normalfester und höherfester Stähle

6.1 Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56]

Im Rahmen des deutschen Forschungsvorhabens *FOSTA P1062* [56] wurde an der Universität Stuttgart ein Vorhaben zur Untersuchung des Tragverhaltens von Kehlnähten an Mischverbindungen durchgeführt. Ziel des Forschungsvorhabens war es, das von *Rasche* [67] entwickelte Bemessungsmodell auf seine Anwendbarkeit für Mischverbindungen zu überprüfen und ggf. anzupassen.

Zwar konnte bereits *Kleiner* [52] durch eine statistische Auswertung die Anwendbarkeit des neuen Bemessungsmodells für Flankenkehlnähte an Mischverbindungen bestätigen, allerdings lag aus dem Forschungsvorhaben *SAFEFRIC TILE* [44] nur eine begrenzte Anzahl experimenteller Ergebnisse vor. Des Weiteren standen noch Untersuchungen des Tragverhaltens von Stirnkehlnähten an Mischverbindungen aus, die zur Absicherung der Anwendbarkeit des angepassten Bemessungsmodells im Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] durchgeführt werden sollten. Durch das Forschungsvorhaben war es möglich, die bereits vorhandene Datenbasis von *Rasche* [67] bzw. *Kleiner* [52] für eine statistische Auswertung durch Mischverbindungen unterschiedlicher Grundwerkstoffe gezielt zu erweitern.

6.2 Experimentelle Untersuchungen an Kehlnähten von Mischverbindungen

6.2.1 Allgemeines

Anhand von Bauteilversuchen wurde im Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] das Tragverhalten speziell von Mischverbindungen untersucht und bewertet. Der Fokus lag dabei auf einer gezielten Betrachtung der Auswirkungen auf die Tragfähigkeit infolge der im Schweißgut vorliegenden Vermischung zweier Grundwerkstoffe unterschiedlicher Festigkeiten in Kombination variierender Schweißzusätze. Ergänzend war zu prüfen, ob auch bei Mischverbindungen eine Beeinflussung der Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Lastrichtung festzustellen ist. Daher umfasste das Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] experimentelle Untersuchungen an Flankenkehlnaht- und Stirnkehlnahtverbindungen unterschiedlicher Materialkonfigurationen. Im Folgenden werden die für die Versuchskörper verwendeten Materialien und deren ermittelte Eigenschaften, die Versuchskörperform, die Fertigung sowie die Versuchsdurchführung kurz vorgestellt. Für eine detaillierte Erläuterung sei hier auf den Schlussbericht des Forschungsvorhabens *FOSTA P1062* [56] verwiesen.

6.2.2 Verwendete Werkstoffe

6.2.2.1 Grundwerkstoff

Der Begriff Mischverbindung umfasste im Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] eine verschweißte Kombination zweier unterschiedlicher Stahlgüten, in diesem Fall normalfeste Stähle mit einer Streckgrenze von $f_{y,PM} < 460 \text{ N/mm}^2$ und höherfeste Stähle einer Streckgrenze $f_{y,PM} \geq 460 \text{ N/mm}^2$. In Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PbA), wurde ein normalfester Stahl der Güte S355J2+N nach *DIN EN 10025-3* [8] mit einem höherfesten Stahl der Güte S460ML nach *DIN EN 10025-4* [9], S690QL oder S960QL nach *DIN EN 10025-6* [10] kombiniert.

Eine Quantifizierung des Einflusses auf die globale Tragfähigkeit einer Verbindung zweier Grundwerkstoffe unterschiedlicher Festigkeiten, erforderte die Ermittlung der tatsächlich vorhandenen mechanischen Eigenschaften der einzelnen Werkstoffe. Ergänzend zu den vorliegenden 3.1 Zeugnissen nach *DIN EN 10204* [31] wurde zusätzlich je Stahlgüte und Blechdicke drei unabhängige Zugversuche am reinen Grundwerkstoff entsprechend *DIN EN ISO 6892-1* [26] durchgeführt. Die Aufbereitung der daraus ermittelten Materialkurven dienen als Eingangsparameter der späteren numerischen Untersuchungen in Abschnitt 6.4. Die aus den Zugversuchen ermittelten mechanischen Eigenschaften der Grundwerkstoffe können Tab. 6-1 entnommen werden.

Tab. 6-1: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Grundwerkstoffe im Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56]

Mechanische Eigenschaften	S355J2+N 1.0545			S460ML 1.8838			S690QL 1.8928		S960QL 1.8933		
	<i>DIN EN 10025-3:2019-10</i> Tabelle 4 [8]			<i>DIN EN 10025-4:2019-10</i> Tabelle 4 [9]			<i>DIN EN 10025-6:2020-02</i> Tabelle 4 [10]		<i>DIN EN 10025-6:2009-08</i> Tabelle 4 [10]		
Blechdicke t [mm]:	15	25	30	15	20	25	15	20	15	20	
$R_{eH} / R_{p0,2}$ [N/mm ²]	nom.:	355	345	345	460	440	440	690		960	
	exp.:	394	470	368	508	538	533	772	761	972	1016
R_m [N/mm ²]	nom.:	470 - 630			540 - 720			770 - 940		980 - 1150	
	exp.:	552	564	518	561	615	590	813	819	1022	1055
$A(t)$ [%]	nom.:	22			17			14		10	
	exp.:	28,73	29,16	29,44	24,6	23,13	23,86	17,42	17,87	16,41	13,21

Die in Tab. 6-1 aufgeführten Werte entsprechen dem Mittelwert der drei ausgewerteten Zugversuche je Stahlgüte und Blechdicke. Ergänzend sind die nach den einzelnen Produktnormen geforderten nominellen Werte aufgeführt und zeigen, dass die Stähle die Anforderungen der Norm erfüllen. Die zur Festlegung der Schweißprozessparameter benötigten chemischen Zusammensetzungen der Schmelzanalysen, entsprechend der vorliegenden 3.1 Zeugnisse nach *DIN EN 10204* [31], können dem Anhang B.1 entnommen werden.

6.2.2.2 Schweißzusatzwerkstoff

Zur Untersuchung des Einflusses der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs wurden die jeweiligen Grundwerkstoffkonfigurationen mit variierenden Schweißzusätzen geschweißt. Der Schweißzusatzwerkstoff wurde in Abhängigkeit der Grundwerkstoffkonfiguration so gewählt, dass verschiedene Matching-Verhältnisse geprüft werden konnten. Zum Einsatz kamen die für das Metall-Schutzgasschweißen üblichen Massiv- sowie Fülldrähte (vgl. Abschnitt 2.2) unterschiedlicher Festigkeitsklassen mit den Bezeichnungen G46 4 M21 4Si1 nach [14], G69 4 M Mn3Ni1CrMo und G89 4 M Mn4Ni2CrMo nach [15], T46 4 M M 2 H5 nach [12], T69 4 Mn2NiMo M M 2 H5 und T89 4 Z M M 3 H5 nach [13]. In Abhängigkeit der zu verschweißenden Grundwerkstoffe erfolgte unter Berücksichtigung der Empfehlungen des *DVS-Merkblattes 0916* [17] (vgl. Abschnitt 2.2.1) die Auswahl eines geeigneten Schweißzusatzwerkstoffs.

Für die späteren Auswertungen sind auch hier die tatsächlich vorhandenen mechanischen Eigenschaften der einzelnen Schweißzusätze anhand von Zugversuchen zu ermitteln. Die Fertigung der für die Zugversuche benötigten Prüfkörper aus reinem Schweißgut erfolgte anhand der Vorgaben nach *DIN EN ISO 15792-1* [27], die Durchführung der Zugversuche nach *DIN EN ISO 6892-1* [26]. Zur Erzeugung des reinen Schweißguts wurden zwei Bleche der Stahlgüte S355J2+N mit dem entsprechenden Schweißzusatzwerkstoff geschweißt und aus der erzeugten mehrlagigen Naht anschließend die drei Rundzugproben ausgearbeitet.

Geprüft wurden drei Zugproben je Schweißzusatzwerkstoff, deren Zugfestigkeiten als Mittelwert Tab. 6-2 entnommen werden kann. Zum Vergleich sind hier ebenfalls die von den jeweiligen Produktnormen vorgegebenen Werte aufgeführt. Es fällt auf, dass die tatsächlichen Festigkeitswerte zum Teil von den geforderten Mindestwerten abweichen. Dies kann vor allem bei den höherfesten Schweißzusätzen beobachtet werden, was ggf. auf das Aufmischen des wesentlich geringer festen Grundwerkstoffs S355J2+N zurückzuführen ist.

Die Herstellung der Rundzugproben birgt zusätzlich den Nachteil, dass die in den Schweißgutproben erzeugte Aufmischung aus Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff nicht der in den geprüften Mischverbindungen vorliegenden Aufmischung entspricht. Auch die variierenden Schweißparameter und Nahtgeometrien bzw. Lagenanzahl, können zu gewissen Diskrepanzen zwischen den Festigkeiten der Schweißgutproben und den Versuchskörpern führen [64]. Die aus den Zugversuchen abgeleiteten Materialkurven können daher nur bedingt als Eingangswerte für die numerischen Untersuchungen in Abschnitt 6.4 herangezogen werden.

Die chemischen Zusammensetzungen der einzelnen Schweißzusatzwerkstoffe können dem Anhang B.1 entnommen werden. Die dort aufgeführten Werte entsprechen den vorliegenden 3.1 Zeugnissen nach *DIN EN 10204* [31].

Tab. 6-2: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe im Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56]

Mechanische Eigenschaften		G46	G69	G89	T46	T69	T89
		4Si1	Mn3Ni1CrMo	Mn4Ni2CrMo	-	Mn2NiMo	Z
		<i>prEN ISO 14341:2019</i> Tabelle 1A [14]	<i>DIN EN ISO 16834:2012-08</i> Tabelle 1A [15]	<i>DIN EN ISO 16834:2012-08</i> Tabelle 1A [15]	<i>DIN EN ISO 17632:2008</i> Tabelle 1A [12]	<i>DIN EN ISO 18276:2017-07</i> Tabelle 1A [13]	<i>DIN EN ISO 18276:2017-07</i> Tabelle 1A [13]
$R_{eH} / R_{p0,2}$ [N/mm ²]	nom.:	460	690	890	460	690	890
	exp.:	514	685	803	479	768	897
R_m [N/mm ²]	nom.:	530 - 680	770 - 940	940 - 1180	530 - 680	770 - 940	940 - 1180
	exp.:	582	776	912	536	799	936
A [%]	nom.:	20	17	15	20	17	15
	exp.:	27,42	19,12	17,92	28,61	21,09	15,78

6.2.3 Versuchskörperform

6.2.3.1 Flankenkehlnähte

Die Festlegung der Versuchskörpergeometrie erfolgte in Anlehnung an die Geometrie der Versuche des Forschungsvorhabens *SAFEBRITILE* [44] bzw. der *Zusatzuntersuchungen* [55]. Dies ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Tragfähigkeitsuntersuchungen an Mischverbindungen. Um eine möglichst geringe Streuung der Versuchsergebnisse aus dem Schweißprozess zu erreichen, wurden die Versuchskörper vollmechanisiert geschweißt.

Dazu wurden zwei Bleche der Dicke $t = 15 \text{ mm}$ aufeinandergelegt und entsprechend den vorgegebenen Schweißprozessparametern miteinander verschweißt. Für das obere Blech (vgl. Abb. 6-1 GW1), mit der Breite von $b = 140 \text{ mm}$, kam ein normalfester Stahl und für das untere Blech (vgl. Abb. 6-1 GW2), mit der Breite $b = 200 \text{ mm}$, ein höherfester Stahl zum Einsatz.

Bedingt durch die Anordnung der Grundwerkstoffe sollte zusätzlich überprüft werden, ob daraus eine Beeinflussung des sich einstellenden Bruchverlaufs festgestellt werden kann. Daher wurden ergänzend Versuchskörper gefertigt, deren Grundwerkstoffanordnung vertauscht wurde (GW1 = höherfester Stahl / GW2 = normalfester Stahl).

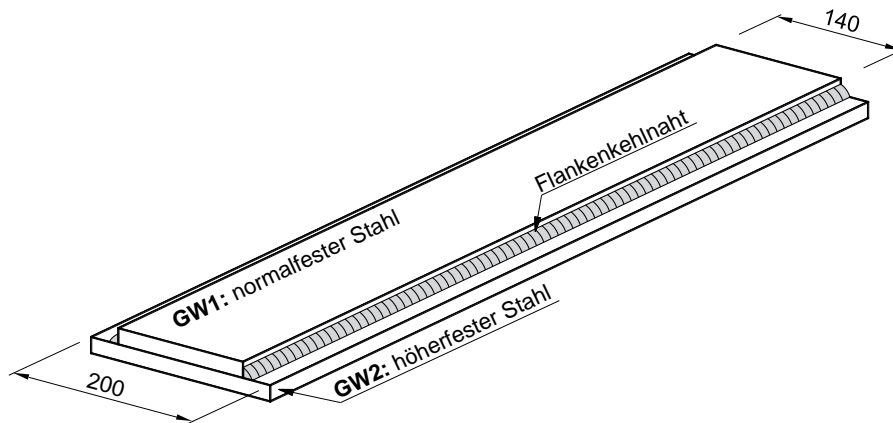


Abb. 6-1: Versuchskörperform der Flankenkehlnahtverbindungen

Im Anschluss an den Schweißprozess erfolgte entsprechend Abb. 6-2 eine mechanische Bearbeitung der Versuchskörper zur Erzeugung einer definierten Nahtlänge l_{eff} . Aufgrund der nicht vorhandenen Nahtanfangs- und Nahtendfehler im geprüften Nahtbereich, konnte für die Untersuchung eine intakte Naht gewährleistet werden.

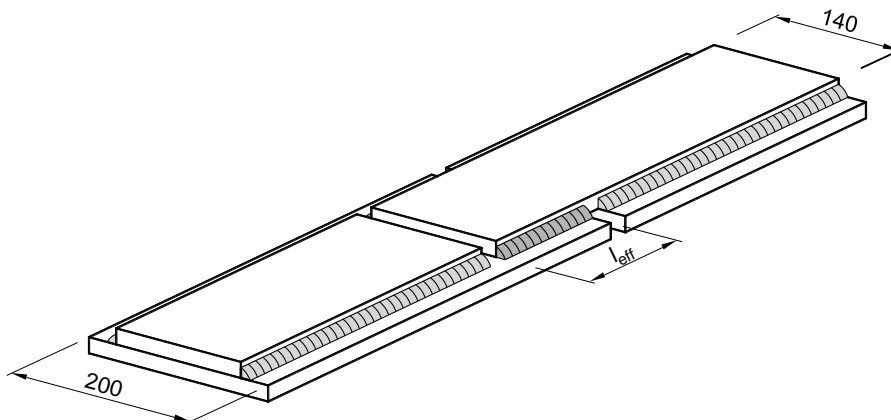


Abb. 6-2: Erzeugung einer definierten Nahtlänge l_{eff}

6.2.3.2 Stirnkehlnähte

Für die Untersuchung der Stirnkehlnähte wurde je Konfiguration ein T-Stummel gefertigt, der für die Versuchsdurchführung auf ein konzipiertes Gegenstück, dem Rigid Support, aufgeschraubt wurde. Um eine definierte und geometrisch toleranzarme Naht prüfen zu können, wurde im ersten Schritt zwei Bleche einlagig vollmechanisiert miteinander verschweißt. Dabei wurde der Flansch des T-Stummels aus normalfestem Stahl (vgl. Abb. 6-3 GW1) und der Steg aus höherfestem Stahl (vgl. Abb. 6-3 GW2) gefertigt. Durch eine Vordimensionierung anhand der nach *DIN EN 1993-1-8* [3] ermittelten Tragfähigkeit einer Kehlnaht, konnten die erforderlichen Dicken des Flansches und des Steges ermittelt werden, um ein frühzeitiges Fließen im Grundwerkstoff zu vermeiden.

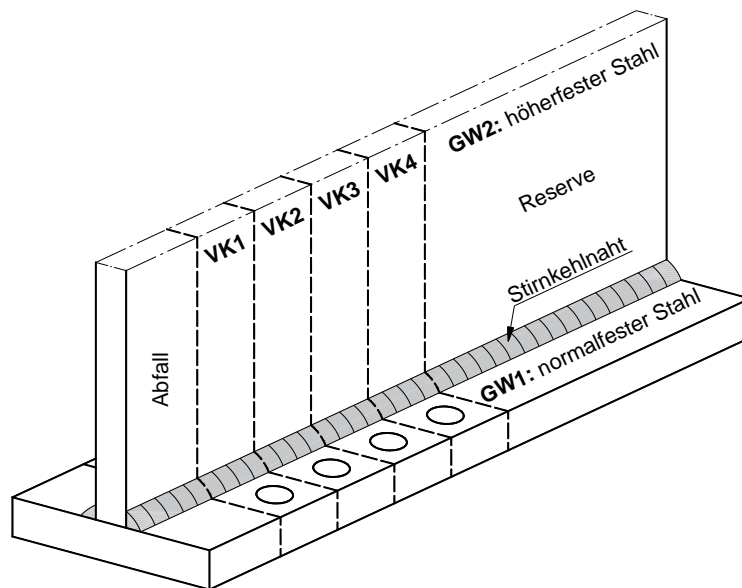


Abb. 6-3: Entnahme der Versuchskörper der Stirnkehlnähte

Im zweiten Fertigungsschritt wurden die vier zu untersuchenden T-Stummel mittels Sägeschnitt aus dem mittleren Bereich der Bleche entnommen und mit zwei Bohrungen im Flansch versehen, vgl. Abb. 6-3. Dadurch konnten, aufgrund der nicht vorhandenen Nahtanfangs- und Nahtendfehler, für die Stirnkehlnähte ebenfalls intakte Nähte untersucht werden.

Im ersten Probeversuch zeigte sich, dass die von der Prüfmaschine maximal aufbringbare Prüfkraft von $1MN$ nicht ausreichte, um ein Versagen der Naht zu erzeugen. Erst durch einen mechanischen Abtrag der Naht und einer damit einhergehenden Verkürzung der definierten Nahtlänge l_{eff} , konnte das gewünschte Nahtversagen erzielt werden, siehe Abb. 6-4.

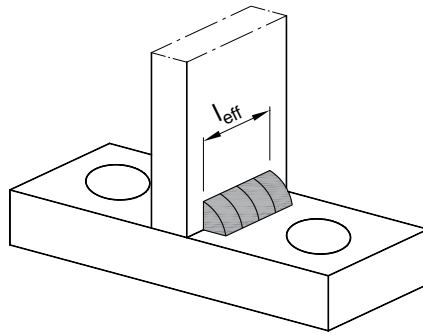


Abb. 6-4: Definierte Nahtlänge l_{eff} der Versuchskörper der Stirnkehlnähte nach der Nahtverkürzung

6.2.4 Versuchsprogramm

Der Fokus der experimentellen Untersuchungen lag auf der Ermittlung der Tragfähigkeit einer Kehlnaht an Mischverbindungen aus normal- und höherfestem Stahl. Untersucht werden sollten neben Matching-Verbindungen ($M = 1,0$, vgl. Gleichung (4.4)) auch Undermatching- ($M < 1,0$) und Overmatching-Verbindungen ($M > 1,0$), um das spätere Anwendungsgebiet der Bemessungsgleichung nach *Rasche* [67] für Mischverbindungen anhand experimenteller Ergebnisse abdecken zu können. Die in Abb. 6-5 dargestellten Werkstoffkonfigurationen wurden sowohl als Flankenkehlnähte als auch als Stirnkehlnähte gefertigt. Es sei festgehalten, dass der in Abb. 6-5 aufgeführte quantifizierte globale Matching-Faktor M den nominellen Festigkeitsunterschied zwischen dem verwendeten Schweißzusatzwerkstoff und dem höherfesten Grundwerkstoff beschreibt.

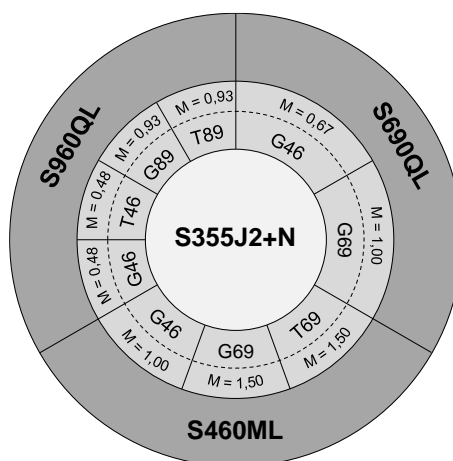


Abb. 6-5: Werkstoffkonfigurationen der Flanken- und Stirnkehlnähte an Mischverbindungen

6.2.5 Schweißprozess

Ein wesentlicher Einfluss auf die Tragfähigkeit einer geschweißten Verbindung geht aus dem gewählten Schweißprozess, bzw. aus den dafür angesetzten Schweißparametern hervor. Wie bereits in Kapitel 3 erläutert, kann in Abhängigkeit der für den Schweißprozess gewählten Prozessparameter der Stromstärke I , der Spannung U und der Schweißgeschwindigkeit v_s die einzubringende Energie E angepasst werden. Anhand des Energieeintrags und der sich daraus ergebenden Abkühlzeit $t_{8/5}$ können sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf das sich einstellende Gefüge und somit auf die Tragfähigkeit der geschweißten Verbindung festgestellt werden. Da bereits im vorangegangenen Forschungsvorhaben *SAFEBRICILE* [44] ein Einfluss aus variierenden Energieeinträgen dokumentiert werden konnte, wurden für die Fertigung aller Versuchskörper im Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] konstante Schweißparameter festgelegt. Dies bietet den Vorteil, dass durch einen Vergleich der Tragfähigkeiten der einzelnen Verbindungen die Einflüsse aus den verwendeten Werkstoffen besser quantifiziert werden können.

Die Versuchskörper wurden vollmechanisiert in der Schweißposition PB geschweißt. Die während der Fertigung angesetzten Schweißprozessparameter der jeweiligen Versuchsserie können Tab. 6-3 entnommen werden.

Tab. 6-3: Schweißprozessparameter der Flanken- und Stirnkehlnähte

Versuchsserie	Schweißzusatzwerkstoff	Schweißspannung U [V]	Schweißstrom I [A]	Schweißgeschwindigkeit v_s [cm/min]	Vorwärmtemperatur T_0 [C°]
FLA	Massivdraht	32	302	30	120 - 130
	Fülldraht		282		
STI	Massivdraht	32	298	30	120 - 130
	Fülldraht		274		

Die Einhaltung der von den Stahlherstellern empfohlenen Bereiche der Abkühlzeiten wurde während des Schweißprozesses mit Hilfe von Thermoelementen kontrolliert. Da die Thermoelemente hierfür in das noch flüssige Schweißbad versenkt werden mussten und somit nach der Erstarrung des flüssigen Schweißbads eine Fehlstelle in der Naht vorlag, befanden sich die Messstellen außerhalb der später zu prüfenden Naht. Die Messstellen der $t_{8/5}$ - Zeit, sowie die Reihenfolge und die Schweißrichtung der Nähte wurden entsprechend Abb. 6-6 für alle Versuchskörper dokumentiert und aufgezeichnet.

Abb. 6-6: Messung der $t_{8/5}$ - Zeit mittels Thermoelement

6.2.6 Versuchsdurchführung

Die experimentellen Untersuchungen an den Kehlnähten wurden an der Materialprüfanstalt der Universität Stuttgart quasi-statisch bei Raumtemperatur durchgeführt. An einer Schenk 1 MN Universalprüfmaschine wurden die Versuchskörper bis zum Bruch mit einer Prüfgeschwindigkeit von $0,5 \text{ mm/min}$ gefahren. Bei allen Versuchskörpern konnte ein Versagen im Nahtquerschnitt beobachtet werden.

Das Versagen der Stirnkehlnähte trat nahezu gleichzeitig in beiden Nähten auf, wohingegen bei den Flankenkehlnähten merklich eine der beiden Nähte zuerst versagte. Aufgrund der dadurch entstehenden ausmittigen Belastung der noch intakten Naht, wurde in der Auswertung ausschließlich die Geometrie und Bruchfläche der zuerst versagten Naht berücksichtigt.

Die Messung der bis zum Versagen aufgebrauchten maximalen Prüfkraft F_{max} und des Maschinenwegs, erfolgten mittels integrierter Kraftmessdose. Zur Dokumentierung der lokalen Nahtverformung wurden zusätzlich induktive Wegaufnehmer angebracht. Dazu wurden die Flankenkehlnähte entsprechend Abb. 6-7 mit insgesamt vier induktiven Wegaufnehmern, jeweils am Nahtanfang und am Nahtende, ausgestattet, die die lokale Verformung der Naht in Richtung der Längsachse erfassten.



Abb. 6-7: Induktive Wegaufnehmer
Flankenkehlnaht



Abb. 6-8: Induktive Wegaufnehmer
Stirnkehlnaht

Die induktiven Wegaufnehmer der Stirnkehlnähte erfassen die lokalen Verformungen der Naht quer zur Nahtlängsachse. Wie in Abb. 6-8 dargestellt, wurden ebenfalls vier Wegaufnehmer am Nahtanfang und am Nahtende angebracht. Ein fünfter Wegaufnehmer diente der Überprüfung einer möglichen Flanschverformung. Die aufgezeichneten lokalen Verformungen der Naht dienen im späteren der Validierung des numerischen Modells in Abschnitt 6.4.

6.2.7 Begleituntersuchungen

6.2.7.1 Makroschliffe

Aus den nicht geprüften Nahtbereichen ausgewählter Versuchskörper wurden nach der Versuchsdurchführung Makroschliffe entnommen. Diese dienten der Ermittlung der tatsächlich vorhandenen Nahtgeometrie und der Überprüfung eines vorhandenen Einbrands, der bei der Bestimmung der Tragfähigkeit der Naht für die erforderliche Nahtdicke a_{EC} nach *prEN 1993-1-8* [18] angesetzt werden darf. Beispielhaft ist in Abb. 6-9 ein Makroschliff einer Flankenkehlnaht und in Abb. 6-10 ein Makroschliff einer Stirnkehlnaht dargestellt.

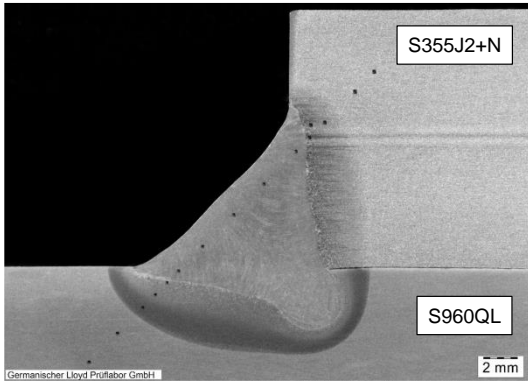


Abb. 6-9: Makroschliff einer Flankenkehlnaht
S355J2+N – S960QL – G46

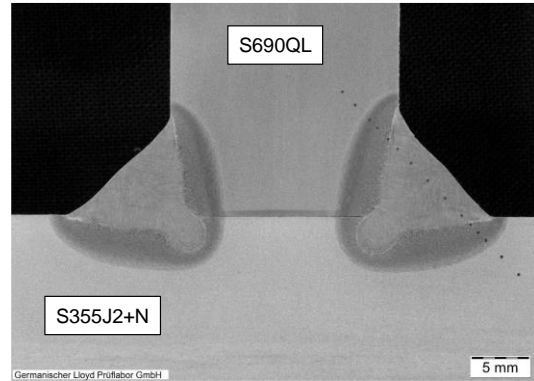


Abb. 6-10: Makroschliff einer Stirnkehlnaht
S355J2+N – S690QL – G46

Eine Liste aller entnommenen Makroschliffe kann Anhang B.2 entnommen werden. Mit Hilfe der Makroschliffe war es möglich, die genaue Nahtgeometrie in ein FE-Modell zu überführen, vgl. Abschnitt 6.4.

6.2.7.2 Härte

Entsprechend den Vorgaben nach *DIN EN ISO 9015-1* [29] wurden an den entnommenen Makroschliffen ergänzende Härteuntersuchungen durchgeführt. Eine Liste der durchgeführten Härteuntersuchungen kann dem Anhang B.2 entnommen werden. In Abb. 6-9 und Abb. 6-10 ist die jeweils parallel zur Nahtoberfläche verlaufende Reihe von Einzeleindrücken zur Härtebestimmung dargestellt.

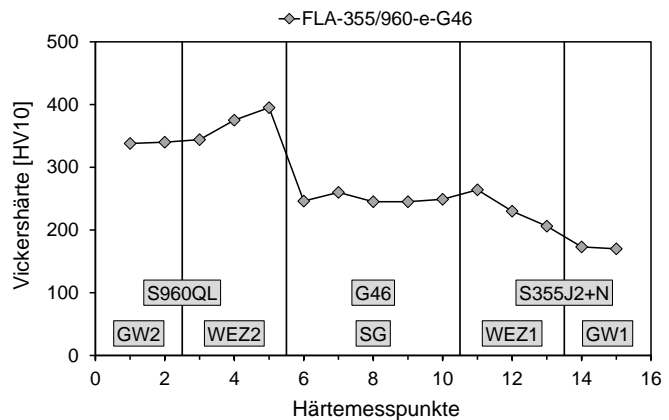
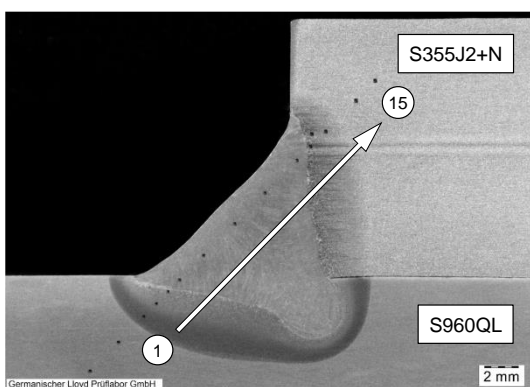


Abb. 6-11: Zuordnung der über den Querschnitt der Naht verlaufenden Einzeleindrücke

Die Lage der Einzeleindrücke wurden entsprechend Abb. 6-11 folgendermaßen festgelegt:

- 2 Einzeleindrücke im unbeeinflussten Grundwerkstoff 2 (GW2),
- 3 Einzeleindrücke im wärmebeeinflussten Bereich des Grundwerkstoffs 2 (WEZ2),
- 5 Einzeleindrücke im Schweißgut (SG),
- 3 Einzeleindrücke im wärmebeeinflussten Bereich des Grundwerkstoffs 1 (GW1),
- 2 Einzeleindrücke im unbeeinflussten Grundwerkstoff 1 (WEZ1).

Am Beispiel der in Abb. 6-11 dargestellten Verbindung FLA-S355/S690-e-G46 zeigt sich deutlich die unterschiedlichen Härtewerte der jeweiligen Nahtbereiche. Die geringste Härte ist dem normalfesten Stahl der Güte S355J2+N zuzuweisen, dass versagen trat jedoch im Bereich der Naht auf.

6.2.7.3 Optischer 3D-Scan der Bruchfläche

Zur Erstellung eines 3D CAD-Modells der entstandenen Bruchfläche der geprüften Versuchskörper wurde im Nachgang der Versuchsdurchführung ein 3D-Scan mittels Streifenlichtprojektor erzeugt, siehe Abb. 6-12. Dem Anhang B.2 kann eine Liste der durchgeführten Scans entnommen werden. Aufgrund des gleichzeitigen Versagens wurden beide Nahtflächen der Stirnkehlnahtverbindungen gescannt, bei den Flankenkehlnähten hingegen ausschließlich die zuerst versagte Naht. Anhand des daraus abgeleiteten 3D CAD-Modells war es möglich die tatsächlich vorhandene Bruchfläche $A_{3D-scan}$ auszulesen.



Abb. 6-12: Scannen der Bruchfläche mittels eines Streifenlichtprojektors Comet L3D [56]

Das vorliegende 3D-Modell der Bruchfläche eröffnete weiterhin die Möglichkeit, sowohl den Bruchwinkel als auch den Bruchverlauf im Nahtquerschnitt zu dokumentieren. Entsprechend Abb. 6-13 wurden hierfür im 3D-Modell virtuelle Schnitte quer zur Nahtlängsachse gelegt und die daraus entstehenden Schnittkanten anschließend in ein 2D-Modell überführt. Das Einfügen der abgeleiteten 2D-Modelle des Bruchverlaufs auf die vorliegenden Bilder der Makroschliffe, ermöglichte die Gegenüberstellung der für die Bemessung anzusetzenden Nahtdicke a_{EC} mit der aus dem Bruchverlauf hergeleiteten Nahtdicke $a_{3D-Scan}$. Dies diente der in Abschnitt 6.3.2 durchgeführten Überprüfung der Genauigkeit der nach *prEN 1993-1-8* [18] anzusetzenden Nahtdicke a_{EC} für Mischverbindungen im Vergleich zu dem tatsächlich auftretenden Versagen.

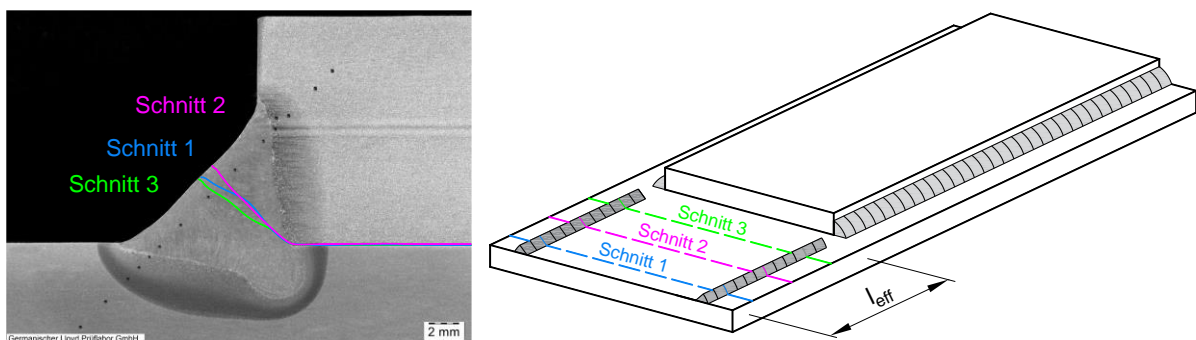


Abb. 6-13: Schnitfführung zur Erzeugung eines 2D-Modells des Bruchverlaufs im Nahtquerschnitt

6.3 Diskussion der Ergebnisse der Versuche zur Tragfähigkeit von Mischverbindungen

6.3.1 Allgemeines

Derzeit ist nach *prEN 1993-1-8* [18] in der Bemessung einer Kehlnahtverbindung zweier Stähle unterschiedlicher Materialgüten, die Festigkeit des geringer festen Grundwerkstoffs anzusetzen. Auch für das von *Rasche* [67] angepasste Bemessungskonzept ist, auf der sicheren Seite liegend, der geringer feste Grundwerkstoff als bemessungsrelevant zu betrachten. Demzufolge beruht die Bemessung einer Verbindung zwischen einem S355J2+N und einem S690QL, geschweißt mit einem Schweißzusatzwerkstoff der Festigkeitsklasse 46 (460 N/mm^2), auf der Festigkeit des Grundwerkstoffs S355J2+N und des Schweißzusatzwerkstoffs. Mögliche festigkeitssteigernde Aufmischungseffekte, hervorgerufen durch den höherfesten Grundwerkstoff S690QL, können derzeit nicht berücksichtigt werden. Aus wirtschaftlicher Sicht gilt es zu untersuchen, ob die genannte Festigkeitssteigerung die globale Tragfähigkeit der Verbindung

signifikant beeinflusst und aus diesem Grund in das Bemessungsmodell integriert werden sollte.

Die folgenden Auswertungsergebnisse dienen nicht nur der Überprüfung der Anwendbarkeit des angepassten Bemessungskonzepts nach *Rasche* [67] für Mischverbindungen sondern einer zusätzlichen Untersuchung, inwieweit der höherfeste Werkstoff die globale Tragfähigkeit beeinflusst.

Im Vorfeld der Tragfähigkeitsanalyse ist die für den Lastabtrag anzusetzende Querschnittsfläche der Naht festzulegen. Vorangegangene Untersuchungen von *Rasche* [67] und *Kleiner* [52] zeigten bereits, dass hier unterschiedliche Ansätze hinsichtlich der zu bestimmenden Nahtdicke möglich sind. Die jeweiligen Ansätze werden in den folgenden Abschnitten auf ihre Anwendbarkeit für Mischverbindungen diskutiert. Darüber hinaus erfolgt eine statistische Erhebung der Nahtdicken zur Erfassung der in der statistischen Beurteilung des Bemessungskonzepts unter Ansatz des Verfahrens nach *Kleiner* [52] die Streuung der Nahtdicken berücksichtigen zu können.

6.3.2 Beurteilung des anzusetzenden a -Maßes nach *prEN 1993-1-8* [18]

6.3.2.1 Allgemeines

Nach *prEN 1993-1-8* [18] ist als theoretische Nahtdicke $a_{EC,th.}$ einer Kehlnahtverbindung entsprechend Abb. 6-14, die Höhe eines gleichschenkligen oder nicht gleichschenkligen einschreibbaren Dreiecks anzusetzen. Für Kehlnahtverbindungen, deren tiefer Einbrand durch eine Verfahrensprüfung nachgewiesen werden kann, darf als Nahtdicke die Höhe bis zum tatsächlichen Wurzelpunkt a_{EC} angesetzt werden, vgl. Abb. 6-14.

Die in Abb. 6-14 dargestellten Nahtdicken $a_{EC,th.}$ und a_{EC} konnten im Forschungsvorhaben anhand der angefertigten Makroschliffe ausgemessen werden. Es ist festzuhalten, dass die nach Norm ermittelten Nahtdicken $a_{EC,th.}$ und a_{EC} ausschließlich von der Geometrie der Naht abhängen. Im Gegensatz dazu kann für die aus dem 3D-Scan der Bruchfläche abgeleiteten Nahtdicken $a_{3D-Scan}$ aus Abb. 6-15, eine zusätzliche Beeinflussung aus den in der Naht vorliegenden Eigenschaften vorliegen.

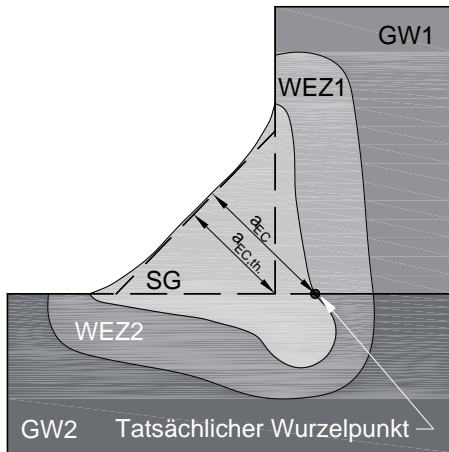


Abb. 6-14: Definition der Schweißnahtdicke nach prEN 1993-1-8 [18]

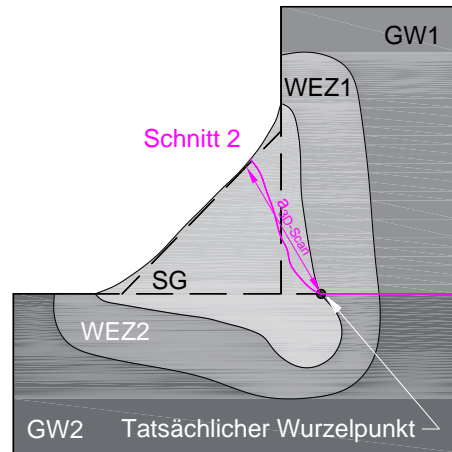


Abb. 6-15: Aus 3D-Scan abgeleitete Schweißnahtdicke $a_{3D-Scan}$

Für Stirnkehlnähte ist eine weitere zu betrachtende Nahtdicke a_{max} zu berücksichtigen, vgl. Abb. 6-16. Die durch die Nahtdicke a_{max} aufgespannte Fläche beschreibt die maximal beanspruchte Fläche in der Nahtlängsachse. Aufgrund der zweiachsigen Beanspruchung durch die Spannungskomponenten σ_{\perp} und τ_{\perp} tritt die höchste Vergleichsspannung von Stirnkehlnähten nicht im Bereich der geringsten Fläche, was der Höhe des einschreibbaren Dreiecks und somit a_{EC} entspricht, auf.

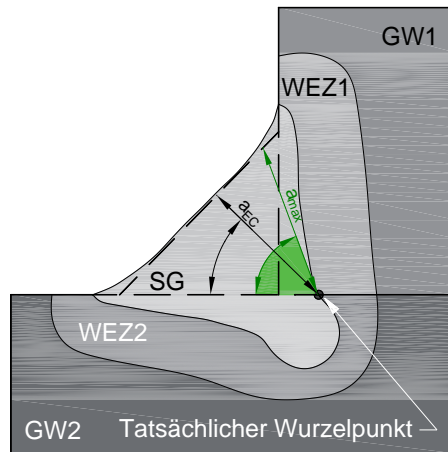


Abb. 6-16: Vergleich der Nahtdicken a_{EC} und a_{max}

Die Nahtfläche a_{max} kann entsprechend Gleichung (6.1) bestimmt werden.

$$a_{max} = \frac{a_{EC}}{\cos(\alpha_{max} - \alpha_{EC})} \quad (6.1)$$

Die dort vorliegenden Spannungsanteile lassen sich nach Gleichung (6.2) bzw. (6.3) ermitteln.

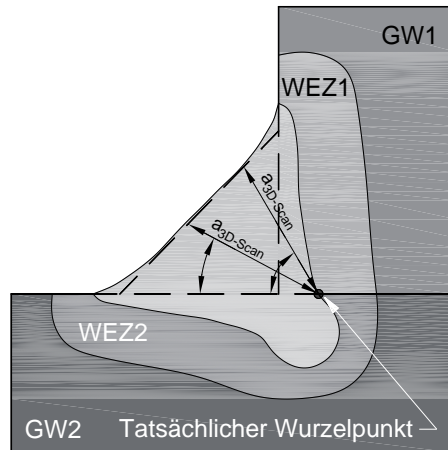
$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{max} \cdot \sin(90 - \alpha_{EC})}{a_{max} \cdot l_{eff}} \quad (6.2)$$

$$\tau_{\perp} = \frac{F_{max} \cdot \cos(90 - \alpha_{EC})}{a_{max} \cdot l_{eff}} \quad (6.3)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (6.1), (6.2) und (6.3) in Gleichung (4.1) kann schließlich eine maximale Vergleichsspannung unter dem Winkel α_{max} in Abhängigkeit der geometrisch bestimmten Nahtdicke a_{EC} nach Gleichung (6.4) iterativ hergeleitet werden, vgl. Abb. 6-16.

$$\sigma_{v,max} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\perp}^2} = \frac{F_{max}}{a_{EC} \cdot l_{eff}} \cdot \cos(\alpha_{max} - \alpha_{EC}) \cdot \sqrt{(\sin(90 - \alpha_{max}))^2 + 3 \cdot (\cos(90 - \alpha_{max}))^2} \quad (6.4)$$

Im Hinblick auf die in der Stirnkehlnaht vorliegenden Spannungsanteile aus Schubspannung τ_{\perp} und Normalspannung σ_{\perp} senkrecht zur Naht, weicht die Lage der höchstbeanspruchten Nahtfläche zum Teil stark von der durch die Nahtdicke a_{EC} aufgespannten Fläche ab, vgl. Abb. 6-16. Ein Vergleich soll vorhandene Abweichungen der rein geometrisch definierten Nahtdicke nach Eurocode und der Nahtdicke der tatsächlich vorhandenen Bruchfläche aufzeigen. Es ist zu berücksichtigen, dass neben den zu vergleichenden Nahtdicken als rein geometrischer Messwert, ergänzend die Lage bzw. der Verlauf des Bruchs durch den Nahtquerschnitt zu betrachten ist. Zwar können den geometrieabhängigen Nahtdicken a_{max} und a_{EC} ein eindeutig definierter Winkel α zugeordnet werden, dies gilt jedoch nicht für die tatsächlich vorhandene Nahtdicke $a_{3D-Scan}$. Entspricht die Nahtdicke $a_{3D-Scan}$ nicht der Höhe des einschreibbaren Dreiecks, kann aus Trigonometriegründen die aus der Bruchfläche ermittelte Länge der Nahtdicke, zwei unterschiedlichen Winkeln zugeordnet werden, vgl. Abb. 6-17. Daher ist es erforderlich sowohl die Auswertung der Nahtdicken als auch die der zugehörigen Bruchwinkel α , um eine Aussage hinsichtlich der Genauigkeit der nach *prEN 1993-1-8* [18] anzusetzenden Nahtdicke für Mischverbindungen ableiten zu können.

Abb. 6-17: Variation der Winkel der Nahtdicke $a_{3D-scan}$

Da bereits *Kleiner* [52] die Bedeutung der anzusetzenden Nahtdicke für die Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen feststellte, ist die detaillierte Untersuchung der Nahtdicken für Mischverbindungen notwendig, um diese in der späteren statistischen Auswertung in Abschnitt 6.5 ausreichend genau berücksichtigen zu können. Abschließend soll aus den Beurteilungen der einzelnen Nahtdicken die für die Ermittlung der globalen Tragfähigkeiten der Verbindungen maßgebenden Nahtdicken festgelegt werden.

6.3.2.2 Auswertung der Nahtdicken

Aufgrund der variierenden Beanspruchung auf reines Abscheren von Flankenkehlnähten und Stirnkehlnähten auf eine kombinierte Beanspruchung auf Abscheren und Normalspannung, werden die ermittelten Nahtdicken getrennt voneinander betrachtet. Für beide Kehlnahttypen werden die in Abschnitt 6.3.2.1 vorgestellten Nahtdicken a_{EC} und $a_{3D-scan}$ miteinander verglichen. Für die Stirnkehlnähte erfolgt ein zusätzlicher Vergleich mit den Nahtdicken a_{max} . Die Nahtdicken ohne tiefen Einbrand $a_{EC,th}$ werden in den Gegenüberstellungen vernachlässigt, da anhand der Makroschliffe das Vorhandensein eines tiefen Einbrands bereits nachgewiesen werden konnte. Für die Gegenüberstellung werden ausschließlich die Versuchskörper betrachtet, für die sowohl ein Makroschliff als auch ein Bruchflächenscan vorliegen.

Nahtdicken der Flankenkehlnähte

Insgesamt wurden an 15 Versuchskörpern im Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] sowohl ein Bruchflächenscan durchgeführt als auch ein Makroschliff entnommen (vgl. Anhang B.2). Die daraus abgeleiteten Nahtdicken a_{EC} und $a_{3D-Scan}$ werden im Folgenden miteinander verglichen und statistisch ausgewertet.

Im Diagramm in Abb. 6-18 sind die für Flankenkehlnähte zu vergleichenden Nahtdicken a_{EC} und $a_{3D-Scan}$ aufgetragen. Die aus dem 3D-Scan ermittelten Nahtdicken $a_{3D-Scan}$ weichen nur gering von den aus den Makroschliffen ausgemessenen Nahtdicken a_{EC} ab. Das Streumaß beider betrachteter Nahtdicken ist trotz variierender Werkstoffkombinationen gering. Hingegen lässt sich feststellen, dass Verbindungen geschweißt mit einem Fülldraht (T46 / T69 / T89) trotz gleicher Schweißparameter geringere Nahtdicken aufweisen als Verbindungen, die unter Verwendung eines Massivdrahts geschweißt wurden. Da die Schweißparameter für beide Schweißzusätze möglichst konstant gehalten wurden, lässt sich dies durch den nicht für Fülldrähte angepassten Drahtvorschub und dem dadurch reduziert aufgeschmolzenen Material der Elektrode begründen.

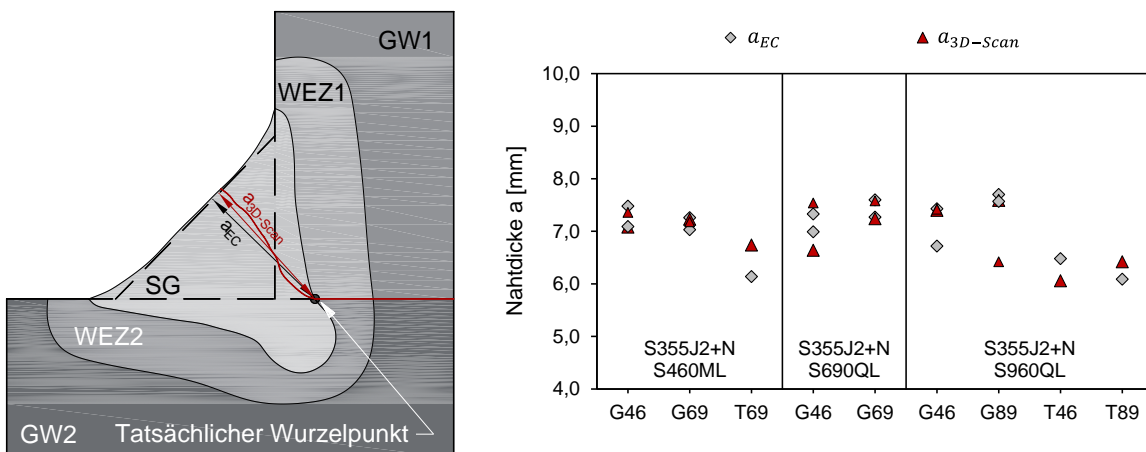


Abb. 6-18: Vergleich der Nahtdicken a_{EC} und $a_{3d-Scan}$ der Flankenkehlnahtverbindungen

Die statistische Auswertung der Nahtdicken erfolgt unabhängig vom verwendeten Drahttyp, da auch in der späteren statistischen Auswertung des Bemessungsmodells keine Differenzierung vorgesehen ist. Mit Hilfe der Ergebnisse der statistischen Auswertung aus Abb. 6-19 lässt sich die gute Übereinstimmung der beiden Nahtdicken a_{EC} und $a_{3D-Scan}$ noch einmal verdeutlichen. Sowohl der Mittelwert X_i als auch der Variationskoeffizient $V(X_i)$ beider Nahtdicken weisen ähnliche Werte auf.

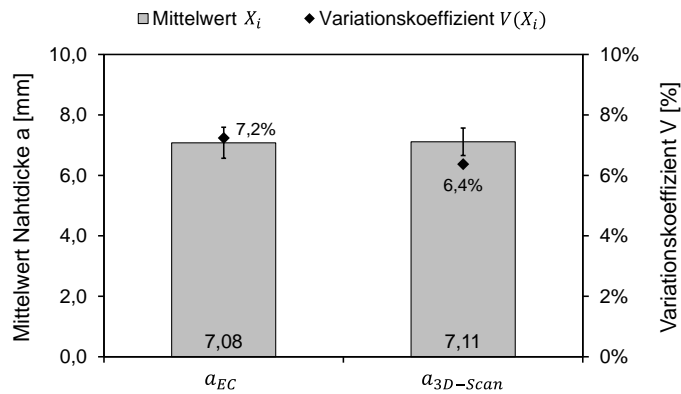


Abb. 6-19: Statistische Auswertung der Nahtdicken a_{EC} und $a_{3d-scan}$ der Flankenkehlnahtverbindungen

Nahtdicken der Stirnkehlnähte

Für die Auswertung der Nahtdicken der Stirnkehlnähte liegen die Daten von insgesamt 9 Versuchskörpern vor, vgl. Anhang B.2. Die Gegenüberstellung der Nahtdicken in Abb. 6-20 zeigt, dass die aus dem Scan der Bruchfläche ermittelten Nahtdicken $a_{3D-Scan}$, vor allem bei Verbindungen geschweißt mit einem Schweißzusatzwerkstoff der Festigkeit G/T46, erkennbar von den nach Eurocode ausgemessenen Nahtdicken a_{EC} und von den Nahtdicken a_{max} abweichen. Die aus dem Bruchflächenscan abgeleiteten Nahtdicken $a_{3D-Scan}$ sind geringer als die Nahtdicken a_{EC} und a_{max} .

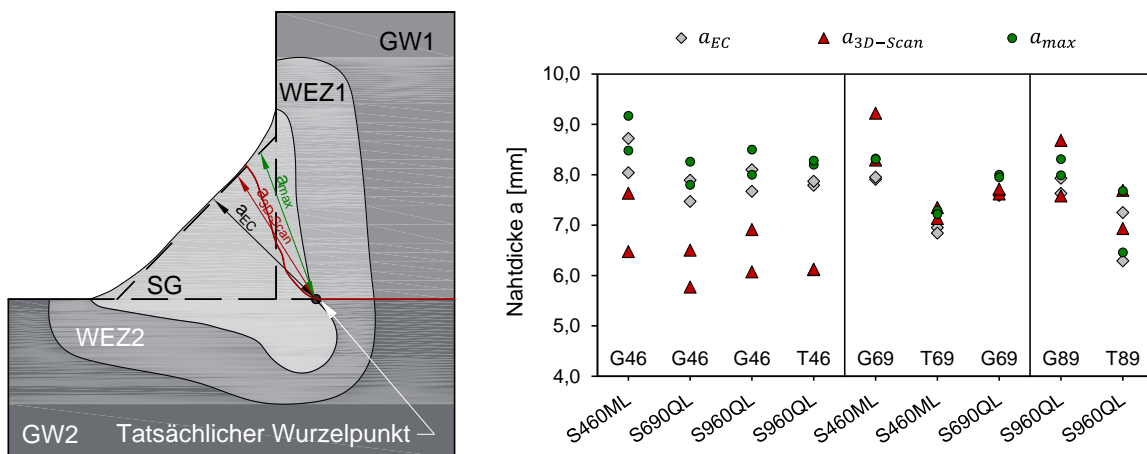


Abb. 6-20: Vergleich der Nahtdicken a_{EC} , a_{max} und $a_{3d-scan}$ der Stirnkehlnahtverbindungen

Bei Verbindungen geschweißt mit einem höherfesten Schweißzusatzwerkstoff zeigt sich eine wesentlich geringere Abweichung zwischen den zu vergleichenden Nahtdicken. Des Weiteren lässt sich für Stirnkehlnähte erkennen, dass aufgrund der konstanten Schweißparameter bei der Verwendung von Fülldrähten, im Gegensatz zu Massivdrähten, ebenfalls Nähte mit geringeren Nahtdicken erzeugt werden.

Durch die statistische Auswertung in Abb. 6-21 lässt sich anhand des hohen Variationskoeffizienten $V(X_i)$ eine starke Streuung der Nahtdicken $a_{3D-Scan}$ feststellen. Der Variationskoeffizient $V(X_i)$ der rein aus der Geometrie abhängenden Nahtdicken a_{EC} fällt wesentlich geringer aus. Auch die Nahtdicken a_{max} streuen weniger stark als die tatsächlich vorhandenen Nahtdicken $a_{3D-Scan}$. Aufgrund der zuvor beschriebenen Abweichungen und einer starken Streuung der Nahtdicke $a_{3D-Scan}$ liegt die Vermutung vor, dass die tatsächlichen Nahtdicken der Stirnkehlnähte nicht nur von der Geometrie sondern auch von den im Schweißgut vorliegenden mechanischen Eigenschaften abhängen.

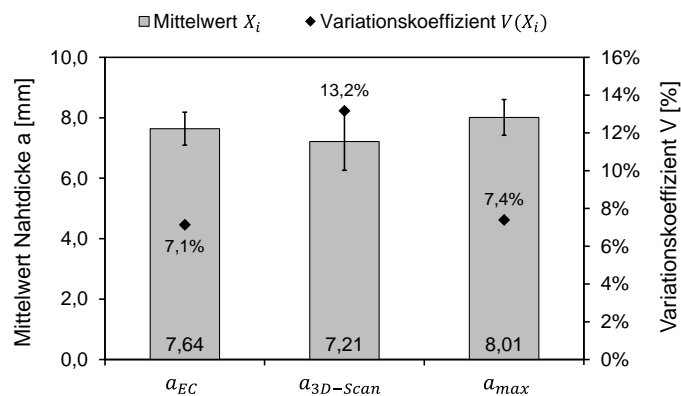


Abb. 6-21: Statistische Auswertung der Nahtdicken a_{EC} , a_{max} und $a_{3d-Scan}$ der Stirnkehlnahtverbindungen

Hinsichtlich der starken Streuung der aus den Bruchflächen abgeleiteten Nahtdicken $a_{3D-Scan}$ ist zu klären, ob diese infolge eines nicht linear verlaufenden Bruchs durch den Nahtquerschnitt hervorgerufen wird oder auf eine variierende Lage des Bruchs in der Naht zurückzuführen ist. Der zugehörige Bruchverlauf bzw. Bruchwinkel und somit die Lage der vorhandenen Nahtdicke ist daher näher zu betrachten, um unter anderem eine eindeutige Aussage hinsichtlich des Einflusses des Schweißguts treffen zu können.

6.3.2.3 Auswertung der Bruchwinkel α

Im ersten Schritt werden die aus dem 3D-Scan ermittelten Bruchwinkel $\alpha_{3d-Scan}$ den Nahtdicken a_{EC} und a_{max} zugehörigen Winkeln α_{EC} bzw. α_{max} gegenübergestellt. Im nächsten Schritt gilt es zu beurteilen, ob der vorliegende Bruchwinkel und somit die Lage der Nahtdicken der nach *prEN 1993-1-8* [18] festgelegten Definition entsprechen. Die Abschätzung einer möglichen Zugehörigkeit erfolgt mittels eines durchgeführten zweiseitigen Hypothesentests.

Die aufgestellte Hypothese „die Stichprobe der Bruchwinkel $\alpha_{3d-Scan}$ gehört der Grundgesamtheit der Winkeln α_{EC} bzw. α_{max} an“, kann dabei über eine definierte Irrtumswahrscheinlichkeit, dem sogenannten Signifikanzniveau, geprüft und anschließend bestätigt bzw. verworfen werden [40].

Als Grundgesamtheit sind deshalb die anhand der Makroschliffe ausgelesenen Winkel α_{EC} zu betrachten. Um eine ausreichend große Grundgesamtheit zu erhalten, werden die aus den Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] und *SAFEBRIC TILE* [44] vorliegenden Daten zusammengefasst. Es ist anzumerken, dass in beiden Projekten ein a -Maß von 5 mm in der Versuchskörperfertigung vorgegeben war und daher zur Erweiterung der Grundgesamtheit herangezogen werden können. Somit ergeben sich für den Hypothesentest die in Tab. 6-4 aufgeführten statistischen Kenngrößen.

Tab. 6-4: Statistische Größen der Grundgesamtheit der Winkel α_{EC}

Statistische Größen der Grundgesamtheit	
Mittelwert μ_0 [°]:	44,8
Standardabweichung σ_0 [°]:	3,9
Variationskoeffizient V [-]:	9%
Anzahl [-]:	89

Es gilt die Hypothese zu prüfen, ob die als Stichprobe vom Umfang n gemessenen Bruchwinkel $\alpha_{3d-Scan}$ der Grundgesamtheit der Winkel α_{EC} zugehörig sind. Das Signifikanzniveau wird zu $\alpha = 5\%$, analog der im Bauwesen angesetzten üblichen 5 %-Faktile für die Widerstandsseite [24], festgelegt.

Bruchwinkel der Flankenkehlnähte

Ein Vergleich der tatsächlichen Bruchwinkel $\alpha_{3D-Scan}$ mit den geometrisch abhängigen Winkeln α_{EC} in Abb. 6-22 zeigt, dass auch hier eine gute Übereinstimmung der Werte vorliegt. Die tatsächlichen Bruchwinkel $\alpha_{3D-Scan}$ weichen vernachlässigbar gering von den nach *prEN 1993-1-8* [18] ermittelten Winkeln α_{EC} ab.

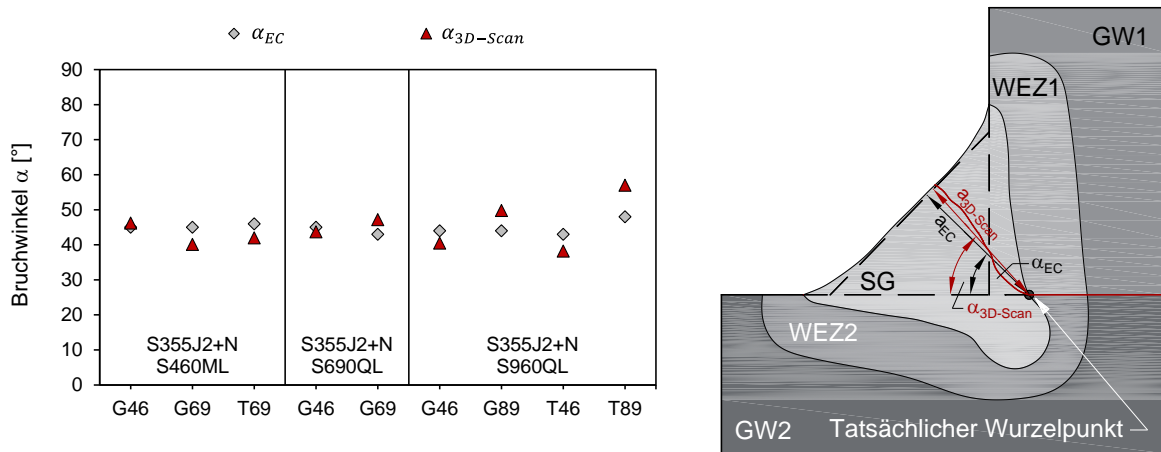


Abb. 6-22: Vergleich der Bruchwinkel α_{EC} und $\alpha_{3d-scan}$ der Flankenkehlnahtverbindungen

Das Ergebnis des Hypothesentests der Stichprobe, bestehend aus den gemessenen Bruchwinkeln $\alpha_{3D-Scan}$ der Flankenkehlnähte, kann Abb. 6-23 entnommen werden. Es lässt sich feststellen, dass der Mittelwert $\bar{x} = 43,38^\circ$ der Stichprobe außerhalb des Ablehnungsbereichs liegt. Die betrachteten Bruchwinkel $\alpha_{3D-Scan}$ der Flankenkehlnähte können somit als eine aus der Grundgesamtheit der nach *prEN 1993-1-8* [18] ermittelten Winkel α_{EC} entnommene Stichprobe betrachtet werden.

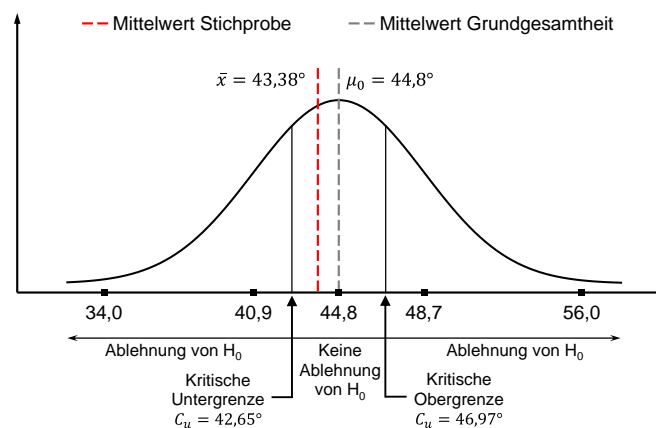


Abb. 6-23: Ablehnungsbereich für die Nullhypothese der Winkel $\alpha_{3D-Scan}$ der Flankenkehlnahtverbindungen

Bruchwinkel der Stirnkehlnähte

Eine erste Gegenüberstellung der Bruchwinkel der Stirnkehlnähte kann Abb. 6-24 entnommen werden. Die aufgetragenen Bruchwinkel $\alpha_{3D-Scan}$ streuen in Abhängigkeit der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs stark. Die zu den Nahtdicken a_{EC} und a_{max} zugehörigen Winkel weisen eine wesentlich geringere Streuung auf. Die Gegenüberstellung der Winkel zeigt, dass sich bei einer geringen Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs ein vorhandener Bruchwinkel $\alpha_{3D-Scan}$ ähnlich des rein geometrisch bedingten Winkels nach Eurocode α_{EC} einstellt. Steigt die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs an, nimmt auch der ermittelte Bruchwinkel $\alpha_{3D-Scan}$ zu. Die dokumentierten Bruchwinkel $\alpha_{3D-Scan}$ liegen hier im Bereich der geometrisch- sowie beanspruchungsabhängigen Winkel α_{max} .

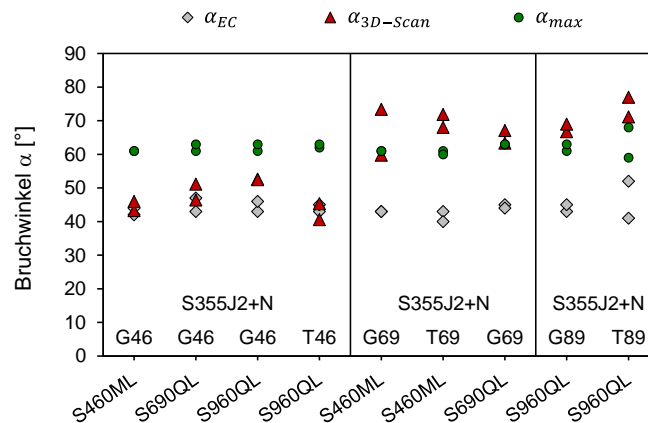


Abb. 6-24: Vergleich der Bruchwinkel α_{EC} , α_{max} und $\alpha_{3d-Scan}$ der Stirnkehlnahtverbindungen

Da keine konsistente Übereinstimmung der Bruchwinkel $\alpha_{3D-Scan}$ mit den Winkeln α_{EC} oder α_{max} aus Abb. 6-24 hervorgeht, soll mit Hilfe des Hypothesentests eine mögliche Zugehörigkeit untersucht werden. Zur Klärung sind für die Stirnkehlnähte zwei unabhängige Hypothesentests durchzuführen. Zum einen ist zu prüfen, ob die Stichprobe der Bruchwinkel der in Tab. 6-4 aufgeführten Grundgesamtheit der Winkel α_{EC} oder der in Tab. 6-5 aufgetragenen Grundgesamtheit der Winkel α_{max} zugeordnet werden kann.

Tab. 6-5: Statistische Größen der Grundgesamtheit der Winkel α_{max}

Statistische Größen der Grundgesamtheit	
Mittelwert μ_0 [°]:	61,9
Standardabweichung σ_0 [°]:	2,0
Variationskoeffizient V [-]:	3%
Anzahl [-]:	18

Das Ergebnis des Hypothesentests bzgl. der Zugehörigkeit zu den Bruchwinkeln α_{EC} in Abb. 6-25 zeigt deutlich, dass der Mittelwert der Stichprobe mit $\bar{x} = 59,17^\circ$ in den Ablehnungsbereich fällt. Der tatsächlich vorhandene Bruchwinkel $\alpha_{3D-Scan}$ der Stirnkehlnähte kann somit nicht als aus der Grundgesamtheit der nach *prEN 1993-1-8* [18] ermittelten Winkeln α_{EC} entnommene Stichprobe betrachtet werden.

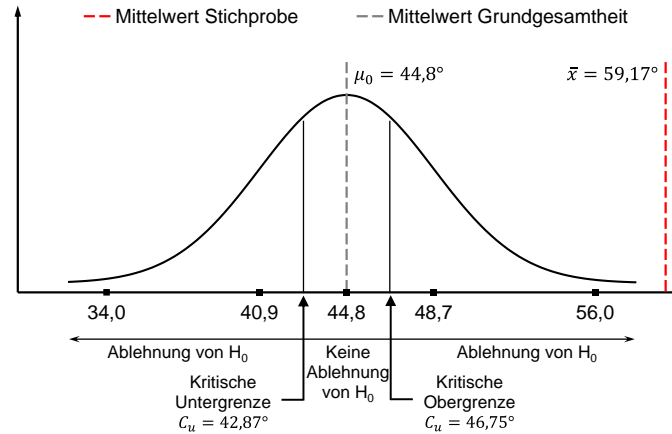


Abb. 6-25: Ablehnungsbereich für die Nullhypothese der Winkel $\alpha_{3D-Scan}$ der Stirnkehlnahtverbindungen unter Betrachtung der Grundgesamtheit α_{EC}

Ergänzend ist für Stirnkehlnäht zu prüfen, ob die Stichprobe der tatsächlich vorhandenen Bruchwinkel $\alpha_{3D-Scan}$ der Grundgesamtheit der ermittelten Winkel α_{max} entstammt. Das Ergebnis des Hypothesentests in Abb. 6-26 zeigt, dass einer Zugehörigkeit der Stichprobe der Bruchwinkel $\alpha_{3D-Scan}$ ebenfalls widersprochen werden muss.

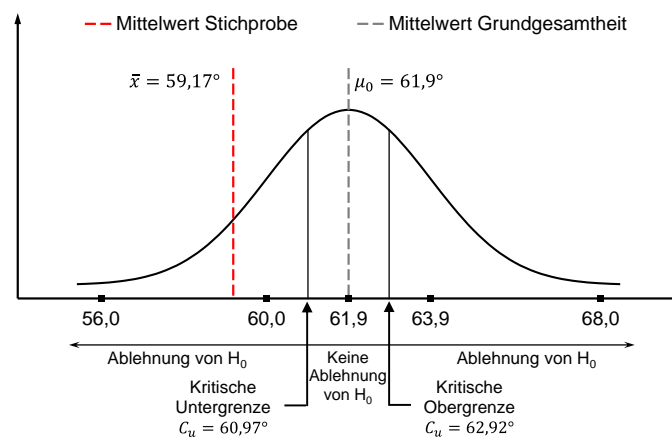


Abb. 6-26: Ablehnungsbereich für die Nullhypothese der Winkel $\alpha_{3D-Scan}$ der Stirnkehlnahtverbindungen unter Betrachtung der Grundgesamtheit α_{max}

6.3.2.4 Zusammenfassung

Ergebnisse der Flankenkehlnähte

Der Vergleich sowie die statistische Auswertung der Nahtdicken für Flankenkehlnähte in Abschnitt 6.3.2.2 zeigte eine gute Konvergenz der Nahtdicken a_{EC} zu den aus den Bruchverläufen resultierenden Nahtdicken $a_{3D-Scan}$. Eine zusätzliche Überprüfung der Lage beider untersuchter Nahtdicken, anhand der Auswertung der zugehörigen Winkel in 6.3.2.3, bestätigte ebenfalls eine gute Übereinstimmung der anzusetzenden Nahtdicke a_{EC} nach *prEN 1993-1-8* [18] und dem sich tatsächlich einstellenden Bruchverlauf.

Das nach *prEN 1993-1-8* [18] angegebene Konzept zur Ermittlung der anzusetzenden Nahtdicken kann somit für Flankenkehlnähte an Mischverbindungen als ausreichend genau eingestuft werden. Aufgrund der guten Übereinstimmung der Nahtdicken und der Bruchwinkel wird für die Ermittlung der Tragfähigkeiten der Flankenkehlnähte, die aus den Makroschliffen ermittelten Nahtdicken a_{EC} angesetzt.

Ergebnisse der Stirnkehlnähte

Sowohl die Gegenüberstellung als auch die statistische Auswertung der Nahtdicken der Stirnkehlnähte in Abschnitt 6.3.2.2 zeigten, im Gegensatz zu den Flankenkehlnähten, eine Divergenz der einzelnen Nahtdicken zueinander. Eine eindeutige Übereinstimmung der sich einstellenden Bruchverläufe mit den nach *prEN 1993-1-8* [18] anzusetzenden Nahtdicken a_{EC} und der Nahtdicken a_{max} kann nicht festgestellt werden. Auch die in Abschnitt 6.3.2.3 durchgeführten Hypothesentests führten zu dem Ergebnis, dass die Stichprobe der tatsächlich vorhandenen Bruchwinkel $\alpha_{3D-Scan}$ weder der Grundgesamtheit der geometrieabhängigen Winkel α_{EC} , noch den geometrie- und beanspruchungsabhängigen Winkeln α_{max} zugeordnet werden kann.

In Abhängigkeit der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs variiert der sich einstellende Bruchverlauf. Bei Verbindungen, geschweißt mit einem Schweißzusatz geringer Festigkeit, stellt sich ein zur Nahtdicke a_{EC} affiner Bruchverlauf ein, wohingegen der Bruch bei Nähten mit höherer Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs im Bereich der Nahtdicke a_{max} auftritt.

Anhand der Auswertungen kann das nach *prEN 1993-1-8* [18] angegebene Konzept zur Ermittlung der vorhandenen Nahtdicke für Stirnkehlnähte an Mischverbindungen nur bedingt bestätigt werden. Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen ist für eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Tragfähigkeit die tatsächlich vorhandenen Bruchflächen einzusetzen. Da

diese jedoch nur an ausgewählten Versuchskörpern bestimmt werden konnten, werden die Nahtdicken a_{EC} nach *prEN 1993-1-8* [18] angesetzt.

Um die tatsächlich vorhandene Streuung der Nahtdicken in der statistischen Auswertung des zu überprüfenden Bemessungsmodells nach *Rasche* [67] berücksichtigen zu können, werden in Abschnitt 6.5 die ermittelten Variationskoeffizienten der Nahtdicken $a_{3D-Scan}$ für die Stirnkehlnahtverbindungen in der Auswertung nach *Kleiner* [52] angesetzt. Für die Flankenkehlnahtverbindungen wird aufgrund der guten Übereinstimmung das Streumaß der Nahtdicke a_{EC} berücksichtigt.

6.3.3 Bestimmung der Tragfähigkeit

Die von der Prüfmaschine gemessene maximale Prüfkraft F_{max} ist für die Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse in eine flächenunabhängige Spannung umzurechnen, um einen Vergleich der Tragfähigkeiten unterschiedlicher Nahtlängen zu ermöglichen. Entsprechend der Untersuchungen aus dem vorangegangenen Abschnitt 6.3.2 wurden zur Ermittlung der spannungsabtragenden Nahtfläche A_{EC} für Flanken- und Stirnkehlnähte die aus den Makroschliffen ausgemessenen Nahtdicken a_{EC} angesetzt.

Da die Erstellung von Makroschliffen nur an einer geringen Anzahl an Versuchskörpern möglich war, wurden für alle weiteren Versuchskörper die Mittelwerte der statistisch betrachteten Nahtdicken a_{EC} nach Abb. 6-19 bez. Abb. 6-21 verwendet.

Die nach Gleichung (6.5) ermittelten und in der späteren Diskussion betrachteten Tragfähigkeiten der untersuchten Flankenkehlnähte und Stirnkehlnähte an Mischverbindungen sind im Anhang B.3 aufgeführt.

$$\sigma_{v,max} = \frac{F_{max}}{A_{EC}} \quad \text{bzw.} \quad \tau_{||,max} = \frac{F_{max}}{A_{EC}} \quad (6.5)$$

6.3.4 Einfluss des Grundwerkstoffs auf die Tragfähigkeit

Um den Einfluss der Festigkeit des Grundwerkstoffs untersuchen zu können, sind die Tragfähigkeiten in Abhängigkeit des verwendeten Schweißzusatzwerkstoffs in Abb. 6-27 und Abb. 6-28 gruppiert und über eine zunehmende Festigkeit des Grundwerkstoffs aufgetragen. Der Fokus liegt hier vor allem auf der Festigkeit des höherfesten Stahls bei Mischverbindungen, da noch zu klären ist inwiefern dieser Auswirkungen auf die globale Tragfähigkeit hat.

Die in Abb. 6-27 und Abb. 6-28 aufgetragenen Tragfähigkeiten nehmen bei gleichbleibender Festigkeit des normalfesten Stahls und zunehmender Festigkeit des höherfesten Stahls leicht zu. Eine proportional zur Festigkeit des Grundwerkstoffs ansteigende Tragfähigkeit liegt jedoch nicht vor. Im Schnitt lässt sich in Abb. 6-27 eine Zunahme der Tragfähigkeit bei Flankenkehlnähten von 4 % bei einer Steigerung der tatsächlichen Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs von 45 % (S460 → S690) feststellen. Eine Zunahme der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs von 82 % (S460 → S960) führt zu einer Tragfähigkeitssteigerung von durchschnittlich 8 %.

Für die Stirnkehlnahtverbindungen lässt sich in Abb. 6-28, aufgrund der geringen Anzahl an Versuchsreihen, keine genaue Aussage treffen. Tendenziell zeigt sich jedoch auch hier eine leichte Beeinflussung der Tragfähigkeit aus der Festigkeitssteigerung des Grundwerkstoffs.

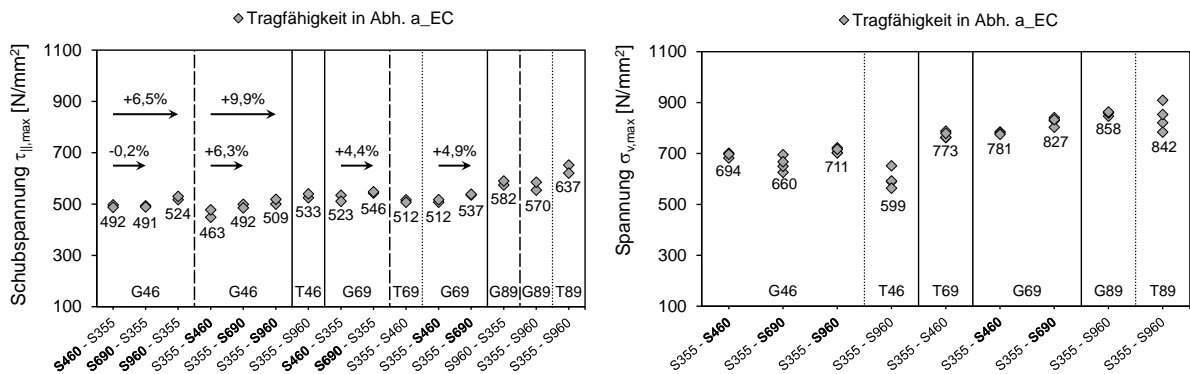


Abb. 6-27: Tragfähigkeit von Flankenkehlnähten in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs

Abb. 6-28: Tragfähigkeit von Stirnkehlnähten in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs

6.3.5 Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Tragfähigkeit

Im Weiteren ist der Einfluss der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Tragfähigkeit von Mischverbindungen zu betrachten. Dazu sind in Abb. 6-29 und Abb. 6-30 die ermittelten Tragfähigkeiten entsprechend der miteinander verschweißten Grundwerkstoffe gruppiert und über eine zunehmende Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs aufgetragen.

Anhand der in Abb. 6-29 und Abb. 6-30 dargestellten Versuchsergebnisse kann eine deutliche Zunahme der Tragfähigkeit infolge einer Festigkeitssteigerung des Schweißzusatzwerkstoffs festgestellt werden. Wird die tatsächliche Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs um 33 % (G46 → G69) gesteigert, nimmt die Tragfähigkeit für Flankenkehlnähte im Schnitt um 9 % zu (vgl. Abb. 6-29). Für Stirnkehlnähte kann sogar eine Tragfähigkeitssteigerung von bis zu 25 % erreicht werden (vgl. Abb. 6-30).

Eine im Durchschnitt 12 % höhere Tragfähigkeit ist entsprechend Abb. 6-29 durch ein Anheben der Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs um 57 % (G46 → G89) zu beobachten. Für die Stirnkehlnahtverbindungen lässt sich eine Tragfähigkeitszunahme von 21 % dem Diagramm aus Abb. 6-30 entnehmen.

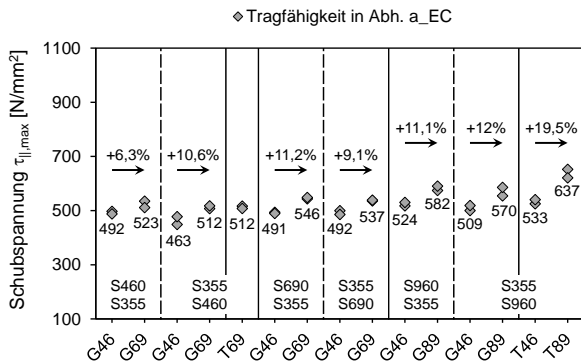


Abb. 6-29: Tragfähigkeit der Flankenkehlnähte in Abhängigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs

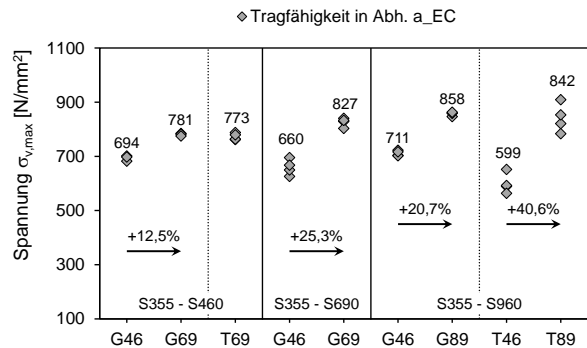


Abb. 6-30: Tragfähigkeit der Stirnkehlnähte in Abhängigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs

6.3.6 Vergleich des Einflusses aus Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff

6.3.6.1 Tragfähigkeitssteigerung in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs und des Schweißzusatzwerkstoffs

Anhand der Auswertungen der Tragfähigkeiten in Abhängigkeit der Festigkeit des Grundwerkstoffs aus Abschnitt 6.3.4 und des Schweißzusatzwerkstoffs aus Abschnitt 6.3.5 lässt sich eine aus den Werkstoffen resultierende unterschiedlich starke Einflussnahme feststellen. Im Folgenden ist die aus der Festigkeitssteigerung des höherfesten Grundwerkstoffs bzw. des Schweißzusatzwerkstoffs hervorgehende Tragfähigkeitszunahme der Kehlnähte genauer zu betrachten und zu diskutieren. Die Untersuchung dient der Erarbeitung einer stringenten Lösung hinsichtlich der für die Bemessung ggf. notwendigen zusätzlichen Berücksichtigung des höherfesten Grundwerkstoffs bei Mischverbindungen.

Für eine Auswertung werden hierzu in Abb. 6-31 und Abb. 6-32 Verbindungen miteinander verglichen, deren nominelle Zunahme der Zugfestigkeit im Grundwerkstoff einer Steigerung der nominellen Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs entspricht.

Demzufolge ist der Tragfähigkeitsunterschied der Verbindungen S355 – G46 – **S460** und S355 – G46 – **S690**, dem Tragfähigkeitsunterschied der Verbindungen S355 – **G46** – S460 und S355 – **G69** – S460 gegenüberzustellen.

Es ist zu berücksichtigen, dass die tatsächlich vorhandene Zunahme der Zugfestigkeit von den nominellen Werten abweicht. Entsprechend den Werten nach Abschnitt 6.2.2.1 bzw. Abschnitt 6.2.2.2 nimmt die Zugfestigkeit im Grundwerkstoff von S460ML auf S690QL um rund 45 % und im Schweißzusatzwerkstoff von G46 auf G69 um rund 33 % zu.

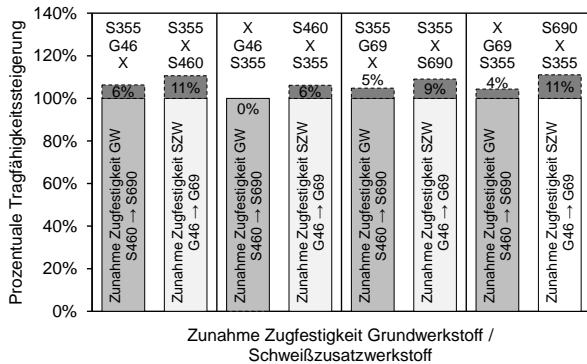


Abb. 6-31: Prozentuale Tragfähigkeitssteigerung der Flankenkehlnähte

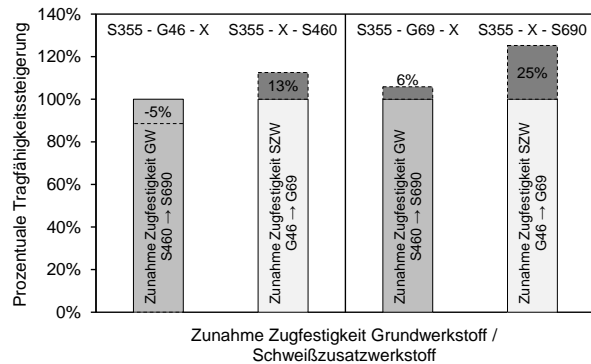


Abb. 6-32: Prozentuale Tragfähigkeitssteigerung der Stirnkehlnähte

Abb. 6-31 und Abb. 6-32 zeigen die Ergebnisse der ermittelten prozentualen Tragfähigkeitssteigerungen der zu vergleichenden Kehlnahtverbindungen. Die in den Diagrammen aufgeführte Variable „X“ markiert das jeweilige Material, dessen Festigkeit gesteigert wird. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse lässt erkennen, dass eine höhere prozentuale Tragfähigkeitszunahme infolge einer zunehmenden Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs erzielt werden kann. Trotz einer im Vergleich zum Schweißzusatzwerkstoff stärker zunehmenden Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs ist die resultierende Tragfähigkeitszunahme der Kehlnahtverbindung geringer.

6.3.6.2 Einfluss des Aufmischungsgrads im Schweißgut auf die Tragfähigkeit

Das Versagen einer Kehlnahtverbindung tritt überwiegend in der Naht auf, so dass die Tragfähigkeit maßgebend von den Eigenschaften im Schweißgut abhängt. Die sich im Schweißgut einstellenden Charakteristika hängen nicht nur vom eingebrachten Schweißzusatzwerkstoff, sondern auch vom aufgeschmolzenen Grundwerkstoff ab. Im Fall der Mischverbindungen sogar infolge zweier unterschiedlicher Grundwerkstofffestigkeiten. Aus den vorherigen Untersuchungen konnte bereits festgestellt werden, dass die Tragfähigkeit der Verbindung durch den höherfesten Grundwerkstoff marginal beeinflusst wird. Wird hingegen die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs ähnlich dem Grundwerkstoff gesteigert, lässt sich Abb. 6-31 und Abb. 6-32 eine höhere Tragfähigkeitszunahme entnehmen. Dies kann ggf. durch die im

Schweißgut vorliegenden Anteile der jeweiligen Werkstoffe beantwortet werden. Daher wird im Folgenden der sogenannte Aufmischungsgrad im Schweißgut betrachtet.

Der sogenannte Aufmischungsgrad bezeichnet das prozentuale Verhältnis der aufgeschmolzenen Fläche des Grundwerkstoffs und dem eingebrachten Schweißzusatzwerkstoff im Schweißgut. Als Richtwert ist der Literatur für das Metall-Schutzgasschweißen von Kehlnähten unter Verwendung von Massivdrähten ein prozentualer Anteil des Grundwerkstoffs im Schweißgut von rund 25 – 35 % zu entnehmen. Bei der Verwendung von Fülldrähten liegt der Anteil des Grundwerkstoffs bei 15 – 30 %. Oftmals wird beispielsweise für Kehlnahtverbindungen, deren Schweißzusatzwerkstoff den Materialkennwerten des Grundwerkstoffs unterliegen, ein höherer Aufmischungsgrad mit dem Grundwerkstoff höherer Festigkeit empfohlen, um daraus resultierende festigkeitssteigernde Effekte zu nutzen [17], [71], vgl. Hinweise in Tab. 2-3.

Allein aus dem Aufmischungsgrad ist es jedoch nicht möglich, auf die im Schweißgut vorliegenden mechanischen Eigenschaften rückzuschließen. Hierzu sind weitere metallurgische Vorgänge im Schweißgut zu berücksichtigen, wie beispielsweise Verunreinigungen, die durch das Vermischen mit dem aufgeschmolzenen Grundwerkstoff in das Schweißgut gelangen und zu einem Herabsetzen der Tragfähigkeit führen können. Auch das Abbrennen von Legierungsbestandteilen des Schweißzusatzwerkstoffs kann die Festigkeitseigenschaften des Schweißguts beeinflussen [64]. Eine genaue Analyse des sich einstellenden Gefüges und der daraus ableitbaren Eigenschaften des Schweißguts ist ausschließlich unter Verwendung von sogenannten ZTU-Schaubildern möglich [72], [71]. Darauf wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch verzichtet und lediglich untersucht, ob eine mögliche Gewichtung der beiden Grundwerkstoffe aus dem vorliegenden Aufmischungsgrad hergeleitet werden kann.

Eine genaue Bestimmung der Aufmischungsgrade war im Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] nicht möglich, sodass die aus den Makroschliffen ermittelten Werte als Näherung zu betrachten sind. Hierfür wurden, wie beispielsweise in Abb. 6-33 rechts dargestellt, die aufgeschmolzenen Bereiche beider Grundwerkstoffe (grün bzw. blau hervorgehoben) ausgemessen und der prozentuale Anteil an der gesamten Schweißgutfläche bestimmt. Der eingebrachte Anteil an Schweißzusatzwerkstoff (rot hervorgehoben) entspricht somit dem gesamten Schweißgutvolumen abzüglich der Anteile der Grundwerkstoffe.

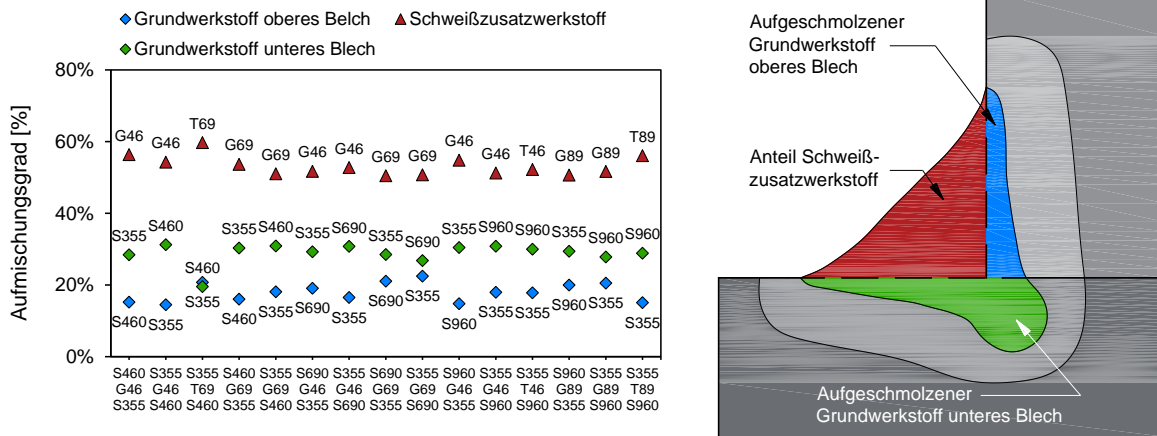


Abb. 6-33: Aufmischungsgrad der Flankenkehlnähte

Das Diagramm aus Abb. 6-33 umfasst die ermittelten Aufmischungsgrade der Flankenkehlnähte und Abb. 6-34 der Stirnkehlnähte. Die Aufmischungsgrade beider verschweißter Bleche sind getrennt voneinander zu betrachten, um mögliche Einflüsse aus den Aufmischungsgraden der unterschiedlichen Grundwerkstoffe zu untersuchen.

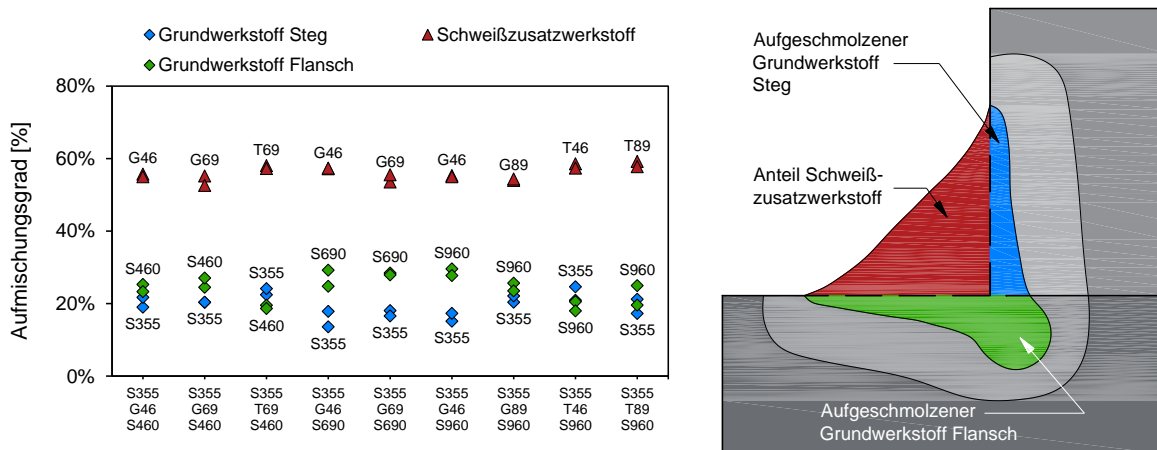


Abb. 6-34: Aufmischungsgrad der Stirnkehlnähte

Der Gegenüberstellung der aufgetragenen Werte der Aufmischungsgrade ist zu entnehmen, dass der Schweißzusatzwerkstoff den größten Anteil am Schweißgut ausmacht. Die jeweiligen Anteile der beiden Grundwerkstoffe fallen wesentlich geringer aus. Durch den größeren Anteil des Schweißzusatzwerkstoffs im Schweißgut ist ggf. der stärkere Einfluss aus der Festigkeit auf die Tragfähigkeit zu erläutern. Hierbei sei noch einmal angemerkt, dass dies lediglich als Näherung zu betrachten ist und unter Vernachlässigung der im Schweißgut ablaufenden metallurgischen Reaktionen zwischen den jeweiligen Werkstoffen betrachtet wird.

Des Weiteren kann festgestellt werden, dass die Aufmischungsgrade der beiden Bleche in Abhängigkeit ihrer Lage variieren. Bedingt durch den vorhandenen tiefen Einbrand stellt sich ein höherer Aufmischungsgrad im Schweißgut mit dem Grundwerkstoff des unteren Bleches (vgl. Abb. 6-33), bzw. dem Flansch (vgl. Abb. 6-34), ein. Der variierende Aufmischungsgrad ist daher allein auf die Geometrie zurückzuführen und wird hauptsächlich durch den Schweißprozess und den Anstellwinkel des Schweißgerätes beeinflusst. Jedoch ermöglichen die unterschiedlichen Aufmischungsgrade gerade bei den Ergebnissen der Flankenkehlnähte die Untersuchung möglicher Auswirkungen auf die Tragfähigkeit.

Wie bereits in Abschnitt 6.2.3.1 vorgestellt, wurden für die Flankenkehlnähte Versuchskörper identischer Werkstoffkonfigurationen gefertigt, deren Anordnung des normalfesten und des höherfesten Grundwerkstoffs variierten. Somit liegen hier gleiche Verbindungen vor, die zum einen einen höheren Aufmischungsgrad mit dem normalfesten Grundwerkstoff und zum anderen mit dem höherfesten Grundwerkstoff aufweisen. Der Vergleich dieser Verbindungen ermöglicht die Überprüfung des Einflusses auf die Tragfähigkeit infolge variierender Aufmischungsgrade mit dem höherfesten Stahl.

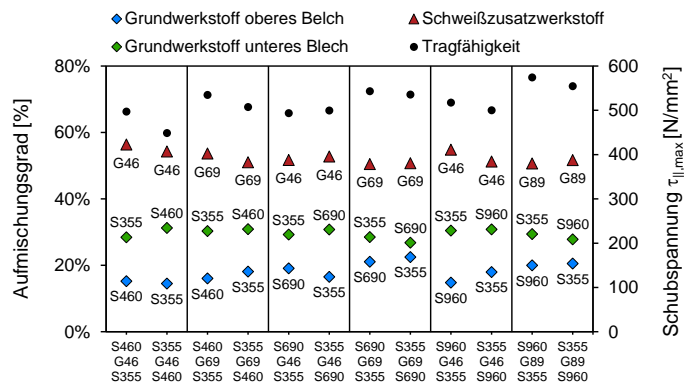


Abb. 6-35: Vergleich des Aufmischungsgrads mit der Tragfähigkeit der Flankenkehlnähte

In Abb. 6-35 sind die gegenüberzustellenden Verbindungen gruppiert aufgetragen. Am Beispiel der Werte der Verbindung S460 – G46 – S355 in Abb. 6-35 ist eine höhere Aufmischung mit dem normalfesten Stahl der Güte S355J2+N im Schweißgut zu erkennen. Hingegen kann bei der Verbindung S355 – G46 – S460 mit vertauschter Werkstoffanordnung eine wesentlich höhere Aufmischung mit dem höherfesten Grundwerkstoff der Güte S460ML festgestellt werden. Vergleicht man die erreichten Tragfähigkeiten beider Verbindungen, ist trotz der stärkeren Aufmischung mit dem höherfesten Grundwerkstoff keine Tragfähigkeitssteigerung zu beobachten. Alle weiteren miteinander verglichenen Verbindungen in Abb. 6-35 weisen ein ähn-

liches Verhalten auf. Eine zunehmende Tragfähigkeit, resultierend aus einer höheren Aufmischung mit dem höherfesten Grundwerkstoff, kann anhand der Versuchsdaten nicht bestätigt werden. Somit lässt sich zwar feststellen, dass die Tragfähigkeit infolge einer zunehmenden Festigkeit des höherfesten Grundwerkstoffs einer Mischverbindung leicht gesteigert werden kann, die Herleitung eines Gewichtungsfaktors ist anhand der Untersuchungen des Aufmischungsgrads jedoch nicht möglich.

6.3.7 Einfluss der Einwirkungsrichtung auf die Tragfähigkeit

Bereits aus dem Forschungsvorhaben *FOSTA P652* [59] ging hervor, dass Stirnkehlnähte eine höhere Beanspruchung aufnehmen können, als rein auf Abscheren beanspruchte Flankenkehlnahtverbindungen. Aufgrund der geringeren Beanspruchbarkeit betrachtete *Rasche* [67] die Versuchsergebnisse an Flankenkehlnähten als essentiell für die Entwicklung des angepassten Bemessungskonzepts. Das hergeleitete Verfahren wurde anschließend anhand der vorliegenden Daten der Stirnkehlnähte hinsichtlich einer sicheren Anwendbarkeit überprüft.

Eine Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten $\sigma_{v,max}$ von Stirn- und Flankenkehlnähten an Mischverbindungen ist Abb. 6-36 zu entnehmen. Da beide Kehlnahtarten unter möglichst gleichen Bedingungen und identischer Schweißparameter gefertigt wurden, ist die Differenz der Tragfähigkeiten hauptsächlich auf den abweichenden Lastabtrag zurückzuführen. Für Mischverbindungen lässt sich infolge des vorliegenden zweiachsigen Spannungszustands im Gegensatz zu den rein auf Abscheren beanspruchten Flankenkehlnähten, eine im Schnitt 41 % höhere Beanspruchbarkeit der Stirnkehlnähte feststellen.

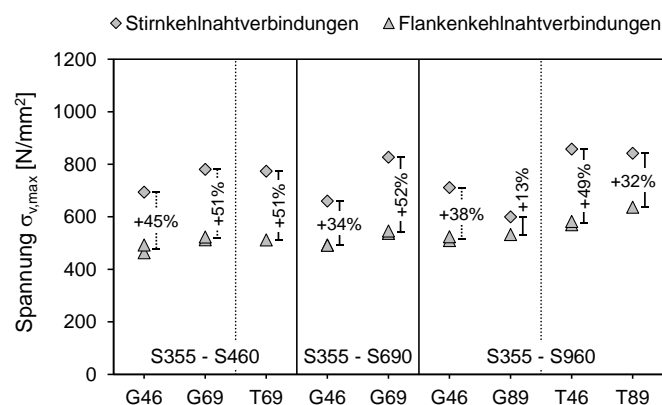


Abb. 6-36: Tragfähigkeiten in Abhängigkeit der Belastungsrichtungen

Ausgehend von der geringeren Beanspruchbarkeit sind für eine Überprüfung der Anwendbarkeit des angepassten Bemessungsmodells in Abschnitt 6.5 ebenfalls die Ergebnisse der Flankenkehlnähte als maßgebend festzulegen. Für ein konsistentes Bemessungskonzept für Mischverbindungen wird zusätzlich eine ergänzende statistische Auswertung, basierend auf den Tragfähigkeiten der Stirnkehlnähte, durchgeführt. Hierbei ist ggf. zu untersuchen, ob die höhere Tragfähigkeit der Stirnkehlnahtverbindungen anhand eines zusätzlichen Faktors in der Bemessung erfasst werden kann.

6.3.8 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen an Mischverbindungen

Eine Auswertung der nach *prEN 1993-1-8* [18] anzusetzenden Nahtdicken a_{EC} und der sich einstellenden Bruchverläufe in Abschnitt 6.3.2 zeigen eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der Lage und der Länge für Flankenkehlnahtverbindungen. Im Gegensatz dazu weichen die sich einstellenden Bruchverläufe der Stirnkehlnahtverbindungen in Abhängigkeit der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs zum Teil stark von den nach Norm anzusetzenden Nahtdicken a_{EC} ab. Da die Ermittlung der Tragfähigkeiten unter Ansatz der Nahtdicken a_{EC} nach *prEN 1993-1-8* [18] zu geringeren Werten führen, werden diese auf der sicheren Seite liegenden bevorzugt.

Des Weiteren konnte in Abschnitt 6.3.4 ein marginaler tragfähigkeitssteigernder Effekt infolge einer zunehmenden Festigkeit von nur einem der verschweißten Grundwerkstoff festgestellt werden. Als weitaus höherer Einflussfaktor ist die Festigkeit des verwendeten Schweißzusatzwerkstoffs zu bewerten. Anhand der Ergebnisse in Abschnitt 6.3.5 konnte festgestellt werden, dass mit zunehmender Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs die Tragfähigkeit deutlich zunimmt. Aufgrund dessen kann für Mischverbindungen der bereits für Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe dokumentierte höhere Einfluss der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Tragfähigkeit bestätigt werden. Ebenfalls bestätigen lässt sich für Mischverbindungen eine im Vergleich zu Flankenkehlnähten höhere Beanspruchbarkeit der Stirnkehlnähte.

Als Fazit weisen Mischverbindungen ein im Vergleich zu Kehlnahtverbindungen gleicher Grundwerkstoffe ähnliches Tragverhalten auf. Auch die auf die Tragfähigkeit einer Mischverbindung nehmenden Einflussfaktoren stimmen mit den Faktoren für Kehlnähte gleicher Grundwerkstoffe überein. Zusätzlich ist ein geringer Einfluss aus der höheren Festigkeit eines der zu verschweißenden Bleche bei Mischverbindungen festzustellen. Aufgrund des geringen Einflusses und einem nicht eindeutig ermittelbaren Gewichtungsfaktors zur Berücksichtigung des

höherfesten Grundwerkstoffs ist auf der sicheren Seite liegend eine Bemessung von Mischverbindungen, basierend auf dem geringer festen Grundwerkstoff, zu empfehlen. Zu prüfen ist jedoch, ob aufgrund der zusätzlichen Aufmischung mit dem höherfesten Grundwerkstoff die anzusetzenden Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,mod}$, die eine im Schweißgut vorliegende Über- oder Unterfestigkeit implizieren, für Mischverbindungen gültig sind.

6.4 Numerische Untersuchungen an Kehlnahtverbindungen

6.4.1 Modellfindung

Der in der Diskussion der Versuchsergebnisse festgestellte Einfluss aus dem Schweißzusatzwerkstoff und dem höherfesten Grundwerkstoff auf die Tragfähigkeit wird im Folgenden anhand einer numerischen Nachrechnung mit der Simulationssoftware ANSYS [82] noch einmal näher betrachtet. Der Fokus liegt auf der Untersuchung des sich in Abhängigkeit der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs einstellenden Bruchverlaufs sowie der aus der Aufmischung im Schweißgut resultierenden Tragfähigkeitsänderung der Stirnkehlnähte. Mit Hilfe der aus der Numerik entnommenen Spannungs- und Dehnungszustände sind mögliche Ursachen zu erarbeiten.

Die Schwierigkeit in der Erstellung eines geeigneten FE-Modells zur Abbildung des Tragverhaltens einer Schweißnahtverbindung liegt vor allem in einer geeigneten Materialzuweisung im Bereich der Wärmeeinflusszone und des Schweißguts. Gerade die Wärmeeinflusszone eines höherfesten Grundwerkstoffs untergliedert sich in mehrere Bereiche mit unterschiedlichen Materialcharakteristika, die zum Teil deutlich von der des unbeeinflussten Grundwerkstoffs abweichen, vgl. Abschnitt 3.4. Hier gilt es geeignete und möglichst praxisnahe Materialkennwerte anzusetzen. Dies ist ebenfalls für die Kennwerte des Schweißguts zu berücksichtigen. Zwar wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens *FOSTA P1062* [56] Untersuchungen am reinen Schweißgut durchgeführt, jedoch wurde bereits in Abschnitt 6.2.2.2 darauf hingewiesen, dass die ermittelten Materialeigenschaften eine gewisse Diskrepanz zu den geprüften Kehlnähten aufweisen. Um jedoch für das Schweißgut möglichst genaue Materialkennwerte in der numerischen Berechnung ansetzen zu können, wurden ergänzende Materialuntersuchungen am Schweißgut zweier ausgewählter Stirnkehlnahtverbindungen (STI-355/690-e-G46 und STI-355/690-e-G69) durchgeführt. Die Materialeigenschaften des Schweißguts beschreibt somit die tatsächlich vorhandenen Festigkeitseigenschaften in der Naht, resultierend aus der Aufmischung des Schweißzusatzwerkstoffs mit den verschweißten Grundwerkstoffen unterschiedlicher Festigkeiten.

Basierend auf den geometrischen und materiellen Eigenschaften dieser beiden Stirnkehlnahtverbindungen, ist es möglich zwei FE-Modelle unterschiedlicher Nahtgeometrien zu entwickeln und zu validieren. Auf Basis der beiden Modelle kann anschließend eine Parameterstudie durchgeführt werden, deren Zielsetzung eine numerische Betrachtung der Auswirkungen der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs und des höherfesten Grundwerkstoffs auf die Tragfähigkeit einer Mischverbindung umfasst.

Es ist anzumerken, dass die aus den numerischen Untersuchungen resultierenden Tragfähigkeiten ausschließlich als Näherungswerte anzusehen sind und einer Abschätzung der jeweiligen Einflussgröße dienen. In der späteren statistischen Auswertung werden die Daten nicht berücksichtigt.

6.4.2 Geometrische Abbildung der Schweißnaht

Durch das Einfügen einer Symmetrieachse, ist es möglich die Rechenzeit zu reduzieren, so dass nur eine der beiden Stirnkehlnähte abgebildet wurde, vgl. Abb. 6-37.

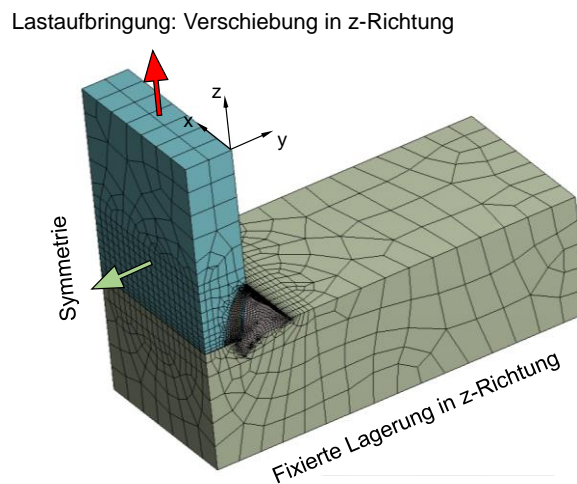


Abb. 6-37: Gewählte Randbedingungen der Stirnkehlnahtverbindung

Die tatsächlich vorhandenen geometrischen Gegebenheiten der Nahtverbindungen konnten mit Hilfe der entnommenen Makroschliffe in ein FE-Modell überführt werden (vgl. Abb. 6-38). Auch eine Annäherung der Geometrie der Wärmeeinflusszone im höherfesten Stahl, lässt sich aus den Makroschliffen ableiten.

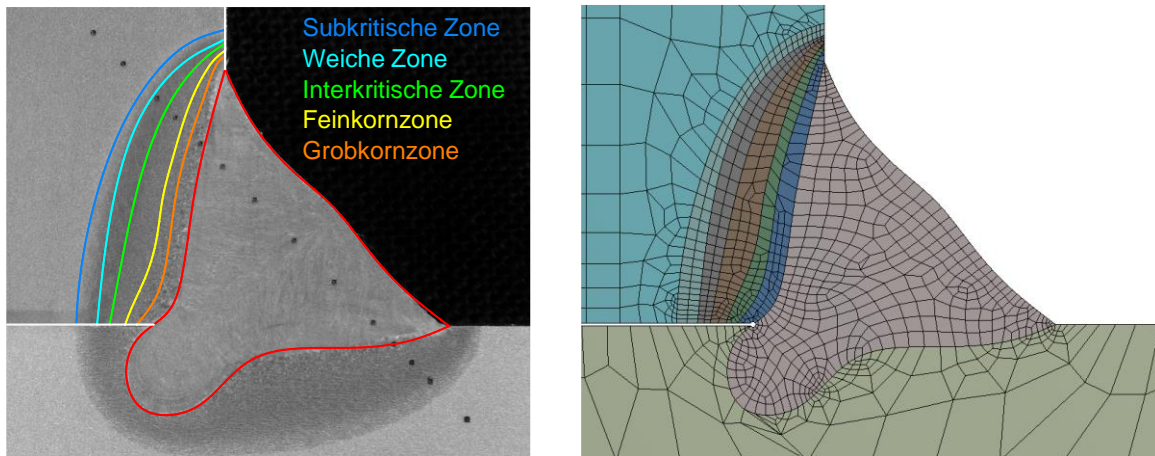


Abb. 6-38: Überführung der Nahtgeometrie der Verbindung STI-S355/S690-e-G46 in ein FE-Modell

6.4.3 Materialzuordnung

Die Materialkurven der Grundwerkstoffe S355J2+N und S690QL entstammen den in Abschnitt 6.2.2.1 vorgestellten Untersuchungen am reinen Grundwerkstoff. Für das Schweißgut sind dem FE-Modell die ermittelten Kurven aus den zusätzlich entnommenen Materialproben der beiden Stirnkehlnähte zugrunde gelegt.

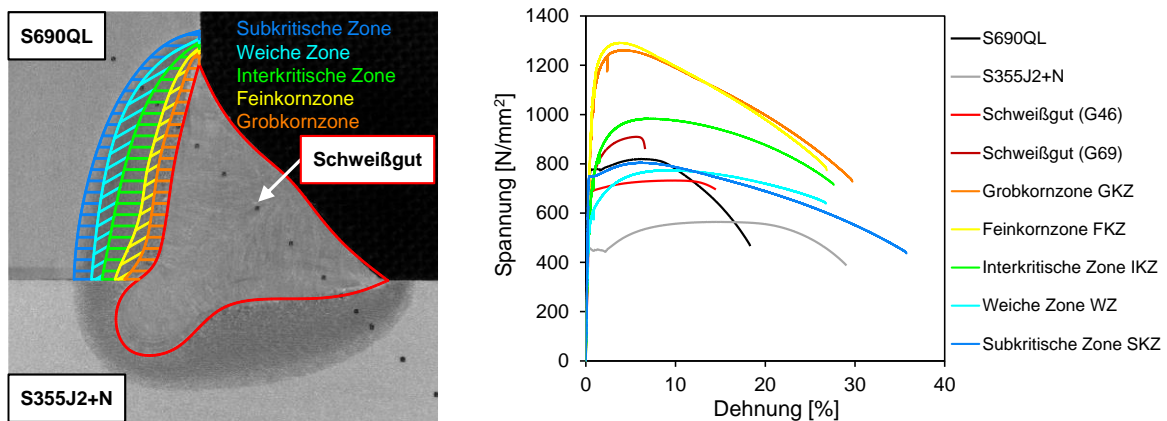


Abb. 6-39: Zuordnung der Materialkurven entsprechend der in der WEZ vorliegenden Zonen (vgl. Abschnitt 3.4.2)

Neben den Materialkurven des Schweißguts und der beiden Grundwerkstoffe, sind dem Modell variierende Materialkurven der einzelnen Temperaturbereiche innerhalb der Wärmeinflusszone des höherfesten Grundwerkstoffs zugeordnet. Von der Firma Voestalpine GmbH wurden hierfür Ergebnisse aus Dilatometerversuchen unterschiedlicher Temperaturbereiche

zur Verfügung gestellt, aus denen die benötigten Materialkurven für die einzelnen Bereiche der Wärmeeinflusszone gewonnen werden konnten.

Den in Abschnitt 3.4.2 aufgeführten Bereichen der Wärmeeinflusszone lässt sich somit in Abhängigkeit der Temperaturbereiche je eine Materialkurve zuweisen. Zusätzlich zu den in Abschnitt 3.4.2 aufgeführten Zonen wird ebenfalls eine Materialkurve für die Weiche Zone berücksichtigt, um einen ggf. daraus resultierenden Einfluss auf das Versagen beziehungsweise die Verformungen berücksichtigen zu können. Die den jeweiligen Bereichen zugewiesenen Materialkurven können Abb. 6-39 sowie Tab. 6-6 entnommen werden. Die in Abb. 6-39 dargestellten Spannungs-Dehnungs-Verläufe zeigen deutlich, wie stark die Materialeigenschaften der einzelnen Bereiche der Wärmeeinflusszone streuen.

Tab. 6-6: Für die numerische Versuchsnachrechnung der Kehlnahtverbindungen angesetzte Materialkennwerte

Mechanische Eigenschaften	Schweißgut		Wärmeeinflusszone					S355J2+N	S690QL
	G46	G69	GKZ	FKZ	IKZ	WZ	SKZ		
$R_{eH} / R_{p0.2}$ [N/mm ²]	691	686	953	993	622	581	754	470	761
R_m [N/mm ²]	730	910	1261	1291	983	774	804	564	819
E-Modul [N/mm ²]	145000	196000	235000	223000	222000	193000	251000	205000	168000

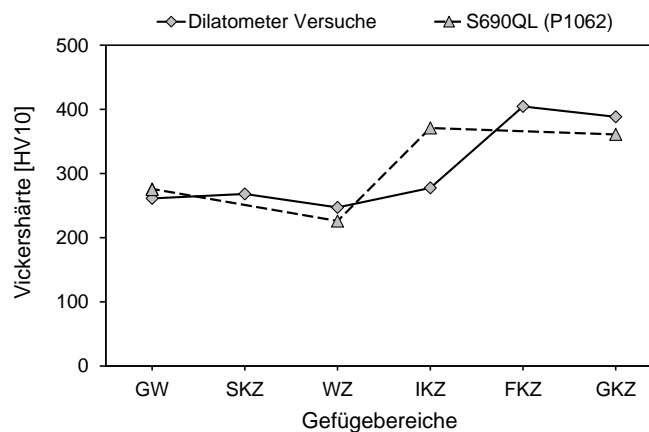


Abb. 6-40: Vergleich der Härtewerte der Dilatometerversuche und der Stirnkehlnähte

Durch einen Vergleich der Härtewerte der jeweiligen Materialkurven, ermittelt aus den Dilatometerversuchen, mit den aus den Härteuntersuchungen an den Kehlnahtverbindungen vorliegenden Werten entsprechend Abschnitt 6.2.7.2, kann eine ausreichend gute Übereinstimmung festgestellt werden, vgl. Abb. 6-40. Die Verwendbarkeit der Materialdaten für das FE-Modell sind somit ausreichend genau.

Die zugeordneten technischen Spannungs-Dehnungs-Verläufe aus Abb. 6-39 sind in die für die Software ANSYS [82] benötigten wahren Spannungen und Dehnungen über die Gleichungen (6.6) und (6.7) zu transformieren und als multilineare Materialkurve in das FE-Modell zu übertragen.

$$\varepsilon_{wahr} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (6.6)$$

$$\sigma_{wahr} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (6.7)$$

6.4.4 Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse

6.4.4.1 Definition des Bruchkriteriums

Den Ergebnissen der FE-Nachrechnung in Abb. 6-41 kann kein eindeutiges Versagen in Form eines Bruchs entnommen werden. Das in den Versuchen beobachtete plötzliche Versagen der Stirnkehlnähte ist durch ein FE-Modell nur anhand weiterer bruchmechanischer Untersuchungen zu simulieren. Da dies jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, ist mit Hilfe einer detaillierten Betrachtung der numerischen Ergebnisse ein Bruchkriterium anhand der vorliegenden Spannungs- und Dehnungsverhältnisse zu definieren.

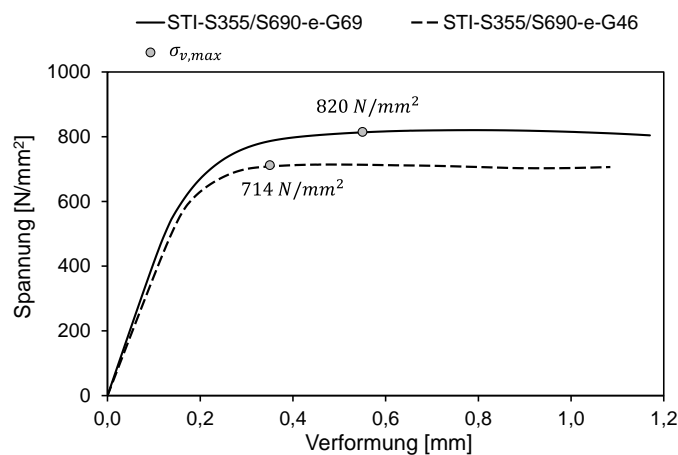


Abb. 6-41: Numerisch ermittelte Spannungs-Verformungs-Verläufe der Verbindungen STI-S355/S690-e-G46 und STI-S355/S690-e-G69

Hierzu werden die in der Naht vorliegenden lokalen Spannungszustände sowie Dehnungen zum Zeitpunkt der maximalen Beanspruchung betrachtet. Unter anderem soll dabei auch der aus den Versuchen in Abhängigkeit der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs festgestellte

variierende Bruchverlauf im Nahtquerschnitt der Stirnkehlnahtverbindungen betrachtet werden. Beispielsweise versagten Versuchskörper, die mit einer geringeren Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs geschweißt wurden, unter einem geringeren Bruchwinkel, als Verbindungen, die mit einer höheren Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs verschweißt wurden, vgl. Abschnitt 6.3.2.3. Eine mögliche Ursache konnte aus den experimentellen Untersuchungen nicht ermittelt werden. Daher werden die Ergebnisse der FE-Untersuchungen ebenfalls herangezogen, um die in der Schweißnaht vorliegenden Spannungszustände auszuwerten und ggf. Rückschlüsse auf das auftretende Versagen zu ziehen.

Verglichen und ausgewertet werden dabei die Spannungszustände entlang der in Abschnitt 6.3.2.2 betrachteten unterschiedlichen Nahtdicken a_{EC} , a_{max} und $a_{3D-Scan}$. Die in Abhängigkeit der Nahtgeometrie zu betrachtenden Bereiche sind für die Verbindung STI-S355/S690-e-G46 in Abb. 6-42 und für die Verbindung STI-S355/S690-e-G69 in Abb. 6-43 dargestellt.

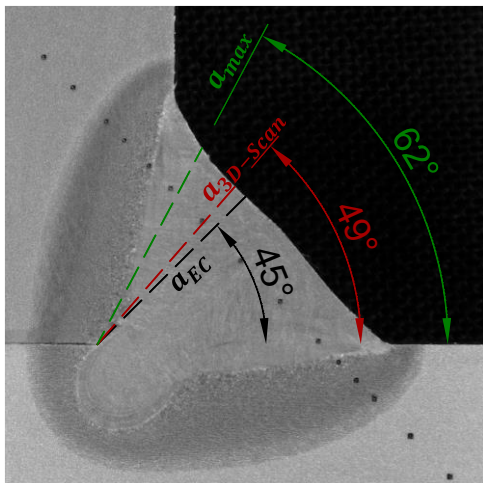


Abb. 6-42: Nahtdicken der Verbindung STI-S355/S690-e-G46

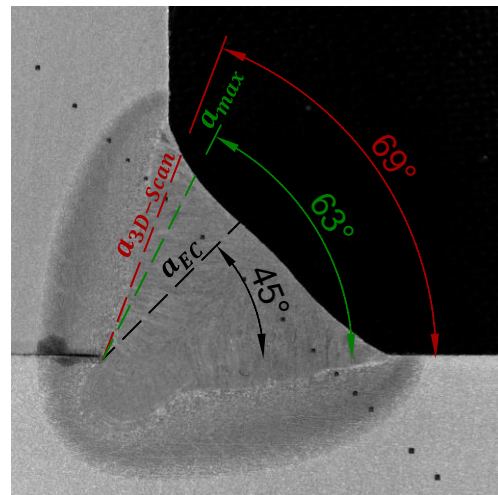


Abb. 6-43: Nahtdicken der Verbindung STI-S355/S690-e-G69

Basierend auf dem Richtungsbezogenen Verfahren des Eurocodes entsprechend Gleichung (4.1), teilt sich die an der Stirnkehlnaht angreifende Beanspruchung in die beiden Spannungskomponenten der Normalspannung σ_{\perp} und Schubspannung τ_{\perp} quer zur Nahtlängsachse auf. Daher werden die in den jeweiligen Querschnitten, aufgespannt durch die Nahtdicke und Länge der Naht, herrschenden Normal- und Schubspannungen ausgelesen und verglichen. Die in Abb. 6-44 und Abb. 6-45 über die Verformung aufgetragenen Spannungswerte entsprechen einem über die jeweilige Querschnittsfläche gemittelten Wert. Als Grenzwerte sind in den Diagrammen die aus den Materialuntersuchungen am reinen Schweißgut abgeleitete maximal

aufnehmbare Normalspannung σ_u (vgl. Tab. 6-6) sowie die zugehörige maximale Schubspannung τ_u aufgetragen.

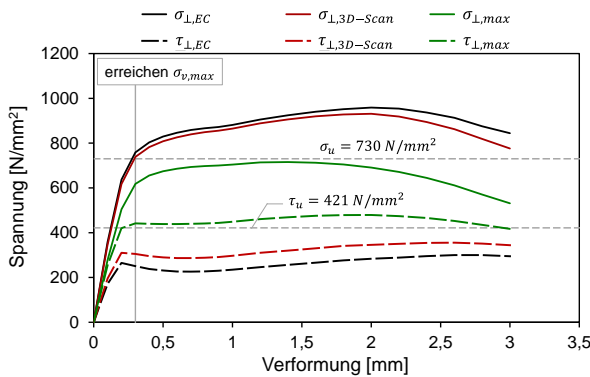


Abb. 6-44: Numerisch ermittelte lokale Spannungszustände in den Ebenen a_{EC} , $a_{3D-Scan}$, a_{max} im Schweißgut (G46)

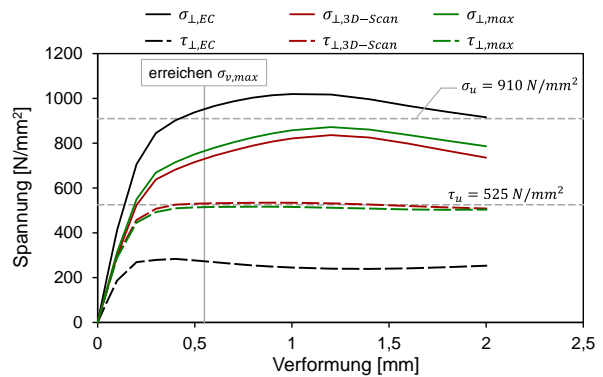


Abb. 6-45: Numerisch ermittelte lokale Spannungszustände in den Ebenen a_{EC} , $a_{3D-Scan}$, a_{max} im Schweißgut (G69)

Unter Einbeziehung der Spannungs-Verformungs-Verläufe aus Abb. 6-41 lässt sich erkennen, dass die Tragfähigkeit $\sigma_{v,max}$ der Verbindung STI-S355/S690-e-G46 bei einer Verformung von ca. $0,35 \text{ mm}$ erreicht wird. Vergleicht man die in den jeweiligen Nahtquerschnitten vorliegenden Spannungsanteile in Abb. 6-44 ist festzustellen, dass hier die Schubspannung τ_{\perp} im Bereich von a_{max} den zulässigen Grenzwert von $\tau_u = 421 \text{ N/mm}^2$ bei Erreichen der Tragfähigkeit $\sigma_{v,max}$ überschreitet. Zwar steigen die Normalspannungen im Bereich der Nahtdicken a_{EC} und $a_{3D-Scan}$ ebenfalls über die zulässige Höchstspannung von $\sigma_u = 730 \text{ N/mm}^2$, da jedoch Metalle zumeist infolge einer Schubspannung versagen, kann diese als maßgebend für das zu definierende Bruchkriterium betrachtet werden [77].

Bei zunehmender Verformung bleibt der Schubspannungsanteil im Querschnitt a_{max} konstant, während die Schubspannungen in den beiden anderen Nahtquerschnitten ($a_{EC} / a_{3D-Scan}$) abnehmen. Es ist davon auszugehen, dass die Naht im Bereich a_{max} zu fließen beginnt und bei Erreichen einer maximalen Dehnung (vgl. Abb. 6-50 bzw. Abb. 6-52) schließlich das Versagen eintritt. Als maximale Dehnung zum Zeitpunkt des Bruchs wird der anhand der experimentellen Versuchsergebnisse festgelegte Mittelwert von $\varepsilon_{A_t} = 0,06 \%$ angesetzt. Dieser ergibt sich aus den in Abschnitt 6.2.6 vorgestellten Messungen der lokalen Verformungen quer zur Nahtlängsachse Δl_{Bruch} dividiert durch die aus den Makroschliffen gemessene Schenkellänge l_0 des einschreibbaren Dreiecks (vgl. Abb. 6-46, links). Da insgesamt vier Wegaufnehmer während der Versuchsdurchführung angebracht waren, wird für die lokale Verformung Δl_{Bruch} der Mittelwert je Versuchskörper berücksichtigt. Das Diagramm aus Abb. 6-46 umfasst die jeweils

ermittelten Bruchdehnungen ε_{A_t} in Abhängigkeit der betrachteten Verbindungen. Im Mittel ergibt sich sowohl für die Verbindungen STI-S355/S690-e-G46 als auch für die Verbindungen STI-S355/S690-e-G69 eine Bruchdehnung von $\varepsilon_{A_t} = 0,06 \%$.

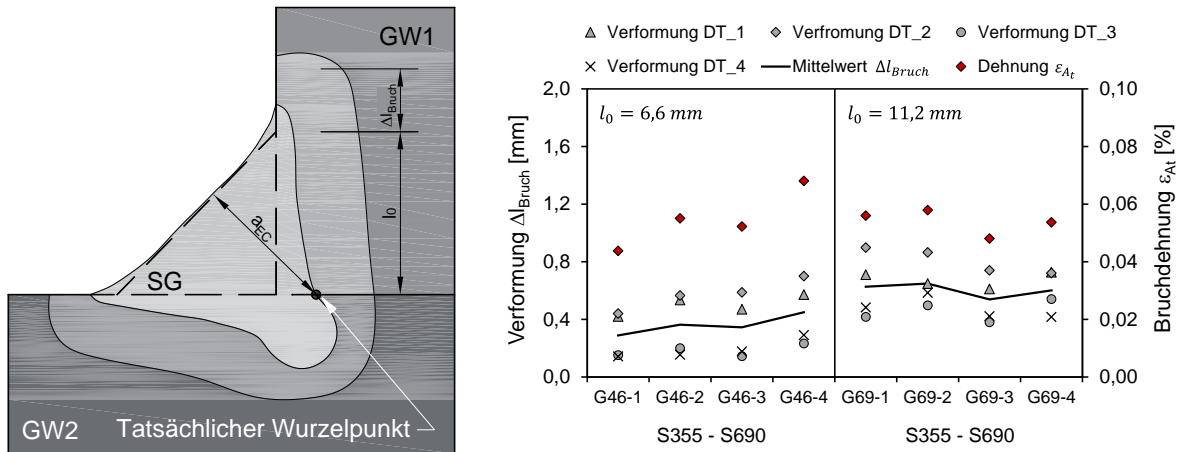


Abb. 6-46: Ermittlung der zulässigen Dehnung ε_{A_t} im Bereich der Naht zum Zeitpunkt des Bruchs für die Verbindungen STI-S355/S690-e-G46 und STI-S355/S690-e-G69

Ein ähnliches Verhalten kann bei der Verbindung STI-S355/S690-e-G69 in Abb. 6-45 zum Zeitpunkt der Verformung von ca. $0,55 \text{ mm}$ beobachtet werden. Eine Überschreitung der maximalen Schubspannung erfolgt hier jedoch zuerst im Nahtquerschnitt $a_{3D-Scan}$.

6.4.4.2 Spannungs-Verformungs-Verläufe

In Abb. 6-47 und Abb. 6-48 sind die aus den numerischen Versuchsnachrechnungen resultierenden Spannungs-Verformungs-Kurven den der experimentellen Untersuchungen gegenübergestellt. Die Spannungen ermitteln sich aus den über die Zeit gemessenen Kraftverläufen, dividiert durch die nach *prEN 1993-1-8* [18] festgelegten Nahtdicken a_{EC} . Aufgetragen sind die experimentell ermittelten Spannungen über die von den externen Wegaufnehmern aufgezeichneten lokalen Verformungen quer zur Nahtlängsachse, vgl. Abschnitt 6.2.6. Analog dazu wurden sowohl die Spannungen als auch Verformungen aus den numerischen Nachrechnungen bestimmt. Die Festlegung des Bruchs erfolgte nach den in Abschnitt 6.4.4.1 festgelegten Kriterien der Erreichung der maximal aufnehmbaren Schubspannung senkrecht zur Nahtachse und eine erreichten Dehnung von $\varepsilon_{A_t} = 0,06 \%$.

Abb. 6-47 und Abb. 6-48 zeigen, dass sowohl die numerische Nachrechnung der Verbindung STI-S355/S690-e-G46 als auch der Verbindung STI-S355/S690-e-G69 eine ausreichend gute Übereinstimmung mit den experimentellen Versuchen aufweist. Die experimentellen Ergebnisse der Verbindung STI-S355/S690-e-G46 aus Abb. 6-47 streuen stark, weshalb hier eine höhere Abweichung zur numerischen Tragfähigkeit mit 8 % vorliegt. Hingegen weicht die numerisch ermittelte Tragfähigkeit der Verbindung STI-S355/S690-e-G69 aus Abb. 6-48 um lediglich 1 % von den experimentell dokumentierten Tragfähigkeiten ab.

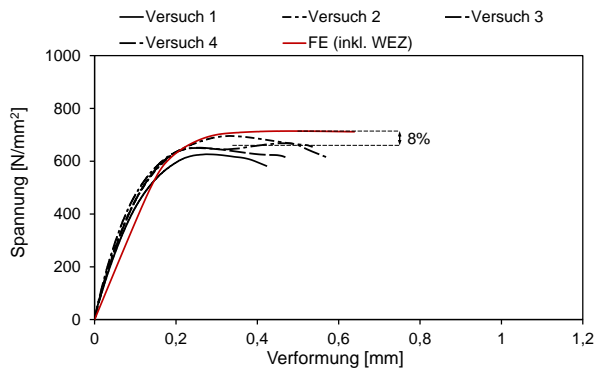


Abb. 6-47: Vergleich der numerischen und experimentellen Spannungs-Verformungs-Kurven der Verbindung STI-S355/S690-e-G46

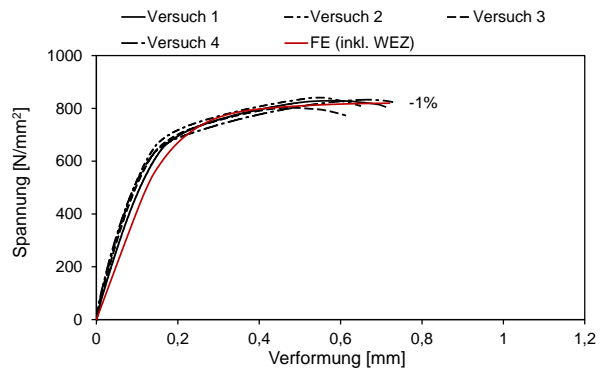


Abb. 6-48: Vergleich der numerischen und experimentellen Spannungs-Verformungs-Kurven der Verbindung STI-S355/S690-e-G69

6.4.4.3 Vergleich der Bruchwinkel

Abschließend sind in Abb. 6-49 und Abb. 6-50 die in der Naht der Verbindung STI-S355/S690-e-G46 auftretenden Vergleichsspannungen und plastischen Dehnungen zum Zeitpunkt des Erreichens von $\sigma_{v,max}$ dargestellt. Die Abbildungen verdeutlichen, dass die höchste Vergleichsspannung und die größte Dehnung im Bereich der Nahtdicke α_{max} (Winkel 62° aus Abb. 6-50) auftreten. Aus den experimentellen Untersuchungen wurde jedoch ein Versagen unter einem Winkel von ca. 49° festgestellt, während das aus der numerischen Simulation definierte Versagen unter einem Winkel von ca. 62° auftritt, vgl. Abb. 6-50.

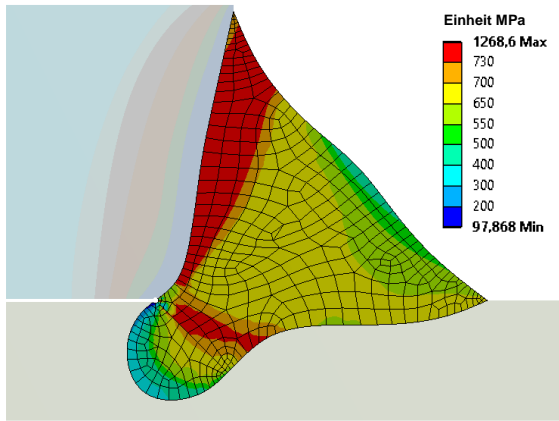


Abb. 6-49: Vergleichsspannung der Verbindung STI-S355/S690-e-G46 bei Erreichen von $\sigma_{v,max}$

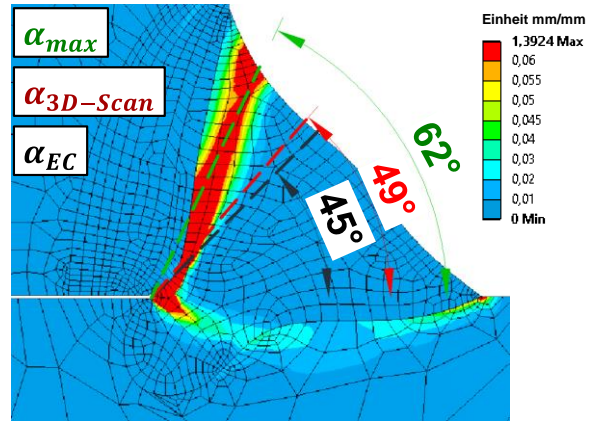


Abb. 6-50: Dehnung der Verbindung STI-S355/S690-e-G46 bei Erreichen von $\sigma_{v,max}$

Der Vergleich des tatsächlichen Versagens der Verbindung STI-S355/S690-e-G69 mit dem aus der numerischen Nachrechnung festgelegten Versagen, zeigt hingegen eine gute Übereinstimmung. In Abb. 6-51 und Abb. 6-52 ist die Vergleichsspannung und plastische Dehnung der Verbindung STI-S355/S690-e-G69 zum Zeitpunkt des Erreichens von $\sigma_{v,max}$ dargestellt. Die Spannungs- und Dehnungskonzentration liegen, übereinstimmend mit den experimentellen Untersuchungen, im Bereich der Nahtdicke $\alpha_{3D-Scan}$.

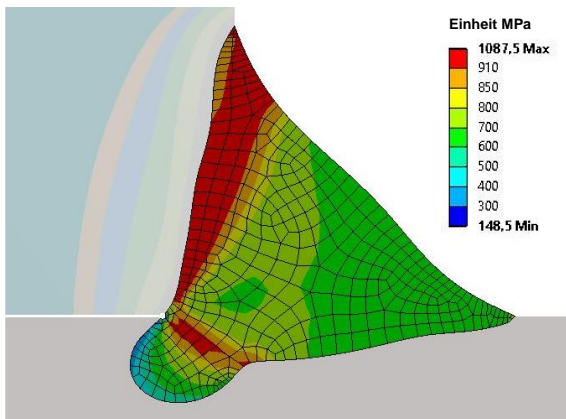


Abb. 6-51: Vergleichsspannung der Verbindung STI-S355/S690-e-G69 bei Erreichen von $\sigma_{v,max}$

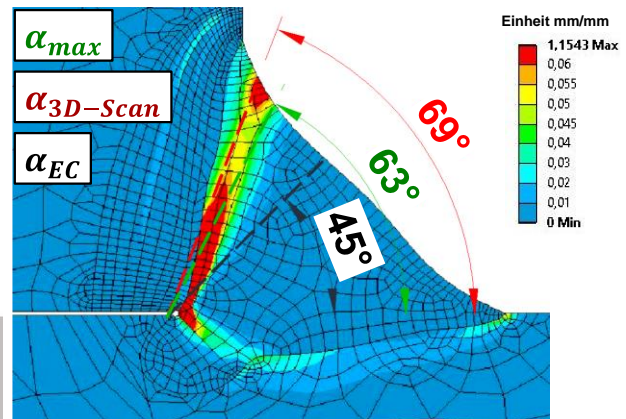


Abb. 6-52: Dehnung der Verbindung STI-S355/S690-e-G69 bei Erreichen von $\sigma_{v,max}$

6.4.4.4 Zusammenfassung

Der Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse zeigt eine insgesamt ausreichend genaue Übereinstimmung der Spannungs-Verformungs-Verläufe. Aus der numerischen Versuchsnachrechnung konnte hergeleitet werden, dass das Versagen einer Stirnkehlnaht aufgrund einer Überschreitung der maximal aufnehmbaren Schubspannung im Schweißgut auftritt. Im Bereich der maximalen Schubspannung können gleichzeitig lokale Dehnungskonzentrationen festgestellt werden, die schließlich zu einem Versagen der Naht führen. Somit ist als Bruchkriterium für die Parameteruntersuchung ein Erreichen der zulässigen Schubspannung in Kombination mit einer Überschreitung der maximalen Dehnung von $\varepsilon_{At} = 0,06\%$ anzusetzen.

Der numerisch ermittelten Bruchwinkel der Verbindung mit höherfestem Schweißzusatzwerkstoff (G69) lag im Bereich der aus den Versuchen dokumentierten Winkel. Für die Verbindung geschweißt mit einem normalfesten Schweißzusatz (G46), lässt sich keine Übereinstimmung feststellen. Die Fragestellung des variierenden Versagens von Stirnkehlnahtverbindungen kann anhand des FE-Modells nicht beantwortet werden. Hierzu sind weitere detaillierte Untersuchungen des Gefüges im Schweißgut notwendig, da das Versagen ggf. darauf zurückzuführen ist.

Aufgrund der ausreichend genauen Übereinstimmung der Spannungs-Verformungs-Verläufe, wurden die beiden entwickelten FE Modelle als ausreichend genaue Abbildung des tatsächlichen Tragverhaltens einer Stirnkehlnahtverbindung bestätigt und können somit für die Parameterstudie verwendet werden.

6.4.5 Parameterstudie: Schweißgutfestigkeit

6.4.5.1 Allgemeines

Ziel der Parameterstudie ist die Untersuchung des Einflusses einer variierenden Festigkeit im Schweißgut auf die globale Tragfähigkeit der Kehlnahtverbindung. Als Ausgangsmodelle werden der Parameterstudie die beiden Geometrien der entwickelten und validierten Modelle der Verbindungen STI-S355/S690-e-G46 (Modell G46) und STI-S355/S690-e-G69 (Modell G69) zugrunde gelegt. Unter Ansatz der im Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] gewonnenen Materialkurven unterschiedlicher Schweißgüter, vgl. Abschnitt 6.2.2.2, erfolgen weitere numerische Auswertungen zur Ermittlung der Tragfähigkeiten von Kehlnähten. Für die Durchführung

der Parameterstudie werden ausschließlich die Materialdaten im Schweißgut variiert. Die Geometrie und Materialkurven des Grundwerkstoffs der jeweiligen Modelle werden beibehalten. Die vorliegenden Materialdaten umfassen Kennwerte von Schweißgütern, die sich aus einer Aufmischung variierender Schweißzusatzwerkstoffe (G46, G69, G89) und Grundwerkstoffe (S355, S690) zusammensetzen. Dies ermöglicht die Untersuchung der Auswirkungen auf das globale Tragverhalten infolge einer höheren Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs und der Aufmischung mit einem höherfesten Grundwerkstoff. Die daraus resultierenden Tragfähigkeitsänderungen werden getrennt in zwei Parameterstudien betrachtet und ausgewertet. Die verwendeten Materialdaten der Schweißgüter können Tab. 6-7 entnommen werden.

Tab. 6-7: Für die Parameterstudie der Kehlnahtverbindungen verwendete Materialkennwerte des Schweißguts

Mechanische Eigenschaften	Schweißgutfestigkeiten in Abhängigkeit der Aufmischung mit dem Grundwerkstoff				
	G46 (S355/S690)	G69 (S355/S690)	G46 (S355)	G69 (S355)	G89 (S355)
$R_{eH} / R_{p0.2}$ [N/mm ²]	691	686	514	685	803
R_m [N/mm ²]	730	910	582	776	912
E-Modul [N/mm ²]	145000	196000	195000	169000	185000

Die Materialdaten der Schweißgüter mit Aufmischung des Grundwerkstoffs S355/S690 entsprechen den bereits vorgestellten, aus der Kehlnaht der Mischverbindungen entnommenen Materialproben. Die Materialdaten der Schweißgüter mit einer Aufmischung des Grundwerkstoffs S355J2+N stammen aus den Materialuntersuchungen des Forschungsvorhabens *FOSTA P1062* [56] (vgl. Tab. 6-2).

Anzumerken ist, dass die in Tab. 6-7 aufgeführten Festigkeitswerte nicht den Eigenschaften der in den Versuchen geprüften Nähte entsprechen und daher eine Gegenüberstellung der experimentellen und numerischen Ergebnisse entfällt. Darüber hinaus stammen die Materialdaten der Schweißgüter, die eine Aufmischung mit dem Grundwerkstoff der Güte S355 aufweisen, ausschließlich aus Stumpfnähten und unterlagen somit von Stirnkehlnähten abweichenden Abkühlbedingungen. Die Untersuchungen dienen daher lediglich einer theoretischen Betrachtung des Einflusses aus der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs respektive einer zusätzlichen Aufmischung durch den höherfesten Grundwerkstoff bei Mischverbindungen.

6.4.5.2 Parameterstudie: Festigkeit Schweißzusatzwerkstoff

In einer ersten Untersuchung wird der tragfähigkeitssteigernde Einfluss der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs, der bereits aus den experimentellen Untersuchungen in Abschnitt 6.3.5 hervorging, betrachtet. Verglichen werden hierfür die numerisch bestimmten Tragfähigkeiten bei zunehmender Festigkeit im Schweißzusatzwerkstoff, die jedoch eine Aufmischung gleicher Grundwerkstofffestigkeiten aufweisen.

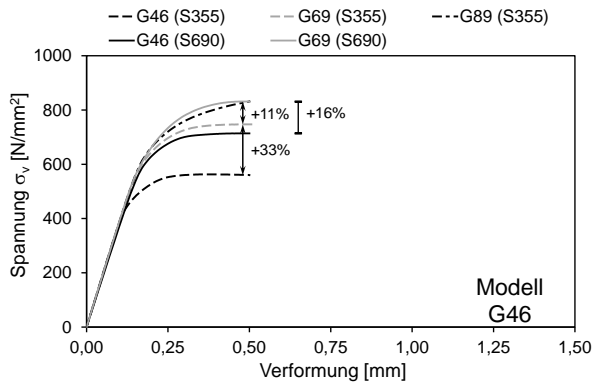


Abb. 6-53: Tragfähigkeit bei zunehmender Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs Modell G46

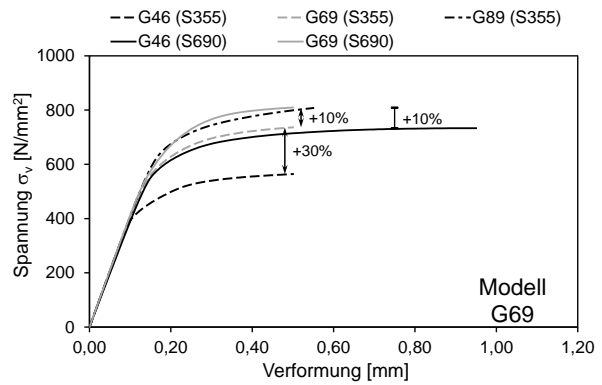


Abb. 6-54: Tragfähigkeit bei zunehmender Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs Modell G69

Vergleicht man die in den Diagrammen aus Abb. 6-53 und Abb. 6-54 dargestellten Spannungs-Verformungs-Kurven, kann analog zu den experimentellen Ergebnissen eine mit dem Schweißzusatzwerkstoff zunehmende globale Tragfähigkeit beobachtet werden. Ein Vergleich der Ergebnisse beider Modelle hinsichtlich der variierenden Geometrie weist geringe Abweichungen auf, so dass der Einfluss der Nahtgeometrie vernachlässigt werden kann.

Tab. 6-8: Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs

	G46 (S355)	G69 (S355)	G89 (S355)	Zunahme	G46 (S355/S690)	G69 (S355/S690)	Zunahme
Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]:	582	776	912	33% / 18%	730	910	25%
Tragfähigkeit $\sigma_{v,Modell G46}$ [N/mm ²]:	560	747	832	33% / 11%	714	831	16%
Tragfähigkeit $\sigma_{v,Modell G69}$ [N/mm ²]:	564	736	808	30% / 10%	733	809	10%

Tab. 6-8 verdeutlicht durch eine Gegenüberstellung, dass die prozentuale Zunahme der globalen Tragfähigkeit zum Teil ähnlich der prozentualen Zunahme der Festigkeit im Schweißgut, infolge einer Festigkeitssteigerung des Schweißzusatzwerkstoffs, ausfällt. Nimmt beispielsweise die Festigkeit im Schweißgut, hervorgerufen durch eine Festigkeitszunahme des

Schweißzusatzwerkstoffs von G46 (S355) zu G69 (S355), um 33 % zu, lässt sich eine Tragfähigkeitszunahme von ebenfalls 33 % (Modell G46) bzw. 30 % (Modell G69) feststellen. Nimmt die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs von G69 (S355) zu G89 (S355) zu, lässt sich eine Zunahme der Schweißgutfestigkeit von 18 % feststellen. Die daraus erreichte Tragfähigkeitssteigerung liegt mit 11 % (Modell G46) bzw. 10 % (Modell G69) darunter.

Bei einer Aufmischung mit dem höherfesten Grundwerkstoff wird bei zunehmender Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs von G46 (S355/S690) zu G69 (S355/S690) ebenfalls eine nur halb so hohe Steigerung der Tragfähigkeit von 16 % (Modell G46) bzw. 10 % (Modell G69), im Vergleich zur Festigkeitszunahme im Schweißgut, erreicht.

6.4.5.3 Parameterstudie: Aufmischung Grundwerkstoff

Die zur Validierung der Modelle in Abschnitt 6.4.4 verwendeten Charakteristika der Schweißgüter resultieren aus einer Aufmischung der Schweißzusätze G46 bzw. G69 mit den beiden Grundwerkstoffen der Mischverbindung S690 und S355. Anhand der vorliegenden Materialkurven von Schweißgütern, die eine Aufmischung gleicher Schweißzusätze jedoch nur mit dem normalfesten Grundwerkstoff S355 aufweisen (bspw. G46 (S355)), kann der bereits aus den experimentellen Untersuchungen hervorgehende leichte Einfluss aus der Vermischung mit dem höherfesten Grundwerkstoff noch einmal numerisch betrachtet werden. Auch hier lässt sich anhand der Ergebnisse aus Abb. 6-55 und Abb. 6-56 eine Steigerung der globalen Tragfähigkeit infolge der Aufmischung mit einem höherfesten Grundwerkstoff feststellen.

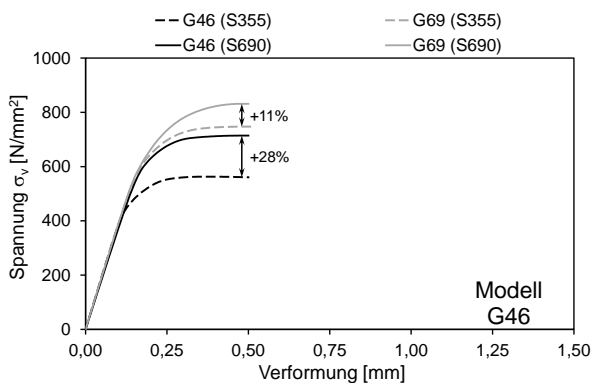


Abb. 6-55: Parameterstudie unter Ansatz der Geometrie der Verbindung STI-S355/S690-e-G46

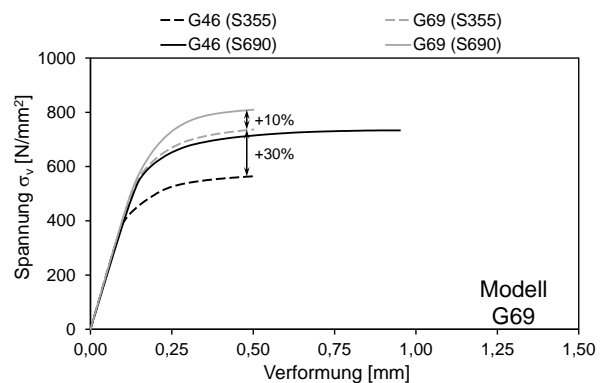


Abb. 6-56: Parameterstudie unter Ansatz der Geometrie der Verbindung STI-S355/S690-e-G69

Die in Tab. 6-9 aufgeführten Werte zeigen, dass auch hier die Aufmischung mit einem höherfesten Grundwerkstoff zu höheren Festigkeiten im Schweißgut und somit zu höheren Tragfähigkeiten der Verbindungen führt. Insgesamt lässt sich feststellen, dass eine Aufmischung mit einem Grundwerkstoff höherer Festigkeit als des Schweißzusatzwerkstoffs eine höhere Tragfähigkeitszunahme zufolge hat. Vergleicht man die Ergebnisse in Tab. 6-9 mit den Ergebnissen aus Tab. 6-8 zeigt sich, dass trotz einer höheren Festigkeitszunahme im Grundwerkstoff (S355 zu S690), eine größere Zunahme der Tragfähigkeit mit Steigerung der Festigkeit im Schweißzusatzwerkstoff (G46 zu G69) erreicht wird.

Tab. 6-9. Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Aufmischung im Schweißgut mit dem Grundwerkstoff

	G46 (S355)	G46 (S355/S690)	Zunahme	G69 (S355)	G69 (S355/S690)	Zunahme
Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]:	582	730	25%	776	910	17%
Tragfähigkeit $\sigma_{v,Modell G46}$ [N/mm ²]:	560	714	28%	747	831	11%
Tragfähigkeit $\sigma_{v,Modell G69}$ [N/mm ²]:	564	733	30%	736	809	10%

6.4.6 Zusammenfassung der numerischen Untersuchungen an Stirnkehlnahtverbindungen

Im Rahmen der numerischen Untersuchungen wurden zwei Modelle unterschiedlicher Nahtgeometrien erstellt und mit den vorliegenden Materialdaten der Wärmeeinflusszone, der Grundwerkstoffe und dem Schweißgut vervollständigt. Eine Nachrechnung der Versuche zeigte eine gute Übereinstimmung, sodass das Modell als validiert betrachtet werden kann.

Anhand einer Parameterstudie konnte anschließend der Einfluss der Festigkeit des Schweißguts auf die globale Tragfähigkeit untersucht werden. Bestätigt werden konnte, dass sowohl eine zunehmende Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs als auch eine Aufmischung mit einem höherfesten Grundwerkstoff die Festigkeit im Schweißgut und somit auch die globale Tragfähigkeit der Kehlnahtverbindung anhebt. Insgesamt zeigten die numerischen Ergebnisse, analog zu den experimentellen Untersuchungen, eine höhere Tragfähigkeitszunahme mit steigender Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs als mit einer steigenden Festigkeit des Grundwerkstoffs.

Aufgrund der geringen Anzahl an Materialdaten unterschiedlicher Schweißgüter, ist es nicht möglich einen abgesicherten Gewichtungsfaktor für die Festigkeit des höherfesten Grundwerkstoffs herzuleiten. Die auf Versuchen basierenden numerischen Betrachtungen dienen daher lediglich der Bestätigung eines Einflusses aus der Festigkeit des Grundwerkstoffs und des Schweißzusatzwerkstoffs.

6.5 Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse

6.5.1 Vorgehen

Um die Anwendbarkeit des von *Rasche* [67] entwickelten Modells für die Bemessung von Mischverbindungen zu bestätigen, bedarf es einer erneuten statistischen Auswertung unter Berücksichtigung einer durch Mischverbindungen ergänzten Datenbasis bestehend aus experimentell ermittelten Tragfähigkeiten von Kehlnahtverbindungen. Für die Auswertung sollen zweier alternative Verfahren zum Einsatz kommen und die daraus hervorgehenden Ergebnisse miteinander verglichen und bewertet werden. Die Beurteilung des zu überprüfenden Bemessungskonzeptes ist anschließend anhand der Ergebnisse des maßgebenden Auswerteverfahrens vorzunehmen.

Die erste der beiden Methoden entspricht dem standardisierten Verfahren zur Überprüfung von bestehenden Bemessungskonzepten nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24]. Das Auswerteverfahren nach *Anhang D* [24] berücksichtigt neben der Streugröße des Widerstandsmodells auch die Streuung der darin enthaltenen Basisvariablen und kombiniert diese zu einem charakteristischen Widerstand. Streuungen weiterer ggf. wichtiger Variablen, die ebenfalls die Tragfähigkeit einer geschweißten Verbindung beeinflussen, jedoch nicht als direkter Parameter in das Bemessungsmodell eingehen, werden nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24] nicht berücksichtigt. Dies hat zur Folge, dass beispielsweise die aus den Versuchsergebnissen der Stirnkehlnahtverbindungen beobachtete Streuung der aus den Bruchverläufen resultierenden Nahtdicken $a_{3d-scan}$ in die Auswertung nicht miteinbezogen werden können.

Infolgedessen wird eine weitere statistische Auswertung der Versuchsergebnisse nach dem von *Kleiner* [52] angepassten Konzept durchgeführt. Um beispielsweise die teilweise starke Streuung der Nahtdicken in die statistische Auswertung einbeziehen zu können, erweiterte *Kleiner* [52] das Auswerteverfahren nach *Anhang D* [24] speziell für Bauteile, die ein Versagen auf Bruch aufzeigen. Für eine genaue Erläuterung des angepassten statistischen Verfahrens sei hier auf *Kleiner* [52] verwiesen. Ein grobes Ablaufschema wurde bereits in Tab. 5-1 vorgestellt.

Anhand eines anschließenden Vergleichs der aus der Statistik abgeleiteten neuen Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,erw.}$ mit den in Tab. 4-2 aufgetragenen $\beta_{w,mod}$ - Werten des Eurocodes, kann eine Beurteilung der Anwendbarkeit des Bemessungsmodells für Kehlnähte an Verbindungen gleicher als auch Mischverbindungen vorgenommen werden. Zusätzlich soll eine Aussage hinsichtlich der Qualität des von *Rasche* [67] entwickelten Konzepts im Hinblick auf das Tragverhalten von Kehlnähten getroffen werden.

6.5.2 Statistisch zu überprüfendes Bemessungsmodell

Es gilt zu prüfen, ob das in Abschnitt 4.3.1 vorgestellte Bemessungskonzept auch anhand der durch Mischverbindungen erweiterten Datenbasis eine ausreichend gute Qualität aufweist. Die Auswertungen sind aufgrund unterschiedlicher Belastungsrichtungen getrennt für Flankenkehlnähte und Stirnkehlnähte durchzuführen, weshalb eine Anpassung der Gleichung (4.7) an die vorliegende Belastungsrichtung erforderlich ist. Daraus lässt sich für die rein auf Abscheren beanspruchten Flankenkehlnahtverbindungen folgender Ausdruck herleiten:

$$\tau_{II,Rd} = \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,mod} \cdot \gamma_{M2}} \quad (6.8)$$

Die mehrachsige Beanspruchung von Stirnkehlnahtverbindungen führt zu folgender Gleichung:

$$\sigma_{v,Rd} = \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\sqrt{2} \cdot \beta_{w,mod} \cdot \gamma_{M2}} \quad (6.9)$$

Eine zusätzliche Auswertung der Begrenzung der bei Stirnkehlnahtverbindungen auftretenden Normalspannung σ_{\perp} nach Gleichung (4.3) entfällt, da diese für die auszuwertenden Verbindungen nicht maßgebend ist.

Aus den experimentellen und numerischen Untersuchungen konnte infolge einer zunehmenden Festigkeit des höherfesten Grundwerkstoffs lediglich eine leichte Steigerung der Tragfähigkeit festgestellt werden. Bedingt durch den geringen Einfluss wird in der statistischen Auswertung die Festigkeit des geringer festen Grundwerkstoffs für $f_{u,PM}$ angesetzt, was den bereits nach *prEN 1993-1-8* [18] festgelegten Bemessungsregeln entspricht, vgl. Abschnitt 4.3. In Anbetracht der aus den statistischen Ergebnissen abzuleitenden Qualität des Bemessungsansatzes sowie der resultierenden Korrelationsbeiwerte wird anschließend über die Notwendigkeit einer Anpassung des Konzepts entschieden.

Die statistischen Auswertungen sind in Abhängigkeit des Kehlnahttyps nach Gleichung (6.8) bzw. (6.9), unter Vernachlässigung des Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod}$ und des Teilsicherheitsbeiwerts γ_{M2} , durchzuführen.

6.5.3 Basisvariablen

6.5.3.1 Grundlagen

Die statistischen Auswerteverfahren nach *Anhang D* [24] und nach *Kleiner* [52] erfordern als Eingangswerte die Streugrößen der im Bemessungsmodell enthaltenen Basisvariablen. Zu den Basisvariablen zählen entsprechend Gleichung (4.7)

- die Festigkeit des Grundwerkstoffs $f_{u,PM}$,
- die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs $f_{u,FM}$

und ergänzend für das Verfahren nach *Kleiner* [52]

- die Nahtdicke a .

In den vorangegangenen Forschungsvorhaben konnten bereits weitere auf die Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen wirkende Einflussgrößen, wie beispielsweise die Schweißgeschwindigkeit v_s und die davon beeinflusste Abkühlzeit $t_{8/5}$, festgestellt werden (vgl. Abschnitt 5). Da jedoch die Erfassung von fertigungsbedingten Parametern in einem Bemessungsmodell eher schwierig ist, fließen diese ausschließlich in Form der natürlichen Streuung der Versuchsergebnisse in die statistische Auswertung ein.

Für die Basisvariablen sind die statistischen Größen der tatsächlich vorhandenen Werte X_i sowie der Grundgesamtheit X_j zu ermitteln. Zur Berücksichtigung der in der Realität vorliegenden natürlichen Streuung der Basisvariablen bedarf es der Erhebung einer ausreichend großen Grundgesamtheit X_j , die oftmals nicht durch die aus den Versuchen erfassten Größen abgedeckt werden kann. Ist dies der Fall, kann auf Erfahrungswerte aus der Literatur zurückgegriffen werden.

Als weitere Größe sind die nominellen Werte der Basisvariablen X_{nom} einzubeziehen. Unter Ansatz der nominellen Werte wird das statistische Modell hinsichtlich des daraus abgeleiteten korrigierten Teilsicherheitsbeiwerts γ_M^* kontrolliert und zur Einhaltung des geforderten Sicherheitsniveaus ggf. angepasst.

Die für die statistischen Auswertungen angesetzten Größen der Basisvariablen werden im Folgenden noch einmal kurz dargestellt und erläutert.

6.5.3.2 Basisvariable der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs $f_{u,PM}$

Die im Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] gesammelten Daten der Basisvariable $f_{u,PM}$ reichen nicht aus, um eine möglichst realitätsnahe Grundgesamtheit $X_{j,f_{u,PM}}$ abzubilden. Daher wird für die Auswertung auf Erfahrungswerte aus der Literatur zurückgegriffen. *Rasche* [67] nutzte zur Entwicklung des Bemessungsansatzes die Erfahrungswerte entsprechend des *Background Document D.03* [22]. Da diese jedoch aus dem Jahre 1990 stammen, überprüfte *Kleiner* [52] die hier angegebenen Werte anhand einer, aus mehreren Literaturstellen [43], [49], aufgestellten Datenbasis aus Zugversuchen am reinen Grundwerkstoff.

Im Rahmen dieser Arbeit ist die von *Kleiner* [52] aufgestellte Datenbasis durch zusätzliche Versuchsergebnisse von Zugversuchen am reinen Grundwerkstoff des Steel Construction Institut (SCI) erweitert worden. Die für die Auswertungen benötigten statistischen Kenngrößen der vorliegenden Grundgesamtheit können Tab. 6-10 entnommen werden.

Tab. 6-10: Statistische Kenngrößen der Grundgesamtheit der Basisvariable der Festigkeit des Grundwerkstoffs $f_{u,PM}$

Statistische Kenngrößen: Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs $f_{u,PM}$	Differenzierung der Stahlgüten				
	S355 Da Silva [43]	S460 SCI [80]	S690 SCI [80]	S700 SCI [80]	S960 SCI [80]
Nominell X_{nom} [N/mm ²]:	490	540	770	750	980
Mittelwert $X_{j,f_{u,PM}}$ [N/mm ²]:	533	613	840	880	1056
Standardabweichung $\sigma_{j,f_{u,PM}}$ [N/mm ²]:	16,5	31,1	29,5	63,1	46,1
Variationskoeffizient $V_{j,f_{u,PM}}$ [-]:	3,1%	5,1%	3,5%	7,2%	4,4%
Anzahl [-]:	1972	1070	589	42	34

Ergänzend sind in Tab. 6-10 die benötigten nominellen Zugfestigkeiten der Grundwerkstoffe aufgeführt. Die angegebenen Werte entsprechen den nach *prEN 1993-1-1* [19] anzusetzenden Zugfestigkeitswerten einer Materialdicke $t \leq 40\text{mm}$. Da der *prEN 1993-1-1* [19] für die Festigkeitsklasse S960 keine Angaben entnommen werden können, ist als nomineller Wert die untere Grenze der Zugfestigkeit entsprechend der Produktnorm *DIN EN 10025-6* [10] bzw. *DIN EN 10149-2* [11] aufgeführt.

Die für die Auswertung der Versuchsdaten des Forschungsvorhabens *FOSTA P1062* [56] anzusetzenden tatsächlichen Zugfestigkeitswerte der Grundwerkstoffe $X_{i,f_{u,PM}}$, wurden bereits in Abschnitt 6.2.2.1 vorgestellt. Den statistischen Auswertungen sind die in Tab. 6-1 aufgeführten

Mittelwerte zugrunde gelegt. Für die Auswertung von Versuchsergebnissen anderer Forschungsvorhaben wurden die tatsächlichen Festigkeitswerte der verwendeten Grundwerkstoffe aus der jeweils vorliegenden Literatur ausgelesen.

6.5.3.3 Basisvariable der Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs $f_{u,FM}$

Bisher stand für die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs keine gesicherte und statistisch ausgewertete Grundgesamtheit $X_{j,f_{u,FM}}$ zur Verfügung. Dies ist dadurch geschuldet, dass die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs bislang nicht als Basisvariable in das Bemessungsmodell einging. Auch dem *Background Document D.03* [22] ist keine Empfehlung hinsichtlich eines anzusetzenden Variationskoeffizienten zu entnehmen, weshalb hier die Notwendigkeit bestand, eine ausreichend große Datenerhebung für eine gesicherte Grundgesamtheit zu erstellen.

Bereits in mehreren Forschungsvorhaben konnte festgestellt werden, dass die sich im Schweißgut einstellenden mechanischen Eigenschaften trotz gleicher Werkstoffkombinationen in Abhängigkeit des Schweißprozesses einer gewissen Streuung unterliegen. Um eine realitätsnahe Streuung zu erhalten, sind der Grundgesamtheit Ergebnisse von Zugversuchen an Schweißgutproben, die unter variierenden Parametern sowie von unterschiedlichem Schweißfachpersonal geschweißt wurden, zugrunde gelegt werden.

Tab. 6-11: Statistische Kenngrößen der Grundgesamtheit der Basisvariable der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs $f_{u,FM}$

Statistische Kenngrößen: Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs $f_{u,FM}$	Differenzierung der Festigkeitsklassen		
	G46 / T46	G69 / T69	G89 / T89
Nominell X_{nom} [N/mm ²]:	530	770	940
Mittelwert $X_{j,f_{u,FM}}$ [N/mm ²]:	610	822	1005
Standardabweichung $\sigma_{j,f_{u,FM}}$ [N/mm ²]:	36,9	58,8	66,3
Variationskoeffizient $V_{j,f_{u,FM}}$ [-]:	6,1%	7,2%	6,6%
Anzahl [-]:	133	107	72

Durch die Bereitstellung von Daten mehrerer Baufirmen und Herstellern von Schweißzusatzwerkstoffen sowie aus der vorliegenden Literatur entnommener Daten, konnte *Kleiner* [52] bereits einen ausreichend großen Datenpool erstellen. Die aufgestellte Grundgesamtheit konnte durch die im Vorhaben *FOSTA P1062* [56] und dem in Kapitel 8 vorgestellten Vorhaben

HighButtWeld [36] durchgeführten Zugversuchen erweitert werden. Die daraus abgeleiteten statistischen Größen der Grundgesamtheit der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs können Tab. 6-11 entnommen werden.

6.5.3.4 Nahtdicke a

Als Empfehlung für die Grundgesamtheit der Nahtdicke a ist im *Background Document D.03* [22] ein Variationskoeffizient von $V = 0,10$ (10 %) angegeben. Die Untersuchungen der Nahtdicken in Abschnitt 6.3.2 haben gezeigt, dass vor allem die Nahtdicken der Stirnkehlnähte eine hohe Streuung aufweisen und darüber hinaus zum Teil stark von den nach Eurocode anzusetzenden Nahtdicken a_{EC} abweichen. Hingegen viel die Streuung der Nahtdicken von Flankenkehlnähte wesentlich geringere aus und die aus den Bruchverläufen resultierenden Nahtdicken $a_{3D-Scan}$ wiesen eine gute Übereinstimmung mit den nach Eurocode anzusetzenden Nahtdicken a_{EC} auf. Der Grundgesamtheit der Nahtdicken für Flankenkehlnähte sind daher die statistischen Kenngrößen der aus den Makroschliffen nach *prEN 1993-1-8* [18] ausgemessenen Nahtdicken a_{EC} und den Stirnkehlnähten die Grundgesamtheit der aus den Bruchverläufen resultierenden Nahtdicken $a_{3D-Scan}$ in Tab. 6-12 zugrunde gelegt. Berücksichtigt wurden hier die aus den Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] und *SAFEBRITILE* [44] vorliegenden Werte.

Tab. 6-12: Statistische Kenngrößen der Grundgesamtheit der Basisvariable der Nahtdicke a

Statistische Kenngrößen:	Flankenkehlnähte	Stirnkehlnähte
Nahtdicke a	a_{EC}	$a_{3d-Scan}$
Nominell X_{nom} [mm]:	5	5
Mittelwert $X_{j,a}$ [mm]:	7,09	7,21
Standardabweichung $\sigma_{j,a}$ [mm]:	0,79	0,95
Variationskoeffizient $V_{j,a}$ [-]:	11,1%	13,2%
Anzahl [-]:	89	18

Den Ergebnissen der statistischen Auswertung der Flankenkehlnahtverbindungen in Tab. 6-12 ist zu entnehmen, dass der daraus abgeleitete Variationskoeffizient mit $V = 0,111$ (11,1 %) leicht über dem Variationskoeffizienten entsprechend des *Background Document D.03* [22] liegt.

Die Grundgesamtheit der Stirnkehlnähte beinhaltet eine geringere Anzahl an Daten, da ausschließlich im Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] Stirnkehlnähte untersucht und entsprechende Bruchverläufe ermittelt wurden. Die Ermittlung der Tragfähigkeiten erfolgte zwar unter Ansatz der Nahtdicken a_{EC} , jedoch soll, auf der sicheren Seite liegend, die Streuung der aus den variierenden Bruchverläufen abgeleiteten Nahtdicken in der statistischen Auswertung zusätzlich berücksichtigt werden. Den Ergebnissen aus Tab. 6-12 ist zu entnehmen, dass der Variationskoeffizient mit $V = 0,132$ (13,2 %) deutlich über dem nach dem *Background Document D.03* [22] anzusetzenden Wert liegt.

6.5.4 Erhebung der statistisch auszuwertenden Datenbasis von Tragfähigkeiten an Kehlnahtverbindungen

Für die statistische Auswertung wurden neben den Versuchsergebnissen aus dem Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] die Ergebnisse aus den Vorhaben *FOSTA P652* [59], *FOSTA P812* [54], *SAFEBRIC TILE* [44] sowie der *Zusatzuntersuchungen* [55] in einer Datenbasis zusammengefasst. Insgesamt konnten somit 176 Versuche an Flankenkehlnähten und 172 Versuche an Stirnkehlnähten ausgewertet werden. Die erstellte Datenbasis umfasst neben den Mischverbindungen auch Versuchsergebnisse von Kehlnahtverbindungen an Grundwerkstoffen gleicher Festigkeit, die mit unterschiedlichen Mechanisierungsgraden des Schweißprozesses in Kombination variierender Prozessparametern, unterschiedlichen Nahtlängen als auch Anzahl an Schweißlagen gefertigt wurden. Eine praxisnahe Streuung der Versuchsergebnisse kann somit gewährleistet werden.

6.5.5 Festlegung der Evaluationsgruppen

Die Überprüfung des bereits in der Norm platzierten Bemessungskonzepts nach *Rasche* [67], erfordert die Ermittlung neuer, vom Schweißzusatzwerkstoff abhängender, Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,erw}$. anhand der durch Mischverbindungen erweiterten Datenbasis. Die Einteilung der Versuchswerte in Evaluationsgruppen ist somit in Abhängigkeit der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs vorzunehmen. Innerhalb der Evaluationsgruppe ist zusätzlich zwischen Stirn- und Flankenkehlnähten zu differenzieren.

6.5.6 Bewertungskriterien zur Beurteilung der Qualität des Bemessungsmodells

Die Qualität des Bemessungsmodells ist anhand der Ergebnisse der statistischen Auswertung festzulegen. Als Beurteilungsparameter ist unter anderem die Mittelwertkorrektur b zu betrachten. Bildet das auszuwertende Bemessungsmodell die aus den Versuchen ermittelte Tragfähigkeit genau ab, resultiert aus der statistischen Auswertung eine Mittelwertkorrektur von $b = 1,0$. Eine genaue Abbildung der tatsächlich vorhandenen Tragfähigkeiten wird jedoch selten erreicht, sodass der Literatur empfohlene Grenzwertbereiche für eine ausreichend genaue Abbildung entnommen werden können. Als Grenzwertbereich werden die Empfehlungen aus dem Forschungsvorhaben *SAFEBRIC TILE* [44] von $0,85 \leq b \leq 1,15$ zugrunde gelegt. Liegt die Mittelwertkorrektur außerhalb des Grenzwertbereichs ist davon auszugehen, dass das Bemessungsmodell die Realität nicht ausreichend genau abdeckt.

Ein weiterer Faktor, der für die Bewertung der Qualität des Bemessungsmodells herangezogen werden kann, ist der Variationskoeffizient der Streugröße V_δ . Liegt der Variationskoeffizient V_δ oberhalb eines festgelegten Höchstwerts, weist das Bemessungsmodell eine zu starke Streuung auf und ist ggf. anzupassen. Als obere Grenze wird der im Forschungsvorhaben *SAFEBRIC TILE* [44] empfohlene Werte von $V_\delta \leq 10\%$ angesetzt.

Abschließend ist die Anwendbarkeit des Bemessungsmodells nach *Rasche* [67] anhand der aus der Statistik hergeleiteten neuen Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,erw.}$ zu bewerten. Im bestehenden Bemessungsmodell dienen die anzusetzenden Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,mod}$ unter anderem der Kalibrierung des Bemessungsmodells zur Einhaltung des geforderten Teilsicherheitsbeiwerts $\gamma_{M2} = 1,25$. Ermittelt werden die Beiwerte infolge eines Vergleichs der unter Einsatz der nominellen Festigkeitswerte bestimmten Grenzspannungen $r_{t,nom}$ mit den aus der Statistik resultierenden Widerstandswerten r_d . Die auf Grundlage der erweiterten Datenbasis hergeleiteten neuen Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,erw.}$ sind den bestehenden Korrelationsbeiwerten $\beta_{w,mod}$ gegenüberzustellen. Liegen die Werte für $\beta_{w,erw.}$ unter den $\beta_{w,mod}$ - Werten, ist das Bemessungsmodell mit den bestehenden Korrelationsbeiwerten nach *prEN 1993-1-8* [18] als anwendbar bestätigt. Dies ist darin begründet, dass aus den höheren Beiwerten $\beta_{w,mod}$ geringere Bemessungsgrenzspannungen resultieren und somit die Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen.

Überschreiten der Wert $\beta_{w,erw.}$ den bestehenden Korrelationsbeiwert $\beta_{w,mod}$, ist in einem zweiten Schritt zu prüfen, ob infolge der Anwendung des geringeren Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod}$ ein Sicherheitsrisiko aus der Bemessung hervorgeht

Anhand einer erneuten statistischen Auswertung unter Berücksichtigung des zugehörigen Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod}$, ist die Differenz zwischen dem ermittelten korrigierten Teilsicherheitsbeiwert γ_M^* und dem geforderten Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M2} = 1,25$ zu überprüfen. Eine Anpassung des Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod}$ ist vorzunehmen, wenn die ins Verhältnis gesetzten Teilsicherheitsbeiwerte den Grenzwert f_a überschreiten.

$$f_a \geq \frac{\gamma_M^*}{\gamma_{M2}} \quad (6.10)$$

Dabei ist:

f_a	einzuhaltender Grenzwert nach Tab. 6-13
γ_M^*	korrigierter Teilsicherheitsbeiwert
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M2} = 1,25$

Die einzuhaltenden Grenzwerte f_a sind in Abhängigkeit des aus der Statistik ermittelten Variationskoeffizienten des Bemessungsmodells V_r entsprechend Tab. 6-13 zu bestimmen.

Tab. 6-13: Grenzwert f_a in Abhängigkeit des Variationskoeffizienten V_r [44]

Bereich V_r	einzuhaltender Grenzwert f_a
$0,00 < V_r < 0,04$	1,03
$0,04 \leq V_r < 0,20$	$1,03 + 0,75 \cdot (V_r + 0,04)$
$V_r \geq 0,20$	1,15

In den folgenden Abschnitten werden die statistischen Ergebnisse der ausgewerteten Evaluationsgruppen für Flankenkehlnähte und Stirnkehlnähte getrennt vorgestellt und bewertet.

6.5.7 Ergebnisse der Evaluationsgruppe G/T/E46

6.5.7.1 Flankenkehlnahtverbindungen

Insgesamt beinhaltet die Datenbasis 71 Versuchsergebnisse von Flankenkehlnähten geschweißt mit einem Schweißzusatzwerkstoff der Festigkeitsklasse G/T/E46. In Tab. 6-14 ist die der Datenbasis entnommene Anzahl an Versuchsergebnissen in Abhängigkeit der Grundwerkstoffkombinationen aufgeführt. Der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe G/T/E46 der Flankenkehlnahtverbindungen können 35 Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und 36 Mischverbindungen zugrunde gelegt werden.

Tab. 6-14: Datenbasis der Evaluationsgruppe G/T/E46 der Flankenkehlnahtverbindungen

Evaluationsgruppe: G/T/E46		Anzahl Daten in Abh. des Forschungsvorhabens					Zusatzunter- suchungen [55]	Summe
Grundwerkstoff	Einordnung	P1062 [56]	SAFE- BRICTILE [44]	P652 [59]	P812 [54]			
S460 - S460	Matching	-	2	20	5	-	27	
S690 - S690	Mismatching	-	2	1	2	-	5	
S700 - S700	Mismatching	-	-	-	3	-	3	
S355 - S460	Mismatching	6	-	2	-	-	8	
S355 - S690	Mismatching	6	6	-	-	-	12	
S355 - S960	Mismatching	8	-	-	-	-	8	
S460 - S690	Mismatching	-	6	2	-	-	8	

Die Ergebnisse der statistischen Auswertungen der Evaluationsgruppe G/T/E46 können Tab. 6-15 entnommen werden. Im ersten Schritt erfolgt anhand der statistischen Kenngrößen der Mittelwertkorrektur b und des Variationskoeffizienten der Streugröße V_δ eine Beurteilung der Qualität des überprüften Bemessungskonzepts. Da sich die statistischen Auswerteverfahren nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24] und nach *Kleiner* [52] in der Ermittlung der beiden Bewertungsparametern nicht unterscheiden, kann eine Aussage hinsichtlich der Qualität des Konzepts unabhängig von der Auswertemethode getroffen werden kann.

Tab. 6-15: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe G/T/E46 der Flankenkehlnahtverbindungen

Evaluationsgruppe: G/T/E46	Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	b [-]	V_δ [%]	V_r [-]	r_k [-]	r_d [-]	γ_M^* [-]	$\beta_{w,erw.}$ [-]	$\beta_{w,mod}$ [-]	$\tau_{II,Rk} = \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,erw.}}$
	<i>DIN EN 1990 Anhang D</i> [24]:	71	1,361	10%	0,112	0,824	0,696	0,92	0,74	0,85	
	<i>Kleiner</i> [52]:	71	1,361	10%	0,158	0,762	0,607	1,06	0,85	0,85	

Die Überprüfung des Bemessungsmodells anhand der Daten der Evaluationsgruppe G/T/E46 liefert eine weit über dem in Abschnitt 6.5.6 festgelegten Grenzwertbereichs liegende Mittelwertkorrektur von $b = 1,361$. Der Variationskoeffizient der Streugröße entspricht mit $V_\delta = 10\%$ dem festgelegten Grenzwert. Daraus resultierend ist die Qualität als weniger gut einzustufen, da das Bemessungsmodell die tatsächlichen Tragfähigkeiten nicht ausreichend genau abbildet. Zur Verbesserung kann eine mögliche Anpassung des analytischen Modells in Betracht gezogen werden.

Im weiteren Schritt ist zu untersuchen, ob trotz der unzureichenden Qualität das Konzept für die Flankenkehlnahtverbindungen anwendbar bzw. in diesem Fall sicher ist. Hierzu erfolgt der Vergleich der ermittelten Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,erw.}$ mit den bereits vorliegenden $\beta_{w,mod}$ - Werten.

Die Auswerteverfahren nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24] und nach *Kleiner* [52] beinhalten verschiedene Ansätze zur Ermittlung des Variationskoeffizienten des Bemessungsmodells V_r (vgl. Tab. 5-1), was wiederum zu Abweichungen der daraus resultierenden statistischen Größen, wie beispielsweise den Korrelationsbeiwerten, führt.

Der nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24] ermittelte Korrelationsbeiwert unterschreitet mit $\beta_{w,erw.} = 0,74$ den anzusetzenden Korrelationsbeiwert $\beta_{w,mod} = 0,85$, wohingegen der nach *Kleiner* [52] ermittelte Beiwert $\beta_{w,erw.}$ dem Beiwert $\beta_{w,mod}$ entspricht. Eine Überprüfung des Grenzwerts f_a , hinsichtlich der Abweichung γ_{M^*} von $\gamma_{M2} = 1,25$, entfällt somit für beide Beiwerte. Die sichere Anwendbarkeit des Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod} = 0,85$ ist somit bestätigt.

Aufgrund der bereits festgestellten geringen Qualität des Konzepts ist im letzten Schritt zu untersuchen, ob die aus dem Bemessungsmodell erreichten Grenzwertspannungen zu sicheren Ergebnissen führen. In Abb. 6-57 sind die experimentell ermittelten Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ über die theoretischen Werte des Bemessungsmodells $r_{t,i}$ aufgetragen. Die Ermittlung der theoretischen Werte des Bemessungsmodells $r_{t,i}$ erfolgt unter Berücksichtigung der tatsächlich vorhandenen Festigkeitswerte des Grundwerkstoffs und des Schweißzusatzwerkstoffs und unter Einbezug des Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod} = 0,85$. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse überwiegend auf der sicheren Seite liegen.

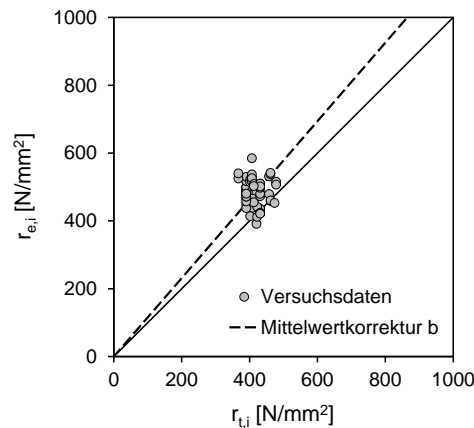


Abb. 6-57: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe G/T/E46 der Flankenkehlnahtverbindungen

6.5.7.2 Stirnkehlnahtverbindungen

Der Datenbasis können 65 Versuchsergebnisse an Stirnkehlnahtverbindungen, geschweißt mit einem Schweißzusatzwerkstoff der Festigkeitsklasse G/T/E46, entnommen werden. Darin sind 32 Verbindungen gleicher Grundwerkstofffestigkeiten und 33 Mischverbindungen beinhaltet (vgl. Tab. 6-16).

Tab. 6-16: Datenbasis der Evaluationsgruppe G/T/E46 der Stirnkehlnahtverbindungen

Evaluationsgruppe: G/T/E46		Anzahl Daten in Abh. des Forschungsvorhabens					Summe
Grundwerkstoff	Einordnung	P1062 [56]	SAFE- BRICTILE [44]	P652 [59]	P812 [54]	Zusatzunter- suchungen [55]	
S460 - S460	Matching	-	-	11	-	-	11
S690 - S690	Mismatching	-	-	15	3	-	18
S700 - S700	Mismatching	-	-	-	3	-	3
S355 - S460	Mismatching	7	-	3	-	-	10
S355 - S690	Mismatching	8	-	-	-	-	8
S355 - S960	Mismatching	12	-	-	-	-	12
S460 - S690	Mismatching	-	-	3	-	-	3

Anhand der in Tab. 6-17 aufgetragenen Mittelwertkorrektur $b = 1,546$ lässt sich feststellen, dass das Bemessungsmodell nach Gleichung (6.9) die experimentellen Tragfähigkeiten nicht ausreichend genau abbildet. Mit $V_\delta = 7\%$ liegt der Variationskoeffizient der Streugröße hingegen unterhalb des festgelegten Höchstwerts. Die Qualität des Konzepts wird deshalb, für die

Bemessung von Stirnkehlnahtverbindungen geschweißt mit einem Schweißzusatz der Festigkeitsklasse G/T/E46, als weniger gut eingestuft.

Tab. 6-17: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe G/T/E46 der Stirnkehlnahtverbindungen

Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	b [-]	V_δ [%]	V_r [-]	$\sigma_{v,Rk} = \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\sqrt{2} \cdot \beta_{w,erw.}}$				
					r_k [-]	r_d [-]	γ_M^* [-]	$\beta_{w,erw.}$ [-]	$\beta_{w,mod}$ [-]
DIN EN 1990 Anhang D [24]:	65	1,546	7%	0,087	0,862	0,756	0,75	0,60	0,85
Kleiner [52]:	65	1,546	7%	0,154	0,764	0,610	0,92	0,74	0,85

Aus der statistischen Auswertung nach *Kleiner* [52] resultiert aufgrund der zusätzlichen Berücksichtigung der Streuung der Nahtdicken $a_{3D-scan}$ ein höherer Variationskoeffizient des Bemessungsmodells V_r (vgl. Tab. 6-17), was wiederum zu einem höheren korrigierten Teilsicherheitsbeiwert γ_M^* und einem höheren Korrelationsbeiwert führt. Die abgeleiteten Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,erw.}$ beider Auswerteverfahren liegen jedoch unter dem vorgegebenen Korrelationsbeiwert von $\beta_{w,mod} = 0,85$. Auf eine Überprüfung hinsichtlich der Einhaltung des Grenzwerts f_a kann deshalb verzichtet und die Anwendung des Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod} = 0,85$ bestätigt werden.

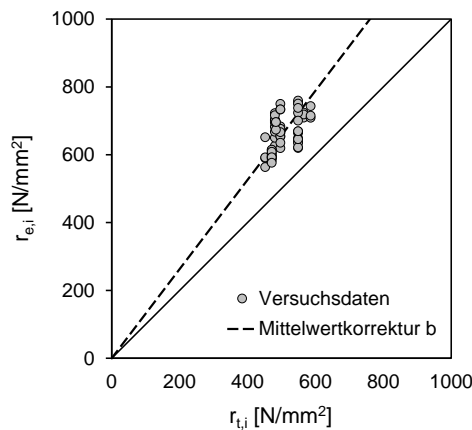


Abb. 6-58: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe G/T/E46 der Stirnkehlnahtverbindungen

In Abb. 6-58 sind die experimentell ermittelten Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ über die unter Berücksichtigung des bestätigten Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod} = 0,85$ und den tatsächlich vorhandenen Festigkeitswerten ermittelten theoretischen Werte des Bemessungsmodells $r_{t,i}$ aufgetragen.

Da die Ergebnisse deutlich auf der sicheren Seite liegen, kann eine sichere Anwendbarkeit des Bemessungsmodells trotz der geringen Qualität bestätigt werden.

6.5.8 Ergebnisse der Evaluationsgruppe G/T69

6.5.8.1 Flankenkehlnahtverbindungen

Aus dem Datenpool liegen insgesamt 93 Flankenkehlnahtverbindungen geschweißt mit einem Schweißzusatzwerkstoff der Festigkeitsklasse G/T69 vor. Die Daten umfassen 59 Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und 34 Mischverbindungen.

Tab. 6-18: Datenbasis der Evaluationsgruppe G/T69 der Flankenkehlnahtverbindungen

Evaluationsgruppe: G/T69		Anzahl Daten in Abh. des Forschungsvorhabens					Zusatzunter- suchungen [55]	Summe
Grundwerkstoff	Einordnung	P1062 [56]	SAFE- BRICTILE [44]	P652 [59]	P812 [54]			
S460 - S460	Mismatching	-	2	2	-	-	4	
S690 - S690	Matching	-	2	9	16	4	31	
S700 - S700	Mismatching	-	-	-	24	-	24	
S355 - S460	Mismatching	10	-	2	-	-	12	
S355 - S690	Mismatching	8	6	-	-	-	14	
S460 - S690	Mismatching	-	6	2	-	-	8	

Im Gegensatz zu den Auswertungen der Evaluationsgruppen der Festigkeitsklasse G/T/E46 aus 6.5.7 liegt die Mittelwertkorrektur der Evaluationsgruppe G/T69 mit $b = 1,120$ innerhalb des festgelegten Grenzwertbereichs (vgl. Tab. 6-19). Der Variationskoeffizient der Streugröße entspricht mit $V_\delta = 10\%$ dem noch zulässigen Höchstwert. Insgesamt kann die Qualität des Bemessungsmodells für Flankenkehlnähte mit einer Schweißgutfestigkeit G/T69 als ausreichend eingestuft werden.

Tab. 6-19: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe G/T69 der Flankenkehlnahtverbindungen

Evaluationsgruppe: G/T69	Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	b [-]	V_δ [%]	V_r [-]	r_k [-]	r_d [-]	γ_M^* [-]	$\beta_{w,erw.}$ [-]	$\beta_{w,mod}$ [-]	$\tau_{II,Rk} = \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,erw.}}$
	<i>DIN EN 1990 Anhang D</i> [24]:	93	1,120	10%	0,114	0,825	0,702	1,18	0,94	1,09	
	<i>Kleiner</i> [52]:	93	1,120	10%	0,159	0,761	0,609	1,36	1,09	1,09	

Eine Betrachtung der in Tab. 6-19 ermittelten Korrelationsbeiwerte zeigt, dass der aus der Auswertung nach *Kleiner* [52] abgeleitete Beiwert $\beta_{w,erw.} = 1,09$ dem vorgegebenen Korrelationsbeiwert von $\beta_{w,mod} = 1,09$ entspricht. Der aus der Auswertung nach *Anhang D* [24] abgeleitete $\beta_{w,erw.}$ - Wert liegt unter dem Korrelationsbeiwert $\beta_{w,mod}$. Eine sichere Anwendbarkeit des Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod} = 1,09$ kann somit bestätigt werden.

Die über die theoretischen Werte des Bemessungsmodells $r_{t,i}$ aufgetragenen experimentell ermittelten Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ in Abb. 6-59, liegen ausschließlich auf der sicheren Seite. Die theoretischen Werte des Bemessungsmodells wurden ebenfalls anhand der tatsächlich vorhandenen Festigkeitswerte des Grundwerkstoffs und des Schweißzusatzwerkstoffs bestimmt. In Kombination zu der ausreichend guten Qualität des Konzepts ist die Bemessung von Flankenkehlnahtverbindungen einer Schweißgutfestigkeit G/T69 unter Ansatz des Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod} = 1,09$ zulässig.

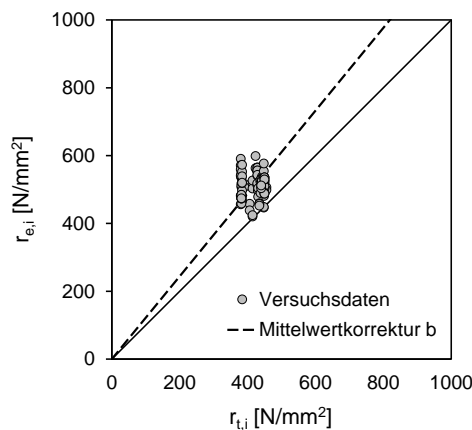


Abb. 6-59: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe G/T69 der Flankenkehlnahtverbindungen

6.5.8.2 Stirnkehlnahtverbindungen

Die aus der Datenbasis entnommenen experimentellen Ergebnisse umfassen 32 Verbindungen gleicher Grundwerkstofffestigkeiten und 31 Mischverbindungen, vgl. Tab. 6-20. Somit liegen für eine statistische Auswertung 63 Daten vor.

Tab. 6-20: Datenbasis der Evaluationsgruppe G/T69 der Stirnkehlnahtverbindungen

Evaluationsgruppe: G/T69		Anzahl Daten in Abh. des Forschungsvorhabens					Summe
Grundwerkstoff	Einordnung	P1062 [56]	SAFE- BRICTILE [44]	P652 [59]	P812 [54]	Zusatzunter- suchungen [55]	
S460 - S460	Mismatching	-	-	8	-	-	8
S690 - S690	Matching	-	-	14	4	-	18
S700 - S700	Mismatching	-	-	-	6	-	6
S355 - S460	Mismatching	13	-	3	-	-	16
S355 - S690	Mismatching	12	-	-	-	-	12
S355 - S960	Mismatching	-	-	3	-	-	3

Tab. 6-21 umfasst die Ergebnisse der statistischen Auswertungen. Für das Bemessungsmodell nach Gleichung (6.9) ergibt sich eine außerhalb des Grenzwertbereichs liegende Mittelwertkorrektur von $b = 1,304$. Auch der Variationskoeffizient der Streugröße liegt mit $V_\delta = 15\%$ weit über dem festgelegten Höchstwert von 10 %. Somit bildet das Bemessungsmodell die tatsächliche Tragfähigkeit unzureichend genau ab und weist darüber hinaus eine extrem hohe Streuung auf. Die Qualität ist daher als weniger gut einzustufen.

Tab. 6-21: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe G/T69 der Stirnkehlnahtverbindungen

Evaluationsgruppe: G/T69	Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	$\sigma_{v,Rk} = \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\sqrt{2} \cdot \beta_{w,erw.}}$							
			b [-]	V_δ [%]	V_r [-]	r_k [-]	r_d [-]	γ_M^* [-]	$\beta_{w,erw.}$ [-]	$\beta_{w,mod}$ [-]
	<i>DIN EN 1990 Anhang D</i> [24]:	63	1,304	15%	0,157	0,761	0,598	1,19	0,95	1,09
	<i>Kleiner</i> [52]:	63	1,304	15%	0,202	0,699	0,517	1,36	1,09	1,09

Aus der Auswertung nach *Kleiner* [52] ergibt sich ein Korrelationsbeiwert $\beta_{w,erw.}$ der dem Korrelationsbeiwert $\beta_{w,mod} = 1,09$ entspricht. Der aus der Auswertung nach *Anhang D* [24] einhergehende Korrelationsbeiwert $\beta_{w,erw.}$ ist geringer als der Beiwert $\beta_{w,mod}$, weshalb eine Prüfung der Grenzwerteinhaltung f_a entfällt und die Anwendbarkeit des Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod} = 1,09$ bestätigt werden kann.

Aufgrund der unzureichenden Qualität des Bemessungsmodells ist ergänzend zu prüfen, ob die unter Ansatz des bestätigten Korrelationsbeiwerts von $\beta_{w,mod} = 1,09$ ermittelten Grenzspannungen auf der sicheren Seite liegen. Hierfür sind in Abb. 6-60 die experimentellen Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ über die theoretischen Werte des Bemessungsmodells $r_{t,i}$, bestimmt unter Einbezug der tatsächlichen Festigkeitswerte von Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff, aufgetragen. Dem Diagramm kann entnommen werden, dass die Daten auf der sicheren Seite liegen und das Bemessungsmodell angewendet werden kann.

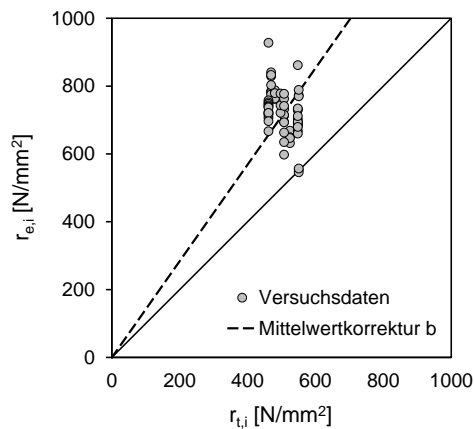


Abb. 6-60: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe G/T69 der Stirnkehlnahtverbindungen

6.5.9 Ergebnisse der Evaluationsgruppe G/T89

6.5.9.1 Flankenkehlnahtverbindungen

Die aus der Datenbasis entnommenen Versuchsergebnisse von Flankenkehlnahtverbindungen, geschweißt mit einem Schweißzusatzwerkstoff der Festigkeitsklasse G/T89, sind in Tab. 6-22 aufgeführt. Insgesamt können 12 Verbindungen gleicher Grundwerkstofffestigkeiten und 22 Mischverbindungen für die statistische Auswertung herangezogen werden.

Tab. 6-22: Datenbasis der Evaluationsgruppe G/T89 der Flankenkehlnahtverbindungen

Evaluationsgruppe: G/T89		Anzahl Daten in Abh. des Forschungsvorhabens					Zusatzunter- suchungen [55]	Summe
Grundwerkstoff	Einordnung	P1062 [56]	SAFE- BRICTILE [44]	P652 [59]	P812 [54]			
S460 - S460	Mismatching	-	2	-	-	-	2	
S690 - S690	Mismatching	-	2	-	2	3	7	
S700 - S700	Mismatching	-	-	-	3	-	3	
S355 - S690	Mismatching	-	6	-	-	-	6	
S355 - S960	Mismatching	10	-	-	-	-	10	
S460 - S690	Mismatching	-	6	-	-	-	6	

Die Ergebnisse der statistischen Auswertungen sind in Tab. 6-23 zusammengefasst. Die entsprechende Mittelwertkorrektur b liegt vernachlässigbar gering über dem festgelegten Grenzbereich, sodass das Bemessungskonzept als eine noch ausreichend gute Abbildung des realen Tragverhaltens zu bewerten ist. Der Variationskoeffizient des Streumaßes V_δ entspricht dem festgelegten Grenzwert. Die Qualität für die Evaluationsgruppe G/T89 wird daher als noch ausreichend angesehen. Die ermittelten Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,erw.}$ beider Auswerteverfahren liegen unter dem vorgegebenen Korrelationsbeiwert $\beta_{w,mod} = 1,19$. Der von Rasche [67] ermittelte Korrelationsbeiwert ist somit für Flankenkehlnahtverbindungen mit einem Schweißzusatzwerkstoff der Festigkeitsklasse G/T89 zulässig.

Tab. 6-23: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe G/T89 der Flankenkehlnahtverbindungen

Evaluationsgruppe: G/T89	Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	b [-]	V_δ [%]	V_r [-]	$\tau_{II,Rk} = \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,erw.}}$		γ_M^* [-]	$\beta_{w,erw.}$ [-]	$\beta_{w,mod}$ [-]
						r_k [-]	r_d [-]			
	DIN EN 1990 Anhang D [24]:	34	1,144	10%	0,119	0,812	0,670	1,21	0,97	1,19
	Kleiner [52]:	34	1,144	10%	0,162	0,753	0,589	1,38	1,10	1,19

Auch die in Abb. 6-61 über die durch das Bemessungsmodell unter Ansatz der tatsächlichen Festigkeitswerte und des Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod}$ hergeleiteten theoretischen Werte $r_{t,i}$ aufgetragenen experimentell ermittelten Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ zeigen, dass diese auf der sicheren Seite liegen.

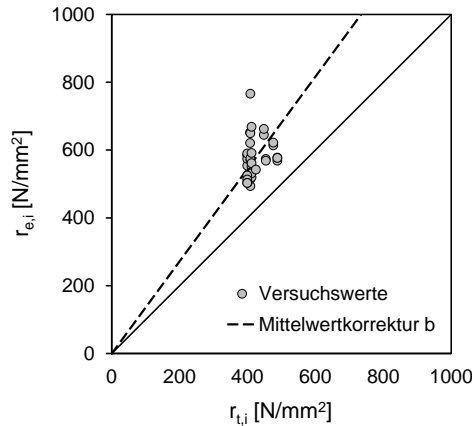


Abb. 6-61: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe G/T89 der Flankenkehlnahtverbindungen

6.5.9.2 Stirnkehlnahtverbindungen

Der Datenbasis liegen insgesamt 6 Verbindungen gleicher Grundwerkstofffestigkeiten und 16 Mischverbindungen vor, vgl. Tab. 6-24. Der statistischen Auswertung kann somit nur eine geringe Anzahl von 22 Versuchen zugrunde gelegt werden.

Tab. 6-24: Datenbasis der Evaluationsgruppe G/T89 der Stirnkehlnahtverbindungen

Evaluationsgruppe: G/T89		Anzahl Daten in Abh. des Forschungsvorhabens					Summe
Grundwerkstoff	Einordnung	P1062 [56]	SAFE-BRICTILE [44]	P652 [59]	P812 [54]	Zusatzuntersuchungen [55]	
S460 - S460	Mismatching	-	-	-	-	-	-
S690 - S690	Mismatching	-	-	3	-	-	3
S700 - S700	Mismatching	-	-	3	-	-	3
S355 - S690	Mismatching	-	-	-	-	-	-
S355 - S960	Mismatching	16	-	-	-	-	16
S460 - S690	Mismatching	-	-	-	-	-	-

Den statistischen Auswertungen aus Tab. 6-25 ist zu entnehmen, dass die Mittelwertkorrektur b sowie der Variationskoeffizient der Streugröße V_δ über den festgelegten Grenzwerten liegen.

Die Qualität des Bemessungsmodells für die Evaluationsgruppe G/T89 der Stirnkehlnähte wird daher als nicht ausreichend bewertet.

Die ermittelten Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,erw.}$ aus Tab. 6-25 liegen jedoch weit unter dem für das Bemessungsmodell anzusetzenden Beiwert von $\beta_{w,mod} = 1,19$. Die Anwendbarkeit des Korrelationsbeiwerts ist somit bestätigt und eine Prüfung des Grenzwerts f_a kann vernachlässigt werden.

Tab. 6-25: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe G/T89 der Stirnkehlnahtverbindungen

Evaluationsgruppe: G/T89		$\sigma_{v,Rk} = \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\sqrt{2} \cdot \beta_{w,erw.}}$								
Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	b [-]	V_δ [%]	V_r [-]	r_k [-]	r_d [-]	γ_M^* [-]	$\beta_{w,erw.}$ [-]	$\beta_{w,mod}$ [-]	
DIN EN 1990 Anhang D [24]:	22	1,329	11%	0,124	0,801	0,644	1,09	0,87	1,19	
Kleiner [52]:	22	1,329	11%	0,176	0,728	0,549	1,26	1,00	1,19	

Die Ergebnisse der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten $r_{e,i}$, aufgetragen über die theoretischen Werte des Bemessungsmodells $r_{t,i}$, sind in Abb. 6-62 dargestellt. Die theoretischen Werte wurden unter Einbezug der tatsächlichen Festigkeitswerte des Grundwerkstoffs und des Schweißzusatzwerkstoffs sowie des Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod}$ ermittelt. Es kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Stirnkehlnahtverbindungen stark auf der sicheren Seite liegen.

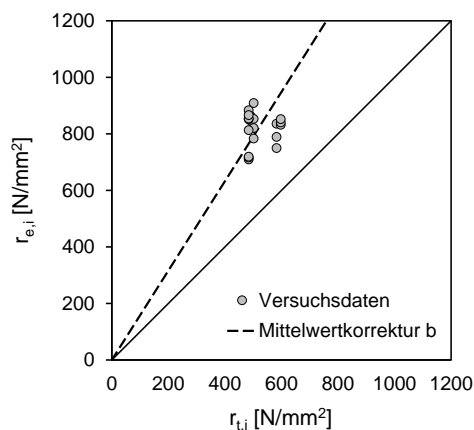


Abb. 6-62: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe G/T89 der Stirnkehlnahtverbindungen

6.5.10 Bewertung der Anwendbarkeit des Bemessungskonzepts

Zusammenfassend lässt sich aus den statistischen Auswertungen der vorangegangenen Abschnitte das Bemessungsmodell nach *Rasche* [67] als anwendbar für Mischverbindungen höherfester Stähle einstufen. Diese Einschätzung basiert auf den Ergebnissen der ausgewerteten Korrelationsbeiwerten sowie der ermittelten statistischen Kenngrößen der Mittelwertkorrekturen und der Variationskoeffizienten der Streugröße. Die anhand der erweiterten Datenbasis hergeleiteten Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,erw.}$ liegen jeweils unter, bzw. entsprechen den derzeit gültigen $\beta_{w,mod}$ – Werten. Demzufolge liefert eine Bemessung unter Ansatz des Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod}$ auf der sicheren Seite liegende Grenzspannungen, was die Anwendbarkeit für Kehlnahtverbindungen bestätigt.

Des Weiteren lagen die aus den Auswertungen der Flankenkehlnähte resultierenden Mittelwertkorrekturen, die als Beurteilungskriterium hinsichtlich der Abbildung des realen Tragverhaltens durch das Bemessungskonzept herangezogen werden können, größtenteils innerhalb des festgelegten Grenzwertbereichs von $0,85 \leq b \leq 1,15$. Somit wird das reale Tragverhalten von Flankenkehlnahtverbindungen ausreichend genau durch das Bemessungsmodell abgebildet. Lediglich in der Auswertung der Flankenkehlnähte der Evaluationsgruppe G/T/E46 lag dieser mit $b = 1,36$ darüber. Da die aus der Bemessung resultierenden Bemessungsgrenzspannungen auf der sicheren Seite liegen, ist jedoch auch hier die Anwendbarkeit bestätigt.

Die statistischen Auswertungen der Stirnkehlnahtverbindungen wiesen in allen Evaluationsgruppen Mittelwertkorrekturen von $b > 1,15$ auf. Daraus ist abzuleiten, dass unter Ansatz des Bemessungsmodells hier zwar konservative aber sichere Bemessungsgrenzspannungen erreicht werden.

In Abb. 6-63 bis Abb. 6-65 werden die experimentell ermittelten Tragfähigkeiten den Bemessungsgrenzspannungen, ermittelt aus dem derzeit gültigen Bemessungsmodell nach *Rasche* [67] unter Ansatz der Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,mod}$ (schwarze Datenreihe) respektive der aus den statistischen Auswertungen nach *Anhang D* [24] und nach *Kleiner* [52] hergeleiteten Korrelationsbeiwerten $\beta_{w,erw.}$ (rote bzw. grüne Datenreihe) gegenübergestellt. Die Versuchsergebnisse sind in Abhängigkeit der in der Bemessung anzusetzenden nominellen Festigkeit des geringer festen Grundwerkstoffs aufgetragen.

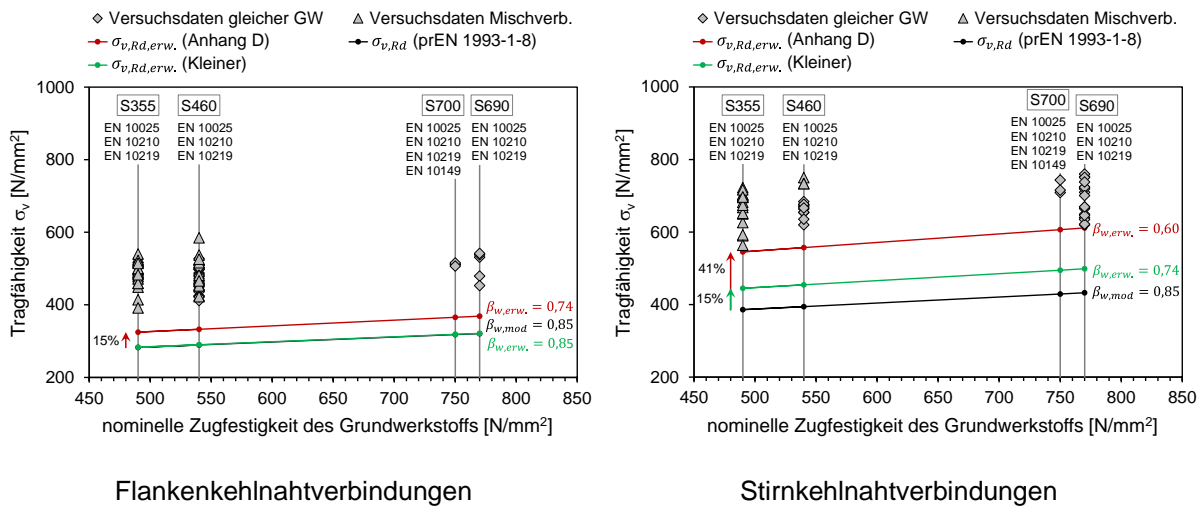


Abb. 6-63: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe G/T/E46

Die Ergebnisse der Evaluationsgruppe G/T/E46 sind in Abb. 6-63 getrennt für Flanken- (links) und Stirnkehlnähte (rechts) aufgetragen. Betrachtet man die Abstände zwischen den Bemessungsgrenzspannungen und Versuchsdaten wird verdeutlicht, dass gerade bei Stirnkehlnahtverbindungen das Modell nach *Rasche* [67] die tatsächlich vorhandenen Tragfähigkeiten zum Teil stark unterschätzt.

Insgesamt lässt sich unter Ansatz des nach *Anhang D* [24] bestimmten neuen Korrelationsbeiwerts höhere Bemessungsgrenzspannungen (rote Datenreihe), im Vergleich zum Einsatz des nach *prEN 1993-1-8* [18] anzusetzenden Beiwerts (schwarze Datenreihe), erreichen. Für Stirnkehlnahtverbindungen (Abb. 6-63, rechts) stellen sich unter Ansatz des nach *Anhang D* [24] ermittelten Beiwerts um 41 % und für Flankenkehlnähte (Abb. 6-63, links) um 15 % höhere Bemessungsgrenzspannungen ein.

Infolge des Korrelationsbeiwerts ermittelt unter Berücksichtigung der Streuung der Nahtdicken nach dem Auswerteverfahren nach *Kleiner* [52] lässt sich für Stirnkehlnähte eine Steigerung von nur noch 15 % erreichen (Abb. 6-63, rechts). Die abgeleiteten Bemessungsgrenzspannungen der Flankenkehlnähte unterscheiden sich nicht von den nach *prEN 1993-1-8* [18] ermittelten Werten.

Die Daten der Evaluationsgruppe G/T69 sind in den Diagrammen aus Abb. 6-64 dargestellt. Unter Ansatz der nach *Anhang D* [24] hergeleiteten Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,erw}$ können eben-

falls höhere Bemessungswerte für Kehlnahtverbindungen erreicht werden. Unter Berücksichtigung der Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,erw.}$ nach *Kleiner* [52] stimmen die Bemessungsgrenzspannungen mit den Werten nach *prEN 1993-1-8* [18] überein.

Die in Abb. 6-64 (rechts) dargestellten experimentellen Tragfähigkeiten der untersuchten Stirnkehlnahtverbindungen weisen ebenfalls einen zum Teil hohen Sicherheitsabstand zu den jeweils ermittelten Bemessungsgrenzspannungen auf. Die tatsächlich vorhandenen Tragfähigkeiten der Stirnkehlnahtverbindungen werden auch hier durch das Bemessungsmodell unterschätzt.

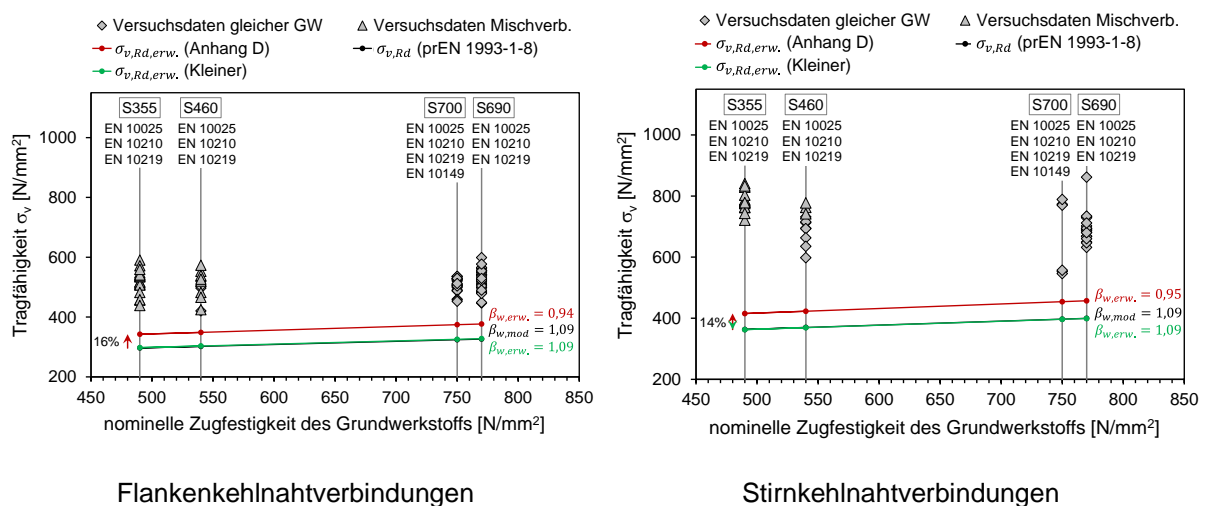


Abb. 6-64: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe G/T69

In Abb. 6-65 sind die Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe G/T89 aufgetragen. Unter Ansatz der nach *Anhang D* [24] bestimmten Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,erw.}$ kann sowohl für Flanken- als auch für Stirnkehlnähte die Bemessungsgrenzspannung um 23 % bzw. 37 % gesteigert werden. Durch Berücksichtigung des aus der statistischen Auswertung nach *Kleiner* [52] ermittelten Korrelationsbeiwerts, sinkt die Zunahme auf 8 % – 18 %.

Der Vergleich der Ergebnisse der Flankenkehlnähte und der Stirnkehlnähte zeigt, dass auch hier ein wesentlich größerer Abstand zwischen den experimentell ermittelten Tragfähigkeiten und den Bemessungsgrenzspannungen für Stirnkehlnähte im Gegensatz zu den Flankenkehlnähten vorliegt. Insgesamt können durch die erneute statistische Auswertung und der daraus resultierenden Korrelationsbeiwerten für beide Kehlnahtarten bessere Grenzspannungen erzielt werden.

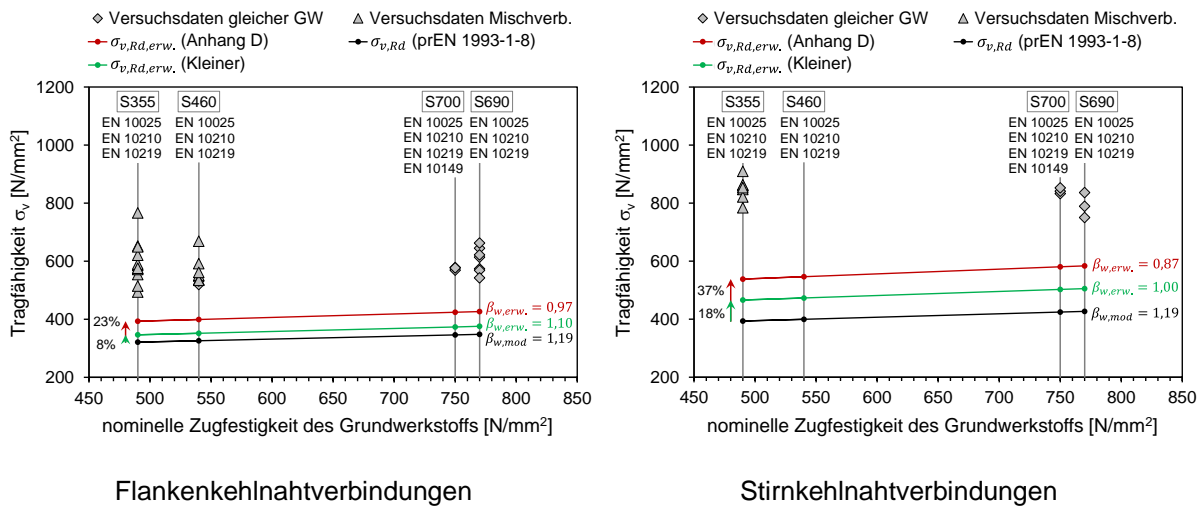


Abb. 6-65: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe G/T89

Zusammenfassend kann das Bemessungsmodell nach *Rasche* [67], unter Verwendung der zugehörigen Korrelationsbeiwerten $\beta_{w,mod}$, für Kehlnähte gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen bestätigt werden. Dabei ist anzumerken, dass vor allem die anhand des Modells bemessenen Stirnkehlnahtverbindungen zwar sicher, jedoch tendenziell eher als unwirtschaftlich einzustufen sind. Unter dem wirtschaftlichen Aspekt soll im Folgenden geprüft werden, ob durch eine Anpassung speziell für Stirnkehlnähten das Tragverhalten der Verbindungen besser abgebildet und infolgedessen die Qualität des Konzepts verbessert werden kann.

6.6 Anpassung des Bemessungsmodells speziell für Stirnkehlnahtverbindungen

6.6.1 Angepasstes Bemessungsmodell

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Stirnkehlnähten an Mischverbindungen und Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe soll im Folgenden ein erweiterter Bemessungsansatz diskutiert werden. Der zu betrachtende Ansatz wurde unter dem Aspekt konzipiert, eine möglichst einfache Ergänzung der bestehenden normativen Regelungen nach *prEN 1993-1-8* [18] für Kehlnahtverbindungen bereit zu stellen. Dabei ist unter anderem das Ziel zu verfolgen, die bereits nach *prEN 1993-1-8* [18] vorgegebenen Korrelationsbeiwerte für Kehlnahtverbindungen beibehalten zu können.

Basierend aus dem aus der Diskussion der Versuchsergebnisse hervorgehenden Einflusses der Einwirkungsrichtung (vgl. Abschnitt 6.3.7) auf die Tragfähigkeit ist zu untersuchen, ob ein

zusätzlicher Faktor speziell für die Bemessung von Stirnkehlnähten die Qualität des bestehenden Modells verbessert. Aufgrund der in den Abb. 6-63 bis Abb. 6-65 aufgezeigten hohen Abstände zwischen den Versuchs- und Bemessungswerten, wird die Ergänzung durch einen tragfähigkeitssteigernden Faktor δ_{Δ} betrachtet und statistisch ausgewertet. Die Festlegung des Faktors erfolgt ausschließlich anhand der im Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] vorliegenden Daten, da hier die Stirn- und Flankenkehlnahtverbindungen mit gleichen Schweißprozessparametern und denselben Grundwerkstoffen gefertigt wurden und somit die Tragfähigkeitsdifferenz hauptsächlich auf die Belastungsrichtung zurückgeführt werden kann. Die statistische Auswertung der Prozentualen Tragfähigkeitsunterschiede aus Abschnitt 6.3.7 können Tab. 6-26 entnommen werden. Unter Berücksichtigung des auf Widerstandsseite geforderten Sicherheitsniveaus der Norm, erfolgt die Bestimmung des tragfähigkeitssteigernden Faktors unter Verwendung des Fraktilefaktors k_n (5 % Fraktilwert) nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24]. Aufgrund der in Tab. 6-26 ermittelten Tragfähigkeitsdifferenz von 15 % (unterer 5 % Fraktilwert) wird der tragfähigkeitssteigernde Faktor zu $\delta_{\Delta} = 1,15$ gewählt.

Tab. 6-26: Statistische Ermittlung des tragfähigkeitssteigernden Faktors δ_{Δ}

Statistische Größen der prozentualen Tragfähigkeitszunahme	
Mittelwert μ_0 [%]:	40,6
Standardabweichung σ_0 [%]:	12,9
Variationskoeffizient V [-]:	31,8%
Fraktilefaktors k_n (5 % Fraktilwert) [-]:	1,96
stat. ermittelte Tragfähigkeitsdifferenz [%]:	15
Anzahl [-]:	89

Die Bemessung von Flankenkehlnähten ist unter Ansatz des Werts $\delta_{\Delta} = 1,00$ durchzuführen, da die daraus hervorgehende Gleichung dem in der Norm *prEN 1993-1-8* [18] angegebenen und bereits statistisch ausgewerteten Bemessungsmodells entspricht (vgl. 6.5.7 – 6.5.9).

Das daraus hervorgehende hypothetische Modell für Stirnkehlnahtverbindungen aus Gleichung (6.11) ist anhand einer erneuten statistischen Auswertung zu betrachten und auf die Qualität hin zu bewerten. Darüber hinaus sind die resultierenden Korrelationsbeiwerte den bereits bestehenden Werten nach *prEN 1993-1-8* [18] gegenüberzustellen.

$$\sigma_{v,Rd} = 1,15 \cdot \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\beta_{w,mod} \cdot \gamma_{M2}} \quad (6.11)$$

6.6.2 Ergebnisse des angepassten Bemessungskonzepts

Die Ergebnisse der statistischen Auswertungen des erweiterten Bemessungsansatzes speziell für Stirnkehlnahtverbindungen nach Gleichung (6.11) kann den Tab. 6-27 bis Tab. 6-30 entnommen werden. Zur Beurteilung des angepassten Modells wird zunächst die resultierende Mittelwertkorrektur b aller drei Evaluationsgruppen betrachtet und mit den Ergebnissen der statistischen Auswertung des bisher gültigen Bemessungsmodells nach *prEN 1993-1-8* [18] verglichen.

Die Evaluationsgruppe G/T/E46 liefert eine, im Vergleich zu den Ergebnissen der Auswertung des derzeit gültigen Konzepts in Tab. 6-17, deutlich geringere Mittelwertkorrektur b , die jedoch immer noch über dem festgelegten Grenzwert von $b = 1,15$ liegt (vgl. Tab. 6-27). Der Variationskoeffizient der Streugröße V_δ bleibt unverändert und liegt somit unterhalb des festgelegten Grenzwerts von 10 %.

Zu bewerten sind abschließend die aus der Auswertung resultierenden Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,erw.}$. Die Ergebnisse in Tab. 6-17 zeigen, dass der aus der Auswertung nach *Anhang D* [24] hergeleitete Korrelationsbeiwert geringer als der nach *prEN 1993-1-8* [18] anzusetzende Beiwert $\beta_{w,mod} = 0,85$ ist. Eine Übereinstimmung liegt mit dem nach *Kleiner* [52] ermittelten Wert vor. Die Anwendung des Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod}$ für das erweiterte Bemessungskonzept liegt somit auf der sicheren Seite und kann bestätigt werden.

Tab. 6-27: Ergebnis der statistische Auswertung des angepassten Bemessungsmodells der Evaluationsgruppe G/T/E46

Evaluationsgruppe: G/T/E46	Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	b [-]	V_δ [%]	V_r [-]	r_k [-]	r_d [-]	γ_M^* [-]	$\beta_{w,erw.}$ [-]	$\beta_{w,mod}$ [-]	$\sigma_{v,Rk} = 1,15 \cdot \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\sqrt{2} \cdot \beta_{w,erw.}}$
	<i>DIN EN 1990 Anhang D</i> [24]:	65	1,345	7%	0,087	0,862	0,756	0,86	0,69	0,85	
	<i>Kleiner</i> [52]:	65	1,345	7%	0,154	0,764	0,610	1,06	0,85	0,85	

Auch die Auswertung der Evaluationsgruppe G/T69 in Tab. 6-28 erzielt, im Gegensatz zur Auswertung des Konzepts nach *prEN 1993-1-8* [18] aus Tab. 6-21, eine bessere Mittelwertkorrektur b , die innerhalb des festgelegten Grenzwertbereichs liegt. Der Variationskoeffizient der Streugröße V_δ bleibt unverändert.

Tab. 6-28: Ergebnis der statistische Auswertung des angepassten Bemessungsmodells der Evaluationsgruppe G/T69

Evaluationsgruppe: G/T69		$\sigma_{v,Rk} = 1,15 \cdot \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\sqrt{2} \cdot \beta_{w,erw.}}$								
Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	b [-]	V_δ [%]	V_r [-]	r_k [-]	r_d [-]	γ_M^* [-]	$\beta_{w,erw.}$ [-]	$\beta_{w,mod}$ [-]	
<i>DIN EN 1990 Anhang D</i> [24]:	63	1,134	15%	0,157	0,761	0,598	1,37	1,10	1,09	
<i>Kleiner</i> [52]:	63	1,134	15%	0,202	0,699	0,517	1,57	1,26	1,09	

Ein Vergleich der in Tab. 6-28 angegebenen Korrelationsbeiwerte zeigt, dass der nach *Kleiner* [52] ermittelten Beiwert deutlich über dem nach *prEN 1993-1-8* [18] anzusetzenden Wert von $\beta_{w,mod} = 1,09$ liegt und die Verwendung für das erweiterte Bemessungskonzept ggf. unsicher ist. Da der Korrelationsbeiwert aus dem Verhältnis des korrigierten und des einzuhaltenden Teilsicherheitsbeiwerts bestimmt wird, kann zur Überprüfung der Anwendbarkeit des geringeren Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,mod}$ die Einhaltung des Grenzwerts f_a herangezogen werden, vgl. Abschnitt 6.5.6. Tab. 6-29 zeigt, dass der Grenzwert für beide Auswerteverfahren noch eingehalten und somit der Einsatz des Beiwerts $\beta_{w,mod}$ zulässig ist.

Tab. 6-29: Überprüfung der Einhaltung des Grenzwerts f_a

$f_a \geq \frac{\gamma_M^*}{\gamma_{M2}}$	Stirnkehlnaht G/T/E69	
	f_a [-]	γ_M^* / γ_{M2} [-]
<i>DIN EN 1990 Anhang D</i> [24]:	1,12	1,01
<i>Kleiner</i> [52]:	1,15	1,15

Die Mittelwertkorrektur der Auswertung der Evaluationsgruppe G/T89 aus Tab. 6-30 liegt vernachlässigbar gering über dem festgelegten Grenzwert von $b = 1,15$ und liefert somit einen im Vergleich zur Mittelwertkorrektur der Auswertung des gültigen Bemessungskonzeptes nach *prEN 1993-1-8* [18] in Tab. 6-25 besseren Wert. Der Variationskoeffizient der Streugröße bleibt auch hier unverändert und liegt ebenfalls vernachlässigbar gering über dem Grenzwert. Eine Verwendung des nach *prEN 1993-1-8* [18] anzusetzenden Korrelationsbeiwerts von $\beta_{w,mod} = 1,19$ ist ebenfalls zulässig, da die ermittelten Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,erw.}$ aus Tab. 6-30 jeweils geringere Werte aufzeigen.

Tab. 6-30: Ergebnis der statistische Auswertung des angepassten Bemessungsmodells der Evaluationsgruppe G/T89

Evaluationsgruppe: G/T89		$\sigma_{v,Rk} = 1,15 \cdot \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\sqrt{2} \cdot \beta_{w,erw.}}$								
Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	b [-]	V_{δ} [%]	V_r [-]	r_k [-]	r_d [-]	γ_M^* [-]	$\beta_{w,erw.}$ [-]	$\beta_{w,mod}$ [-]	
<i>DIN EN 1990 Anhang D</i> [24]:	22	1,155	11%	0,124	0,801	0,644	1,25	1,00	1,19	
<i>Kleiner</i> [52]:	22	1,155	11%	0,176	0,728	0,549	1,44	1,16	1,19	

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine Erweiterung des nach *prEN 1993-1-8* [18] anzuwendenden Bemessungskonzepts mit einem tragfähigkeitssteigernden Faktor von $\delta_{\Delta} = 1,15$ für Stirnkehlnähte an Mischverbindungen und Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe zu wirtschaftlicheren Grenzspannungen führt. Insgesamt lässt sich anhand der verbesserten Mittelwertkorrektur b feststellen, dass das angepasste Modell das reale Tragverhalten der Stirnkehlnähte besser abbilden kann als das derzeit gültige Konzept nach *prEN 1993-1-8* [18] und somit die Qualität des Modells angehoben wird. Das in der Entwicklung des Konzepts geforderte Ziel der Anwendbarkeit der in der Norm angegebenen Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,mod}$ wird dabei ebenfalls eingehalten.

6.7 Zusammenfassung der statistischen Auswertungen

Mit Hilfe statistischer Auswertungen wurden zwei mögliche Bemessungsansätze für Kehlnahtverbindungen gleicher Grundwerkstoffe sowie für Mischverbindungen aus normal- und höherfestem Stahl untersucht und bewertet. In einer ersten Auswertung wurde die Anwendbarkeit des nach *Rasche* [67] entwickelte Bemessungskonzepts untersucht. Den statistischen Kenngrößen zufolge, ist die Bemessung von Kehlnahtverbindungen möglich, liefert jedoch gerade für Stirnkehlnahtverbindungen zum Teil stark auf der sicheren Seite liegende Bemessungsgrenzspannungen. Daher wurde im Weiteren das bestehende Konzept speziell für Stirnkehlnähte durch einen tragfähigkeitssteigernden Faktor δ_{Δ} erweitert, um die aus der experimentellen Auswertung festgestellte Beeinflussung der Einwirkungsrichtung in der Bemessung erfassen zu können. Die erneuten statistischen Auswertungen der Evaluationsgruppen der Stirnkehlnahtverbindungen lieferte insgesamt bessere Mittelwertkorrekturen b , weshalb das erweiterte Konzept als bessere Näherung an das reale Tragverhalten einzustufen ist. Die Anpassung ist aufgrund der vorhandenen Datenbasis aus Versuchswerten sowohl für Stirnkehlnähte an Mischverbindungen als auch an Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe zulässig.

6.8 Empfehlungen für die Bemessung von Kehlnähten an Mischverbindungen

Anhand der statistischen Untersuchungen kann für eine Bemessung von Kehlnahtverbindungen gleicher Grundwerkstoffe und an Mischverbindungen das nach *Rasche* [67] entwickelte Modell empfohlen werden. Entgegen den Regelungen nach *prEN 1993-1-8* [18] sollte jedoch die Bemessung für Mischverbindungen, wie auch für Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe, durch den Faktor δ_{Δ} erweitert werden, um die aus der Einwirkungsrichtung resultierende Beeinflussung der Tragfähigkeit berücksichtigen zu können. Darüber hinaus ist aus wirtschaftlicher Sicht eine Anpassung des Korrelationsbeiwerts für Verbindungen der Festigkeitsklasse G/T89 zu $\beta_{w,erw.} = 1,16$ zu empfehlen. Für die Bemessung von Kehlnahtverbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen wird somit folgendes Konzept vorgeschlagen:

$$\sigma_{v,Rd} = \delta_{\Delta} \cdot \frac{0,25 \cdot f_{u,PM} + 0,75 \cdot f_{u,FM}}{\beta_{w,mod} \cdot \gamma_{M2}} \quad (6.12)$$

Dabei ist:

$f_{u,PM}$	Zugfestigkeit des schwächeren Grundwerkstoffs
$f_{u,FM}$	Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs
$\beta_{w,mod}$	Korrelationsbeiwert in Abhängigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs nach <i>prEN 1993-1-8</i> [18]
δ_{Δ}	Faktor zur Berücksichtigung der Einwirkungsrichtung nach Tab. 6-31
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M2} = 1,25$

Tab. 6-31: Faktor δ_{Δ} zur Berücksichtigung der Einwirkungsrichtung von Kehlnahtverbindungen

Einwirkungsrichtung	δ_{Δ}
Flankenkehlnahtverbindung	1,00
Stirnkehlnahtverbindung	1,15

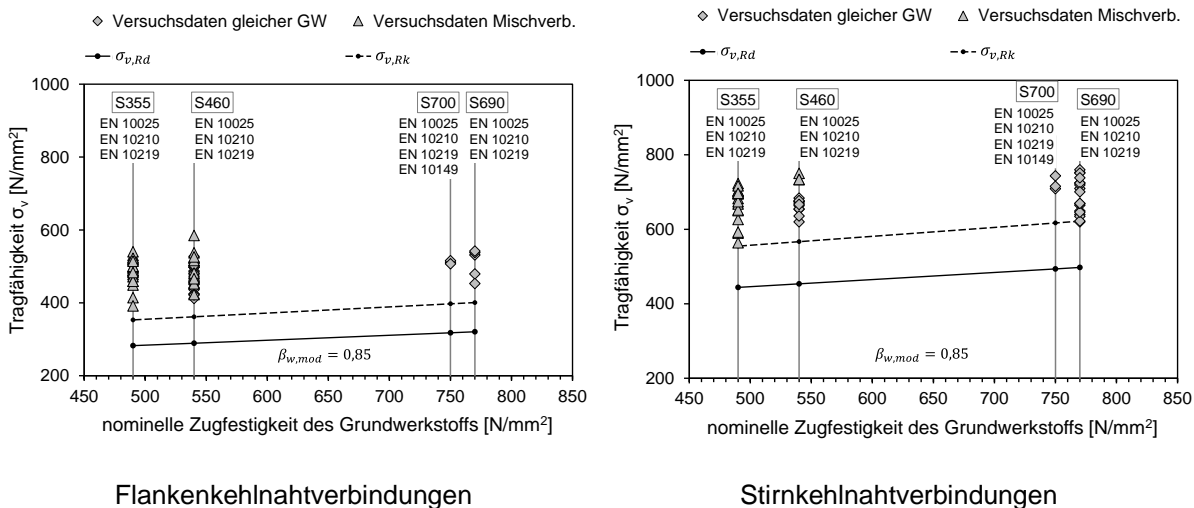


Abb. 6-66: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe G/T/E46

In Abb. 6-66 bis Abb. 6-68 sind die vorliegenden Versuchsergebnisse den entsprechend des empfohlenen Konzepts nach Gleichung (6.12) ermittelten Bemessungsgrenzspannungen gegenübergestellt. Die experimentellen Daten der Mischverbindungen sind dabei in Abhängigkeit der für die Bemessung zu berücksichtigenden nominellen Festigkeit des Grundwerkstoffs der geringeren Festigkeit aufgetragen.

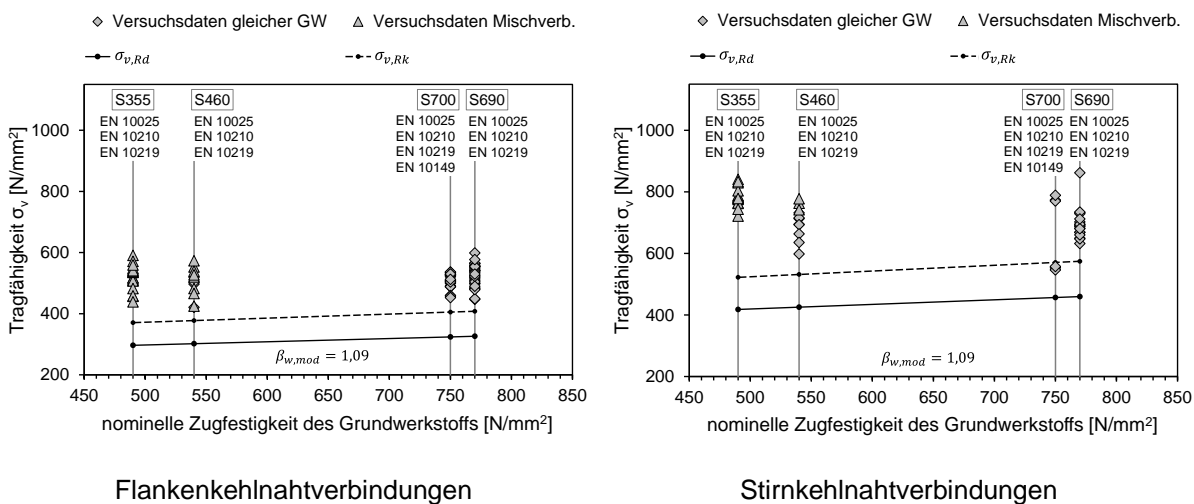


Abb. 6-67: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe G/T/69

Betrachtet man den Abstand zwischen Bemessungsmodell und Versuchsergebnissen kann für die Stirnkehlnahtverbindungen, im Gegensatz zu den Gegenüberstellungen aus Abschnitt

6.5.10, ein zum Teil geringerer jedoch ausreichend hoher Sicherheitsabstand festgestellt werden. Da für Flankenkehlnahtverbindungen der Faktor $\delta_{\Delta} = 1,00$ anzusetzen ist, entsprechen die anhand des angepassten Modells ermittelten Bemessungsgrenzspannungen den Spannungen ermittelt nach dem derzeit gültigen Modell nach *prEN 1993-1-8* [18].

Für die Flankenkehlnahtverbindungen kann für alle drei Evaluationsgruppen festgestellt werden, dass die experimentell ermittelte Tragfähigkeit mit zunehmender Festigkeit des geringeren Grundwerkstoffs ansteigt. Die Zunahme der aufgetragenen Bemessungsgrenzspannungen fällt ähnlich aus.

Dies kann für die Stirnkehlnahtverbindungen lediglich für die Evaluationsgruppe G/T/E46 in Abb. 6-66 rechts beobachtet werden. Die aus den Versuchen ermittelten Tragfähigkeiten der Evaluationsgruppen G/T69 in Abb. 6-67 und G/T89 in Abb. 6-68 streuen wesentlich stärker, was jedoch aufgrund des höheren Sicherheitsabstands zwischen Versuchswerten und Bemessungsgrenzspannung berücksichtigt wird.

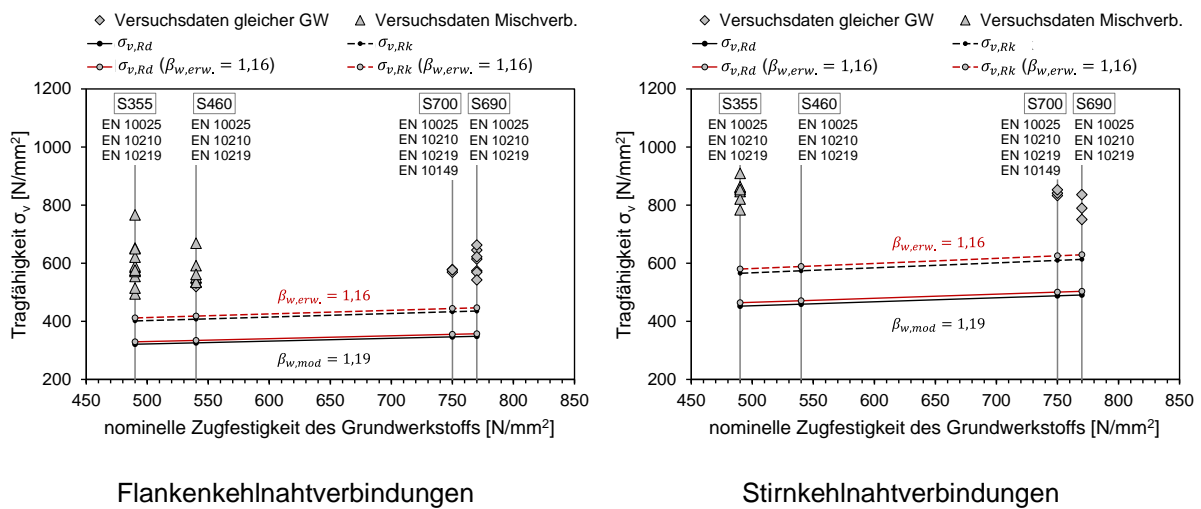


Abb. 6-68: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeit mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe G/T89

Ergänzend ist in den Diagrammen in Abb. 6-68 die Bemessungsgrenzspannung unter Ansatz des vorgeschlagenen Korrelationsbeiwerts $\beta_{w,erw} = 1,16$ für Flanken- als auch für Stirnkehlnahtverbindungen aufgetragen. Aufgrund des ausreichend hohen Sicherheitsabstands zu den Versuchsergebnissen zeigt sich, dass eine Anpassung des Beiwerts möglich ist.

7 Ergebnisse bereits abgeschlossener Untersuchungen an durchgeschweißten Stumpfnahverbindungen

7.1 Allgemeines

Bereits in Abschnitt 4 wurden die nach *prEN 1993-1-8* [18] gültigen Bemessungskonzepte für geschweißte Verbindungen vorgestellt. In Verbindung mit den Ergebnissen aus den vorherigen Abschnitten konnte gezeigt werden, dass ein an die Eigenschaften höherfester Stähle angepasstes Bemessungskonzept für Kehlnahverbindungen vorliegt. Dies gilt ebenfalls für nicht durchgeschweißte Stumpfnahverbindungen, da diese nach Norm entsprechend einer Kehlnahverbindung zu behandeln sind. Ein angepasstes Konzept für durchgeschweißte Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle liegt derzeit jedoch noch nicht vor. Die Dringlichkeit eines adaptierten Bemessungsansatzes speziell für Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle, wurde bereits in abgeschlossenen Untersuchungen thematisiert. Aus den durchgeführten experimentellen Untersuchungen konnte ein deutliches Sicherheitsrisiko hinsichtlich der nach Norm empfohlenen Nachweisführung festgestellt werden. Das in den Versuchen beobachtete Versagen von Matching-Verbindungen trat hier, entgegen der nach *prEN 1993-1-8* [18] vorgegebenen Nachweisführung, zum Teil im Bereich der Wärmeeinflusszone mit verringerten Tragfähigkeiten auf. Um die Problematik der durchgeschweißten Stumpfnahverbindungen zu erläutern und den derzeitigen Stand der Forschung wiederzugeben, werden im Folgenden die bereits vorliegenden Untersuchungen an Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle vorgestellt. Die daraus hervorgehenden Versuchsergebnisse werden in der späteren statistischen Auswertung in Abschnitt 8.6 miteinbezogen.

7.2 Dissertation Maurer [61]

7.2.1 Zielsetzung

Im Rahmen seiner Dissertation untersuchte *Maurer* [61] die Auswirkungen auf die globale Tragfähigkeit einer sich einstellenden Erweichung innerhalb der Wärmeeinflusszone von geschweißten Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle. Zur Diskussion stand hierbei die oftmals von den verarbeitenden Firmen geforderte höhere Wärmeeinbringung während des Schweißprozesses, um dadurch die Abschmelzleistung und infolgedessen die Wirtschaftlichkeit zu verbessern. Dies steht jedoch in einer negativen Korrelation mit einer in der Wärmeeinflusszone des Grundwerkstoffs entstehenden lokalen Erweichung (vgl. Abschnitt 3.4.3), die eine Beeinflussung der globalen mechanischen Eigenschaften des Bauteils zufolge hat.

Maurer [61] betrachtete in seiner Arbeit die Fragestellung, inwiefern die globale Tragfähigkeit einer Stumpfnahthverbindung von einer entstehenden Weichen Zone beeinträchtigt wird. Die Zielsetzung beinhaltete die Ermittlung der von der Weichen Zone ausgehenden Einflussfaktoren und der Ermittlung von spezifischen Grenzwerten, die die negativen Beeinflussungen auf die Tragfähigkeit minimieren bzw. verhindern können.

7.2.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm umfasste neben experimentellen Untersuchungen ergänzende physikalische Simulationen der Wärmeeinflusszone. Für die Fertigung der Versuchskörper wurden ausschließlich Stähle der Güte S700MC verwendet, die mit unterschiedlichen Festigkeiten des Schweißzusatzwerkstoffs verschweißt wurden. Neben variierenden Schweißzusätzen, zur Erzeugung unterschiedlicher Mismatch-Verhältnisse in der Naht, wurden die Schweißparameter und der Nahttyp (V- und X-Naht) variiert. Die Ausführung der Schweißnähte erfolgte einlagig und mehrlagig. Physikalische WEZ-Simulationen (Dilatometerversuche) ermöglichten zusätzlich eine gezielte Untersuchung der entstehenden Erweichung unter Vernachlässigung der Durchführung eines Schweißprozesses. Hierbei wurden mittels konduktiver Erwärmung unterschiedliche Zeit-Temperatur-Zyklen auf definierte Probevolumen aufgebracht, um die daraus resultierenden mechanischen und geometrischen Eigenschaften ermitteln zu können.

7.2.3 Ergebnisse

Als geometrischen Einflussfaktor konnte *Maurer* [61] aus den Versuchsergebnissen die Breite der Weichen Zone ableiten. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Verbindungen unterschiedlicher Grundwerkstoffdicken wurden die gemessenen Breiten der Weichen Zone ins Verhältnis der vorhandenen Grundwerkstoffdicken t gesetzt. Die Auswertung der Ergebnisse in Abb. 7-1 zeigen deutlich, dass infolge einer zunehmenden relativen Breite der Weichen Zone X_{WZ} die Tragfähigkeit einer Stumpfnahthverbindung abnimmt.

Des Weiteren bestätigte *Maurer* [61] den bereits aus der Literatur bekannten Einfluss des Energieeintrags auf die Ausbildung der Weichen Zone. Die Ergebnisse seiner Untersuchungen zeigten eine mit dem Energieeintrag zunehmende Breite der Weichen Zone.

Aus der Gegenüberstellung der Tragfähigkeiten der Verbindungen unterschiedlicher Mismatch-Verhältnisse zeichnete sich ein tragfähigkeitssteigernder Einfluss bei Verwendung eines Overmatching-Schweißzusatzes ab. Dem Diagramm in Abb. 7-1 ist zu entnehmen, dass

Verbindungen ähnlicher relativer Breiten der Weichen Zone X_{WZ} höhere Tragfähigkeiten erreichen, wenn ein höherfester Schweißzusatzwerkstoff verwendet wird. Vergleicht man in Abb. 7-1 (rote Markierung) die Verbindungen mit einer relativen Breite von $X_{WZ} \approx 0,5$ lässt sich deutlich erkennen, dass die Tragfähigkeit mit zunehmender Festigkeit im Schweißzusatzwerkstoff zunimmt und das Versagen trotz vorhandener Erweichung im Grundwerkstoff auftritt.

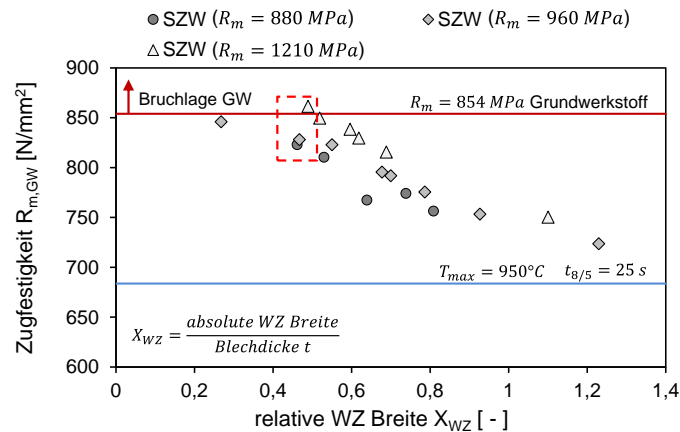


Abb. 7-1: Zugfestigkeit einer Stumpfnahverbindung in Abhängigkeit der relativen Breite der Weichen Zone X_{WZ} [61]

Als Ergebnis fasste *Maurer* [61] zusammen, dass zwar eine Weiche Zone innerhalb der Wärmeinflusszone von höherfesten Stählen vorhanden ist, diese jedoch nicht zwingend zu einer verringerten globalen Tragfähigkeit der Verbindung führt. Beispielsweise kann die Einhaltung eines Grenzwerts hinsichtlich der relativen Breite der Weichen Zone die Gefahr eines frühzeitigen Bauteilversagens verringern. *Maurer* [61] legte als relative Breite der Weichen Zone für Matching-Verbindungen einen Grenzwert von $X_{WZ} \leq 0,25$ fest, der aufgrund von festigkeitssteigernden Stützeffekten für Overmatching-Verbindungen auf $X_{WZ} \leq 0,5$ angehoben werden kann. Im Zuge der Diskussion der Versuchsergebnisse der beiden Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] und der *Zusatzuntersuchungen* [57] in Abschnitt 8.3 soll der von *Maurer* [61] angegebenen Grenzwert ebenfalls betrachtet werden.

7.3 Untersuchungen an Undermatching-Verbindungen [74], [42]

7.3.1 Zielsetzung

Da gerade für höherfeste Stähle oftmals ein Schweißzusatzwerkstoff mit vergleichbaren oder höheren mechanischen Eigenschaften nicht verfügbar ist, untersuchten *Törnblom* [74] und *Collin* [42] das Tragverhalten von Undermatching-Verbindungen. Anhand von experimentellen Untersuchungen sollte unter anderem ein Grenzwert für das Mismatch-Verhältnis von Stumpfnahverbindungen ermittelt werden, der, ausgehend von der Festigkeit des Grundwerkstoffs, zu einer möglichst geringen Tragfähigkeitsminderung führt.

7.3.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm umfasste V-Naht Verbindungen an den Grundwerkstoffen WELDOX 960 und WELDOX 1100. Um unterschiedliche Undermatching-Verhältnisse zu erzeugen, wurden die Stahlsorten mit variierenden Schweißzusatzwerkstoffen verschweißt. Des Weiteren sollten unterschiedliche geometrische Einflüsse auf die Tragfähigkeit der Undermatching-Verbindungen untersucht werden. Hier wurde zum einen der Einfluss des Verhältnisses aus Versuchskörperbreite b zu -dicke t , als auch der Einfluss der Nahtbreite a durch die Variierung des Nahtöffnungswinkels α betrachtet, siehe Abb. 7-2.

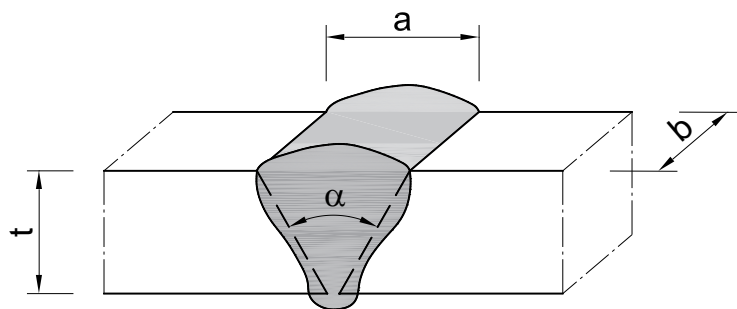


Abb. 7-2: Geometrische Parameter einer Stumpfnah

7.3.3 Ergebnisse

Trotz einer Undermatching-Verbindung trat das Versagen in den experimentellen Untersuchungen teilweise im Grundwerkstoff auf. Die erreichten Tragfähigkeiten entsprachen dabei der Festigkeit des Grundwerkstoffs. Durch den Vergleich der Tragfähigkeiten von Verbindungen unterschiedlicher Undermatching-Verbindungen konnte von *Törnblom* [74] und *Collin* [42]

nachgewiesen werden, dass infolge einer zunehmenden Festigkeitsabweichung des Schweißzusatzwerkstoffs vom Grundwerkstoff die globale Tragfähigkeit der Verbindung abnimmt, siehe Abb. 7-3. *Törnblom* [74] und *Collin* [42] entnehmen den Versuchsergebnissen, dass ein Unterschreiten des in der Naht vorliegenden Undermatching-Verhältnisses von $f_{y,szw}/f_{y,gw} \geq 0,77$, die Wahrscheinlichkeit eines Versagens im Schweißgut bzw. in der Wärmeinflusszone erhöht. Das von *Törnblom* [74] und *Collin* [42] festgelegte Grenzverhältnis soll für die spätere Versuchsauswertung in Abschnitt 8.3 ebenfalls berücksichtigt werden.

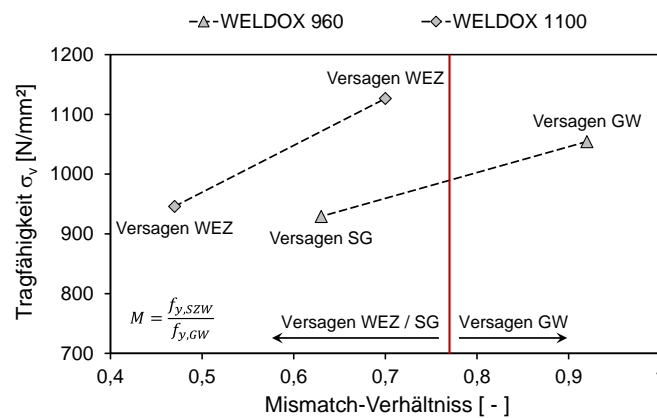


Abb. 7-3: Einfluss des Undermatching-Verhältnisses auf die Tragfähigkeit einer Stumpfnahverbindung

Ebenfalls konnte anhand der Ergebnisse ein Einfluss aus der Versuchskörperbreite b (siehe Abb. 7-2) auf die Tragfähigkeit festgestellt werden. In Abb. 7-4 ist zu erkennen, dass die globale Tragfähigkeit der Verbindung mit zunehmender Breite ansteigt. *Törnblom* [74] und *Collin* [42] begründeten die Tragfähigkeitszunahme durch die vom Grundwerkstoff hervorgerufenen Stützeffekte, die einer Querdehnung in der Naht und somit einem Versagen in der Wärmeinflusszone entgegenwirkt.

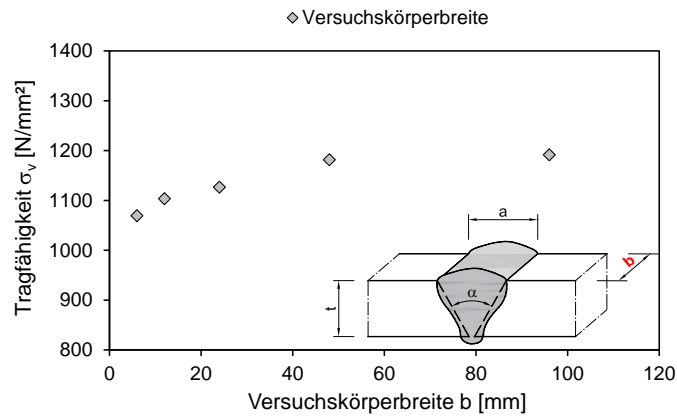


Abb. 7-4: Einfluss der Versuchskörperbreite b auf die Tragfähigkeit einer Stumpfnahftverbindung

Als letzter Einflussfaktor auf die Tragfähigkeit betrachteten *Törnblom* [74] und *Collin* [42] das vorhandene Nahtvolumen von V-Nähten unterschiedlicher Nahtöffnungswinkel. Die in Abb. 7-5 aufgetragenen Ergebnisse zeigen, dass ein zunehmender Nahtöffnungswinkel eine Abnahme der Tragfähigkeit bewirkt. Hier konnten jedoch lediglich zwei Nahtöffnungswinkel verglichen werden. Um eine begründete Aussage treffen zu können, bedarf es daher weiterer Untersuchungen an Stumpfnahftverbindungen unterschiedlicher Nahtöffnungswinkel.

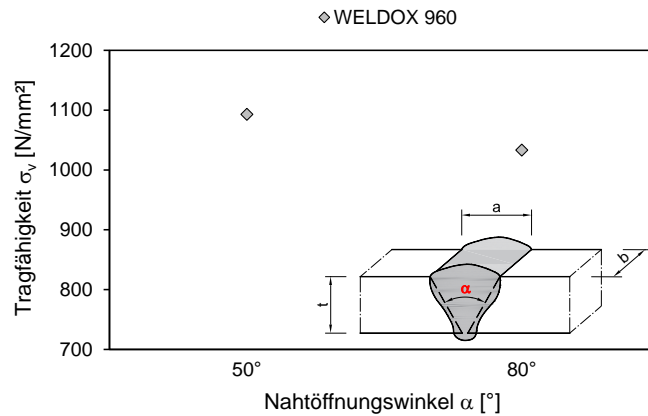


Abb. 7-5: Einfluss des Nahtöffnungswinkels α auf die Tragfähigkeit einer Stumpfnahftverbindung

7.4 Statistische Auswertung von Stumpfnahverbindungen nach Björk [37]

7.4.1 Zielsetzung

Weitere Untersuchungen an Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle erfolgten durch Björk [37]. Die hier betrachtete Problemstellung beinhaltete die bereits in vorherigen Untersuchungen festgestellte Erweichung innerhalb der Wärmeeinflusszone von höherfesten Stählen. Björk [37] betrachtete vor allem die Thematik einer reduzierten Tragfähigkeit infolge der Erweichung, die in den derzeit gültigen Bemessungskonzepten nicht berücksichtigt wird. Anhand von Zugversuchen ermittelte Björk [37] experimentell und numerisch die Tragfähigkeiten von durchgeschweißten Stumpfnahverbindungen und wertete diese anschließend statistisch nach Anhang D [24] aus. Mit Hilfe der statistischen Auswertung sollte ein materialbezogener Teilsicherheitsbeiwert für höherfeste Stähle entwickelt werden, der in Zukunft eine sichere Bemessung von Stumpfnähten gewährleistet.

7.4.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm umfasste Stumpfnahverbindungen der Festigkeitsklassen S500 bis S700. Ausgeführt wurden die Verbindungen als V- und DV- Nähte, die unter variierenden Energieeinträgen geschweißt wurden. Die Schweißarbeiten erfolgten unter Werkstatt- und Laborbedingungen, um mögliche Einflüsse aus dem Schweißprozess auf die Tragfähigkeit untersuchen zu können. Es ist hervorzuheben, dass teilweise Energieeinträge gewählt wurden, die zu Abkühlzeiten von bis zu 85 Sekunden führten und damit weit über den von den Stahlherstellern empfohlenen Grenzwerten lagen. Die anschließende Versuchsdurchführung erfolgte bei unterschiedlichen Raumtemperaturen.

7.4.3 Ergebnisse

Aus den Untersuchungen leitete Björk [37] ab, dass die vorliegende Streuung der Versuchsergebnisse vor allem durch den verwendeten Schweißprozess hervorgerufen wird. Eine wesentlich geringere Streuung der Versuchsergebnisse lag bei Verbindungen, die unter Laborbedingungen geschweißt wurden, vor. Auch die Raumtemperatur während der Versuchsdurchführung beeinflusste das Tragverhalten der Stumpfnahverbindungen zum Teil deutlich.

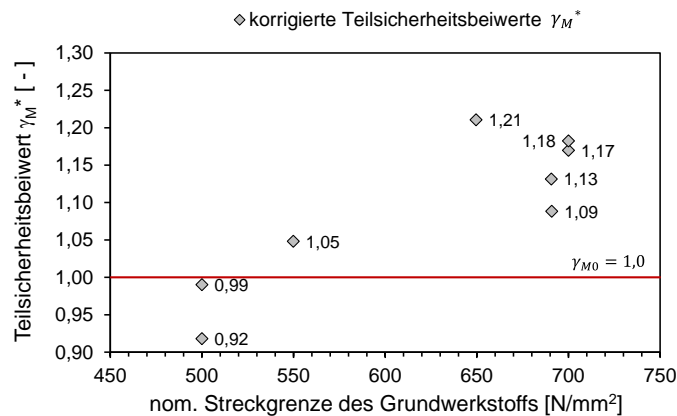


Abb. 7-6: Korrigierte Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand in Abhängigkeit des jeweiligen Grundwerkstoffs

Anhand einer statistischen Auswertung ermittelte Björk [37] nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24] in Abhängigkeit der Festigkeit f_y des jeweiligen Grundwerkstoffs neue korrigierte Teilsicherheitsbeiwerte γ_M^* und verglich diese mit dem für den Bauteilnachweis anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M0} = 1,0$. Die Ergebnisse können Abb. 7-6 entnommen werden.

Abb. 7-6 zeigt, dass ab einer Festigkeit von 500 N/mm^2 der aus der Statistik ermittelte korrigierte Teilsicherheitsbeiwert γ_M^* über dem für das Bemessungskonzept anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M0} = 1,0$ liegt. Aufgrund des höheren Teilsicherheitsbeiwerts ist nach Björk [37] eine Anpassung des Bemessungskonzepts für Stumpfnähte höherfester Stähle unabdingbar, um das geforderte Sicherheitsniveau einhalten zu können. Björk [37] gibt als Anpassungsmaßnahmen zwei mögliche Alternativen an. Die erste Alternative beinhaltet die Einführung eines Abminderungsbeiwerts, um die einzusetzenden Festigkeitswerte zu korrigieren und dadurch den vorgegebenen Teilsicherheitsbeiwert einzuhalten. Als zweite Möglichkeit führt er die Anwendung eines für höherfeste Stähle angepassten Teilsicherheitsbeiwerts auf. Björk [37] ergänzt jedoch, dass aufgrund der starken Streuung der vorliegenden Versuchsergebnisse eine entsprechende Anpassung derzeit nicht hergeleitet werden kann.

8 Untersuchungen an Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle

8.1 Forschungsvorhaben HighButtWeld DVS 09.083 [36]

Die in Abschnitt 7 vorgestellten Ergebnisse der Untersuchungen an durchgeschweißten Stumpfnahverbindungen gaben Anlass zu einem deutschen Forschungsvorhaben mit dem Titel „*Tragfähigkeit von Stumpfnähten höherfester Stähle im Stahlbau*“ (*HighButtWeld*) [36]. Das Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] zielte darauf hin, das Tragverhalten von durchgeschweißten Stumpfnahverbindungen zu untersuchen und ein darauf abgestimmtes sicheres und wirtschaftliches Bemessungskonzept zu erarbeiten. Wie bereits in Abschnitt 3.4.2 erläutert, stellen sich infolge des Schweißprozesses im Bereich der Wärmeeinflusszone oftmals unerwünschte mechanische Eigenschaften ein, die zu einem frühzeitigen und somit kritischen Versagen in der Wärmeeinflusszone der Naht führen können. Um ein solches Versagen in Form eines angepassten Bemessungsmodells erfassen zu können, waren detaillierte Untersuchungen des Tragverhaltens an durchgeschweißter Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle erforderlich. Der Fokus der Untersuchungen lag vor allem auf der Identifizierung der einflussnehmenden Parameter, die ein kritisches Versagen in der Wärmeeinflusszone in Kombination einer verringerten Tragfähigkeit begünstigen.

8.2 Experimentelle Untersuchungen an durchgeschweißten Stumpfnahverbindungen

8.2.1 Allgemeines

Das Tragverhalten von durchgeschweißten Stumpfnahverbindungen wurde anhand von Bauteilversuchen untersucht. Ausgehend von den in Abschnitt 7 vorgestellten Versuchsergebnissen erfolgte die Festlegung der im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] zu betrachtenden Einflussparameter, wie die Festigkeiten der verwendeten Werkstoffe, die Art der Nahtvorbereitung, der Nahtöffnungswinkel und der Schweißprozess. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens *HighButtWeld* [36] durchgeführten experimentellen Untersuchungen werden im Folgenden kurz vorgestellt und erläutert. Für eine detaillierte Versuchsbeschreibung sei hier auf den Schlussbericht des Forschungsvorhabens *HighButtWeld* [36] verwiesen.

8.2.2 Verwendete Werkstoffe

8.2.2.1 Grundwerkstoff

Im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] wurden insgesamt drei Versuchsserien unterschiedlicher höherfester Grundwerkstoffe mit variierenden Materialdicken untersucht. Die Referenzversuche umfassten die Versuchsserie aus höchfestem Stahl der Güte S460ML nach *DIN EN 10025-4* [9]. Als weitere Versuchsserien wurden Stumpfnahverbindungen der Güte S690QL nach *DIN EN 10025-6* [10] und der Güte S700MC nach *DIN EN 10149-2* [11] gefertigt.

Derzeit schreibt die Norm für die Bemessung einer durchgeschweißten Stumpfnah einen Bauteilnachweis des geringer festen Grundwerkstoffs vor, vgl. Abschnitt 4.4.3. Ein Vergleich der aus den Versuchen abgeleiteten globalen Tragfähigkeiten der Verbindungen mit der nach Norm zugrunde zu legenden Bauteiltragfähigkeit, erforderte daher die Ermittlung der tatsächlich vorhandenen mechanischen Eigenschaften der verwendeten Grundwerkstoffe. Darüber hinaus dienen die daraus hervorgehenden Materialkurven als Eingangswerte für die späteren analytischen Versuchsnachrechnungen in Abschnitt 8.4. Die Bestimmung der Materialeigenschaften erfolgte anhand zweier unabhängiger Zugversuche am reinen Grundwerkstoff. Tab. 8-1 umfasst die aus den Zugversuchen abgeleiteten mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Stahlgüte und der jeweiligen Blechdicke. Die hier aufgeführten Daten entsprechen den aus den beiden Zugversuchen gemittelten Werten. Ergänzend sind die von der zugehörigen Produktnorm geforderten nominellen Mindestwerte aufgeführt. Die im Anhang C.1 angegebenen chemischen Zusammensetzungen der Schmelzanalysen wurden den vorliegenden 3.1 Zeugnissen nach *DIN EN 10204* [31] entnommen.

Tab. 8-1: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Grundwerkstoffe im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36]

Mechanische Eigenschaften	S460ML 1.8838 <i>DIN EN 10025-4:</i> <i>2019-10 Tabelle 4</i> [9]		S690QL 1.8928 <i>DIN EN 10025-6:</i> <i>2020-02 Tabelle 4</i> [10]		S700MC 1.8974 <i>DIN EN 10149-2:</i> <i>2013 Tabelle 2</i> [11]		
	Blechdicke t [mm]:	10	20	10	20	10	15
$R_{eH} / R_{p0.2}$ [N/mm ²]	nom.:	460	440	690		700	
	exp.:	542	540	841	853	815	792
R_m [N/mm ²]	nom.:	540-720		770-940		750-950	
	exp.:	603	599	872	895	830	813
$A(t)$ [%]	nom.:	17		14		12	
	exp.:	13	17	14	14	19	18

8.2.2.2 Schweißzusatzwerkstoff

In Abhängigkeit der zu verschweißenden Grundwerkstoffe konnten unter Verwendung der Schweißzusatzwerkstoffe G46 4 M21 4Si1 nach [14], G69 4 M Mn3Ni1CrMo und G89 4 M Mn4Ni2CrMo nach [15], und T69 4 Mn2NiMo M M 2 H5 Undermatching-, Matching- und Overmatching-Verbindungen gefertigt werden.

Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe erfolgte analog zu dem in Abschnitt 6.2.2.2 erläuterten Schweißgutuntersuchungen. Hier wurde bereits darauf hingewiesen, dass die ermittelten Materialeigenschaften der untersuchten Schweißgutproben von den in der Naht der Versuchskörper vorliegenden Eigenschaften abweichen können. Um Im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] möglichst versuchsnahe Materialmodelle für die Schweißnaht zu erhalten, wurde für jeden Schweißzusatzwerkstoff Schweißgutproben mit einer Aufmischung mit dem Grundwerkstoff S690QL unter hohem und unter niedrigem Energieeintrag, entsprechend des Versuchsprogramms, gefertigt. Für den Fülldraht T89 wurden keine mechanischen Eigenschaften bestimmt, da dieser nicht für die Hauptversuchsserie am S690QL verwendet wurde.

Die daraus ermittelten Werkstoffeigenschaften können Tab. 8-2 entnommen werden. Die hier aufgeführten Daten entsprechen den aus den drei Zugversuchen gemittelten Festigkeiten und sind den geforderten Werten der jeweiligen Produktnorm gegenübergestellt. Die vorgegebenen Festigkeitswerte werden von allen Schweißzusätzen eingehalten. Die chemischen Zusammensetzungen der einzelnen Schweißzusatzwerkstoffe sind in C.1 aufgeführt und entstammen den vorliegenden Datenblättern. Auch hier dienen die ermittelten Materialkurven als Eingangswerte der späteren analytischen Versuchsbeurteilung.

Tab. 8-2: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36]

Mechanische Eigenschaften	Energieeintrag:	G46 4Si1 <i>prEN ISO 14341:</i> <i>2019 Tabelle 1A [14]</i>	G69 Mn4Ni1.5CrMo <i>DIN EN ISO 16834:</i> <i>2012-08 Tabelle 1A [15]</i>		T69 Mn2NiCrMo <i>DIN EN ISO 18276:</i> <i>2017-07 Tabelle 1A [13]</i>		G89 Mn4Ni2CrMo <i>DIN EN ISO 16834:</i> <i>2012-08 Tabelle 1A [15]</i>	
		hoch	niedrig	hoch	niedrig	hoch	niedrig	
$R_{eH} / R_{p0.2}$ [N/mm ²]	nom.:	460	690		690		890	
	exp.:	645	795	912	747	804	986	1017
R_m [N/mm ²]	nom.:	530 - 680	770 - 940		770 - 940		940 - 1180	
	exp.:	708	919	997	818	829	1097	1137

8.2.3 Versuchskörperform

Um das tatsächliche Tragverhalten einer Stumpfnahverbindung prüfen zu können, bedarf es einer, zur Vermeidung unzureichend großer Streuungen der Versuchsdaten, intakten und fehlerfreien Naht. Hierzu wurden zwei Bleche entsprechend der angedachten Nahtvorbereitung stumpf gestoßen und unter Verwendung des vorgegebenen Schweißzusatzwerkstoffs und der Schweißparameter verschweißt. Anschließend erfolgte entsprechend Abb. 8-1 die Entnahme der tatsächlichen Versuchskörper aus dem mittleren Bereich der verschweißten beiden Bleche. Ausgearbeitet wurden jeweils drei Versuchskörper. Aus den vorhandenen Reststücken konnten anschließend die für die Untersuchungen benötigten Makroschliffe entnommen sowie Härteuntersuchungen durchgeführt werden.

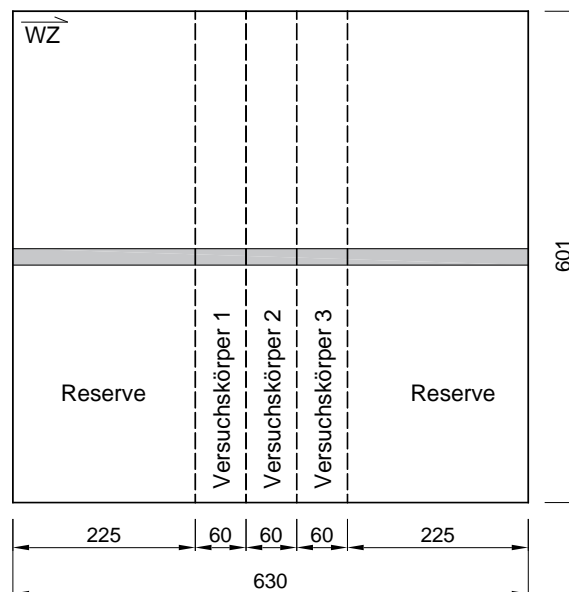


Abb. 8-1: Geschweißtes Blech zur Entnahme der Zugproben

Die Abmessungen der Versuchskörper der auf Zug zu prüfenden Stumpfnähte wurden in Anlehnung an die Empfehlungen der *DIN 50125* [30] bestimmt. In Abhängigkeit der Materialdicken ergaben sich die in Abb. 8-2 dargestellten Versuchskörperabmessungen.

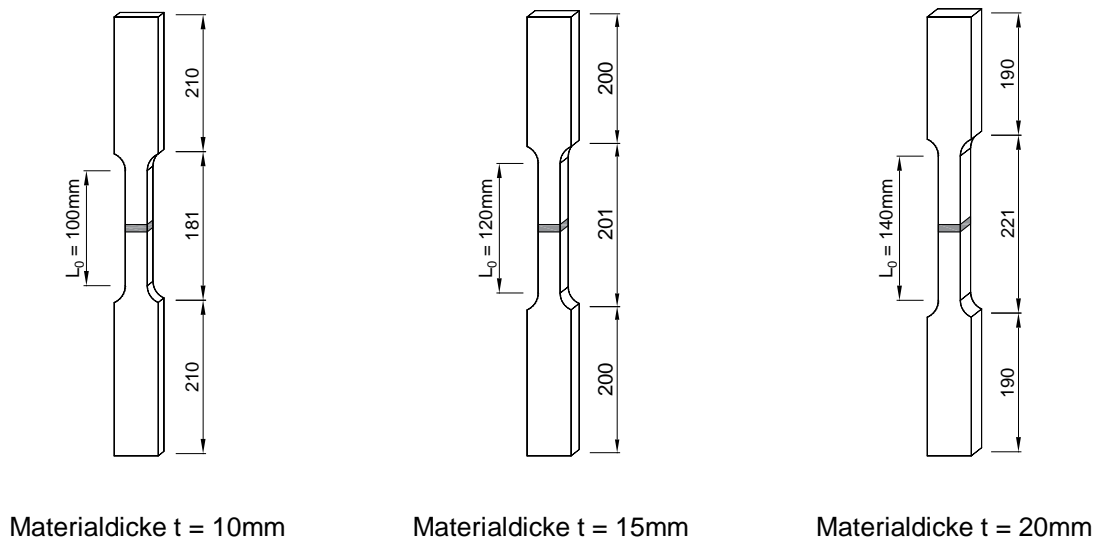


Abb. 8-2: Versuchskörpergeometrie in Abhängigkeit der Materialdicke

8.2.4 Abtrag der Nahtüberhöhung

Erste experimentelle Untersuchungen zeigten, dass das auftretende Versagen aufgrund einer vorhandenen Nahtüberhöhung beeinflusst wird. In Abb. 8-3 ist deutlich der vergrößerte Querschnitt im Bereich der Naht zu erkennen, der einem Versagen im Bereich der Wärmeeinflusszone oder des Schweißguts positiv entgegenwirkt bzw. es verhindert. Um diesen Effekt zu vermeiden, wurde an den noch nicht geprüften Versuchskörpern nachträglich die vorhandene Nahtüberhöhungen entsprechend Abb. 8-3 bis auf $0,5\text{ mm}$ abgetragen.

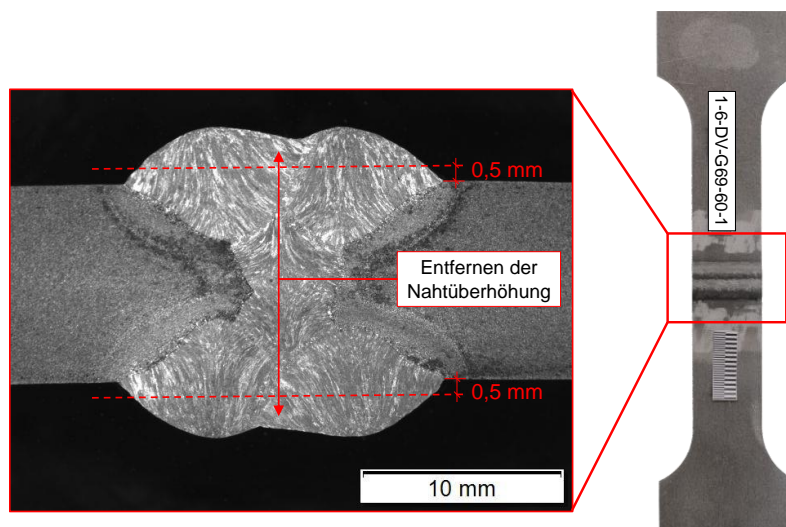


Abb. 8-3: Abtrag der Nahtüberhöhung

Abb. 8-4 verdeutlicht den positiven Einfluss aus der Nahtüberhöhung auf das auftretende Versagen. Gegenübergestellt sind hier Verbindungen, die sowohl mit als auch ohne Nahtüberhöhung geprüft wurden. Bei Verbindungen mit vorhandener Nahtüberhöhung trat das Versagen ausschließlich im Grundwerkstoff auf. Wurde derselbe Stumpfnahttyp ohne Nahtüberhöhung getestet, verlagerte sich das Versagen in die Wärmeeinflusszone um. Die dabei erreichten Tragfähigkeiten liegen unter den Tragfähigkeiten der Verbindungen, die mit vorhandener Nahtüberhöhung geprüft wurden.

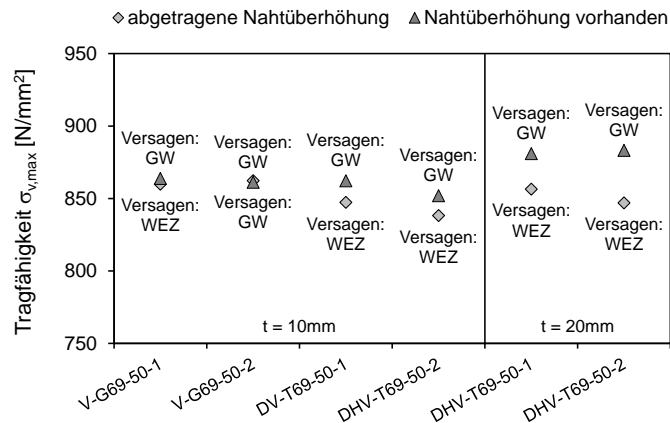


Abb. 8-4: Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Nahtüberhöhung

8.2.5 Versuchsprogramm

Abb. 8-5 umfasst die im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] untersuchten Werkstoffkonfigurationen der drei Versuchsserien an Stumpfnahtverbindungen höherfester Stähle der Güte S460ML, S690QL und S700MC. Das ausführliche Versuchsprogramm kann Anhang C.2 entnommen werden. Die angegebenen Matching-Faktoren M der jeweiligen Werkstoffkonfiguration wurden anhand der nominellen Streckgrenzen f_y ermittelt (vgl. Gleichung (4.4)).

Die Versuchsserie der Stumpfnahtverbindungen der Güte S460ML diente als Referenzwert und beinhaltete als V-, DV- und DHV-Nähte gefertigte Matching-Verbindungen ($M = 1,0$) unter Verwendung des Schweißzusatzwerkstoffs G46. Anhand der Referenzversuche soll die von Björk [37] getroffene Annahme überprüft werden, dass die Gefahr eines kritischen Versagens erst ab einer Festigkeit von $> 500 \text{ N/mm}^2$ zu berücksichtigen ist, vgl. Abschnitt 7.4.

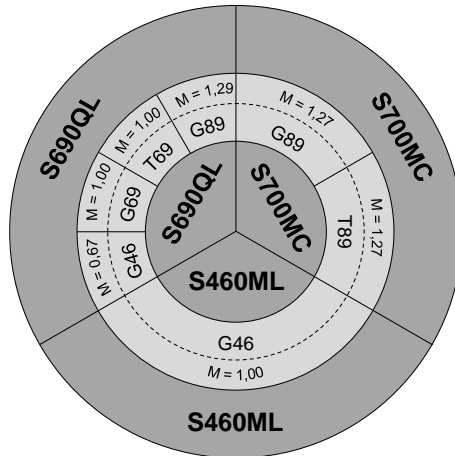


Abb. 8-5: Werkstoffkonfigurationen der Stumpfnahverbindungen

Für die Versuchsserie der Stumpfnahverbindungen am Grundwerkstoff der Güte S700MC waren ausschließlich Overmatching-Verbindungen ($M > 1,0$) geplant, die unter Verwendung der Schweißzusätze G89 und T89 geschweißt wurden. Auch hier waren V-, DV- sowie DHV-Nähte vorgesehen.

Die Hauptversuchsserie im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] umfasste Stumpfnahverbindungen am Grundwerkstoff der Güte S690QL. Untersucht wurden Stumpfnahverbindungen verschiedener Nahtgeometrien mit unterschiedlichem Matching-Verhältnis, die unter variierenden Energieeinträgen geschweißt wurden.

8.2.5.1 Zusatzuntersuchungen [36]

Aufgrund der geringen Anzahl an Versuchen mit abgetragener Nahtüberhöhung wurden im Rahmen von *Zusatzuntersuchungen* [57] weitere Stumpfnahverbindungen mit Stahl der Güte S690QL geprüft, deren Nahtüberhöhung ebenfalls abgetragen wurde. Das Versuchsprogramm kann D.1 entnommen werden. Da die Versuchskörperfertigung sowie die Versuchsdurchführung analog zum Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] erfolgte, wird auf eine Erläuterung verzichtet und lediglich die Versuchsergebnisse in der späteren Diskussion und Auswertung betrachtet.

8.2.6 Schweißprozess

Eine Variation der Schweißparameter zielte daraufhin, die Auswirkungen des Energieeintrags auf die globale Tragfähigkeit einer Stumpfnahverbindung zu untersuchen. Aus den in Kapitel 7 vorgestellten Untersuchungen an Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle konnte bereits ein wesentlicher Einfluss aus dem Energieeintrag während des Schweißens festgestellt werden. Es zeigte sich, dass vor allem bei Versuchskörpern, die mit einem hohen Energieeintrag geschweißt wurden, ein vermehrtes Versagen in der Wärmeeinflusszone auftrat. Nach *Maurer* [61] ist das vermehrte Versagen in der Wärmeeinflusszone auf eine in Abhängigkeit des Energieeintrags hervorgerufene Weiche Zone zurückzuführen. Dies sollte im Rahmen des Forschungsvorhabens *HighButtWeld* [36] erneut untersucht werden, um wichtige Erkenntnisse für das zu erarbeitende Bemessungskonzept zu erhalten. Deshalb wurden gleiche Werkstoffkonfigurationen mit variierenden Energieeinträgen gefertigt, um einerseits eine möglichst schnelle ($t_{8/5} \approx 5 \text{ sec}$) und andererseits eine möglichst langsame Abkühlgeschwindigkeit ($t_{8/5} \approx 8 - 10 \text{ sec}$) hervorzurufen und die daraus resultierenden Weichen Zonen zu untersuchen. Zu erwähnen ist, dass die Festlegung der Prozessparameter unter Berücksichtigung der Einhaltung der von den Grobblechproduzenten angegebenen Abkühlzeiten $t_{8/5}$ erfolgte. Um weitere aus dem Schweißprozess resultierende Einflüsse zu vermeiden, wurden alle Versuchskörper vollmechanisiert geschweißt. Die angesetzten Schweißprozessparameter wurden für jede einzelne Schweißlage dokumentiert und die sich einstellenden Abkühlzeiten mit Hilfe von Thermoelementen aufgezeichnet. Die Messung fand außerhalb des Bereichs statt, aus dem später die Versuchskörper entnommen wurde vgl. Abb. 8-6.



Abb. 8-6: Messung der Abkühlzeit mittels eingebrachter Thermoelemente



Abb. 8-7: Winkelverzug der ersten Probeschweißung

Abb. 8-7 zeigt den sich einstellenden Winkelverzug, der sich bei den ersten Schweißproben während der Abkühlung einstellte. Daher war es erforderlich, die zu verschweißenden Bleche mit einer in Abhängigkeit der Nahtart benötigten Winkelvorgabe zu heften und anschließend zu schweißen, um die Fertigung von Versuchskörpern mit einem geringen Verzug zu gewährleisten.

8.2.7 Versuchsdurchführung

Im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] waren mehrere Forschungseinrichtungen beteiligt, sodass die Versuche an der Materialprüfanstalt der Universität Stuttgart und der TU Ilmenau durchgeführt wurden. Für die an der Universität Stuttgart durchgeführten Versuche kam die in Abb. 8-8 dargestellte servo-hydraulische Prüfmaschine mit einer maximalen Maschinenkraft von 1 MN zum Einsatz. Die Versuchskörper wurden weggesteuert bei Raumtemperatur bis zum auftretenden Versagen geprüft. Die Wahl der erforderlichen Belastungsgeschwindigkeit erfolgte in Abhängigkeit der Blechdicke des Versuchskörpers entsprechend den Vorgaben nach *DIN EN ISO 6892-1* [26]. Daraus ergaben sich die Prüfgeschwindigkeiten von 2 mm/min für die Blechdicke $t = 10\text{ mm}$ bzw. $t = 15\text{ mm}$ und 3 mm/min für Verbindungen der Blechdicke $t = 20\text{ mm}$.

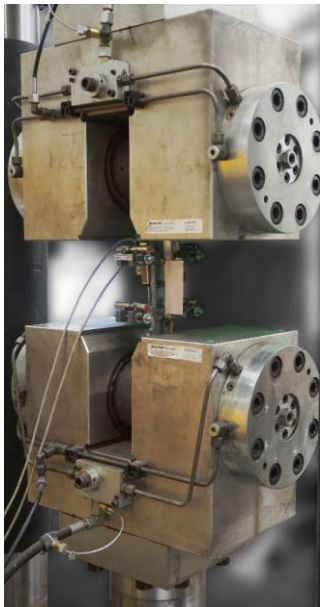


Abb. 8-8: Eingespannter Versuchskörper



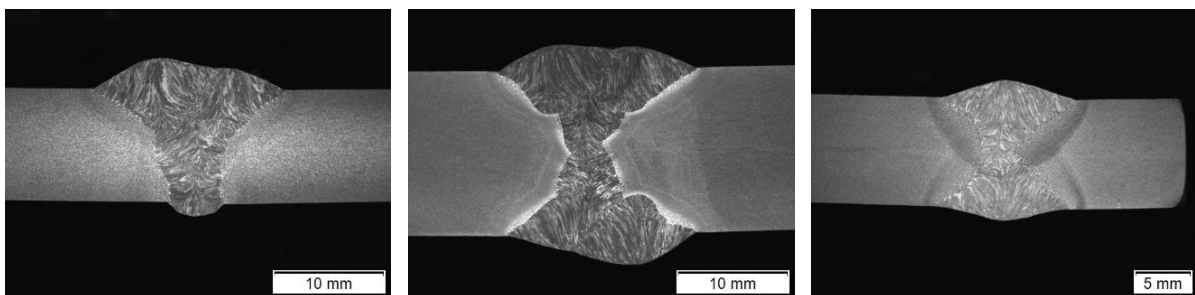
Abb. 8-9: Messsystem zur Dokumentation der lokalen Verformung des Versuchskörpers

Die Messung des von der Maschine aufbrachten Wegs und der dafür benötigten Kraft konnte mittels der integrierten Kraftmessdose aufgezeichnet werden. Die Dokumentation der lokalen Verformung des Versuchskörpers während der Versuchsdurchführung erfolgte anhand zweier induktiver Wegaufnehmer, die entsprechend Abb. 8-9 beidseitig angebracht wurden. Als Messlänge wurden in Abhängigkeit der Materialdicke die nach *DIN 50125* [30] empfohlenen Werte für die Anfangsmesslänge L_0 festgelegt. Die Messung der lokalen Dehnungen der Versuchskörper mit einer Materialdicke $t = 10 \text{ mm}$ erfolgte über eine Länge von $L_0 = 100 \text{ mm}$, für $t = 15 \text{ mm}$ über $L_0 = 120 \text{ mm}$ und für $t = 20 \text{ mm}$ über $L_0 = 140 \text{ mm}$ (vgl. Abb. 8-2). Die dokumentierten Verformungen dienen zur späteren Validierung der numerischen Versuchsnachrechnungen in Abschnitt 8.5.

8.2.8 Begleituntersuchungen

8.2.8.1 Makroschliffe

Für eine Auswertung der geometrischen Beeinflussung der Wärmeeinflusszone auf das Versagen bzw. die Tragfähigkeit von Stumpfnahverbindungen wurden aus den in Abb. 8-1 gekennzeichneten Reststücken Makroschliffe entnommen. Abb. 8-10 umfasst exemplarisch drei Makroschliffe unterschiedlicher Schweißnähte. Die erzeugten Makroschliffe ermöglichten die Überführung der tatsächlich vorhandenen Geometrie der Stumpfnähte in ein analytisches Modell zur Versuchsbeurteilung in Abschnitt 8.5.



Makroschliff 1-4-V-G46-50

Makroschliff 2-7-DV-G89-50

Makroschliff 1-6-DHV-G69-50-1

Abb. 8-10: Exemplarische Makroschliffe unterschiedlicher Stumpfnahverbindungen

8.2.8.2 Härte

Im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] kamen zwei Methoden zum Einsatz, um die in der Schweißnaht vorliegende Härte zu bestimmen. Um die Einhaltung der zulässigen Härtehöchstwerte in der Naht zu überprüfen, erfolgte die Messung der Vickershärte HV10 nach *DIN EN ISO 9015-1* [29]. Hierfür wurden unterhalb der Oberflächen je drei Einzeleindrücke im Bereich der unbeeinflussten Grundwerkstoffe, der Wärmeeinflusszonen und im Schweißgut gemessen, siehe Abb. 8-11.

Die Lokalisierung der zum Teil sehr schmalen Weichen Zone (vgl. Abschnitt 3.4.3) ist anhand der Einzeleindrücke nicht möglich, weshalb eine genauere und engmaschigere Härteprüfung erforderlich war. An ausgewählten Versuchskörpern wurde daher ein sogenanntes Härtemapping erstellt, bei dem über ein Raster im Abstand von 0,2 mm auf 0,2 mm (vgl. Abb. 8-12) die Härte nach Vickers HV2 gemessen wurde. Abb. 8-12 zeigt deutlich den dadurch identifizierten erweichten Bereich (blaue Datenpunkte) innerhalb der Wärmeeinflusszone.

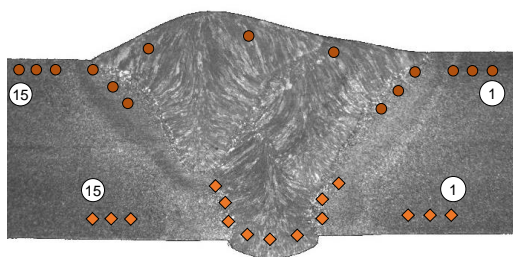


Abb. 8-11: Einzeleindrücke HV10 der Verbindung 1-6-V-G69-50-1

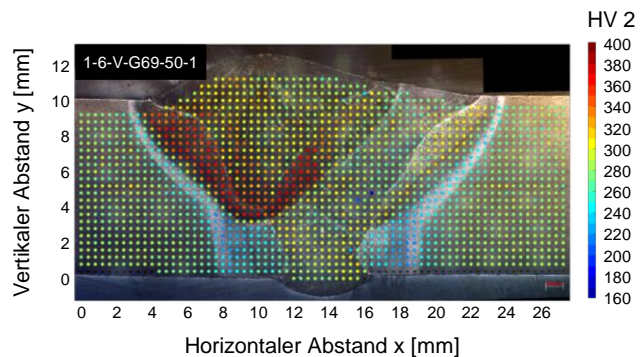


Abb. 8-12: Härtemapping HV2 der Verbindung 1-6-V-G69-50-1

Nach *DIN EN ISO 18265* [28] können aus den Härtewerten entsprechende Festigkeitswerte abgeleitet werden, die jedoch lediglich als Näherung zu betrachten sind. Daher werden in den folgenden Auswertungen die Härtemappings herangezogen, um entsprechende Einflüsse aus vorliegenden Festigkeitsunterschieden im Bereich der Naht nachzuvollziehen.

8.3 Diskussion der Ergebnisse der Tragfähigkeit von Stumpfnahverbindungen

8.3.1 Allgemeines

Kritisch hinterfragt wird derzeit das nach *prEN 1993-1-8* [18] gültige Bemessungskonzept für durchgeschweißte Stumpfnahverbindungen in der Anwendung für höherfeste Stähle. Hintergrund ist das in den vorherigen Untersuchungen beobachtete vermehrte Versagen von Matching- und Overmatching-Verbindungen an höherfesten Stählen im Bereich der Wärmeeinflusszone. Aufgrund der damit einhergehenden reduzierten Tragfähigkeit ist ein solches Versagen als kritisch zu betrachten. Die experimentellen Untersuchungen im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] und der *Zusatzuntersuchungen* [57] dienten dazu, die für das kritische Versagen verantwortlichen Einflussparameter herauszufiltern und in einem konsistenten Bemessungskonzept zusammenzufassen. In Anbetracht der derzeit inadäquaten Nachweisführung der Norm sind zusätzlich die tatsächlichen Tragfähigkeiten von Undermatching-Verbindungen bei einem Versagen im Schweißgut neu zu bewerten.

Aus den bereits vorliegenden Literaturstellen [61], [74], [42], [37] konnten erste Einflussfaktoren aus der Festigkeit des Grundwerkstoffs und des Schweißzusatzwerkstoffs sowie des Schweißprozesses ermittelt werden. Im Folgenden sollen daher die aus den Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] sowie der *Zusatzuntersuchungen* [57] gewonnenen Versuchsdaten dahingehend ausgewertet werden.

Dabei ist anzumerken, dass zur Ermittlung der Einflussfaktoren ausschließlich Versuchsergebnisse der Verbindungen herangezogen werden, deren vorhandene Nahtüberhöhung entsprechend Abschnitt 8.2.4 abgetragen wurde.

8.3.2 Bestimmung der Tragfähigkeit

Für eine Gegenüberstellung der Ergebnisse unterschiedlicher Materialdicken ist eine Umrechnung der von der Prüfmaschine aufgebrachten maximalen Kraft F_{max} in eine flächenunabhängige Spannung nach Gleichung (8.1) vorzunehmen.

$$\sigma_{v,max} = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (8.1)$$

A_0 entspricht dabei der senkrecht zur angreifenden Kraft F_{max} vorhandenen Ausgangsquerschnittsfläche im Bereich des auftretenden Versagens. Hierzu wurde vor der Versuchsdurchführung entsprechend Abb. 8-13 die Geometrie der Versuchskörper an insgesamt fünf Stellen vermessen und dokumentiert.

Eine Übersicht der anhand Gleichung (8.1) ermittelten Tragfähigkeiten kann Anhang C.3 entnommen werden. Ergänzend ist in den Tabellen das sich einstellende Versagen des jeweiligen Versuchskörpers aufgeführt. Auffallend ist, dass ausschließlich Verbindungen der Serie S690QL in unterschiedlichen Bereichen des Versuchskörpers versagten. Die Matching-Verbindungen der Referenzserie S460ML sowie die Overmatching-Verbindungen der Serie S700MC versagten ausschließlich im Grundwerkstoff.

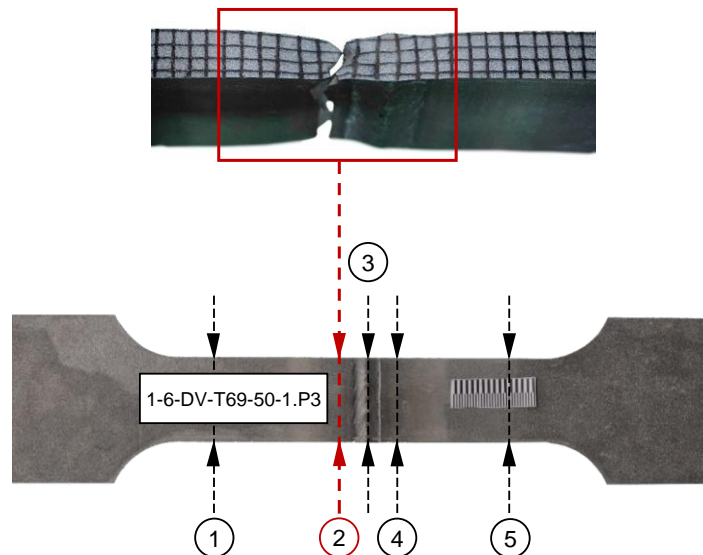


Abb. 8-13: Festlegung der Ausgangsquerschnittsfläche A_0

Zusätzlich zu den Versuchsergebnissen des Forschungsvorhabens *HighButtWeld* [36] werden in den anschließenden Abschnitten die Versuchsergebnisse der *Zusatzuntersuchungen* [57] analysiert. Das auftretende Versagen und die daraus hervorgehende Tragfähigkeit sind in Anhang D.2 aufgeführt.

8.3.3 Einfluss des auftretenden Versagens auf die Tragfähigkeit

In Anbetracht der Nachweisführung nach *prEN 1993-1-8* [18] ist die Tragfähigkeit einer Matching- sowie Overmatching-Verbindung mit der Festigkeit des Grundwerkstoffs gleichzusetzen, vgl. Abschnitt 4.4.3. Für eine Undermatching-Verbindung ist der Nachweis auf Basis der

Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs zu führen. Eine erste Betrachtung der Versuchsergebnisse soll zeigen, ob die nach Norm vorgegebene Nachweisführung den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen entspricht. Da die experimentell ermittelten Tragfähigkeiten aus der maximal aufnehmbaren Zugkraft F_{max} bestimmt wurden, sind für einen Vergleich die tatsächlich vorhandenen Zugfestigkeiten der jeweiligen Werkstoffe nach Tab. 8-1 bzw. Tab. 8-2 heranzuziehen. In den Abb. 8-14 und Abb. 8-15 sind daher die Tragfähigkeiten in Abhängigkeit des sich einstellenden Versagens und die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs S690QL bzw. des Undermatching-Schweißzusatzwerkstoffs G46 aufgetragen. Betrachtet werden hier ausschließlich die Ergebnisse der Stumpfnahverbindungen der Versuchsserie des höherfesten Stahls S690QL, da sich bei den Versuchsserien der Stahlgüte S460ML und S700MC ausschließlich ein Versagen im Grundwerkstoff einstellte. Die Ergebnisse werden getrennt nach der Materialdicke betrachtet.

Besonders hervorzuheben sind die reduzierten Tragfähigkeiten der Matching-Verbindungen, die ein Versagen im Bereich der Wärmeeinflusszone oder Schweißgut aufwiesen. Stellt man die Tragfähigkeiten der von der Norm geforderten Festigkeit des Grundwerkstoffs gegenüber, können zum Teil hohe Abweichungen festgestellt werden. Vor allem das Versagen im Schweißgut der Matching-Verbindungen der Materialdicke $t = 20 \text{ mm}$ in Abb. 8-15 weicht stark von der Festigkeit des Grundwerkstoffs ab. Eine Bemessung der Matching-Verbindung entsprechend *prEN 1993-1-8* [18] auf Basis des Grundwerkstoffs stellt in diesem Fall ein Sicherheitsrisiko dar.

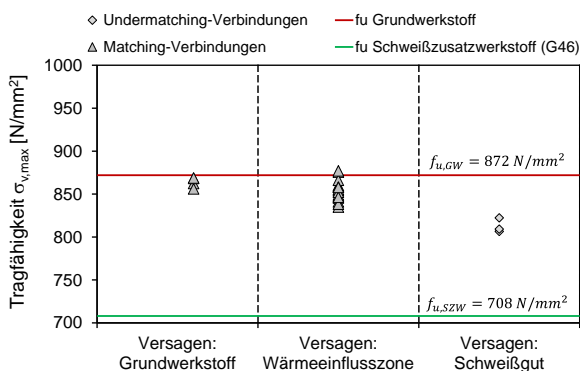


Abb. 8-14: Auftretendes Versagen S690QL
 $t = 10 \text{ mm}$

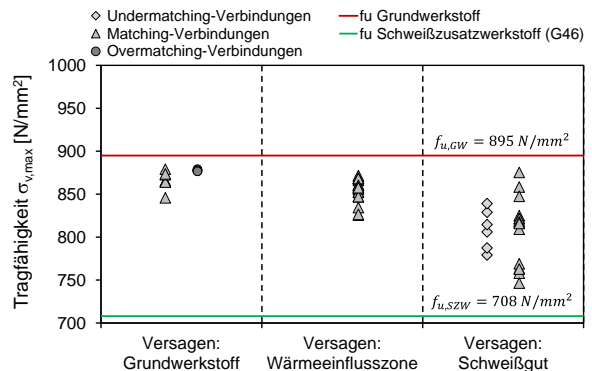


Abb. 8-15: Auftretendes Versagen S690QL
 $t = 20 \text{ mm}$

Die untersuchten Undermatching-Verbindungen versagten ausschließlich im Schweißgut. Vergleicht man die in Abb. 8-14 und Abb. 8-15 dargestellten experimentellen Tragfähigkeiten mit der nach Norm anzusetzenden Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs G46, kann ebenfalls

eine zum Teil große Differenz festgestellt werden. Jedoch liegen die hier erreichten Tragfähigkeiten weit über der anzusetzenden Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs. Dies kann infolge möglicher Aufmischungseffekte (vgl. Abschnitt 2.2.1) zwischen dem Schweißzusatzwerkstoff und dem höherfesten Grundwerkstoff hervorgerufen werden, die im derzeit gültigen Bemessungskonzept nicht berücksichtigt werden. Eine Bemessung der Undermatching-Verbindung entsprechend *prEN 1993-1-8* [18] auf Basis des Schweißzusatzwerkstoffs führt in diesem Fall zu sicheren aber unwirtschaftlichen Verbindungen.

Im Gegensatz dazu versagten die Overmatching-Verbindungen aus Abb. 8-15 ausschließlich im Grundwerkstoff. Die daraus abgeleiteten Tragfähigkeiten weichen vernachlässigbar gering von der Festigkeit des Grundwerkstoffs ab. Das Nachweiskonzept nach *prEN 1993-1-8* [18] kann für Overmatching-Verbindungen in diesem Fall als sicher und wirtschaftlich angesehen werden.

Grundsätzlich geht aus den Versuchsergebnissen der Serie S690QL hervor, dass die Tragfähigkeit einer Stumpfnahverbindung durch das auftretende Versagen beeinflusst wird. Aus den bereits beschriebenen Beobachtungen lässt sich ebenfalls ableiten, dass das auftretende Versagen unter anderem durch die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs beeinflusst werden kann. So zeigen Verbindungen, geschweißt mit einem Overmatching-Schweißzusatz ($M > 1,0$), ein Versagen im Grundwerkstoff und Verbindungen, geschweißt mit einem Undermatching-Schweißzusatz ($M < 1,0$), ein Versagen im Schweißgut.

Genauer zu untersuchen ist das Versagen der Matching-Verbindungen ($M = 1,0$), das trotz gleichbleibender Werkstoffkonfiguration variiert. Betrachtet man das in Abschnitt 8.2.5 vorgestellte Versuchsprogramm, können als mögliche Einflussparameter eine Variierung der Nahtgeometrie und des Energieeintrags ausgemacht werden. Auf eine Untersuchung der Nahtgeometrie wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch verzichtet, da im Forschungsvorhaben *High-ButtWeld* [36] ein geringer bis kein Einfluss festgestellt werden konnte.

Schließlich ist als Parameter die Festigkeit des Grundwerkstoffs zu betrachten, da, im Gegensatz zu den Matching-Verbindungen der Versuchsserie S690QL, die Matching-Verbindungen der Referenzversuche S460ML ausschließlich im Grundwerkstoff versagten.

Die genannten Einflussfaktoren werden in den anschließenden Abschnitten detailliert betrachtet und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die globale Tragfähigkeit bewertet.

8.3.4 Einfluss des Grundwerkstoffs auf das auftretende Versagen

Für die Untersuchung des Einflusses aus der Festigkeit des Grundwerkstoffs werden die Versuchsergebnisse der Matching-Verbindungen mit S460ML den Versuchsergebnissen der Matching-Verbindungen mit S690QL in Abb. 8-16 gegenübergestellt. Zur Identifizierung des Einflusses aus dem Grundwerkstoff werden ausschließlich Verbindungen gleicher Nahtöffnungswinkel verglichen, die unter einem ähnlichen Energieeintrag gefertigt wurden.

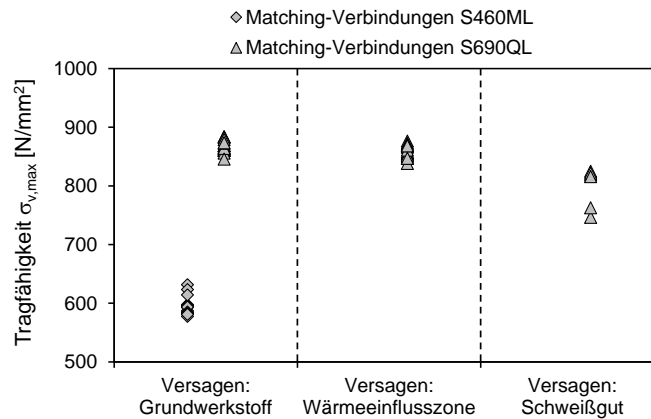


Abb. 8-16: Einfluss des Grundwerkstoffs auf das auftretende Versagen

Entsprechend den in Abschnitt 7.4 vorgestellten Untersuchungen nach Björk [37] konnte auch im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] für Verbindungen mit S460ML kein kritisches Versagen in der Wärmeeinflusszone bzw. im Schweißgut von Matching-Verbindungen beobachtet werden, vgl. Abb. 8-16. Matching-Verbindungen an Stählen der Güte S690QL wiesen hingegen ein kritisches Versagen auf. Daher ist zu klären, wodurch das Versagen in der Wärmeeinflusszone oder im Schweißgut bei Verbindungen der Güte S690QL begünstigt wird.

Maurer [61] führte das kritische Versagen auf eine in der Wärmeeinflusszone entstehende Erweichung zurück. Im Folgenden werden daher die entnommenen Härtemappings der beiden Versuchsserien hinsichtlich einer vorhandenen Erweichung näher betrachtet.

In Abb. 8-17 und Abb. 8-18 sind die aus den Härtemappings abgeleiteten Daten der Matching-Verbindungen mit S460ML und mit S690QL dargestellt. Im Härtemapping der Verbindung S690QL in Abb. 8-17 zeichnen sich in der Wärmeeinflusszone unterschiedliche Härtebereiche ab. Die in der Wärmeeinflusszone gemessene Härte streut, ausgehend vom unbeeinflussten Grundwerkstoff, zwischen einer 25 % geringeren (Abb. 8-17, blaue Bereiche) bzw. 35 % (Abb. 8-17, rote Bereiche) höheren Härte. Bei der hier betrachteten V-Naht lässt sich ein deutlich erweichter Bereich vor allem in der zuerst geschweißten Lage, der sogenannten Wurzellage,

erkennen. Eine aufgehärtete Zone stellt sich im Bereich der zuletzt geschweißten Lagen, der Decklage, ein. Die Härte im Schweißgut liegt im Schnitt ca. 5 % über der Härte des unbeeinflussten Grundwerkstoffs. Somit liegt die geringste Härte in der Wärmeeinflusszone der Matching-Verbindung vor und ist entsprechend Abschnitt 3.4.3 als Weiche Zone zu bezeichnen.

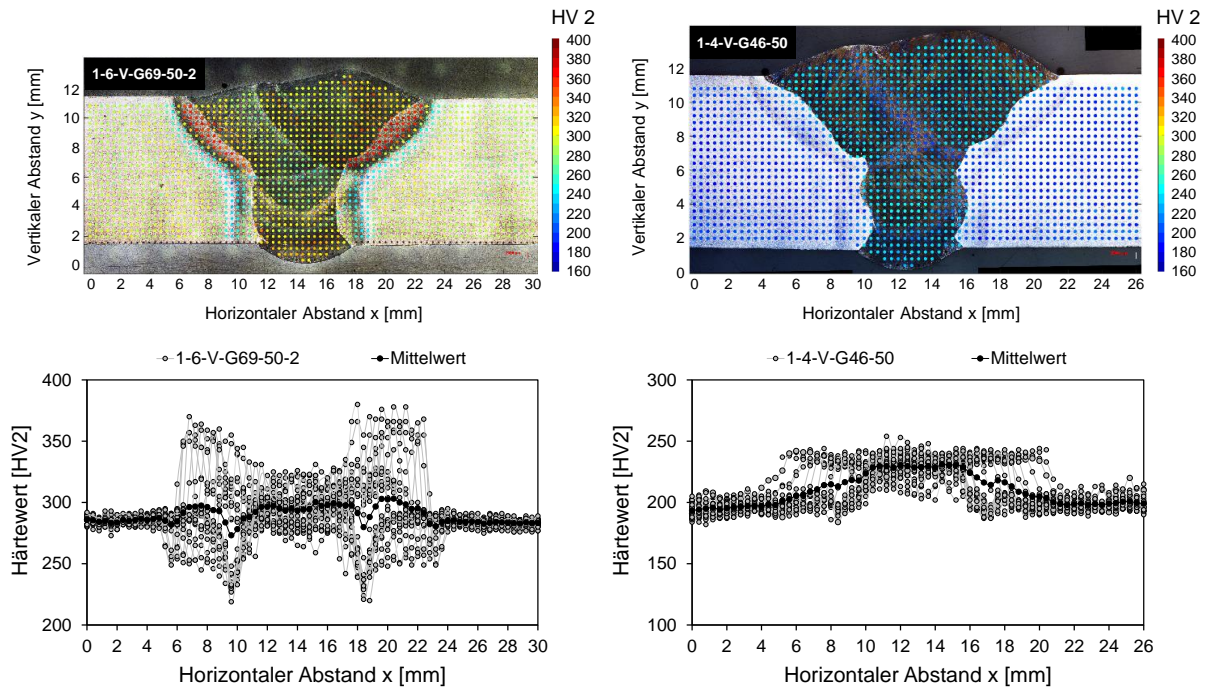


Abb. 8-17: Härtemapping V-Naht S690QL – G69 Abb. 8-18: Härtemapping V-Naht S460ML – G46

Die Verbindung am Grundwerkstoff S460ML in Abb. 8-18 zeigt hingegen kaum streuende Härtewerte in der Wärmeeinflusszone. Eine signifikante Erweichung kann hier, sowie bei allen weiteren vorliegenden Härtemappings der Verbindungen mit S460ML, nicht festgestellt werden.

Das beobachtete Versagen in der Wärmeeinflusszone der Verbindungen der Güte S690QL lässt sich auf eine dort entstehende lokale Erweichung zurückführen und bestätigt somit die Erkenntnisse nach *Maurer* [61]. Die nach *Björk* [37] aufgestellte Aussage, dass ein kritisches Versagen in der Wärmeeinflusszone erst ab einer Festigkeit über S460ML auftritt, wird infolge der hier nicht vorhandenen Erweichung der Wärmeeinflusszone anhand der vorliegenden Daten bestätigt. Aus den Versuchsergebnissen kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass eine Weiche Zone aufgrund ungünstiger Schweißparameter auch bei Verbindungen der Güte S460ML auftreten.

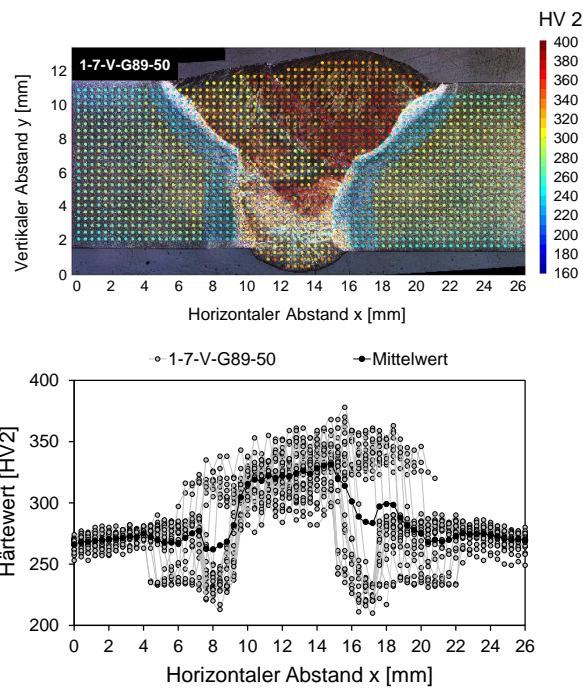


Abb. 8-19: Härtemapping V-Naht S700MC – G89

Der Aussage nach Björk [37] zufolge tritt das Versagen in der Wärmeeinflusszone vor allem bei Verbindungen mit einer Festigkeit $> S500$ auf. Das beobachtete Versagen der Verbindungen mit S700MC im Grundwerkstoff ist demzufolge widersprüchlich. Ergänzend wird daher in Abb. 8-19 das Härtemapping einer V-Naht mit S700MC genauer betrachtet. Auch hier zeigt sich eine deutliche Erweichung im Bereich der Wärmeeinflusszone, die im Vergleich zu der Verbindung mit S690QL aus Abb. 8-17 wesentlich stärker ausgeprägt ist. Ebenfalls fällt auf, dass sich der erweichte Bereich über die gesamte Wärmeeinflusszone, unabhängig ob Wurzel- oder Decklage, ausbildet. Das Versagen trat jedoch bei keiner Verbindung im Bereich der starken Erweichung auf. Abb. 8-19 ist ebenfalls zu entnehmen, dass im Schweißgut aufgrund der hier betrachteten Overmatching-Verbindung eine höhere Härte vorliegt. Bedingt durch die höhere Härte im Schweißgut können wiederum positiv wirkende Stützeffekte hervorgerufen werden, die die Querdehnung der erweichten Zone behindern und dadurch einem Versagen in der Wärmeeinflusszone entgegenwirken.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Gefahr eines kritischen Versagens in der Wärmeeinflusszone unter anderem durch den Grundwerkstoff beeinflusst wird. In Abhängigkeit des Grundwerkstoffs bildet sich im Bereich der Wärmeeinflusszone eine Weiche Zone aus, die ein kritisches Versagen begünstigt und die Tragfähigkeit der Verbindung herabsetzt. Unklar ist jedoch, weshalb trotz ähnlicher Randbedingungen ein variierendes Versagen der Matching-

Verbindungen mit Stahl der Güte S690QL beobachtet werden konnte. Als mögliche Ursache ist das in der Wärmeeinflusszone vorliegende Verhältnis der aufgehärteten zu den erweichten Bereichen zu nennen (vgl. Abb. 8-17). Resultierend aus den aufgehärteten Bereichen können ebenfalls sogenannte Stützeffekte hervorgerufen werden, die der erweichten Zone positiv entgegenwirken.

Mögliche Stützeffekte können auch durch eine höhere Festigkeit im Schweißgut hervorgerufen werden, die dadurch ebenfalls einem kritischen Versagen der Naht entgegenwirken. Daher wird im Weiteren der Einfluss aus der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs auf das auftretende Versagen näher untersucht.

8.3.5 Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs auf das auftretende Versagen

Anhand der in Abb. 8-20 und Abb. 8-21 dargestellten Versuchsergebnisse der Verbindungen mit S690QL ist zu untersuchen, inwieweit das auftretende Versagen von der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs abhängt. Für die Vergleichbarkeit sind in den Diagrammen ausschließlich Tragfähigkeiten von Verbindungen gleicher Nahtöffnungswinkel an Stählen der Güte S690QL aufgeführt, die unter ähnlichem Energieeintrag geschweißt wurden. Somit unterscheiden sich die betrachteten Versuchskörper ausschließlich in der Festigkeit des verwendeten Schweißzusatzwerkstoffs und der Nahtgeometrie. Da im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] ein geringer bis kein Einfluss aus der Nahtgeometrie festzustellen war, können diese gemeinsam ausgewertet werden.

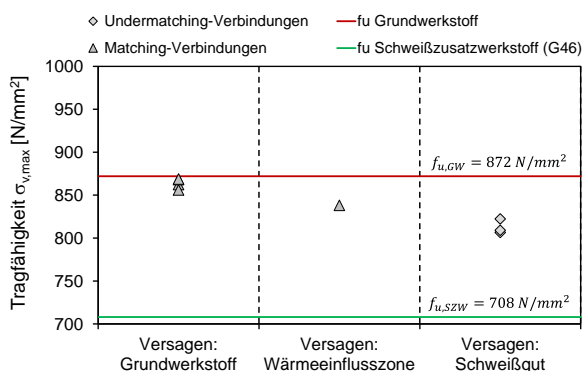


Abb. 8-20: Einfluss des SZW auf das auftretende Versagen S690QL $t = 10 \text{ mm}$

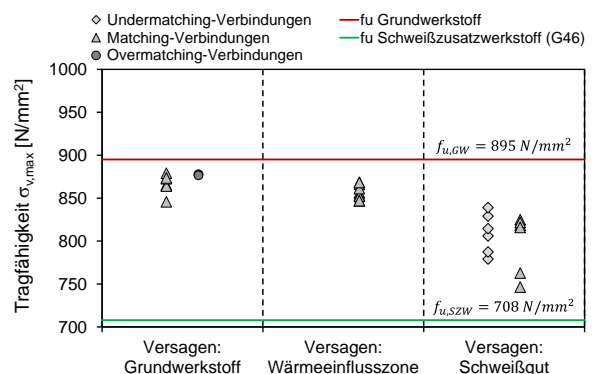


Abb. 8-21: Einfluss des SZW auf das auftretende Versagen S690QL $t = 20 \text{ mm}$

Die geprüften Undermatching-Verbindungen versagten ausschließlich im Schweißgut. Aufgrund der geringeren Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs scheint auch das Schweißgut

eine geringere Widerstandsfähigkeit aufzuweisen. In Abb. 8-22 ist das Härtemapping der Undermatching-Verbindung einer V-Naht dargestellt. Die Ergebnisse der Härteuntersuchungen zeigen, dass zwar ein erweichter Bereich vorhanden ist (blaue Bereiche), jedoch die Härte-
werte im Schweißgut und somit auch die Festigkeit geringer als die Härte-
werte der Weichen Zone sind. Das Versagen im Schweißgut ist somit durch die hier vorhandene geringste Härte
bzw. Festigkeit begründet. Fraglich ist, ob dies überschlägig für alle Undermatching-Verbin-
dungen gilt. Beispielsweise konnte *Törnblom* [74] und *Collin* [42] zeigen, dass das Versagen
im Schweißgut vom vorliegenden Undermatching-Verhältnis abhängt, vgl. Abschnitt 7.3.3. Für
die betrachteten Undermatching-Verbindungen liegt das Verhältnis bei $f_{y,SZW} / f_{y,GW} = 0,76$
(vgl. Tab. 8-1 und Tab. 8-2) und somit leicht unter dem von *Törnblom* [74] und *Collin* [42]
festgelegten Grenzwert von $f_{y,SZW} / f_{y,GW} = 0,77$. Anhand der vorliegenden Verbindungen ist
der Grenzwert von *Törnblom* [74] und *Collin* [42] bestätigt. Da jedoch weder aus dem For-
schungsvorhaben *HighButtWeld* [36] noch den *Zusatzuntersuchungen* [57] Verbindungen mit
variierenden Undermatching-Verhältnissen vorliegen, können keine nähere Untersuchung
durchgeführt und die Aussage von *Törnblom* [74] und *Collin* [42] nicht näher überprüft werden.

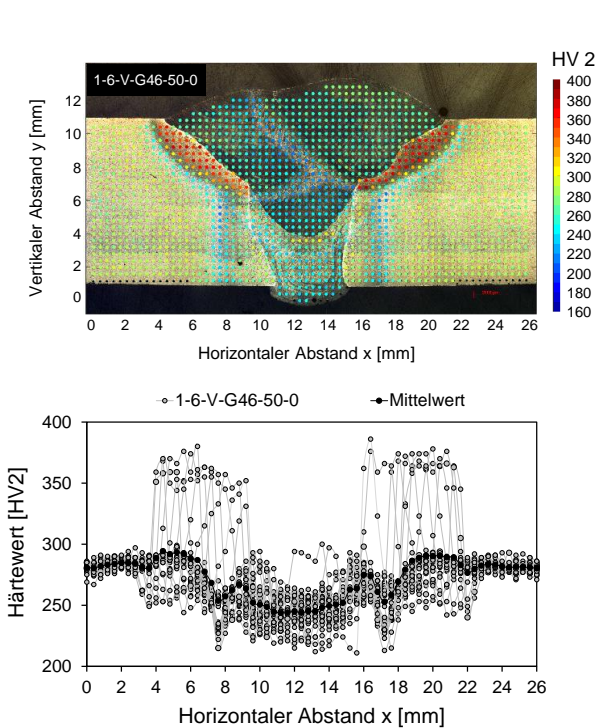


Abb. 8-22: Härtemapping V-Naht
S690QL – G46

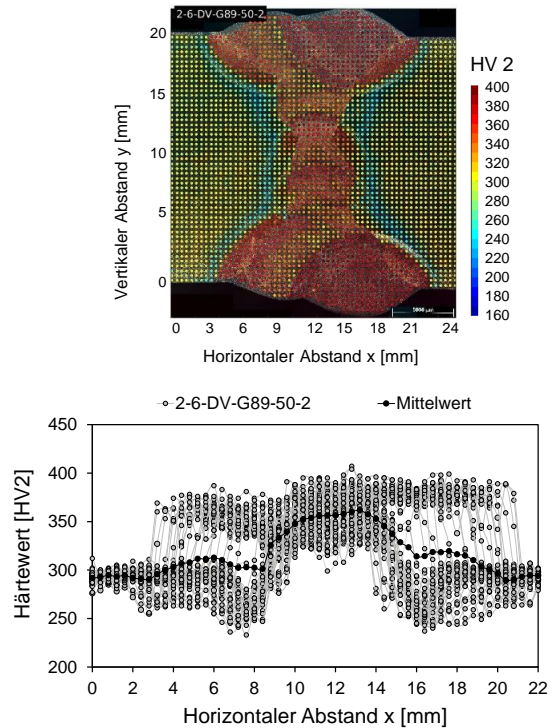


Abb. 8-23: Härtemapping DV-Naht
S690QL – G89

Die Overmatching-Verbindungen versagten ausschließlich im Grundwerkstoff. Auch hier lässt sich anhand des Härtemappings in Abb. 8-23 das Vorhandensein einer Weichen Zone (blaue

Bereiche) bestätigen. Analog zu den Overmatching-Verbindungen mit Stahl der Güte S700MC aus Abb. 8-19 weist auch die Overmatching-Verbindung mit S690QL eine wesentlich höhere Härte infolge der höheren Festigkeit des verwendeten Schweißzusatzwerkstoffs im Schweißgut auf. Somit besteht auch hier, ausgehend vom härtesten Schweißgut, die Möglichkeit von positiv wirkenden Stützeffekten.

Verbindungen, die mit einem passenden Schweißzusatzwerkstoff geschweißt wurden (Matching-Verbindungen), zeigten hingegen ein variierendes Versagen. Wie bereits in Abschnitt 8.3.4 erläutert, stellen sich im Bereich der Wärmeinflusszone neben den erweichten Zonen auch aufgehärtete Bereiche ein. Die Ausbildung dieser beiden Bereiche hängt vor allem von der eingebrachten Energie während des Schweißprozesses ab. Eine ungünstige Wahl kann zu einem vergrößerten Bereich der Erweichung führen und die Gefahr eines kritischen Versagens erhöhen. Gehen noch dazu vom angrenzenden Schweißgut geringe bzw. keine stützenden Effekte hervor, wird ein kritisches Versagen weiter begünstigt. Aufgrund einer begrenzten Anzahl an angefertigten Härtemappings im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] kann dies jedoch nicht für alle Verbindungen überprüft werden.

Ergänzend werden die Ergebnisse der *Zusatzuntersuchungen* [57] betrachtet, da auch hier ein Einfluss aus der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs identifiziert werden kann. In Abb. 8-24 und Abb. 8-25 sind die ermittelten Tragfähigkeiten in Abhängigkeit des Versagens aufgetragen. Zusätzlich sind die Ergebnisse getrennt nach ihrem Energieeintrag aufgeführt, da die Versuchskörper jeweils mit niedrigem und hohem Energieeintrag gefertigt wurden.

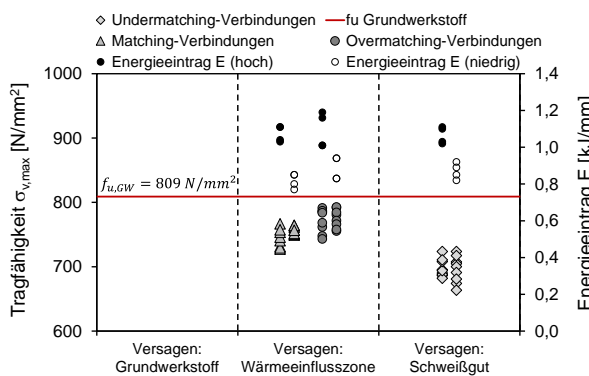


Abb. 8-24: Einfluss des SZW auf das auftretende Versagen S690QL $t = 10\text{ mm}$ Zusatzuntersuchungen [57]

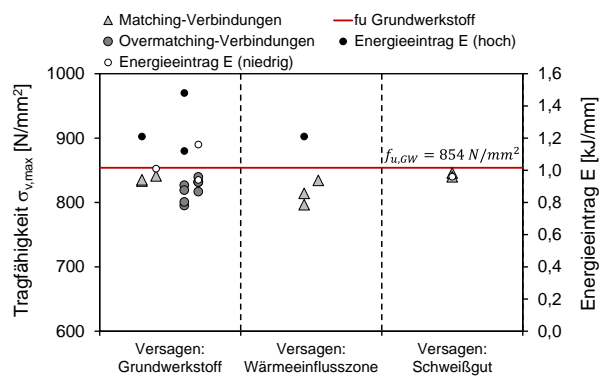


Abb. 8-25: Einfluss des SZW auf das auftretende Versagen S690QL $t = 20\text{ mm}$ Zusatzuntersuchungen [57]

Die dargestellten Diagramme zeigen ebenfalls einen Einfluss aus der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs auf das auftretende Versagen. Das Versagen der Undermatching-Verbindungen trat auch hier ausschließlich im Schweißgut auf. Hingegen kann in Abhängigkeit der Materialdicke t für Overmatching-Verbindungen ein unterschiedliches Versagen festgestellt werden. Übereinstimmend mit den Ergebnissen aus dem Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] ist in Abb. 8-25 auch für Overmatching-Verbindungen der Materialdicke $t = 20 \text{ mm}$ ein Versagen im Grundwerkstoff dokumentiert. Im Gegensatz dazu versagten die in Abb. 8-24 aufgeführten Overmatching-Verbindungen der Materialdicke $t = 10 \text{ mm}$ in der Wärmeeinflusszone. Vergleicht man jedoch die Tragfähigkeiten mit den ebenfalls in der Wärmeeinflusszone versagten Matching-Verbindungen, können für Overmatching-Verbindungen leicht höhere Tragfähigkeiten festgestellt werden. So kann hier zwar ein kritisches Versagen infolge einer höheren Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs nicht verhindert, jedoch die Tragfähigkeit im Vergleich zur Matching-Verbindung gesteigert werden. Aus den *Zusatzuntersuchungen* [57] liegen keine Härtemappings vor, die einen genauen Aufschluss über die in der Wärmeeinflusszone vorliegenden Härteverhältnisse geben können.

Zusätzlich ist den Diagrammen in Abb. 8-24 und Abb. 8-25 eine vom Energieeintrag abhängende Tragfähigkeit zu entnehmen. Die hier aufgeführten Matching- als auch Overmatching-Verbindungen erreichen höhere Tragfähigkeiten infolge eines geringen Energieeintrages im Vergleich zu Verbindungen, die mit einem hohen Energieeintrag geschweißt wurden. Daher sind die Versagensmechanismen in Abhängigkeit des Energieeintrags auszuwerten.

Es ist festzuhalten, dass die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs das auftretende Versagen einer Stumpfnahverbindung beeinflusst. Die Gefahr eines kritischen Versagens in der Wärmeeinflusszone und einer damit einhergehenden Tragfähigkeitsminderung, kann durch stützende Effekte einer höheren Festigkeit im Schweißgut herabgesetzt werden. Im Gegensatz dazu tritt das Versagen der geprüften Undermatching-Verbindungen aufgrund der geringeren Festigkeit im Schweißgut auf.

8.3.6 Einfluss Energieeintrag

Den Ergebnisse der *Zusatzuntersuchungen* [57] in den Diagrammen aus Abb. 8-24 und Abb. 8-25 ist neben dem Einfluss aus der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs ebenfalls ein Einfluss aus dem Energieeintrag auf die Tragfähigkeit zu entnehmen. Deshalb werden im Folgenden die aus dem Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] vorliegenden Ergebnisse von

Verbindungen unterschiedlicher Energieeinträge der Serie mit S690QL verglichen und ausgewertet. Da für die Undermatching-Verbindungen im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] keine Variierung des Energieeintrags vorgesehen war, werden diese in den Auswertungen nicht näher betrachtet.

Die den Auswertungen zugrunde gelegten Energieeinträge \bar{E} entsprechen dem jeweils gebildeten Mittelwert der Energieeinträge der einzelnen Schweißraupen je Versuchskörper. Aufgrund der geringen Streuung der Energieeinträge der einzelnen Schweißraupen, ist eine Auswertung unter Ansatz des Mittelwerts des Energieeintrages \bar{E} zulässig.

In den Diagrammen in Abb. 8-26 und Abb. 8-27 sind, differenziert nach den Energieeinträgen \bar{E} , die experimentellen Tragfähigkeiten in Abhängigkeit des auftretenden Versagens aufgetragen. Die vorliegenden Ergebnisse der Matching-Verbindungen beider Materialdicken, geschweißt mit einem hohen Energieeintrag ($\bar{E} \approx 1,2 \text{ kJ/mm}$), weisen ausschließlich ein Versagen in der Wärmeeinflusszone bzw. im Schweißgut auf. Ein Versagen im Grundwerkstoff konnte in der Versuchsdurchführung nicht festgestellt werden. Hingegen versagten Matching-Verbindungen der Materialdicke $t = 10 \text{ mm}$ (Abb. 8-26), gefertigt mit einem niedrigen Energieeintrag ($\bar{E} \approx 0,8 \text{ kJ/mm}$), fast ausschließlich im Grundwerkstoff. Für Matching-Verbindungen der Materialdicke $t = 20 \text{ mm}$ lässt sich aus Abb. 8-27 keine eindeutige Aussage treffen. Das in der Versuchsdurchführung beobachtete Versagen der Verbindungen, geschweißt mit niedrigem Energieeintrag, variierte.

Die Overmatching-Verbindungen in Abb. 8-27 versagten ausschließlich im Grundwerkstoff. Ein Einfluss aus dem Energieeintrag auf das Versagen bzw. die Tragfähigkeit geht aus den Versuchsdaten nicht hervor.

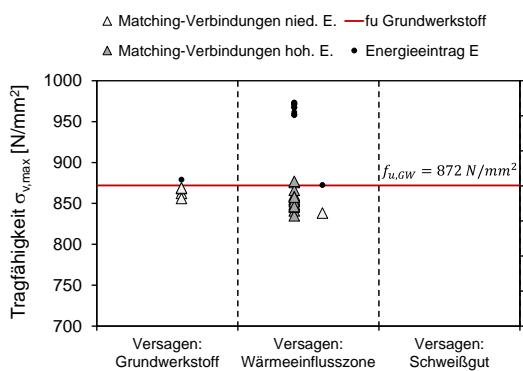


Abb. 8-26: Einfluss des Energieeintrags
S690QL $t = 10 \text{ mm}$

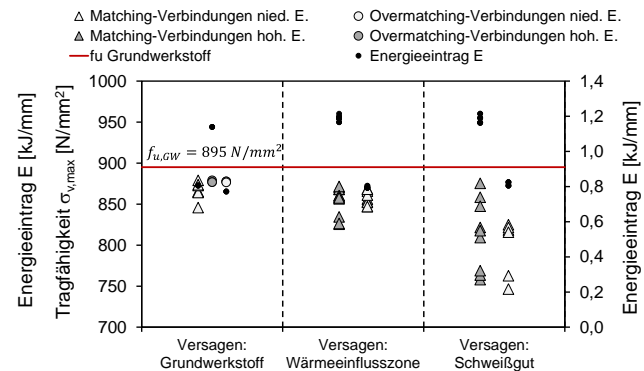


Abb. 8-27: Einfluss des Energieeintrags
S690QL $t = 20 \text{ mm}$

Zu untersuchen ist, weshalb der Energieeintrag das auftretende Versagen bzw. die Tragfähigkeit einer Stumpfnahverbindung beeinflusst. Bereits aus den Abschnitten 8.3.4 und 8.3.5 konnte festgestellt werden, dass aufgrund eines ungünstigen Zusammenspiels einer entstehenden Weichen Zone und fehlender Stützeffekte aus dem Schweißgut das Versagen in der Wärmeeinflusszone auftreten kann. Im Zusammenhang des vermehrten Versagens in der Wärmeeinflusszone von Verbindungen, geschweißt mit einem hohen Energieeintrag, ist zu untersuchen, inwieweit die eingebrachte Energie auf die in der Naht vorliegenden Eigenschaften Einfluss nimmt. Mit Hilfe der erstellten Härtemappings können zwei identische Verbindungen, die sich lediglich durch die im Schweißprozess eingebrachte Energie und dem auftretenden Versagen unterscheiden, verglichen werden. Da in Abschnitt 8.3.4 bereits auf die in der Wärmeeinflusszone vorhandenen unterschiedlichen Härtebereiche hingewiesen wurde, werden diese noch einmal in Abhängigkeit des Energieeintrages betrachtet und diskutiert.

Ein erster Vergleich erfolgt anhand zweier V-Nahverbindungen. Das Versagen der Verbindung, geschweißt mit hohem Energieeintrag (Abb. 8-28), trat im Bereich der Wärmeeinflusszone auf, das Versagen der Verbindung, geschweißt mit niedrigem Energieeintrag (Abb. 8-29), im Bereich des Grundwerkstoffs.

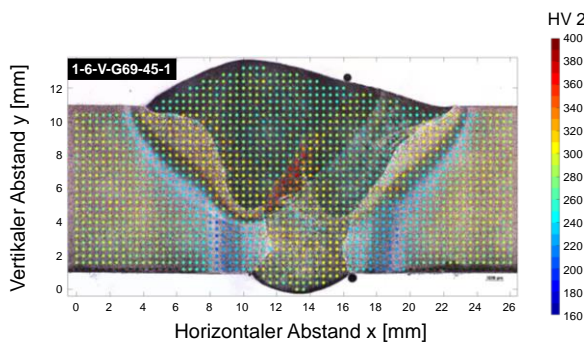


Abb. 8-28: Härtemapping V-S690-G69-45
hoher Energieeintrag $\bar{E} = 1,25 \text{ kJ/mm}$

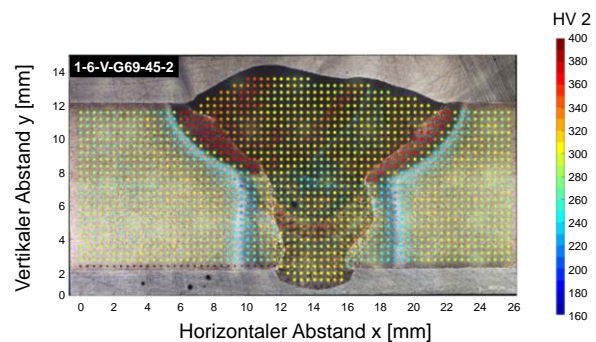


Abb. 8-29: Härtemapping V-S690-G69-45
niedriger Energieeintrag $\bar{E} = 0,82 \text{ kJ/mm}$

Aus der Gegenüberstellung beider Härtemappings lassen sich deutliche Unterschiede hinsichtlich der in der Wärmeeinflusszone und im Schweißgut vorliegenden Härtebereiche erkennen. Als besonders markant geht aus Abb. 8-28 die entstehende Weiche Zone (blaue Datenpunkte) hervor. Bedingt durch den hohen Energieeintrag bildet sich die Weiche Zone, im Gegensatz zu der Verbindung geschweißt mit einem niedrigen Energieeintrag aus Abb. 8-29, über einen wesentlich größeren Bereich aus. Auch die Härte in der Weichen Zone nimmt im Vergleich zum unbeeinflussten Grundwerkstoff bei höherem Energieeintrag stärker ab (212 HV2) als bei einem geringen Energieeintrag (223 HV2).

In Abb. 8-29 fällt hingegen der zum Teil stark aufgehärtete Bereich (rote Datenpunkte) der Decklagen sowie der angrenzenden Wärmeeinflusszonen der Verbindung, geschweißt mit niedrigem Energieeintrag, auf. Die Verbindung, geschweißt mit hohem Energieeintrag aus Abb. 8-28, weist keine vergleichbare Aufhärtung in der Decklage bzw. im Schweißgut auf.

Die am Beispiel der V-Nähte erläuterten Auswirkungen des Energieeintrages können mit Hilfe des Vergleiches der Härtemappings an DV-Nähten bestätigt werden. Das Versagen der Verbindung, geschweißt mit hohem Energieeintrag (Abb. 8-30), trat ebenfalls in der Wärmeeinflusszone auf, während die Verbindung, geschweißt mit niedrigem Energieeintrag (Abb. 8-31), im Grundwerkstoff versagte. Betrachtet man das Härtemapping in Abb. 8-30 fällt auch hier die stärker ausgeprägte Weiche Zone, hervorgerufen durch den hohen Energieeintrag, auf. Ein aufgehärteter Bereich kann auch hier nicht festgestellt werden.

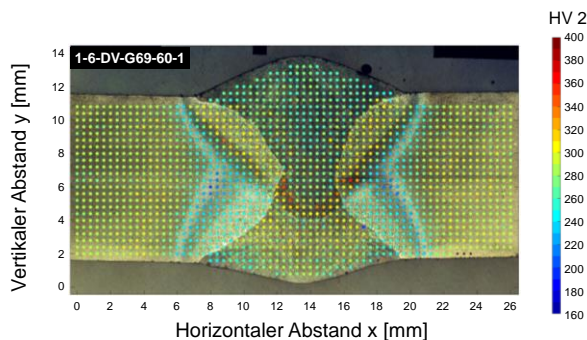


Abb. 8-30: Härtemapping DV-S690-G69-60
Hoher Energieeintrag $\bar{E} = 1,27 \text{ kJ/mm}$

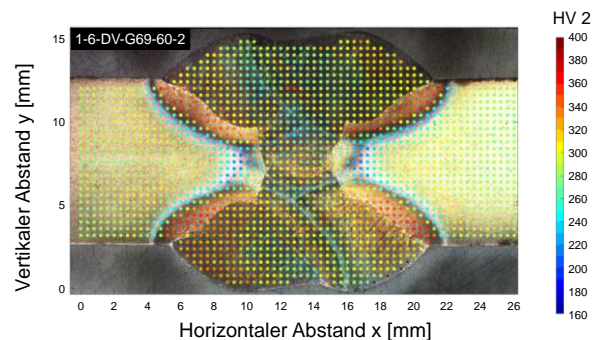


Abb. 8-31: Härtemapping DV-S690-G69-60
niedrig Energieeintrag $\bar{E} = 0,83 \text{ kJ/mm}$

Daraus ist abzuleiten, dass das Versagen in der Wärmeeinflusszone infolge einer durch einen hohen Energieeintrag stärker ausgeprägten Erweichung in Kombination verringerter bzw. nicht vorhandener Stützeffekte aufgehärteter Bereiche in der Wärmeeinflusszone bzw. Schweißgut (vgl. Abschnitt 8.3.5) begünstigt wird.

8.3.7 Zusammenfassung der Auswertung der experimentellen Untersuchungen

Abschließend ist festzuhalten, dass die experimentell erreichten Tragfähigkeiten der im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] und den *Zusatzuntersuchungen* [57] geprüften Matching- und Overmatching-Verbindungen höherfester Stähle zum Teil unter den Zugfestigkeiten des zu vergleichenden Werkstoffs liegen. Vor allem für Matching- und Overmatching-Verbindungen, die ein frühzeitiges und damit kritisches Versagen in der Wärmeeinflusszone respektive

im Schweißgut aufweisen, unterliegt das nach *prEN 1993-1-8* [18] anzuwendende Bemessungskonzept einer gewissen Unsicherheit. Die erreichten Tragfähigkeiten von Undermatching-Verbindungen höherfester Stähle lagen hingegen weit über der nach Norm anzusetzenden Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs. Das Bemessungskonzept nach *prEN 1993-1-8* [18] ist für Undermatching-Verbindungen daher als sicher, aber unwirtschaftlich einzustufen.

Besonders die Ursachen des beobachteten variierenden Versagens von Stumpfnahverbindungen gleicher Werkstoffkombinationen, und der daraus hervorgehenden Tragfähigkeitsunterschiede konnten anhand einer detaillierten Auswertung der experimentell ermittelten Versuchsdaten erarbeitet werden.

Als erster Einflussfaktor konnte die Festigkeit des Grundwerkstoffs identifiziert werden. Abhängig vom Grundwerkstoff besteht die Gefahr der Ausbildung einer lokalen Erweichung im Bereich der Wärmeeinflusszone, die ein kritisches Versagen der geschweißten Verbindung begünstigt. Die Entstehung einer solchen Weichen Zone zeigte sich jedoch erst bei Stumpfnähten an Stählen mit einer Festigkeit über $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$.

Neben der Festigkeit des Grundwerkstoffs spielt auch die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs eine entscheidende Rolle hinsichtlich des auftretenden Versagens. Die Auswertungen zeigten, dass beispielsweise eine höhere Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs durch daraus hervorgehende positiv wirkende Stützeffekte einem kritischen Versagen entgegenwirkt bzw. dieses verhindern. Im Gegensatz dazu versagten Undermatching-Verbindungen, aufgrund der hier vorliegenden geringeren Festigkeit, überwiegend im Schweißgut.

Als letzter wichtiger Einflussfaktor ist der Energieeintrag zu berücksichtigen. Es zeigte sich, dass die geometrischen sowie mechanischen Eigenschaften der sich ausbildenden Weichen Zone von der während des Schweißprozesses eingebrachten Energie abhängen. Den aufgezeigten Härtemappings ist zu entnehmen, dass vor allem ein hoher Energieeintrag das Ausbilden einer ungewollt breiten Weichen Zone und somit ein Versagen in der Wärmeeinflusszone begünstigt. Im Gegensatz dazu konnte an Verbindungen, die unter einem niedrigen Energieeintrag geschweißt wurden, aufgehärtete Bereiche in der Wärmeeinflusszone lokalisiert werden, die durch sogenannte Stützeffekte die Gefahr eines kritischen Versagens verringern. Die aus der Versuchsauswertung hergeleiteten Einflussgrößen sind in Abb. 8-32 hinsichtlich ihrer Wirkungsweise auf ein tragfähigkeitsminderndes Versagen in der Wärmeeinflusszone noch einmal übersichtlich dargestellt.

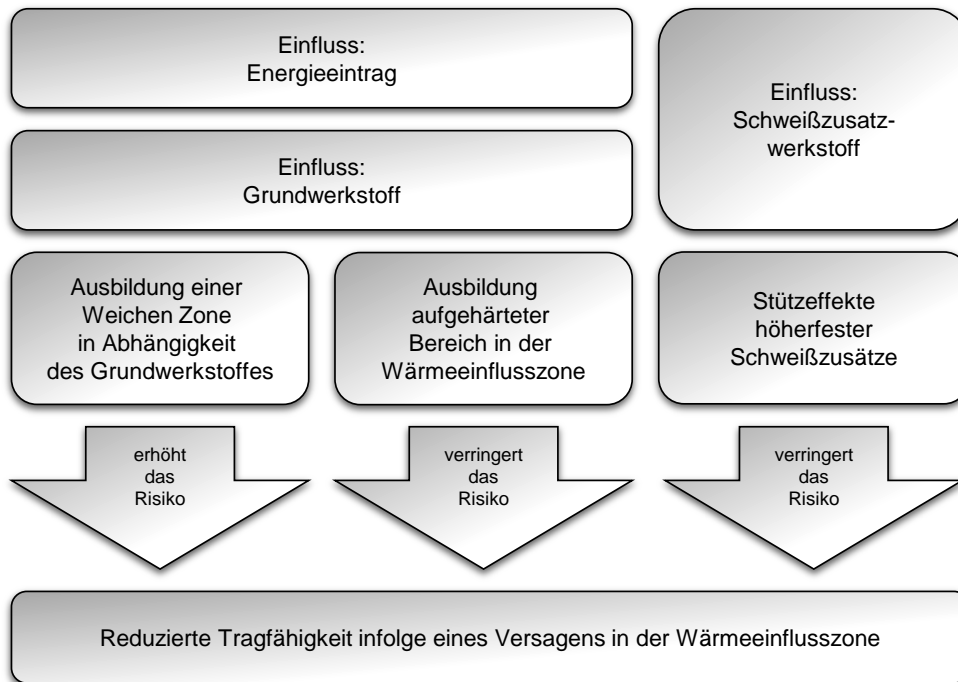


Abb. 8-32: Wirkungsweise der Einflussfaktoren auf ein tragfähigkeitsreduziertes Versagen in der Wärmeeinflusszone

8.4 Numerische Untersuchungen an Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle

8.4.1 Modellfindung

Anhand der numerischen Auswertungen soll eine gezielte Untersuchung des in Abschnitt 8.2.4 festgestellten Einflusses einer vorhandenen Nahtüberhöhung auf das sich einstellende Versagen einer durchgeschweißten Stumpfnahverbindung durchgeführt werden. Erste Versuchsdurchführungen im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] machten deutlich, dass ein variiertes Versagen, trotz identischer Verbindungsparameter, in Abhängigkeit einer vorhandenen bzw. nicht vorhandenen Nahtüberhöhung auftritt. Nach ersten Erkenntnissen ist davon auszugehen, dass der im Nahtbereich vorliegende größere Querschnitt sogenannte Stützeffekte hervorruft, die einem kritischen Versagen von Matching-Verbindungen in der Wärmeeinflusszone entgegenwirken.

In den experimentellen Untersuchungen an Undermatching-Verbindungen verlagerte sich infolge einer vorhandenen Nahtüberhöhung das Versagen vom Schweißgut in den Grundwerkstoff um. Hier ist die Hypothese zu untersuchen, dass die im Schweißgut vorhandene Festigkeitsdifferenz durch den im Nahtbereich vorliegenden größeren Querschnitt, aufgrund einer

daraus resultierenden geringeren Spannung im geringer festen Schweißgut, ausgeglichen wird und so zu einem Versagen im Grundwerkstoff führt.

Für die Untersuchung des Einflusses der Nahtüberhöhung sind im Vorfeld sechs ausgewählte Stumpfnahverbindungen in ein FE-Modell zu überführen und numerisch nachzurechnen. Die daraus hervorgehenden validierten Modelle können anschließend erneut numerisch betrachtet werden, unter Berücksichtigung geometrischer Änderungen hinsichtlich der Nahtüberhöhung. Die durch das FE-Modell erzeugten Ergebnisse der Verbindungen mit und ohne Nahtüberhöhung sind in den jeweils auftretenden Versagen zu vergleichen und zu diskutieren, um einen möglichen Einfluss aus der Nahtüberhöhung herausarbeiten zu können.

Der Fokus der numerischen Untersuchungen wird auf Verbindungen der Stahlgüte S690QL mit einer Materialdicke von $t = 10 \text{ mm}$ gelegt. Die Untersuchungen beschränken sich auf V- und DV-Nähte, ausgebildet als Matching- und Undermatching-Verbindungen. Darüber hinaus soll für Matching-Verbindungen zusätzlich untersucht werden, ob infolge eines hohen oder niedrigen Energieeintrags unterschiedliche Versagensmechanismen festzustellen sind.

Die numerische Betrachtung einer Stumpfnahverbindung erfordert besonders im Bereich der Wärmeeinflusszone aufgrund eines hier möglichen auftretenden Versagens eine praxisnahe Materialabbildung. Jedoch wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens *HighButtWeld* [36] keine Materialuntersuchungen der einzelnen Temperaturbereiche der Wärmeeinflusszone durchgeführt. Daher muss auf die bereits in der numerischen Untersuchung der Kehlnahverbindungen in Abschnitt 6.4 angesetzten Materialkurven zurückgegriffen werden. Für das Schweißgut kommen die in Abschnitt 8.2.2.2 erläuterten Materialdaten zum Einsatz, da die hier untersuchten Zugproben am reinen Schweißgut in der Aufmischung und dem verwendeten Energieeintrag den numerisch abzubildenden Versuchskörpern ähnlich sind. Für den Grundwerkstoff werden die Materialdaten nach Abschnitt 8.2.2.1 berücksichtigt.

In den folgenden Abschnitten wird die Erarbeitung der numerischen Modelle anhand der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1 (Matching-Verbindung, hoher Energieeintrag) beispielhaft erläutert. Das Vorgehen kann auf die ebenfalls nachgerechneten Versuche folgender Verbindungen übertragen werden:

- 1-6-DV-G69-50-2 (Matching-Verbindung, geringer Energieeintrag),
- 1-6-DV-G46-50-0 (Undermatching-Verbindung),
- 1-6-V-G69-50-1 (Matching-Verbindung, hoher Energieeintrag),
- 1-6-V-G69-50-2 (Matching-Verbindung, geringer Energieeintrag),
- 1-6-V-G46-50-0 (Undermatching-Verbindung).

8.4.2 Geometrische Abbildung der Schweißnaht

Durch die vorliegenden Makroschliffe war es möglich, die tatsächlich vorhandene Nahtgeometrie der jeweiligen Stumpfnahverbindung in das FE-Modell zu übertragen. Unter Berücksichtigung der erstellten Härtemappings konnten ebenfalls die in der Wärmeeinflusszone vorliegenden Bereiche entsprechend Abb. 8-33 untergliedert und in das FE-Modell eingefügt werden. Die Einteilung der jeweiligen Zonen ist jedoch als Näherung zu betrachten, da detaillierte Gefügeuntersuchungen aus dem Forschungsvorhaben nicht vorlagen.

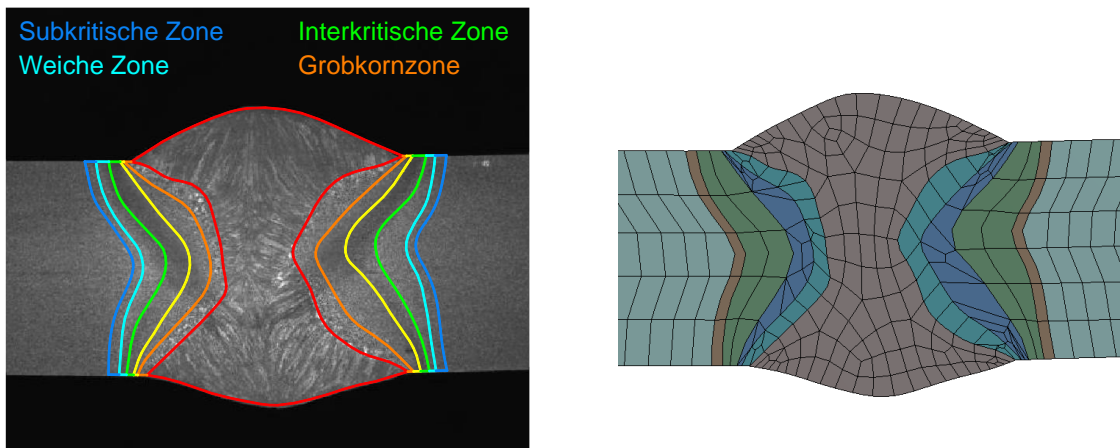


Abb. 8-33: Überführung der Nahtgeometrie der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1 in ein FE-Modell

8.4.3 Materialzuordnung

Als Materialkurven für den Grundwerkstoff und das Schweißgut werden die in Abschnitt 8.2.2 vorgestellten Ergebnisse der Zugversuche angesetzt. Die vorliegenden Materialdaten der einzelnen Schweißgüter stimmen, aufgrund der Aufmischung mit einem Grundwerkstoff der Güte S690QL und dem Schweißzusatzwerkstoff sowie dem Energieeintrag, in etwa mit den numerisch nachzuvollziehenden Versuchskörpern überein.

Die Materialdaten der einzelnen Temperaturbereiche der Wärmeeinflusszone entsprechen den bereits in Abschnitt 6.4 vorgestellten, aus Dilatometerversuchen ermittelten Spannungs-Dehnungs-Verläufen. Aus den Betrachtungen der von den Verbindungen erstellten Härtemappings in Abschnitt 8.3.6 ging hervor, dass die in der Wärmeeinflusszone vorliegenden Eigenschaften zum Teil sehr komplex als auch stark von der während des Schweißens eingebrachten Energie abhängen. Daher ist eine Materialzuordnung in der Wärmeeinflusszone getrennt für jeden Versuchskörper anhand eines Vergleichs der Härtemappings mit den zu den Materialdaten der Temperaturbereichen zugehörigen Härtewerten durchzuführen. Aufgrund der

hohen Komplexität der Materialeigenschaften in der Wärmeeinflusszone ist eine genaue Nachbildung zum Teil nur schwer zu realisieren, so dass die Zuordnung lediglich als Näherung zu betrachten ist. Am Beispiel zweier DV-Nähte, geschweißt mit hohem (h. E.) und niedrigem Energieeintrag (n. E.), erfolgt eine kurze Erläuterung der Zuordnung der Materialkurven. Die Zuordnungen aller weiteren Stumpfnahverbindungen können dem Anhang E.1 entnommen werden.

Abb. 8-34 links umfasst die in Abhängigkeit der vorliegenden Härtewerte zugeordneten Temperaturbereiche der Stumpfnahverbindung 1-6-DV-G69-50-1, geschweißt mit einem hohen Energieeintrag. Dem Diagramm in Abb. 8-34 rechts ist zu entnehmen, dass die Härtewerte der Stumpfnahverbindung weit unter dem gemittelten Härtewert des Dilatometerversuchs für den Temperaturbereich der Feinkornzone (FKZ) liegen. Daher wird auf eine Verwendung der zugehörigen Materialkurve für das FE-Modell verzichtet. Zwar liegt der gemittelte Härtewert des Temperaturbereichs der Grobkornzone (GKZ) ebenfalls über den Werten der Verbindung, da jedoch für den aufgehärteten Bereich keine alternativen Materialdaten vorliegen, werden diese für das FE-Modell verwendet.

Des Weiteren ist es nicht möglich, die tatsächlich vorhandene Erweichung (WZ) der Stumpfnahverbindung zu erfassen, da auch hier die Materialdaten aus den Dilatometerversuchen leicht höhere Härtewerte aufweisen. Dies kann in den späteren numerischen Untersuchungen ggf. Auswirkungen auf das zu untersuchende Versagen in der Wärmeeinflusszone, bedingt durch die höhere Festigkeit im Bereich der lokalen Erweichung, nehmen.

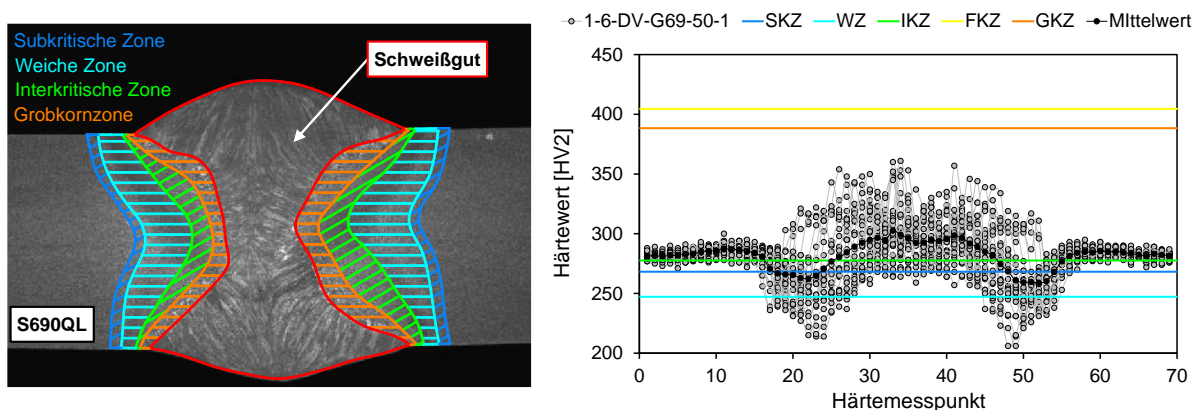


Abb. 8-34: Vergleich der Härtewerte der Dilatometerversuche und der Stumpfnahverbindung 1-6-DV-G69-50-1 (hoher Energieeintrag)

Ein Vergleich der Härtewerte der Verbindung 1-6-DV-G69-50-2, geschweißt mit einem geringen Energieeintrag, zeigt in Abb. 8-35 rechts eine bessere Übereinstimmung im Bereich der

GKZ und der erweichten Zone (WZ). Jedoch ist auch hier aufgrund der Härtedifferenz auf eine Verwendung der Materialdaten der FKZ zu verzichten. Die Zuordnung der jeweiligen Temperaturbereiche ist in Abb. 8-35 links noch einmal dargestellt.

Zu berücksichtigen ist in der Modellbildung der Matching-Verbindungen, dass vor allem der in Abschnitt 8.3.6 festgestellte Unterschied der sich in Abhängigkeit des Energieeintrags einstellenden Breite der erweichten Zone erfasst wird. Bezüglich *Maurer* [61] ist das Versagen in der Wärmeeinflusszone einer breiten Weichen Zone über dem Grenzwert von $X_{WZ} \leq 0,25$ geschuldet, vgl. Abschnitt 7.2.

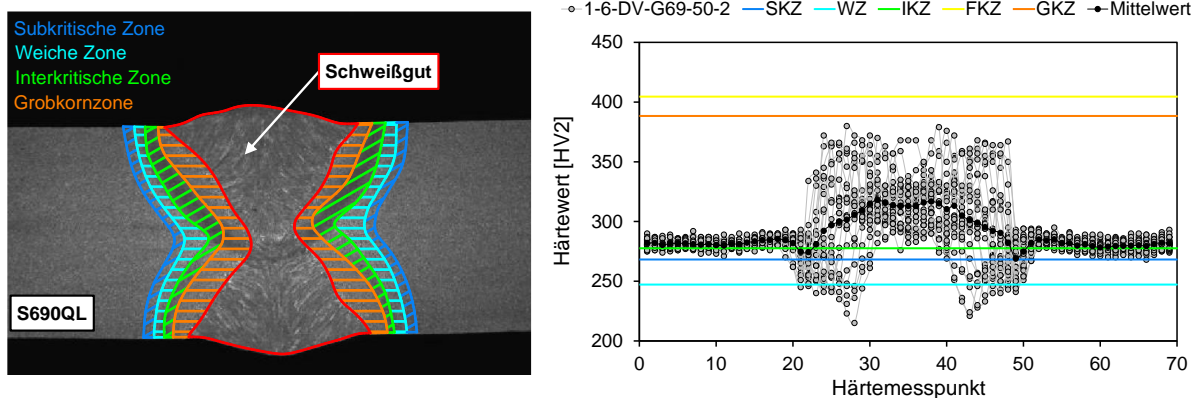


Abb. 8-35: Vergleich der Härtewerte der Dilatometerversuche und der Stumpfnahverbindung 1-6-DV-G69-50-2 (niedriger Energieeintrag)

Das Modell der Verbindung, geschweißt mit hohem Energieeintrag in Abb. 8-34, besitzt, gemäß dem Härtemapping, eine unter dem von *Maurer* [61] definierten Grenzwert von $X_{WZ} \leq 0,25$ (vgl. Abschnitt 7.2.3) liegende relative Breite der Weichen Zone von $X_{WZ} \approx 0,19$. Auch die Verbindung, geschweißt mit niedrigem Energieeintrag, liegt mit $X_{WZ} \approx 0,08$ deutlich unter der zulässigen Höchstbreite. Die angegebenen relativen Breiten der Weichen Zone entsprechen einem über die Bauteildicke gebildeten Mittelwert. Die Gefahr eines Versagens in der Wärmeeinflusszone sollte demnach bei beiden Verbindungen gering sein.

Die zugeordneten Spannungs-Dehnungs-Verläufe der verwendeten Materialien sind in Abb. 8-36 aufgetragen und in Tab. 8-3 zusammengefasst. Aus den Materialuntersuchungen aus Abschnitt 8.2.2.2 liegen Spannungs-Dehnungs-Verläufe für das Schweißgut in Abhängigkeit des Energieeintrags vor. In den Materialangaben wird daher unterschieden zwischen Materialproben, die unter einem hohen (h. E.) bzw. unter einem niedrigen Energieeintrag (n. E.) geschweißt wurden.

Es ist noch einmal anzumerken, dass die implementierten Materialdaten gewisse Abweichungen von den tatsächlich vorhandenen Materialeigenschaften der nachzurechnenden Stumpfnahverbindung aufweisen, sodass die Ergebnisse der folgenden Untersuchungen als Näherung zu betrachten sind.

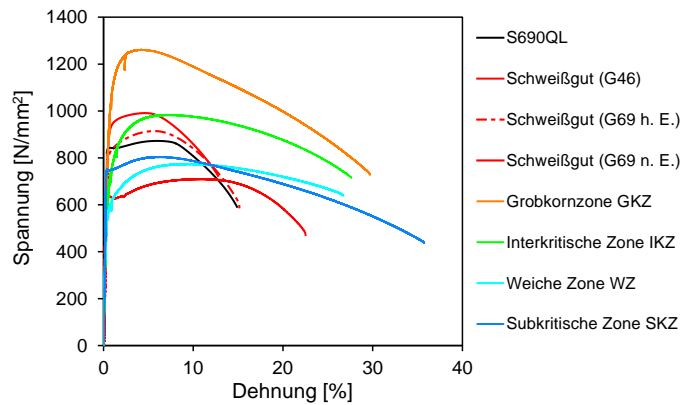


Abb. 8-36: Zugeordnete Spannungs-Dehnungs-Verläufe der einzelnen Materialbereiche

Die festgelegten Spannungs-Dehnungs-Verläufe sind abschließend in die für die Software ANSYS [82] benötigten wahren Spannungen und Dehnungen nach Gleichung (6.6) und (6.7) zu überführen und als multilineare Materialkurven in das FE-Modell einzufügen.

Tab. 8-3: Für die numerische Untersuchung der Stumpfnahverbindungen angesetzte Materialkennwerte

Mechanische Eigenschaften	Schweißgut			Wärmeeinflusszone			S690QL	
	G46	G69 (h. E.)	G69 (n. E.)	GKZ	IKZ	WZ		SKZ
$R_{eH} / R_{p0.2}$ [N/mm ²]	645	795	912	953	622	581	754	841
R_m [N/mm ²]	708	919	997	1261	983	774	804	872
E-Modul [N/mm ²]	196000	197000	197000	235000	222000	193000	251000	234000

8.4.4 Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse

8.4.4.1 Allgemeines

Bevor eine Untersuchung des Einflusses der Nahtüberhöhung durchgeführt werden kann, ist anhand eines Vergleichs der numerischen und der experimentellen Ergebnissen zu prüfen, ob das tatsächliche Tragverhalten durch das Modell ausreichend genau wiedergegeben wird. Ist dies der Fall, kann anhand des validierten Modells in einer erneuten numerischen Auswertung

untersucht werden, inwieweit eine rein geometrische Veränderung der Nahtüberhöhung das auftretende Versagen beeinflusst.

Die für den Vergleich herangezogenen experimentellen Spannungs-Verformungs-Kurven entsprechen der über die Verformung im Bereich der Anfangsmesslänge L_o aufgetragenen Kraft dividiert durch den im Bereich des Versagens vorliegenden Querschnitt A_o . Die Anfangsmesslänge L_o entspricht hierbei der in Abschnitt 8.2.7 für die Versuchskörper der Materialdicke $t = 10 \text{ mm}$ definierten Messlänge $L_o = 100 \text{ mm}$. Für die numerischen Verläufe wurde die Verformungen und die dafür aufgebrauchte Kraft entsprechend den experimentellen Untersuchungen ausgelesen.

Die aus den numerischen Betrachtungen resultierenden Ergebnisse werden am Beispiel der DV-Nähte erläutert und lassen sich auf die untersuchten V-Nähte übertragen. Die Ergebnisse der V-Nähte können dem Anhang E.2 entnommen werden.

8.4.4.2 Ergebnisse der Undermatching-Verbindungen

In Abb. 8-37 ist der numerisch ermittelte Spannungs-Verformungs-Verlauf den experimentellen Verläufen gegenübergestellt. Experimentell geprüft wurden ausschließlich Undermatching-Verbindungen mit einer vorhandenen Nahtüberhöhung, weshalb auch für das zu validierende Modell die Schweißnaht mit Nahtüberhöhung berücksichtigt wurde.

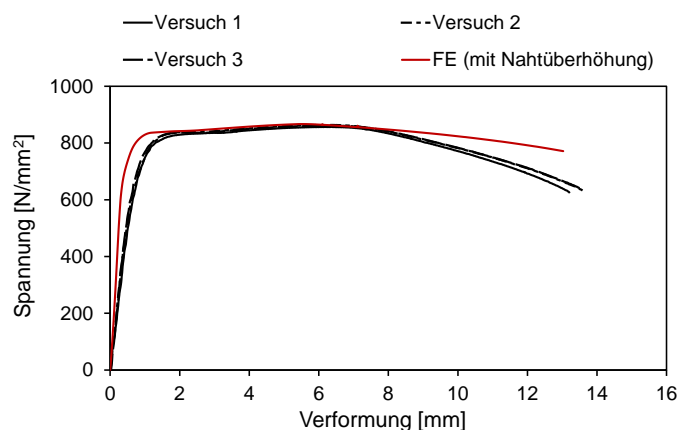


Abb. 8-37: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Spannungs-Verformungs-Verläufe der Stumpfnahverbindung 1-6-DV-G46-50-0

Der aus der numerischen Auswertung hervorgehende und in Abb. 8-37 aufgetragene Verlauf sowie das auftretende Versagen aus Abb. 8-38 und Abb. 8-39 zeigen eine insgesamt gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen.

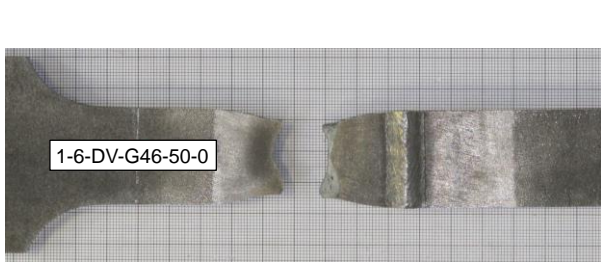


Abb. 8-38: Experimentell beobachtetes Versagen der Verbindung 1-6-DV-G46-50-0

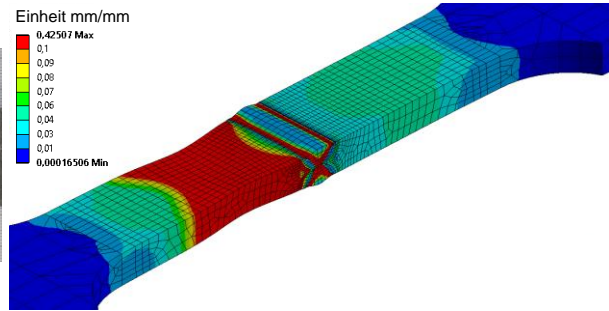


Abb. 8-39: Vergleichsdehnung der numerischen Versuchsnachrechnung der Verbindung 1-6-DV-G46-50-0

Berücksichtigt man das von *Törnblom* [74] und *Collin* [42] festgelegte Undermatching-Verhältnis von $f_{y,SZW} / f_{y,GW} \geq 0,77$ (vgl. 7.3.3), ist von einem leicht erhöhten Risiko eines Versagens im Bereich des Nahtquerschnittes auszugehen, da das Festigkeitsverhältnis der numerisch betrachteten Verbindung bei 0,77 liegt. Das Versagen trat jedoch sowohl experimentell (vgl. Abb. 8-38) als auch numerisch (vgl. Abb. 8-39) im Grundwerkstoff auf. Daher ist im Weiteren zu untersuchen, ob eine rein geometrische Modifizierung der Naht durch den Abtrag der Überhöhung zu einem veränderten Versagen führt.

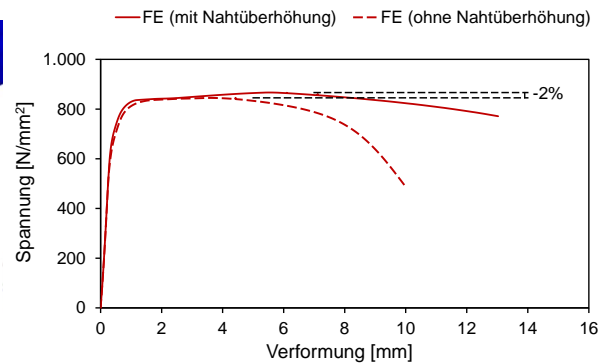
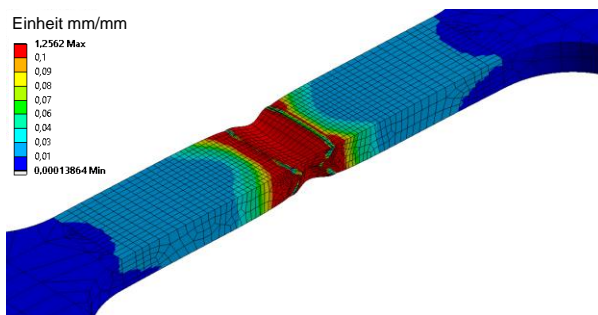


Abb. 8-40: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung der Verbindung 1-6-DV-G46-50-0

Die Ergebnisse einer erneuten Auswertung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung kann Abb. 8-40 entnommen werden. Es zeigt sich, dass sich das Versagen in die Schweißnaht umlagert. Die in Abb. 8-40 dargestellten Vergleichsdehnungen zeigen deutlich ein Einschnüren im Schweißgut der Verbindung. Die daraus resultierende Tragfähigkeit weicht jedoch mit 2 % nur leicht von der numerisch ermittelten Tragfähigkeit bei einem Versagen im Grundwerkstoff ab.

Das Versagen im Grundwerkstoff der Verbindung mit Nahtüberhöhung lässt sich anhand des vorliegenden Verhältnisses x_t zwischen der Bauteildicke t_{GW} und dem Nahtquerschnitt t_{SG} begründen. Entspricht bzw. liegt das Verhältnis x_t über den ins Verhältnis gesetzten Zugfestigkeitswerten x_{fu} des Grundwerkstoffs $f_{u,GW}$ und des Schweißguts $f_{u,SG}$, kann die vorliegende Unterfestigkeit im Schweißgut durch einen höheren Querschnitt im Nahtbereich und dadurch reduzierten Spannungen ausgeglichen werden, vgl. Abb. 8-41. Im Fall der betrachteten Undermatching-Verbindung aus Abb. 8-41, liegt das Verhältnis der Querschnittsdicken minimal über dem Verhältnis der Querschnittsfestigkeiten. Somit erreicht der Grundwerkstoff aufgrund $x_{fu} < x_t$ seine maximal aufnehmbare Spannung vor dem Schweißgut, was schließlich zu einem Versagen führt.

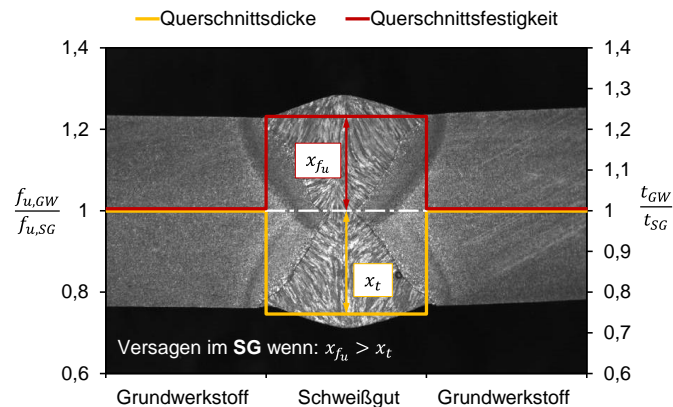


Abb. 8-41: Ausgleichendes Verhältnis von Querschnittsdicke und Querschnittsfestigkeit

Eine weitere numerische Auswertung unter Abtrag der halben Nahtüberhöhung in Abb. 8-42 bestätigt dies. Infolge der hier teilweise abgetragenen Nahtüberhöhung gilt $x_{fu} > x_t$. Dies hat zufolge, dass die Festigkeitsdifferenz im Schweißgut nicht mehr durch den höheren Nahtquerschnitt ausgeglichen werden kann. Demzufolge wird die maximal aufnehmbare Spannung im Schweißgut zuerst erreicht und somit zu einem Versagen führt.

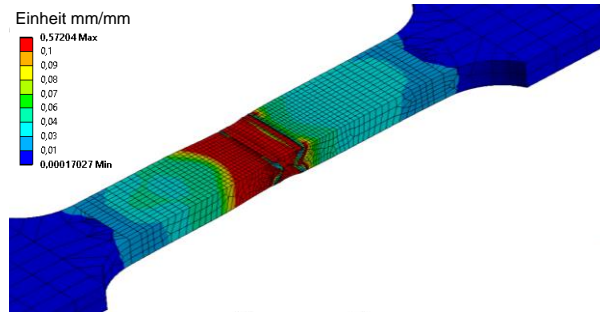


Abb. 8-42: Vergleichsdehnung unter Berücksichtigung einer teilweise abgetragenen Nahtüberhöhung der Verbindung 1-6-DV-G46-50-0

Zusammenfassend kann aus der numerischen Untersuchung der Undermatching-Verbindung einer DV-Naht ein Einfluss aus der Nahtüberhöhung hinsichtlich des auftretenden Versagens festgestellt werden. Bedingt durch den höheren Nahtquerschnitt kann das vorliegende Undermatching-Verhältnis ausgeglichen werden.

Die numerische Betrachtung der Undermatching-Verbindung der V-Naht zeigt ein ähnliches Verhalten, jedoch kann hier eine wesentlich höhere Differenz der erreichten Tragfähigkeiten von Verbindungen mit und ohne Nahtüberhöhung festgestellt werden. Die Ergebnisse sind im Anhang E.2 dokumentiert.

8.4.4.3 Ergebnisse der Matching-Verbindungen, geschweißt mit hohem Energieeintrag

Die Ergebnisse der numerisch und experimentell hergeleiteten Spannungs-Verformungs-Kurven können Abb. 8-43 entnommen werden. Experimentell geprüft wurden hier ausschließlich Verbindungen ohne Nahtüberhöhung, weshalb auch im FE-Modell die Naht ohne Überhöhung abgebildet wurde. In der Versuchsdurchführung zeigten die unter hohem Energieeintrag geschweißten DV-Nähte, trotz Einhaltung des nach *Maurer* [61] festgelegten Grenzwerts der maximal zulässigen relativen Breite der Weichen Zone, ein Versagen im Bereich der Wärmeinflusszone, vgl. Abb. 8-44.

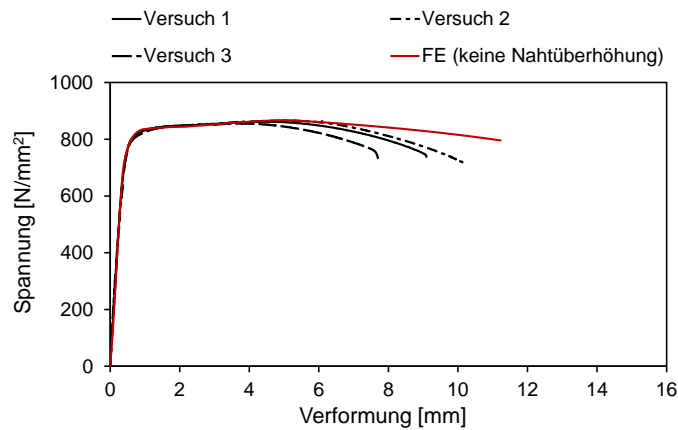


Abb. 8-43: Vergleich der numerischen und experimentellen Spannungs-Verformungs-Kurven der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1

Der Vergleich der Verläufe in Abb. 8-43 zeigt eine ausreichend gute Übereinstimmung der numerischen und experimentellen Spannungs-Verformungs-Verläufe. Das Modell kann somit als validiert betrachtet werden. Die in Abb. 8-45 dargestellten Ergebnisse der numerisch ermittelten Vergleichsdehnungen gibt keinen genauen Aufschluss darüber, ob das Versagen im Grundwerkstoff oder in der Wärmeeinflusszone auftritt, da in beiden Bereichen lokale Dehnungskonzentrationen vorliegen. Hier sei noch einmal auf die in Abb. 8-34 festgestellte Differenz zwischen den Härtemappings und der im FE-Modell verwendeten Materialdaten der GKZ verwiesen. Die daraus ggf. hervorgehenden höheren Stützeffekte können Auswirkungen auf das sich einstellende Versagen der Verbindung nehmen.

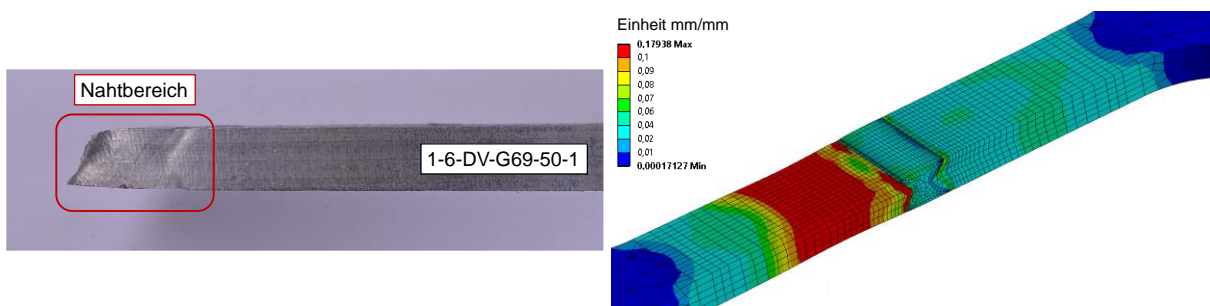


Abb. 8-44: Experimentell beobachtetes Versagen der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1

Abb. 8-45: Vergleichsdehnung der numerischen Versuchsnachrechnung der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1

Ergänzend wird daher untersucht, wie sich das auftretende Versagen der Naht unter Vernachlässigung der Überhöhung in Abhängigkeit einer nicht berücksichtigten GKZ verändert. Hierfür werden der in Abb. 8-34 definierten GKZ die Materialdaten der geringer festen IKZ zugeordnet. Die aus der erneuten numerischen Auswertung hervorgehenden Vergleichsdehnungen aus

Abb. 8-46 zeigen, dass sich bei einer Vernachlässigung der GKZ eine lokale Dehnungskonzentration ausschließlich im Bereich der Wärmeeinflusszone einstellt. Es ist davon auszugehen, dass das Versagen unter Vernachlässigung der GKZ in der Wärmeeinflusszone auftritt.

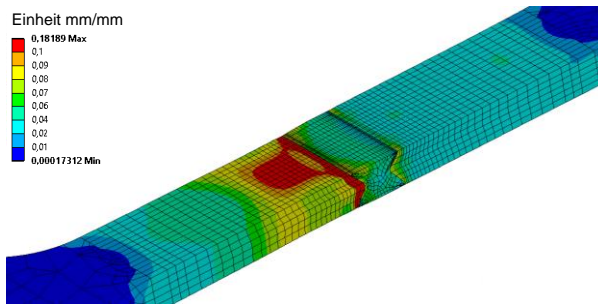


Abb. 8-46: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung und der GKZ der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1

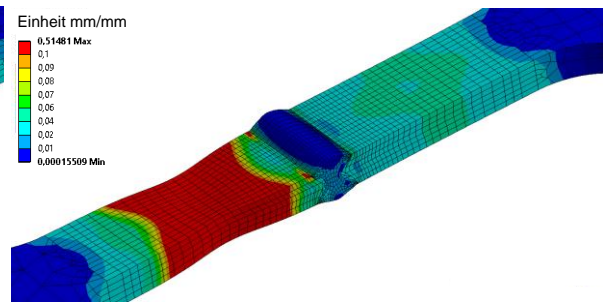


Abb. 8-47: Vergleichsdehnung bei Berücksichtigung der Nahtüberhöhung der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1

Hingegen lagert sich das Versagen bei einer Verbindung mit Nahtüberhöhung und vernachlässigter GKZ in den Grundwerkstoff um. Abb. 8-47 ist deutlich zu entnehmen, dass im Bereich des Grundwerkstoffs die größten Dehnungen auftreten. Die lokalen Dehnungen in der Wärmeeinflusszone sind vernachlässigbar gering.

Anhand der Auswertungen der numerischen Modelle der Matching-Verbindung einer DV-Naht unter Vernachlässigung der GKZ, geschweißt mit einem hohen Energieeintrag, kann eine Beeinflussung des auftretenden Versagens durch eine vorhandene Nahtüberhöhung festgestellt werden. Zusätzlich zeigen die Ergebnisse, dass ein aufgehärteter Bereich in der Wärmeeinflusszone einem kritischen Versagen ebenfalls entgegenwirken kann. Dies bestätigt die Annahme von positiv wirkenden Stützeffekten, resultierend aus den aufgehärteten Bereichen der Wärmeeinflusszone, die bereits in der Diskussion der Versuchsergebnisse in Abschnitt 8.3.6 angemerkt wurden.

Die Ergebnisse der V-Naht, geschweißt mit einem hohen Energieeintrag, in Anhang E.2 zeigen eine ähnliche Tendenz. Auch hier lagert sich das Versagen bei Vernachlässigung der Nahtüberhöhung und der GKZ in den Bereich der Wärmeeinflusszone um.

Auf einen Vergleich der Spannungs-Verformungs-Kurven bei einem Versagen in der Wärmeeinflusszone wird, aufgrund der hier nicht exakt den Versuchskörpern entsprechenden Materialdaten, verzichtet.

8.4.4.4 Ergebnisse der Matching-Verbindungen, geschweißt mit niedrigem Energieeintrag

Aus den experimentellen Untersuchungen liegen ausschließlich Ergebnisse von Verbindungen, deren Nahtüberhöhung vor Versuchsdurchführung entfernt wurde, vor. Daher ist im FE-Modell die Naht ohne Überhöhung modelliert worden. Der Vergleich der numerisch und experimentell ermittelten Spannungs-Verformungs-Verläufe ist in Abb. 8-48 dargestellt.

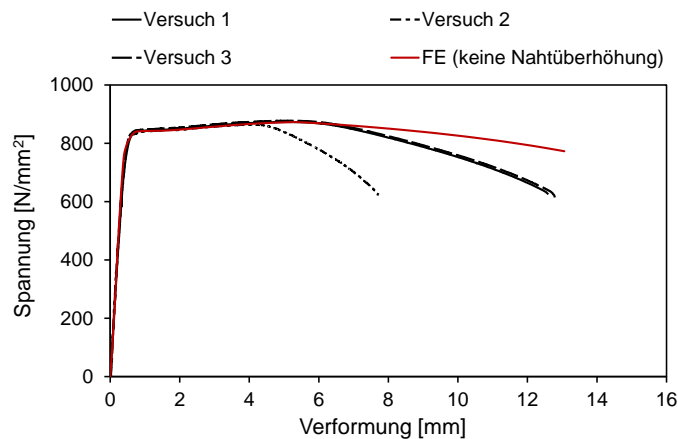


Abb. 8-48: Vergleich der numerischen und experimentellen Spannungs-Verformungs-Kurven der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1

Insgesamt kann eine gute Übereinstimmung zwischen den in Abb. 8-48 aufgetragenen Verläufen und dem experimentell (Abb. 8-49) und numerisch (Abb. 8-50) auftretenden Versagen festgestellt werden.

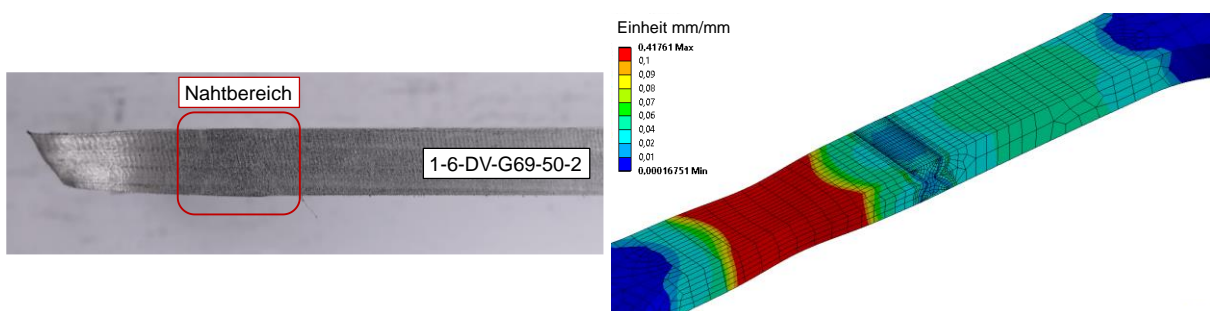


Abb. 8-49: Experimentell beobachtetes Versagen der Verbindung 1-6-DV-G69-50-2

Abb. 8-50: Vergleichsdehnung der numerischen Versuchsnachrechnung der Verbindung 1-6-DV-G69-50-2

Zusätzlich wird auch hier untersucht, ob infolge einer Vernachlässigung der GKZ und den dadurch verringerten Stützeffekten lokale Dehnungskonzentrationen in der Wärmeeinflusszone festzustellen sind. Betrachtet man die in Abb. 8-51 dargestellten Dehnungen, können

auch bei einer nicht vorhandenen GKZ keine lokalen Dehnungskonzentrationen in der Wärmeeinflusszone festgestellt werden.

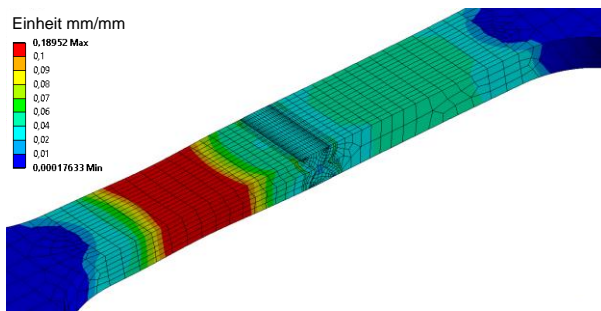


Abb. 8-51: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung und der GKZ der Verbindung 1-6-DV-G69-50-2

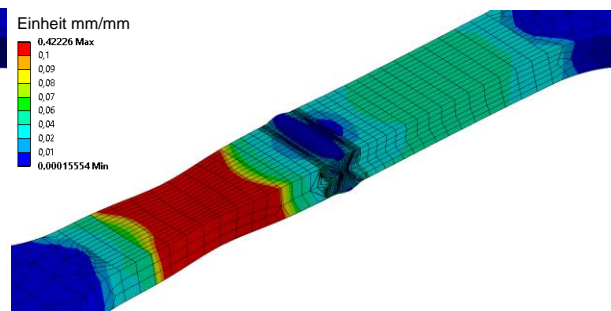


Abb. 8-52: Vergleichsdehnung unter Berücksichtigung der Nahtüberhöhung der Verbindung 1-6-DV-G69-50-2

Die numerische Untersuchung der Matching-Verbindung, geschweißt mit einem niedrigen Energieeintrag, zeigt trotz vernachlässigter GKZ ein, im Gegensatz zu der Verbindung mit hohem Energieeintrag, von der Nahtüberhöhung unabhängiges Versagen. Die in Abb. 8-51 und Abb. 8-52 dargestellten Vergleichsdehnungen konzentrieren sich sowohl mit als auch ohne Nahtüberhöhung im Bereich des Grundwerkstoffs. Eine lokale Dehnungskonzentration im Bereich der Wärmeeinflusszone kann nicht festgestellt werden. Als mögliche Ursache ist hier die geringe Breite der Weichen Zone zu nennen, die trotz verringerter Stützeffekte die Gefahr eines Versagens in der Wärmeeinflusszone herabsetzt.

Auch in der Untersuchung der V-Naht Verbindung, geschweißt mit einem niedrigen Energieeintrag, trat das Versagen weder mit noch ohne Nahtüberhöhung respektive vernachlässigter GKZ im Bereich der Wärmeeinflusszone auf. Die Ergebnisse können dem Anhang E.2 entnommen werden.

Auf eine Betrachtung der aus den weiteren Modellen resultierenden Spannungs-Verformungsverläufe kann aufgrund eines identischen Versagens verzichtet werden.

8.4.5 Zusammenfassung der numerischen Untersuchungen durchgeschweißter Stumpfnahverbindungen

Mit Hilfe der numerischen Untersuchungen konnte aufgezeigt werden, dass das Versagen der betrachteten Stumpfnahverbindungen in Abhängigkeit der Nahtüberhöhung variiert.

Die Ergebnisse der Auswertungen der Undermatching-Verbindungen zeigten, dass trotz einer geringeren Festigkeit im Schweißgut ein Versagen im Grundwerkstoff auftritt, wenn die vorliegende Festigkeitsdifferenz durch eine ausreichend große Querschnittserhöhung die Spannungskonzentration im Nahtbereich verringert wird.

Aus den Untersuchungen der Matching-Verbindungen konnte hingegen ein vom verwendeten Energieeintrag abhängender Einfluss der Nahtüberhöhung festgestellt werden. So kann beispielsweise bei der betrachteten Verbindung, geschweißt mit einem hohen Energieeintrag, das Risiko eines kritischen Versagens in der Wärmeeinflusszone durch eine vorhandene Nahtüberhöhung reduziert werden. Des Weiteren ließ sich feststellen, dass die aus den aufgehärteten Bereichen resultierenden Stützeffekte ebenfalls die Gefahr eines kritischen Versagens in der Wärmeeinflusszone verringern können.

Für die Verbindung, geschweißt mit einem niedrigeren Energieeintrag, konnte keine Beeinflussung festgestellt werden. Daher ist davon auszugehen, dass aus der hier berücksichtigten geringeren Breite der Weichen Zone die Gefahr eines kritischen Versagens verringert wird.

Eine detaillierten Betrachtung des Einflusses der Breite der Weichen Zone und einem davon abhängenden Versagen soll im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen. Anhand der betrachteten Härtemappings konnte gezeigt werden, dass in Abhängigkeit des Energieeintrags die Breite der Weichen Zone als auch die Härte der angrenzenden Gefügebereiche und der daraus hervorgehenden Stützeffekte stark variieren. Somit erfordert eine Untersuchung bzw. Überprüfung des von *Maurer* [61] bereits festgelegten Grenzwerts vertiefte Gefügeuntersuchungen an Stumpfnahverbindungen, geschweißt unter verschiedenen Energieeinträgen, um das Zusammenspiel der Erweichung und der aufgehärteten Bereiche in einer Auswertung experimenteller Daten zu erfassen.

Ein Ausgleich der Festigkeitsdifferenz im Schweißgut, beziehungsweise der Erweichung in der Wärmeeinflusszone anhand eines erhöhten Nahtquerschnitts ist aufgrund der dadurch steigenden Material- und Herstellungskosten nicht zu empfehlen. Darüber hinaus birgt eine Nahtüberhöhung weitere Sicherheitsrisiken gerade im Hinblick auf die oftmals wichtigen Aspekte

der Ermüdung. Die durchgeführten numerischen Betrachtungen dienen lediglich der Bestätigung der in der Entwicklung des Bemessungskonzepts zu berücksichtigenden Versagensmodi, vgl. Abschnitt 8.5.2.

8.5 Entwicklung eines angepassten Bemessungskonzepts für durchgeschweißte Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle

8.5.1 Vorgehen

Unter Berücksichtigung des in Abschnitt 8.3 dokumentierten Tragverhaltens von durchgeschweißten Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle soll ein wirtschaftliches und sicheres Widerstandsmodell entwickelt werden. Ziel ist es, einen Bemessungsansatz zu erarbeiten, der vor allem ein sicheres Nachweiskonzept gegen die in den Versuchen auftretenden Versagensmodi Grundwerkstoff, Wärmeeinflusszone und Schweißgut bereitstellt. Die Vorgehensweise zur Herleitung eines geeigneten Bemessungsansatzes wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

8.5.2 Abzubildende Versagensmodi

8.5.2.1 Allgemeines

Basierend auf den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen aus Abschnitt 8.3 erfolgt zunächst eine getrennte Betrachtung aller beobachteten Versagensmodi und eines jeweils dafür abgeleiteten analytischen Modells zur Abbildung der Tragfähigkeiten. Gerade die Ergebnisse der Matching-Verbindungen an Stählen der Güte S690QL haben gezeigt, dass als auftretendes Versagen in der Bemessung jeder Modus in Betracht gezogen werden muss. Dies stellt an das zu entwickelnde Bemessungsmodell für Stumpfnahverbindungen die Anforderung einer Nachweisführung, die alle drei aus den Versuchen bekannten Versagensarten abdeckt. Daher sollen die einzelnen Gleichungen anschließend in einer Gleichung kombiniert werden, um eine möglichst einfache Bemessung für Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle unabhängig vom Mismatch-Verhältnis zu ermöglichen.

Im Gegensatz zum derzeit gültigen Bemessungsmodell nach *prEN 1993-1-8* [18], das lediglich einen Bauteilnachweis nach *prEN 1993-1-1* [19] vorsieht, soll das neue Konzept als Nachweis der eigentlichen Stumpfnahverbindung dienen. Um das Versagensverhalten einer geschweißten Verbindung auf Bruch berücksichtigen zu können, werden dem neuen Bemessungskon-

zept als Werkstoffkennwerte die Zugfestigkeiten f_u zugrunde gelegt. Infolge einer Nachweisführung auf Basis der Zugfestigkeit ist ein höherer Sicherheitsfaktor mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M2} = 1,25$ anzusetzen, um das sogenannte „Versagen ohne Ankündigung“ berücksichtigen zu können [75].

8.5.2.2 Versagensmodus 1: Grundwerkstoff

In Abb. 8-53 sind die experimentell ermittelten Tragfähigkeiten von Verbindungen des Forschungsvorhabens *HighButtWeld* [36] aufgetragen, die ein Versagen im Grundwerkstoff aufwiesen. Der Vergleich verdeutlicht, dass die globale Tragfähigkeit der jeweiligen Verbindungen mit der tatsächlich vorhandenen Zugfestigkeit des reinen Grundwerkstoffs übereinstimmt. Somit kann, bei einem Versagen im Grundwerkstoff, die globale Tragfähigkeit der Stumpfnahverbindung entsprechend Gleichung (8.2) mit der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs gleichgesetzt werden.

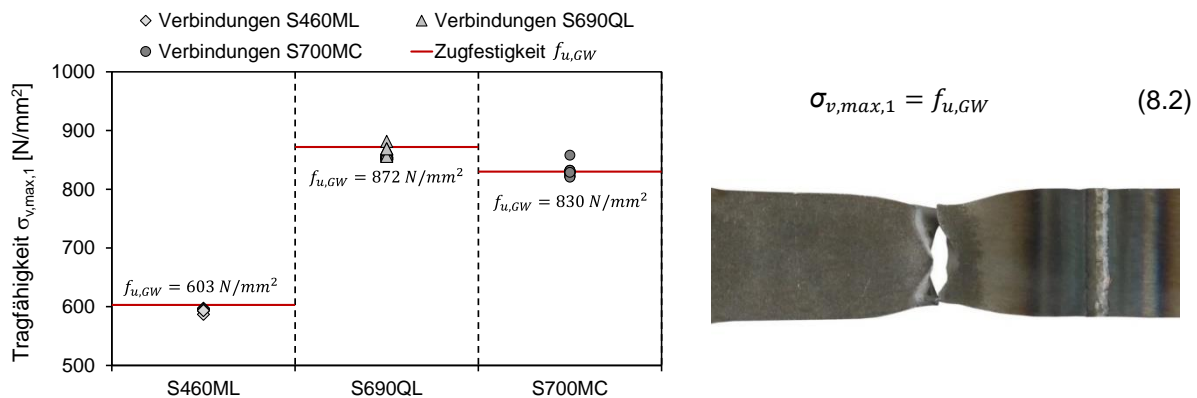


Abb. 8-53: Versagen im Grundwerkstoff [36]

8.5.2.3 Versagensmodus 2: Wärmeeinflusszone

Die in Abb. 8-54 aufgetragenen experimentellen Ergebnisse der Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] und der *Zusatzuntersuchungen* [57] verdeutlichen, dass bei einem Versagen in der Wärmeeinflusszone die Tragfähigkeit der Verbindung nicht die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs erreicht. Vereinfacht lässt sich die globale Tragfähigkeit der Stumpfnahverbindung durch die über den Faktor x abgeminderte Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs beschreiben. Mit Hilfe des Faktors x aus Gleichung (8.3), kann die in der Wärmeeinflusszone vorliegende Erweichung und die dadurch herabgesetzte Tragfähigkeit erfasst werden.

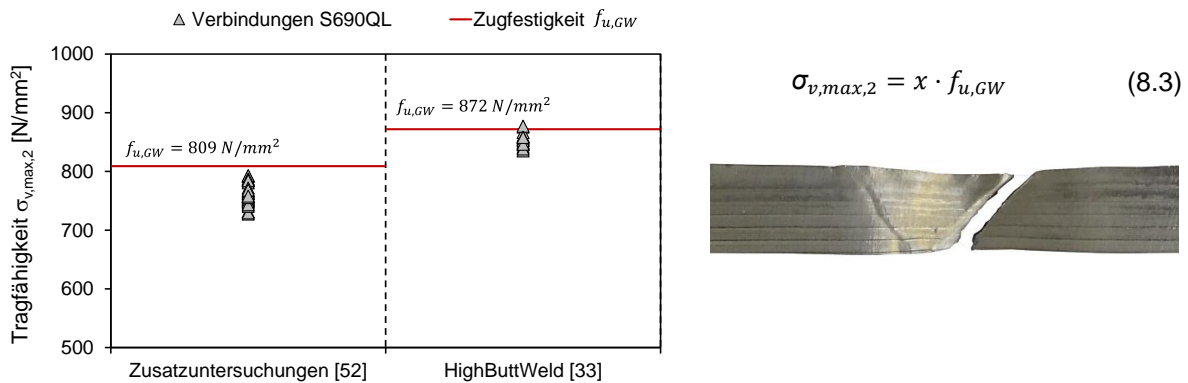


Abb. 8-54: Versagen in der Wärmeeinflusszone

Festlegung des Erweichungsfaktors x in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs

Die Abweichungen der globalen Tragfähigkeiten bei einem Versagen im Bereich der Wärmeeinflusszone hängen maßgeblich von den dort vorliegenden Eigenschaften ab. Dies kann zum einen eine negativ wirkende Erweichung als auch eine positiv wirkende Aufhärtung beinhalten. Aus der Diskussion der Versuchsergebnisse ging hervor, dass die sich einstellenden Eigenschaften im wärmebeeinflussten Bereich der Naht je nach Grundwerkstoff zum Teil stark variieren können. Um die vorliegende Beschaffenheit in der Bemessung ausreichend genau berücksichtigen zu können, ist es von essentieller Bedeutung, die anzusetzenden Erweichungsfaktoren in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs zu ermitteln.

Beispielsweise zeigten die Härtemappings der Verbindungen am Grundwerkstoff der Güte S460ML in Abschnitt 8.3.4 keine Erweichung im Bereich der Wärmeeinflusszone. Anhand der vorliegenden Versuchsdaten ist somit für Stumpfnahverbindungen mit Stahl der Güte S460ML ein Erweichungsfaktor von $x = 1,0$ abzuleiten. Offen ist jedoch, ob eine Erweichung infolge ungünstiger Schweißprozessparameter erzeugt wird. Hierzu liegen aufgrund der geringen Versuchsdaten derzeit keine Erkenntnisse vor.

Für Verbindungen der Güte S690QL und der Güte S700MC lassen sich in der Wärmeeinflusszone deutliche vom unbeeinflussten Grundwerkstoff abweichende Eigenschaften feststellen, die durch einen Erweichungsfaktor erfasst werden sollten.

Aus der Betrachtung der Härtemappings ging hervor, dass vor allem der Energieeintrag einen wesentlichen Einfluss auf die sich einstellenden Eigenschaften der Wärmeeinflusszone und somit auf die Tragfähigkeit nimmt. Aus Sicht des Anwenders ist ein auf dem Energieeintrag

basierendes Bemessungskonzept in der Praxis eher schwierig umzusetzen, weshalb die daraus resultierenden Streuungen der Materialeigenschaften, hervorgerufen durch variierende Härte- und Weichenwerte, in Form eines Erweichungsfaktors x berücksichtigt werden sollen. Das im Rahmen dieser Arbeit angewandte Verfahren zur Ermittlung der Erweichungsfaktoren wird anhand der Auswertung der Verbindungen mit S690QL erläutert.

Für die Herleitung des Erweichungsfaktors wurden ausschließlich Verbindungen der Güte S690QL herangezogen, die ein Versagen in der Wärmeeinflusszone aufwiesen. Hierzu wurden ergänzend zu den Versuchsergebnissen der Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] und der *Zusatzuntersuchungen* [57], die Versuchsergebnisse aus der Literatur [61], [79] und [37] hinzugezogen. Der Erweichungsfaktor für Verbindungen mit S690QL sollte sowohl den auf die Tragfähigkeit negativ wirkenden Einfluss aus der Weichen Zone als auch die positiv wirkenden Stützeffekte aus den aufgehärteten Bereichen berücksichtigen.

Das Einsetzen der vorliegenden Versuchsdaten in Gleichung (8.3) ermöglicht im ersten Schritt die Ermittlung der prozentualen Abweichungen der globalen Tragfähigkeiten von den tatsächlichen Zugfestigkeiten der Grundwerkstoffe für jeden Versuch. Mit Hilfe einer statistischen Auswertung der ermittelten x -Faktoren kann in einem zweiten Schritt der für Gleichung (8.3) resultierende Erweichungsfaktor x für Stähle der Güte S690QL festgelegt werden.

Um das auf Widerstandsseite geforderte Sicherheitsniveau der Norm zu berücksichtigen, erfolgt die Bestimmung des Erweichungsfaktors unter Verwendung des Fraktilenfaktors k_n (5 % Fraktilewert) nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24]. Entsprechend Abb. 8-55 lässt sich ein Erweichungsfaktor von $x = 0,93$ für Stumpfnahverbindungen am Grundwerkstoff der Güte S690QL, unter Berücksichtigung des Fraktilenfaktors $k_{78} = 1,668$, ableiten.

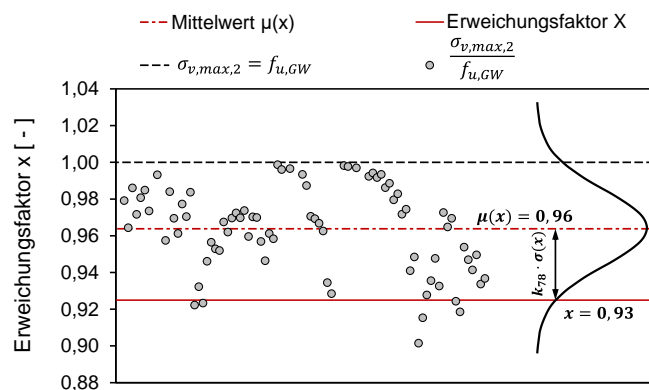


Abb. 8-55: Beispiel zur Ermittlung des Erweichungsfaktors x für Stähle der Güte S690QL

Die Ermittlung der Erweichungsfaktoren für Verbindungen am Grundwerkstoff der Güten S500MC und S700MC erfolgte analog zu dem beschriebenen Beispiel. Eine Übersicht der statistisch hergeleiteten Erweichungsfaktoren x kann Tab. 8-4 entnommen werden.

Entsprechend Tab. 8-4 erfährt eine Verbindung von Stählen der Güte S700MC die größte Abminderung. Bedingt durch den geringen Kohlenstoffanteil des Stahls S700MC stellt sich über die komplette Wärmeeinflusszone eine Weiche Zone ein vgl. Abschnitt 3.4.3. Positiv wirkende aufgehärtete Bereiche bilden sich, im Vergleich zu Verbindungen der Güte S690QL, hier nicht aus, was zu einem höheren Erweichungsfaktor führt.

Tab. 8-4: Statistische Auswertung der Erweichungsfaktoren x in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs

Statistische Kenngrößen	S460ML	S500MC	S690QL	S700MC
Mittelwert $\mu(x)$ [-]:	-	0,98	0,96	0,94
Standardabweichung $\sigma(x)$ [-]:	-	0,01	0,02	0,03
Variationskoeffizient $V(x)$ [%]:	-	1%	2%	4%
Fraktilefaktor k_n (5% Fraktilewert) [-]:	-	2,33	1,668	1,648
festgelegter Erweichungsfaktor x [-]:	1,00	0,95	0,93	0,88
Anzahl [-]:	-	5	78	94

8.5.2.4 Versagensmodus 3: Schweißgut

Der dritte Versagensmodus betrifft das Versagen einer Stumpfnahverbindung im Schweißgut. Abb. 8-56 umfasst daher die aus dem Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] und den *Zusatzuntersuchungen* [57] ermittelten Tragfähigkeiten von Verbindungen, die ein Versagen im Schweißgut aufwiesen. Der betrachtete Versagensmodus ist überwiegend an Verbindungen, die mit einem geringer festen Schweißzusatzwerkstoff verschweißt wurden, zu beobachten. Betrachtet man die in Abb. 8-56 aufgeführten Ergebnisse des Forschungsvorhabens *HighButtWeld* [36] wird ersichtlich, dass die bisher nach *prEN 1993-1-8* [18] anzusetzende Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs (vgl. Gleichung (4.11)) als eher konservativ anzusehen ist. Aufgrund fehlender Festigkeitswerte am reinen Schweißgut kann für die *Zusatzuntersuchungen* [57] nicht geprüft werden.

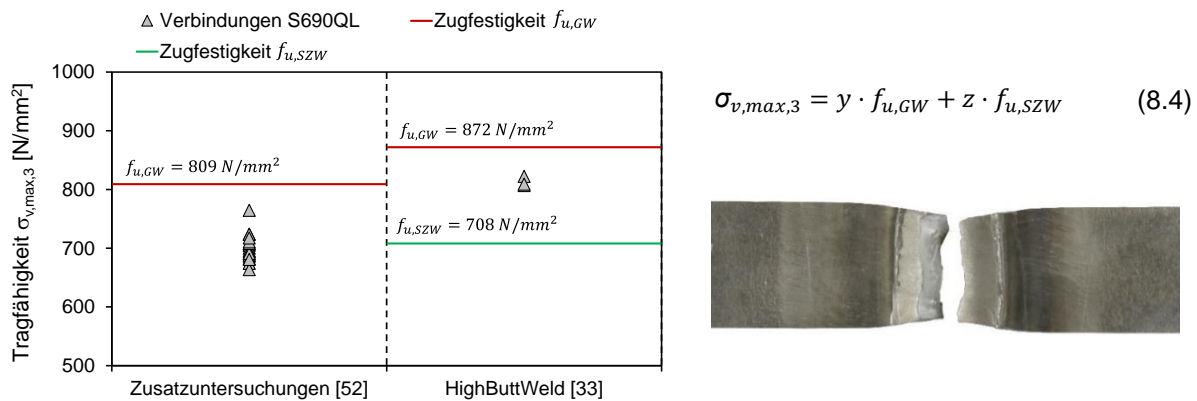


Abb. 8-56: Versagen im Schweißgut

Die globale Tragfähigkeit bei einem Schweißgutversagen hängt von den dort vorliegenden Materialeigenschaften ab, die, wie bereits in Abschnitt 3.4 und 6.3.6.2 verdeutlicht wurde, wiederum von der Aufmischung des Schweißzusatzwerkstoffs mit dem aufgeschmolzenen Grundwerkstoff beeinflusst werden. Daraus abgeleitet ist nach Gleichung (8.4) die Tragfähigkeit einer im Schweißgut versagten Verbindung mit der Kombination gewichteter Zugfestigkeiten des Grundwerkstoffs und des Schweißzusatzwerkstoffs gleichzusetzen.

Bestimmung der Gewichtungsfaktoren y und z

Die Gewichtungsfaktoren berücksichtigen die Beeinflussung der Festigkeit im Schweißgut aus der Aufmischung von Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff. Zur Ermittlung der benötigten Gewichtungsfaktoren werden ausschließlich Versuchsergebnisse von Verbindungen, die ein Versagen im Schweißgut aufwiesen, herangezogen.

Die Bestimmung der beiden Gewichtungsfaktoren y und z erfolgt über die Lösung eines Gleichungssystems, das anhand zweier Verbindungen aufzustellen ist. Die zu vergleichenden Verbindungen unterscheiden sich ausschließlich in der Festigkeit des verwendeten Schweißzusatzwerkstoffs. Grundwerkstoff, Schweißprozess und Nahtgeometrie sollten innerhalb des Gleichungssystems nahezu identisch sein, um den reinen Einfluss aus der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs und daraus den Gewichtungsfaktor z ableiten zu können.

Aus den Versuchsdaten liegt jedoch nur eine geringe Anzahl an Verbindungen vor, die die angegebenen Voraussetzungen erfüllen. Ermittelt werden konnten hierbei Gewichtungsfakto-

ren für unterschiedliche Nahttypen, unterschiedliche Energieeinträge sowie Werkstoffkombinationen. In Tab. 8-5 ist beispielhaft ein Auszug der ermittelten Gewichtungsfaktoren, resultierend aus Gleichungssystemen unterschiedlicher Nahttypen, aufgetragen.

Tab. 8-5: Beispiel ermittelter Gewichtungsfaktoren y und z unterschiedlicher Nahttypen

	Grundwerkstoff	Schweißzusatzwerkstoff	Nahttyp	Blechdicke [mm]	$f_{u,GW}$ [N/mm ²]	$f_{u,SZW}$ [N/mm ²]	Tragfähigkeit [N/mm ²]	Gewichtungsfaktoren	
								y [-]	z [-]
GLS 1	S690QL	G46	V	20	895	708	791	0,79	0,12
	S690QL	G69	V	20	895	919	816		
GLS 2	S690QL	G46	DV	20	895	708	827	0,80	0,16
	S690QL	G69	DV	20	895	919	861		
GLS 3	S700MC	G79	X	8	843	815	776	0,85	0,08
	S700MC	T69	X	8	843	722	769		

Bereits Tab. 8-5 ist zu entnehmen, dass die aus den Gleichungssystemen hergeleiteten Gewichtungsfaktoren zum Teil eine hohe Streuung untereinander aufzeigen. Auch die statistische Betrachtung der Gewichtungsfaktoren in Tab. 8-6 bestätigt, dass vor allem der Gewichtungsfaktor z , mit einem Variationskoeffizient von $V = 25\%$, eine äußerst hohe Streuung aufweist. Begründen lässt sich die hohe Streuung zum einen durch variierende Aufmischungsverhältnisse und Materialeigenschaften im Schweißgut, die sich in Abhängigkeit von der eingebrachten Energie während des Schweißens einstellen, als auch durch die geringe Anzahl an vorliegenden Versuchswerten. Für die in Gleichung (8.4) aufgeführten Gewichtungsfaktoren werden vereinfacht die in Tab. 8-6 angegebenen Mittelwerte von $y = 0,81$ und $z = 0,12$ zugrunde gelegt. In einer späteren statistischen Auswertung besteht die Möglichkeit, die Gewichtungsfaktoren anhand einer Verträglichkeitsprüfung anzupassen.

Tab. 8-6: Statistische Auswertung der Gewichtungsfaktoren y und z

Statistische Kenngrößen	y	z
Mittelwert μ [-]:	0,81	0,12
Standardabweichung σ [-]:	0,02	0,03
Variationskoeffizient V [%]:	3%	25%

8.5.3 Versagensunabhängiges Bemessungskonzept

Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass das auftretende Versagen im Vorhinein nicht immer eindeutig den geplanten Verbindungsparametern zugeordnet werden kann. Demzufolge besteht die Notwendigkeit eine Stumpfnahverbindung von höherfesten Stählen unabhängig von der Werkstoffkombination gegen alle drei Versagensmodi nachzuweisen.

Um ein sicheres und vor allem einfaches Bemessungskonzept für den Anwender bereitzustellen sind in Gleichung (8.5) die festgelegten lokalen Tragfähigkeiten der einzelnen Versagensmodi in einem analytischen Modell kombiniert worden.

$$\sigma_{v,Rd} = \frac{0,81 \cdot x \cdot f_{u,GW} + 0,12 \cdot f_{u,SZW}}{\beta_{bw} \cdot \gamma_{M2}} \quad (8.5)$$

Dabei ist:

$f_{u,GW}$	Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
$f_{u,SZW}$	Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs
x	Erweichungsfaktor in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs nach Tab. 8-7
β_{bw}	Korrelationsbeiwert für Stumpfnahverbindungen
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M2} = 1,25$

Tab. 8-7: Erweichungsfaktoren x in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs

Stahlgüte	Erweichungsfaktor x [-]
S460ML	1,00
S500MC	0,95
S690QL	0,93
S700MC	0,88

Eine Beurteilung der Qualität des hergeleiteten Bemessungskonzepts ist anhand einer statistischen Auswertung unter Einbezug der vorhandenen experimentellen Versuchsdaten vorzunehmen. Mit Hilfe einer im Rahmen der statistischen Auswertung anzusetzenden Verträglichkeitsprüfung ist das entwickelte Konzept an das bestehende Bemessungsproblem anzupassen und zu optimieren. Zusätzlich ist die Notwendigkeit eines Korrelationsbeiwerts β_w (vgl. Gleichung (8.5)), zur Anpassung des aus der statistischen Auswertung hervorgehenden korrigierten Teilsicherheitsbeiwerts γ_M^* , zu überprüfen.

8.6 Statistische Auswertung des Bemessungskonzepts

8.6.1 Vorgehen

Die Gültigkeit bzw. Qualität des in Abschnitt 8.5.3 vorgestellten Bemessungskonzepts ist anhand einer statistischen Auswertung nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24] und nach *Kleiner* [52], unter Einbeziehung der vorhandenen experimentellen Daten, zu überprüfen bzw. anzupassen. Auf eine detaillierte Beschreibung der statistischen Auswertemethoden wird verzichtet, da diese bereits in Abschnitt 6.5 vorgestellt wurden.

Das Auswerteverfahren nach *Kleiner* [52] soll auch für die Stumpfnahverbindungen zum Einsatz kommen, da hier die Möglichkeit gegeben ist, weitere, über die Basisvariablen hinausgehende, wichtige Streuergößen in die statistische Auswertung einfließen lassen zu können. Hierzu zählt, hervorgehend aus den experimentellen und numerischen Ergebnissen, die Beeinflussung aus der im Nahtbereich variierenden Querschnittsdicke. Zwar wäre ebenfalls die Option gegeben, die Streuung, hervorgehend aus den variierenden Energieeinträgen, einzubringen, jedoch wird diese bereits indirekt über die variierenden Nahtquerschnitte sowie über die natürliche Streuung der Versuchsdaten berücksichtigt.

Nach Gleichung (8.5) zählen zu den weiteren Basisvariablen die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs $f_{u,GW}$ sowie die Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs $f_{u,SZW}$. Auf eine Erläuterung der in der Auswertung verwendeten statistischen Kenngrößen der Grundgesamtheit der genannten Basisvariablen wird ebenfalls verzichtet, da diese den in Abschnitt 6.5.3.2 und 6.5.3.3 bereits vorgestellten Werten entsprechen. Die zusätzlich benötigten statistischen Kennwerte der nicht in Abschnitt 6.5.3.2 und 6.5.3.3 aufgetragenen Werkstoffe sind in Anhang F.1 aufgeführt. Die tatsächlichen Festigkeitswerte können Abschnitt 8.2.2 entnommen werden bzw. stammen aus den jeweiligen Literaturstellen der ebenfalls ausgewerteten Versuchsdaten.

Die Bewertung der Gültigkeit bzw. Qualität des Bemessungskonzepts der Stumpfnahverbindungen erfolgt analog zu der Bewertung der Kehlnahverbindungen unter Betrachtung der statistischen Kenngrößen der Mittelwertkorrektur b und des Variationskoeffizienten der Streuergöße V_δ . Die einzuhaltenden Grenzwerte sind entsprechend Abschnitt 6.5.6 festgelegt zu $0,85 \leq b \leq 1,15$ und $V_\delta \leq 10\%$.

8.6.2 Zusätzliche Variable der vorhandenen Nahtüberhöhung

Das Auswerteverfahren nach *Kleiner* [52] ermöglicht die Erfassung zusätzlicher Streuungen in der statistischen Auswertung zur Entwicklung eines optimierten Bemessungskonzepts. Als ein wichtiger weiterer Einflussparameter ging aus der Diskussion der Versuchsergebnisse ein vorhandener erhöhter Querschnitt im Nahtbereich hervor. Es konnte festgestellt werden, dass vor allem eine starke Nahtüberhöhung, die noch innerhalb der nach *DIN EN ISO 5817* [32] angegebenen Grenzwerte der Bewertungsgruppe B liegen, einem kritischen Versagen positiv entgegen wirken können.

Zur Erläuterung des Einflusses auf das Versagen aus der Nahtüberhöhung sei hier noch einmal auf Abschnitt 8.2.4 sowie die numerischen Untersuchungen in Abschnitt 8.4 verwiesen.

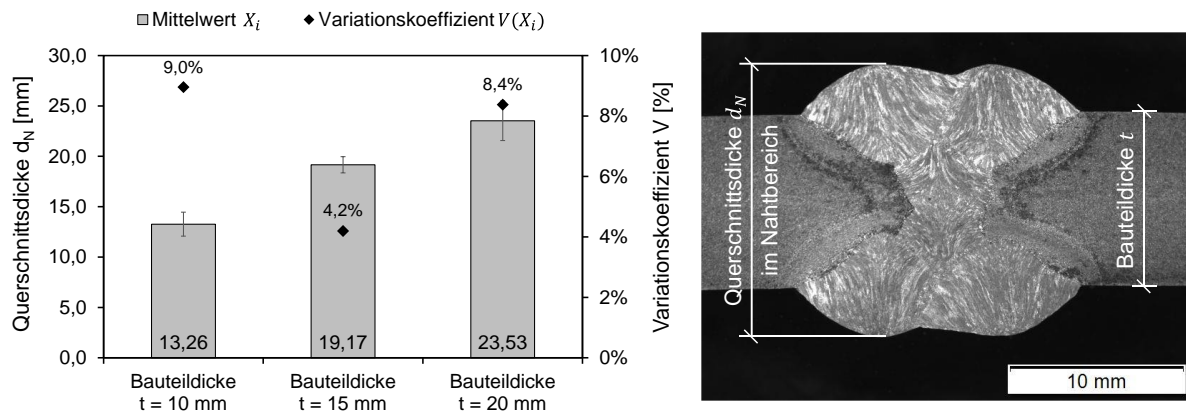


Abb. 8-57: Statistische Auswertung der Grundgesamtheit der Basisvariable der Nahtüberhöhung

Im Zuge der vor der Abtragung der Nahtüberhöhung durchgeführten Vermessung der Versuchskörper zeigte sich, dass die Nahtüberhöhung in Abhängigkeit der verwendeten Schweißprozessparameter stark variiert. Um die davon ausgehende Beeinflussung auf das Versagen in der statistischen Auswertung berücksichtigen zu können, sind die größeren Querschnittsdicken im Bereich der Naht statistisch zu erfassen. Anhand der in Abb. 8-57 aufgeführten Ergebnisse der statistischen Auswertungen werden die bereits erwähnten starken Streuungen des Nahtquerschnitts d_N gerade bei Verbindungen der Bauteildicke $t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$ deutlich. Für Verbindungen der Bauteildicke $t = 15 \text{ mm}$, die ausschließlich Stumpfnähte der Güte S700MC umfassten, kann infolge der hier nicht variierten Schweißprozessparameter eine weniger starke Streuung festgestellt werden. In der statistischen Auswertung nach *Kleiner* [52] werden daher ausschließlich die ermittelten Variationskoeffizienten der Verbindungen der

Dicke $t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$ berücksichtigt und ein Variationskoeffizient von $V(X_i) = 0,09$ (9 %) angesetzt.

8.6.3 Erhebung der statistisch auszuwertenden Datenbasis von Tragfähigkeiten an Stumpfnahverbindungen

Für eine statistische Überprüfung der Gültigkeit des hergeleiteten Bemessungskonzepts aus Gleichung (8.5) bedarf es einer ausreichend großen Datenbasis, die eine praxisnahe Streuung beinhaltet und dadurch die Realität ausreichend genau abbildet. Hierzu sollte die Datenbasis Versuchsergebnisse von Stumpfnahverbindungen unterschiedlicher höherfester Stähle, die mit variierenden Nahtvorbereitungen und Schweißzusatzwerkstoffen unter verschiedenen Energieeinträgen gefertigt wurden, beinhalten. Ergänzend zu den Versuchsdaten des beschriebenen Forschungsvorhabens *HighButtWeld* [36] und der *Zusatzuntersuchung* [57] wurden daher der Datenbasis weitere Versuchswerte aus den in Kapitel 7 vorgestellten Literaturstellen *Maurer* [61], *Collin* [42] und *Björk* [37] zugefügt. Des Weiteren stellte die Firma Voestalpine GmbH eine Sammlung weiterer Versuchswerte [79] zur Verfügung, mit der die zur Kalibrierung des Bemessungskonzepts benötigte Datenbasis unter Ergänzung der Versuchsergebnisse aus [39] auf insgesamt 845 Versuchsdaten erweitert werden konnte. Da die Datenbasis der Firma Voestalpine GmbH [79] ebenfalls die von *Maurer* [61] ausgewerteten Daten umfasst, sind diese in den jeweiligen Tabellen zusammen dargestellt. Die zusätzlichen Daten beinhalten ebenfalls Versuchsergebnisse von Stumpfnahverbindungen an Stählen der Güte S890QL, S900MC, S960QL und S960MC, die derzeit nicht nach *prEN 1993-1-8* [18] geregelt werden.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit, erfolgt im Rahmen der Working Group EN 1993-1-12 (WG12) die Erarbeitung einer neuen Norm *prEN 1993-1-12* [20], die ergänzende Regelungen für Stähle von S700 bis S960 bereitstellen soll. Daher werden die Versuchsdaten der Stumpfnahverbindungen an Stählen, die in dem genannten Gütebereich liegen, ebenfalls statistisch ausgewertet. Die daraus abgeleiteten Ergebnisse dienen der Entwicklung entsprechender Bemessungsregeln, um der Working Group EN 1993-1-12 (WG12) auch Empfehlungen für geschweißte Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle bis S960 zur Verfügung stellen zu können.

8.6.4 Festlegung der Evaluationsgruppen

Basierend auf dem aus den Untersuchungen des Tragverhaltens von Stumpfnahverbindungen hergeleiteten Bemessungsmodells aus (8.5), ist eine Einteilung der Versuchsdaten in Abhängigkeit der verschweißten Grundwerkstoffe vorzunehmen. Begründen lässt sich dies auf das vom Grundwerkstoff abhängende unterschiedliche Verhalten der Gefügewandlung im Bereich der Wärmeeinflusszone, die im Bemessungsmodell durch den Erweichungsfaktor x berücksichtigt werden soll. Die jeweiligen Evaluationsgruppen umfassen daher Tragfähigkeiten von Stumpfnähten gleicher Stahlgüte, ausgeführt als Undermatching-, Matching- und Overmatching-Verbindungen. Die Ergebnisse der Evaluationsgruppen werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert.

8.6.5 Ergebnisse der Evaluationsgruppe S690QL

Die Evaluationsgruppe der Stumpfnahverbindungen an Stählen der Güte S690QL umfasst mit insgesamt 278 die höchste Anzahl an Versuchsdaten, bestehend aus Undermatching-, Matching- und Overmatching-Verbindungen. Die vorliegende Datenbasis enthält somit eine praxisnahe Streuung der Versuchsergebnisse.

Eine erste statistische Auswertung, anhand der in Tab. 8-8 aufgetragenen Versuchsdaten in Kombination mit einer anschließenden Verträglichkeitsprüfung dient der Optimierung des Bemessungsansatzes. Für die statistische Auswertung des Bemessungskonzepts nach Gleichung (8.5) wurde entsprechend der Stahlgüte S690QL ein Erweichungsfaktor von $x = 0,93$ nach Tab. 8-7 berücksichtigt.

Tab. 8-8: Datenbasis der Evaluationsgruppe S690QL

Evaluationsgruppe: S690QL		Anzahl Daten in Abh. des Forschungsvorhabens						Summe
Schweißzusatz- werkstoff	Mismatch	HighButtWeld [36]	Voestalpine [79] Maurer [61]	Collin [42]	Björk [37]	Zusatzunter- suchungen [57]		
G46	Undermatching	18	-	-	-	18	36	
G/T69	Matching	108	24	-	19	24	175	
G79	Overmatching	-	36	-	-	-	36	
G/T89	Overmatching	6	-	-	-	25	31	

Hinsichtlich einer Betrachtung der ermittelten statistischen Kenngrößen kann das zu prüfende Bemessungskonzept für Stumpfnahverbindungen der Stahlgüte S690QL als ausreichend genau eingestuft werden. Die in Tab. 8-9 aufgetragenen Werte der Mittelwertkorrektur und des Variationskoeffizienten der Streugröße liegen mit $b = 1,099$ und $V_\delta = 4\%$ innerhalb der nach Abschnitt 6.5.2 einzuhaltenden Grenzwerte von $0,85 \leq b \leq 1,15$ und $V_\delta \leq 10\%$.

Tab. 8-9: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe S690QL

Evaluationsgruppe: S690QL		$\sigma_{v,Rk} = \frac{x \cdot y \cdot f_{u,GW} + z \cdot f_{u,SZW}}{\beta_{bw}}$										
Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	x [-]	y [-]	z [-]	b [-]	V_δ [%]	V_r [-]	r_k [-]	r_d [-]	γ_{M^*} [-]	γ_{M2} [-]	β_{bw} [-]
<i>DIN EN 1990 Anhang D</i> [24]:	278	0,93	0,81	0,12	1,099	4%	0,051	0,918	0,855	0,98	1,25	0,78
<i>Kleiner</i> [52]:	278	0,93	0,81	0,12	1,099	4%	0,104	0,840	0,726	1,15	1,25	0,92

Die abgeleiteten korrigierten Teilsicherheitsbeiwerte beider Auswerteverfahren aus Tab. 8-9 liegen teilweise unter dem geforderten Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M2} = 1,25$. Aufgrund der starken Abweichung besteht die Möglichkeit das Bemessungskonzept über einen sogenannten Korrelationsbeiwert β_{bw} für Stumpfnahverbindungen auf das angegebene Sicherheitsniveau $\gamma_{M2} = 1,25$ anzuheben. Der Beiwert β_{bw} bestimmt sich aus dem korrigierten und dem tatsächlichen Teilsicherheitsbeiwert nach Gleichung (8.6). Die Festlegung eines anzusetzenden Korrelationsbeiwerts soll jedoch erst im Anschluss einer zur Optimierung der Bemessungsgleichung durchgeführten Verträglichkeitsprüfung erfolgen.

$$\beta_{bw} = \frac{\gamma_{M^*}}{\gamma_{M2}} \quad (8.6)$$

Im Rahmen der Verträglichkeitsprüfung ist zu untersuchen, ob das vorgestellte Bemessungskonzept durch eine Modifizierung eine verbesserte Approximation des Tragverhaltens von Stumpfnahverbindungen aufweist. Hierfür ist eine Mittelwertkorrektur von annähernd $b = 1,0$ anzustreben, was einer genauen Abbildung des realen Tragverhaltens entspricht Aufgrund der nach Abschnitt 8.5.2.4 vorliegenden starken Streuung der hergeleiteten Gewichtungsfaktoren y und z soll eine Kalibrierung des Bemessungsansatzes anhand dieser durchgeführt werden. Anhand einer Iteration können schließlich die Gewichtungsfaktoren von $y = 0,85$ und $z = 0,15$ hergeleitet werden, die für das Bemessungsmodell eine nahezu perfekte Mittelwertkorrektur von $b = 1,02$ erwirken, vgl. Tab. 8-10.

Tab. 8-10: Ergebnis der Verträglichkeitsprüfung der Evaluationsgruppe S690QL

Evaluationsgruppe: S690QL		$\sigma_{v,Rk} = \frac{x \cdot y \cdot f_{u,GW} + z \cdot f_{u,SZW}}{\beta_{bw}}$										
Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	x [-]	y [-]	z [-]	b [-]	V_{δ} [%]	V_r [-]	r_k [-]	r_d [-]	γ_M^* [-]	γ_{M2} [-]	β_{bw} [-]
DIN EN 1990 Anhang D [24]:	278	0,93	0,85	0,15	1,020	4%	0,051	0,919	0,856	1,05	1,25	0,84
Kleiner [52]:	278	0,93	0,85	0,15	1,020	4%	0,103	0,840	0,727	1,24	1,25	0,99

Infolge der angepassten Gewichtungsfaktoren nimmt die Differenz der aus den statistischen Auswertungen abgeleiteten korrigierten Teilsicherheitsbeiwerte γ_M^* zum geforderten Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M2} = 1,25$ ab. Die Auswertung nach dem Verfahren von *Kleiner* [52] führt hier sogar zu einem nahezu identischen Wert. Wird die Streuung der Nahtüberhöhung vernachlässigt, wird mit der Auswertung nach *Anhang D* [24] ein deutlich geringerer Beiwert mit $\gamma_M^* = 1,05$ erreicht. Auf der sicheren Seite ist daher das Auswerteverfahren nach *Kleiner* [52] zu betrachten. Resultierend aus der geringeren Abweichung zwischen dem korrigierten und dem geforderten Teilsicherheitsbeiwert wird auf eine Korrektur des Bemessungsmodells durch einen Korrelationsbeiwert verzichtet bzw. ein $\beta_{bw} = 1,0$ vorgeschlagen.

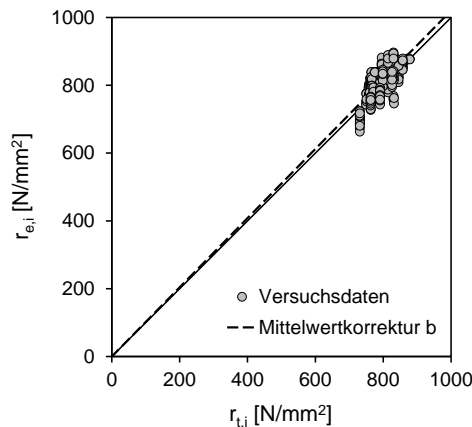


Abb. 8-58: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe S690QL

Insgesamt kann die Qualität des Bemessungsmodells für Stumpfnahverbindungen der Güte S690QL als hinreichend genau eingestuft werden. Abb. 8-58 zeigt, anhand der über die aus dem Bemessungsmodell hergeleiteten Widerstandswerte $r_{t,i}$ aufgetragenen tatsächlich vorhandenen Tragfähigkeiten $r_{e,i}$, die sehr gute Abbildung des realen Tragverhaltens von Undermatching-, Matching- und Overmatching-Stumpfnahverbindungen an Stählen der Güte

S690QL. Die Ermittlung der Widerstandswerte $r_{t,i}$ erfolgte unter Einbezug der tatsächlich vorhandenen Festigkeitswerte der Verbindungen.

8.6.6 Ergebnisse der Evaluationsgruppe S700MC

Die Evaluationsgruppe der Stumpfnahverbindungen der Stahlgüte S700MC umfasst insgesamt 216 Versuchsdaten von Undermatching- und Overmatching-Verbindungen, siehe Tab. 8-11. Da für den S700 ein entsprechender Schweißzusatzwerkstoff für eine Matching-Verbindung ($M = 1,0$) nicht zur Verfügung steht, können diese vernachlässigt werden. Somit liegt auch hier für die Auswertung eine praxisnahe Streuung der Versuchsdaten vor.

Tab. 8-11: Datenbasis der Evaluationsgruppe S700MC

Evaluationsgruppe: S700MC		Anzahl Daten in Abh. des Forschungsvorhabens					Zusatzunter- suchungen [57]	Summe
Schweißzusatz- werkstoff	Mismatch	HighButtWeld [36]	Voestalpine [79] Maurer [61]	Collin [42]	Björk [37]			
G/T69	Undermatching	-	58	-	12	-	70	
G79	Overmatching	-	80	-	-	-	80	
G/T89	Overmatching	36	30	-	-	-	66	

In einer ersten statistischen Auswertung wird die Gleichung (8.5) unter Einbezug der in Abschnitt 8.5.2.4 ermittelten Gewichtungsfaktoren $y = 0,81$ und $z = 0,12$ betrachtet. In der Ergebnistabelle Tab. 8-12 sind diese durch die Bezeichnung A1 gekennzeichnet. Im Weiteren soll geprüft werden, ob eine Korrektur der Gewichtungsfaktoren entsprechend den aus der Verträglichkeitsprüfung der Evaluationsgruppe S690QL hervorgehenden Faktoren die Qualität des Bemessungskonzepts für Verbindungen der Güte S700MC verbessert. Daher erfolgt eine weitere statistische Auswertung, gekennzeichnet durch A2, unter Ansatz der Gewichtungsfaktoren $y = 0,85$ und $z = 0,15$. Als Erweichungsfaktor ist den Auswertungen $x = 0,88$ nach Tab. 8-7 zugrunde zu legen.

Für Stumpfnahverbindungen an Stählen der Güte S700MC ist das auszuwertende Bemessungskonzept der ersten Auswertung (A1) als ausreichend genau einzustufen. Die in Tab. 8-12 aufgeführten statistischen Größen der Mittelwertkorrektur und des Variationskoeffizienten der Streugröße liegen in den jeweils festgelegten Grenzbereichen.

Im Vergleich kann infolge einer Anpassung der Gewichtungsfaktoren (A2) eine Verbesserung des Bemessungskonzepts hinsichtlich seiner Qualität erreicht werden. Die in Tab. 8-12 aufgetragene Mittelwertkorrektur $b = 1,042$ macht deutlich, dass das Bemessungsmodell die tatsächlich vorhandenen Tragfähigkeiten gut abbildet. Aufgrund der besseren Ergebnisse der Auswertung unter Ansatz der angepassten Gewichtungsfaktoren sind diese für die Bemessung einer Stumpfnahverbindung der Güte S700MC zu bevorzugen.

Tab. 8-12: Ergebnisse der statistischen Auswertungen der Evaluationsgruppe S700MC

Evaluationsgruppe: S700MC		$\sigma_{v,Rk} = \frac{x \cdot y \cdot f_{u,GW} + z \cdot f_{u,SZW}}{\beta_{bw}}$											
Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	x [-]	y [-]	z [-]	b [-]	V_{δ} [%]	V_r [-]	r_k [-]	r_d [-]	γ_{M}^* [-]	γ_{M2} [-]	β_{bw} [-]	
<i>DIN EN 1990 Anhang D</i> [24]:	A1:	216	0,88	0,81	0,12	1,126	3%	0,070	0,890	0,807	0,95	1,25	0,76
	A2:	216	0,88	0,85	0,15	1,042	3%	0,068	0,892	0,810	1,03	1,25	0,82
<i>Kleiner</i> [52]:	A1:	216	0,88	0,81	0,12	1,126	3%	0,114	0,826	0,705	1,10	1,25	0,88
	A2:	216	0,88	0,85	0,15	1,042	3%	0,113	0,827	0,706	1,18	1,25	0,95

Die Untersuchung eines anzusetzenden Korrelationsbeiwerts erfolgt daher anhand der Ergebnisse der zweiten Auswertung (A2). Tab. 8-12 ist zu entnehmen, dass sowohl für die Auswertung nach *Anhang D* [24] als auch nach *Kleiner* [52] die resultierenden korrigierten Teilsicherheitsbeiwerte γ_{M}^* eine relativ große Differenz zu dem einzuhaltenden Teilsicherheitsbeiwert γ_{M2} aufweisen. Als maßgebend werden auch hier die Ergebnisse nach *Kleiner* [52] betrachtet, da der resultierende Teilsicherheitsbeiwert über dem Beiwert nach *Anhang D* [24] liegt. Somit kann für das Bemessungsmodell ein Korrelationsbeiwert von $\beta_{bw} = 0,95$ hergeleitet werden.

Betrachtet man die experimentell ermittelten Tragfähigkeiten $r_{e,i}$, aufgetragen über die aus dem Bemessungsmodell unter Ansatz des Korrelationsbeiwerts und der tatsächlichen Festigkeitswerten ermittelten Grenzspannungen $r_{t,i}$ in Abb. 8-59, zeigt sich auch hier die gute Qualität des Bemessungsansatzes für Undermatching- und Overmatching-Verbindungen der Güte S700MC.

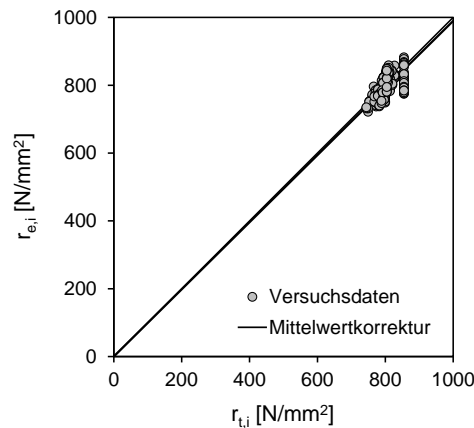


Abb. 8-59: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe S700MC

8.6.7 Ergebnisse der Evaluationsgruppe S460ML

Der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe der Stahlgüte S460ML können lediglich 18 Versuche an Matching-Verbindungen zugeordnet werden, vgl. Tab. 8-13. Ergebnisse von Overmatching- sowie Undermatching-Verbindungen liegen aus der Datenbasis nicht vor. Zu berücksichtigen ist, dass die statistisch ausgewerteten Daten ausschließlich Versuchswerte aus dem Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] enthalten. Eine Variierung der Schweißparameter bzw. des Schweißzusatzwerkstoffs wurde hier nicht untersucht, weshalb eine weniger gute Abbildung der natürlichen Streuung aus der Praxis vorliegt. Aus den Versuchen konnte kein kritisches Versagen und eine daraus resultierende Tragfähigkeitsminderung beobachtet werden, weshalb ein beibehalten des bisher gültigen Bemessungsmodells nach *prEN 1993-1-8* [18] bzw. nach *prEN 1993-1-1* [19] in Betracht gezogen werden kann. Die Bemessung einer Undermatching-Verbindung ist in diesem Fall jedoch nicht klar geregelt. Eine Auswertung soll deshalb auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse trotzdem durchgeführt werden, da das angepasste Konzept nach Gleichung (8.5) einen definierten Bemessungsansatz für Undermatching-Verbindungen bietet. Die Gültigkeit des Konzepts ist jedoch aufgrund fehlender Versuchsergebnissen im Hinblick auf die Bemessung von Undermatching-Verbindungen kritisch zu betrachten.

Tab. 8-13: Datenbasis der Evaluationsgruppe S460ML

Evaluationsgruppe: S460ML		Anzahl Daten in Abh. des Forschungsvorhabens					Zusatzunter- suchungen [57]	Summe
Schweißzusatz- werkstoff	Mismatch	HighButtWeld [36]	Voestalpine [79] Maurer [61]	Collin [42]	Björk [37]			
G46	Matching	18	-	-	-	-	18	

Der zu berücksichtigende Erweichungsfaktor ist nach Tab. 8-7 zu $x = 1,0$ anzusetzen, da die Härtemappings der Stähle der Güte S460ML keine Erweichung in der Wärmeeinflusszone aufwiesen, vgl. Abschnitt 8.3.4. Als Gewichtungsfaktoren werden in einer ersten Auswertung (A1) die in Abschnitt 8.5.2.4 festgelegten Werte verwendet und mit den Ergebnissen einer zweiten Auswertung (A2), unter Ansatz der in Abschnitt 8.6.5 angepassten Gewichtungsfaktoren, verglichen.

Die Qualität des Bemessungskonzepts für Verbindungen der Güte S460ML kann anhand der in Tab. 8-14 aufgeführten Ergebnisse beider Gleichungsmodelle (A1 und A2) als ausreichend eingestuft werden. Die dafür zu betrachtenden statistischen Größen der Mittelwertkorrektur b und des Variationskoeffizienten der Streugröße V_δ liegen in den vorgegebenen Grenzwertbereichen. Die Mittelwertkorrektur der ersten (A1) sowie der zweiten Auswertung (A2) weichen ähnlich stark vom angestrebten Wert $b = 1,0$ ab. Insgesamt werden jedoch die korrigierten Gewichtungsfaktoren $y = 0,85$ und $z = 0,15$ bevorzugen, da hier geringere Abweichungen zwischen den nach *Kleiner* [52] und nach *Anhang D* [24] ermittelten korrigierten Teilsicherheitsbeiwerten γ_M^* und dem einzuhaltenden Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M2} = 1,25$ vorliegen. Als Maßgebend ist auch hier das Auswerteverfahren nach *Kleiner* [52] zu betrachten, da die Ergebnisse durch die zusätzliche Berücksichtigung der Streuung der Nahtüberhöhung auf der sicheren Seite liegt.

Tab. 8-14: Ergebnisse der statistischen Auswertungen der Evaluationsgruppe S460ML

Evaluationsgruppe: S460ML	Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	$\sigma_{v,Rk} = \frac{x \cdot y \cdot f_{u,GW} + z \cdot f_{u,SZW}}{\beta_{BW}}$										
			x [-]	y [-]	z [-]	b [-]	V_δ [%]	V_r [-]	r_k [-]	r_d [-]	γ_M^* [-]	γ_{M2} [-]	β_{BW} [-]
<i>DIN EN 1990 Anhang D</i> [24]:	A1:	18	1,00	0,81	0,12	1,040	2%	0,051	0,917	0,847	1,00	1,25	0,80
	A2:	18	1,00	0,85	0,15	0,964	2%	0,050	0,918	0,849	1,07	1,25	0,86
<i>Kleiner</i> [52]:	A1:	18	1,00	0,81	0,12	1,040	2%	0,104	0,839	0,723	1,17	1,25	0,93
	A2:	18	1,00	0,85	0,15	0,964	2%	0,103	0,839	0,724	1,26	1,25	1,01

Nach *Kleiner* [52] kann ein nahezu identischer Wert mit $\gamma_M^* = 1,26$, unter Ansatz der angepassten Gewichtungsfaktoren ($y = 0,85$ und $z = 0,15$), Tab. 8-14 entnommen werden. Aufgrund der vernachlässigbar geringen Abweichung der Teilsicherheitsbeiwerte, ist auf Basis der vorliegenden Versuchsdaten für Verbindungen der Güte S460ML ein Korrelationsbeiwert von $\beta_{bw} = 1,0$ zu empfehlen.

In Abb. 8-60 sind die tatsächlichen Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ über die aus dem Bemessungsmodell abgeleiteten Widerstandswerte $r_{t,i}$ aufgetragen und bestätigen die durch das Bemessungsmodell gute Abbildung des realen Tragverhaltens der ausgewerteten Matching-Verbindungen. Aufgrund der geringen Anzahl an Versuchsdaten sind jedoch weitere Untersuchungen zur Absicherung von Undermatching- als auch Overmatching-Verbindungen mit Stahl der Güte S460 vorzunehmen.

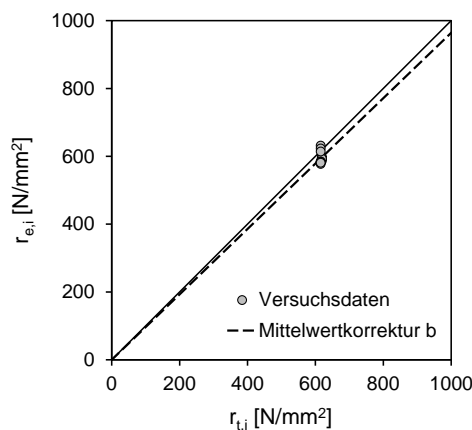


Abb. 8-60: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe S460ML

Aufgrund fehlender Versuchsdaten ist der erweiterte Bemessungsansatz hinsichtlich der daraus resultierenden Bemessungsgrenzspannungen für Undermatching- sowie Overmatching-Verbindungen gesondert zu beurteilen. Hierzu sind in Abb. 8-61 die Bemessungsgrenzspannungen, ermittelt nach dem bisherigen Konzept nach *prEN 1993-1-8* [18] bzw. nach *prEN 1993-1-1* [19] (schwarze Datenreihe) unter Ansatz der Streckgrenze $f_{y,GW}$ und des Teilsicherheitsbeiwerts $\gamma_{M0} = 1,0$, den durch das erweiterte Modell ermittelten Werten (rote Datenreihe) unter Verwendung der Zugfestigkeiten $f_{u,GW}$ und $f_{u,SZW}$ und des Teilsicherheitsbeiwerts $\gamma_{M2} = 1,25$ gegenübergestellt. Zur Ermittlung der Bemessungsgrenzspannungen der Undermatching-Verbindungen ist für das Konzept nach *prEN 1993-1-8* [18] die Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs in Kombination des Teilsicherheitsbeiwerts $\gamma_{M2} = 1,25$ berücksichtigt.

Abb. 8-61 ist zu entnehmen, dass die Abweichung der beiden Bemessungsansätze gering ist. Für Undermatching-Verbindungen fällt die Tragfähigkeitssteigerung durch das angepasste Modell nach Gleichung (8.5) mit 6 % gering aus. Auch für Overmatching-Verbindungen lässt sich Abb. 8-61 eine Steigerung von vernachlässigbaren 3 % bzw. 4 % entnehmen. Aufgrund der nicht möglichen Vergleichbarkeit von experimentell ermittelten Tragfähigkeiten und Bemessungsgrenzspannungen sowie der Beobachtung einer nicht vorhandenen Weichen Zone der Verbindungen mit Stahl der Güte S460ML (vgl. Abschnitt 8.3.4), ist auf der sicheren Seite das Bemessungskonzept nach *prEN 1993-1-8* [18] bzw. nach *prEN 1993-1-1* [19] beizubehalten. Dies beinhaltet somit die Bemessung von Matching- und Overmatching-Verbindungen auf Basis der Festigkeit des Grundwerkstoffes und für Undermatching-Verbindungen auf Basis der Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffes unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwerts γ_{M2} .

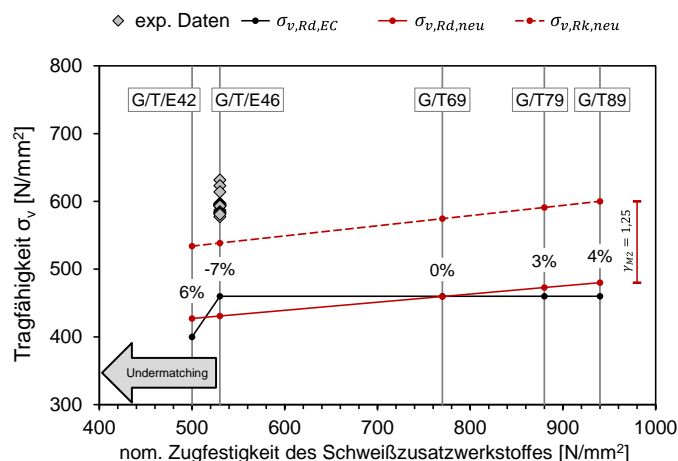


Abb. 8-61: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S460ML

8.6.8 Ergebnisse der Evaluationsgruppe S500MC

Die Evaluationsgruppe der Stumpfnahverbindungen von Stählen der Güte S500MC umfasst eine geringe Anzahl von 13 Daten, die ausschließlich Overmatching-Verbindungen beinhaltet, vgl. Tab. 8-15. Aufgrund der geringen Versuchsergebnisse kann eine praxisnahe Streuung nicht gewährleistet werden.

In einer ersten Auswertung (A1) werden zunächst die Ergebnisse unter Verwendung der nach Abschnitt 8.5.2.4 ermittelten Gewichtungsfaktoren betrachtet und mit den Ergebnissen der zweiten Auswertung (A2) unter Ansatz der angepassten Gewichtungsfaktoren $\gamma = 0,85$ und

$z = 0,15$ verglichen. Für den Erweichungsfaktor wird entsprechend Tab. 8-7 ein Wert von $x = 0,95$ berücksichtigt.

Tab. 8-15: Datenbasis der Evaluationsgruppe S500MC

Evaluationsgruppe: S500MC		Anzahl Daten in Abh. des Forschungsvorhabens						Summe
Schweißzusatz- werkstoff	Mismatch	HighButtWeld [36]	Voestalpine [79] Maurer [61]	Collin [42]	Björk [37]	Zusatzunter- suchungen [57]		
G/T69	Overmatching	-	-	-	13	-	13	

Den Ergebnissen der statistischen Auswertung aus Tab. 8-16 ist zu entnehmen, dass unter Ansatz der korrigierten Gewichtungsfaktoren das reale Tragverhalten von Verbindungen der Güte S500MC besser abgebildet werden kann. Die in Tab. 8-16 aufgetragene Mittelwertkorrektur b weicht gerade mal um 1,4 % vom anzustrebenden Wert $b = 1,0$ ab, weshalb die angepassten Gewichtungsfaktoren zu bevorzugen sind.

Tab. 8-16: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe S500MC

Evaluationsgruppe: S500MC		$\sigma_{v,Rk} = \frac{x \cdot y \cdot f_{u,GW} + z \cdot f_{u,SZW}}{\beta_{bw}}$											
Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	x [-]	y [-]	z [-]	b [-]	V_δ [%]	V_r [-]	r_k [-]	r_d [-]	γ_M^* [-]	γ_{M2} [-]	β_{bw} [-]	
DIN EN 1990 Anhang D [24]:	A1:	13	0,95	0,81	0,12	1,097	2%	0,048	0,921	0,853	0,90	1,25	0,72
	A2:	13	0,95	0,85	0,15	1,014	2%	0,047	0,922	0,855	0,97	1,25	0,78
Kleiner [52]:	A1:	13	0,95	0,81	0,12	1,097	2%	0,102	0,841	0,726	1,05	1,25	0,84
	A2:	13	0,95	0,85	0,15	1,014	2%	0,102	0,842	0,727	1,14	1,25	0,91

Hinsichtlich einer Anpassung des Bemessungsmodells durch den Korrelationsbeiwert β_{bw} ist der nach Kleiner [52] statistisch ermittelte korrigierte Teilsicherheitsbeiwert der zweiten Auswertung (A2) als maßgebend zu betrachten. Infolge des verringerten Teilsicherheitsbeiwerts $\gamma_M^* = 1,14$ besteht auch hier die Möglichkeit das Bemessungsmodell mit Hilfe von $\beta_{bw} = 0,91$ anzuheben. Aufgrund der geringen Anzahl an Versuchsergebnissen wird auf eine Anpassung verzichtet. In Abb. 8-62 sind die experimentell ermittelten Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ über die unter Berücksichtigung der tatsächlich vorhandenen Festigkeitswerte ermittelten theoretischen Werte des Bemessungsmodells $r_{t,i}$ aufgetragen.

Wie bereits bei der Auswertung der Verbindungen mit S460 angemerkt, sind auch hier Untersuchungen an Matching- sowie Undermatching-Verbindungen zur Absicherung des analytischen Modells zu ergänzen.

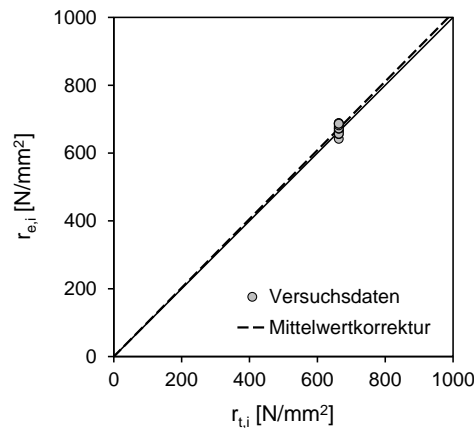


Abb. 8-62: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe S500MC

8.6.9 Ergebnisse der Evaluationsgruppen S890QL, S900MC, S960QL und S960MC

Abschließend werden die statistischen Ergebnisse der ausgewerteten Evaluationsgruppen von Baustählen, die dem Festigkeitsbereich S700 bis S960 angehören, vorgestellt. Anhand der Auswertungen sind ergänzende Empfehlungen zur Bemessung von Stumpfnahverbindungen an Stählen einer Stahlgüte über S700 für den neuen Normenteil *prEN 1993-1-12* [20] zu erarbeiten. Die verwendeten Versuchsdaten können in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs Tab. 8-17 entnommen werden. Anzumerken ist, dass hier fast ausschließlich Undermatching-Verbindungen vorliegen, da der Praxis Schweißzusatzwerkstoffe zur Erzeugung von Matching- bzw. Overmatching-Verbindungen nur bedingt vorliegen.

Tab. 8-17: Datenbasis der Evaluationsgruppen S890QL, S900MC, S960MC und S960QL

Evaluationsgruppe	Schweißzusatzwerkstoff	Mismatch	Anzahl Daten in Abh. des Forschungsvorhabens			Summe
			Voestalpine [79]	Ongelin [39]	Collin [42]	
S890QL	G89	Matching	38	-	-	38
S900MC	G/T89	Undermatching	142	-	-	142
S960MC	G/T89	Undermatching	69	-	-	69
	G46	Undermatching	3	-	-	3
	G69	Undermatching	-	6	-	6
S960QL	G/T89	Undermatching	56	-	-	56
	PZ6145	Undermatching	-	-	3	3
	PZ6149	Undermatching	-	-	3	3

Die statistischen Auswertungen basieren auf dem in Gleichung (8.5) aufgeführten Bemessungskonzept, unter Berücksichtigung der aus der Verträglichkeitsprüfung angepassten Gewichtungsfaktoren $y = 0,85$ und $z = 0,15$. Da in den vorherigen Auswertungen jeweils bessere Qualitäten der Bemessungsgleichung unter Ansatz der angepassten Gewichtungsfaktoren erreicht wurden, wird auf eine Auswertung unter Berücksichtigung der in Abschnitt 8.5.2.4 hergeleiteten Gewichtungsfaktoren verzichtet.

Die vorliegenden Versuchsergebnisse umfassen ausschließlich Verbindungen, deren Nahtüberhöhung abgetragen wurde. Informationen bezüglich der tatsächlich vorhandenen Nahtgeometrie liegen nicht vor. Um jedoch für das Auswerteverfahren nach *Kleiner* [52] eine in der Praxis auftretende Streuung der Nahtdicke, bspw. infolge variierender Schweißparameter, berücksichtigen zu können, wird der in Abschnitt 8.6.9 hergeleitete Variationskoeffizient von $V(X_i) = 0,09$ (9 %) angesetzt.

Derzeit liegen aus der Norm keine Angaben hinsichtlich der in der Bemessung anzusetzenden nominellen Zugfestigkeit von Grundwerkstoffen oberhalb einer Stahlgüte von S700 vor. Daher werden für die statistischen Auswertungen die unteren Grenzwerte der jeweils geltenden Produktnorm angesetzt. Die Festlegung der noch fehlenden Erweichungsfaktoren x erfolgt entsprechend dem in Abschnitt 8.5.2.3 vorgestellten Vorgehen. Die hergeleiteten Erweichungsfaktoren können Tab. 8-18 in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs entnommen werden.

Tab. 8-18: Statistische Auswertungen der Erweichungsfaktoren x der Stahlgüten S890QL, S900MC, S960MC und S960QL

Statistische Kenngrößen	S890QL	S900MC	S960MC	S960QL
Mittelwert $\mu(x)$ [-]:	0,98	0,98	0,98	0,98
Standardabweichung $\sigma(x)$ [-]:	0,01	0,02	0,03	0,03
Variationskoeffizient $V(x)$ [%]:	1%	0,02	3%	3%
festgelegter Erweichungsfaktor x : [-]:	0,96	0,95	0,94	0,93
Anzahl [-]	14	38	69	27

Die Ergebnisse der Auswertungen sind in Abhängigkeit der Evaluationsgruppe in Tab. 8-19 aufgeführt. Die aufgetragenen Mittelwertkorrekturen b aller Evaluationsgruppen bestätigen eine gute bis sehr gute Abbildung des realen Tragverhaltens durch das zu überprüfende Konzept. Auch der Variationskoeffizient der Streugröße V_δ liegt unter dem festgelegten Höchstwert, weshalb insgesamt dem Bemessungsmodell für Stumpfnahverbindungen an Stählen einer Güte $> S700$ eine gute Qualität zu zuschreiben ist.

Tab. 8-19: Ergebnisse der statistischen Auswertungen der Evaluationsgruppen S890QL, S900MC, S960MC und S960QL

Evaluationsgruppen:		$\sigma_{v,Rk} = \frac{x \cdot y \cdot f_{u,GW} + z \cdot f_{u,SZW}}{\beta_{bw}}$											
Ergebnisse der stat. Auswertung	Anzahl	x [-]	y [-]	z [-]	b [-]	V_{δ} [%]	V_r [-]	r_k [-]	r_d [-]	γ_M^* [-]	γ_{M2} [-]	β_{bw} [-]	
S890QL	DIN EN 1990 Anhang D [24]:	38	0,96	0,85	0,15	1,026	1%	0,023	0,963	0,932	0,99	1,25	0,80
	Kleiner [52]:	38	0,96	0,85	0,15	1,026	1%	0,093	0,855	0,751	1,23	1,25	0,99
S900MC	DIN EN 1990 Anhang D [24]:	142	0,95	0,85	0,15	1,025	2%	0,044	0,930	0,874	0,90	1,25	0,72
	Kleiner [52]:	142	0,95	0,85	0,15	1,025	2%	0,100	0,845	0,734	1,07	1,25	0,86
S960MC	DIN EN 1990 Anhang D [24]:	69	0,94	0,85	0,15	1,025	3%	0,050	0,919	0,854	1,06	1,25	0,85
	Kleiner [52]:	69	0,94	0,85	0,15	1,025	3%	0,103	0,840	0,726	1,25	1,25	1,00
S960QL	DIN EN 1990 Anhang D [24]:	71	0,93	0,85	0,15	1,042	4%	0,057	0,908	0,834	1,07	1,25	0,85
	Kleiner [52]:	71	0,93	0,85	0,15	1,042	4%	0,107	0,835	0,718	1,24	1,25	0,99

Die Festlegung eines anzusetzenden Korrelationsbeiwerts β_{bw} erfolgt anhand der Ergebnisse der nach Kleiner [52] durchgeführten Auswertung. Betrachtet man die in Tab. 8-19 abgeleiteten Korrelationsbeiwerte, lässt sich lediglich für die Evaluationsgruppe S900MC eine mögliche Anpassung der Bemessungsgleichung durch einen Beiwert von $\beta_{bw} = 0,86$ ableiten. Basierend auf den vorliegenden Versuchsergebnissen wird jedoch auf der sicheren Seite liegend auf ein Anheben der Bemessungsgrenzspannung durch den Korrelationsbeiwert verzichtet. Dies ist begründet durch die vorliegenden Versuchsergebnisse, die ausschließlich Daten von Verbindungen, geschweißt mit derselben Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs (G/T89), beinhalten. Zur Absicherung sollten hier, als auch für alle weiteren Evaluationsgruppen in Tab. 8-19, der Datenpool durch Verbindungen, geschweißt mit variierenden Schweißzusatzwerkstoffen, ergänzt werden. Dies ermöglicht bspw. die Untersuchung unterschiedlicher Undermatching-Level um ggf. die von Törnblom [74] und Collin [42] festgestellte Beeinflussung auf das auftretende Versagen betrachten zu können.

8.6.10 Empfehlung eines Bemessungsansatzes für Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle

Mit Hilfe der aus dem Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] und der *Zusatzuntersuchungen* [57] erarbeiteten Erkenntnissen über das Tragverhalten von durchgeschweißten Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle war es möglich, eine empirische Bemessungsgleichung herzuleiten, die anhand von insgesamt 845 Versuchsdaten statistisch überprüft und optimiert wurde. Des Weiteren ist den statistischen Auswertungen zu entnehmen, dass der in Abhängigkeit der Evaluationsgruppe abgeleitete korrigierte Teilsicherheitsbeiwert γ_{M^*} teilweise gering von dem für Verbindungen gültigen Teilsicherheitsbeiwert γ_{M2} abweicht. Es besteht die Möglichkeit die Abweichung im Bemessungsmodell durch einen Korrelationsbeiwert β_{bw} auszugleichen. Da jedoch lediglich eine Anpassung für Verbindungen der Stahlgüte S700MC nennenswert war, jedoch der Korrelationsbeiwert von $\beta_{bw} = 1,0$ im Gegensatz zu $\beta_{bw} = 0,95$ auf der sicheren Seite liegt, wird auf eine Anwendung des Korrelationsbeiwerts verzichtet. Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen und vorliegenden Versuchsdaten wird als Bemessungsmodell für Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle ab einer Stahlgüte von S500 bis zu einer Stahlgüte S960 das folgende Konzept vorgeschlagen:

$$\sigma_{v,Rd} = \frac{0,85 \cdot x \cdot f_{u,GW} + 0,15 \cdot f_{u,SZW}}{\gamma_{M2}} \quad (8.7)$$

Dabei ist:

$f_{u,GW}$	Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
$f_{u,SZW}$	Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs
x	Erweichungsfaktor in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs nach Tab. 8-20
γ_{M2}	Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M2} = 1,25$

Tab. 8-20: Erweichungsfaktoren x in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs

Stahlgüte	Erweichungsfaktor x [-]
S500MC	0,95
S690QL	0,93
S700MC	0,88
S890QL	0,96
S900MC	0,95
S960MC	0,94
S960QL	0,93

Aufgrund der guten Korrelation zwischen den theoretischen Werten $r_{t,i}$, ermittelt unter Ansatz der jeweils tatsächlich vorhandenen Materialfestigkeiten, und den vorliegenden Versuchsdaten $r_{e,i}$ in Abb. 8-63 wird noch einmal verdeutlicht, dass das entwickelte Modell das reale Tragverhalten von durchgeschweißten Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle sehr gut abbildet. Das in dieser Arbeit entwickelte Bemessungskonzept wurde bereits dem Normenausschuss anhand des *Amendments N3092* [33] vorgeschlagen.

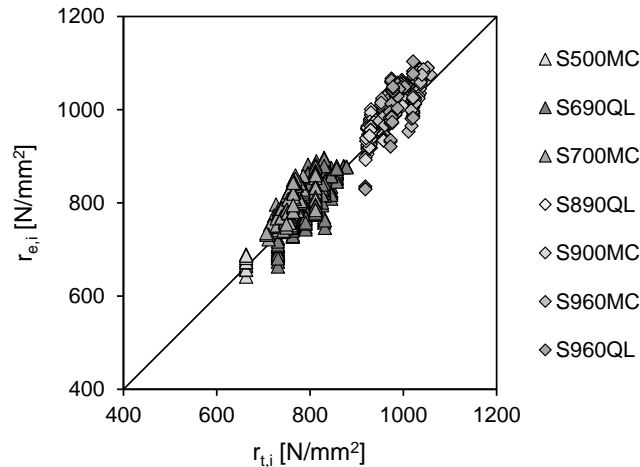


Abb. 8-63: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ aller geprüfter Stumpfnahverbindungen

8.6.11 Vergleich des Bemessungsvorschlags mit dem derzeit gültigen Konzept nach *prEN 1993-1-8* [18] bzw. *prEN 1993-1-1* [19]

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte neue Bemessungsmodell wird im Folgenden mit dem derzeit gültigen Bemessungskonzept nach *prEN 1993-1-8* [18] bzw. *prEN 1993-1-1* [19] verglichen. In den dargestellten Diagrammen aus Abb. 8-64 bis Abb. 8-66 sind hierfür die nach dem derzeit gültigen Konzept der *prEN 1993-1-8* [18] bzw. *prEN 1993-1-1* [19] ermittelten Bemessungsgrenzspannungen $\sigma_{v,Rd,EC}$ (schwarze Datenreihe) den aus dem neuen Bemessungsmodell nach Gleichung (8.7) resultierenden Werten $\sigma_{v,Rd,neu}$ (rote Datenreihe) gegenübergestellt. Ergänzend sind die für die statistischen Auswertungen herangezogenen Versuchsdaten in den Diagrammen aufgetragen. Am Beispiel der Gegenüberstellung für Stumpfnahverbindungen an Stählen der Güte S690QL in Abb. 8-64 und der Güte S700MC in Abb. 8-65, sollen die positiven Aspekte des neuen Bemessungsmodells aufgezeigt werden.

Zu erwähnen ist in erster Linie, das durch das neue Konzept klar definierte Vorgehen für eine Bemessung von Undermatching-, Matching- und Overmatching-Verbindungen. Aus den bisherigen Bemessungsregeln nach *prEN 1993-1-8* [18] geht insbesondere im Fall von Undermatching-Verbindungen keine eindeutige Handhabung hervor. Aufgrund der nicht klaren Bemessungsdurchführung ist anzumerken, dass die Bemessungsgrenzspannungen $\sigma_{v,Rd,EC}$, der in Abb. 8-64 bis Abb. 8-66 aufgetragenen Undermatching-Verbindungen, anhand der nominalen Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs $f_{u,SZW}$ in Kombination des Teilsicherheitsbeiwerts γ_{M2} ermittelt wurden. Die Bemessungsgrenzspannungen $\sigma_{v,Rd,EC}$ der Matching- sowie Overmatching-Verbindungen sind unter Ansatz der nominalen Streckgrenze des Grundwerkstoffs $f_{y,GW}$ in Kombination des Teilsicherheitsbeiwerts γ_{M0} bestimmt worden.

Der Vergleich beider Modelle in Abb. 8-64 zeigt, dass das derzeit gültige Konzept eine hohe Abweichung zu den vorliegenden Tragfähigkeiten bei Undermatching-Verbindungen mit Stahl der Güte S690QL aufweist. Das neue Bemessungskonzept liefert hier wesentlich wirtschaftlichere Lösungen, da die tragfähigkeitssteigernden Effekte infolge einer Aufmischung mit dem höherfesten Grundwerkstoff im Schweißgut in der Bemessung berücksichtigt werden können.

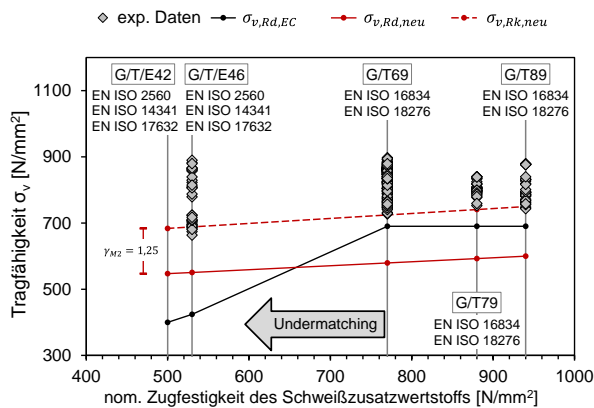


Abb. 8-64: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S690QL

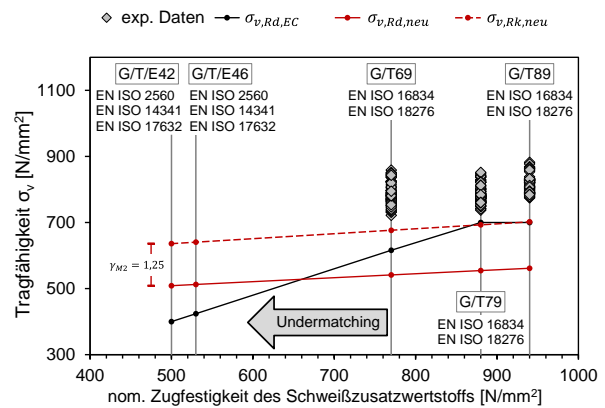


Abb. 8-65: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S700MC

Betrachtet man die in Abb. 8-64 und Abb. 8-65 aufgetragenen Matching- und Overmatching-Verbindungen zeigt sich hingegen ein zum Teil sehr geringer Abstand zwischen den aufgeführten Versuchsdaten und den nach *prEN 1993-1-8* [18] bzw. *prEN 1993-1-1* [19] ermittelten Bemessungsgrenzspannungen. Im Hinblick auf das in den Versuchen beobachtete kritische Versagen in der Wärmeeinflusszone und einer daraus resultierenden Tragfähigkeitsabnahme ist der geringe Abstand als tendenziell kritisch zu bewerten. Unsicherheiten auf der Wider-

standsseite durch bspw. Streuungen der Materialeigenschaften und geometrischen Eigenschaften als auch die Gefahr der Ausbildung einer unzulässig hohen Weichen Zone während des Schweißprozesses können durch das Konzept ggf. nicht ausreichend abgedeckt werden.

Zwischen den experimentellen Daten und der Grenzspannung $\sigma_{v,Rk,neu}$ des neuen Konzepts zeigt sich zwar ebenfalls ein geringer Abstand, jedoch wird hier durch Ansatz des Teilsicherheitsbeiwerts $\gamma_{M2} = 1,25$ eine ausreichend hohe Sicherheit für die Bemessungsgrenzspannungen $\sigma_{v,Rd,neu}$ erzeugt.

Ebenfalls positiv zu bewerten ist die durch das modifizierte Konzept gegebene Möglichkeit einer zusätzlichen Berücksichtigung tragfähigkeitssteigernder Stützeffekte, trotz vorhandener Weichen Zone, bei Verwendung eines höherfesten Schweißzusatzwerkstoffs. Vergleicht man insgesamt den Verlauf der mit der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs zunehmenden Tragfähigkeit der Versuchsergebnisse, lässt sich eine bessere Affinität zu den experimentellen Daten durch das neue Bemessungskonzept feststellen.

Entsprechend Abb. 8-66 kann das neue Konzept für die Bemessung von Stumpfnahverbindungen an Stählen der Güte S500MC ebenfalls als anwendbare Alternative eingestuft werden. Die Bemessungsgrenzspannungen, ermittelt nach dem derzeit gültigen Konzept *prEN 1993-1-8* [18] bzw. *prEN 1993-1-1* [19], weisen zwar, im Vergleich zu den Ergebnissen der Verbindungen mit Stahl der Güte S690QL und S700MC, einen ausreichend hohen Sicherheitsabstand zu den Versuchswerten auf, jedoch liegt auch hier die Problematik einer nicht klar geregelten Bemessung von Undermatching-Verbindungen vor. Dies wird durch das entwickelte Bemessungsmodell gelöst.

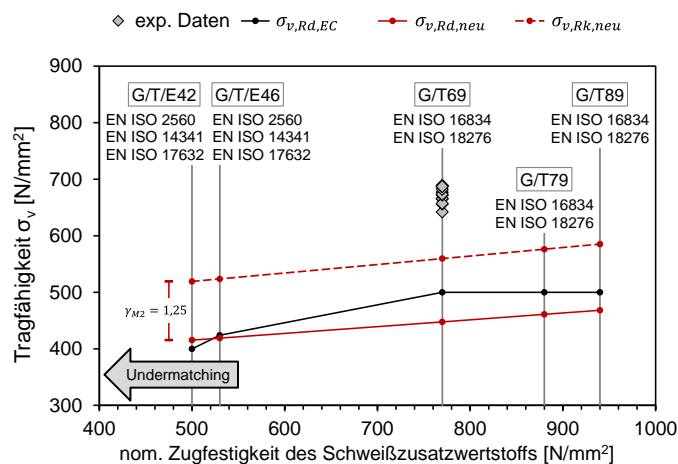


Abb. 8-66: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S500MC

Weiterhin ist der Gegenüberstellung in Abb. 8-66 zu entnehmen, dass die Bemessungsgrenzspannungen, ermittelt aus dem neuen Modell, unter den Werten nach dem derzeitigen Bemessungsansatzes liegen. Dies kann infolge der geringen Anzahl an Versuchsdaten als auch auf das in den Untersuchungen beobachtete kritische Versagen der Verbindungen mit S500MC zurückgeführt werden, dass durch das neue Bemessungsmodell berücksichtigt wird. Aufgrund der geringen Anzahl von Versuchsdaten sind zur Absicherung weitere Untersuchungen, vor allem in der Anwendung für Undermatching-Verbindungen, nötig.

Da für Stumpfnahverbindungen an Stählen der Güte > S700 aus der Norm derzeit kein gültiges Bemessungsmodell vorliegt, entfällt ein entsprechender Vergleich in den Abb. 8-67 bis Abb. 8-70.

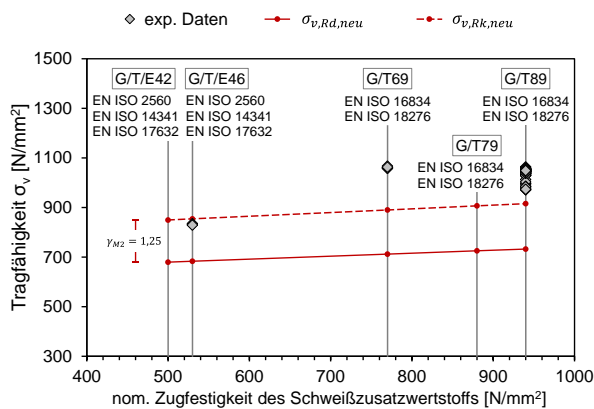


Abb. 8-67: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S960QL

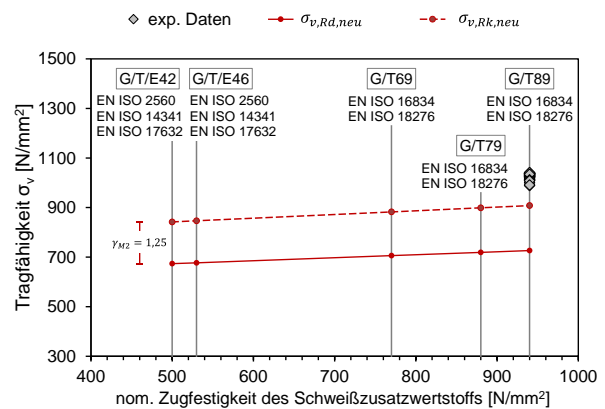


Abb. 8-68: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S890QL

Betrachtet man den vorliegenden Abstand zwischen den Versuchsergebnissen und den ermittelten Bemessungsgrenzspannungen für Verbindungen der Güte S960QL in Abb. 8-67 zeigt sich, dass das Bemessungsmodell anwendbar ist. Auch für Verbindungen der Güte S890QL, S900MC und S960MC (vgl. Abb. 8-68 bis Abb. 8-70) kann dies bestätigt werden. Jedoch liegen hier ausschließlich Versuchsdaten mit gleichem Schweißzusatzwerkstoff und somit mit jeweils gleichem Undermatching-Level vor, weshalb weitere Untersuchungen zur Absicherung des entwickelten Konzepts erforderlich sind.

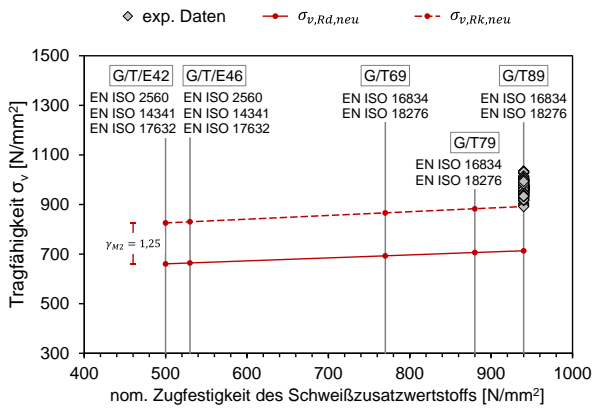


Abb. 8-69: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeit mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S900MC

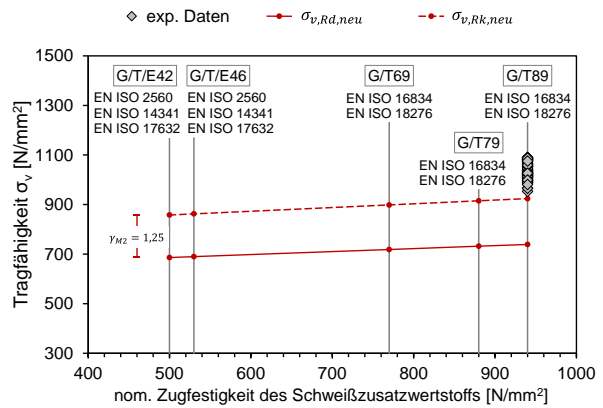


Abb. 8-70: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeit mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S960MC

Insgesamt bietet das speziell für höherfeste Stähle ab einer Stahlgüte von S500 konzipierte Bemessungsmodell eine wirtschaftliche und vor allem klar definierte Nachweisführung, unabhängig ob sich um eine Undermatching-, Matching- oder Overmatching-Verbindung handelt, an. Darüber hinaus wird für durchgeschweißte Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle ein Konzept bereitgestellt, das eine sichere Bemessung gegen ein Versagen im Bauteil sowie in der Wärmeeinflusszone bzw. im Schweißgut ermöglicht.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Ein effizienter Einsatz höherfester Stähle erfordert die Bereitstellung von sicheren, auf die Eigenschaften des Werkstoffs angepassten Bemessungskonzepten. In den vergangenen Jahren hat sich vermehrt gezeigt, dass gerade die Bemessung geschweißter Kehlnahtverbindungen höherfester Stähle zu unwirtschaftlichen Lösungen führte. Im Zuge mehrerer Forschungsvorhaben konnte *Rasche* [67] diesbezüglich ein Konzept zur Bemessung von Kehlnähten höherfester Stähle entwickeln, das bereits in den Normentwurf *prEN 1993-1-8* [18] integriert wurde. Offen für das Bemessungsmodell ist jedoch die Anwendbarkeit für Mischverbindungen, Verbindungen aus normal- und höherfesten Stählen. Auf der sicheren Seite liegend ist nach *prEN 1993-1-8* [18] festgelegt, dass eine Bemessung unter Berücksichtigung der Festigkeit des geringer festen Grundwerkstoffs und dem verwendeten Schweißzusatzwerkstoff durchzuführen ist. Aufgrund einer unzureichenden Anzahl an Versuchswerten konnte eine entsprechende Überprüfung bisher nicht durchgeführt werden.

Die Thematik der noch unklaren Bemessungssituation wird im ersten Teil dieser Arbeit aufgegriffen. Im Vorfeld einer erneuten statistischen Auswertung des bestehenden Bemessungskonzepts erfolgte eine detaillierte Untersuchung des Tragverhaltens von Mischverbindungen. Daraus ging hervor, dass ein Tragverhalten ähnlich zu Kehlnahtverbindungen gleicher Grundwerkstoffe für die Mischverbindungen vorliegt. Feststellen ließ sich, dass die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs ebenfalls maßgebend für die globale Tragfähigkeit einer Mischverbindung ist. Darüber hinaus zeigte eine Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten, dass zusätzlich ein festigkeitssteigernder Effekt aus der Aufmischung mit dem höherfesten Grundwerkstoff bei Mischverbindung hervorgeht. Zu prüfen war, ob eine Berücksichtigung der aus der Aufmischung im Schweißgut resultierenden Tragfähigkeitssteigerung bzw. eine Korrektur der anzusetzenden Korrelationsbeiwerte, die die Unter- oder Überfestigkeit in der Naht berücksichtigen, für das Bemessungsmodell sinnvoll ist.

Eine erneute statistische Auswertung der erweiterten Datenbasis, bestehend aus Kehlnahtverbindungen gleicher sowie unterschiedlicher Grundwerkstoffe, bestätigte die Anwendbarkeit des vorliegenden Bemessungskonzepts. Jedoch zeigte sich, dass das Konzept zur Bemessung von Stirnkehlnahtverbindungen eine weniger gute Qualität aufweist, im Gegensatz zu einer Bemessung von Flankenkehlnahtverbindungen. Eine Anpassung zur Verbesserung der Qualität des Bemessungsmodells konnte durch eine Ergänzung Mittels des Faktors von δ_{Δ}

erzielt werden. Für Stirnkehlnahtverbindungen ist dieser mit $\delta_{\Delta} = 1,15$ und für Flankenkehlnahtverbindungen mit $\delta_{\Delta} = 1,0$ anzusetzen.

Die Verwendung der nach *prEN 1993-1-8* [18] angegebenen Korrelationsbeiwerte $\beta_{w,mod}$ ist auch unter Berücksichtigung des δ_{Δ} zulässig. Lediglich für den Korrelationsbeiwert der Festigkeitsklasse des Schweißzusatzes G/T89 kann zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, hervorgehend aus der erneuten statistischen Auswertung einer erweiterten Datenbasis, sowohl für Mischverbindungen als auch Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe ein verbesserter Wert von $\beta_{w,mod} = 1,16$ vorgeschlagen werden.

Als wesentlich kritischer ist jedoch die Nachweisführung von durchgeschweißten Stumpfnahverbindungen zu betrachten, da gerade hier ein gewisses Sicherheitsrisiko bei der Anwendung der Bemessungsregeln für höherfeste Stähle vorliegt. Dies führt zu einem Handlungsbedarf hinsichtlich der Entwicklung eines an höherfeste Stähle angepassten Bemessungsansatzes. Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich daher mit der Entwicklung eines für durchgeschweißte Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle geeigneten Bemessungsansatzes, der unter anderem ein kritisches Versagen in der Wärmeeinflusszone berücksichtigen soll. Aus der Praxis lagen erste Untersuchungen an Stumpfnahverbindungen vor, die ein solches vorzeitiges Versagen und einer daraus resultierenden verringerten Tragfähigkeit von Stumpfnähten aufzeigen. Als Ursache wird in der Literatur vermehrt auf die Gefahr der Ausbildung, speziell bei höherfesten Stählen, einer lokalen Erweichung in der Wärmeeinflusszone hingewiesen. Der Literatur können zwar erste Vorschläge möglicher Bemessungsansätze entnommen werden, ein ausformuliertes und statistisch abgesichertes Modell lag jedoch noch nicht vor.

Hier knüpft die vorliegende Arbeit an. Im Rahmen zweier Versuchsreihen [36], [57] konnten experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung der auf die Tragfähigkeit einer Stumpfnahverbindung nehmenden Einflussfaktoren durchgeführt werden. Es zeigte sich, dass die Gefahr eines frühzeitigen Versagens unter anderem vom Grundwerkstoff abhängt. Bedingt durch den Grundwerkstoff, bzw. durch das vorhandene Legierungskonzept, besteht die Gefahr einer sich ausbildenden lokalen Erweichung, die ein frühzeitiges Versagen in der Wärmeeinflusszone begünstigt. Ein maßgebender Einfluss auf die sich ausbildenden Charakteristika der Weichen Zone geht dabei aus der während des Schweißprozesses eingebrachten Energie hervor. Es zeigte sich, dass, bedingt durch einen hohen Energieeintrag, ein wesentlich größerer Bereich der Wärmeeinflusszone erweicht und dadurch das Risiko eines vorzeitigen Versagens erhöht.

Neben dem Grundwerkstoff konnte als weiterer Einflussfaktor die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs festgestellt werden. Verbindungen, die mit einem Undermatching-Schweißzusatz gefertigt werden, zeigten überwiegend ein Versagen im Schweißgut. Hingegen scheint die Verwendung eines Overmatching-Schweißzusatzes einem kritischen Versagen entgegenzuwirken, da das Versagen hier zumeist im Grundwerkstoff auftrat.

Die Zielsetzung umfasste die Erarbeitung einer Gleichung, die eine Nachweisführung gegen ein Versagen im Grundwerkstoff, im Schweißgut und in der Wärmeeinflusszone einer Stumpfnahthverbindung vereint. Daher wurden die aus den Auswertungen hervorgehenden Einflussfaktoren aus der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs und des Grundwerkstoffs in Kombination eines Erweichungsfaktors x , der zur Erfassung der Eigenschaften in der Wärmeeinflusszone dient, in einem Bemessungsmodell verdichtet und anhand der umfangreichen Datenbasis, bestehend aus Zugversuchen an Stumpfnahthverbindungen höherfester Stähle, statistisch ausgewertet. Unter Einbeziehung einer Verträglichkeitsprüfung gelang es ein Konzept zu erarbeiten, das das Tragverhalten einer durchgeschweißten Stumpfnahthverbindung ausreichend genau abbildet.

9.2 Fazit

Mit der Weiterentwicklung des bestehenden Bemessungskonzepts für Kehlnahthverbindungen höherfester Stähle nach *prEN 1993-1-8* [18] ist es möglich, Kehlnähte an gleichen sowie unterschiedlichen Grundwerkstoffen in Abhängigkeit der Belastungsrichtung wirtschaftlich zu bemessen. Den Planern wird damit eingeräumt, eine auf den Anschluss adaptierte und somit ökonomische Werkstoffwahl treffen zu können. Das an das Tragverhalten von Kehlnahthverbindungen höherfester Stähle angepasste Bemessungskonzept ermöglicht darüber hinaus die Ausbildung geringerer Nahtdicken, was neben einer Senkung der Materialkosten auch zu geringeren Fertigungskosten führt.

Des Weiteren kann dem Anwender ein klar definiertes, sicheres und auch wirtschaftliches Bemessungsmodell für durchgeschweißte Stumpfnahthverbindungen höherfester Stähle zur Verfügung gestellt werden. Das entwickelte Konzept bietet die Möglichkeit eine Stumpfnahth als Undermatching-, Matching- sowie Overmatching-Verbindung zu realisieren und die daraus hervorgehenden Tragfähigkeitssteigernden bzw. -mindernden Effekte in der Bemessung mit einzubeziehen. Zusätzlich vereint das Modell eine Nachweisführung gegen die in den Versuchen beobachteten Versagensmodi Versagen im Grundwerkstoff, Versagen in der Wärmeeinflusszone und Versagen im Schweißgut in einer Gleichung.

9.3 Ausblick

Als Abschluss der Arbeit soll ein kurzer Ausblick über den noch vorhandenen Forschungsbedarf gegeben werden. Auf Basis neuer Untersuchungen an Kehlnahtverbindungen höherfester Stähle war es möglich, das nach *prEN 1993-1-8* [18] angegebene Konzept auf die Anwendbarkeit für Mischverbindungen zu überprüfen bzw. eine Anpassung hinsichtlich der Bemessung von Stirnkehlnahtverbindungen bis zu einer Stahlgüte S700 zu erarbeiten. In Anbetracht der sich derzeit in Überarbeitung befindenden Norm *prEN 1993-1-12* [20], zur Erweiterung der Bemessungsregeln nach *prEN 1993-1-8* [18] für Stähle bis zu einer Güte von S960, sind weitere Untersuchungen an Kehlnahtverbindungen erforderlich, um auch hier entsprechende Empfehlungen zur Bemessung bereitstellen zu können. Aus den bisherigen Versuchsdaten liegen nur wenige bis keine Daten von Verbindungen an Stählen der Güte S890 bis S960 vor, so dass es weiterer experimenteller Untersuchungen zur Absicherung bzw. Überprüfung des Bemessungskonzepts sowie der Erarbeitung von ggf. angepassten Korrelationsbeiwerten bedarf.

Ein wesentlich höherer Forschungsbedarf liegt für durchgeschweißte Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle vor. Der in dieser Arbeit entwickelte Bemessungsansatz konnte auf Basis einer bereits hohen Anzahl an Daten hergeleitet und statistisch kalibriert werden. Da jedoch gerade für Stumpfnahverbindungen an Stählen der Güte S500 nur eine geringe Versuchsanzahl vorlag, sind zur Absicherung des Bemessungsmodells weitere Untersuchungen, speziell von Undermatching- und Overmatching-Verbindungen, zu ergänzen und auszuwerten.

Des Weiteren ist, wie bereits für Kehlnahtverbindungen erfolgt, das Verhalten von durchgeschweißten Stumpfnähten an Mischverbindungen zu untersuchen. Der Fokus ist hierbei vor allem auf die in der Wärmeeinflusszone höherfester Stähle entstehende Erweichung zu legen. Der Bemessungsvorschlag aus Abschnitt 8.6.10 ist auf Empfehlung unter Berücksichtigung der Festigkeit des geringer festen Bauteils durchzuführen. Dies ist anhand erweiterter experimenteller Untersuchungen von durchgeschweißten Stumpfnähten an Mischverbindungen zu überprüfen.

Erste Empfehlungen für durchgeschweißte Stumpfnahverbindungen an höherfesten Stählen über einer Güte von S700 konnten bereits für *prEN 1993-1-12* [20] erarbeitet werden. Jedoch sind auch hier weitere experimentelle Untersuchungen notwendig, um die jeweiligen Undermatching-Level der einzelnen Stahlgüten abdecken und überprüfen zu können.

Literaturverzeichnis

Normen und Richtlinien

- [1] DIN 18800-1: Stahlbauten; Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Ausgabedatum: 2008.
- [2] DIN EN 1993-1-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlgüten bis S700; Deutsche Fassung EN 1993-1-12:2007 + AC:2009, Ausgabedatum: Dezember 2010.
- [3] DIN EN 1993-1-8: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005 + AC:2009, Ausgabedatum: Dezember 2010.
- [4] DIN EN 1993-1-8/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen, Ausgabedatum: Dezember 2010.
- [5] DIN EN 1993-1-10: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung; Deutsche Fassung EN 1993-1-10:2005 + AC:2009, Ausgabedatum: Dezember 2012.
- [6] DIN EN 10020: Begriffsbestimmung für die Einteilung der Stähle; Deutsche Fassung EN 10020:2000, Ausgabedatum: Juli 2000.
- [7] DIN EN 10025-2: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle; Deutsche Fassung EN 10025-2:2019, Ausgabedatum: Oktober 2019.
- [8] DIN EN 10025-3: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 3: Technische Lieferbedingungen für normalgeglühte/normalisierend gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle; Deutsche Fassung EN 10025-3:2019, Ausgabedatum: Oktober 2019.
- [9] DIN EN 10025-4: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 4: Technische Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle; Deutsche Fassung EN 10025-4:2019, Ausgabedatum: Oktober 2019.
- [10] DIN EN 10025-6: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 6: Technische Lieferbedingungen für Flacherzeugnisse aus Stählen mit höherer Streckgrenze im vergüteten Zustand; Deutsche Fassung EN 10025-6:2019, Ausgabedatum: Februar 2020.
- [11] DIN EN 10149-2: Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte Stähle; Deutsche Fassung EN 10149-2:2013, Ausgabedatum: Dezember 2013.
- [12] DIN EN ISO 17632: Schweißzusätze – Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von unlegierten Stählen und Feinkornstählen – Einteilung (ISO 17632:2015); Deutsche Fassung EN ISO 17632:2015, Ausgabedatum: Mai 2016.

- [13] DIN EN ISO 18276: Schweißzusätze – Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von hochfesten Stählen – Einteilung (ISO 18276:2017); Deutsche Fassung EN ISO 18276:2017, Ausgabedatum: Juli 2017.
- [14] DIN EN ISO 14341 (Entwurf): Schweißzusätze – Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall-Schutzgasschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen – Einteilung (ISO/DIS 14341:2019); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 14341:2019, Ausgabedatum: 2011.
- [15] DIN EN ISO 16834: Schweißzusätze – Drahtelektroden, Drähte, Stäbe und Schweißgut zum Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen – Einteilung (ISO 16834:2012); Deutsche Fassung EN ISO 16834:2012, Ausgabedatum: August 2012.
- [16] DIN EN 1011-2: Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe - Teil 2: Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen; Deutsche Fassung EN 1011-2:2001, Ausgabedatum: Mai 2001.
- [17] Merkblatt DVS 0916: Metall-Schutzgasschweißen von Feinkornbaustählen, Ausgabedatum: April 2012.
- [18] prEN 1993-1-8 (Entwurf): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche und Englische Fassung prEN 1993-1-8:2021, Ausgabedatum: März 2021.
- [19] CEN/TC 250/SC 3/WG 1 N3361, prEN 1993-1-1: Design of steel structures – Part 1-1: General rules for buildings, Englische Fassung, Ausgabedatum: Juni 2021.
- [20] CEN/TC 250/SC 3/WG 12 N 111, prEN 1993-1-12: Design of steel structures – Part 1-12: Additional rules for steel grades up to S960, Englische Fassung, Ausgabedatum: Januar 2021
- [21] Zulassung Z-30.1-1: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung: Flacherzeugnisse aus hochfestem schweißgeeignetem Feinkornbaustahl S690QL1 und die daraus hergestellten Bauteile, Geltungsdauer bis 31. Januar 2010.
- [22] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG (Hrsg.): Background Documentation Document D.03 Annex D: Evaluation of test results on welded connections made from FeE 460 in order to obtain strength functions and suitable model factors, 1990.
- [23] SNIJDER, H. H.; et al.: Background Documentation Document 6.05: Evaluation of test results on welded connections in order to obtain strength functions and suitable model factors, 1989.
- [24] DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, Ausgabedatum: Dezember 2010.
- [25] DIN EN 1993-1-1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009, Ausgabedatum: Dezember 2010.

- [26] DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2009, Ausgabedatum: Dezember 2009.
- [27] DIN EN ISO 15792-1: Schweißzusätze – Prüfverfahren – Teil 1: Prüfverfahren für Prüfstücke zur Entnahme von Schweißgutproben an Stahl, Nickel und Nickellegierungen (ISO 15792-1:2000 + Amd 1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 15792-1:2008 + A1:2011, Ausgabedatum: Januar 2012.
- [28] DIN EN ISO 18265: Metallische Werkstoffe – Umwertung von Härtewerten (ISO 18265:2013); Deutsche Fassung EN ISO 18265:2013, Ausgabedatum: Februar 2014.
- [29] DIN EN ISO 9015-1: Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Härteprüfung – Teil 1: Härteprüfung für Lichtbogenschweißverbindungen (ISO 9015-1:2001); Deutsche Fassung EN ISO 9015-1:2011, Ausgabedatum: Mai 2011.
- [30] DIN 50125: Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben, Ausgabedatum: Juli 2009.
- [31] DIN EN 10204: Metallische Erzeugnisse – Arten von Prüfbescheinigungen; Deutsche Fassung EN 10204:2004, Ausgabedatum: Januar 2005.
- [32] DIN EN ISO 5817: Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (ISO 5817:2014); Deutsche Fassung EN ISO 5817:2014, Ausgabedatum: Juni 2014.
- [33] NA 005-08-16 AA N 3092: Kommentare Kuhlmann zum Norm-Entwurf E DIN EN 1993-1-8 und Vorschlag für neue Bemessungsgleichung, Ausgabe: April 2021.

Fachbücher und Publikationen

- [34] BARGEL, H. J.; SCHULZE, G.: Werkstoffkunde, 12. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [35] BELYTSCHKO, T.; LIU, W. K.; MORAN, B.; ELKHODARY, K.: Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, 2. Auflage. John Wiley & Sons Inc, 2001.
- [36] BERGMANN, P.; et al.: Tragfähigkeit von Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle im Stahlbau, Forschung für die Praxis IGF-Vorhaben Nr. 19.470 BG. Düsseldorf: Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, 2020.
- [37] BJÖRK, T.; HALME, T.: Statistical Analysis for tension tests of welded S500-S700 high strength steels according to Eurocode EN 1990.
- [38] BLECK, W.; MOELLER, E.: Handbuch Stahl, Auswahl, Verarbeitung, Anwendung. München: Carl Hanser Verlag, 2018.
- [39] CEN/TC 250/SC 3/WG 12 N 96: kHAZ strength reduction of steel grades S500 – S960, Petri Ongelin, 2019.

- [40] CLEFF, T.: Angewandte Induktive Statistik und Statistische Testverfahren. Wiesbaden: Springer Gabler, 2019.
- [41] COLLIN, P.; JOHANSSON, B.: Design of welds in high strength steel. In: EUROSTEEL 2005 4th European Conference on Steel and Composite Structures, Volume C., S. 4.10/89-4.10/99.
- [42] COLLIN, P.; MÖLLER, M.; NILSSON, M.; TÖRNBLOM, S.: Undermatching Butt Welds in High Strength Steel. In: IABSE Symposium Report 96 (2009), S. 96–106.
- [43] DA SILVA, L.; et al.: Statistical evaluation of the lateral-torsional buckling resistance of steel I-beams, Part 2: Variability of steel properties. Journal of Constructional Steel Research 65 (2009), S. 832–849.
- [44] DA SILVA, L.; et al.: SAFEBRIC TILE: Standardization of Safety Assessment Procedures across Brittle to Ductile Failure Modes, RFSR-CT-2013-00023, Schlussbericht, 2015.
- [45] DEGENKOLB, J.; KAISER, H. J.; UWER, D.: Zähigkeit der Wärmeeinflußzone von Schweißverbindungen. Stahl u. Eisen 109 (1989), Nr. 18.
- [46] DILTHEY, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1, Schweiß- und Schneidtechnologien, 3., bearbeitete Auflage. Berlin: Springer, 2006.
- [47] DILTHEY, U.; BRANDENBURG, A.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2, Verhalten Werkstoffe beim Schweißen, 2., überarb. Aufl. Berlin: Springer, 2002.
- [48] FAHRENWALDT, H. J.; SCHULER, V.; TWRDEK, J.: Praxiswissen Schweißtechnik, Werkstoffe, Prozesse, Fertigung, 5., vollst. überarb. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [49] FRANCIS, P.; et al.: HILONG: High Strength Long Span Structures, RFCS-CT-2012-00028, Schlussbericht, 2016.
- [50] GSI - Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH: SFI-Aktuell 2009, Internationaler Schweissfachingenieurlehrgang, 2008.
- [51] ITO, R.; et al.: Controlling of the Softened Region in Weld Heat Affected Zone of Ultra Fine Grained Steels. ISIJ International (2000), Vol. 40, S. 29–33.
- [52] KLEINER, A.: Beurteilung des Tragverhaltens von Flankenkehlnahtverbindungen aus normal- und höherfestem Baustahl unter Berücksichtigung statistischer Kriterien, Dissertation, Universität Stuttgart, Mitteilung des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2018-1, 2018.
- [53] KOB, P.; HARRE, W.; SCHMIDT, H.: Einfluß geometrische Verhältnisse auf die Tragfähigkeit statisch beanspruchter Kehlnahtverbindungen, Schriftenreihe Heft 78. Stuttgart: 1987.
- [54] KUHLMANN, U.: Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen höherfester Baustähle S690 im Stahlbau, Forschung für die Praxis P812. Düsseldorf: Forschungsvereinigung e. V. (FOSTA), 2011.

- [55] KUHLMANN, U.; GÜNTHER, H. P.; RASCHE, C.: Versuche zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Flankenkehlnahtverbindungen höherfester Baustähle S690Q, Versuchsbericht, Nr. 2008-21X. Stuttgart: 2008 (unveröffentlicht).
- [56] KUHLMANN, U.; SPIEGLER, J.: Tragfähigkeit von Mischverbindungen normalfester und höherfester Stähle im Stahlbau, Forschung für die Praxis P1062. Düsseldorf: Forschungsvereinigung e. V. (FOSTA), 2019.
- [57] KUHLMANN, U.; SPIEGLER, J.: Zusatzuntersuchungen an Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle der Güte S690QL, Versuchsbericht, Universität Stuttgart, Mitteilung des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2020-33X, 2020 (unveröffentlicht).
- [58] KUHLMANN, U.; SPIEGLER, J.; SCHMIDT-RASCHE, C.; VOLZ, M.; GÜNTHER, H. P.; HILDEBRAND, J.: Geschweißte Verbindungen höherfester Stähle. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Stahlbaukalender 2019. Berlin: Ernst & Sohn, 2019.
- [59] KUHLMANN, U.; WERNER, F.; VORMWALD, M.; KÖHLER, G.: Wirtschaftliche Schweißverbindungen höherfester Baustähle, Forschung für die Praxis P652. Düsseldorf: Forschungsvereinigung e. V. (FOSTA), 2007.
- [60] LEHNERT, T.; SCHRÖTER, F.: Stähle für den Stahlbau – Herstellung, Normung und Anwendung. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Stahlbaukalender 2016. Berlin: Ernst & Sohn, 2016.
- [61] MAURER, M.: Untersuchung der Auswirkung einer Weichen Zone auf die Festigkeitseigenschaften von hochfesten Schweißverbindungen, Technische Universität Graz, Dissertation, 2014.
- [62] HOLICKÝ, M.; et al.: Implementation of Eurocode - Reliability Backgrounds, Handbook 2, Leonardo da Vinci Project CZ/02/B/F/PP-134007, Prag, 2015.
- [63] MÜLLER, G.; GROTH, C.: FEM für Praktiker - Band 1: Grundlagen, 8. Auflage. Renningen: Expert Verlag, 2007.
- [64] MÜSCH, K.: Untersuchungen zum Einfluß örtlicher Festigkeitsunterschiede (Mismatch) auf das Versagensverhalten von Schweißverbindungen aus höherfesten Feinkornbaustählen, RWTH Aachen, Dissertation, 1998.
- [65] NIEMI, E.: Tests on fillet weld joints with high strength steel specimens. Lappeenranta: IIW document XV-696-89, 1988.
- [66] PUTHLI, R.; UMMENHOFER, T.; UNGERMANN, D.; WEYNAND, K.: Eurocode 3 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Band 2: Anschlüsse. DIN EN 1993-1-8 mit Nationalem Anhang. Kommentar und Beispiele. bauforumstahl e.V. (Hrsg.). Düsseldorf: Ernst & Sohn, 2015.
- [67] RASCHE, C.: Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen höherfester Baustähle, Dissertation, Universität Stuttgart, Mitteilung des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2012-1, 2012.

- [68] ROOS, E.; MAILE, K.: Werkstoffkunde für Ingenieure, Grundlagen, Anwendung, Prüfung, 4., bearbeitete Auflage. Berlin - Heidelberg: Springer, 2011.
- [69] SAAL, H.; HÖBLING, W.: Zusammenfassung der Ergebnisse von Versuchen an Kehlnahtprüfkörpern aus HISTAR460/460L hergestellt im Blockgussverfahren. Bericht Nr. 042119-2, 2005.
- [70] SCHRÖTER, F.: Höherfeste Stähle für den Stahlbau - Auswahl und Anwendung. Bauingenieur 78 (2003), S. 426–432.
- [71] SCHULER, V.; TWRDEK, J.: Praxiswissen Schweißtechnik, Werkstoffe, Prozesse, Fertigung, 6. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [72] SCHULZE, G.: Die Metallurgie des Schweißens, Eisenwerkstoffe -Nichteisenmetallische Werkstoffe, 4., neu bearbeitete Auflage. Berlin - Heidelberg: Springer, 2010.
- [73] STROETMANN, R.; et al.: Praxisgerechte Schweißverbindungen von höherfesten Stählen – weiterentwicklung der Bemessungsregeln und Verfahrensoptimierungen unter Berücksichtigung des Verformungsvermögens, Forschung für die Praxis P 1020. Düsseldorf: Forschungsvereinigung e. V. (FOSTA), 2020.
- [74] TÖRNBLOM, S.: Undermatching Butt Welds in High Strength Steel, Lulea University of Technology, Masterarbeit, 2007.
- [75] UNGERMANN, D.; UMMENHOFER, T.; PUTHLI, R.; WEYNAND, K.: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Band 2: Anschlüsse, Bauforumstahl e.V. (Hrsg.), 1. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn 2015.
- [76] VOLZ, M.; SAAL, H.: Geschweißte Verbindungen nach DIN EN 1993-1-8. Stahlbau 81 (2012), Heft 4, S. 282–289.
- [77] VOLZ, M.; SCHRÖTER, F.; STEIDL, G.: Baustähle im konstruktiven Ingenieurbau. Stahlbau 77 (2008), Heft 11, S. 781–790.
- [78] ANSYS Release 11.0 User`s Manual. ANSYS, Inc., Canonsburg, USA.
- [79] Voestalpine Stahl GmbH, Datenbank: Zugversuchen an Stumpfnahverbindungen höherfeste Stähle, 2020.
- [80] Steel Construction Institute (SCI), Datenbank: Zugversuche am reinen Grundwerkstoff höherfester Stähle, 2019.

Internetquellen

- [81] www.esab.de
Schweißzusätze,
<https://www.esab.de/de/de/education/blog/schweisszusaeetze.cfm>
Zugegriffen am: 23.06.2019

Software

[82] ANSYS Inc. ANSYS Workbench V18.0, 2019.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Kehlnaht als Mischverbindung zwischen normalfestem Stahl der Güte S355J2+N und höherfestem Stahl der Güte S960QL	3
Abb. 1-2: Kritisches Versagen in der Wärmeeinflusszone durchgeschweißter Stumpfnahverbindungen höherfester Stähle der Güte S690QL	4
Abb. 2-1: Temperaturverlauf während des Normalglühens [50]	13
Abb. 2-2: Vorgänge beim thermodynamischen Walzen (Warmband- und Grobblechstraße) [72]	14
Abb. 2-3: Temperaturverlauf des Vergütens [50].....	15
Abb. 2-4: Schweißzusatzwerkstoffe für das Metall-Schutzgasschweißen	17
Abb. 2-5: Erläuterung der Bezeichnung einer Fülldrahtelektrode	18
Abb. 2-6: Erläuterung der Bezeichnung eines Massivdrahtes	19
Abb. 3-1: Schweißbarkeit des Bauteils (in Anlehnung an [47]).....	21
Abb. 3-2: Gefügezonen in der Wärmeeinflusszone von unlegierten und niedriglegierten Stählen (in Anlehnung an [47])	25
Abb. 3-3: Härteverlauf eines S700MC	27
Abb. 3-4: Härteverlauf eines S690QL.....	27
Abb. 3-5: Definition der Abkühlzeit $t_{8/5}$ [72]	30
Abb. 3-6: Übergangsdicke tt [16].....	31
Abb. 4-1: Spannungskomponenten einer Kehlnaht (in Anlehnung an [67])	39
Abb. 4-2: Unterscheidung einer durchgeschweißten und einer nicht durchgeschweißten Stumpfnah [58]	45
Abb. 4-3: Bemessung einer durchgeschweißten Stumpfnah nach <i>prEN 1993-1-8</i> [18].....	46
Abb. 5-1: Einfluss der Stahlgüte auf die Tragfähigkeit einer Flankenkehlnah [59].....	51
Abb. 5-2: Einfluss der Nahtlänge auf die Tragfähigkeit einer Flankenkehlnah [59]	52
Abb. 5-3: Einfluss der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Tragfähigkeit einer Flankenkehlnah [55]	54
Abb. 5-4: Einfluss der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Tragfähigkeit einer Flankenkehlnah [54]	55
Abb. 5-5: Ermittelte Korrelationsbeiwerte für das richtungsbezogene Verfahren nach <i>prEN 1993-1-8</i> [18]	57

Abb. 6-1: Versuchskörperform der Flankenkehlnahtverbindungen.....	73
Abb. 6-2: Erzeugung einer definierten Nahtlänge l_{eff}	73
Abb. 6-3: Entnahme der Versuchskörper der Stirnkehlnähte	74
Abb. 6-4: Definierte Nahtlänge l_{eff} der Versuchskörper der Stirnkehlnähte nach der Nahtverkürzung	75
Abb. 6-5: Werkstoffkonfigurationen der Flanken- und Stirnkehlnähte an Mischverbindungen.....	75
Abb. 6-6: Messung der $t_{8/5}$ - Zeit mittels Thermoelement.....	77
Abb. 6-7: Induktive Wegaufnehmer Flankenkehlnaht.....	78
Abb. 6-8: Induktive Wegaufnehmer Stirnkehlnaht	78
Abb. 6-9: Makroschliff einer Flankenkehlnaht S355J2+N – S960QL – G46	79
Abb. 6-10: Makroschliff einer Stirnkehlnaht S355J2+N – S690QL – G46	79
Abb. 6-11: Zuordnung der über den Querschnitt der Naht verlaufenden Einzeleindrücke	79
Abb. 6-12: Scannen der Bruchfläche mittels eines Streifenlichtprojektors Comet L3D [56].....	80
Abb. 6-13: Schnittführung zur Erzeugung eines 2D-Modells des Bruchverlaufs im Nahtquerschnitt....	81
Abb. 6-14: Definition der Schweißnahtdicke nach prEN 1993-1-8 [18].....	83
Abb. 6-15: Aus 3D-Scan abgeleitete Schweißnahtdicke $a_{3D} - Scan$	83
Abb. 6-16: Vergleich der Nahtdicken a_{EC} und a_{max}	83
Abb. 6-17: Variation der Winkel der Nahtdicke $a_{3D} - Scan$	85
Abb. 6-18: Vergleich der Nahtdicken a_{EC} und $a_{3d} - Scan$ der Flankenkehlnahtverbindungen	86
Abb. 6-19: Statistische Auswertung der Nahtdicken a_{EC} und $a_{3d} - Scan$ der Flankenkehlnahtverbindungen	87
Abb. 6-20: Vergleich der Nahtdicken a_{EC} , a_{max} und $a_{3d} - Scan$ der Stirnkehlnahtverbindungen.....	87
Abb. 6-21: Statistische Auswertung der Nahtdicken a_{EC} , a_{max} und $a_{3d} - Scan$ der Stirnkehlnahtverbindungen.....	88
Abb. 6-22: Vergleich der Bruchwinkel α_{EC} und $\alpha_{3d} - Scan$ der Flankenkehlnahtverbindungen.....	90
Abb. 6-23: Ablehnungsbereich für die Nullhypothese der Winkel $\alpha_{3D} - Scan$ der Flankenkehlnahtverbindungen	90
Abb. 6-24: Vergleich der Bruchwinkel α_{EC} , a_{max} und $a_{3d} - Scan$ der Stirnkehlnahtverbindungen....	91

Abb. 6-25: Ablehnungsbereich für die Nullhypothese der Winkel $\alpha_{3D} - Scan$ der Stirnkehlnahtverbindungen unter Betrachtung der Grundgesamtheit α_{EC}	92
Abb. 6-26: Ablehnungsbereich für die Nullhypothese der Winkel $\alpha_{3D} - Scan$ der Stirnkehlnahtverbindungen unter Betrachtung der Grundgesamtheit α_{max}	92
Abb. 6-27: Tragfähigkeit von Flankenkehlnähten in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs	95
Abb. 6-28: Tragfähigkeit von Stirnkehlnähten in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs	95
Abb. 6-29: Tragfähigkeit der Flankenkehlnähte in Abhängigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs	96
Abb. 6-30: Tragfähigkeit der Stirnkehlnähte in Abhängigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs	96
Abb. 6-31: Prozentuale Tragfähigkeitssteigerung der Flankenkehlnähte	97
Abb. 6-32: Prozentuale Tragfähigkeitssteigerung der Stirnkehlnähte	97
Abb. 6-33: Aufmischungsgrad der Flankenkehlnähte	99
Abb. 6-34: Aufmischungsgrad der Stirnkehlnähte	99
Abb. 6-35: Vergleich des Aufmischungsgrads mit der Tragfähigkeit der Flankenkehlnähte	100
Abb. 6-36: Tragfähigkeiten in Abhängigkeit der Belastungsrichtungen	101
Abb. 6-37: Gewählte Randbedingungen der Stirnkehlnahtverbindung	104
Abb. 6-38: Überführung der Nahtgeometrie der Verbindung STI-S355/S690-e-G46 in ein FE-Modell	105
Abb. 6-39: Zuordnung der Materialkurven entsprechend der in der WEZ vorliegenden Zonen (vgl. Abschnitt 3.4.2)	105
Abb. 6-40: Vergleich der Härtewerte der Dilatometerversuche und der Stirnkehlnähte	106
Abb. 6-41: Numerisch ermittelte Spannungs-Verformungs-Verläufe der Verbindungen STI-S355/S690-e-G46 und STI-S355/S690-e-G69	107
Abb. 6-42: Nahtdicken der Verbindung STI-S355/S690-e-G46	108
Abb. 6-43: Nahtdicken der Verbindung STI-S355/S690-e-G69	108
Abb. 6-44: Numerisch ermittelte lokale Spannungszustände in den Ebenen α_{EC} , $\alpha_{3D} - Scan$, α_{max} im Schweißgut (G46)	109
Abb. 6-45: Numerisch ermittelte lokale Spannungszustände in den Ebenen α_{EC} , $\alpha_{3D} - Scan$, α_{max} im Schweißgut (G69)	109
Abb. 6-46: Ermittlung der zulässigen Dehnung ϵ_{At} im Bereich der Naht zum Zeitpunkt des Bruchs für die Verbindungen STI-S355/S690-e-G46 und STI-S355/S690-e-G69	110

Abb. 6-47: Vergleich der numerischen und experimentellen Spannungs-Verformungs-Kurven der Verbindung STI-S355/S690-e-G46	111
Abb. 6-48: Vergleich der numerischen und experimentellen Spannungs-Verformungs-Kurven der Verbindung STI-S355/S690-e-G69	111
Abb. 6-49: Vergleichsspannung der Verbindung STI-S355/S690-e-G46 bei Erreichen von $\sigma_{v,max}$	112
Abb. 6-50: Dehnung der Verbindung STI-S355/S690-e-G46 bei Erreichen von $\sigma_{v,max}$	112
Abb. 6-51: Vergleichsspannung der Verbindung STI-S355/S690-e-G69 bei Erreichen von $\sigma_{v,max}$	112
Abb. 6-52: Dehnung der Verbindung STI-S355/S690-e-G69 bei Erreichen von $\sigma_{v,max}$	112
Abb. 6-53: Tragfähigkeit bei zunehmender Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs Modell G46	115
Abb. 6-54: Tragfähigkeit bei zunehmender Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs Modell G69	115
Abb. 6-55: Parameterstudie unter Ansatz der Geometrie der Verbindung STI-S355/S690-e-G46.....	116
Abb. 6-56: Parameterstudie unter Ansatz der Geometrie der Verbindung STI-S355/S690-e-G69.....	116
Abb. 6-57: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe G/T/E46 der Flankenkehlnahtverbindungen	129
Abb. 6-58: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe G/T/E46 der Stirnkehlnahtverbindungen.....	130
Abb. 6-59: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe G/T69 der Flankenkehlnahtverbindungen.....	132
Abb. 6-60: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe G/T69 der Stirnkehlnahtverbindungen	134
Abb. 6-61: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe G/T89 der Flankenkehlnahtverbindungen.....	136
Abb. 6-62: Tatsächliche Tragfähigkeiten $r_{e,i}$ aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte $r_{t,i}$ der Evaluationsgruppe G/T89 der Stirnkehlnahtverbindungen	137
Abb. 6-63: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe G/T/E46	139
Abb. 6-64: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe G/T69	140
Abb. 6-65: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe G/T89	141

Abb. 6-66: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe G/T/E46	147
Abb. 6-67: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe G/T69	147
Abb. 6-68: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeit mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe G/T89	148
Abb. 7-1: Zugfestigkeit einer Stumpfnahverbindung in Abhängigkeit der relativen Breite der Weichen Zone XWZ [61]	151
Abb. 7-2: Geometrische Parameter einer Stumpfnah.....	152
Abb. 7-3: Einfluss des Undermatching-Verhältnisses auf die Tragfähigkeit einer Stumpfnahverbindung	153
Abb. 7-4: Einfluss der Versuchskörperbreite b auf die Tragfähigkeit einer Stumpfnahverbindung	154
Abb. 7-5: Einfluss des Nahtöffnungswinkels α auf die Tragfähigkeit einer Stumpfnahverbindung	154
Abb. 7-6: Korrigierte Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand in Abhängigkeit des jeweiligen Grundwerkstoffs	156
Abb. 8-1: Geschweißtes Blech zur Entnahme der Zugproben.....	160
Abb. 8-2: Versuchskörpergeometrie in Abhängigkeit der Materialdicke	161
Abb. 8-3: Abtrag der Nahtüberhöhung	161
Abb. 8-4: Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Nahtüberhöhung	162
Abb. 8-5: Werkstoffkonfigurationen der Stumpfnahverbindungen	163
Abb. 8-6: Messung der Abkühlzeit mittels eingebrachter Thermolemente.....	164
Abb. 8-7: Winkelverzug der ersten Probeschweißung.....	164
Abb. 8-8: Eingespannter Versuchskörper.....	165
Abb. 8-9: Messsystem zur Dokumentation der lokalen Verformung des Versuchskörpers	165
Abb. 8-10: Exemplarische Makroschliffe unterschiedlicher Stumpfnahverbindungen	166
Abb. 8-11: Einzeleindrücke HV10 der Verbindung 1-6-V-G69-50-1	167
Abb. 8-12: Härtemapping HV2 der Verbindung 1-6-V-G69-50-1	167
Abb. 8-13: Festlegung der Ausgangsquerschnittsfläche A_0	169
Abb. 8-14: Auftretendes Versagen S690QL $t = 10 \text{ mm}$	170
Abb. 8-15: Auftretendes Versagen S690QL $t = 20 \text{ mm}$	170

Abb. 8-16: Einfluss des Grundwerkstoffs auf das auftretende Versagen	172
Abb. 8-17: Härtemapping V-Naht S690QL – G69	173
Abb. 8-18: Härtemapping V-Naht S460ML – G46	173
Abb. 8-19: Härtemapping V-Naht S700MC – G89.....	174
Abb. 8-20: Einfluss des SZW auf das auftretende Versagen S690QL $t = 10\text{ mm}$	175
Abb. 8-21: Einfluss des SZW auf das auftretende Versagen S690QL $t = 20\text{ mm}$	175
Abb. 8-22: Härtemapping V-Naht S690QL – G46	176
Abb. 8-23: Härtemapping DV-Naht S690QL – G89.....	176
Abb. 8-24: Einfluss des SZW auf das auftretende Versagen S690QL $t = 10\text{ mm}$ Zusatzuntersuchungen [57]	177
Abb. 8-25: Einfluss des SZW auf das auftretende Versagen S690QL $t = 20\text{ mm}$ Zusatzuntersuchungen [57]	177
Abb. 8-26: Einfluss des Energieeintrags S690QL $t = 10\text{ mm}$	179
Abb. 8-27: Einfluss des Energieeintrags S690QL $t = 20\text{ mm}$	179
Abb. 8-28: Härtemapping V-S690-G69-45 hoher Energieeintrag $E = 1,25\text{ kJ/mm}$	180
Abb. 8-29: Härtemapping V-S690-G69-45 niedriger Energieeintrag $E = 0,82\text{ kJ/mm}$	180
Abb. 8-30: Härtemapping DV-S690-G69-60 Hoher Energieeintrag $E = 1,27\text{ kJ/mm}$	181
Abb. 8-31: Härtemapping DV-S690-G69-60 niedrig Energieeintrag $E = 0,83\text{ kJ/mm}$	181
Abb. 8-32: Wirkungsweise der Einflussfaktoren auf ein tragfähigkeitsreduziertes Versagen in der Wärmeeinflusszone	183
Abb. 8-33: Überführung der Nahtgeometrie der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1 in ein FE-Modell.....	185
Abb. 8-34: Vergleich der Härtewerte der Dilatometerversuche und der Stumpfnahthverbindung 1-6-DV-G69-50-1 (hoher Energieeintrag)	186
Abb. 8-35: Vergleich der Härtewerte der Dilatometerversuche und der Stumpfnahthverbindung 1-6-DV-G69-50-2 (niedriger Energieeintrag).....	187
Abb. 8-36: Zugeordnete Spannungs-Dehnungs-Verläufe der einzelnen Materialbereiche.....	188
Abb. 8-37: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Spannungs-Verformungs-Verläufe der Stumpfnahthverbindung 1-6-DV-G46-50-0.....	189
Abb. 8-38: Experimentell beobachtetes Versagen der Verbindung 1-6-DV-G46-50-0	190

Abb. 8-39: Vergleichsdehnung der numerischen Versuchsnachrechnung der Verbindung 1-6-DV-G46-50-0	190
Abb. 8-40: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung der Verbindung 1-6-DV-G46-50-0	190
Abb. 8-41: Ausgleichendes Verhältnis von Querschnittsdicke und Querschnittsfestigkeit	191
Abb. 8-42: Vergleichsdehnung unter Berücksichtigung einer teilweise abgetragenen Nahtüberhöhung der Verbindung 1-6-DV-G46-50-0	192
Abb. 8-43: Vergleich der numerischen und experimentellen Spannungs-Verformungs-Kurven der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1	193
Abb. 8-44: Experimentell beobachtetes Versagen der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1	193
Abb. 8-45: Vergleichsdehnung der numerischen Versuchsnachrechnung der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1	193
Abb. 8-46: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung und der GKZ der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1	194
Abb. 8-47: Vergleichsdehnung bei Berücksichtigung der Nahtüberhöhung der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1	194
Abb. 8-48: Vergleich der numerischen und experimentellen Spannungs-Verformungs-Kurven der Verbindung 1-6-DV-G69-50-1	195
Abb. 8-49: Experimentell beobachtetes Versagen der Verbindung 1-6-DV-G69-50-2	195
Abb. 8-50: Vergleichsdehnung der numerischen Versuchsnachrechnung der Verbindung 1-6-DV-G69-50-2	195
Abb. 8-51: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung und der GKZ der Verbindung 1-6-DV-G69-50-2	196
Abb. 8-52: Vergleichsdehnung unter Berücksichtigung der Nahtüberhöhung der Verbindung 1-6-DV-G69-50-2	196
Abb. 8-53: Versagen im Grundwerkstoff [36].....	199
Abb. 8-54: Versagen in der Wärmeeinflusszone	200
Abb. 8-55: Beispiel zur Ermittlung des Erweichungsfaktors x für Stähle der Güte S690QL	201
Abb. 8-56: Versagen im Schweißgut	203
Abb. 8-57: Statistische Auswertung der Grundgesamtheit der Basisvariable der Nahtüberhöhung ...	207

Abb. 8-58: Tatsächliche Tragfähigkeiten re, i aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte rt, i der Evaluationsgruppe S690QL	211
Abb. 8-59: Tatsächliche Tragfähigkeiten re, i aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte rt, i der Evaluationsgruppe S700MC.....	214
Abb. 8-60: Tatsächliche Tragfähigkeiten re, i aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte rt, i der Evaluationsgruppe S460ML	216
Abb. 8-61: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S460ML	217
Abb. 8-62: Tatsächliche Tragfähigkeiten re, i aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte rt, i der Evaluationsgruppe S500MC.....	219
Abb. 8-63: Tatsächliche Tragfähigkeiten re, i aufgetragen über die theoretischen Widerstandswerte rt, i aller geprüfter Stumpfnahverbindungen	223
Abb. 8-64: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S690QL	224
Abb. 8-65: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S700MC	224
Abb. 8-66: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S500MC	225
Abb. 8-67: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S960QL	226
Abb. 8-68: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S890QL	226
Abb. 8-69: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeit mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S900MC	227
Abb. 8-70: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeit mit den Bemessungsgrenzspannungen der Evaluationsgruppe S960MC	227
Abb. E-1: Stumpfnahverbindung 1-6-V-G46-50-0	270
Abb. E-2: Stumpfnahverbindung 1-6-V-G69-50-1	270
Abb. E-3: Stumpfnahverbindung 1-6-V-G69-50-2	271
Abb. E-4: Stumpfnahverbindung 1-6-DV-G46-50-0.....	271

Abb. E-5: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Spannungs-Verformungs-Verläufe der Stumpfnahhtverbindung 1-6-V-G46-50-0	272
Abb. E-6: Experimentell beobachtetes Versagen der Verbindung 1-6-V-G46-50-0.....	272
Abb. E-7: Vergleichsdehnung der numerischen Versuchsnachrechnung der Verbindung 1-6-V-G46-50-0	272
Abb. E-8: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung der Verbindung 1-6-DV-G69-50-2	272
Abb. E-9: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Spannungs-Verformungs-Verläufe der Stumpfnahhtverbindung 1-6-V-G69-50-1	273
Abb. E-10: Experimentell beobachtetes Versagen der Verbindung 1-6-V-G69-50-1.....	273
Abb. E-11: Vergleichsdehnung der numerischen Versuchsnachrechnung der Verbindung 1-6-V-G69-50-1	273
Abb. E-12: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung der Verbindung 1-6-V-G69-50-1	273
Abb. E-13: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung und der GKZ der Verbindung 1-6-V-G69-50-1	273
Abb. E-14: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Spannungs-Verformungs-Verläufe der Stumpfnahhtverbindung 1-6-V-G69-50-2	274
Abb. E-15: Experimentell beobachtetes Versagen der Verbindung 1-6-V-G69-50-2.....	274
Abb. E-16: Vergleichsdehnung der numerischen Versuchsnachrechnung der Verbindung 1-6-V-G69-50-2	274
Abb. E-17: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung der Verbindung 1-6-V-G69-50-2	274
Abb. E-18: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung und der GKZ der Verbindung 1-6-V-G69-50-2.....	274

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Grenze zwischen unlegierten und legierten Stählen (Schmelzanalyse) nach <i>DIN EN 10020 Tabelle 1</i> [6].....	8
Tab. 2-2: Grenze der chemischen Zusammensetzung zwischen legierten Qualitätsstählen und legierten Edelstählen nach <i>DIN EN 10020 Tabelle 2</i> [6].....	9
Tab. 2-3: Auszug der Empfehlungen für eine Zuordnung der Schweißzusätze zu den jeweiligen Grundwerkstoffen [17].....	17
Tab. 3-1: Vereinfachte Darstellung des thermischen Wirkungsgrades auf die Eigenschaften der Wärmeeinflusszone (in Anlehnung an [72]).....	24
Tab. 3-2: Thermische Wirkungsgrade ε nach <i>DIN EN 1011-2</i> [16].....	29
Tab. 3-3: Einfluss der Schweißnahtform auf die Abkühlzeit $t_{8/5}$ nach <i>DIN EN 1011-2 Tabelle D.1</i> [16].....	32
Tab. 4-1: Korrelationsbeiwerte β_w entsprechend des Entwurfs <i>prEN 1993-1-8 Table 6.1</i> [18].....	42
Tab. 4-2: Korrelationsbeiwerte β_w, mod in Abhängigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs nach <i>prEN 1993-1-8 Table 6.2</i> [18].....	43
Tab. 5-1: Gegenüberstellung des statistischen Auswerteverfahrens nach <i>DIN EN 1990 Anhang D</i> [24] und des für Bruchversagen angepassten Verfahrens nach <i>Kleiner</i> [52].....	64
Tab. 5-2: Schweißnahtzugfestigkeit $f_{wu, kt8/5}$	67
Tab. 5-3: Schweißkonstruktionsfaktor α_w, k	67
Tab. 6-1: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Grundwerkstoffe im Forschungsvorhaben <i>FOSTA P1062</i> [56].....	70
Tab. 6-2: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe im Forschungsvorhaben <i>FOSTA P1062</i> [56].....	72
Tab. 6-3: Schweißprozessparameter der Flanken- und Stirnkehlnähte.....	76
Tab. 6-4: Statistische Größen der Grundgesamtheit der Winkel α_{EC}	89
Tab. 6-5: Statistische Größen der Grundgesamtheit der Winkel α_{max}	91
Tab. 6-6: Für die numerische Versuchsnachrechnung der Kehlnahtverbindungen angesetzte Materialkennwerte.....	106
Tab. 6-7: Für die Parameterstudie der Kehlnahtverbindungen verwendete Materialkennwerte des Schweißguts.....	114
Tab. 6-8: Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs.....	115

Tab. 6-9. Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Aufmischung im Schweißgut mit dem Grundwerkstoff ...	117
Tab. 6-10: Statistische Kenngrößen der Grundgesamtheit der Basisvariable der Festigkeit des Grundwerkstoffs f_u, PM	121
Tab. 6-11: Statistische Kenngrößen der Grundgesamtheit der Basisvariable der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs f_u, FM	122
Tab. 6-12: Statistische Kenngrößen der Grundgesamtheit der Basisvariable der Nahtdicke a	123
Tab. 6-13: Grenzwert f_a in Abhängigkeit des Variationskoeffizienten V_r [44]	126
Tab. 6-14: Datenbasis der Evaluationsgruppe G/T/E46 der Flankenkehlnahtverbindungen	127
Tab. 6-15: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe G/T/E46 der Flankenkehlnahtverbindungen	127
Tab. 6-16: Datenbasis der Evaluationsgruppe G/T/E46 der Stirnkehlnahtverbindungen	129
Tab. 6-17: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe G/T/E46 der Stirnkehlnahtverbindungen.....	130
Tab. 6-18: Datenbasis der Evaluationsgruppe G/T69 der Flankenkehlnahtverbindungen	131
Tab. 6-19: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe G/T69 der Flankenkehlnahtverbindungen	131
Tab. 6-20: Datenbasis der Evaluationsgruppe G/T69 der Stirnkehlnahtverbindungen.....	133
Tab. 6-21: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe G/T69 der Stirnkehlnahtverbindungen.....	133
Tab. 6-22: Datenbasis der Evaluationsgruppe G/T89 der Flankenkehlnahtverbindungen	135
Tab. 6-23: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe G/T89 der Flankenkehlnahtverbindungen	135
Tab. 6-24: Datenbasis der Evaluationsgruppe G/T89 der Stirnkehlnahtverbindungen.....	136
Tab. 6-25: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe G/T89 der Stirnkehlnahtverbindungen.....	137
Tab. 6-26: Statistische Ermittlung des tragfähigkeitssteigernden Faktors $\delta\Delta$	142
Tab. 6-27: Ergebnis der statistische Auswertung des angepassten Bemessungsmodells der Evaluationsgruppe G/T/E46	143
Tab. 6-28: Ergebnis der statistische Auswertung des angepassten Bemessungsmodells der Evaluationsgruppe G/T69.....	144
Tab. 6-29: Überprüfung der Einhaltung des Grenzwerts f_a	144

Tab. 6-30: Ergebnis der statistische Auswertung des angepassten Bemessungsmodells der Evaluationsgruppe G/T89.....	145
Tab. 6-31: Faktor $\delta\Delta$ zur Berücksichtigung der Einwirkungsrichtung von Kehlnahtverbindungen	146
Tab. 8-1: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Grundwerkstoffe im Forschungsvorhaben <i>HighButtWeld</i> [36]	158
Tab. 8-2: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe im Forschungsvorhaben <i>HighButtWeld</i> [36].....	159
Tab. 8-3: Für die numerische Untersuchung der Stumpfnahhtverbindungen angesetzte Materialkennwerte	188
Tab. 8-4: Statistische Auswertung der Erweichungsfaktoren x in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs	202
Tab. 8-5: Beispiel ermittelter Gewichtungsfaktoren y und z unterschiedlicher Nahttypen	204
Tab. 8-6: Statistische Auswertung der Gewichtungsfaktoren y und z	204
Tab. 8-7: Erweichungsfaktoren x in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs	205
Tab. 8-8: Datenbasis der Evaluationsgruppe S690QL	209
Tab. 8-9: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe S690QL	210
Tab. 8-10: Ergebnis der Verträglichkeitsprüfung der Evaluationsgruppe S690QL	211
Tab. 8-11: Datenbasis der Evaluationsgruppe S700MC	212
Tab. 8-12: Ergebnisse der statistischen Auswertungen der Evaluationsgruppe S700MC	213
Tab. 8-13: Datenbasis der Evaluationsgruppe S460ML	215
Tab. 8-14: Ergebnisse der statistischen Auswertungen der Evaluationsgruppe S460ML	215
Tab. 8-15: Datenbasis der Evaluationsgruppe S500MC	218
Tab. 8-16: Ergebnis der statistischen Auswertung der Evaluationsgruppe S500MC.....	218
Tab. 8-17: Datenbasis der Evaluationsgruppen S890QL, S900MC, S960MC und S960QL.....	219
Tab. 8-18: Statistische Auswertungen der Erweichungsfaktoren x der Stahlgüten S890QL, S900MC, S960MC und S960QL	220
Tab. 8-19: Ergebnisse der statistischen Auswertungen der Evaluationsgruppen S890QL, S900MC, S960MC und S960QL	221
Tab. 8-20: Erweichungsfaktoren x in Abhängigkeit des Grundwerkstoffs	222

Anhang A – Statistisches Auswerteverfahren

A.1: Statistische Bestimmung eines Widerstandsmodells

Im Folgenden ist das Vorgehen der in Abschnitt 6.5, 6.6 und 8.6 durchgeführten statistischen Auswertungen zur Bestimmung und Kalibrierung eines Widerstandsmodells nach *DIN EN 1990 Anhang D* [24] aufgeführt. Das zusätzlich angewendete Verfahren nach *Kleiner* [52] unterscheidet sich lediglich in den Schritten 6 und 7 und kann Tab. 5-1 aus Abschnitt 5.7.2 entnommen werden.

Schritt 1: Entwicklung eines Bemessungsmodells

$$r_t = g_{r_t}(\underline{X}) = g_{r_t}(X_1, X_1, \dots, X_j, \dots, X_k) \quad (0.1)$$

Schritt 2: Vergleich der experimentellen und theoretischen Werte

$$r_e = b \cdot r_t \quad (0.2)$$

Schritt 3: Schätzung der Mittelwertkorrektur b

$$r = b \cdot r_t \cdot \delta \quad (0.3)$$

Mit:

$$b = \frac{\sum r_e \cdot r_t}{\sum r_t^2} \quad (0.4)$$

Schritt 4: Schätzung des Variationskoeffizienten der Streugröße δ

$$V_\delta = \sqrt{\exp(s_\Delta^2) - 1} \quad (0.5)$$

Mit

$$\delta_i = \frac{r_{ei}}{b \cdot r_{ti}} \quad (0.6)$$

$$\Delta_i = \ln(\delta_i) \quad (0.7)$$

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (0.8)$$

$$s_\Delta^2 = \frac{1}{1-n} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2 \quad (0.9)$$

Schritt 5: Verträglichkeitsprüfung

Schritt 6: Bestimmung der Variationskoeffizienten V_{X_i} der Basisvariablen

$$V_{X_i} = \frac{\sigma_{X_i}}{\underline{X}_{i,m}} \quad (0.10)$$

Schritt 7: Bestimmung des Variationskoeffizienten aller Basisvariablen für komplexe Funktionen

$$V_{r_{ti}}^2 = \frac{1}{r_{ti}(\underline{X}_{j,m})^2} \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial r_{ti}(X_j)}{\partial X_j} \cdot \sigma_j \right)^2 \quad (0.11)$$

$$V_{ri}^2 = (1 + V_{\delta}^2) \cdot (1 + V_{r_{ti}}^2) - 1 \quad \text{nach [62]} \quad (0.12)$$

$$Q_{r_{ti}} = \sqrt{\ln(V_{r_{ti}}^2 + 1)} \quad (0.13)$$

$$Q_{\delta} = \sqrt{\ln(V_{\delta}^2 + 1)} \quad (0.14)$$

$$Q_i = \sqrt{\ln(V_{ri}^2 + 1)} \quad (0.15)$$

Schritt 8: Bestimmung des Bemessungswerts der Widerstandsfunktion

$$n \leq 100 \quad r_{d,i} = b \cdot r_{ti}(X_{j,m}) \cdot \exp\left(-k_{d,\infty} \cdot \frac{Q_{r_{ti}}^2}{Q_i} - k_{d,n} \cdot \frac{Q_{\delta}^2}{Q_i} - 0,5 \cdot Q_i^2\right) \quad (0.16)$$

$$n > 100 \quad r_{d,i} = b \cdot r_{ti}(X_{j,m}) \cdot \exp(-k_{d,\infty} \cdot Q_i - 0,5 \cdot Q_i^2) \quad (0.17)$$

Schritt 9: Bestimmung des korrigierten Teilsicherheitsbeiwerts

$$\gamma_M^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{r_{t,nom,i}}{r_{d,i}} \quad (0.18)$$

Mit

$$r_{t,nom,i} = g_{r_t}\left(\underline{X}_{nom,i}\right) \quad (0.19)$$

Schritt 10: Korrektur der Widerstandsfunktion

$$g_{r_t}(\underline{X}) = \frac{\gamma_{M,target}}{\gamma_M^*} \cdot g_{r_t}\left(\underline{X}_{nom}\right) \quad (0.20)$$

Anhang B – Versuche Forschungsvorhaben FOSTA P1062 [56]

B.1: Chemische Zusammensetzungen der Werkstoffe

Die folgende Tabelle umfasst die chemischen Zusammensetzungen der im Forschungsvorhaben FOSTA P1062 [56] verwendeten Grundwerkstoffe und Schweißzusatzwerkstoffe. Die aufgeführten Werte entsprechen den aus den 3.1 Zeugnissen bzw. Datenblättern entnommenen Werten. Den Tabellen sind durch die von den geltenden Produktnormen geforderten Grenzwerten ergänzt. Die Daten wurden im Forschungsvorhaben FOSTA P1062 [56] zur Festlegung der Schweißprozessparameter herangezogen.

Chemische Zusammensetzung der Schweißzusatzwerkstoffe

Legierungselemente			G46	G69	G89	T46	T69	T89
			4Si1 prEN ISO 14341:2019 Tabelle 1A [14]	Mn3Ni1CrMo DIN EN ISO 16834:2012-08 Tabelle 1A [15]	Mn4Ni2CrMo DIN EN ISO 16834:2012-08 Tabelle 1A [15]	- DIN EN ISO 17632:2008 Tabelle 1A [12]	Mn2NiMo DIN EN ISO 18276:2017-07 Tabelle 1A [13]	Z DIN EN ISO 18276:2017-07 Tabelle 1A [13]
Kohlenstoff [%]	C	nom.:	0,06 bis 0,14	0,12	0,12	-	0,03 bis 0,10	-
		exp.:	0,07	0,100	0,110	0,050	0,070	0,080
Silicium [%]	Si	nom.:	0,70 bis 1,00	0,50 bis 0,80	0,60 bis 0,90	-	0,90	-
		exp.:	0,94	0,570	0,820	0,590	0,400	0,530
Mangan [%]	Mn	nom.:	1,30 bis 1,60	1,6 bis 2,10	1,60 bis 2,10	2,00	1,40 bis 2,00	-
		exp.:	1,63	1,700	1,880	1,220	1,400	1,220
Phosphor [%]	P	nom.:	0,03	0,02	0,02	-	0,02	-
		exp.:	0,010	0,015	0,009	0,009	0,009	0,010
Schwefel [%]	S	nom.:	0,03	0,02	0,02	-	0,02	-
		exp.:	0,008	0,006	0,006	0,030	0,009	0,015
Aluminium [%]	Al	nom.:	0,02	max. 0,12	max. 0,12	2,00	-	-
		exp.:	0,001	<0,01	0,009	-	-	-
Niob [%]	Nb	nom.:	-	-	-	0,05	max. 0,05	-
		exp.:	-	-	-	<0,01	-	-
Vanadium [%]	V	nom.:	0,03	0,03	0,03	0,08	0,05	-
		exp.:	<0,01	0,070	0,010	<0,01	0,010	-
Molybdän [%]	Mo	nom.:	0,15	0,30 bis 0,65	0,45 bis 0,70	0,20	0,30 bis 0,70	-
		exp.:	<0,01	0,240	0,520	0,020	0,540	0,730
Nickel [%]	Ni	nom.:	0,15	1,30 bis 1,90	1,80 bis 2,30	0,50	1,80 bis 2,60	-
		exp.:	0,010	1,430	2,070	0,470	2,310	2,740
Chrom [%]	Cr	nom.:	0,15	0,15 bis 0,40	0,20 bis 0,45	0,20	0,20	-
		exp.:	0,040	0,370	0,380	0,040	0,020	0,500
Kupfer [%]	Cu	nom.:	0,35	0,30	0,30	-	max. 0,30	-
		exp.:	0,020	0,030	0,118	0,030	0,010	-
Titan [%]	Ti	nom.:	-	max. 0,10	max. 0,10	0,30	-	-
		exp.:	0,01	<0,01	0,040	-	-	-
Zincronium [%]	Zr	nom.:	-	max. 0,10	max. 0,10	-	-	-
		exp.:	-	<0,01	<0,01	-	-	-

Chemische Zusammensetzung der Grundwerkstoffe

Legierungselemente	S355J2+N 1.0577	S460ML 1.8838			S690QL 1.8928		S960QL 1.8933			
		DIN EN 10025-3:2019-10 Tabelle 4 [8]			DIN EN 10025-4:2019-10 Tabelle 4 [9]		DIN EN 10025-6: 2020-02 Tabelle 4 [10]		DIN EN 10025-6: 2009-08 Tabelle 4 [10]	
Blechdicke t [mm]	15	25	30	15	20	25	15	20	15	20
Kohlenstoff [%]	C	nom.: max. 0.20			max. 0.16		max. 0.20		max. 0.20	
		exp.: 0,189	0,149	0,180	0,028	0,109	0,103	0,150	0,163	-
Silicium [%]	Si	nom.: max. 0.55			max. 0.60		max. 0.80		max. 0.80	
		exp.: 0,326	0,217	0,300	0,317	0,502	0,484	0,288	0,291	-
Mangan [%]	Mn	nom.: max. 1.60			max. 1.70		max. 1.70		max. 1.70	
		exp.: 1,210	1,560	1,310	1,630	1,620	1,630	1,310	1,300	-
Phosphor [%]	P	nom.: max. 0.025			max. 0.025		max. 0.02		max. 0.02	
		exp.: 0,008	0,016	0,013	0,007	0,012	0,012	0,008	0,008	-
Schwefel [%]	S	nom.: max. 0.025			max. 0.020		max. 0.010		max. 0.010	
		exp.: 0,0045	0,0008	0,001	0,0003	0,0013	0,001	0,0006	0,0006	-
Aluminium [%]	Al	nom.: -			min. 0.02		-		-	
		exp.: 0,036	-	0,038	0,038	0,034	0,034	-	-	-
Niob [%]	Nb	nom.: max. 0.05			max. 0.05		max. 0.06		max. 0.06	
		exp.: 0,002	-	0,001	0,038	0,029	0,027	0,025	0,024	-
Vanadium [%]	V	nom.: max. 0.13			max. 0.12		max. 0.12		max. 0.12	
		exp.: 0,002	0,002	0,003	0,004	0,000	0,001	0,001	-	-
Molybdän [%]	Mo	nom.: max. 0.11			max. 0.20		max. 0.7		max. 0.70	
		exp.: 0,002	0,020	0,001	0,011	0,016	0,016	0,116	0,113	-
Nickel [%]	Ni	nom.: max. 0.42			max. 0.80		max. 2.00		max. 2.00	
		exp.: 0,010	0,052	0,010	0,180	0,024	0,056	0,068	0,049	-
Chrom [%]	Cr	nom.: max. 0.42			max. 0.30		max. 1.50		max. 1.50	
		exp.: 0,037	0,043	0,070	0,177	0,031	0,032	0,054	0,037	-
Kupfer [%]	Cu	nom.: max. 0.55			max. 0.55		max. 0.5		max. 0.50	
		exp.: 0,011	0,026	0,010	0,163	0,021	0,028	0,035	0,038	-
Titan [%]	Ti	nom.: max. 0.05			max. 0.05		max. 0.05		max. 0.05	
		exp.: 0,001	-	0,002	0,011	0,002	0,002	0,002	0,002	-
Stickstoff [%]	N	nom.: -			max. 0.025		max. 0.015		max. 0.015	
		exp.: 0,0053	-	0,0040	0,0055	0,0048	0,0040	0,0031	0,0026	-
Bor [%]	B	nom.: -			-		max. 0.005		max. 0.005	
		exp.: 0,0002	-	-	0,0002	0,000	0,000	0,0022	0,0018	-
Zincronium [%]	Zr	nom.: -			-		max. 0.15		max. 0.15	
		exp.: -	-	-	-	-	-	-	-	-

B.2: Begleituntersuchungen

Der anschließenden Tabelle zeigt eine Übersicht der Versuchskörper für Informationen Forschungsvorhaben *FOSTA P1062* [56] hinsichtlich Makroschliffe, Härtemessungen und Bruchflächenscans vorliegen.

Versuchskörperbezeichnung	Makroschliff	Härtemessung	Scan der Bruchfläche	Bruch in Naht
FLA-355/460-e-G46-1	X		X	Naht 2
FLA-460/355-e-G46-1	X	X	X	Naht 1
FLA-355/460-e-G69-1	X		X	Naht 2
FLA-460/355-e-G69-1	X	X	X	Naht 2
FLA-355/460-e-T69-1	X		X	Naht 1
FLA-355/690-e-G46-1	X		X	Naht 1
FLA-690/355-e-G46-1	X	X	X	Naht 2
FLA-355/690-e-G69-1	X		X	Naht 2
FLA-690/355-e-G69-1	X	X	X	Naht 2
FLA-355/960-e-G46-1	X	X	X	Naht 2
FLA-960/355-e-G46-1	X	X	X	Naht 2
FLA-355/960-e-T46-1	X	X	X	Naht 1
FLA-355/960-e-G89-1	X	X	X	Naht 2
FLA-960/355-e-G89-1	X	X	X	Naht 1
FLA-355/960-e-T89-1	X	X	X	Naht 2
STI-355/460-e-G46	X	X	X	Naht 1
STI-355/460-e-G69	X	X	X	Naht 1
STI-355/460-e-T69	X	X	X	Naht 1
STI-355/690-e-G46	X	X	X	Naht 1
STI-355/690-e-G69	X	X	X	Naht 1
STI-355/960-e-G46	X	X	X	Naht 1
STI-355/960-e-T46	X	X	X	Naht 1
STI-355/960-e-G89	X	X	X	Naht 1
STI-355/960-e-T89	X	X	X	Naht 1

B.3: Tragfähigkeiten von Mischverbindungen

Die aus den experimentellen Untersuchungen dokumentierten Tragfähigkeiten von Kehlnähten an Mischverbindungen im Forschungsvorhaben FOSTA P1062 [56], können den folgenden Tabellen entnommen werden. Die Tragfähigkeiten wurden anhand der maximal gemessenen Prüfkraft F_{max} dividiert durch die nach prEN 1993-1-8 [18] definierten Nahtdicke a_{EC} ermittelt.

Tragfähigkeit der Flankenkehlnähte

Versuchskörper- bezeichnung Flankenkehlnähte	Max. Prüfkraft F_{max} [kN]	Bruch- flächen A_{EC} [mm ²]	Tragfähigkeit $\tau_{ ,max}$ [N/mm ²]	Versuchskörper- bezeichnung Flankenkehlnähte	Max. Prüfkraft F_{max} [kN]	Bruch- flächen A_{EC} [mm ²]	Tragfähigkeit $\tau_{ ,max}$ [N/mm ²]
FLA-355/460-e-G46-1	337,9	752,9	448,8	FLA-355/690-e-G69-2	380,7	48,5	538,6
FLA-355/460-e-G46-2	340,5	713,0	477,6	FLA-690/355-e-G69-1	400,2	48,5	543,2
FLA-460/355-e-G46-1	354,2	712,5	497,1	FLA-690/355-e-G69-2	398,1	49,8	548,2
FLA-460/355-e-G46-2	358,8	735,6	487,8	FLA-355/960-e-G46-1	371,7	50,0	500,1
FLA-355/460-e-G69-1	373,3	735,7	507,4	FLA-355/960-e-G46-2	377,0	49,9	518,7
FLA-355/460-e-G69-2	381,5	737,5	517,3	FLA-960/355-e-G46-1	348,4	50,1	517,5
FLA-460/355-e-G69-1	374,8	701,0	534,6	FLA-960/355-e-G46-2	389,6	50,4	530,0
FLA-460/355-e-G69-2	373,5	730,9	511,0	FLA-355/960-e-T46-1	346,0	50,9	525,0
FLA-355/460-e-T69-1	319,8	619,2	516,5	FLA-355/960-e-T46-2	338,1	50,2	540,1
FLA-355/460-e-T69-2	313,9	618,6	507,4	FLA-355/960-e-G89-1	425,4	49,8	554,4
FLA-355/690-e-G46-1	343,5	687,8	499,4	FLA-355/960-e-G89-2	421,2	49,3	585,5
FLA-355/690-e-G46-2	354,8	730,7	485,5	FLA-960/355-e-G89-1	438,1	50,4	574,4
FLA-690/355-e-G46-1	363,6	736,7	493,6	FLA-960/355-e-G89-2	436,4	50,7	590,2
FLA-690/355-e-G46-2	358,4	732,6	489,2	FLA-355/960-e-T89-1	397,7	50,1	652,4
FLA-355/690-e-G69-1	395,8	739,2	535,4	FLA-355/960-e-T89-2	391,7	50,6	620,9

Tragfähigkeit der Stirnkehlnähte

Versuchskörper- bezeichnung Stirnkehlnähte	Max. Prüfkraft	Bruch- flächen	Tragfähigkeit	Versuchskörper- bezeichnung Stirnkehlnähte	Max. Prüfkraft	Bruch- flächen	Tragfähigkeit
	F_{max} [kN]	A_{EC} [mm ²]	$\sigma_{v,max}$ [N/mm ²]		F_{max} [kN]	A_{EC} [mm ²]	$\sigma_{v,max}$ [N/mm ²]
STI-355/460-e-G46-1		Testversuch		STI-355/690-e-G69-3	418,0	520,4	803,2
STI-355/460-e-G46-2	382,3	560,2	682,4	STI-355/690-e-G69-4	434,9	522,0	833,2
STI-355/460-e-G46-3	393,8	561,4	701,5	STI-355/960-e-G46-1	374,0	531,6	703,7
STI-355/460-e-G46-4	399,2	572,3	697,6	STI-355/960-e-G46-2	372,7	530,7	702,4
STI-355/460-e-G69-1		Testversuch		STI-355/960-e-G46-3	384,9	532,7	722,6
STI-355/460-e-G69-2	416,9	531,2	784,9	STI-355/960-e-G46-4	385,4	537,7	716,7
STI-355/460-e-G69-3	421,9	539,6	782,0	STI-355/960-e-T46-1	314,6	533,4	589,8
STI-355/460-e-G69-4	414,1	533,9	775,5	STI-355/960-e-T46-2	312,3	527,2	592,4
STI-355/460-e-T69-1	367,8	466,8	787,9	STI-355/960-e-T46-3	300,1	532,4	563,7
STI-355/460-e-T69-2	355,3	466,1	762,3	STI-355/960-e-T46-4	340,3	522,0	651,8
STI-355/460-e-T69-3	356,4	466,6	763,8	STI-355/960-e-G89-1	447,3	528,1	846,9
STI-355/460-e-T69-4	363,4	466,2	779,5	STI-355/960-e-G89-2	454,1	528,3	859,5
STI-355/690-e-G46-1	331,9	530,0	626,3	STI-355/960-e-G89-3	453,9	527,3	860,8
STI-355/690-e-G46-2	365,0	524,7	695,5	STI-355/960-e-G89-4	455,9	528,1	863,3
STI-355/690-e-G46-3	345,9	532,1	650,0	STI-355/960-e-T89-1	391,7	477,1	821,1
STI-355/690-e-G46-4	346,5	518,8	667,9	STI-355/960-e-T89-2	418,5	460,2	909,4
STI-355/690-e-G69-1	424,9	512,3	829,4	STI-355/960-e-T89-3	397,2	465,4	853,4
STI-355/690-e-G69-2	434,3	516,5	840,8	STI-355/960-e-T89-4	360,0	459,2	783,9

Anhang C – Versuche Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36]

C.1: Chemische Zusammensetzungen der Werkstoffe

Die folgende Tabelle umfasst die chemischen Zusammensetzungen der im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] verwendeten Grundwerkstoffe und Schweißzusatzwerkstoffe. Die aufgeführten Werte entsprechen den aus den 3.1 Zeugnissen bzw. Datenblättern entnommenen Werten. Den Tabellen sind durch die von den geltenden Produktnormen geforderten Grenzwerten ergänzt. Die Daten wurden im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] zur Festlegung der Schweißprozessparameter herangezogen.

Chemische Zusammensetzung der Schweißzusatzwerkstoffe

Legierungselemente			G46	G69	T69	G89	T89
			4Si1 prEN ISO 14341: 2019 Tabelle 1A [14]	Mn4Ni1.5CrMo DIN EN ISO 16834: 2012-08 Tabelle 1A [15]	Mn2NiCrMo DIN EN ISO 18276: 2017-07 Tabelle 1A [13]	Mn4Ni2CrMo DIN EN ISO 16834: 2012-08 Tabelle 1A [15]	Z DIN EN ISO 18276: 2017-07 Tabelle 1A [13]
Kohlenstoff [%]	C	nom.	0,06 bis 0,14	0,120	0,03 bis 0,10	0,120	-
		exp.	0,080	0,080	0,06	0,100	0,105
Silicium [%]	Si	nom.	0,70 bis 1,00	0,50 bis 0,80	0,900	0,60 bis 0,90	-
		exp.	1,050	0,600	0,66	0,800	0,530
Mangan [%]	Mn	nom.	1,30 bis 1,60	1,60 bis 2,10	1,40 bis 2,00	1,60 bis 2,10	-
		exp.	1,650	1,700	1,51	1,800	1,320
Phosphor [%]	P	nom.	0,025	0,015	0,020	0,015	-
		exp.	-	-	0,009	-	0,008
Schwefel [%]	S	nom.	0,025	0,018	0,020	0,018	-
		exp.	-	-	0,005	-	0,010
Aluminium [%]	Al	nom.	0,020	max. 0,12	-	max. 0,12	-
		exp.	-	-	-	-	-
Niob [%]	Nb	nom.	-	-	-	-	-
		exp.	-	1,500	-	-	0,010
Vanadium [%]	V	nom.	0,030	0,030	0,050	0,030	-
		exp.	-	-	< 0,01	-	0,010
Molybdän [%]	Mo	nom.	0,150	0,30 bis 0,65	0,30 bis 0,60	0,45 bis 0,70	-
		exp.	-	0,500	0,33	0,600	0,710
Nickel [%]	Ni	nom.	0,150	1,30 bis 1,90	1,80 bis 2,60	1,80 bis 2,30	-
		exp.	-	-	2,06	2,300	2,490
Chrom [%]	Cr	nom.	0,150	0,15 bis 0,40	0,30 bis 0,60	0,20 bis 0,45	-
		exp.	-	0,200	0,36	0,350	0,580
Kupfer [%]	Cu	nom.	0,350	0,300	-	0,300	-
		exp.	-	-	0,09	-	0,010
Titan [%]	Ti	nom.	-	max. 0,10	-	max. 0,10	-
		exp.	0,010	-	-	-	-
Zirkonium [%]	Zr	nom.	-	max. 0,10	-	max. 0,10	-
		exp.	-	-	-	-	-

Chemische Zusammensetzung der Grundwerkstoffe

Legierungselemente		S460ML 1.8838		S690QL 1.8928		S700MC 1.8974		
		DIN EN 10025-4: 2019-10 Tabelle 4 [9]		DIN EN10025-6: 2020-02 Tabelle 4 [10]		DIN EN 10149-2: 2013 Tabelle 2 [11]		
Blechdicke t [mm]:		10	20	10	Blechdicke t [mm]:	10	20	
Kohlenstoff [%]	C	nom.	0,160		0,200		0,120	
		exp.	0,031	0,031	0,140	0,140	0,070	0,065
Silicium [%]	Si	nom.	0,600		0,800		0,600	
		exp.	0,327	0,317	0,210	0,225	0,025	0,019
Mangan [%]	Mn	nom.	1,700		1,700		2,100	
		exp.	1,590	1,600	1,030	1,170	1,930	1,880
Phosphor [%]	P	nom.	0,025		0,020		0,025	
		exp.	0,006	0,007	0,012	0,010	0,008	0,009
Schwefel [%]	S	nom.	0,020		0,010		0,015	
		exp.	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002
Aluminium [%]	Al	nom.	0,020		-		0,015	
		exp.	0,360	0,036	0,092	0,082	0,061	0,056
Niob [%]	Nb	nom.	0,050		0,060		0,090	
		exp.	0,038	0,036	0,027	0,029	0,053	0,051
Vanadium [%]	V	nom.	0,120		0,120		0,200	
		exp.	0,004	0,005	0,000	0,002	0,008	0,007
Molybdän [%]	Mo	nom.	0,200		0,700		0,500	
		exp.	0,006	0,005	0,220	0,309	0,005	0,005
Nickel [%]	Ni	nom.	0,800		2,000		-	
		exp.	0,170	0,170	0,050	0,046	0,010	0,014
Chrom [%]	Cr	nom.	0,300		1,500		-	
		exp.	0,168	0,172	0,330	0,341	0,027	0,032
Kupfer [%]	Cu	nom.	0,550		0,500		-	
		exp.	0,161	0,161	0,010	0,032	0,010	0,011
Titan [%]	Ti	nom.	0,050		0,050		0,220	
		exp.	0,013	0,012	0,006	0,004	0,149	0,137
Stickstoff [%]	N	nom.	0,025		0,015		-	
		exp.	0,005	0,004	0,004	0,003		
Bor [%]	B	nom.	-		0,005		0,005	
		exp.	0,000	0,000	0,003	0,003	0,000	0,000
Zirkonium [%]	Zr	nom.	-		0,150		-	
		exp.			0,000	0,001		

C.2: Versuchsprogramm

Die folgenden Tabellen umfassen das im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36] realisierte Versuchsprogramm.

Versuchsserie Referenzversuche S460ML

Nahtvorbereitung	Materialdicke [mm]	Öffnungswinkel [°]	Schweißzusatzwerkstoff
V	10	50	G46 ($M = 1,0$)
DV	20		
DHV			

Versuchsserie S700MC

Nahtvorbereitung	Materialdicke [mm]	Öffnungswinkel [°]	Schweißzusatzwerkstoff
V DV DHV	10	50	G89 ($M = 1,27$)
			T89 ($M = 1,27$)
	20		G89 ($M = 1,27$)
			T89 ($M = 1,27$)

Versuchsserie S690QL, V-Naht

Nahtvorbereitung	Materialdicke [mm]	Öffnungswinkel [°]	Schweißzusatzwerkstoff	Energieeintrag
V	10	45	G69 ($M = 1,0$)	hoch
				niedrig
		50	G69 ($M = 1,0$)	hoch
				niedrig
		60	T69 ($M = 1,0$)	hoch
				niedrig
	20	50	G46 ($M = 0,67$)	-
		60	G69 ($M = 1,0$)	hoch
				niedrig
		50	G69 ($M = 1,0$)	hoch
				niedrig
	T69 ($M = 1,0$)	hoch		
		niedrig		
		G46 ($M = 0,67$)	-	
		60	G69 ($M = 1,0$)	hoch
				niedrig

Versuchsserie S690QL, DV-Naht

Nahtvorbereitung	Materialdicke [mm]	Öffnungswinkel [°]	Schweißzusatzwerkstoff	Energieeintrag	
DV	10	50	G69 ($M = 1,0$)	hoch	
				niedrig	
			T69 ($M = 1,0$)	hoch	
			niedrig		
			G46 ($M = 0,67$)	-	
		60	G69 ($M = 1,0$)	hoch	
			niedrig		
		20	50	G69 ($M = 1,0$)	hoch
				niedrig	
	T69 ($M = 1,0$)			hoch	
	niedrig				
	G89 ($M = 1,29$)		hoch		
	niedrig				
		G46 ($M = 0,67$)	-		
		60	G69 ($M = 1,0$)	hoch	
			niedrig		

Versuchsserie S690QL, DHV-Naht

Nahtvorbereitung	Materialdicke [mm]	Öffnungswinkel [°]	Schweißzusatzwerkstoff	Energieeintrag
DHV	10	50	G69 ($M = 1,0$)	hoch
				niedrig
			T69 ($M = 1,0$)	hoch
			niedrig	
			G46 ($M = 0,67$)	-
		20	G69 ($M = 1,0$)	hoch
			niedrig	
	T69 ($M = 1,0$)		hoch	
		niedrig		
		G46 ($M = 0,67$)	-	

C.3: Tragfähigkeiten durchgeschweißter Stumpfnahverbindungen

Die aus den experimentellen Untersuchungen dokumentierten Tragfähigkeiten von Stumpfnahverbindungen im Forschungsvorhaben *HighButtWeld* [36], können den folgenden Tabellen entnommen werden. Die Tragfähigkeiten wurden anhand der maximal gemessenen Prüfkraft F_{max} dividiert durch die im Bruchbereich vorliegende Querschnittsfläche ermittelt. Bei Verbindungen, die mit einem „*“ markiert sind, erfolgte der Abtrag der Nahtüberhöhung vor der Versuchsdurchführung. Alle weiteren Versuche wurden mit der vorhandenen Nahtüberhöhung geprüft.

Tragfähigkeit der Referenzversuche

Versuchskörperbezeichnung	Versagen	Tragfähigkeit $\sigma_{v,max}$ [N/mm ²]	Versuchskörperbezeichnung	Versagen	Tragfähigkeit $\sigma_{v,max}$ [N/mm ²]
1-4-V-G46-50.P1	GW	593	2-4-V-G46-50.P1	GW	632
1-4-V-G46-50.P2	GW	597	2-4-V-G46-50.P2	GW	623
1-4-V-G46-50.P3	GW	587	2-4-V-G46-50.P3	GW	614
1-4-DV-G46-50.P1	GW	595	2-4-DV-G46-50.P1	GW	585
1-4-DV-G46-50.P2	GW	594	2-4-DV-G46-50.P2	GW	583
1-4-DV-G46-50.P3	GW	595	2-4-DV-G46-50.P3	GW	584
1-4-DHV-G46-50.P1	GW	596	2-4-DHV-G46-50.P1	GW	577
1-4-DHV-G46-50.P2	GW	594	2-4-DHV-G46-50.P2	GW	582
1-4-DHV-G46-50.P3	GW	593	2-4-DHV-G46-50.P3	GW	581

Tragfähigkeit der Stumpfnahverbindungen der Güte S700MC

Versuchskörperbezeichnung	Versagen	Tragfähigkeit $\sigma_{v,max}$ [N/mm ²]	Versuchskörperbezeichnung	Versagen	Tragfähigkeit $\sigma_{v,max}$ [N/mm ²]
1-7-V-G89-50.P1	GW	831	2-7-V-G89-50.P1	GW	808
1-7-V-G89-50.P2	GW	858	2-7-V-G89-50.P2	GW	790
1-7-V-G89-50.P3	GW	828	2-7-V-G89-50.P3	GW	806
1-7-V-T89-50.P1	GW	828	2-7-V-T89-50.P1	GW	791
1-7-V-T89-50.P2	GW	828	2-7-V-T89-50.P2	GW	799
1-7-V-T89-50.P3	GW	828	2-7-V-T89-50.P3	GW	788
1-7-DV-G89-50.P1	GW	831	2-7-DV-G89-50.P1	GW	804
1-7-DV-G89-50.P2	GW	822	2-7-DV-G89-50.P2	GW	799
1-7-DV-G89-50.P3	GW	822	2-7-DV-G89-50.P3	GW	795
1-7-DV-T89-50.P1	GW	827	2-7-DV-T89-50.P1	GW	788
1-7-DV-T89-50.P2	GW	830	2-7-DV-T89-50.P2	GW	790
1-7-DV-T89-50.P3	GW	831	2-7-DV-T89-50.P3	GW	786
1-7-DHV-G89-50.P1	GW	822	2-7-DHV-G89-50.P1	GW	820
1-7-DHV-G89-50.P2	GW	820	2-7-DHV-G89-50.P2	GW	809
1-7-DHV-G89-50.P3	WEZ	825	2-7-DHV-G89-50.P3	GW	819
1-7-DHV-T89-50.P1	GW	832	2-7-DHV-T89-50.P1	GW	790
1-7-DHV-T89-50.P2	GW	832	2-7-DHV-T89-50.P2	GW	790
1-7-DHV-T89-50.P3	GW	829	2-7-DHV-T89-50.P3	GW	783

Tragfähigkeit der Stumpfnahtverbindungen der Güte S690QL

Versuchskörper- bezeichnung	Versagen	Trag- fähigkeit $\sigma_{v,max}$ [N/mm ²]	Versuchskörper- bezeichnung	Versagen	Trag- fähigkeit $\sigma_{v,max}$ [N/mm ²]	Versuchskörper- bezeichnung	Versagen	Trag- fähigkeit $\sigma_{v,max}$ [N/mm ²]
1-6-V-G69-45-1.P1	WEZ	854	1-6-DV-G69-50-2.P3*	GW	869	2-6-DV-T69-50-1.P1*	SG	858
1-6-V-G69-45-1.P2	WEZ	862	1-6-DV-G69-60-1.P1*	WEZ	876	2-6-DV-T69-50-1.P2*	WEZ	860
1-6-V-G69-45-1.P3	WEZ	841	1-6-DV-G69-60-1.P2*	WEZ	866	2-6-DV-T69-50-1.P3*	WEZ	868
1-6-V-G69-45-2.P1	GW	860	1-6-DV-G69-60-1.P3*	WEZ	877	2-6-DV-T69-50-2.P1*	SG	816
1-6-V-G69-45-2.P2	GW	864	1-6-DV-G69-60-2.P1	GW	861	2-6-DV-T69-50-2.P2*	SG	746
1-6-V-G69-45-2.P3	GW	864	1-6-DV-G69-60-2.P2	GW	866	2-6-DV-T69-50-2.P3*	SG	763
1-6-V-G69-50-1.P1	GW	864	1-6-DV-G69-60-2.P3	GW	861	2-6-DV-G46-50-0.P1*	SG	829
1-6-V-G69-50-1.P2	GW	865	1-6-DHV-T69-50-1.P1*	WEZ	835	2-6-DV-G46-50-0.P2*	SG	839
1-6-V-G69-50-1.P3	GW	863	1-6-DHV-T69-50-1.P2*	WEZ	858	2-6-DV-G46-50-0.P3*	SG	814
1-6-V-G69-50-1.P4*	WEZ	860	1-6-DHV-T69-50-1.P3*	WEZ	845	2-6-DV-G69-50-1.P1*	WEZ	870
1-6-V-G69-50-2.P1	GW	863	1-6-DHV-T69-50-2.P1	GW	853	2-6-DV-G69-50-1.P2*	WEZ	868
1-6-V-G69-50-2.P2	GW	861	1-6-DHV-T69-50-2.P2	GW	854	2-6-DV-G69-50-1.P3*	WEZ	872
1-6-V-G69-50-2.P3	GW	860	1-6-DHV-T69-50-2.P3	GW	849	2-6-DV-G69-50-2.P1*	GW	865
1-6-V-G69-50-2.P4*	GW	862	1-6-DHV-T69-50-2.P4*	WEZ	838	2-6-DV-G69-50-2.P2*	GW	865
1-6-V-T69-50-1.P1	GW	869	1-6-DHV-G46-50-0.P1*	SG	807	2-6-DV-G69-50-2.P3*	GW	864
1-6-V-T69-50-1.P2	WEZ	864	1-6-DHV-G46-50-0.P2*	SG	822	2-6-DV-G89-50-1.P1*	GW	879
1-6-V-T69-50-1.P3	WEZ	850	1-6-DHV-G46-50-0.P3*	SG	809	2-6-DV-G89-50-1.P2*	GW	877
1-6-V-T69-50-2.P1	WEZ	876	1-6-DHV-G69-50-1.P1*	WEZ	852	2-6-DV-G89-50-1.P3*	GW	877
1-6-V-T69-50-2.P2	WEZ	873	1-6-DHV-G69-50-1.P2*	WEZ	846	2-6-DV-G89-50-2.P1*	GW	878
1-6-V-T69-50-2.P3	WEZ	871	1-6-DHV-G69-50-1.P3*	WEZ	858	2-6-DV-G89-50-2.P2*	GW	878
1-6-V-G46-50-0.P1	GW	860	1-6-DHV-G69-50-2.P1	GW	856	2-6-DV-G89-50-2.P3*	GW	876
1-6-V-G46-50-0.P2	GW	866	1-6-DHV-G69-50-2.P2	GW	863	2-6-DV-G69-60-1.P1*	WEZ	859
1-6-V-G46-50-0.P3	GW	882	1-6-DHV-G69-50-2.P3	GW	864	2-6-DV-G69-60-1.P2*	SG	847
1-6-V-G69-60-1.P1	WEZ	863	2-6-V-T69-50-1.P1*	SG	758	2-6-DV-G69-60-1.P3*	SG	875
1-6-V-G69-60-1.P2	WEZ	860	2-6-V-T69-50-1.P2*	SG	764	2-6-DV-G69-60-2.P1*	WEZ	868
1-6-V-G69-60-1.P3	WEZ	851	2-6-V-T69-50-1.P3*	SG	769	2-6-DV-G69-60-2.P2*	WEZ	868
1-6-V-G69-60-2.P1	GW	849	2-6-V-T69-50-2.P1*	SG	825	2-6-DV-G69-60-2.P3*	GW	846
1-6-V-G69-60-2.P2	GW	860	2-6-V-T69-50-2.P2*	SG	818	2-6-DHV-T69-50-1.P1	GW	885
1-6-V-G69-60-2.P3	GW	869	2-6-V-T69-50-2.P3*	SG	822	2-6-DHV-T69-50-1.P2	GW	879
1-6-DV-T69-50-1.P1	GW	857	2-6-V-G46-50-0.P1*	SG	779	2-6-DHV-T69-50-1.P3	GW	880
1-6-DV-T69-50-1.P2	GW	864	2-6-V-G46-50-0.P2*	SG	787	2-6-DHV-T69-50-1.P4*	WEZ	856
1-6-DV-T69-50-1.P3	GW	866	2-6-V-G46-50-0.P3*	SG	806	2-6-DHV-T69-50-2.P1	GW	884
1-6-DV-T69-50-1.P4*	WEZ	847	2-6-V-G69-50-1.P1*	WEZ	825	2-6-DHV-T69-50-2.P2	GW	884
1-6-DV-T69-50-2.P1	WEZ	858	2-6-V-G69-50-1.P2*	WEZ	834	2-6-DHV-T69-50-2.P3	GW	882
1-6-DV-T69-50-2.P2	WEZ	855	2-6-V-G69-50-1.P3*	WEZ	826	2-6-DHV-T69-50-2.P4*	WEZ	847
1-6-DV-T69-50-2.P3	WEZ	868	2-6-V-G69-50-2.P1*	WEZ	847	2-6-DHV-G46-50-0.P1	WEZ	866
1-6-DV-G46-50-0.P1	GW	857	2-6-V-G69-50-2.P2*	WEZ	856	2-6-DHV-G46-50-0.P2	WEZ	890
1-6-DV-G46-50-0.P2	GW	864	2-6-V-G69-50-2.P3*	WEZ	853	2-6-DHV-G46-50-0.P3	WEZ	879
1-6-DV-G46-50-0.P3	GW	862	2-6-V-G69-60-1.P1*	SG	822	2-6-DHV-G69-50-1.P1*	WEZ	860
1-6-DV-G69-50-1.P1*	WEZ	855	2-6-V-G69-60-1.P2*	SG	809	2-6-DHV-G69-50-1.P2*	WEZ	858
1-6-DV-G69-50-1.P2*	WEZ	859	2-6-V-G69-60-1.P3*	SG	818	2-6-DHV-G69-50-1.P3*	WEZ	857
1-6-DV-G69-50-1.P3*	WEZ	849	2-6-V-G69-60-2.P1*	WEZ	852	2-6-DHV-G69-50-2.P1*	GW	879
1-6-DV-G69-50-2.P1*	GW	868	2-6-V-G69-60-2.P2*	WEZ	866	2-6-DHV-G69-50-2.P2*	GW	873
1-6-DV-G69-50-2.P2*	GW	856	2-6-V-G69-60-2.P3*	WEZ	861	2-6-DHV-G69-50-2.P3*	GW	874

Anhang D – Versuche Forschungsvorhaben *Zusatzuntersuchungen* [57]

D.1: Versuchsprogramm

Die folgende Tabelle umfasst das für die *Zusatzuntersuchungen* [57] angedachte Versuchsprogramm.

Nahtvorbereitung	Grundwerkstoff	Materialdicke [mm]	Öffnungswinkel [°]	Schweißzusatz- werkstoff	Energieeintrag
V / DV	S690QL	10	50 / 60	G46 ($M = 0,67$)	hoch
					niedrig
				G69 ($M = 1,0$)	hoch
					niedrig
				G89 ($M = 1,29$)	hoch
					niedrig
V / DV	S690QL	20	50	G69 ($M = 1,0$)	hoch
					niedrig
				G89 ($M = 1,29$)	hoch
					niedrig

D.2: Tragfähigkeiten durchgeschweißter Stumpfnahtverbindungen

Die aus den experimentellen Untersuchungen dokumentierten Tragfähigkeiten von Stumpfnahtverbindungen der *Zusatzuntersuchungen* [57], können den folgenden Tabellen entnommen werden. Die Tragfähigkeiten wurden anhand der maximal gemessenen Prüfkraft F_{max} dividiert durch die im Bruchbereich vorliegende Querschnittsfläche ermittelt.

Versuchskörperbezeichnung	Versagen	Tragfähigkeit $\sigma_{v,max}$ [N/mm ²]	Versuchskörperbezeichnung	Versagen	Tragfähigkeit $\sigma_{v,max}$ [N/mm ²]
V-1-G46-50-1.1	SG	724	DV-1-G69-50-1.1	WEZ	746
V-1-G46-50-1.2	SG	690	DV-1-G69-50-1.2	WEZ	753
V-1-G46-50-1.3	SG	686	DV-1-G69-50-2.1	WEZ	752
V-1-G46-50-2.1	SG	707	DV-1-G69-50-2.2	SG	764
V-1-G46-50-2.2	SG	705	DV-1-G69-60-1.1	WEZ	767
V-1-G46-50-2.3	SG	700	DV-1-G69-60-1.2	WEZ	757
V-1-G46-60-1.1	SG	688	DV-1-G69-60-2.1	WEZ	764
V-1-G46-60-1.2	SG	682	DV-1-G69-60-2.2	WEZ	757
V-1-G46-60-2.1	SG	674	DV-1-G89-50-1.1	WEZ	748
V-1-G46-60-2.2	SG	664	DV-1-G89-50-1.2	WEZ	743
V-1-G69-50-1.1	WEZ	727	DV-1-G89-50-2.1	WEZ	772
V-1-G69-50-1.2	WEZ	731	DV-1-G89-50-2.2	WEZ	766
V-1-G69-50-2.1	WEZ	762	DV-1-G89-60-1.1	WEZ	762
V-1-G69-50-2.2	WEZ	749	DV-1-G89-60-1.2	WEZ	768
V-1-G69-60-1.1	WEZ	729	DV-1-G89-60-2.1	WEZ	755
V-1-G69-60-1.2	WEZ	741	DV-1-G89-60-2.2	WEZ	758
V-1-G69-60-2.1	WEZ	751	V-2-G69-50-1.1	WEZ	796
V-1-G69-60-2.2	WEZ	757	V-2-G69-50-1.2	WEZ	814
V-1-G89-50-1.1	WEZ	785	V-2-G69-50-2.1	SG	846
V-1-G89-50-1.2	WEZ	791	V-2-G69-50-2.2	SG	840
V-1-G89-50-2.1	WEZ	792	V-2-G89-60-1.1	GW	795
V-1-G89-50-2.2	WEZ	793	V-2-G89-60-1.2	GW	801
V-1-G89-60-1.1	WEZ	787	V-2-G89-60-2.1	GW	832
V-1-G89-60-1.2	WEZ	784	V-2-G89-60-2.2	GW	832
V-1-G89-60-2.1	WEZ	781	DV-2-G69-50-1.1	GW	833
V-1-G89-60-2.2	WEZ	784	DV-2-G69-50-1.2	GW	835
DV-1-G46-50-1.1	SG	695	DV-2-G69-50-2.1	GW	841
DV-1-G46-50-1.2	SG	694	DV-2-G69-50-2.2	WEZ	834
DV-1-G46-50-2.1	SG	691	DV-2-G89-60-1.1	GW	827
DV-1-G46-50-2.2	SG	681	DV-2-G89-60-1.2	GW	819
DV-1-G46-60-1.1	SG	708	DV-2-G89-60-2.1	GW	832
DV-1-G46-60-1.2	SG	711	DV-2-G89-60-2.2	GW	817
DV-1-G46-60-2.1	SG	724	DV-2-G89-60-2.3	GW	840
DV-1-G46-60-2.2	SG	717			

Anhang E – Numerische Untersuchungen an Stumpfnahverbindungen

E.1: Materialzuordnung in der Wärmeeinflusszone

In den folgenden Abbildungen werden die der jeweiligen Verbindung zugeordneten Materialdaten der Wärmeeinflusszone dargestellt. Die Zuordnung erfolgte anhand eines Vergleiches der Härtewerte der Verbindungen mit den aus den Dilatometerversuchen vorliegenden Daten. Eine exakte Nachbildung der Wärmeeinflusszone ist aufgrund der Abweichungen nicht möglich, weshalb die Zuordnung als Näherung zu betrachten ist.

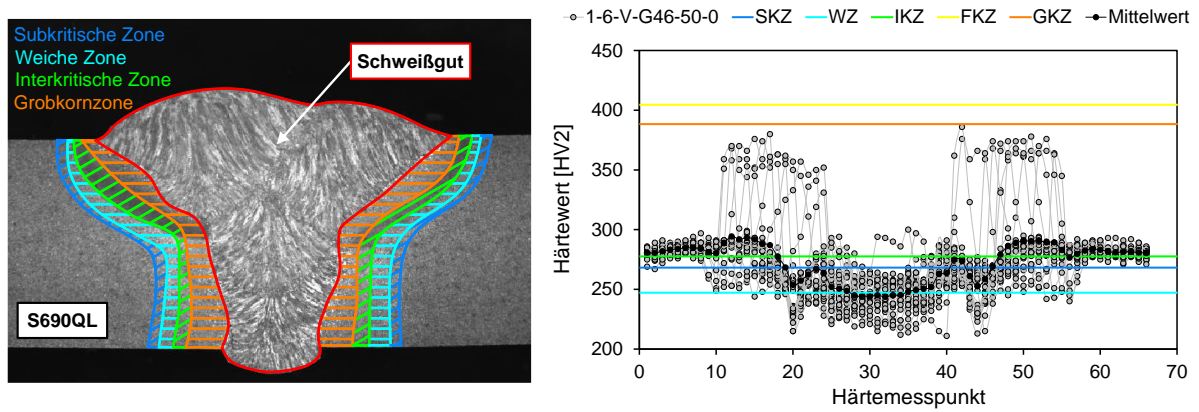


Abb. E-1: Stumpfnahverbindung 1-6-V-G46-50-0

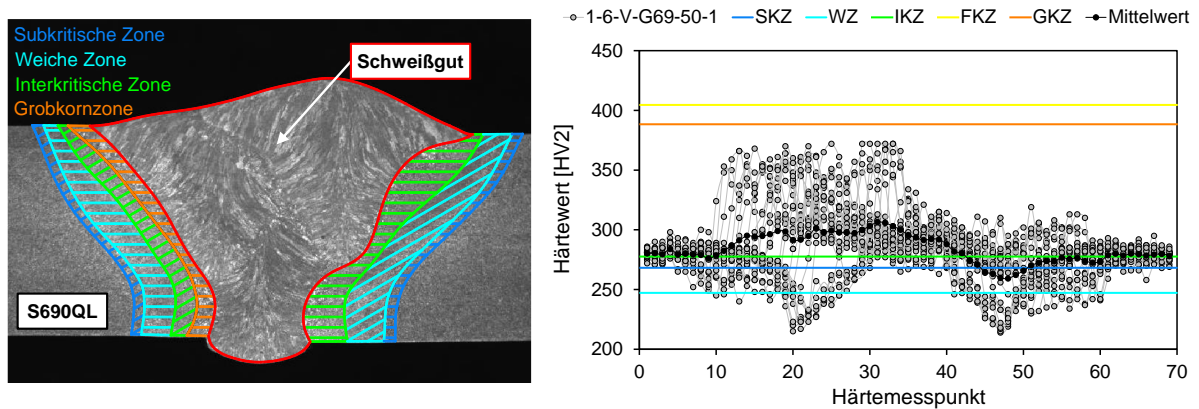


Abb. E-2: Stumpfnahverbindung 1-6-V-G69-50-1

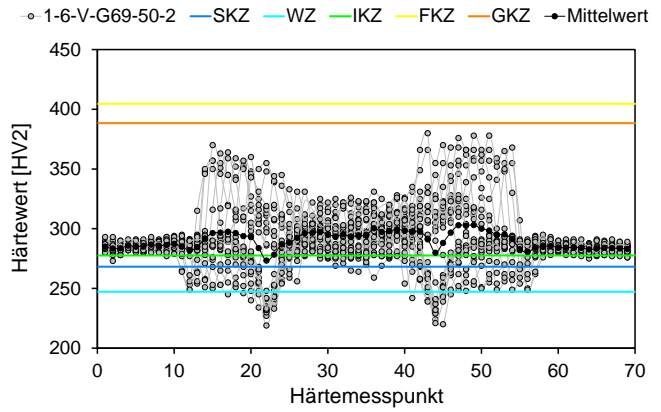
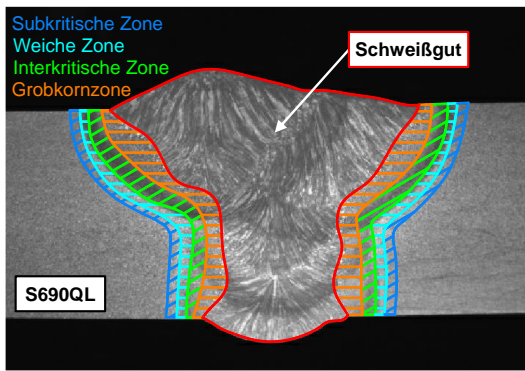


Abb. E-3: Stumpfnahverbindung 1-6-V-G69-50-2

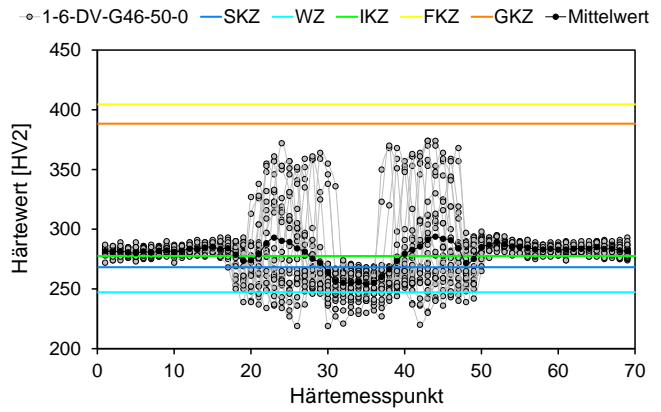
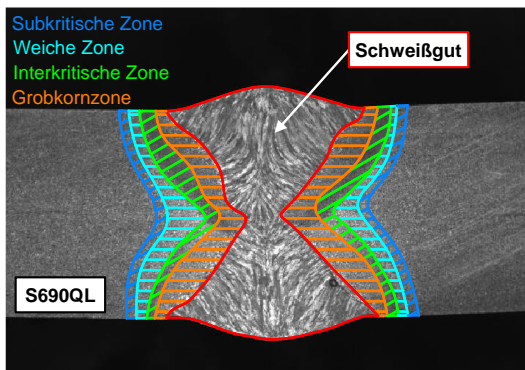


Abb. E-4: Stumpfnahverbindung 1-6-DV-G46-50-0

E.2: Ergebnisse der numerischen Untersuchungen an V-Nähten

Die folgenden Diagramme und Abbildungen enthalten die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen von durchgeschweißten Stumpfnahftverbindungen, ausgeführt als V-Nähte.

1-6-V-G46-50-0:

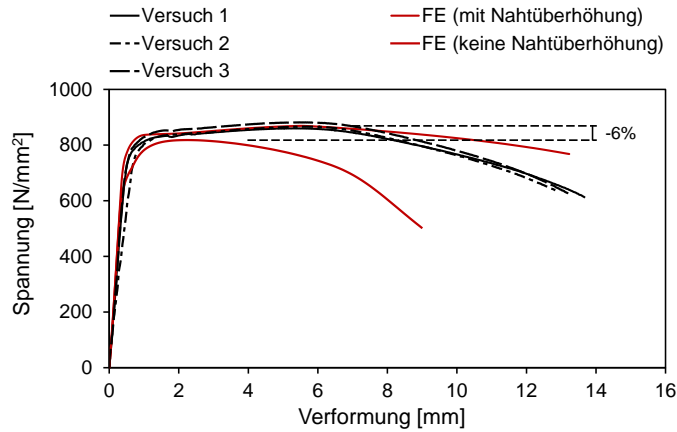


Abb. E-5: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Spannungs-Verformungs-Verläufe der Stumpfnahftverbindung 1-6-V-G46-50-0

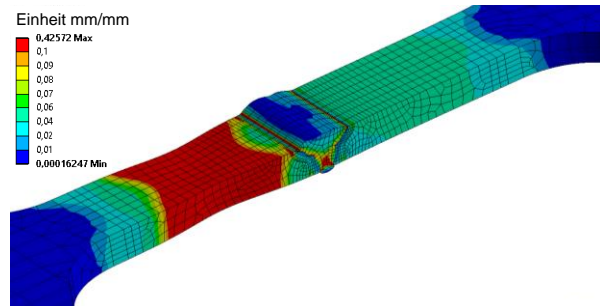
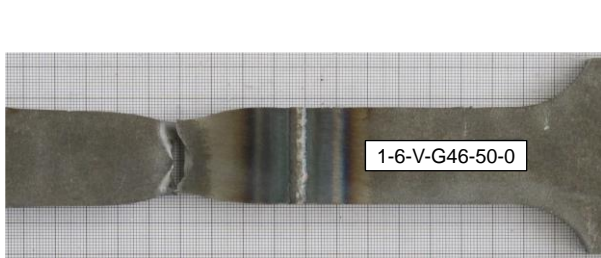


Abb. E-6: Experimentell beobachtetes Versagen der Verbindung 1-6-V-G46-50-0

Abb. E-7: Vergleichsdehnung der numerischen Versuchsnachrechnung der Verbindung 1-6-V-G46-50-0

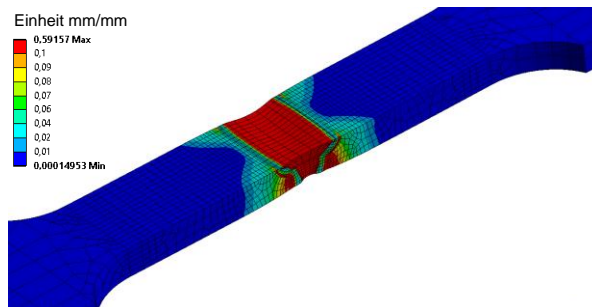


Abb. E-8: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung der Verbindung 1-6-DV-G69-50-2

1-6-V-G69-50-1:

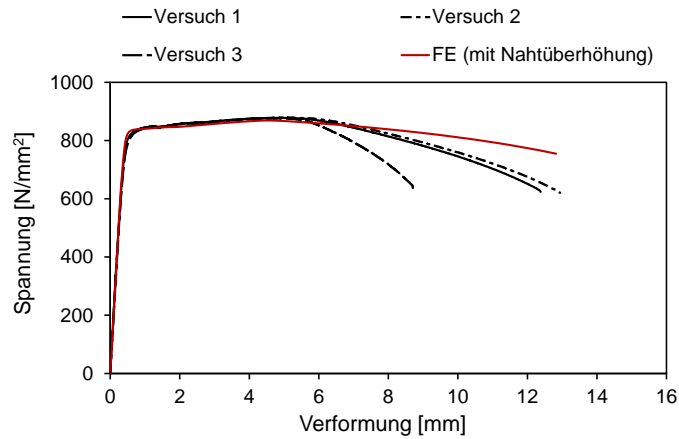


Abb. E-9: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Spannungs-Verformungs-Verläufe der Stumpfnahftverbindung 1-6-V-G69-50-1

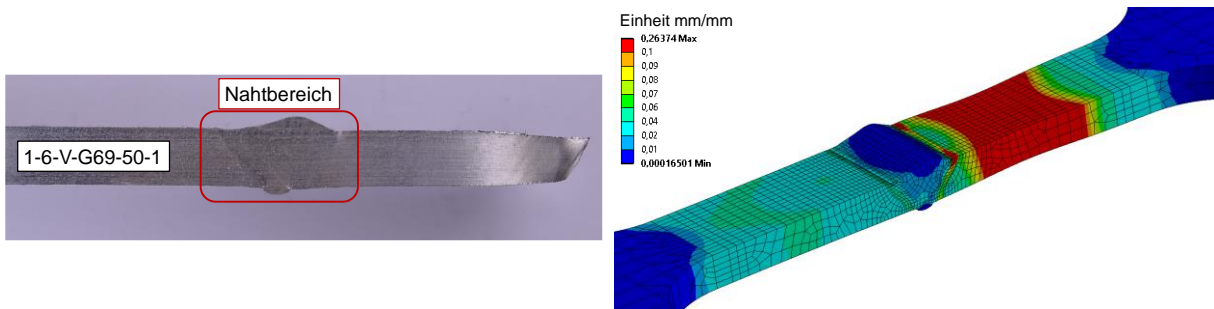


Abb. E-10: Experimentell beobachtetes Versagen der Verbindung 1-6-V-G69-50-1

Abb. E-11: Vergleichsdehnung der numerischen Versuchsnachrechnung der Verbindung 1-6-V-G69-50-1

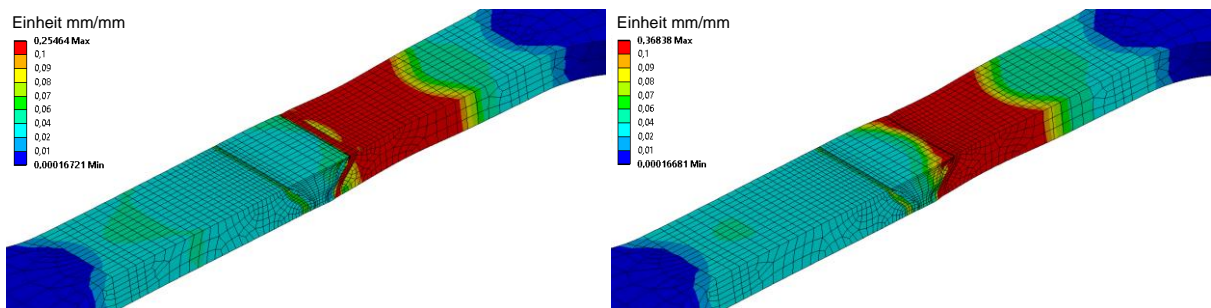


Abb. E-12: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung der Verbindung 1-6-V-G69-50-1

Abb. E-13: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung und der GKZ der Verbindung 1-6-V-G69-50-1

1-6-V-G69-50-2:

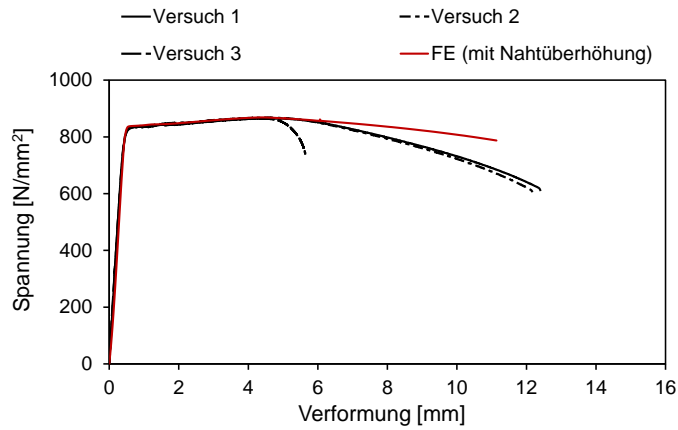


Abb. E-14: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Spannungs-Verformungs-Verläufe der Stumpfnahftverbindung 1-6-V-G69-50-2

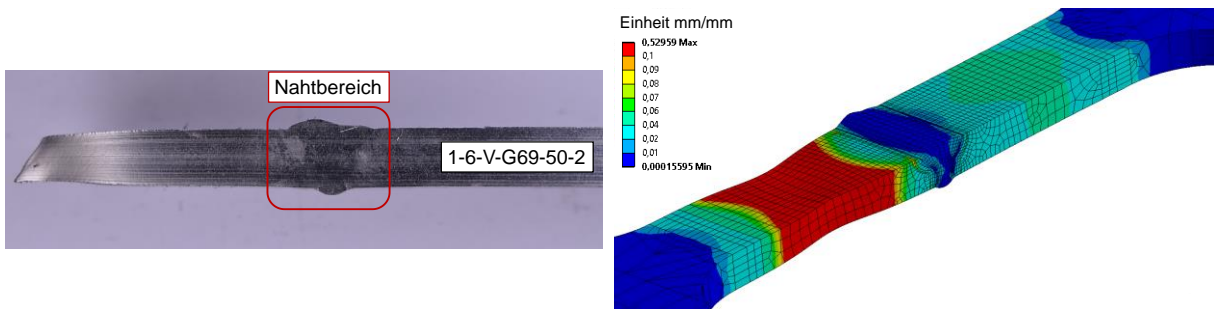


Abb. E-15: Experimentell beobachtetes Versagen der Verbindung 1-6-V-G69-50-2

Abb. E-16: Vergleichsdehnung der numerischen Versuchsnachrechnung der Verbindung 1-6-V-G69-50-2

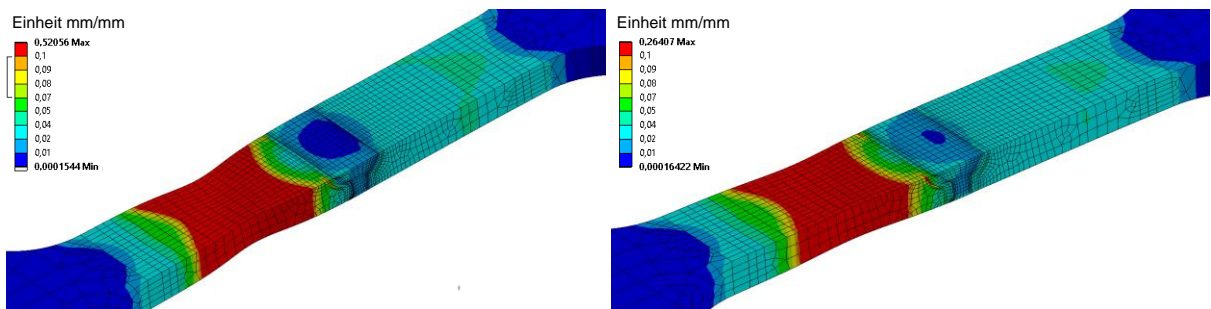


Abb. E-17: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung der Verbindung 1-6-V-G69-50-2

Abb. E-18: Vergleichsdehnung unter Vernachlässigung der Nahtüberhöhung und der GKZ der Verbindung 1-6-V-G69-50-2

Anhang F – Statistische Auswertung von Stumpfnahverbindungen

F.1 Statistische Kenngrößen der Basisvariablen

Die folgende Tabelle enthält die für die Auswertung der Stumpfnahverbindungen benötigten zusätzlichen statistischen Kenngrößen der Basisvariablen der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs und des Schweißzusatzwerkstoffs.

Statistische Kenngrößen:	Differenzierung der Werkstoffe			
	G/T79	S500	S890	S900
Zugfestigkeit des Werkstoffs f_u	-	SCI [80]	SCI [80]	SCI [80]
Nominell X_{nom} [N/mm ²]:	880	550	940	930
Mittelwert X_{j,f_u} [N/mm ²]:	884	670	987	1179
Standardabweichung σ_{j,f_u} [N/mm ²]:	52,8	32,6	20,8	51,7
Variationskoeffizient V_{j,f_u} [-]:	6,0%	4,9%	2,1%	4,4%
Anzahl [-]:	57	8	7	17

