

# **Beurteilung des Tragverhaltens von Flankenkehlnahtverbindungen aus normal- und höherfestem Baustahl unter Berücksichtigung statistischer Kriterien**

**Andreas Kleiner**

**Mitteilungen**



**Beurteilung des Tragverhaltens  
von Flankenkehlnahtverbindungen  
aus normal- und höherfestem Baustahl  
unter Berücksichtigung statistischer Kriterien**

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

vorgelegt von

**Andreas Kleiner**

aus Balingen

Hauptberichterin: Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann  
Mitberichter: Prof. Dr. techn. Andreas Taras  
Prof. Dr.-Ing. Dieter Ungermann

Tag der mündlichen Prüfung: 20.02.2018

Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart

2018

Andreas Kleiner      Beurteilung des Tragverhaltens von Flankenkehlnahtverbindungen aus normal- und höherfestem Baustahl unter Berücksichtigung statistischer Kriterien

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

Redaktion      Simon Mönch

**D 93**

---

## Kurzdarstellung

In der modernen Architektur führt der Wunsch nach immer schlankeren und filigraneren Konstruktionen mit größeren Spannweiten oder hohen Beanspruchungen konsequenterweise zum Einsatz von höherfesten Baustählen. Infolgedessen lassen sich zum Teil erhebliche Einsparungen erzielen, nicht nur beim Materialeinsatz, sondern auch bei nachgelagerten Prozessen, bspw. der Herstellung von Schweißnahtverbindungen. Gleichwohl hängt die Höhe der Einsparung u. a. von den Bemessungskriterien ab, die für den konkreten Fall maßgebend werden. Insbesondere für Kehlnahtverbindungen wird in den geltenden Bemessungskonzepten nach EN 1993-1-8 derzeit lediglich die Festigkeit des Grundwerkstoffs berücksichtigt. Zusätzlich wird explizit verlangt, dass die für den Schweißzusatzwerkstoff spezifizierten Materialeigenschaften mindestens denen des verschweißten Grundwerkstoffs entsprechen müssen. Anhand bereits abgeschlossener Forschungsvorhaben konnte ein signifikanter Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Festigkeit der Kehlnahtverbindung festgestellt und ein neues Bemessungsmodell entwickelt werden, das den Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs ebenfalls berücksichtigt. Jedoch ist bislang die Anwendung des neuen Bemessungsmodells für sogenannte Mischverbindungen ungeklärt. Unter einer Mischverbindung versteht man eine geschweißte Verbindung aus Baustählen unterschiedlicher Festigkeitsklassen und einer dazu passenden oder abweichenden Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs.

Demzufolge ist die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit auf Basis von experimentellen Untersuchungen an geschweißten Flankenkehlnahtverbindungen aus normal- und höherfestem Baustahl sowohl die Anwendbarkeit des bestehenden als auch des neu entwickelten Bemessungsmodells zur Bestimmung der Tragfähigkeit zu verifizieren und weiterzuentwickeln. Hierzu wird ein speziell angepasstes statistisches Auswerteverfahren konzipiert, das prinzipiell auf Fälle angewendet werden kann, die ein Bauteilversagen auf Bruch aufweisen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen einerseits, dass die Bemessungsmodelle für die Mischverbindungen eine akzeptable Übereinstimmung liefern, andererseits aber durch angepasste Korrelationsbeiwerte  $\beta_w$  wirtschaftlich optimiert werden können. Zusätzlich zur Tragfähigkeit wurden die Versuchsergebnisse der Flankenkehlnahtverbindungen hinsichtlich ihrer Verformungsfähigkeit ausgewertet. Mit Hilfe dieser Ergebnisse konnte ein analytischer Ansatz zur Abschätzung der Verformung einer Flankenkehlnaht abgeleitet werden, der mit dem angepassten statistischen Auswerteverfahren verifiziert wurde. Mögliche Anwendungsfelder der Verformungsberechnung sind die Kapazitätsbemessung eines Gebäudes im Lastfall Erdbeben oder die Verifizierung von numerischen Untersuchungen an Flankenkehlnahtverbindungen.

**Abstract**

In modern architecture, the demand for even more slender and lightweight steel constructions with large spans and higher forces leads to the use of high strength steel. Further demands to reductions in material use and other downstream processes, such as welding, are common. However, each design criteria allows for certain reductions which are case dependent. In present design rules, e. g. EN 1993-1-8 only the strength of the base metal is taken into account for the load-bearing capacity of fillet welds. In addition, it is explicitly required, that the material properties of the filler metal should be equivalent to, or better than the welded base metal. One of the main outcomes of former research projects was that a significant influence of the filler metal on the strength of the fillet weld could be observed. Therefore a new design model was developed also taking into account the strength of the filler metal. However, the procedure in the case of welded mixed connections has still not been clarified. Welded mixed connections are defined as a connection made of two different base metals combined with a matching or non-matching filler metal.

Consequently, based on experimental investigations the aim of the present work is to verify and further develop the application of the existing as well as the newly developed design rule for the determination of the load-bearing capacity of fillet welds made of mild carbon and high strength steel. For this purpose, a specifically adapted statistical evaluation method was developed, which in principle can be applied to failure modes driven by fracture.

The results of the investigations show, that the design rules for mixed connections provide an acceptable agreement and also can be economically optimized by means of adapted correlation factors  $\beta_w$ . In addition to the load-bearing capacity, the collected test results on fillet welds were evaluated with regard to the deformation capacity. As an outcome, an analytical approach could be derived for estimating the deformation capacity of a fillet weld, which was verified with the adapted statistical evaluation method. Potential fields of applications for the determination of the deformation are the capacity design method in earthquake engineering or the verification of numerical results of investigations on fillet welds.

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart entstanden.

Mein aufrichtiger Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, Leiterin des Instituts für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart, für das entgegengebrachte Vertrauen während meiner Zeit am Institut für Konstruktion und Entwurf sowie für die Übernahme des Hauptberichts.

Bei Herrn Prof. Dr. techn. Andreas Taras, Inhaber der Professur für Stahlbau an der Universität der Bundeswehr München und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Ungermann, Leiter des Instituts für Stahlbau an der Technischen Universität Dortmund darf ich mich für das Interesse an der Arbeit, die kritische Durchsicht und die Übernahme des Mitberichts bedanken.

Ebenfalls bedanke ich mich bei allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Konstruktion und Entwurf und den Verfassern der von mir betreuten Abschlussarbeiten für die Anregungen und fachlichen Diskussionen. Ein großer Dank geht an die wissenschaftlichen Hilfskräfte, die mich bei dieser Arbeit in verschiedenster Form unterstützt haben.

Meinen besonderen Dank möchte ich meiner Familie, meinem Freundeskreis und meinen Musikantenfreunden für den fortwährenden Zuspruch und ihr Verständnis aussprechen. Zudem haben sie zur richtigen Zeit und in angemessenem Maß für die notwendige Ablenkung und Abwechslung gesorgt.

Der allergrößte Dank gebührt schließlich meinen Eltern. Durch ihre bedingungslose und unermüdliche Unterstützung, Nachsicht und Geduld haben sie einen wesentlichen Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Stuttgart, im Februar 2018

Andreas Kleiner





---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Überblick	5
<b>2</b>	<b>DER WERKSTOFF BAUSTAHL</b>	<b>7</b>
2.1	Eigenschafts- und Anforderungsprofil	7
2.2	Allgemeines zur Stahlherstellung	8
2.3	Entwicklung der Festigkeitseigenschaften	8
2.4	Normal- und höherfeste Stähle	10
2.4.1	Begriffsdifferenzierung	10
2.4.2	Besonderheiten der Herstellung höherfester Baustähle	11
2.4.3	Normalisierte Stähle	12
2.4.4	Thermomechanisch gewalzte Stähle	12
2.4.5	Vergütete Stähle	13
2.4.6	Mechanische Eigenschaften von Baustahl	14
2.4.7	Stahlsorten und Bezeichnungssystem im Stahlbau	15
2.4.8	Verwendbarkeit	17
2.4.9	Vorteile und Anwendungsbeispiele höherfester Baustähle	22
<b>3</b>	<b>SCHWEIßEN HOCHFESTER STÄHLE</b>	<b>25</b>
3.1	Allgemeines	25
3.2	Schweißzusatzwerkstoffe	25
3.3	Metallurgische Vorgänge beim Schweißen	27
3.3.1	Allgemeines	27
3.3.2	Einfluss von Kohlenstoff auf die Martensitbildung	28
3.3.3	Einfluss der Legierungselemente auf die Aufhärtung/Gefügeausbildung	29
3.4	Schweißbeignung	30
3.5	Vorwärmtemperatur	31
3.6	Streckenenergie	36
3.7	Wärmeeinbringung	37
3.8	Abkühlzeit	38
3.9	Arbeitsfeld/Einflüsse und deren Auswirkung	42
3.10	Zusammenfassung	44
<b>4</b>	<b>BEMESSUNGSKONZEPTE VON GESCHWEIßTEN KEHLNAHTVERBINDUNGEN</b>	<b>47</b>
4.1	Allgemeines	47

4.2 Geometrische Angaben .....	47
4.2.1 Wirksame Nahtdicke .....	47
4.2.2 Schweißnahtlänge .....	48
4.3 Tragfähigkeit von Kehlnähten nach DIN EN 1993-1-8 .....	49
4.3.1 Allgemeines .....	49
4.3.2 Vereinfachtes Verfahren .....	50
4.3.3 Richtungsbezogenes Verfahren .....	51
4.3.4 Entwicklung des richtungsbezogenen Verfahrens.....	54
4.3.5 Tragverhalten einer Flanken- und Stirnkehlnahtverbindung .....	58
4.4 Weitere Schweißnahtverbindungen.....	60
4.4.1 Überblick .....	60
4.4.2 Stumpfnahverbindungen.....	60
<b>5 ERGEBNISSE ABGESCHLOSSENER FORSCHUNGSVORHABEN .....</b>	<b>63</b>
5.1 Erkenntnisse aus der Literatur.....	63
5.2 Forschungsvorhaben - <i>FOSTA P652</i> .....	63
5.3 Unabhängige Zusatzversuche.....	65
5.4 Forschungsvorhaben - <i>FOSTA P812</i> .....	65
5.5 Dissertation Rasche .....	66
5.5.1 Grundlage für das erweiterte Bemessungsmodell.....	66
5.5.2 Bemessungsvorschlag für Kehlnahtverbindungen nach Eurocode 3.....	67
5.5.3 Modifizierter Bemessungsvorschlag für Kehlnahtverbindungen .....	68
5.5.4 Vergleich der Bemessungsvorschläge mit dem bestehenden Bemessungskonzept nach Eurocode 3.....	71
<b>6 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN MISCHVERBINDUNGEN.....</b>	<b>73</b>
6.1 Allgemeines .....	73
6.2 Verwendete Werkstoffe .....	74
6.2.1 Grundwerkstoffe.....	74
6.2.2 Schweißzusatzwerkstoffe .....	75
6.3 Versuchsprogramm .....	76
6.3.1 Allgemeines .....	76
6.3.2 Versuchskörperform .....	76
6.3.3 Versuchskonfigurationen .....	78
6.3.3.1 Parameterwahl .....	78
6.3.3.2 Definition: Verbindung gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindung ....	80
6.3.3.3 Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe.....	82
6.3.3.4 Mischverbindungen .....	83
6.3.4 Schweißprozessparameter .....	84
6.4 Versuchsdurchführung .....	88

---

6.5	Begleituntersuchungen .....	89
6.5.1	Allgemeines .....	89
6.5.2	Makroschliffe und Nahtdickenbestimmung .....	90
6.5.3	Härtemessungen .....	91
6.5.4	Digitalisierung der Nahtbruchfläche .....	92
6.6	Ergebnisgrößen: Tragfähigkeit .....	95
6.6.1	Schubspannung .....	95
6.6.2	Schubfluss .....	96
6.7	Ergebnisgrößen: Verformungsfähigkeit .....	97
6.7.1	Allgemeines .....	97
6.7.2	Bestimmung der Verformung bei Fließbeginn .....	97
6.7.3	Bestimmung der Verformung bei Probenversagen .....	100
6.7.4	Vorgehensweise zur Bestimmung der Verformungsfähigkeit .....	102
<b>7</b>	<b>VERSUCHSERGEBNISSE AN FLANKENKEHLNAHTVERBINDUNGEN .....</b>	<b>105</b>
7.1	Versuchsergebnisse: Tragfähigkeit .....	105
7.2	Versuchsergebnisse: Verformungsfähigkeit .....	107
<b>8</b>	<b>DISKUSSION DER VERSUCHSERGEBNISSE .....</b>	<b>109</b>
8.1	Allgemeines .....	109
8.2	Schweißprozessparameter .....	109
8.2.1	Spannung, Strom und Streckenenergie .....	109
8.2.2	Abkühlzeit .....	111
8.3	Nahtdicke .....	112
8.4	Tragfähigkeit .....	115
8.4.1	Schubfluss .....	115
8.4.2	Schubspannung .....	117
8.5	Härte .....	120
8.5.1	Einfluss der Abkühlzeit auf die Härte in der Wärmeeinflusszone .....	120
8.5.2	Korrelation zwischen Härte, Schubfluss und Schubspannung .....	121
8.6	Bruchverhalten .....	122
8.7	Verformungsfähigkeit .....	125
8.7.1	Verformungsverhalten .....	125
8.7.2	Verformung bei Fließbeginn .....	127
8.7.3	Verformung bei Probenversagen .....	128
8.7.4	Elastisches und plastisches Verformungsvermögen .....	128
<b>9</b>	<b>SICHERHEIT UND ZUVERLÄSSIGKEIT .....</b>	<b>133</b>
9.1	Einführung in die Sicherheitsbetrachtung von Bauwerken .....	133
9.2	Strategien zur Gewährleistung der Tragwerkssicherheit .....	136

---

9.3	Zuverlässigkeitsmethoden .....	138
9.3.1	Überblick .....	138
9.3.2	Deterministische Methoden .....	138
9.3.3	Probabilistische Methoden.....	139
9.4	Anforderungen an das Bauwerk .....	143
9.4.1	Grundlegende Anforderungen .....	143
9.4.2	Behandlung der Zuverlässigkeit .....	143
9.4.3	Bestimmung des Zuverlässigkeitsindex .....	145
9.5	Aufteilung der geforderten globalen Sicherheit auf Beanspruchung und Widerstand .....	147
<b>10</b>	<b>STATISTISCHE AUSWERTEVERFAHREN FÜR VERSUCHSERGEBNISSE .....</b>	<b>155</b>
10.1	Prinzipielle Vorgehensweise statistischer Auswerteverfahren .....	155
10.2	Statistische Bestimmung einer einzelnen Eigenschaft .....	155
10.2.1	Allgemeines .....	155
10.2.2	Bestimmung des Bemessungswerts über den charakteristischen Wert .....	156
10.2.3	Direkte Bestimmung des Bemessungswerts für Tragfähigkeitsnachweise .....	157
10.3	Statistische Bestimmung eines Widerstandsmodells .....	158
10.3.1	Überblick .....	158
10.3.2	Schritt 1: Entwicklung einer Funktion für das Widerstandsmodell.....	159
10.3.3	Schritt 2: Vergleich der experimentellen und theoretischen Werte der Widerstände.....	159
10.3.4	Schritt 3: Schätzung der Mittelwertkorrektur.....	160
10.3.5	Schritt 4: Schätzung des Variationskoeffizienten der Streugröße .....	160
10.3.6	Schritt 5: Verträglichkeitsprüfung.....	161
10.3.7	Schritt 6: Bestimmung der Variationskoeffizienten der Basisvariablen .....	162
10.3.8	Schritt 7: Bestimmung des Variationskoeffizienten aller Basisvariablen .....	162
10.3.9	Schritt 8: Bestimmung des Bemessungswerts der Widerstandsfunktion .....	164
10.3.10	Schritt 9: Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwerts .....	165
10.3.11	Schritt 10: Korrektur der Widerstandsfunktion .....	165
10.4	Ablaufschema: Statistisches Auswerteverfahren nach DIN EN 1990 Anhang D .....	167
<b>11</b>	<b>WEITERENTWICKLUNG DER TRAGFÄHIGKEIT EINER FLANKENKEHLNAHT.....</b>	<b>169</b>
11.1	Allgemeines.....	169
11.2	Vorstellung der Datenbasis für die statistische Auswertung.....	169
11.2.1	Datenbasis aus der Dissertation von Rasche.....	169
11.2.2	Datenbasis aus dem Forschungsprojekt <i>SAFEBRICKTILE</i> .....	171
11.3	Vorstellung der theoretischen Widerstandsfunktion .....	172
11.4	Statistische Verteilung der Basisvariablen.....	175
11.4.1	Allgemeines .....	175
11.4.2	Zugfestigkeit der Grundwerkstoffe.....	176
11.4.3	Zugfestigkeit der Schweißzusatzwerkstoffe .....	178

11.4.3.1	Stichprobenerhebung .....	178
11.4.3.2	Bootstrapping-Methode .....	178
11.4.3.3	Ergebnisse der Stichprobenerhebung und der Bootstrapping-Methode... ..	179
11.4.3.4	Statistische Kenngrößen der Schweißzusatzwerkstoffe .....	180
11.4.4	Nahtbruchfläche.....	181
11.5	Angepasstes statistisches Auswerteverfahren für Bauteilversagen durch Bruch .....	187
11.6	Nennwerte der Zugfestigkeiten der Basisvariablen .....	191
11.7	Sensitivitätsanalyse - Einfluss der Gewichtungsfaktoren .....	192
11.8	Ermittlung des Korrelationsbeiwerts .....	198
11.8.1	Evaluationsgruppe - Grundwerkstoff (Bemessungsmodell nach EC 3) .....	198
11.8.1.1	Allgemeines .....	198
11.8.1.2	Statistische Auswertung - Grundwerkstoff S460.....	200
11.8.1.3	Statistische Auswertung - Grundwerkstoff S690/S700 .....	202
11.8.1.4	Zusammenfassung der Evaluationsergebnisse .....	204
11.8.2	Evaluationsgruppe - Schweißzusatzwerkstoff (Bemessungsmodell nach EC 3) .....	206
11.8.2.1	Allgemeines .....	206
11.8.2.2	Statistische Auswertung - Schweißzusatzwerkstoffe mit Kennziffer 46, 69 und 89.....	207
11.8.3	Evaluationsgruppe - Schweißzusatzwerkstoff (Bemessungsmodell nach Rasche) .....	210
11.8.3.1	Allgemeines .....	210
11.8.3.2	Statistische Auswertung - Schweißzusatzwerkstoffe mit Kennziffer 46....	213
11.8.3.3	Statistische Auswertung - Schweißzusatzwerkstoffe mit Kennziffer 69....	217
11.8.3.4	Statistische Auswertung - Schweißzusatzwerkstoffe mit Kennziffer 89....	220
11.9	Sensitivitätsanalyse - Einfluss des Mechanisierungsgrades .....	223
 <b>12 ANALYTISCHER ANSATZ ZUR VERFORMUNGSBERECHNUNG EINER</b>		
<b>FLANKENKEHLNAHT .....</b>		
		<b>227</b>
12.1	Beweggrund zur Verformungsbetrachtung einer Flankenkehlnaht .....	227
12.2	Methode der Kapazitätsbemessung .....	228
12.2.1	Philosophie der Kapazitätsbemessung .....	228
12.2.2	Methodik der Kapazitätsbemessung.....	229
12.3	Übersicht bisheriger Ansätze zur analytischen Verformungsberechnung .....	231
12.3.1	Allgemeines .....	231
12.3.2	Lesik und Kennedy .....	232
12.3.3	Feder.....	232
12.3.4	Valtinat.....	233
12.3.5	Wenk.....	234
12.4	Bestimmung eines analytischen Ansatzes zur Verformungsberechnung.....	235
12.4.1	Allgemeines .....	235
12.4.2	Verhältnis der Kraft bei Fließbeginn zu maximal gemessener Kraft .....	236

12.4.3	Berechnung der Schubfederzahl .....	237
12.4.4	Analytisches Modell zur Verformungsberechnung .....	242
12.4.5	Statistische Auswertung des analytischen Ansatzes zur Verformungsberechnung.	245
12.4.5.1	Allgemeines .....	245
12.4.5.2	Bestimmung des Anpassungsfaktors .....	247
12.4.5.3	Bestimmung des Korrelationsfaktors .....	249
12.5	Vorschlag eines analytischen Ansatzes zur Verformungsberechnung.....	252
<b>13</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>257</b>
13.1	Zusammenfassung.....	257
13.2	Ausblick.....	258
<b>14</b>	<b>BEZEICHNUNGEN .....</b>	<b>261</b>
<b>15</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>263</b>
<b>16</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>271</b>
<b>17</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>277</b>
<b>ANHANG A</b>	<b>- KERBSCHLAGARBEIT UND CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG.....</b>	<b>281</b>
A.1:	Grundwerkstoffe.....	281
A.2:	Schweißzusatzwerkstoffe .....	282
<b>ANHANG B</b>	<b>- BOOTSTRAPPING-METHODE .....</b>	<b>284</b>
B.1:	Bootstrapping-Methode: Schweißzusatzwerkstoff G46 / T46.....	284
B.2:	Bootstrapping-Methode: Schweißzusatzwerkstoff G69 / T69.....	285
B.3:	Bootstrapping-Methode: Schweißzusatzwerkstoff G89 / T89.....	286
<b>ANHANG C</b>	<b>- VERFORMUNGSVERHALTEN .....</b>	<b>287</b>
C.1:	Verformungsverhalten bis Probenbruch .....	287
C.2:	Verformungsverhalten bis einschließlich der maximalen Last .....	290
<b>ANHANG D</b>	<b>- ANPASSUNGSFAKTOR .....</b>	<b>293</b>
D.1:	Elastische Verformung.....	293
D.2:	Plastische Verformung.....	294
<b>ANHANG E</b>	<b>- KORRELATIONSFAKTOR .....</b>	<b>295</b>
E.1:	Elastische Verformung.....	295
E.2:	Plastische Verformung.....	296

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die zunehmend vielseitigen und komplexen Anforderungen der Architektur nach immer schlankeren und filigraneren Konstruktionen mit größeren Spannweiten oder hohen Beanspruchungen führen konsequenterweise zum Einsatz von höherfesten Baustählen. Als höherfeste Baustähle werden derzeit Stahlsorten mit einer Streckgrenze  $R_{eH} > 355 \text{ N/mm}^2$  bezeichnet. Im Vergleich zu normalfesten Baustählen können höherfeste Baustähle höhere Beanspruchungen in der Konstruktion aufnehmen und führen zu einer Reduzierung der tragenden Querschnitte und schlussendlich zu einer Verringerung des Materialverbrauchs und der Herstellungskosten.

Mit höherfesten Baustählen lassen sich zum Teil erhebliche Einsparungen erzielen, nicht nur beim Materialeinsatz, sondern auch bei nachgelagerten Prozessen, bspw. der Herstellung von Schweißnahtverbindungen. Jedoch hängt die Höhe der Einsparung u. a. von den Bemessungskriterien ab, die für den konkreten Fall maßgebend werden. In der jüngeren Vergangenheit sah sich die Stahl erzeugende Industrie deshalb der Herausforderung gegenüber, diesen Anforderungen durch die Verbesserung und die Weiterentwicklung der mechanischen Eigenschaften, aber auch der Verarbeitungseigenschaften gerecht zu werden. Parallel zu dieser Entwicklung gilt es die im konstruktiven Stahlbau für diese Zwecke eingesetzten Schweißverbindungen durch angepasste Bemessungskonzepte wirtschaftlich zu optimieren.

Durch zeitgemäße und innovative Konstruktions- und Bemessungsprinzipien für Schweißverbindungen hinsichtlich der Trag- und Verformungsfähigkeit können ressourcenschonende Konstruktionen verwirklicht und ein effektiverer Einsatz von höherfesten Baustählen in Kombination mit normalfesten Baustählen gefördert werden. Dem Stahlbau eröffnet dies ein breiteres Anwendungsfeld von normal- und höherfesten Baustählen, so dass durch eine überlegte Wahl des Schweißzusatzwerkstoffs in Kombination mit den zu verbindenden Grundwerkstoffen die Trag- und Verformungsfähigkeit der Schweißverbindung gezielt beeinflusst und gesteuert werden kann.

## 1.2 Zielsetzung

Der konstruktive Stahlbau steht oft vor der Herausforderung ein zug- oder druckbeanspruchtes Bauteil an ein anderes anzuschließen. Häufig werden die Bauteile gestoßen oder überlappt und mit Kehlnähten verschweißt. Die Kehlnaht stellt einerseits mit ihrer recht einfachen geometrischen Form eine pragmatische Möglichkeit zur Kraftübertragung dar, andererseits gestaltet sich die Beanspruchung recht kompliziert. In Abhängigkeit von der Lage der Einwirkung (Normalkraft  $N$ , Querkraft  $V$  oder Moment  $M$ ) zur Nahtlängsrichtung ergeben sich verschiedene Spannungszustände. Eine Kehlnaht, die senkrecht zur Nahtlängsrichtung beansprucht wird, bezeichnet man als Stirnkehlnaht (vgl. Abb. 1-1 a). Demgegenüber spricht man von einer Flankenkehlnaht (vgl. Abb. 1-1 b), wenn die Einwirkung parallel zur Nahtlängsachse verläuft.

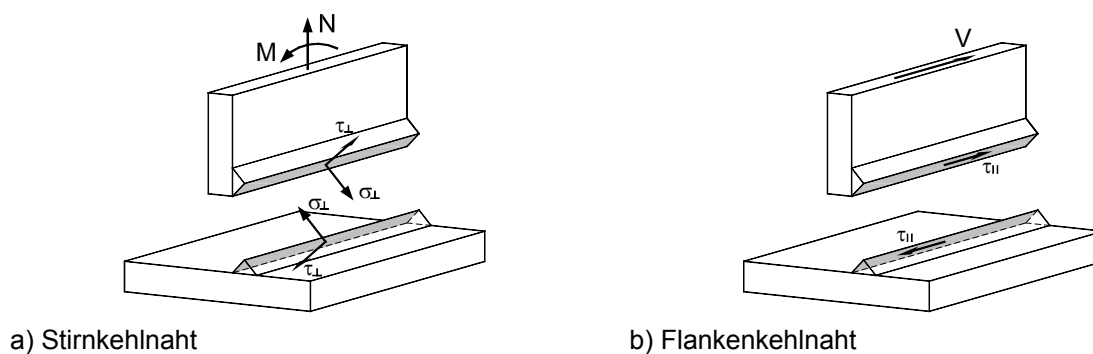


Abb. 1-1: Unterscheidung von Stirn- und Flankenkehlnaht

Vorausgesetzt die Kehlnaht wird idealisiert als Prisma mit dem Querschnitt eines gleichschenkligen oder nicht gleichschenkligen Dreiecks angenommen, dann ist die Flankenkehlnaht allein durch Schubspannungen  $\tau_{\parallel}$  in der wirksamen Kehlnahtfläche beansprucht. Im Gegensatz dazu wird die Stirnkehlnaht senkrecht zu ihrer Längsrichtung in der wirksamen Kehlnahtfläche durch eine Schubspannung  $\tau_{\perp}$  und durch eine Zug- oder Druckspannung  $\sigma_{\perp}$  beansprucht. Diese vereinfachte Darstellung der Spannungen wird selbstverständlich der tatsächlichen ungleichförmigen Spannungsverteilung in Dicken- und Längsrichtung der Naht nicht gerecht, jedoch wird bei Nachweisen bzgl. der Verformungs- und Tragfähigkeit auf diese idealisierte Darstellung mit gleichförmig verteilten Spannungen zurückgegriffen. Es sei noch angemerkt, dass eine Kehlnaht im Vergleich zu einer Stumpfnahnt zwar oft konstruktiv ungünstiger ist, da der Kraftfluss aus der Wirkungslinie der Anschlusskräfte herausgelenkt wird, allerdings bietet die Kehlnaht im Wettbewerb den Vorteil einer kostengünstigen Herstellung ohne Nahtvorbereitung.

Die Bemessungsregeln für Schweißnahtverbindungen der derzeit aktuellen Normengeneration des Eurocode 3 beziehen sich auf die beschriebene idealisierte Darstellung. Diese Bemessungsregeln beruhen indes auf Konzepten, die für normalfeste Baustähle entwickelt wurden.



Bei der Bestimmung der Beanspruchbarkeit der Schweißnahtverbindungen wird bislang einzig die Festigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile berücksichtigt. Abb. 1-2 zeigt deutlich anhand einer 200 mm langen Flankenkehlnahtverbindung unter reiner Schubbeanspruchung von  $F_{||} = 300 \text{ kN}$  den effizienten Einsatz von höherfesten Baustählen. Dargestellt sind die erforderliche Nahtdicke  $a$  auf der primären Ordinatenachse und das entsprechend einzubringende Schweißnahtvolumen auf der sekundären Ordinatenachse, jeweils über der nominellen Zugfestigkeiten der verschiedenen Grundwerkstoffe aufgetragen. Die Nahtdicke  $a$  entspricht der Mindestkehlnahtdicke, um die Tragfähigkeit der Kehlnahtverbindung nach der aktuellen Normengeneration des Eurocode 3 sicherzustellen.

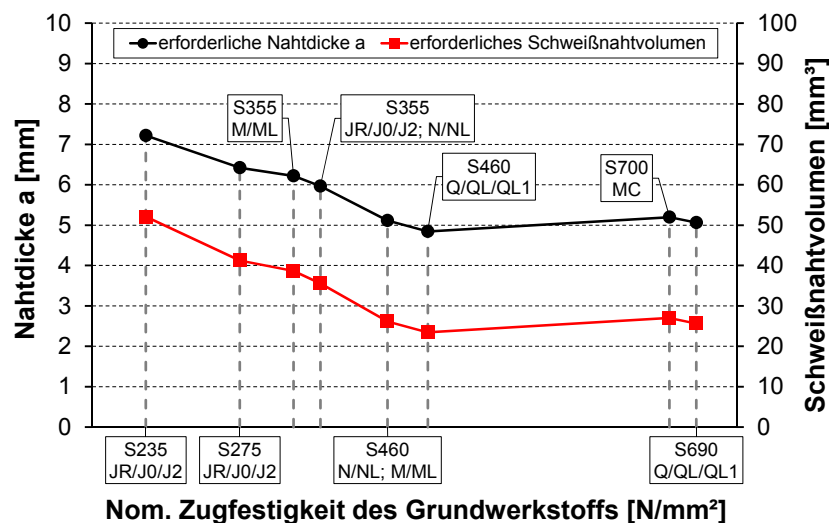


Abb. 1-2: Erforderliche Nahtdicke  $a$  und Schweißnahtvolumen einer Flankenkehlnaht abhängig von der Festigkeit des Grundwerkstoffs

Die Verwendung höherfester Baustähle führt zu einer der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs abhängigen Verringerung der erforderlichen Nahtdicke  $a$ . Demzufolge sinken auch die Materialkosten und letztendlich auch die Herstellungskosten. Allerdings ist bereits an diesem Beispiel erkennbar, dass sich keine stetige Verringerung der erforderlichen Nahtdicke  $a$  mit zunehmender Festigkeit des Grundwerkstoffs einstellt. Dies ist auf die konservative Bemessung der Schweißnahtverbindungen zurückzuführen, die ausschließlich die Festigkeit des Grundwerkstoffs berücksichtigen.

Das Hauptaugenmerk vergangener Forschungsprojekte lag auf der Bestimmung der Tragfähigkeit von Schweißverbindungen. Neben der Tatsache, dass im Speziellen bei Kehlnahtverbindungen stets das Versagen in der Schweißnaht aufgetreten ist, konnte folglich ein signifikanter Einfluss der Festigkeit des gewählten Schweißzusatzwerkstoffs auf die Tragfähigkeit der Schweißnaht festgestellt werden (vgl. Rasche [84]). Ferner basierten die bisherigen Untersuchungen auf der Voraussetzung, dass die beiden zu verbindenden Grundwerkstoffe die gleiche Festigkeit haben.

Rasche hat in [84] ein neues Bemessungsmodell entwickelt, das die Festigkeit des Grundwerkstoffs mit 25 % und die des Schweißzusatzwerkstoffs mit 75 % berücksichtigt. Offen ist dabei aber das Vorgehen bei sogenannten Mischverbindungen, wenn Grundwerkstoffe mit unterschiedlichen Festigkeitsklassen und einer dazu passenden oder abweichenden Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs verschweißt werden. Eine Situation, die in der Praxis standardmäßig auftritt, weil die Wahl der Baustahlgüte i. d. R. an die Ausnutzung angepasst wird und es immer auch Anbauteile mit geringeren Beanspruchungen gibt.

Mit der vorliegenden Arbeit wird das Ziel verfolgt, auf Grundlage der im Rahmen eines Forschungsprojekts durchgeführten experimentellen Untersuchungen an Flankenkehlnahtverbindungen, gezielt neben dem Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs auch den Einfluss der beiden Grundwerkstoffe auf die Trag- und Verformungsfähigkeit herauszuarbeiten. Hierfür bietet die Methode der Flächenrückführung der Nahtbruchfläche einen entscheidenden Vorteil. Durch die Digitalisierung der Nahtbruchfläche nach den Traglastprüfungen kann der Bruchverlauf durch die Schweißnaht rekonstruiert werden. Es gilt insbesondere herauszufinden, welcher der beiden verschweißten unterschiedlichen Grundwerkstoffe maßgebend für die Bestimmung der Tragfähigkeit der Flankenkehlnahtverbindung ist. Anknüpfend daran, soll der bereits durch Rasche aufgestellte Bemessungsvorschlag für den Anwendungsfall von Mischverbindungen aus normal- und höherfestem Baustahl weiterentwickelt und für die normative Tragfähigkeit optimiert werden. Hierzu gehört die Überarbeitung der Korrelationsbeiwerte, sowohl einerseits abhängig von Grundwerkstoff als auch andererseits vom Schweißzusatzwerkstoff.

Parallel dazu sollen die gewonnenen Versuchsergebnisse hinsichtlich der Verformungsfähigkeit der Flankenkehlnaht ausgewertet werden. Für die praktische Anwendung steht hierbei im Vordergrund, eine analytisch basierte Abschätzung der Verformung einer Flankenkehlnaht zu formulieren.

Für die Bewertung der Trag- und Verformungsfähigkeit wird auf Grundlage des Anhang D nach DIN EN 1990 ein speziell für Bruchversagen konzipiertes Auswerteverfahren entwickelt, das die statistische Bewertung und Sicherheitsbeurteilung von Verbindungen oder Bauteilen im Stahlbau, die auf Bruch versagen, ermöglicht.

Mit einem angepassten Bemessungskonzept bzgl. der Tragfähigkeit und einer analytisch basierten Abschätzung der Verformungsfähigkeit wird ein innovativer Beitrag für die zukünftige Bemessung von Kehlnahtverbindungen, insbesondere für Mischverbindungen aus normal- und höherfesten Baustählen, geleistet. Vor allem für das Erdbebeningenieurwesen erweitert sich dadurch das Anwendungsfeld und trägt zu einem vermehrten Einsatz von höherfesten Baustählen bei.

### 1.3 Überblick

Die Beurteilung des Tragverhaltens von Flankenkehlnahtverbindungen aus normal- und höherfestem Baustahl unterteilt sich in dieser Arbeit in experimentelle und analytische Untersuchungen hinsichtlich der Trag- und Verformungsfähigkeit. Dabei ist die Arbeit wie folgt strukturiert:

In Kapitel 2 wird nach einer kurzen Darstellung des derzeitigen Wissenstandes zur Erzeugung und Fertigung des Werkstoffs Baustahl insbesondere auf die charakteristischen Eigenschaften von normal- und höherfesten Baustählen eingegangen, die für die spätere Diskussion der experimentellen Ergebnisse von grundlegender Bedeutung sind.

Kapitel 3 thematisiert den Schweißzusatzwerkstoff und den Schweißprozess mit den damit verbundenen Schweißparametern für die Herstellung einer Schweißnahtverbindung. In Kapitel 4 werden die grundlegenden Bemessungskonzepte von geschweißten Kehlnahtverbindungen nach den derzeit gültigen europäischen Regelwerken dargestellt und ihre Entwicklung aufgezeigt.

Anschließend werden in Kapitel 5 die Versuchsergebnisse bzgl. dem Tragverhalten von Flankenkehlnahtverbindungen aus bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben beschrieben. Der von Rasche [84] entwickelte Bemessungsvorschlag für Kehlnahtverbindungen wird erörtert und verglichen. Kennzeichnend für diesen Vorschlag ist einerseits, dass als Datenbasis ausschließlich Versuchsergebnisse herangezogen wurden, bei denen die verschweißten Grundwerkstoffe die gleiche Festigkeitsklasse, bei einer dazu passenden oder abweichenden Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs hatten. Andererseits berücksichtigt der daraus entwickelte Bemessungsvorschlag zur Bestimmung der Tragfähigkeit sowohl die Festigkeit des Grund- als auch des Schweißzusatzwerkstoffs.

Für die Verifizierung und Weiterentwicklung des Bemessungsvorschlags wurden experimentelle Untersuchungen an sogenannten Mischverbindungen durchgeführt, die in Kapitel 6 beschrieben und ausgewertet werden. Mischverbindungen sind dadurch charakterisiert, dass die zu verbindenden Grundwerkstoffe unterschiedliche Festigkeitsklassen haben. Darüber hinaus werden die Begleituntersuchungen und die Vorgehensweise zur Bestimmung der experimentellen Ergebnisgrößen bzgl. der Trag- und Verformungsfähigkeit der Kehlnahtverbindungen vorgestellt. Kapitel 7 fasst die Versuchsergebnisse in einer übersichtlichen Darstellungsform zusammen.

Im Rahmen einer umfassenden Diskussion werden die Versuchsergebnisse bzgl. der Tragfähigkeit und dem Verformungsvermögen der Kehlnahtverbindungen in Kapitel 8 aufbereitet und beschrieben. Zunächst soll gezeigt werden, dass die Tragfähigkeit und das Verformungsvermögen einer Flankenkehlnahtverbindung durch verschiedene Parameter beeinflusst wird.

Bei den experimentellen Untersuchungen wurde die Variation auf bestimmte Parameter reduziert, da einerseits durch die vorhandene Versuchseinrichtung Beschränkungen hinsichtlich der Abmessungen und der aufzubringenden Lasten gegeben waren und sich andererseits die Anzahl der Untersuchungen in einem überschaubaren Rahmen bewegen sollte.

In Kapitel 9 werden für die späteren umfangreichen statistischen Auswertungen die grundlegenden Begriffe, Methoden und Kriterien zur Sicherheitsbetrachtung vorgestellt. Hierbei wird ausführlich auf die Aufteilung der Zuverlässigkeit (quantitatives Maß der Sicherheit) in die beiden Größen Einwirkung  $E$  und Tragwiderstand  $R$  eingegangen. Daran anknüpfend wird in Kapitel 10 detailliert und schrittweise die Vorgehensweise des statistischen Auswerteverfahrens zur Kalibrierung eines Widerstandsmodells nach DIN EN 1990 Anhang D [6] beschrieben.

Kapitel 11 gibt einen Überblick über das eigens durchgeführte Verfahren zur statistischen Erhebung der Basisvariablen der Widerstandsmodelle und stellt deren statistische Kenngrößen vor. Am Beispiel der Kehlnahtverbindungen wurde in diesem Kapitel ein speziell angepasstes statistisches Auswerteverfahren konzipiert, das generell auf Fälle angewendet werden kann, die ein Bauteilversagen auf Bruch aufweisen. Anhand dieses neu entwickelten Auswerteverfahrens wird die Anwendbarkeit der Bemessungsmodelle zur Bestimmung der Tragfähigkeit einer Flankenkehlnaht nach DIN EN 1993-1-8 [9] und nach Rasche [84] überprüft und eine Weiterentwicklung bzw. Optimierung der Bemessungsmodelle aufgezeigt. Weiterhin wird für das Bemessungsmodell nach Rasche [84] eine Sensitivitätsanalyse bzgl. den Faktoren zur differenzierten Gewichtung der Festigkeit von Grund- und Schweißzusatzwerkstoff durchgeführt. Darüber hinaus wird ein neuer Ansatz einer theoretischen Widerstandsfunktion ausgewertet, bei dem zur Ermittlung der Tragfähigkeit ausschließlich die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs, unabhängig vom Grundwerkstoff, Eingang findet.

Bislang war das Verformungsverhalten von Kehlnahtverbindungen eher von geringem Interesse. Doch mit dem wachsenden Anwendungsfeld von normal- und höherfesten Baustählen, vor allem bspw. bei der Kapazitätsbemessung im Erdbebeningenieurwesen, steigt die Nachfrage nach einem analytischen Ansatz zur Abschätzung der Verformung. Ausgehend von einer Literaturrecherche wird in Kapitel 12 ein analytischer Ansatz zur Verformungsberechnung einer Flankenkehlnaht erarbeitet und mit den vorgestellten Auswerteverfahren statistisch abgesichert. Abschließend werden in Kapitel 13 alle wesentlichen Erkenntnisse und Ergebnisse zum Trag- und Verformungsverhalten von Kehlnahtverbindungen aus normal- und höherfesten Baustählen zusammengefasst und in einem Ausblick offene Fragen bzw. weitere mögliche Untersuchungen dargestellt.

## 2 Der Werkstoff Baustahl

### 2.1 Eigenschafts- und Anforderungsprofil

Der metallische Werkstoff Stahl ist definiert als eine Legierung des Elements Eisen mit anderen nichtmetallischen oder metallischen Elementen. Kohlenstoff und Silicium zählen bspw. zu den nichtmetallischen Legierungselementen, während Mangan und Chrom als metallische Legierungselemente geführt werden. Kohlenstoff gilt als wichtigstes Legierungselement von Stahl und liegt darin als Verbindung vor (Zementit -  $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Mit Ausnahme einiger chromreicher Stähle enthält Stahl höchstens 2,06 % Kohlenstoff und kann umformtechnisch verarbeitet werden. Sofern der Kohlenstoffgehalt größer als 2,06 % ist, spricht man von Gusseisen. Gusseisen ist nicht mehr wie Stahl verformbar, i. d. R. nicht ohne Weiteres schweißbar und wird im Bauwesen nur in Spezialbereichen eingesetzt [94].

Mit mehr als 2500 Legierungstypen wird die Werkstoffgruppe der Stähle aufgrund der vielfältigen Eigenschaftsprofile in allen technischen Bereichen angewendet. Einen hohen Anteil der Weltstahlproduktion stellen die im Bauwesen eingesetzten niedriglegierten ferritisch-perlitischen Baustähle dar. Diese Stähle haben im Allgemeinen einen Kohlenstoffgehalt von weniger als 0,25 % und werden in geschweißten und geschraubten Konstruktionen als Bleche oder Profile für den allgemeinen Stahlbau, den Brückenbau und den Kranbau eingesetzt. Als technisch verwandte Einsatzgebiete seien an dieser Stelle der Druckbehälterbau, der Bau von Off-Shore-Plattformen und der Schiffbau erwähnt [73].

In den zurückliegenden Jahrzehnten sind die Anforderungen an den Werkstoff Stahl stets gestiegen. Derzeit prägen die Begriffe *Kosteneffizienz*, *Qualität* und *Nachhaltigkeit* die Anforderungen an den modernen Stahlbau. Sowohl Planer, Ingenieure als auch Stahlerzeuger stehen vor einer großen Herausforderung, all diese Ansprüche in gleichem Maße zu erfüllen. Das Anforderungsprofil an moderne Produkte im Stahlbau definiert für die Stahlerzeuger klare Richtlinien an das entsprechende Eigenschaftsprofil von Produktneuentwicklungen. Demzufolge war und ist auch heute die Stahlindustrie bestrebt, diesen Anforderungen durch Weiterentwicklung der metallurgischen und fertigungstechnischen Möglichkeiten gerecht zu werden. Dabei stehen im Allgemeinen zwei Aufgaben im Vordergrund: Einerseits die Verbesserung der mechanischen Eigenschaftswerte, z. B. der Festigkeit und der Zähigkeit, und andererseits die Optimierung der Verarbeitungseigenschaften, die dem Stahlbauer eine möglichst leichte und somit kostengünstige Bearbeitung des Werkstoffs ermöglichen soll. Sowohl durch die chemische Zusammensetzung als auch durch Wärmebehandlungen können die Werkstoffeigenschaften des Stahls während und nach dem Herstellungsprozess gezielt beeinflusst werden [94]. Diese Thematik der chemischen Stahlzusammensetzung und der Einstellung der mechanischen Eigenschaften wird in Kapitel 2.4 näher beleuchtet.

In den letzten Jahren haben moderne Stahlgüten, wie bspw. höherfeste Stähle, aber auch wetterfeste Baustähle auf vielfältige Art bewiesen, dass durch deren Einsatz sowohl wirtschaftliches schnelles Bauen als auch ein verantwortungsbewusster Umgang mit natürlichen Ressourcen gefördert werden kann. Grundsätzlich hebt sich der Werkstoff Baustahl von seinen Konkurrenzwerkstoffen, insbesondere gegenüber dem Stahlbeton, durch eine Vielzahl von Vorteilen ab: Hohe Beanspruchbarkeit auf Zug und Druck, großer E-Modul, hohes Verformungsvermögen und unbegrenzte Recyclefähigkeit am Ende der Nutzungszeit. Diese Kreislaufeigenschaft verleiht dem Baustahl das Prädikat eines regenerativen Baustoffs. Werden ferner alle zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten und Werkstoffeigenschaften ausgeschöpft, insbesondere seine hohe Tragfähigkeit im Verhältnis zum Eigengewicht, lassen sich mit Baustahl klare, auf die Funktion der Lastabtragung konzentrierte Strukturen, außergewöhnliche, filigrane und architektonisch herausragende Konstruktionen wirtschaftlich realisieren. Der Werkstoff Baustahl steht im modernen Stahlbau nicht nur für repräsentative High-Tech-Bauwerke, sondern auch für eine vielfältige Anwendung in der normalen Alltagsarchitektur [74].

### **2.2 Allgemeines zur Stahlherstellung**

Der Herstellungsprozess von Baustählen lässt sich grundsätzlich in zwei Schritte aufteilen: In einem ersten Schritt wird der flüssige Stahl hergestellt und in eine geeignete Form zum Halbzeug vergossen. In dem darauffolgenden zweiten Schritt wird aus dem Halbzeug das Endprodukt ausgewalzt und ferner durch eine Wärmebehandlung beim oder nach dem Walzen die mechanischen Eigenschaften eingestellt [74].

### **2.3 Entwicklung der Festigkeitseigenschaften**

Die Gesamtwirtschaftlichkeit von Stahlbauten, deren Anforderungen an die Betriebsfestigkeit und die Verformungen eher gering sind, wird meist durch die Streckgrenze und die Zugfestigkeit des eingesetzten Baustahls bestimmt. Je höher diese Kennwerte sind, desto größer ist das Potential zur Reduzierung der Querschnitte und dem gesamten Konstruktionsgewicht [101]. Abb. 2-1 gibt einen Überblick über die zeitlichen Entwicklung der Streckgrenze der genormten verfügbaren Stähle in den vergangenen 100 Jahren. Die Entwicklung der Feinkornbaustähle hat nach dem Ende des Ersten Weltkrieges begonnen. Durch verschiedene Legierungszusätze konnte damals die Festigkeit des St 37 mit einer Mindeststreckgrenze von 230 bis 240 N/mm<sup>2</sup> auf 360 N/mm<sup>2</sup> (St 52) gesteigert werden [39]. In einem vergleichsweise kurzen Zeitraum nach dem Zweiten Weltkrieg gelang es, den Mindestwert der Streckgrenze von Baustählen auf mehr als 1000 N/mm<sup>2</sup> anzuheben.

Der erste Schritt dieser Entwicklung lässt sich darauf zurückführen, dass der Legierungsgehalt angehoben wurde. Jedoch waren diesem Vorgehen Grenzen gesetzt, da eine Erhöhung des Legierungsgehalts zu Lasten der Kalttrissicherheit geht. Deshalb beschränkte man sich bei der Herstellung von normalgeglühten Stählen darauf, einen Mindestwert der Streckgrenze bis zu  $460 \text{ N/mm}^2$  zu produzieren. Seit Mitte der 1960er Jahre begann die Entwicklung mit Mindeststreckgrenzen oberhalb von  $690 \text{ N/mm}^2$ . Innerhalb kürzester Zeit gelang es deren Mindeststreckgrenzen auf mehr als  $960 \text{ N/mm}^2$  zu erhöhen (siehe Abb. 2-1). Parallel zur Entwicklung der Mindeststreckgrenze ist es den Stahlherstellern zusätzlich gelungen die Zähigkeitseigenschaften der Stähle kontinuierlich zu verbessern.

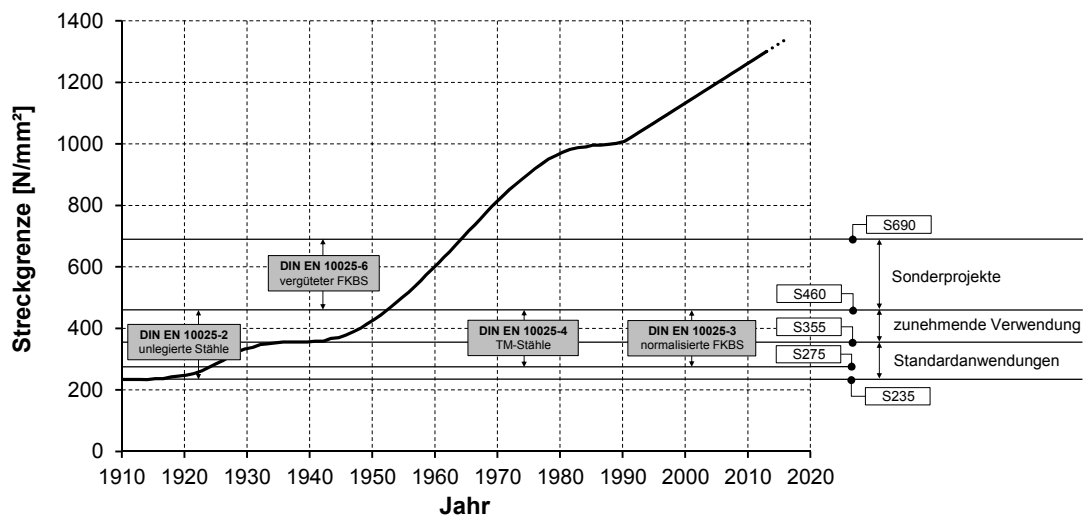


Abb. 2-1: Entwicklung der durch technische Lieferbedingungen gewährleisteten Streckgrenzenwerte nach [101]

Höchste Festigkeitsanforderungen bei gleichzeitig hervorragender Zähigkeit lassen sich durch eine Wasservergütung erreichen. Wasservergütete Baustähle mit Mindestwerten der Streckgrenze von  $690 \text{ N/mm}^2$ ,  $890 \text{ N/mm}^2$  und  $960 \text{ N/mm}^2$  sind seit mehreren Jahren auf dem Markt verfügbar. Im Wesentlichen werden diese Stähle im Druckbehälter-, Kran- und Fahrzeugbau aber auch für Bergbaugeräte eingesetzt. In der jüngeren Vergangenheit wurden auch Stähle mit einem Mindestwert der Streckgrenze von  $1300 \text{ N/mm}^2$  im Mobilkranbau verwendet [74].

Eine interessante Alternative zu den wärmebehandelten Stählen bietet sich durch die thermomechanisch gewalzten Stahlsorten. Mit Mindestwerten der Streckgrenze von  $355 \text{ N/mm}^2$  bis  $700 \text{ N/mm}^2$  erstreckt sich deren Einsatzgebiet mittlerweile vom Stahl- und Kranbau bis hin zum Fahrzeugbau. Diese Entwicklung lässt sich zusammenfassend darauf zurückführen, dass nicht nur metallurgische Fortschritte, sondern ferner auch walztechnische Verbesserungen erzielt wurden. Als Ergebnis dieser Entwicklung stehen dem Verarbeiter heute arbeitsfreundliche, hochfeste Baustähle mit Mindestwerten der Streckgrenze von  $355 \text{ N/mm}^2$  bis  $1100 \text{ N/mm}^2$ , bei gleichzeitig hervorragendem Zähigkeitsverhalten, zur Verfügung [104].

Die maßgebenden Eigenschaften der im Handel verfügbaren Stahlerzeugnisse sind in werkstoffbeschreibenden nationalen und internationalen Normen detailliert erfasst. Diese Normen (Produktnormen) bilden als Technische Lieferbedingungen die Grundlage sowohl für die vertraglich einzuhaltenden mechanischen Eigenschaften als auch die chemische Zusammensetzung der Stahlprodukte. Die gegenwärtigen bauaufsichtlichen Regelungen erlauben die Verwendung von Baustählen mit Streckgrenzen von 235 N/mm<sup>2</sup> bis 700 N/mm<sup>2</sup>. Dies sind hauptsächlich unlegierte Baustähle und Feinkornbaustähle nach DIN EN 10025-2 [14], DIN EN 10025-3 [15], DIN EN 10025-4 [16], DIN EN 10025-5 [17], DIN EN 10025-6 [18], warmgefertigte Hohlprofile nach DIN EN 10210 [22] sowie kaltgefertigte und geschweißte Hohlprofile nach DIN EN 10219 [23].

## 2.4 Normal- und höherfeste Stähle

### 2.4.1 Begriffsdifferenzierung

Den gesteigerten Anforderungen an den Werkstoff Baustahl in Bezug auf die Verringerung des Eigengewichts, bei gleicher Tragfähigkeit in Verbindung mit geringeren Verarbeitungskosten versuchten die Stahlerzeuger durch die Bereitstellung von sogenannten höherfesten Stählen gerecht zu werden. Kapitel 2.3 zeigt deutlich, dass durch legierungstechnische und technologische Maßnahmen, ausgehend von niedriglegierten ferritischen Baustählen, seit den 1920er Jahren die Festigkeit kontinuierlich gesteigert wurde. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Begriff *Höherfester Stahl* nicht eindeutig definiert ist und sowohl vom Anwendungsgebiet als auch von den technischen Entwicklungen, wie sie sowohl in der stahlerzeugenden als auch stahlverarbeitenden Industrie gemacht wurden, abhängt. Beispielsweise wurde die Stahlgüte St 52 mit einer Berechnungsstreckgrenze von 360 N/mm<sup>2</sup>, was einem heutigen Baustahl S355 entspricht, in den 1920er Jahren im deutschen Stahlbrückenbau eingeführt und galt lange Zeit als hochfester Baustahl [93]. Andererseits werden im Mobilkranbau heute bereits Stähle bis zu einer Streckgrenze von 1300 N/mm<sup>2</sup> eingesetzt, so dass höherfester Stahl in diesem Bereich anders definiert ist als bspw. im klassischen Stahlbau. Im Bereich des klassischen Stahlbaus versteht man unter höherfester Stahlsorten bereits Stähle mit einer Streckgrenze größer als 355 N/mm<sup>2</sup>. Nicht zuletzt unterliegt der Begriff *Höherfester Stahl* dabei offensichtlich einer zeitlichen Entwicklung und vor allem einem anwendungsbezogenen Einsatzgebiet.

Tab. 2-3 zeigt, dass durch die Einführung von DIN EN 1993-1-12 [11] für den europäischen Stahlbau der Einsatz von Stahlsorten bis zu einer Mindeststreckgrenze von 700 N/mm<sup>2</sup> geregelt wurde, so dass sich für höherfeste Stahlgüten, wie bspw. S460 ML und S690 QL, das Anwendungsfeld vergrößert [74]. Stahlsorten mit einer Mindeststreckgrenze von größer als 355 N/mm<sup>2</sup> werden im Folgenden als höherfeste Stähle bezeichnet.



### 2.4.2 Besonderheiten der Herstellung höherfester Baustähle

Höherfeste Baustähle können durch verschiedene Herstellungsprozesse hergestellt werden. Die Herstellungsrouten stehen dabei in enger Abhängigkeit zur chemischen Zusammensetzung des Stahls. Daraus ergeben sich unterschiedliche Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften besonders in Hinblick auf die Schweißbarkeit, die im Stahlbau eine bedeutende Rolle einnimmt. Folgende Prozesse und damit Stahlgruppen lassen sich übergeordnet unterscheiden:

- Normalisierte Stähle
- Thermomechanisch gewalzte Stähle
- Vergütete Stähle

Auf metallurgischer Ebene stehen zwei Mittel zur Verfügung, um höherfeste Stahlsorten herzustellen. Durch Legieren lässt sich die Festigkeit leicht erhöhen. Dies kann entweder mit Mischkristallbildnern (bspw. Mangan, Nickel, Chrom) oder interstitiell gelösten Atomen (Kohlenstoff, Stickstoff) erreicht werden. Jedoch kann dies bspw. beim aus Kostengründen gängigsten Legierungselement Kohlenstoff die Schweißbarkeit und die Zähigkeit beeinträchtigen.

Ein weiterer wirksamer Mechanismus zur Streckgrenzensteigerung stellt die Kornfeinung dar, vor allem hinsichtlich der Schweißbarkeit. Ein feines Korn führt nicht nur zu einer Erhöhung der Streckgrenze durch Versetzungsbehinderung an den Korngrenzen, sondern gleichzeitig auch zu einer verbesserten Zähigkeit des Werkstoffs. Nach der Beziehung von *Hall-Petch* nimmt die Streckgrenze mit dem Reziprok der Quadratwurzel der mittleren Korngröße zu [106]. In der Regel lässt sich diese Kornfeinung durch eine Mikrolegierung mit Niob, Titan und/oder Vanadin sowie eine geeignete Wärmebehandlung erreichen. Letztendlich ist die Art der Wärmebehandlung in Kombination mit der chemischen Zusammensetzung des Stahls und somit den Verarbeitungseigenschaften eng verknüpft [74].

### 2.4.3 Normalisierte Stähle

Der klassische Herstellprozess für Baustähle besteht aus einer Warmwalzung auf Blechabmessungen mit daran anschließendem Normalglühen. Als Normalglühen bezeichnet man das durchgreifende Erwärmen auf Temperaturen über die Ferrit-Austenit-Umwandlungstemperatur ( $> 900\text{ °C}$ ) mit nachfolgender langsamer Abkühlung. Dadurch entsteht eine feine, regelmäßige ferritisch-perlitische Gefügestruktur im Stahl, die in Verbindung mit Legierungselementen zu entsprechend höheren Streckgrenzen führt als im Walzzustand. Diese Art der Wärmebehandlung kann heute je nach Blechdicke und Stahlqualität mit demselben Resultat durch ein normalisierendes Walzen ersetzt werden. Normalisierendes Walzen ist demnach definiert als ein kontrolliertes Walzverfahren, bei dem die Endverformungen im Temperaturbereich des Normalglühens stattfinden.

Als Beispiel für die Herstellung nach diesen Prozessen sei die Standardstahlgüte S355 J2+N genannt. Bis zu einer Streckgrenze von  $460\text{ N/mm}^2$  basiert die festigkeitssteigernde Wirkung i. d. R. auf dem Einsatz einer Legierung von Vanadin und Stickstoff, dem daraus resultierenden Vanadiumkarbonitrid. Normalisierend gewalzte Stähle und auch normalisierte Stähle tragen die Bezeichnung N als Abkürzung für den Lieferzustand und sind bis zu einer Streckgrenzenklasse von  $460\text{ N/mm}^2$  in DIN EN 10025-3 [15] mit nachgewiesener Kerbschlagarbeit bei  $-20\text{ °C}$  genormt. Die Abkürzung NL steht für tieftemperaturzähe Güte mit nachgewiesener Kerbschlagarbeit bei  $-50\text{ °C}$  [93]. Normalisierte Feinkornbaustähle eignen sich ideal für Bauteile, die über klassisches Warmumformen hergestellt oder bei denen ein anschließendes Normalglühen im Fertigungsprozess vorgesehen ist.

### 2.4.4 Thermomechanisch gewalzte Stähle

Das thermomechanische Walzen basiert auf einer Kombination von thermischer und mechanischer Behandlung mit klar definierten Walzverformungsschritten bei vorherbestimmten Temperaturen. Die daraus resultierende Gefügestruktur und mechanisch-technologischen Eigenschaften könnten durch eine Wärmebehandlung alleine nicht erreicht werden. Im Gegensatz zum normalisierenden Walzen wird bei diesem unter Umständen auch auf Walzschriffe unterhalb der Rekristallisationstemperatur zurückgegriffen, die kombiniert mit der durch Mikrolegierungselemente bedingten Teilchenbildung in einer höchst feinen Gefügestruktur resultieren. Auf Basis der Beziehung nach *Hall-Petch* sind für einen thermomechanisch gewalzten Stahl gleichzeitig hohe Zähigkeiten und Festigkeiten möglich, bei gleichzeitiger Reduzierung des Legierungsgehalts. Zusätzlich heben sich thermomechanisch gewalzte Stähle auch durch eine bessere Schweißbarkeit von den normalisierten Stählen ab [74].

Oft wird das thermomechanische Walzen durch eine sogenannte Mikrolegierungsbildung, z. B. durch Niob oder Vanadium, unterstützt. Dies hat die Bildung feiner Teilchen (Karbide oder Karbonitride) zur Folge, die eine Festigkeitssteigerung bewirken und einer unerwünschten Kornvergrößerung beim kurzzeitigen Wiedererhitzen, z. B. beim Schweißen, entgegenwirken. Durch die Einführung von DIN EN 1993-1-12 [11] wurde für den europäischen Stahlbau der Einsatz thermomechanisch gewalzter Stähle bis zu einer Streckgrenze von  $700 \text{ N/mm}^2$  geregelt. Thermomechanisch gewalzte Stähle sind nach DIN EN 10025-4 [16] genormt und werden mit den Kennbuchstaben M (normalzähe Güte mit nachgewiesener Kerbschlagarbeit bei  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und ML (tieftemperaturzähe Güte mit nachgewiesener Kerbschlagarbeit bei  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) bezeichnet.

#### 2.4.5 Vergütete Stähle

Klassischerweise besteht die Verfahrensrouten zur Herstellung höherfester Stähle oberhalb  $500 \text{ N/mm}^2$  (S690 bis S1100) aus einem zweistufigen Wärmebehandlungsprozess: Der erste Schritt umfasst das Härten, bei dem der Werkstoff von der Austenitisierungstemperatur (oberhalb  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ ) i. d. R. auf Raumtemperatur rasch abgekühlt wird (vorzugsweise mit Wasser, Öl oder Luft). Daran anschließend folgt der Anlassschritt, bei dem die gewünschten Materialeigenschaften eingestellt werden. Durch diese Abfolge bildet sich im Stahl zuerst eine Gefügestruktur mit hoher Festigkeit (martensitisch-bainitisches Gefüge), jedoch extremer Härte und Sprödigkeit und ist in diesem Zustand noch nicht zu verwenden. Durch das Anlassen erfolgt eine Entspannung und Umbildung der Gefügebestandteile mit einer daraus resultierenden Verbesserung der Zähigkeit, wobei die Festigkeit und die Härte abnehmen.

Mit diesem Verfahren können Stähle im kleineren Wanddickenbereich bis zu einer Streckgrenze von  $1300 \text{ N/mm}^2$  hergestellt werden. Bei größeren Erzeugnisdicken ergibt sich die Problematik, dass die Abkühlgeschwindigkeiten beim Härten an der Oberfläche sich wesentlich von denen im Blechkern unterscheiden. Für eine ausreichende Durchhärtung in den Kern müssen somit Legierungselemente zugesetzt werden, die die kritische Martensitbildungsgeschwindigkeit herabsetzen. Als Folge dessen weisen vergütete Stähle mit größeren Erzeugnisdicken zwangsläufig größere Kohlenstoffäquivalente auf, die zur Beurteilung der Schweißeignung betrachtet werden. Dementsprechend nimmt die Schweißeignung mit wachsenden Erzeugnisdicken der vergüteten Stähle ab [74].

Vergütete Stähle sind nach DIN EN 10025-6 [18] in Streckgrenzenklassen bis  $960 \text{ N/mm}^2$  genormt, wobei drei Zähigkeitsgütegruppen unterschieden werden: Q für eine nachgewiesene Kerbschlagarbeit von  $30 \text{ J}$  bei  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ , QL für  $30 \text{ J}$  bei  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  und QL1 für  $30 \text{ J}$  bei  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 2.4.6 Mechanische Eigenschaften von Baustahl

Die maßgebenden Kenngrößen zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von Baustahl werden in einem einachsigen Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1 [30] i. d. R. an Rund- oder Flachzugproben bestimmt, bei dem die Belastung quasi-statisch bis zum Bruch gesteigert wird. Zu diesen Kenngrößen zählen der Elastizitätsmodul  $E$ , die obere Streckgrenze  $f_y$ , die Zugfestigkeit  $f_u$  und die Bruchdehnung  $A$  (Abb. 2-2). Ferner können für das Verformungsvermögen die Zähigkeitseigenschaften relevant sein. Während die Probe in der Zugprüfmaschine mit der vorgegebenen Geschwindigkeit belastet wird, können gleichzeitig die anliegende Kraft und die zugehörige Verformung kontinuierlich aufgezeichnet werden. Hieraus lassen sich durch Umrechnung die Spannung  $\sigma$  und die Dehnung  $\varepsilon$  bestimmen, womit das baustahltypische Spannungs-Dehnungsdiagramm (vgl. Abb. 2-2) abgeleitet werden kann. Grundsätzlich gilt, dass Belastungen an Bauteilen Formänderungen hervorrufen. Elastisches Verhalten eines Werkstoffs ist dadurch gekennzeichnet, dass sich nach Entlastung die ursprüngliche Form wieder einstellt. Ist dies nicht der Fall, hat sich der Werkstoff plastisch verformt.

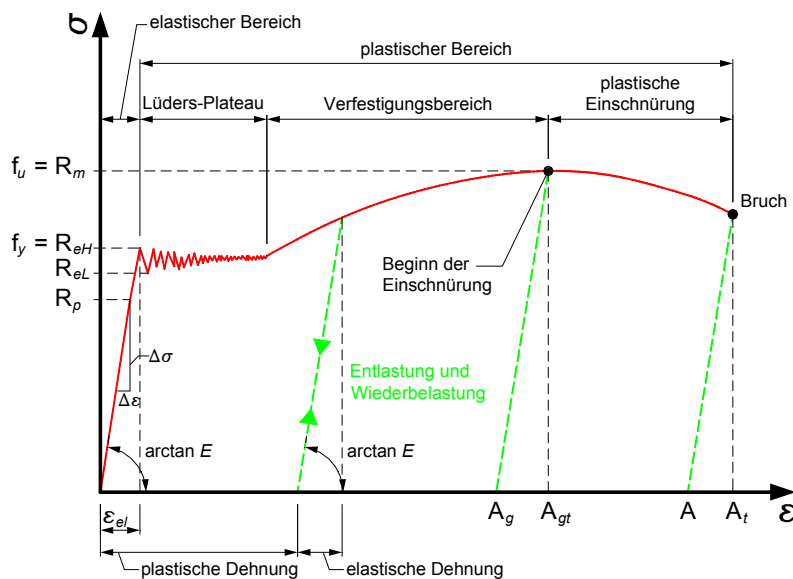


Abb. 2-2: Typisches Spannungs-Dehnungsdiagramm eines unlegierten Baustahls mit Lüders-Plateau nach DIN EN ISO 6892-1 [30]

In Abb. 2-2 ist ein realitätsnahes Spannungs-Dehnungsdiagramm eines unlegierten Baustahls mit ausgeprägter Streckgrenze dargestellt. Bis zum Erreichen der Elastizitätsgrenze  $R_p$  zeigt sich ein rein elastisches Werkstoffverhalten. Der lineare Anstieg wird durch den Elastizitätsmodul  $E$  ausgedrückt (Hookesches Gesetz). Ab der Elastizitätsgrenze  $R_p$  beginnt der Übergang in den Fließbereich. Da sich jedoch die ersten plastischen Verformungen kaum messen lassen, wird üblicherweise eine technische Elastizitätsgrenze angewandt, bei der sich eine plastische Verformung von 0,01 % einstellt [81].

Mit Erreichen der oberen Fließgrenze  $R_{eH}$  bilden sich die sogenannten Lüders-Bänder aus, bis die Spannung der Zugprobe auf den Wert der unteren Fließgrenze  $R_{eL}$  abgefallen ist. Bei den meisten Stahlsorten wird der Übergang zwischen elastischem und plastischem Verhalten durch die Streckgrenze  $f_y$  charakterisiert, die gemäß DIN EN 1993-1-1 [7] als die obere Fließgrenze  $R_{eH}$  definiert ist. Bei Stählen, die keine ausgeprägte natürliche Streckgrenze aufweisen und deren Streckgrenze nur schwer bestimmt werden kann, wird die Spannung an der 0,2 %-Dehngrenze als technische Streckgrenze  $R_{p0,2}$  festgelegt. Die 0,2 %-Dehngrenze  $R_{p0,2}$  stellt diejenige Spannung dar, die nach dem Entlasten eine bleibende Dehnung von 0,2 % ergibt.

Nach dem Fließbereich folgt der Verfestigungsbereich, der nach Erreichen der Zugfestigkeit  $R_m$  mit dem Beginn des örtlichen Einschnürens endet. Der scheinbar auftretende Festigkeitsabfall nach dem Erreichen der Zugfestigkeit  $R_m$  hat seine Ursache darin, dass die Belastung stets auf den Anfangsquerschnitt der Probe bezogen wird. Man spricht von der technischen Spannungs-Dehnungslinie. Tatsächlich verringert sich der vorhandene Querschnitt jedoch durch die Querdehnung und die Einschnürung an der Stelle des späteren Bruchs und der Werkstoff verfestigt sich mit zunehmender Verformung immer stärker, d. h. in einem wahren Spannungs-Dehnungsdiagramm nimmt die Spannung, bezogen auf den augenblicklich vorhandenen Querschnitt im eingeschnürten Bereich der Zugprobe, ständig zu. Bis zum Erreichen der Zugfestigkeit  $R_m$  erfolgt eine gleichmäßige bzw. homogene Verminderung des Querschnitts über die gesamte Messlänge. Danach schnürt die Probe an ihrer schwächsten Stelle ein. Die plastische Dehnung bis zum Beginn der Einschnürung ist definiert als die Gleichmaßdehnung  $A_g$ . Die gemessene Gesamtverlängerung der Probe nach dem Bruch kennzeichnet die Bruchdehnung  $A$ . Da beim Bruch die elastische Dehnung verschwindet, handelt es sich bei der Bruchdehnung  $A$  um eine rein plastische Dehnung.

#### 2.4.7 Stahlsorten und Bezeichnungssystem im Stahlbau

Grundsätzlich werden Stahlsorten nach Werkstoffnummern oder Kurzbezeichnungen gekennzeichnet. Die Kurzbezeichnung erweist sich für die im Stahlbau verwendeten Stahlsorten als Vorteil, da aus dieser das prinzipielle Eigenschaftsprofil rasch abgelesen werden kann. Die Bezeichnung und Klassifizierung der Stähle erfolgt hierbei nach den grundlegenden Eigenschaften, wie Festigkeit, Zähigkeit und speziellen Eigenschaften, wie z. B. Kaltumformbarkeit etc. Die generelle Vorgehensweise ist in Tab. 2-1 nach DIN EN 10027-1 [19] dargestellt.

Tab. 2-1: Kurzbezeichnung der Stähle nach DIN EN 10027-1 [19]

Gruppe 1: Für unlegierte Baustähle				Gruppe 1: Für Feinkornbaustähle		Gruppe 2
Kerbschlagarbeit			Temp.			
27 J	40 J	60 J	[°C]			
JR	KR	LR	+20	M	thermomechanisch gewalzt KV ≥ 40 J bei T = -20 °C	C Mit besonderer Kaltumformbarkeit
J0	K0	L0	0	ML	thermomechanisch gewalzt KV ≥ 27 J bei T = -50 °C	H Hohlprofil
J2	K2	L2	-20	N	normalgeglüht/normalisierend gewalzt KV ≥ 40 J bei T = -20 °C	L Für tiefe Temperaturen
J3	K3	L3	-30	NL	normalgeglüht/normalisierend gewalzt KV ≥ 27 J bei T = -50 °C	W Wetterfest
J4	K4	L4	-40	Q	vergütet KV ≥ 27 J bei T = -20 °C	P Für Spundbohlen
J5	K5	L5	-50	QL	vergütet KV ≥ 27 J bei T = -40 °C	S Für Schiffsbau
J6	K6	K6	-60	QL1	vergütet KV ≥ 27 J bei T = -60 °C	T Für Rohre

In Tab. 2-2 sind die gängigsten Zusatzsymbole nach DIN EN 10027-1 [19] für Stahlbaustähle aufgeführt.

Tab. 2-2: Zusatzsymbole nach DIN EN 10027-1 [19]

Besondere Anforderungen	
+H	Mit Härbarkeit
+Z15	Mindest-Brucheinschnürung senkrecht zur Oberfläche 15 %
Art des Überzugs	
+A	Feueraluminiert
+CU	Kupferüberzug
+Z	Feuerverzinkt
Behandlungszustand	
+A	Weichgeglüht
+AR	Wie gewalzt (ohne jegliche besonderen Walz- und/oder Wärmebehandlungsbedingungen)
+C	Kaltverfestigt
+CR	Kaltgewalzt
+M	Thermomechanisch umgeformt
+N	Normalgeglüht oder normalisierend umgeformt
+QT	Vergütet
+SR	Spannungsarmgeglüht

Die mechanischen Eigenschaften und die chemische Zusammensetzung der Stähle sind in den europäischen Produktnormen spezifiziert. Im Bauwesen werden hauptsächlich unlegierte Baustähle und Feinkornbaustähle nach DIN EN 10025-2 [14], DIN EN 10025-3 [15], DIN EN 10025-4 [16], DIN EN 10025-5 [17], DIN EN 10025-6 [18], warmgefertigte Hohlprofile nach DIN EN 10210 [22] sowie kaltgefertigte und geschweißte Hohlprofile nach DIN EN 10219 [23] eingesetzt. Tab. 2-3 gibt einen Überblick über die nach DIN EN 1993-1-1 [7] Tabelle 3.1 und DIN EN 1993-1-12 [11] Tabelle 1 derzeit im Bauwesen einsetzbaren Stähle und ihrer zugehörigen Produktnorm.

Tab. 2-3: Einsetzbare Baustähle und Hohlprofile nach DIN EN 1993-1-1 [7] und DIN EN 1993-1-12 [11]

Norm	Titel	Stahlsorte
<b>DIN EN 10025 - Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen</b>		
DIN EN 10025-2: 2005-04 [14]	<b>Teil 2:</b> Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle	S235
		S275
		S355
		S450
DIN EN 10025-3: 2005-02 [15]	<b>Teil 3:</b> Technische Lieferbedingungen für normalgeglühte/ normalisierend gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle	S275 N/NL
		S355 N/NL
		S420 N/NL
		S460 N/NL
DIN EN 10025-4: 2005-04 [16]	<b>Teil 4:</b> Technische Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle	S275 M/ML
		S355 M/ML
		S420 M/ML
		S460 M/ML
DIN EN 10025-5: 2005-02 [17]	<b>Teil 5:</b> Technische Lieferbedingungen für wetterfeste Baustähle	S235 W
		S355 W
DIN EN 10025-6: 2009-08 [18]	<b>Teil 6:</b> Technische Lieferbedingungen für Flacherzeugnisse aus Stählen mit höherer Streckgrenze im vergüteten Zustand	S460 Q/QL/QL1
		S500 Q/QL/QL1
		S550 Q/QL/QL1
		S620 Q/QL/QL1
		S690 Q/QL/QL1
<b>DIN EN 10210 - Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen</b>		
DIN EN 10210-1: 2006-07 [22]	<b>Teil 1:</b> Technische Lieferbedingungen	S235 H
		S275 H
		S355 H
		S275 NH/NLH
		S355 NH/NLH
		S420 NH/NLH
		S460 NH/NLH
<b>DIN EN 10219 - Kaltgefertigte geschweißte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen</b>		
DIN EN 10219-1: 2006-07 [23]	<b>Teil 1:</b> Technische Lieferbedingungen	S235 H
		S275 H
		S355 H
		S275 NH/NLH
		S355 NH/NLH
		S460 NH/NLH
		S275 MH/MLH
		S355 MH/MLH
		S420 MH/MLH
S460 MH/MLH		

#### 2.4.8 Verwendbarkeit

Mit der Einführung von DIN EN 1993-1-12 [11] ist die Anwendung höherfester Stähle im Bauwesen nicht nur im Rahmen allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen oder Zustimmungen im Einzelfall, sondern in Verbindung mit den Produktnormen und der Ausführungsnorm DIN EN 1090-2 [4] europäisch reglementiert. Die verschiedenen Teile des Eurocode 3 sind zunächst für Stähle bis S460 anwendbar. DIN EN 1993-1-12 [11] beinhaltet zusätzliche Regeln zur Erweiterung von DIN EN 1993 auf Stahlgüten bis S700.

Dementsprechend sind als höherfeste Stähle in DIN EN 1993-1-12 [11] sowohl Vergütungsstähle S500 bis S690 der Güten Q/QL/QL1 (Tab. 2-4) gemäß EN 10025-6 [18] als auch thermomechanisch gewalzte Stähle zum Kaltumformen S500 MC bis S700 MC (Tab. 2-5) gemäß EN 10149-2 [20] geregelt.

Tab. 2-4: Vergütungsstähle gemäß DIN EN 1993-1-12 [11]

Produktnorm und Stahlsorte	Dicken			$t \leq t_1$		$t_1 < t \leq t_2$		$t_2 < t \leq t_3$	
	$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	$t_3$ [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]
<b>DIN EN 10025-6 - Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen</b>									
S500 Q/QL/QL1	50	100	150	500	590	480	590	440	540
S550 Q/QL/QL1	50	100	150	550	640	530	640	490	590
S620 Q/QL/QL1	50	100	150	620	700	580	700	560	650
S690 Q/QL/QL1	50	100	150	690	770	650	760	630	710

Tab. 2-5: Thermomechanisch gewalzte Stähle zum Kaltumformen gemäß DIN EN 1993-1-12 [11]

Produktnorm und Stahlsorte	Dicken			$t_1 < t \leq t_2$		$t_2 < t \leq t_3$	
	$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	$t_3$ [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]
<b>DIN EN 10149 - Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen</b>							
S500 MC	1,5	8	16	500	550	500	550
S550 MC	1,5	8	16	550	600	550	600
S600 MC	1,5	8	16	600	650	600	650
S650 MC	1,5	8	16	650	700	630	700
S700 MC	1,5	8	16	700	750	680	750

Der deutsche Nationale Anhang DIN EN 1993-1-12/NA [12] beschränkt die Anwendung von DIN EN 1993-1-12 [11] auf die Vergütungsstähle gemäß Tab. 2-4. Die Anwendbarkeit der thermomechanisch gewalzten Stähle gemäß Tab. 2-5 wurde nicht allgemein zugelassen, weil EN 10149-2 [20] keine harmonisierte Produktnorm ist und das bisherige Haupteinsatzgebiet der Stähle im Maschinenbau lag [98]. Demzufolge ist die Verwendbarkeit von Stählen nach DIN EN 1993-1-1 [7] unter Berücksichtigung von DIN EN 1993-1-12 [11] und DIN EN 1993-1-12/NA [12] auf die in Tab. 2-4 und Tab. 2-6 aufgeführten Stahlsorten begrenzt. Die Nationalen Anhänge DIN EN 1993-1-1/NA [8] bzw. DIN EN 1993-1-12/NA [12] bieten darüber hinaus die Möglichkeit der Anwendung weiterer Stahlsorten, also auch S500 MC bis S700 MC gemäß DIN EN 10149-2 [20], wenn:

- die chemische Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften und die Schweißeignung in den Lieferbedingungen des Stahlherstellers festgelegt sind und diese Eigenschaften einer der in Tab. 2-4 oder Tab. 2-6 aufgeführten Stahlsorten zugeordnet werden können, oder
- sie in Fachnormen vollständig beschrieben und hinsichtlich ihrer Verwendung geregelt sind, oder



- ihre Verwendbarkeit durch einen bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweis (z. B. europäische technische Zulassung, allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall) nachgewiesen worden ist.

Tab. 2-6: Nennwerte der Streckgrenze  $f_y$  und der Zugfestigkeit  $f_u$  für Baustähle nach DIN EN 1993-1-1 [7] Tabelle 3.1

Produktnorm und Stahlsorte	Dicken			$t \leq t_1$		$t_1 < t \leq t_2$		$t_2 < t \leq t_3$	
	$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	$t_3$ [mm]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]
<b>DIN EN 10025-2</b>									
S235	40	80		235	360	215	360		
S275	40	80		275	430	255	410		
S355	40	80		355	490	335	470		
S450	40	80		440	550	410	550		
<b>DIN EN 10025-3</b>									
S275 N/NL	40	80		275	390	255	370		
S355 N/NL	40	80		355	490	335	470		
S420 N/NL	40	80		420	520	390	520		
S460 N/NL	40	80		460	540	430	540		
<b>DIN EN 10025-4</b>									
S275 M/ML	40	80		275	370	255	360		
S355 M/ML	40	80		355	470	335	450		
S420 M/ML	40	80		420	520	390	500		
S460 M/ML	40	80		460	540	430	530		
<b>DIN EN 10025-5</b>									
S235 W	40	80		235	360	215	340		
S355 W	40	80		355	490	335	490		
<b>DIN EN 10025-6</b>									
S460 Q/QL/QL1	40	80		460	570	440	550		
<b>DIN EN 10210-1</b>									
S235 H	40	80		235	360	215	340		
S275 H	40	80		275	430	255	410		
S355 H	40	80		355	510	355	490		
S275 NH/NLH	40	80		275	390	255	370		
S355 NH/NLH	40	80		355	490	335	470		
S420 NH/NLH	40	80		420	540	390	520		
S460 NH/NLH	40	80		460	560	430	550		
<b>DIN EN 10219-1</b>									
S235 H	40			235	360				
S275 H	40			275	430				
S355 H	40			355	510				
S275 NH/NLH	40			275	370				
S355 NH/NLH	40			355	470				
S460 NH/NLH	40			460	550				
S275 MH/MLH	40			275	360				
S355 MH/MLH	40			355	470				
S420 MH/MLH	40			420	500				
S460 MH/MLH	40			460	530				

Die charakteristischen Werte der Streckgrenze  $f_y$  und der Zugfestigkeit  $f_u$ , die Tab. 2-4 und Tab. 2-6 der entsprechenden Stahlsorte entnommen werden können, stellen keine Fraktilewerte sondern Nennwerte dar. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird nicht der Ausdruck *charakteristischer Wert* der Streckgrenze und Zugfestigkeit sondern *Nennwert* der Streckgrenze und Zugfestigkeit verwendet.

Bei den Nennwerten der Tab. 2-4 und Tab. 2-6 handelt es sich im Vergleich zu den Werten der Produktnormen wegen der gröberen Abstufung in Abhängigkeit von den Bauteildicken um eine Vereinfachung, die teilweise den Ansatz höherer Festigkeiten gestattet.

Bei der Bemessung von Stahlbauten sind die Nennwerte der Festigkeiten als charakteristische Werte gemäß Tab. 2-4 und Tab. 2-6 zu verwenden. Bei Erzeugnissen aus Stahlsorten nach Tab. 2-4 und Tab. 2-6 darf unterstellt werden, dass die Anforderungen an die Duktilität nach DIN EN 1993-1-1 [7] Abschnitt 3.2.2 bzw. DIN EN 1993-1-12 [11] Abschnitt 3.2.2 erfüllt sind, obwohl die in Tab. 2-4 und Tab. 2-6 aufgeführten rechnerischen Nennwerte von Streckgrenze und Zugfestigkeit die Kriterien zum Teil nominell nicht erfüllen. Für Baustähle, die nicht in Tab. 2-4 und Tab. 2-6 geregelt sind, müssen die zusammengefassten Duktilitätskriterien in Tab. 2-7 gesondert nachgewiesen werden.

Tab. 2-7: Duktilitätsanforderungen für Stähle nach DIN EN 1993-1-1 [7] und DIN EN 1993-1-12 [11]

Duktilitätskriterium	DIN EN 1993-1-1 bis S460	DIN EN 1993-1-12 über S460 bis S700
Festigkeitsverhältnis $f_u/f_y$	$\geq 1,10$	$\geq 1,05$
Bruchdehnung $A$	$\geq 15 \%$	$\geq 10 \%$
Dehnungsverhältnis $\varepsilon_u/\varepsilon_y$	$\geq 15$	$\geq 15$

Die Bruchdehnung  $A$  ist bereits eine nachzuweisende mechanische Eigenschaft nach den Produktnormen. Für den Nachweis des Dehnungsverhältnisses entspricht der Dehnung  $\varepsilon_u$  die der Zugfestigkeit  $f_u$  zugeordnete Gleichmaßdehnung  $A_g$ . Die Fließdehnung  $\varepsilon_y$  ist definiert als  $\varepsilon_y = f_y/E$ .

Im Rahmen der derzeitigen Überarbeitung von EN 1993-1-1 [7] wurde durch das *European Committee for Standardization CEN250/SC3 Steel Structures* beschlossen, dass zukünftig die Inhalte von EN 1993-1-12 in die entsprechenden Teile des Eurocode 3 eingearbeitet werden sollen. In diesem Zusammenhang werden die Vergütungsstähle nach Tab. 2-4 und die thermomechanisch gewalzten Stähle zum Kaltumformen nach Tab. 2-5 in EN 1993-1-1 aufgenommen. Weiterhin werden die in Tab. 2-7 aufgeführten Duktilitätsanforderungen überarbeitet und finden, wie in Tab. 2-8 aufgeführt, in EN 1993-1-1 Eingang.

Tab. 2-8: Angepasste Duktilitätsanforderungen für die zukünftige Fassung von EN 1993-1-1

Duktilitätskriterium	Plastische Tragwerksberechnung Stähle nach Tab. 2-6	Elastische Tragwerksberechnung Stähle nach Tab. 2-4 und Tab. 2-5
Festigkeitsverhältnis $f_u/f_y$	$\geq 1,10$	$\geq 1,05$
Bruchdehnung $A$	$\geq 15 \%$	$\geq 12 \%$
Dehnungsverhältnis $\varepsilon_u/\varepsilon_y$	$\geq 15$	

Gemäß Tab. 2-8 darf künftig eine plastische Tragwerksberechnung dann durchgeführt werden, wenn das Tragwerk aus Baustählen nach Tab. 2-6 besteht und über ausreichend Rotationskapazität an den Stellen verfügt, an denen sich die plastischen Gelenke bilden, sei es in Bauteilen oder in Anschlüssen. Es wird davon ausgegangen, dass die in Tab. 2-6 aufgeführten Stahlsorten die angepassten Duktilitätsanforderungen für eine plastische Tragwerksberechnung nach Tab. 2-8 erfüllen. Im Gegensatz dazu wurde für eine elastische Tragwerksberechnung unter Verwendung der Stahlsorten nach Tab. 2-4 und Tab. 2-5 die Anforderung an die Mindestduktilität für die Bruchdehnung  $A$  von 10 % auf 12 % angehoben. Das Dehnungsverhältnis  $\varepsilon_u/\varepsilon_y$  wird zukünftig für Stahlsorten nach Tab. 2-4 und Tab. 2-5 nicht berücksichtigt.

### 2.4.9 Vorteile und Anwendungsbeispiele höherfester Baustähle

Höherfeste Baustähle zeichnen sich durch eine hohe Streckgrenze und beachtlicher Zähigkeit bei niedrigen Temperaturen und gleichzeitig außergewöhnlich guter Schweißeignung aus. Die Kombination dieser Materialeigenschaften wurde lange als unvereinbar betrachtet und gilt in der Entwicklung von Baustählen als richtungsweisend. Um hohen Beanspruchungen bei gleichzeitig möglichst kleinen Querschnitten der Tragkonstruktion zu widerstehen werden höherfeste Baustähle eingesetzt. Demzufolge ermöglichen moderne Baustähle die Realisierung innovativer und wirtschaftlicher Stahlkonstruktionen. Die exzellenten Eigenschaften können bei der Planung von hochbelasteten Stützen im Industrie- und Geschossbau, von Fachwerken mit großer Spannweite sowie von Offshore-Konstruktionen genutzt werden. Somit können die Forderungen der Planer und Ingenieure nach leichten und wirtschaftlichen Konstruktionen unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Nachhaltigkeit erfüllt werden. Hauptsächlich profitieren im Stahlbau drei Einsatzbereiche von der Anwendung moderner Stahlsorten [74]:

- Schwerer Stahlhochbau (Hochhäuser, Hallen oder Kraftwerksgebäude)
- Brückenbau (in verschiedensten Spannweitenbereichen)
- Stahlwasserbau (bewegliche Wehre, Verschlüsse sowie Bauelemente von Wasserkraftanlagen)

Weshalb moderne Baustähle in diesen Konstruktionen eingesetzt werden, zeigt Abb. 2-3. Höhere Festigkeitswerte ermöglichen ein Konstruieren mit kleineren konstruktiven Querschnitten, sofern der Ermüdungsnachweis und Durchbiegungskriterien von untergeordneter Bedeutung sind. Diese Methode bietet für den Hochbau den Vorteil, dass die lichte Höhe maximiert werden kann und im Brückenbau die Forderung nach einer möglichst großen Durchfahrtshöhe durch sehr niedrigbauende Träger erfüllt wird.

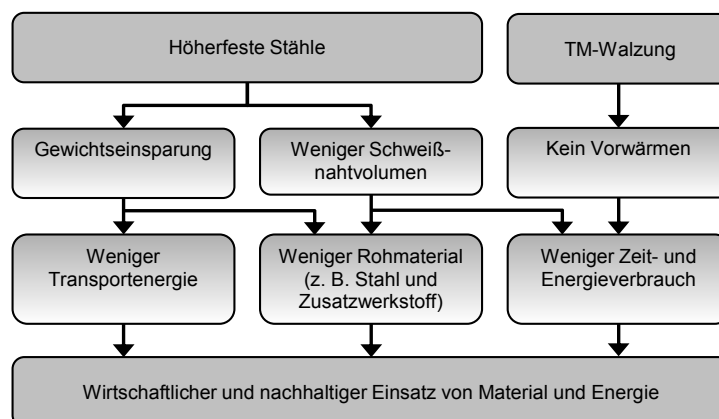


Abb. 2-3: Vorteile der Verwendung von höherfesten bzw. TM-gewalzten Stählen nach [74]

Durch die Anwendung höherfester Stahlsorten reduziert sich die Querschnittsfläche, so dass eine Verringerung des Eigengewichts die Folge ist.

Zusätzlich hat dieser Prozess auch Einfluss auf die Kosten einer Stahlkonstruktion. Eine Verringerung der Querschnitte ermöglicht zudem auch größere Baugruppen und Montageeinheiten bei gleichzeitig günstigeren Transport- und Montagekosten. Daran anknüpfend verringern sich die Fertigungskosten bei zunehmend kleineren Wanddicken. Als Beispiel sei hier das sinkende Schweißnahtvolumen bei kleineren Wanddicken aufgeführt, was nicht nur zu einer Reduzierung der Kosten für den Materialverbrauch beim Schweißen, sondern auch zu einer Reduzierung der Fertigungs- und Prüfzeit führt [82].

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass mit den höherfesten modernen Stahlsorten verschiedenste konstruktive und ästhetische Aufgabenstellungen gelöst werden können. Zahlreiche Anwendungen in Europa und weltweit zeigen, dass die modernen Stahlsorten problemlos angewendet werden können und sehr wirtschaftliche und nachhaltige Lösungen ermöglichen [74]. Im Folgenden soll der Einsatz von höherfesten Baustählen jeweils an einem Beispiel aus dem Stahlhoch- und Brückenbau verdeutlicht werden.

Sowohl im amerikanischen als auch im asiatischen Raum sind höherfeste Stähle in Stützkonstruktionen von Wolkenkratzern sehr gängig. Als Beispiel sei hier der 492 m hohe Turm des Shanghai World Financial Center (Abb. 2-4) im Shanghaier Finanzviertel Pudong erwähnt. Beim Bau des Turms wurde ein Großteil der Kastenstützen in einem höherfesten thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustahl (S460 M) ausgeführt.



Abb. 2-4: Shanghai World Financial Center (links), Shanghai (China) [eigene Aufnahme]

Durch den Einsatz von höherfestem Baustahl konnte im Vergleich zu Standardstahl ca. 25 % an relativem Materialgewicht und ca. 15 – 20 % an relativen Materialkosten eingespart werden, wobei sich dadurch auch der Zeitaufwand für Schweißarbeiten und Montage verringert hat [74].

Im Brückenbau, vor allem bei Brücken mit mittleren Spannweiten bis 100 m, trägt der Einsatz von höherfesten Stahlsorten dazu bei die hohen technischen Ansprüche zu erfüllen, aber gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit und die Nachhaltigkeit zu erhöhen. Beispielsweise wurde für die Samuel Beckett Brücke in Dublin, Irland (siehe Abb. 2-5) die Stahlsorte S690 QL für den Pylonkopf als hochbelastetes Bauteil eingesetzt. Die asymmetrische Schrägseilbrücke ähnelt einer auf der Seite liegenden Harfe. Die größten Lasten hat bei dieser außergewöhnlichen Brückenkonstruktion der Pylon zu tragen.



Abb. 2-5: Samuel Beckett Schrägseilbrücke, Dublin (Irland) [eigene Aufnahme]

Neben den ästhetisch hohen Ansprüchen wurden auch hohe Ansprüche an die Verarbeitbarkeit des Stahls gestellt. Deshalb kam im unteren Bereich der hervorragend zu schweißende thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustahl S355 M zum Einsatz. Für die Spitze des Pylons wurde wegen der außergewöhnlichen Belastungssituation der hochfeste, wasservergütete Feinkornbaustahl S690 QL gewählt. Mit dieser Materialkombination konnte die vom Architekten Santiago Calatrava geforderte schlanke Form des Pylons erzielt werden [74].

### 3 Schweißen hochfester Stähle

#### 3.1 Allgemeines

Schweißen und verwandte Prozesse sind nach DIN EN 14610 [26] und DIN 1910-100 [5] genormt und werden in Letzterer als Fügeprozess beschrieben, bei dem *„zwei oder mehr Teile verbunden werden“*. Dabei wird *„eine Kontinuität der Werkstoffe der zu verbindenden Teile [...] unter Anwendung von Wärme oder Kraft oder beiden und mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoff“* hergestellt. Als übergeordnetes Ziel des Schweißens wird das Erstellen von Verbindungen definiert, *„die es gestatten, die Tragfähigkeit des Grundwerkstoffs voll auszunutzen“* [41].

Beim Schweißen entstehen im Schweißgut (SG) und in der sogenannten Wärmeeinflusszone (WEZ) verschiedenste Werkstoffänderungen. Sowohl Änderungen der Zähigkeit als auch der Festigkeit und der Härte gehen vonstatten. Im Gegensatz zu den in Kapitel 2.4 beschriebenen Wärmebehandlungen, bei denen der Werkstoff über einen längeren Zeitraum auf der erforderlichen Temperatur gehalten werden muss, wird beim Schweißen die Wärmeeinflusszone nur einige Sekunden thermisch beeinflusst. Das bedeutet, die Vorgänge Umschmelzen von Schweißzusatzwerkstoff (SZW) zu Schweißgut, Aufschmelzen des Grundwerkstoffs (GW) und Verbinden von Schweißgut im Grundwerkstoff laufen gleichzeitig in nur sehr kurzer Zeit ab. Somit sind Vorhersagen über die zu erwartenden Gefügeänderungen oder Gütewerte mit der konventionellen Werkstoffprüfung größtenteils ungenau, da das Gefüge der Schweißnaht, das in sich nicht homogen ist, nicht selten vom Gefüge des thermisch unbeeinflussten Grundwerkstoffs abweicht. Durch den Schweißvorgang bildet sich die Wärmeeinflusszone zu einem Kontinuum unterschiedlichster Gefügestrukturen und Eigenschaften aus [94].

#### 3.2 Schweißzusatzwerkstoffe

Die Zusammensetzung der Schweißzusatzwerkstoffe entspricht im Allgemeinen der der verwendeten Grundwerkstoffe. Das geschmolzene Schweißgut ist artgleich, wenigstens aber artähnlich. Dadurch werden bei einem ordnungsgemäßen Ablauf der metallurgischen Reaktionen mechanische Gütewerte, wie Tragfähigkeit und Zähigkeit, sowie ein Korrosionsverhalten des Schweißguts erzielt, die vergleichbar sind mit den Eigenschaften des Grundwerkstoffs [94].

Schweißzusatzwerkstoffe werden anhand von Kennziffern für die Festigkeit und die Bruchdehnung des reinen Schweißguts eingeteilt. Hierbei entspricht die Kennziffer der Mindeststreckgrenze in  $\text{kN/cm}^2$ , gegensätzlich zur Bezeichnung von Baustählen in der Einheit  $\text{N/mm}^2$  (bzw. MPa).

Exemplarisch soll die Bezeichnung eines Schweißguts erläutert werden (siehe Tab. 3-1), das mit einem Schweißdraht DIN EN ISO 14341-A G 46 4 M21 3Si1 geschweißt wurde.

Tab. 3-1: Einstufungssystematik nach DIN EN ISO 14341-A [33]

DIN EN ISO 14341-A	Nummer der Norm, Einteilung nach Streckgrenze und Kerbschlagarbeit von 47 J
G	Kurzzeichen für Produkt/Schweißprozess
46	Kennziffer für die Streckgrenze, Festigkeit und Dehnung des Schweißguts
4	Kennziffer für die Kerbschlagarbeit des Schweißguts
M21	Kennzeichen für das Schutzgas
3Si1	Kennzeichen für die chemische Zusammensetzung

Das durch Metall-Schutzgasschweißen hergestellte Schweißgut wurde unter Mischgas (M21) mit einer Drahtelektrode (G), der chemischen Zusammensetzung 3Si1 (Tabelle 3A aus DIN EN ISO 14341 [33]) geschweißt und besitzt eine Mindeststreckgrenze von 460 N/mm<sup>2</sup> (46) nach Tabelle 1A aus DIN EN ISO 14341 [33] sowie eine Mindestkerbschlagarbeit von 47 J bei -40 °C (4) nach Tabelle 2 aus DIN EN ISO 14341 [33]. In Tab. 3-2 sind die verwendeten Kurzzeichen zur Bezeichnung von Schweißzusatzwerkstoffen aufgeführt.

Tab. 3-2: Kurzzeichen für Produkt und Schweißprozess des Schweißzusatzwerkstoffs nach DIN EN ISO 544 [27]

Art des Produkts	Schweißprozess(e) <sup>(siehe Anmerkung)</sup>
Füllbandelektrode	EG, ES, S
Umhüllte Stabelektrode	E
Massivstab	W, O, P
Massivbandelektrode	ES, S
Massivdraht	W, P, L, EB
Massivdrahtelektrode	EG, ES, G, S
Füllstab	W, O, P
Fülldraht	L, W
Fülldrahtelektrode	EG, ES, P, S, T
Dünne Folie	L, EB

#### Anmerkung zu Tab. 3-2:

<sup>a</sup>	Zusammenhang zwischen den Kurzzeichen und den Ordnungsnummern nach DIN EN ISO 4063:2011-03
E	Lichtbogenhandschweißen (111)
EB	Elektronenstrahlschweißen (51)
EG	Elektrogasschweißen (73)
ES	Elektroschlackeschweißen (72)
G	Metall-Inertgasschweißen/Metall-Aktivgasschweißen mit Massivdrahtelektrode (131, 135)
L	Laserstrahlschweißen (52)
O	Gasschweißen mit Sauerstoff-Brenngasflamme (31)
P	Plasmaschweißen (15)
S	Unterpulverschweißen (12)
T	Metall-Lichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode mit Schutzgas (132, 133, 136 und 138) oder ohne Schutzgas (114)
W	Wolfram-Schutzgasschweißen (14)



Entsprechend dem Stahleisenwerkstoffblatt SEW 088 [41] spielt bei der Auswahl der Schweißzusatzwerkstoffe im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften die Vermischung des Schweißguts mit dem aufgeschmolzenen Grundwerkstoff eine wesentliche Rolle. Die Eigenschaften des Schweißguts können sich hierbei infolge der Vermischung mit dem aufgeschmolzenen Grundwerkstoff von den für das reine Schweißgut genormten (vgl. Tab. 11-13) oder in den Katalogen der Schweißzusatzhersteller angegebenen Werten unterscheiden. Grundsätzlich sollte der Schweißzusatzwerkstoff so ausgewählt werden, dass kein zu hartes, sprödes und rissanfälliges Schweißgut entsteht. Voraussetzung für eine hohe Zähigkeit des Schweißguts ist die Verwendung von basischen Schweißzusatzwerkstoffen. Um beim Schweißen der Bildung von Kaltrissen, die in geschweißten Verbindungen mit ferritischen Stählen unter Einwirkung von Wasserstoff und Spannungen bei Temperaturen unter 300 °C auftreten können, entgegenzuwirken, sollte eine unnötig hohe Festigkeit des Schweißguts im Vergleich zum Grundwerkstoff vermieden werden. Weiterhin sollte berücksichtigt werden, dass nur solche Schweißzusätze verwendet werden, die im Vergleich zum Grundwerkstoff einen hinreichend niedrigen Wasserstoffgehalt im Schweißgut ergeben [41].

### **3.3 Metallurgische Vorgänge beim Schweißen**

#### **3.3.1 Allgemeines**

Wie alle Wärmebehandlungen wirkt sich auch der Vorgang des Schweißens auf das Gefüge und dadurch auf die Eigenschaften der Grundwerkstoffe und des Schweißzusatzes aus. Da bei fast allen Schweißverfahren durch verschiedene Wärmequellen Wärme in die genannten Werkstoffe eingebracht wird, sind diese bestimmten Erwärmungs- und Abkühlzyklen unterworfen. Es entstehen im Schweißgut und in der Wärmeeinflusszone die vielfältigsten Werkstoffveränderungen. Hinzu kommt, dass sich nicht identische Grundwerkstoffe und Schweißzusatzwerkstoffe in der flüssigen Phase vermischen. In diesem Zusammenhang sind Vorhersagen über die zu erwartenden Gefügeänderungen oder mechanischen Gütewerte mit den Methoden der konventionellen Werkstoffprüfung oft sehr ungenau [94].

Beim Schweißvorgang werden lediglich das Schweißgut und nur einige Millimeter des Grundwerkstoffs thermisch beeinflusst (vgl. Abb. 3-1). Da die Abkühlgeschwindigkeiten wesentlich höher sind als bei anderen Wärmebehandlungen, wird die Unterkühlung so groß, dass die polymorphe Umwandlung nicht mehr über Diffusionsvorgänge, sondern nur noch über den diffusionslosen Umwandlungsmechanismus ablaufen kann. In Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung und den Abkühlgeschwindigkeiten können sich dabei sehr harte Gefügebestandteile wie Martensit bilden, die eine Ferrit- und Perlitbildung vollständig unterdrücken können.

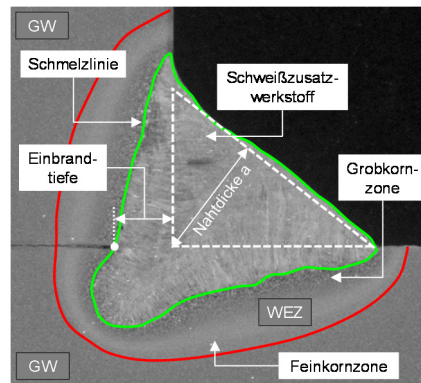


Abb. 3-1: Aufbau der Wärmeinflusszone einer Kehlnaht

Durch Martensitbildung können sich vor allem im Bereich der Grobkornzone (vgl. Abb. 3-1) ungünstige Eigenschaften ergeben. Diese bildet sich am Übergang zwischen Schweißzusatzwerkstoff und Grundwerkstoff und kann je nach Größe der Schweißparameter einen verhältnismäßig großen Bereich der Wärmeinflusszone einnehmen [94].

### 3.3.2 Einfluss von Kohlenstoff auf die Martensitbildung

Kohlenstoffatome besitzen einen kleineren Durchmesser als Eisenatome und können sich daher nur auf wenigen Zwischengitterplätzen im Eisen einlagern. Bei der Abkühlung von  $\gamma$ -Eisen zu  $\alpha$ -Eisen wird der sich in der löslicheren Austenit-Phase befindliche Kohlenstoff ausgeschieden. Durch die sehr kurzen Abkühlzeiten beim Schweißen verringert sich auch die Diffusionszeit, in der der Kohlenstoff das Eisengitter verlassen kann. Ab einer bestimmten kritischen Abkühlzeit kann der Kohlenstoff, der im Austenit noch in löslicher Form vorliegt, nicht mehr aus dem Gitter ausscheiden. Er bleibt durch die schlagartige Abnahme der Löslichkeit bei der Umwandlung von  $\gamma$ -Austenit zu  $\alpha$ -Ferrit zwangsgelöst. Zudem sind durch die schnelle Abkühlung keine Haltezeiten vorhanden und es kann somit kein Konzentrationsausgleich stattfinden. Der Austenit wandelt sich somit fast vollständig in sehr harte Gefügebestandteile wie Martensit oder Bainit um und es ergeben sich Höchst härten. Das Volumen des Gitteraufbaus bleibt dabei nach bisherigen Erkenntnissen unverändert. Es kommt vielmehr zu einer Gestalt- bzw. Formänderung, die in Abb. 3-2 dargestellt ist [94].

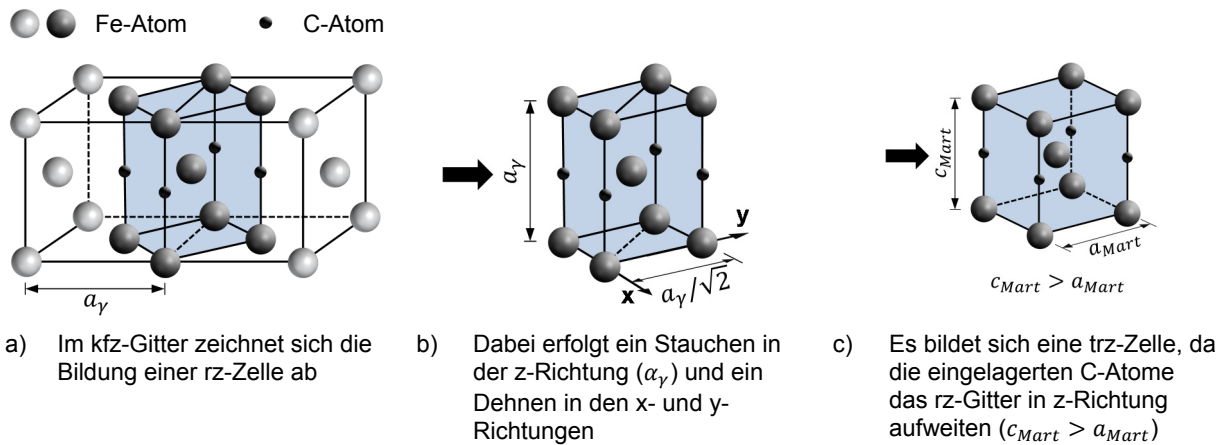


Abb. 3-2: Entstehung des Martensitgitters aus dem kfz-Gitter nach Bain [94]

Die eigentliche Ursache der Martensithärte lässt sich anhand des Bain-Mechanismus erklären: In Abb. 3-2 erkennt man, dass im kfz-Gitter bereits eine raumzentrierte Zelle (rz) virtuell vorgebildet ist. Die Abmessungen des krz-Martensitgitters werden dadurch erreicht, dass das Gitter in z-Richtung gestaucht und in x- und y-Ebene gedehnt wird. Es entsteht Martensit mit einem tetragonal-raumzentrierten (trz) Gitter, also nicht mehr kubisch-raumzentriert [94].

### 3.3.3 Einfluss der Legierungselemente auf die Aufhärtung/Gefügeausbildung

Neben den thermischen Zyklen ist, wie schon beschrieben, die chemische Zusammensetzung ein wichtiger Faktor, der einen Einfluss auf die Gefügeausbildung in der Wärmeinflusszone hat. Durch die Zusammenstellung der Legierungselemente werden Umwandlungstemperaturen und Umwandlungskinetik beeinflusst, wobei die Wirkung der Legierung auf die Diffusionsgeschwindigkeit des Kohlenstoffs von großer Bedeutung ist, da die Diffusion für die Umwandlung des  $\gamma$ -Austenits in  $\alpha$ -Ferrit notwendig ist [64]. Legierungselemente wie Mangan, Molybdän, Chrom, Nickel und Vanadium sind im Eisen-Kristall besser löslich als Kohlenstoff, da ihre Ordnungszahlen nahe an denen des Eisens liegen. Das bedeutet, sie weisen wesentlich kleinere Unterschiede im Atomdurchmesser auf. Aus diesem Grund ist ihre Diffusionsneigung geringer und ihre Verteilung und Löslichkeit bleibt während des Abkühlens annähernd konstant. Sie haben jedoch einen direkten Einfluss auf den Aufhärtungsprozess, indem die meisten Elemente die Härte erhöhen und den Härteabfall hin zu längeren Abkühlzeiten verschieben. Der Einfluss von Kohlenstoff und den Legierungselementen wird mittels den Kohlenstoffäquivalenten ausgedrückt (vgl. Kapitel 3.5) [94].

### 3.4 Schweißbeignung

Der Begriff der Schweißbeignung beschreibt hauptsächlich die Reaktionen des Grundwerkstoffs auf den Schweißprozess. Während des Schweißprozesses erfährt der Grundwerkstoff eine ungewollte Wärmebehandlung. Dadurch verändern sich die mechanisch-technologischen Eigenschaften, die vorwiegend durch Gefügeumwandlungen ausgelöst werden, die zu Versprödung, verminderter Korrosionsbeständigkeit oder erhöhten Spannungen im Bauteil führen können. Ein zum Schweißen geeigneter Werkstoff ist dadurch gekennzeichnet, dass durch den Schweißprozess die mechanisch-technologischen Eigenschaften nur minimal und in tolerierbarem Maße verändert werden. Die Schweißbeignung von Grundwerkstoffen kann, wie in Abb. 3-3 zu erkennen, in drei Bereiche eingeteilt werden: Hierbei werden die chemische Zusammensetzung und die metallurgischen Eigenschaften des Grundwerkstoffs stark durch seine Herstellung beeinflusst und wirken sich infolgedessen wesentlich auf die physikalischen Eigenschaften aus [55].

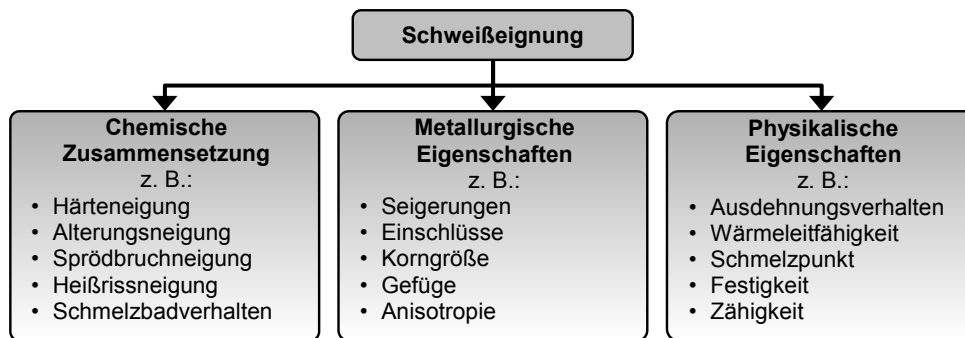


Abb. 3-3: Schweißbeignung eines Grundwerkstoffs basierend auf der chemischen Zusammensetzung und den metallurgischen und physikalischen Eigenschaften nach [55]

Zur Bewertung der Schweißbeignung dient im Allgemeinen das Kohlenstoffäquivalent, für das in den Normen einzuhaltende Maximalwerte angegeben sind [86]. Die Gleichungen zur Berechnung der unterschiedlichen Kohlenstoffäquivalente werden in Kapitel 3.5 vorgestellt. Aus den Gleichungen (3.2) bis (3.7) ist klar zu erkennen, dass sich die chemische Zusammensetzung des Stahls - also die vorhandenen Legierungselemente - stark auf die Schweißbeignung auswirkt und diese beeinflusst. Über das Kohlenstoffäquivalent kann der Einfluss der Legierungselemente auf die (Kalt-) Rissneigung in den aufgehärteten Zonen und auf die Schweißbeignung qualitativ bestimmt werden und gleichzeitig erkannt werden, ob ein Vorwärmen notwendig ist [94]. Genauer wird dieser Sachverhalt in Kapitel 3.5 behandelt. Eine sehr gute Schweißbeignung kann grundsätzlich durch einen geringen Gehalt an Kohlenstoff ( $C \leq 0,2\%$ ) und möglichst geringe Gehalte der Verunreinigungen (Phosphor (P), Schwefel (S), Arsen (As), u.a.) erzielt werden [94].

### 3.5 Vorwärmtemperatur

Das Vorwärmen ist Wärmebehandlung, bei der vor dem Schweißen Wärme in das Bauteil eingebracht wird, um das Gefüge während des Abkühlens zur Reduzierung der Härte positiv zu beeinflussen und gleichzeitig die Nahtdicke einzuhalten. Dabei wird die Abkühlung der geschweißten Naht während und nach dem Schweißvorgang verzögert, wodurch dem Wasserstoff Gelegenheit zur Effusion gegeben wird. Der Vorgang des Vorwärmens ist vor allem bei schlecht schweißbaren Stählen zu empfehlen. Selbst Stähle mit hohem Anteil an Kohlenstoff, die eine geringere Zähigkeit aufweisen und daher anfälliger für eine Anrissbildung sind, können somit durch eine entsprechende Vorwärmung geschweißt werden [65]. Die Vorwärmtemperatur  $T_p$  wird unmittelbar vor dem Vorgang des Schweißens im Nahtbereich gemessen. Üblicherweise wird sie als untere Grenze angegeben, da sie die Temperatur darstellt, die mindestens eingehalten werden sollte, um die Bildung von Kaltrissen durch den Schweißvorgang zu vermeiden. Sie sollte bis zur endgültigen Fertigstellung der Schweißnaht nicht unterschritten werden [91], [104]. Hohe Vorwärmtemperaturen treten bspw. beim Mehrlagenschweißen auf. Faktoren, die die Vorwärmtemperatur bestimmen ist das Kohlenstoffäquivalent  $CET$ , die Blechdicke  $d$ , der Wasserstoffgehalt  $HD$  im Schweißzusatzwerkstoff und die Wärmeeinbringung  $Q$  (vgl. Gleichung (3.1)). Das Kohlenstoffäquivalent  $CET$ , das von der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffs abhängt und in die Berechnung der Vorwärmtemperatur  $T_p$  mit eingeht, verdeutlicht den Einfluss der Legierungselemente auf die Schweißverbindung.

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.1)$$

mit

$CET$	Kohlenstoffäquivalent	[%]
$d$	Blechdicke	[mm]
$HD$	Wasserstoffgehalt des Schweißguts	[cm <sup>3</sup> /100g]
$Q$	Wärmeeinbringung	[kJ/mm]

Es ist wichtig zu beachten, dass das Kohlenstoffäquivalent  $CET$  des Grundwerkstoffs nur dann maßgebend ist, wenn es um 0,03 % über dem des verwendeten Schweißguts liegt. Andernfalls ist das um 0,03 % höhere  $CET$  des Schweißguts zu berücksichtigen, um Risse auch im Schweißgut zu vermeiden. Dies ist vor allem bei höherfesten thermomechanisch gewalzten Stählen zu beachten, da es bei diesen oft der Fall ist, dass das Kohlenstoffäquivalent des Schweißguts das des Grundwerkstoffs beträchtlich überschreiten kann [39].

Es gilt anzumerken, dass die mit dieser Methode bestimmte Vorwärmtemperatur  $T_p$  für viele Fälle eher sehr konservativ, d. h. hoch angesetzt ist. In den meisten Fällen im Stahlbau kann auf ein Vorwärmen verzichtet werden, sofern die Bauteiltemperaturen über  $0\text{ °C}$  liegen und die Schweißverbindung vor einer zu schnellen Abkühlung geschützt wird. Jedoch wird dazu geraten, bei ungünstigen geometrischen Verbindungen in Kombination mit wasserstoffbelasteten Schweißzusatzwerkstoffen im Rahmen einer Verfahrensprüfung konkret zu kontrollieren, ob ein Vorwärmen nicht doch notwendig ist [74].

Abb. 3-4 zeigt eindrucksvoll, dass unter Verwendung der Empfehlungen von DIN EN 1011-2 [3] bspw. für einen TM-gewalzten S460 ML wesentlich geringere Vorwärmtemperaturen notwendig sind als bei der normalisierten Stahlsorte S460 NL. Den beiden dargestellten Bereichen ist die Gleichung (3.1), eine Wärmeeinbringung von  $Q = 2\text{ kJ/mm}$  und die auf der sekundären Ordinatenachse angegebenen Wasserstoffgehalte des Schweißguts zugrunde gelegt.

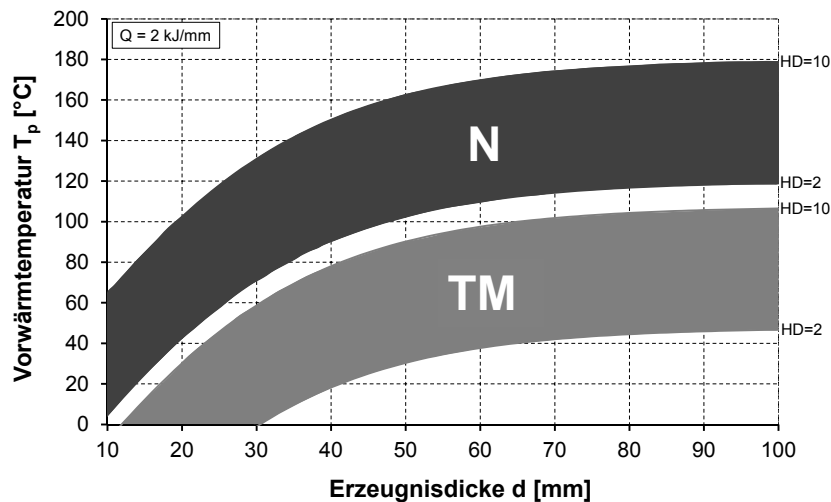


Abb. 3-4: Vergleich der Vorwärmtemperaturen S460 N und S460 M nach DIN EN 1011-2 [3]

Zusammenfassend wird das Vorwärmen hauptsächlich aus folgenden Gründen angewandt: Zum einen dient das Vorwärmen zur Vermeidung von Kaltrissen oder wasserstoffinduzierten Rissen, die während dem Schweißen entstehen können [39]. Durch das Vorwärmen kommt es zu einem verzögerten Abkühlen und folglich zu einer Begünstigung der Wasserstoffeffusion [104]. Die Größen, die Einfluss auf die Vermeidung von Kaltrissen haben können, sind die chemische Zusammensetzung ( $CET$ ), die Dicke des Werkstücks  $d$ , der Wasserstoffgehalt im Schweißgut  $HD$  und die Wärmeeinbringung  $Q$ , deren Einfluss auf die Vorwärmtemperatur  $T_p$  aus Gleichung (3.1) abgelesen werden kann. Zum anderen können durch das Vorwärmen Härterisse vermieden werden, die bei zu kurzer Abkühlzeit und bei einer nicht optimalen chemischen Zusammensetzung der Grundwerkstoffe möglicherweise auftreten [41].

Weiterhin bewirkt das Vorwärmen die Vermeidung von Schrumpfrissen, die bei zu hohen Eigenspannungen oder Schrumpfbehinderung entstehen können [91]. Bei Mehrlagenschweißungen spielt neben der Vorwärmtemperatur auch die Zwischenlagentemperatur  $T_i$  eine wesentliche Größe. Sie stellt die Temperatur dar, auf die die vorherige geschweißte Lage nach dem Lichtbogendurchgang abkühlt, bevor weitere Schweißraupen geschweißt werden. Jedoch unterscheiden sich  $T_p$  und  $T_i$  i. d. R. nicht, weshalb oft nur die Vorwärmtemperatur  $T_p$  betrachtet wird [104].

Da die Vorwärmtemperatur in einem gewissen Bereich liegen sollte und vor allem nicht zu niedrig sein darf, gibt es in Europa Empfehlungen zur Bestimmung der notwendigen Vorwärmtemperatur, die ausführlich in DIN EN 1011-2 [3] und dem Stahleisenwerkstoffblatt SEW 008 [41] erläutert sind. In DIN EN 1011-2 [3] existieren jedoch zwei verschiedene Empfehlungen für das Vorwärmen, die an sich sehr unterschiedlich sind.

- Methode A unter Verwendung des Kohlenstoffäquivalentes  $CE$
- Methode B unter Verwendung des Kohlenstoffäquivalentes  $CET$

In Deutschland wird die Verwendung der Methode B empfohlen. Diese führt zwar zu höheren Vorwärmtemperaturen, allerdings ist sie besonders bei höherfesten Feinkornbaustählen sicherer bezüglich der Vermeidung von Kaltrissen. Die entweder nach Methode A oder B ermittelte Vorwärmtemperatur  $T_p$  muss während des gesamten Schweißvorgangs aufrechterhalten werden [91]. Bei dickeren Blechen mit gleichbleibender Streckgrenze ist die empfohlene Mindestvorwärmtemperatur höher als bei dünneren Blechen, bei normalgeglühten Stählen ist sie bei gleicher Dicke höher als bei thermomechanisch gewalzten Stählen. So kann bei TM-Stählen, vor allem bei dickeren Blechen, mit einer sehr niedrigen Vorwärmtemperatur gearbeitet werden oder in manchen Fällen auf das Vorwärmen vollständig verzichtet werden [65]. Bei Kehlnähten ist prinzipiell eine geringere Vorwärmtemperatur erforderlich als bei Stumpfnähten [104].

Es ist von großer Bedeutung, Baustähle und Schweißzusatzwerkstoffe hinsichtlich ihrer Kaltrissempfindlichkeit beurteilen zu können, da das Kaltrissverhalten der Werkstoffe grundlegend den Schweißaufwand beeinflussen kann [58]. Zur Beurteilung des Kaltrissverhaltens wird das Kohlenstoffäquivalent herangezogen. Gemäß Methode A nach DIN EN 1011-2 [3] wird das Kohlenstoffäquivalent  $CE$  entsprechend Gleichung (3.2) herangezogen. Es wurde hauptsächlich über Härtemessungen ermittelt unter der Annahme, dass die zur Aufhärtung beitragenden Legierungselemente gleichermaßen die Kaltrissbildung fördern [39].

Berechnet wird das Kohlenstoffäquivalent  $CE$  wie folgt [90]:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad [\%] \quad (3.2)$$

Das in Methode B nach DIN EN 1011-2 [3] verwendete Kohlenstoffäquivalent  $CET$  gemäß Gleichung (3.3) wurde durch eine multiple Regression auf Grundlage detaillierter Kaltrissuntersuchungen entwickelt. Es stellt eine Verbindung zwischen der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffs und seiner Neigung zur wasserstoffinduzierten Rissbildung beim Schweißen her. Das  $CET$  trifft besonders für höherfeste Baustähle zu [65], [103].

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\%] \quad (3.3)$$

$CET$ -Wert > 0,4: eingeschränkte Schweißneigung, Vorwärmen empfohlen

Ein für Großrohrstähle abgeleitetes Kohlenstoffäquivalent ist das  $CEM$ , das nach Gleichung (3.4) berechnet wird [103].

$$CEM = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn + Cu}{29} + \frac{Cr + V}{10} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} \quad [\%] \quad (3.4)$$

Für niedriglegierte Kohlenstoff-Mangan Stähle wird das Kohlenstoffäquivalent  $CEV$  nach Gleichung (3.5) berechnet.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Mo + Cr + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\%] \quad (3.5)$$

Mithilfe multipler Regression wurde Gleichung (3.6) zur Berechnung des Kohlenstoffäquivalents  $PCM$  aus Ergebnissen des Tekken-Tests abgeleitet. Der Tekken-Test gibt Auskunft über die kritische Rissspannung an dehnungsbehinderten Schweißverbindungen [77]. Durch das Kohlenstoffäquivalent  $PCM$  wird das Kaltrissverhalten vorwiegend von Wurzelschweißungen beschrieben.

$$PCM = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + \frac{Ni}{60} + 5B \quad [\%] \quad (3.6)$$

Das Kohlenstoffäquivalent  $CEN$  wurde als Kombination des Kohlenstoffäquivalents  $CE$  und des Kohlenstoffäquivalents  $PCM$  entwickelt, um bessere Aussagen über das Kaltrissverhalten zu machen als die vorher entwickelten Kohlenstoffäquivalente. Die  $\tanh$ -Funktion beeinflusst die Werte des  $CEN$  so, dass sie bei Kohlenstoffgehalten größer 0,12 % mehr den nach der  $CE$ -Gleichung berechneten Werten entsprechen und bei Kohlenstoffgehalten kleiner 0,12 % mehr in Richtung der nach der  $PCM$ -Gleichung berechneten Werten gehen.

$$CEN = C + [0,75 + 0,25 \cdot \tanh(20 \cdot (C - 0,12))] \cdot \left[ \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + V + Nb}{5} + 5 \cdot B \right] \quad [\%] \quad (3.7)$$



In Tab. 3-3 und Tab. 3-4 ist ein Vergleich der Legierungsgehalte und der Werte des Kohlenstoffäquivalents  $CE$  nach Gleichung (3.2), des Kohlenstoffäquivalents  $PCM$  nach Gleichung (3.6) und des Kohlenstoffäquivalents  $CET$  nach Gleichung (3.3) dargestellt. Hierbei steht in Tab. 3-3 einem herkömmlichen S355 J2+N ein thermomechanisch gewalzter Stahl S355 ML gegenüber. In Tab. 3-4 ist der Unterschied zwischen einem normalgeglühten höherfesten Feinkornbaustahl S460 NL und einem thermomechanisch gewalzten höherfesten Feinkornbaustahl S460 ML aufgeführt. Sowohl in Tab. 3-3 als auch in Tab. 3-4 wird jeweils die Normanforderung einer typischen Schmelzanalyse gegenübergestellt.

Tab. 3-3: Typische Schmelzanalyse eines S355 ML im Vergleich zu einem konventionellen S355 J2+N (Blechdicke: 50 mm) [74]

	S355 J2+N		S355 ML	
	nach EN 10025-2	typ. Analyse	nach EN 10025-4	typ. Analyse
C	≤ 0,22	0,17	≤ 0,14	0,08
Si	≤ 0,55	0,45	≤ 0,50	0,35
Mn	≤ 1,60	1,50	≤ 1,60	1,53
P	≤ 0,025	0,018	≤ 0,025	0,012
S	≤ 0,025	0,015	≤ 0,020	0,005
Nb	-	-	≤ 0,05	0,02
V	-	-	≤ 0,10	-
Mo	-	-	≤ 0,10	-
Ni	-	-	≤ 0,50	-
$CE$	≤ 0,47	<b>0,42</b>	≤ 0,40	<b>0,34</b>
$PCM$		0,26		0,17
$CET$		0,32		0,24

Tab. 3-4: Typische Schmelzanalyse eines S460 ML im Vergleich zu einem normalisierten S460 NL (Blechdicke: 50 mm) [74]

	S460 NL		S460 ML	
	nach EN 10025-3	typ. Analyse	nach EN 10025-4	typ. Analyse
C	≤ 0,20	0,17	≤ 0,16	0,08
Si	≤ 0,60	0,45	≤ 0,60	0,46
Mn	≤ 1,70	1,65	≤ 1,70	1,64
P	≤ 0,025	0,015	≤ 0,025	0,012
S	≤ 0,020	0,010	≤ 0,020	0,005
Nb	≤ 0,05	-	≤ 0,05	0,02
V	≤ 0,20	0,17	≤ 0,12	-
Mo	≤ 0,10	-	≤ 0,20	-
Cu	≤ 0,55	-	≤ 0,55	0,17
Ni	≤ 0,80	0,29	≤ 0,80	0,20
$CE$	≤ 0,53	<b>0,50</b>	≤ 0,47	<b>0,39</b>
$PCM$		0,29		0,20
$CET$		0,34		0,25

Es zeigt sich, dass das Kohlenstoffäquivalent  $CET$ , das zur Berechnung der Vorwärmtemperatur nach Gleichung (3.1) benötigt wird, bei den TM-Stählen fast 0,1 % tiefer liegt als bei den entsprechenden normalgeglühten Stahlsorten der gleichen Festigkeitsstufe. Weiterhin wird deutlich, dass sich thermomechanisch gewalzte Baustähle durch eine hervorragende Schweißbarkeit von den allgemeinen Baustählen, insbesondere von den normalgeglühten

oder normalisierend gewalzten Stahlsorten abheben. Der Grund dafür liegt in den niedrigen Gehalten an Kohlenstoff und anderen Legierungs- und Begleitelementen, die sich in sehr geringen Werten für das Kohlenstoffäquivalent widerspiegeln [74].

### 3.6 Streckenenergie

Eine der wichtigsten Größen, durch die die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  (siehe Kapitel 3.8) und somit das Gefüge und die Eigenschaften der Schweißverbindung entscheidend beeinflusst werden können, ist die Streckenenergie  $E$ , die beim Schweißen direkt gelenkt werden kann. Nach Gleichung (3.8) hängt die Streckenenergie  $E$  bzw. die Wärme, die durch den brennenden Lichtbogen eingebracht wird, von der Spannung  $U$ , der Stromstärke  $I$  und der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  ab. Mit zunehmender Stromstärke  $I$  und Spannung  $U$  vergrößert sich die Streckenenergie  $E$ . Demzufolge befindet sich mehr Wärme im Bauteil und die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  nimmt zu. Zusätzlich ist die Streckenenergie  $E$  vom Schweißverfahren, dem Drahtvorschub, der Lichtbogenlänge und von der Art des Schutzgases abhängig [94].

$$E = \frac{U \cdot I}{v_s} \cdot \left( \frac{60}{10\,000} \right) \text{ [kJ/mm]} \quad (3.8)$$

mit

$U$	Elektrische Spannung	[V]
$I$	Stromstärke	[A]
$v_s$	Schweißgeschwindigkeit	[cm/min]

Häufig empfehlen Stahlhersteller bereits in den Werkstoffblättern in einem vorgegebenen Bereich der Streckenenergie zu schweißen, um gute mechanische Eigenschaften in der Wärmeeinflusszone zu erreichen, da wie beschrieben, zu niedrige oder zu hohe Abkühlzeiten zu negativen mechanischen Eigenschaften führen können. Diese empfohlenen Werte der Streckenenergie ändern sich je nach Verfahren und äußeren Einflüssen. Beispielsweise sind bei hohen Arbeitstemperaturen und gleicher Blechdicke niedrigere Streckenenergien empfohlen. Diese hohen Arbeitstemperaturen können z. B. beim Mehrlagenschweißen auftreten. Die Auswirkungen der Streckenenergie  $E$  auf die Schweißverbindung sind in Tab. 3-5 nochmals übersichtlich zusammengefasst.

Tab. 3-5 Auswirkungen der Streckenenergie  $E$  auf die Schweißverbindung

Streckenenergie $E$	Auswirkung
Reduzierte Streckenenergie $E$	Höhere Zähigkeit Höhere Festigkeit Geringere Verformung Schmalere WEZ
Erhöhte Streckenenergie $E$	Höhere Produktivität für herkömmliche Schweißverfahren

### 3.7 Wärmeeinbringung

Da die Wirkung der verschiedenen Schweißverfahren und die verwendeten Schutzgase mit unterschiedlicher Leitfähigkeit ebenfalls einen Einfluss auf die eingebrachte Energie haben, müssen diese durch einen Faktor  $k$  berechnet werden. Die tatsächliche Wärmeeinbringung  $Q$  macht so wesentlich bessere Aussagen über die wirklich vorhandenen Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung. Dieser zusätzliche Einfluss geht über den vom Schweißverfahren abhängigen thermischen Wirkungsgrad  $k$  in die Gleichung der Wärmeeinbringung  $Q$  ein. Ausgedrückt wird die Wärmeeinbringung  $Q$  durch Gleichung (3.9).

$$Q = k \cdot E = k \cdot \frac{U \cdot I}{v_s} \cdot \left( \frac{60}{10\,000} \right) \text{ [kJ/mm]} \quad (3.9)$$

mit

$U$	Elektrische Spannung	[V]
$I$	Stromstärke	[A]
$v_s$	Schweißgeschwindigkeit	[cm/min]
$k$	Thermischer Wirkungsgrad	[-]

In Tab. 3-6 sind die jeweiligen Werte des thermischen Wirkungsgrads  $k$  in Abhängigkeit des Schweißverfahrens aufgelistet.

Tab. 3-6: Thermischer Wirkungsgrad  $k$  in Bezug zu verschiedenen Schweißverfahren [109]

Schweißverfahren	Thermischer Wirkungsgrad $k$
Unterpulverschweißen	1,0
Lichtbogenhandschweißen, rutilumhüllte Stabelektrode	0,9
Lichtbogenhandschweißen, basisch umhüllte Stabelektrode	0,8
Metall-Aktivgasschweißen (MAG) mit Kohlendioxid	0,8 - 0,9
Metall-Inertgasschweißen (MIG) mit Argon bzw. Helium	0,7 - 0,8
Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) mit Argon bzw. Helium	0,6 - 0,7

Die Streckenenergie  $E$  und somit auch die Wärmeeinbringung  $Q$  können beim Schweißen am wirksamsten direkt über den Drahtvorschub geregelt werden. Hierbei hängt der Drahtvorschub bspw. beim MAG-Schweißen mit der Strom- und Abschmelzleistung und der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  zusammen. Wird der Drahtvorschub erhöht, muss zwangsläufig auch gleichzeitig der Strom  $I$  erhöht werden, wodurch die Abschmelzleistung ansteigt. Es wird also mehr Wärme in das Bauteil eingeleitet, wenn der Drahtvorschub gesteigert wird. Ist die Schweißgeschwindigkeit gering, gleitet der Lichtbogen nur sehr langsam über die Naht. Es dringt, bezogen auf die überstrichene Fläche, mehr Energie in die zu verschweißenden Werkstoffe ein als bei einer schnelleren Schweißgeschwindigkeit. Umso höher also die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$ , desto niedriger die Wärmeeinbringung  $Q$ , was auch anhand der Gleichung (3.9) abzulesen ist.

Die Wärmeeinbringung ist in der Praxis einigen Grenzen unterlegen, um Lichtbogeninstabilitäten, Schweißspritzer und andere Nahtunregelmäßigkeiten zu vermeiden. Da die Wärmeeinbringung  $Q$  unmittelbar die Abkühlgeschwindigkeit beeinflusst und diese sich wiederum auf das Gefüge und dessen Eigenschaften auswirkt, kann letztendlich auch über die Wärmeeinbringung die Härte beeinflusst werden [94].

### 3.8 Abkühlzeit

Die mechanischen Eigenschaften einer Schweißverbindung werden größtenteils durch die Temperaturzyklen (Temperatur-Zeit-Verlauf) während des Schweißens beeinflusst. Die Temperaturzyklen ihrerseits sind stark von den Schweißparametern abhängig. Da die Abkühlgeschwindigkeit gerade in Bezug auf die entstehende Härte von besonderem Interesse ist, hat sich ein bestimmter Temperaturbereich während der Abkühlung als sehr nützlich erwiesen. Zur Kennzeichnung des Temperatur-Zeit-Verlaufs wählt man im Allgemeinen die sogenannte Abkühlzeit  $t_{8/5}$ . Dieser  $t_{8/5}$ -Wert ist definiert als die Zeit, die während des Abkühlens einer Schweißraupe und ihrer Wärmeeinflusszone zum Durchlaufen des Temperaturbereiches von 800 °C bis 500 °C benötigt wird (vgl. Abb. 3-5) [94]. In der Schweißtechnik hat sich die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  als einer der wichtigsten Größen zur Beschreibung der Abkühlung bewährt und wird deshalb als charakteristischer Kennwert verwendet.

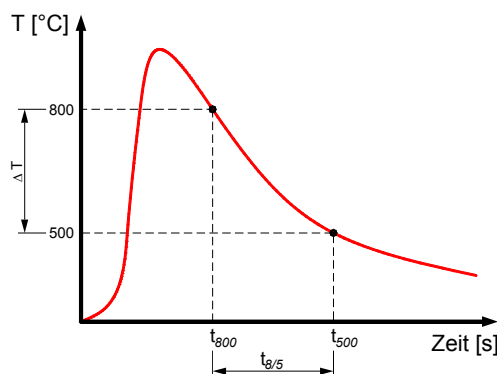


Abb. 3-5: Definition der Abkühlzeit  $t_{8/5}$

Anhand der  $t_{8/5}$ -Zeit können in der Theorie und Praxis entscheidende Aussagen über die metallurgischen Eigenschaften einer Schweißnahtverbindung getroffen werden. Im Gegensatz zu üblichen Wärmebehandlungen sind die Abkühlzeiten beim Schweißen extrem gering, so dass auch die Diffusionszeit, in der der Kohlenstoff das Eisengitter verlassen kann, stark abnimmt. Entsprechend der Geschwindigkeit des Abkühlens stellen sich in der Wärmeeinflusszone die unterschiedlichen Gefügeformen ein.

Kühlt die Schweißnaht zu schnell ab, bildet sich vermehrt Martensit. Dies führt zu einer hohen Festigkeit, extremer Härte und Zähigkeitsverlusten. Aufgrund einer langsameren Abkühlung bilden sich Ferrit- und Perlitanteile, die einen Festigkeitsverlust und eine geringere Härte, jedoch bessere Zähigkeitseigenschaften zur Folge haben.

Aus Abb. 3-6 wird ersichtlich, dass sich die chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffs und die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  auf die mechanischen Eigenschaften der Wärmeeinflusszone auswirken. Die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  als zentrale Kenngröße ist wiederum vom Schweißprozess, den Schweißparametern  $U, I, v_s$ , der Vorwärmtemperatur  $T_p$  und der Nahtgeometrie  $F_2$  oder  $F_3$  abhängig.

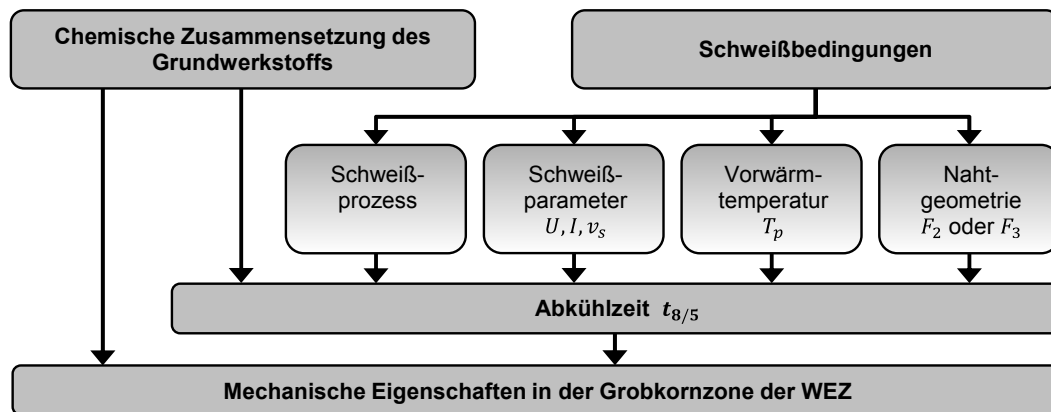


Abb. 3-6: Einfluss der Schweißbedingungen auf die mechanischen Eigenschaften in der WEZ

Diese Zusammenfassung der verfahrenstechnischen Einflussgrößen zu einer zentralen Kenngröße, wie der Abkühlzeit  $t_{8/5}$ , erleichtert wesentlich die Darstellung des komplexen Zusammenhangs zwischen den Schweißbedingungen und den Eigenschaften der Schweißnaht, jedoch muss zwischen zwei- und dreidimensionaler Wärmeableitung  $F_2$  oder  $F_3$  unterschieden werden. Die Einteilung, ob es sich um eine zwei- oder dreidimensionale Wärmeableitung handelt, ist oftmals schwer zu definieren, da nicht nur Bauteildicke sondern auch die Lage der Naht einen Einfluss auf die Wärmeableitung hat.

In Abb. 3-7 ist beispielhaft ein zweidimensionaler Wärmefluss dargestellt. Die Wärme fließt hier nur in Blechlängsrichtung und Blechbreite ab und tritt vor allem bei Schweißverbindungen von dünnen Blechen auf. Ein dreidimensionaler Wärmefluss, wie in Abb. 3-8, tritt bei Blechen mit großer Dicke auf. Die Wärme fließt dabei in alle drei Richtungen, eben zusätzlich in Blechdickenrichtung, ab.

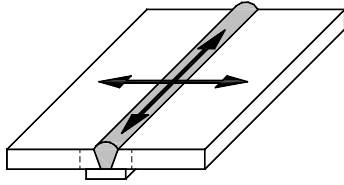


Abb. 3-7: Zweidimensionaler Wärmefluss nach [94]

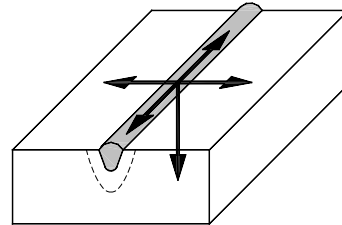


Abb. 3-8: Dreidimensionaler Wärmefluss nach [94]

Wenn die Wärmeableitung dreidimensional erfolgt und die Abkühlzeit von der Werkstückdicke unabhängig ist, wird für die Berechnung von unlegierten und niedriglegierten Stählen unter Verwendung des geeigneten Formfaktors  $F_3$  nach Tab. 3-7 näherungsweise die Gleichung (3.10) angewendet.

Für **dreidimensionale Wärmeableitung** gilt:

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot T_p) \cdot Q \cdot \left( \frac{1}{500 - T_p} - \frac{1}{800 - T_p} \right) \cdot F_3 \quad [\text{s}] \quad (3.10)$$

Wenn die Wärmeableitung zweidimensional erfolgt, d. h. dass die Abkühlzeit von der Werkstoffdicke abhängig ist, wird zur Ermittlung von unlegierten und niedriglegierten Stählen unter Verwendung des geeigneten Formfaktors  $F_2$  nach Tab. 3-7 die Gleichung (3.11) verwendet.

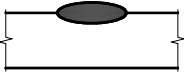

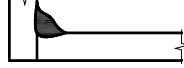

Für **zweidimensionale Wärmeableitung** gilt:

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 \cdot T_p) \cdot 10^5 \cdot \frac{Q^2}{d^2} \cdot \left[ \left( \frac{1}{500 - T_p} \right)^2 - \left( \frac{1}{800 - T_p} \right)^2 \right] \cdot F_2 \quad [\text{s}] \quad (3.11)$$

wobei für Gleichung (3.10) und (3.11) gilt:

$Q$	Wärmeeinbringung nach Gleichung (3.9)	[kJ/mm]
$T_p$	Vorwärm- oder Zwischenlagentemperatur nach Gleichung (3.1)	[°C]
$d$	Bauteildicke	[mm]
$F_3, F_2$	Formfaktor nach Tab. 3-7	[-]

Tab. 3-7: Formfaktor  $F_2$  und  $F_3$  zur Berücksichtigung des Einflusses der Schweißnahtform auf die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  [3]

Schweißnahtformat	Formfaktor	
	$F_2$ zweidimensionale Wärmeableitung	$F_3$ dreidimensionale Wärmeableitung
Schweißraupe auf Blech 	1,0	1,0
Zwischen Schweißraupen in Stumpfnah 	0,9	0,9
Einlagige Kehlnah an einem Eckstoß 	0,9 bis 0,67	0,67
Einlagige Kehlnah an einem T-Stoß 	0,45 bis 0,67	0,67

Die Blechdicke beim Übergang von drei- zu zweidimensionaler Wärmeableitung bezeichnet man als Übergangsblechdicke  $d_t$ . Durch Gleichsetzen der Gleichungen (3.10) und (3.11) zur Berechnung der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  für drei- und zweidimensionale Wärmeableitung ergibt sich die Gleichung für die Berechnung der Übergangsblechdicke  $d_t$  zu:

$$d_t = \sqrt{(4300 - 4,3 \cdot T_p) \cdot \frac{10^5}{(6700 - 5 \cdot T_p)} \cdot Q \cdot \left( \frac{1}{500 - T_p} + \frac{1}{800 - T_p} \right)} \quad [mm] \quad (3.12)$$

mit

$Q$	Wärmeeinbringung nach Gleichung (3.9)	[kJ/mm]
$T_p$	Vorwärm- oder Zwischenlagentemperatur nach Gleichung (3.1)	[°C]

Liegt die vorhandene Bauteildicke  $d$  oberhalb der Übergangsblechdicke  $d_t$  findet in der Naht eine dreidimensionale Wärmeableitung statt und umgekehrt.

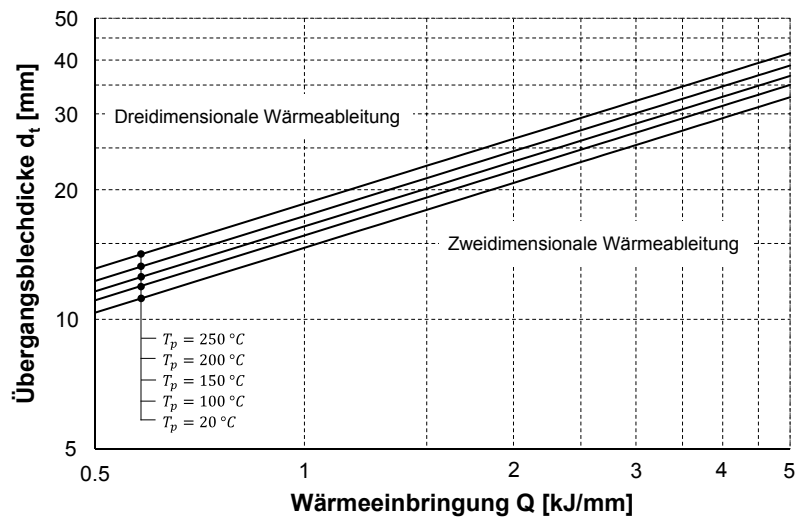


Abb. 3-9: Übergangsblechdicke  $d_t$  in Abhängigkeit der Wärmeeinbringung  $Q$  und der Vorwärmtemperatur  $T_p$  nach [3]

Abb. 3-9 stellt den Zusammenhang zwischen der Übergangsblechdicke  $d_t$ , der Wärmeeinbringung  $Q$  und der Vorwärmtemperatur  $T_p$  für alle Arten von Schweißungen und Schweißprozessen dar. Anhand dieses Diagramms lässt sich ablesen, ob die Wärmeableitung zwei- oder dreidimensional für eine bestimmte Kombination aus Werkstückdicke  $d$ , Wärmeeinbringung  $Q$  und Vorwärmtemperatur  $T_p$  erfolgt.

### 3.9 Arbeitsfeld/Einflüsse und deren Auswirkung

Um die gewünschten Eigenschaften einer Schweißnaht, das bedeutet eine ausreichende Tragfähigkeit aber auch eine nicht zu hohe Härte und eine nicht zu niedrige Zähigkeit, zu erreichen, müssen diese durch die Parameter Abkühlzeit  $t_{8/5}$ , Vorwärmtemperatur  $T_p$  und Wärmeeinbringung  $Q$  beschränkt werden. Es entsteht ein charakteristisches Arbeitsfeld, das den gewünschten Anforderungen gerecht wird und somit zu einer Optimierung der Schweißbedingungen und zu einer wirtschaftlicheren Fertigung beiträgt. Innerhalb dieses Arbeitsfeldes sollte die Wärmeeinbringung  $Q$  und die Vorwärmtemperatur  $T_p$  liegen.

Abb. 3-10 zeigt exemplarisch ein Arbeitsfenster einer Verbindung gleicher Grundwerkstoffe (S690 QL) mit einem Schweißzusatzwerkstoff der Güte G69. Je nach Stahlsorte und Schweißzusatzwerkstoff muss eine bestimmte Spanne der Abkühlzeit eingehalten werden, um eine ausreichende Zähigkeit in der Wärmeeinflusszone zu gewährleisten. Für die Bestimmung der oberen und unteren Begrenzung des Arbeitsfeldes werden die Gleichungen (3.10) und (3.11) nach der Wärmeeinbringung  $Q$  in Abhängigkeit der Vorwärmtemperatur  $T_p$  und der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  umgestellt.



Für eine gegebene Geometrie (bekannte Bauteildicke  $d$  und bekannter Formfaktor  $F_2$  oder  $F_3$ , vgl. Tab. 3-7) lässt sich für die vom Hersteller empfohlenen Bereiche der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  die erforderliche Wärmeeinbringung  $Q$  in Abhängigkeit der Vorwärmtemperatur  $T_p$  ermittelt. Für das Beispiel in Abb. 3-10 wurde eine zulässige Spanne der Abkühlzeit von  $t_{8/5} = 5 \text{ s}$  bis  $t_{8/5} = 15 \text{ s}$  gewählt.

Für **zweidimensionale Wärmeableitung** ergibt sich aus Gleichung (3.11):

$$Q(T_p) = \sqrt{\frac{t_{8/5} \cdot d^2}{(4300 - 4,3 \cdot T_p) \cdot 10^5 \cdot F_2 \cdot \left[ \left( \frac{1}{500 - T_p} \right)^2 - \left( \frac{1}{800 - T_p} \right)^2 \right]}} \quad [\text{kJ/mm}] \quad (3.13)$$

Für **dreidimensionale Wärmeableitung** ergibt sich aus Gleichung (3.10):

$$Q(T_p) = \frac{t_{8/5}}{(6700 - 5 \cdot T_p) \cdot F_3 \cdot \left( \frac{1}{500 - T_p} - \frac{1}{800 - T_p} \right)} \quad [\text{kJ/mm}] \quad (3.14)$$

Somit ergibt sich je eine lineare Gleichung für die obere und untere Grenze des Arbeitsfensters. Für die Berechnung der Wärmeeinbringung  $Q$  in Abhängigkeit der Vorwärmtemperatur  $T_p$  wird zur Bestimmung der Mindestvorwärmtemperatur zur Vermeidung von Kaltrissen Gleichung (3.1) umgestellt. Hieraus ergibt sich der linke Rand des Arbeitsfensters als Grenzlinie zur Vermeidung der Bildung von Kaltrissen.

$$Q(T_p) = \frac{T_p + 328 - 697 \cdot CET - 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 62 \cdot HD^{0,35}}{(53 \cdot CET - 32)} \quad [\text{kJ/mm}] \quad (3.15)$$

Der rechte Rand ergibt sich aus der vom Hersteller vorgeschriebenen maximalen Vorwärmtemperatur  $T_p$ . Innerhalb der durch die vier Ränder begrenzten Fläche müssen die für die Schweißnahterstellung gewählten Parameter für Wärmeeinbringung  $Q$  und Vorwärmtemperatur  $T_p$  liegen. Der Arbeitspunkt definiert die vorhandene Wärmeeinbringung  $Q$  und die vorhandene Vorwärmtemperatur  $T_p$ .

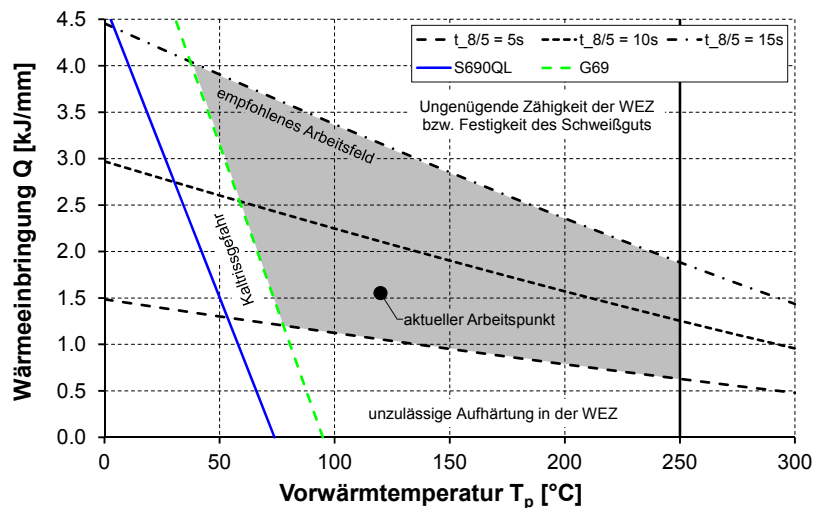


Abb. 3-10: Arbeitsfenster zur möglichen Parameterwahl beim Schweißen einer Stahlgüte S690 QL mit einem Schweißzusatzwerkstoff G69

Abb. 3-10 verdeutlicht anschaulich, dass für eine Änderung des Arbeitspunktes im Arbeitsfenster, die Vorwärmtemperatur  $T_p$  (Abszisse) und/oder die Wärmeeinbringung  $Q$  (Ordinate) geändert werden muss. Beide Parameter beeinflussen die Abkühlbedingungen. Anhand Gleichung (3.9) lässt sich erkennen, dass die Wärmeeinbringung  $Q$  durch die Schweißparameter Strom  $I$ , Spannung  $U$  und Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  definiert ist. Bei einer Variation der Streckenenergie  $E$ , vor allem aber der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$ , ändert sich vorrangig die Nahtdicke  $a$ . Eine hohe Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  führt zu einer geringen Nahtdicke und eine geringe Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  zu einer größeren Nahtdicke. Weitere, teils umfangreiche Empfehlungen zum Schweißen im Hinblick auf die Abkühlbedingungen sind in DIN EN 1011-2 [3] oder dem Stahleisenwerkstoffblatt SEW 088 [41] gegeben. Darin wird ein Konzept beschrieben, das eine kontrollierte Wärmeführung beim Schweißen vorsieht, so dass die Abkühlung nicht zu langsam stattfindet, um eine Auflösung der kornfeinenden Bestandteile und eine damit einhergehende Grobkornbildung zu vermeiden.

### 3.10 Zusammenfassung

Zusammengefasst kann aus den in diesem Kapitel beschriebenen Informationen gefolgert werden, dass durch Parameter wie die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$ , die Stromstärke  $I$ , die Spannung  $U$  und durch das Schweißverfahren die Wärmeeinbringung  $Q$  beeinflusst werden kann. Davon hängt wiederum die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  ab, da diese bei höherer Wärmeeinbringung  $Q$  einen höheren Wert annimmt, als bei einer geringeren Wärmeeinbringung  $Q$ . Schlussendlich wirkt sich die Länge der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  auf den Martensitgehalt und somit auch auf die Härte aus. Wie diese Parameter und Eigenschaften der Schweißnaht zueinander in Beziehung stehen, wird in Abb. 3-11 dargestellt.



Abb. 3-11: Wechselbeziehung zwischen Schweißparametern und Eigenschaften der Schweißnaht

So zeigt sich, dass auf eine hohe Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  eine niedrige Wärmeeinbringung  $Q$ , eine geringe Abkühlzeit  $t_{8/5}$ , jedoch aber ein hoher Martensitgehalt und demzufolge eine hohe Härte folgen. Die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  stellt hier den regulierbaren Parameter dar, durch den das Maß der Wärmeeinbringung  $Q$  und die Länge der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  beeinflusst werden, die sich letztendlich auf das Gefüge und die Eigenschaften (Martensitgehalt und Härte) der Schweißnaht auswirken.



## 4 Bemessungskonzepte von geschweißten Kehlnahtverbindungen

### 4.1 Allgemeines

Der Schwerpunkt der experimentellen und analytischen Untersuchungen liegt in dieser Arbeit auf geschweißten Flankenkehlnahtverbindungen. Dementsprechend werden in diesem Kapitel die derzeit gültigen europäischen Bemessungsregeln zur Ermittlung der normativen Tragfähigkeit von geschweißten Kehlnahtverbindungen nach DIN EN 1993-1-8 [9] vorgestellt und deren Besonderheiten thematisiert.

### 4.2 Geometrische Angaben

#### 4.2.1 Wirksame Nahtdicke

Gemäß DIN EN 1993-1-8 [9] ist die wirksame Nahtdicke  $a$  einer Kehlnaht definiert als die bis zum theoretischen Wurzelpunkt gemessene Höhe des einschreibbaren (gleichschenkligen oder nicht gleichschenkligen) Dreiecks. Dabei ergibt sich der theoretische Wurzelpunkt als Verlängerung der Außenkanten (vgl. Abb. 4-1 a)).

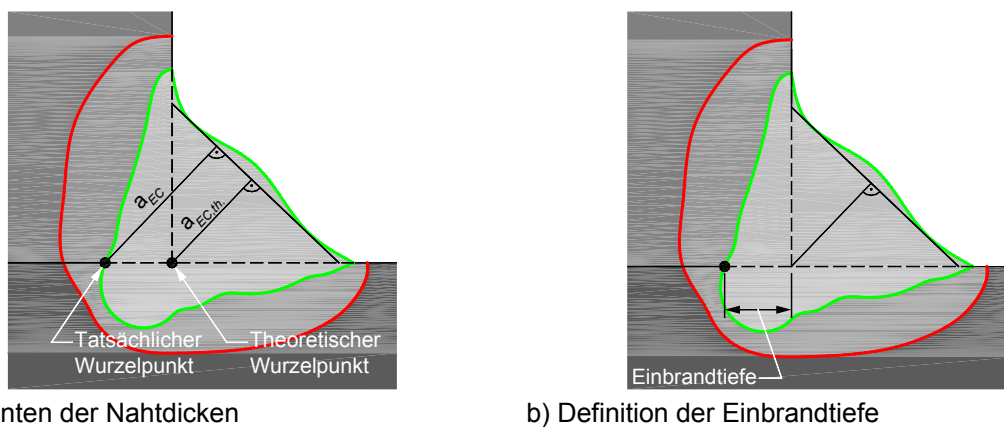


Abb. 4-1: Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8 [9]

Sofern eine Verfahrensprüfung durchgeführt und der über den theoretischen Wurzelpunkt hinausgehende Einbrand nachgewiesen wird, darf bei der Bestimmung der Beanspruchbarkeit einer Kehlnaht eine vergrößerte Nahtdicke berücksichtigt werden. Mit dem Einbrand wird die Tiefe des aufgeschmolzenen Bereichs des Grundwerkstoffs bezeichnet (vgl. Abb. 4-1 b)). Somit vergrößert sich bei Berücksichtigung des Einbrandes die Nahtfläche, die durch den aufgeschmolzenen Schweißzusatzwerkstoff entsteht. Ergänzend wird in DIN EN 1993-1-8 [9] Abschnitt 4.5.2 (2) eine Mindestkehlnahtdicke von 3 mm als untere Grenze gefordert.

Für Flacherzeugnisse und offene Profile mit Querschnittsteilen, deren Dicke mindestens 3 mm beträgt, befindet sich im Nationalen Anhang DIN EN 1993-1-8/NA [10] eine Begrenzung der minimalen Kehlnahtdicke  $a$  in Abhängigkeit von der maximalen Dicke  $\max t$  des Grundwerkstoffs.

$$a \geq \sqrt{\max t} - 0,5 \text{ [mm]} \quad (4.1)$$

mit

$a$	Wirksame Nahtdicke nach Abb. 4-1	[mm]
$t$	Querschnittsdicke, siehe Abb. 4-2	[mm]

Die geforderte Mindestnahtdicke nach Gleichung (4.1) soll sicherstellen, dass die zu verschweißenden Bauteile im Bereich der Schweißnaht ausreichend aufgeschmolzen werden und eine kraftschlüssige Verbindung der Bauteile durch die Schweißnaht gegeben ist. Sofern dies auch durch die Wahl geeigneter Schweißparameter sichergestellt werden kann, darf von der geforderten Mindestnahtdicke abgewichen werden. Jedoch darf dabei nach DIN EN 1993-1-8 [9] Abschnitt 4.5.2 (2) die geregelte Mindestnahtdicke für Kehlnähte nicht unterschritten werden. Zusätzlich darf nach DIN EN 1993-1-8/NA [10] auf die Einhaltung der Gleichung (4.1) in Abhängigkeit von den gewählten Schweißbedingungen verzichtet werden, jedoch sollte für die Blechdicken  $t \geq 30 \text{ mm}$  die Schweißnahtdicke mit  $a \geq 5 \text{ mm}$  gewählt werden [90].

#### 4.2.2 Schweißnahtlänge

Nach DIN EN 1993-1-8 [9] ist als wirksame Länge  $l_{eff}$  einer Kehlnaht die Gesamtlänge zu berücksichtigen, in der die volle Kehlnahtdicke  $a$  vorliegt (vgl. Abb. 4-2). Hierfür kann die tatsächliche Länge der Schweißnaht abzüglich des zweifachen Betrags der wirksamen Kehlnahtdicke  $a$  angesetzt werden.

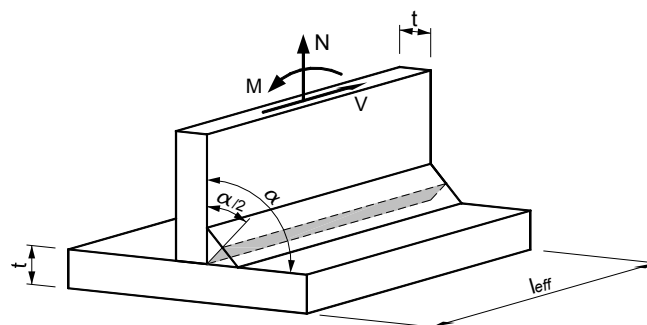


Abb. 4-2: Definition der wirksamen Schweißnahtlänge  $l_{eff}$

Sofern eine Kehlnaht über die gesamte Länge einschließlich der Nahtenden mit voller Nahtdicke ohne unzulässige Unregelmäßigkeiten ausgeführt ist, braucht keine Abminderung der wirksamen Länge durchgeführt werden. DIN EN 1993-1-8 [9] fordert in Abschnitt 4.5.1 (2), dass für die Übertragung von Kräften nur solche Kehlnähte in Betracht gezogen werden sollten, deren wirksame Länge nicht kleiner als das 6-fache der Nahtdicke ist und mindestens 30 mm beträgt [90].

### 4.3 Tragfähigkeit von Kehlnähten nach DIN EN 1993-1-8

#### 4.3.1 Allgemeines

Für den Nachweis der Tragfähigkeit von Kehlnähten können nach DIN EN 1993-1-8 [9] zwei alternative Verfahren angewendet werden: Das *vereinfachte Verfahren* und das *richtungsbezogene Verfahren*, die in den nachfolgenden Kapiteln 4.3.2 und 4.3.3 beschrieben werden. In beiden Verfahren wird - wie auch bei Schraubverbindungen - der Nachweise einheitlich auf dem Niveau der Zugfestigkeiten  $f_u$  der verbundenen Bauteile geführt. Dies ist insofern angemessen, dass die mit der Überschreitung der Streckgrenze einhergehenden lokalen plastischen Verformungen in den Schweißnähten für das Verformungsverhalten des Gesamttragwerks für gewöhnlich vernachlässigbar sind. Bereits an dieser Stelle sei angemerkt, dass in der Handhabung das richtungsbezogene Verfahren aufwendiger ist, jedoch i. d. R. zu wirtschaftlicheren Kehlnahtdicken führt.

Was die Wahl der Schweißzusätze anbelangt, werden in DIN EN 1993-1-8 [9] Abschnitt 4.2 (2) strenge Anforderungen dahingehend gestellt, 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 müssen.

Über eine Verfahrensprüfung nach DIN EN ISO 15614-1 [34] kann der hierfür erforderliche Nachweis erfolgen, bei der Prüfungen an Querkzug- und Kerbschlagbiegeproben sowie Härteprüfungen durchgeführt werden. Durch die Einführung der europäisch harmonisierten Produktnorm DIN EN 13479 [24] für Schweißzusätze erfolgte die Zertifizierung und CE-Kennzeichnung der Schweißzusätze nach DIN EN 14532-1 [25]. Demzufolge muss in einer Grundeignungsprüfung mit dem in DIN EN 14532-1 [25] angegebenen Umfang der Nachweis erbracht werden, dass die maßgebenden Werkstoffeigenschaften ( $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ,  $\epsilon_u$ ,  $J_{min}$ ) mit den Anforderungen der spezifischen Produktnorm des Schweißzusatzes (z. B. Drahtelektroden zum Metall- Schutzgasschweißen nach DIN EN ISO 14341 [33]) übereinstimmen.

In der Produktnorm DIN EN 13479 [24] sind keine Festlegungen zur Anwendung hinsichtlich Grundwerkstoff, Hilfsstoffen (z. B. Schutzgas), Schweißposition, etc. getroffen. An dieser Stelle sei auf die Zulassungszertifikate gemäß DIN EN 14532-1 [25] verwiesen. Im Allgemeinen lässt sich festhalten, dass die Wahl von Elektroden mit höherer Güte, als für die verwendeten Stahlsorten erforderlich, zu empfehlen ist [90].

#### 4.3.2 Vereinfachtes Verfahren

Beim vereinfachten Verfahren gilt es entsprechend Gleichung (4.2) nachzuweisen, dass die Resultierende  $F_{w,Ed}$  nach Gleichung (4.3) aller je Längeneinheit auf eine Kehlnaht einwirkenden Kräfte  $N_{\perp,Ed}$ ,  $V_{\perp,Ed}$  und  $V_{\parallel,Ed}$ , die sich aus den Schnittgrößen der angeschlossenen Bauteile ergeben (vgl. Abb. 4-3), nicht den Bemessungswert der Tragfähigkeit der Schweißnaht je Längeneinheit  $F_{w,Rd}$  überschreitet.

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad (4.2)$$

mit

$F_{w,Ed}$  Bemessungswert der auf die wirksame Kehlnahtfläche einwirkenden Kräfte je Längeneinheit [kN/cm]

$F_{w,Rd}$  Bemessungswert der Tragfähigkeit der Schweißnaht je Längeneinheit [kN/cm]

$$F_{w,Ed} = \sqrt{N_{\perp,Ed}^2 + V_{\perp,Ed}^2 + V_{\parallel,Ed}^2} \quad (4.3)$$

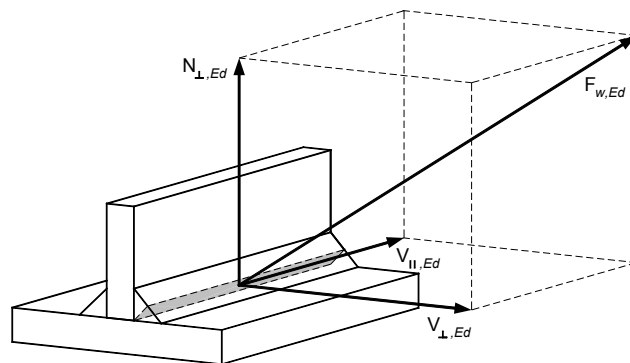


Abb. 4-3: Auf eine Kehlnaht einwirkende Kräfte je Längeneinheit

Die Tragfähigkeit  $F_{w,Rd}$  ist von der Orientierung der wirksamen Kehlnahtfläche zur einwirkenden Kraft  $F_{w,Ed}$  unabhängig. Sie wird als Produkt der Scherfestigkeit  $f_{vw,d}$  und der Nahtdicke  $a$  nach Gleichung (4.4) ermittelt.



$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} \cdot a \quad (4.4)$$

mit

$f_{vw,d}$	Bemessungswert der Scherfestigkeit der Schweißnaht	[N/mm <sup>2</sup> ]
$a$	Nahtdicke	[mm]
$f_u$	Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs des schwächeren der angeschlossenen Bauteile	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\beta_w$	Korrelationsbeiwert nach Tab. 4-1	[-]
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert (hier: 1,25)	[-]

Sofern die Gleichung (4.2) durch die Nahtdicke  $a$  dividiert wird, kann der Nachweis mit dem vereinfachten Verfahren entsprechend Gleichung (4.5) auf Spannungsniveau geführt werden.

$$\sqrt{\sigma_{\perp,Ed}^2 + \tau_{\perp,Ed}^2 + \tau_{\parallel,Ed}^2} \leq f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.5)$$

### 4.3.3 Richtungsbezogenes Verfahren

Beim richtungsbezogenen Verfahren handelt es sich um einen Vergleichsspannungsnachweis in Anlehnung an die Fließbedingung nach *von Mises* entsprechend Gleichung (4.6)

$$\sigma_{v,Ed} \leq \sigma_{u,Rd} \quad (4.6)$$

mit

$\sigma_{v,Ed}$	Vergleichsspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{u,Rd}$	Bemessungsgrenzspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]

Hierfür sind die Spannungen auf eine Bezugsfläche, die in der Winkelhalbierenden der Kehlnaht liegt, zu beziehen (vgl. Abb. 4-1 und Abb. 4-4)

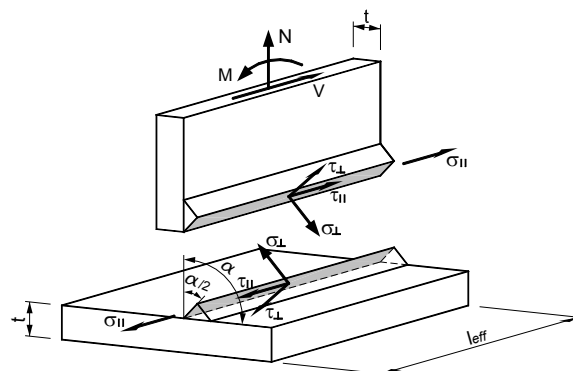


Abb. 4-4: Spannungskomponenten im wirksamen Kehlnahtquerschnitt

Aus den einzelnen Spannungskomponenten ist die Vergleichsspannung  $\sigma_{v,Ed}$  nach Gleichung (4.7) zu bestimmen. Die Schubspannungskomponenten werden in Analogie zur *von Mises* Vergleichsspannung mit dem Faktor 3 gewichtet. Entsprechend dem Background Document 6.05 Part A [45] hat die parallel zur Schweißnahtachse wirkende Normalspannungskomponente  $\sigma_{\parallel}$  keinen signifikanten Einfluss auf die Tragfähigkeit, so dass diese für die Ermittlung der Vergleichsspannung  $\sigma_{v,Ed}$  nicht berücksichtigt wird.

$$\sigma_{v,Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \quad (4.7)$$

mit

$\sigma_{\perp}$	Normalspannung senkrecht zur Schweißnahtachse	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{\perp}$	Schubspannung (in der Ebene der Kehlnahtfläche) senkrecht zur Schweißnahtachse	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{\parallel}$	Schubspannung (in der Ebene der Kehlnahtfläche) parallel zur Schweißnahtachse	[N/mm <sup>2</sup> ]

Die Bemessungsgrenzspannung  $\sigma_{u,Rd}$  der Schweißnahtverbindung berechnet sich nach Gleichung (4.8).

$$\sigma_{u,Rd} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.8)$$

mit

$f_u$	Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs des schwächeren der angeschlossenen Bauteile	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\beta_w$	Korrelationsbeiwert nach Tab. 4-1	[-]
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert (hier: 1,25)	[-]

Der Tragfähigkeitsnachweis ist als Doppelnachweis mit den Bedingungen gemäß Gleichung (4.9) und (4.10) zu führen. Durch die Nebenbedingung nach Gleichung (4.10) wird die Normalspannungskomponente  $\sigma_{\perp}$  begrenzt.

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.9)$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (4.10)$$

mit

$\sigma_{\perp}$	Normalspannung senkrecht zur Schweißnahtachse	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{\perp}$	Schubspannung (in der Ebene der Kehlnahtfläche) senkrecht zur Schweißnahtachse	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{\parallel}$	Schubspannung (in der Ebene der Kehlnahtfläche) parallel zur Schweißnahtachse	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_u$	Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs des schwächeren der angeschlossenen Bauteile	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\beta_w$	Korrelationsbeiwert nach Tab. 4-1	[-]
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert (hier: 1,25)	[-]

Bei der Ermittlung der Beanspruchbarkeit der Schweißnähte ist unabhängig vom gewählten Nachweisverfahren mit den Korrelationsbeiwerten  $\beta_w$  nach Tab. 4-1 zu rechnen.

Tab. 4-1: Korrelationsbeiwerte  $\beta_w$  für Kehlnähte nach DIN EN 1993-1-8 [9], DIN EN 1993-1-8/NA [10], DIN EN 1993-1-12 [11] und DIN EN 1993-1-12/NA [12]

Norm und Stahlorte			Korrelationsbeiwert	
EN 10025	EN 10210-1	EN 10219-1	EN 10149-2	$\beta_w$
S235 S235 W	S235 H	S235 H		0,80 <sup>(1)</sup>
S275 S275 N/NL S275 M/ML	S275 H S275 NH/NLH	S275 H S275 NH/NLH S275 M/MLH		0,85 <sup>(1)</sup>
S355 S355 N/NL S355 M/ML S355 W	S355 H S355 NH/NLH	S355 H S355 NH/NLH S355 MH/MLH		0,90 <sup>(1)</sup>
S420 N/NL S420 M/ML		S420 MH/MLH		1,00 <sup>(1)</sup> 0,88 <sup>(2)</sup>
S460 N/NL S460 M/ML S460 Q/QL/QL1	S460 NH/NLH	S460 NH/NLH S460 MH/MLH		1,00 <sup>(1)</sup> 0,85 <sup>(2)</sup>
S500 Q/QL/QL1 S550 Q/QL/QL1 S620 Q/QL/QL1 S690 Q/QL/QL1			S500 MC S550 MC S600 MC S650 MC S700 MC	1,00 <sup>(3)</sup> 1,20 <sup>(4)</sup>
<sup>(1)</sup> DIN EN 1993-1-8	4.5.3.2, Tabelle 4.1			
<sup>(2)</sup> DIN EN 1993-1-8/NA	NDP zu 2.2 (2) Anmerkung			
<sup>(3)</sup> DIN EN 1993-1-12	4.5.3.2 (6)			
<sup>(4)</sup> DIN EN 1993-1-12/NA	NCI zu 2.8 (4.5.3.2 (6))			

Entsprechend dem Nationalen Anhang DIN EN 1993-1-8/NA [10] müssen für die beiden Stahlgüten S420 und S460 Korrelationsbeiwerte  $\beta_w \leq 1,0$  (siehe NDP zu Abschnitt 2.2 (2) Anmerkung) angesetzt werden. Für höherfeste Baustähle mit Streckgrenzen über  $f_y > 460 \text{ N/mm}^2$  gilt gemäß dem Nationalen Anhang DIN EN 1993-1-12/NA [12] ein Korrelationsbeiwert von  $\beta_w = 1,2$ .

Sowohl das vereinfachte, als auch das richtungsbezogene Bemessungsverfahren in DIN EN 1993-1-8 [9] für Kehlnahtverbindungen berücksichtigen die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs bislang nicht. In DIN EN 1993-1-8 [9] Abschnitt 4.2 (2) wird explizit verlangt, 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 müssen.“

In DIN EN 1993-1-8 [9] Abschnitt 4.5.3.2 (7) wird darauf verwiesen, dass „bei der Bemessung von Kehlnähten zwischen Bauteilen mit unterschiedlichen Stahlsorten in der Regel die Werkstoffkenngrößen des Bauteils mit der geringeren Festigkeit zu verwenden sind.“

Für höherfeste Baustähle mit Streckgrenzen über  $f_y > 460 \text{ N/mm}^2$  erlaubt DIN EN 1993-1-12 [11], dass die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs zwar geringer als die des verschweißten Grundwerkstoffs sein darf, jedoch wird diese Erlaubnis mit dem Nationalen Anhang DIN EN 1993-1-12/NA [12] rückgängig gemacht (siehe NDP zu 2.8 (4.2(2))). Eine Abstimmung bzw. detaillierte Auslegung der Nahtbemessung auf die tatsächlich vorhandene Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs ist demzufolge für die deutsche Anwendung von DIN EN 1993-1-8 [9] und DIN EN 1993-1-12 [11] möglich.

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts *FOSTA P812* [72] zeigten, dass der vorgegebene Korrelationsbeiwert von  $\beta_w = 1,2$  zu einer konservativen Auslegung von Kehlnähten beiträgt, so dass Rasche in ihrer Dissertation [84] einen Bemessungsansatz entwickelte, der eine wirtschaftlichere Auslegung von Kehlnähten bei höherfesten Baustählen erlaubt (vgl. Kapitel 5.5.3).

#### 4.3.4 Entwicklung des richtungsbezogenen Verfahrens

Für die beiden vorgestellten Verfahren zur Bestimmung der Beanspruchbarkeit von Kehlnähten gemäß DIN EN 1993-1-8 [9] wird der Nachweis einheitlich auf dem Niveau der Zugfestigkeit  $f_u$  geführt. Das Versagen von Kehlnahtanschlüssen kann sowohl in den anschließenden Bauteilen, als auch in der Kehlnaht selbst oder in beiden gleichzeitig auftreten. Für die Bestimmung der Bemessungsmodelle zur Kehlnahttragfähigkeit wurden nur die Versuche mit Kehlnahtversagen berücksichtigt. In Abb. 4-5 ist der qualitative Spannungsverlauf in einem Kehlnahtanschluss dargestellt. In den jeweiligen fiktiven Schnitten (A-B; C-D; C-B) sind deutliche Spannungsspitzen und nichtlineare Spannungsverläufe zu erkennen.

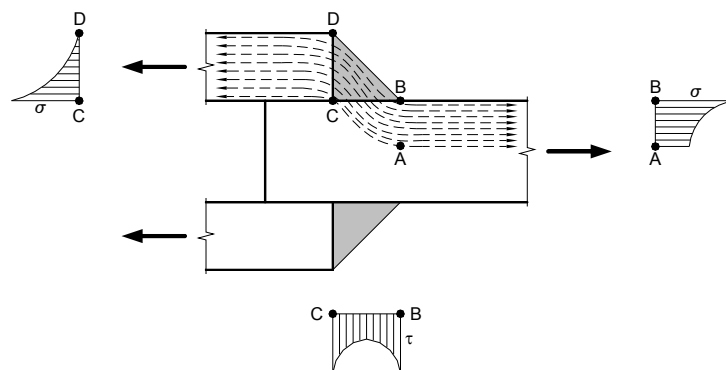


Abb. 4-5: Qualitativer Spannungsverlauf in einem Kehlnahtanschluss nach [45]

Im Gegensatz dazu wird für den rechnerischen Nachweis vereinfacht eine gleichmäßige Spannungsverteilung in der Kehlnahtfläche angenommen. Voraussetzung dafür ist, dass ausreichende Duktilität und Zähigkeit des Materials garantiert werden kann. Entsprechend zugehörige Qualitätsstandards für den Grundwerkstoff, den Schweißzusatzwerkstoff und den Schweißprozess selbst sollen hierfür berücksichtigt werden. Beide in DIN EN 1993-1-8 [9] verankerten Nachweisverfahren wurden mit Versuchsergebnissen überprüft. Da der Fokus in dieser Arbeit auf dem richtungsbezogenen Verfahren liegt, soll im Folgenden auf die Entwicklung dieses Nachweisverfahrens eingegangen werden.

Beim richtungsbezogenen Verfahren werden die Spannungen auf die wirksame Kehlnahtfläche nach Abb. 4-4 bezogen. Die Vergleichsspannung, resultierend aus der Normalspannung  $\sigma_{\perp}$  und den Schubspannungen  $\tau_{\perp}$  und  $\tau_{\parallel}$ , wird der Beanspruchbarkeit der Naht gegenübergestellt. Die Entwicklung dieses Verfahrens geht zurück auf das International Institute of Welding (IIW). Später wurde das Verfahren durch die International Organization for Standardization (ISO) übernommen. Das Nachweisformat wurde auf Grundlage von Untersuchungen an der TNO [100] zu Gleichung (4.11) weiterentwickelt.

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + k \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \beta^* \cdot f_u \quad (4.11)$$

Hierbei berücksichtigt der Faktor  $\beta^*$  den Einfluss des Schweißprozesses, d. h. Elektrodenmaterial, Schweißqualität etc. auf die Festigkeit des Grundwerkstoffs. Mit dem Faktor  $k$  bot die International Organization for Standardization (ISO) den einzelnen Nationen die Möglichkeit zur Festlegung des Sicherheitsfaktors für die Schubfestigkeit. Letztendlich wurde in den einzelnen Normenvorschlägen der Faktor  $k = 3$  gewählt, um für den Kehlnahtnachweis eine Analogie zur Formulierung der *von Mises* Fließbedingung herzustellen. Für den ersten Entwurf von EN 1993 [59] wurde mit den Änderungen  $\beta = 1/\beta^*$  und  $f_u = 1,5 \cdot f_y$  folgende Formulierung gewählt:

$$\beta \cdot \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq 1,5 \cdot f_y \quad (4.12)$$

Unter Berücksichtigung von  $\gamma_M = 1,5$  folgte

$$\beta \cdot \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq f_y \quad (4.13)$$

Im Background Document 6.05 Part A [45] sind die statistischen Auswertungen von Versuchen an Kehlnahtverbindungen aufgeführt. Die meisten Versuche mit den Stahlgüten S235 und S355 wurden an den Versuchskörpergeometrien nach Abb. 4-6 durchgeführt.

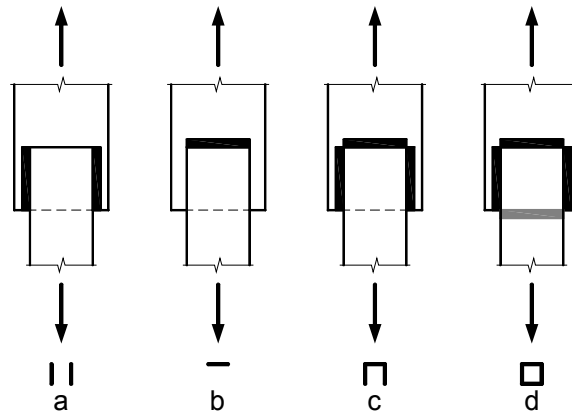


Abb. 4-6: Schweißnahtgeometrie der Versuchskörper nach [45]

Die Sensitivitätsdiagramme in Abb. 4-7 und Abb. 4-8 veranschaulichen in Abhängigkeit der verschiedenen Schweißnahtgeometrien den Quotient aus experimenteller Tragfähigkeit  $r_e$  und Bemessungstragfähigkeit  $r_d$ .

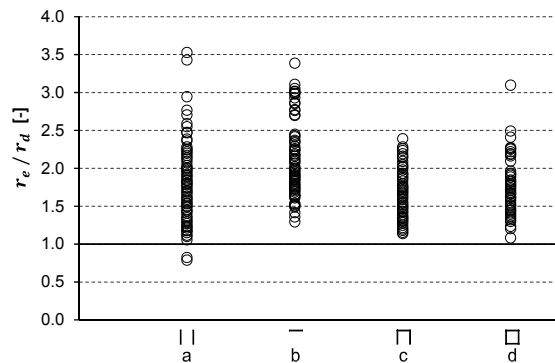


Abb. 4-7: Sensitivitätsdiagramm für Stahlgüte S235 in Abhängigkeit der verschiedenen Schweißnahtgeometrien nach [45]

In Abb. 4-7 ist zu erkennen, dass für die Konfiguration a mit zwei Schweißnähten parallel zur Beanspruchungsrichtung die größte Streuung auftrat. Im Sinne einer zweckmäßigen und praktischen Anwendung wurde eine einheitliche Nachweisfunktion für alle Konfigurationen festgelegt, wodurch die Beanspruchbarkeit der anderen Konfigurationen ein wenig konservativer ausfiel.

Vergleicht man das Sensitivitätsdiagramm für die Stahlgüte S355 in Abb. 4-8 mit dem in Abb. 4-7 ist deutlich zu erkennen, dass zwar die Tendenz gleich ist, jedoch die Standardabweichung für die Stahlgüte S235 (Abb. 4-7) bei einer gleichzeitig ausgeprägteren Streuung größer ist. Bei der Festlegung der Bemessungswerte bezogen auf die jeweilige Zugfestigkeit des Materials führt dies zu einer leicht größeren Beanspruchbarkeit bei der Stahlgüte S235.

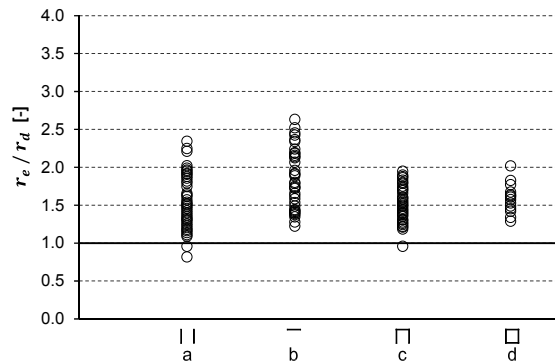


Abb. 4-8: Sensitivitätsdiagramm für Stahlgüte S355 in Abhängigkeit der verschiedenen Schweißnahtgeometrien nach [45]

Die statistische Auswertung ergab unter Berücksichtigung des Nachweises gegen die Zugfestigkeit  $f_u$  und der Angabe des Teilsicherheitsbeiwerts  $\gamma_{M2} = 1,25$  folgendes Nachweisformat:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.14)$$

Mit den beiden von der Stahlgüte abhängigen Anpassungswerten  $\beta_w$  (Tab. 4-2).

Tab. 4-2: Anpassungswerte  $\beta_w$  nach Background Document 6.05 Part A [45]

Stahlgüte	Anpassungswert $\beta_w$
S235	0,74
S355	0,77

Der relativ geringe Unterschied in den Anpassungswerten  $\beta_w$  für S235 und S355 wird im Background Document 6.05 Part A [45] anhand von zwei Einflüssen erklärt: Beim Schweißen der Versuchskörper wurden für beide Stahlgüten die gleiche Elektrode und somit der gleiche Schweißzusatzwerkstoff verwendet. Tatsächlich wird die Tragfähigkeit der Schweißnaht sowohl durch die Festigkeiten des Grundwerkstoffs  $f_{u,GW}$  als auch durch die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs  $f_{u,SZW}$  beeinflusst. Demzufolge ist der Quotient  $f_{u,SZW}/f_{u,GW}$  für S235 wesentlich größer als für S355, bei gleichem Schweißzusatzwerkstoff. Gleichzeitig ist aber die Standardabweichung aus der Versuchsauswertung für die Stahlgüte S235 größer. Letztendlich führen beide Einflüsse nur zu einer geringfügig höheren Beanspruchbarkeit der Schweißnaht bei S235.

Über die Schweißnahtqualität wurden in der Versuchsdokumentation [45] keine Angaben gemacht. So konnten abschließend auf Grundlage einer begrenzt untersuchten Anzahl an möglichen Schweißnahtkonfigurationen die vorhandenen Mittelwertabweichungen und Streuungen der Bemessungsmodelle als nicht repräsentativ für die in der Praxis auftretende Ausführungsqualität gewertet werden. Infolgedessen wurden die Anpassungswerte  $\beta_w$  gemäß Tab. 4-3 angehoben [102]:

Tab. 4-3: Angehobene Anpassungswerte  $\beta_w$  nach Background Document 6.05 Part A [45]

Stahlgüte	Anpassungswert $\beta_w$
S235	0,80
S355	0,90

#### 4.3.5 Tragverhalten einer Flanken- und Stirnkehlnahtverbindung

Eine *Flankenkehlnahtbeanspruchung* ist dadurch charakterisiert, dass nur eine Kraft  $F_{\parallel}$  bzw.  $V$  (vgl. Abb. 4-4) parallel zur Nahtlängsachse am Bauteil angreift. Diese Kraft erzeugt unabhängig vom Nahtöffnungswinkel  $\alpha$  nur Schubspannungen  $\tau_{\parallel}$  parallel zur Nahtlängsachse (siehe Gleichung (4.15)).

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_{\parallel}}{a \cdot l_{eff}} ; \tau_{\perp} = 0 ; \sigma_{\perp} = 0 \quad (4.15)$$

Damit folgt aus Gleichung (4.9) die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  zu:

$$\sigma_v = \sqrt{3 \cdot \tau_{\parallel}^2} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \Rightarrow \frac{F_{\parallel}}{a \cdot l_{eff}} \leq \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.16)$$

Im Gegensatz dazu ist eine *Stirnkehlnahtbeanspruchung* durch eine Kraft  $F_{\perp}$  bzw.  $N$  (vgl. Abb. 4-4) rechtwinklig zur Nahtlängsachse (Stirnkehlnaht) gekennzeichnet, die Normalspannungen  $\sigma_{\perp}$  und Schubspannungen  $\tau_{\perp}$  senkrecht zur Schweißnahtachse bewirkt. Diese beiden Spannungskomponenten berechnen sich entsprechend Gleichung (4.17).

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{\perp} \cdot \sin(\alpha/2)}{a \cdot l_{eff}} ; \tau_{\perp} = \frac{F_{\perp} \cdot \cos(\alpha/2)}{a \cdot l_{eff}} ; \tau_{\parallel} = 0 \quad (4.17)$$

Die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  ermittelt sich demnach zu:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\perp}^2} = \frac{F_{\perp}}{a \cdot l_{eff}} \cdot \sqrt{2 + \cos \alpha} \quad (4.18)$$



Der Doppelnachweis nach der Gleichung (4.9) und Gleichung (4.10) ist für einen Nahtöffnungswinkel von  $\alpha = 90^\circ$  entsprechend Gleichung (4.19) und (4.20) zu führen.

$$\sigma_v = \frac{F_\perp}{a \cdot l_{eff}} \cdot \sqrt{2 + \cos(90^\circ)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \Rightarrow \frac{F_\perp}{a \cdot l_{eff}} \leq \frac{f_u}{\sqrt{2} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.19)$$

$$\sigma_\perp = \frac{F_\perp \cdot \sin(\alpha/2)}{a \cdot l_{eff}} \leq \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \Rightarrow \frac{F_\perp}{a \cdot l_{eff}} \leq \sqrt{2} \cdot \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (4.20)$$

Hierbei ist die Beanspruchbarkeit nach Gleichung (4.19) maßgebend, da sich nach Gleichung (4.20) erst für einen Korrelationsbeiwert von  $\beta_w < 0,56$  eine kleinere Beanspruchbarkeit ergeben würde.

Für eine rechtwinklig zur Nahtlängsachse angreifenden Kraft  $N_{\perp,Ed}$  (vgl. Abb. 4-3) ist für das vereinfachte Verfahren in diesem Fall nur die Schubspannung  $\tau_\perp = F_\perp / (l_{eff} \cdot a)$  senkrecht zur Nahtlängsachse zu berücksichtigen. Vergleicht man für diesen Fall die Bemessungstragfähigkeiten des richtungsbezogenen Verfahrens mit dem vereinfachten Verfahren, so ergibt sich eine um den Faktor  $\sqrt{3}/\sqrt{2} \approx 1,22$  höhere Tragfähigkeit für das richtungsbezogene Verfahren.

Zusätzlich zu den analytischen Erläuterungen soll in Abb. 4-9 das Tragverhalten einer Kehlnahtverbindung prinzipiell am Beispiel einer Flankenkehlnaht numerisch dargestellt werden. Abb. 4-9 a) zeigt die Geometrie eines numerischen Berechnungsmodells einer Mischverbindung mit den Grundwerkstoffen S355 und S690 und einem Schweißzusatzwerkstoff G46.

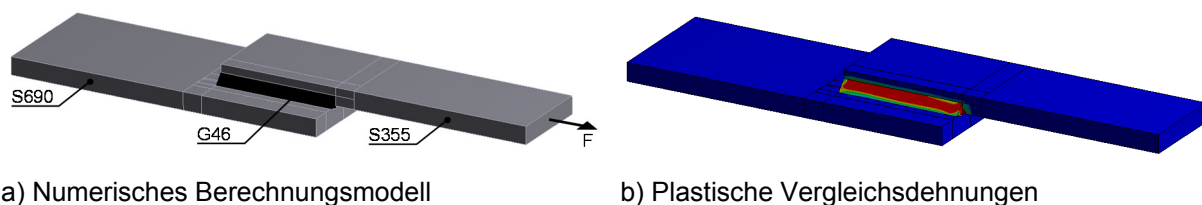


Abb. 4-9: Prinzipielle Darstellung des Tragverhaltens einer Flankenkehlnahtverbindung

In Abb. 4-11 b) ist zu erkennen, dass die plastischen Vergleichsdehnungen zuerst in der Kehlnaht ihren gemäß der eingegebenen Spannungs-Dehnungs-Linie möglichen Maximalwert (roter Bereich) erreichen. Die Naht ist der am höchsten beanspruchte Bereich, da die Kehlnaht der kleinste Querschnitt ist, der bei der Kraftübertragung mitwirkt. Demzufolge konzentrieren sich lokal in der Naht die Spannungen und Dehnungen, so dass ein Versagen stets in der Naht auftritt (vgl. Kapitel 6.5.4).

Für einen detaillierten Vergleich zwischen bestehenden europäischen und internationalen Bemessungsregeln zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Flanken- als auch Stirnkehlnahtverbindungen wird auf die Dissertation von Rasche [84] verwiesen.

## 4.4 Weitere Schweißnahtverbindungen

### 4.4.1 Überblick

In DIN EN 1993-1-8 [9] sind außer Kehl Nähten auch Stumpfnähte, Schlitznähte, Hohlkehlnähte und Lochschweißungen geregelt. Eine Schlitznaht ist definiert als ein Überlappungsstoß mit umlaufender Kehlnaht und ist ausschließlich zur Schubübertragung sowie zur Verhinderung des Beulens oder des Trennens überlappender Bleche zulässig. Die Tragfähigkeit einer Schlitznaht ist analog zu der einer Kehlnaht zu bestimmen (vgl. Kapitel 4.3). Im Gegensatz dazu ist eine Lochschweißung dadurch gekennzeichnet, dass in einem Überlappungsstoß ein Loch in einem der beiden Bauteile ausgeschweißt wird. Wie die Lochschweißung ist auch die Schlitznaht nur zur Schubübertragung in der Überlappungsebene, zur Verhinderung von Beulen oder Klaffen und zur Verbindung von Komponenten von mehrteiligen Bauteilen zulässig [90]. Die Beanspruchbarkeit  $F_{w,Rd}$  einer Lochschweißung bestimmt sich nach Gleichung (4.21).

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot A_w = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} \cdot A_w \quad (4.21)$$

mit

$A_w$	Lochfläche	[mm <sup>2</sup> ]
$f_u$	Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs des schwächeren der angeschlossenen Bauteile	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\beta_w$	Korrelationsbeiwert nach Tab. 4-1	[-]
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert (hier: 1,25)	[-]

### 4.4.2 Stumpfnahntverbindungen

Stumpfnahntverbindungen werden in durchgeschweißte und nicht durchgeschweißte Stumpfnähte unterteilt. Abb. 4-10 zeigt schematisch in a) eine durchgeschweißte und in b) eine nicht durchgeschweißte Stumpfnahntverbindung unter der Beanspruchung  $F_{Ed}$ .

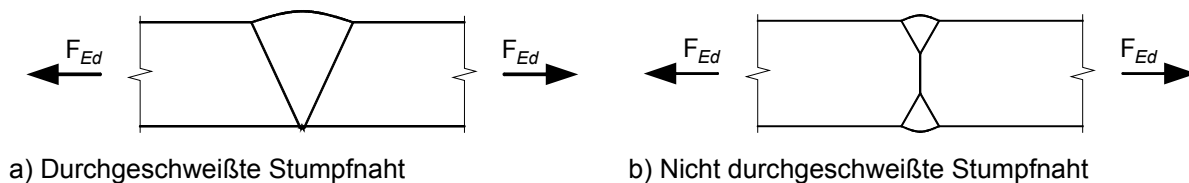


Abb. 4-10: Stumpfnahntverbindungen

Die unterschiedlichen Beanspruchungszustände einer Schweißnaht, d. h. insbesondere die Orientierung der Naht zur Beanspruchungsrichtung haben einen deutlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit und folglich auch auf die Bestimmung der Beanspruchbarkeit (vgl. hierzu Kapitel 4.3.5).

Bei *durchgeschweißten Stumpfnähten* ist i. d. R. die Schweißnaht nicht maßgebend für die Tragfähigkeit. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass entsprechend einer Schweißgutprüfung der Schweißzusatzwerkstoff Mindestwerte der Streckgrenze und der Zugfestigkeit aufweist, die größer als die der verbundenen Bauteile sind. Nach DIN EN 1993-1-8 [9] ist demzufolge die Tragfähigkeit einer durchgeschweißten Stumpfnah mit der Tragfähigkeit des schwächeren der beiden Bauteile gleichzusetzen (vgl. Gleichung (4.22)).

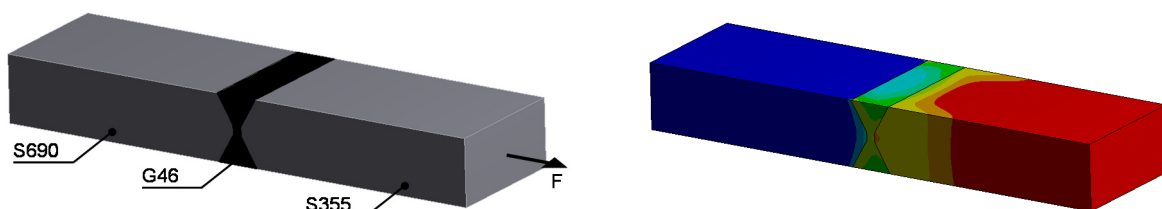
$$\sigma_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{l_{eff} \cdot t} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.22)$$

mit

$l_{eff}$	Wirksame Schweißnahtlänge	[mm]
$t$	Blechdicke	[mm]
$f_y$	Streckgrenze des Grundwerkstoffs des schwächeren der angeschlossenen Bauteile	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\gamma_{M0}$	Teilsicherheitsbeiwert (hier: 1,0)	[-]

Die Tragfähigkeit *nicht durchgeschweißter Stumpfnähte* ermittelt sich wie für Kehlnähte mit tiefem Einbrand (vgl. Kapitel 4.3). Dabei gilt zu beachten, dass die Nahtdicke nicht größer sein sollte als die mit dem Schweißverfahren erreichbare Tiefe des Einbrandes. Für eine ausführliche Darstellung der Bemessung wird auf [90] verwiesen.

In Abb. 4-11 wird analog zu Kapitel 4.3.5 zusätzlich zu den analytischen Betrachtungen das Tragverhalten einer Stumpfnahverbindung prinzipiell an einer Doppel-V-Naht (durchgeschweißte Stumpfnah) numerisch dargestellt. Abb. 4-11 a) zeigt die Geometrie eines numerischen Berechnungsmodells einer Mischverbindung mit den Grundwerkstoffen S355 und S690 und einem Schweißzusatzwerkstoff G46.



a) Numerisches Berechnungsmodell

b) Plastische Vergleichsdehnungen

Abb. 4-11: Prinzipielle Darstellung des Tragverhaltens einer durchgeschweißten Stumpfnahverbindung (Doppel-V-Naht)

In Abb. 4-11 b) wird deutlich, dass die plastischen Vergleichsdehnungen ihren Maximalwert (roter Bereich) zuerst im schwächeren der beiden verbundenen Grundwerkstoffe erreichen, sofern der Schweißzusatzwerkstoff, wie im vorliegenden Fall, Mindestwerte der Streckgrenze und der Zugfestigkeit aufweist, die größer als die der verbundenen Bauteile sind. Demzufolge lässt sich schlussfolgern, dass die Schweißnaht nicht maßgebend für das Tragverhalten einer Stumpfnahverbindung ist.



## 5 Ergebnisse abgeschlossener Forschungsvorhaben

### 5.1 Erkenntnisse aus der Literatur

Zur Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen wurden in Deutschland in den 1960er Jahren Untersuchungen an Schweißverbindungen normalfester Stähle von Bornscheuer/Feder (1966) [47], Klöppel/Petri (1966) [68], Feder (1967) [60], Klöppel/Petri (1969) [67] durchgeführt. Neben der Tragfähigkeit wurde auch der Einfluss von Nahtlänge und Nahtdicke untersucht. Für höherfeste Stähle gab es von Kob et al. (1987) [69] ähnliche Untersuchungen, die jedoch nur normalfeste Schweißzusatzwerkstoffe verwendeten.

Da plastische Verformungen notwendig sind, um gerade bei langen Nähten die Kräfte zu übertragen, stellte Wenk (1988) [107] fest, dass demzufolge eine ausreichende Duktilität der Nahtverbindung erforderlich ist. In Klöppel/Petri (1966) [68] wurde für normalfeste Stähle gezeigt, dass die maximal übertragbaren Spannungen erst mit einer Nahtlänge von  $l/a = 150$  abfallen. Für höherfeste Stähle S460 und S690 waren diese Grenzen ursprünglich mit  $l/a = 50$  sehr konservativ. Der Einfluss von Kraft- zu Nahtrichtung auf das Tragverhalten von Schweißverbindungen und die Untersuchung der Tragfähigkeit von Stirnkehlnähten mit Stählen mit einer Streckgrenze von  $f_{y,k} < 460 \text{ N/mm}^2$  wurden zusätzlich in internationalen Veröffentlichungen, Callele et al. (2005) [49], Deng et al. (2003) [54] und Ng et al. (2005) [79], thematisiert.

### 5.2 Forschungsvorhaben - FOSTA P652

Die ungünstige Bemessungssituation für Schweißverbindungen höherfester Baustähle war Anlass für das Forschungsvorhaben *FOSTA P652 Wirtschaftliche Schweißverbindungen höherfester Baustähle* [71]. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden die für den Stahlbau typischen Schweißverbindungen mit nicht durchgeschweißten Nähten höherfester Baustähle untersucht. Es wurden Versuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit von nicht durchgeschweißten Verbindungen an Flankenkehlnähten (vgl. Abb. 5-1 a)), Stirnkehlnähten und Stumpfnähten von höherfesten Baustählen mit Schwerpunkt der Baustahlgüte S460 M durchgeführt und zusätzlich einige Versuche an Schweißverbindungen der Baustahlgüte S690. Die Versuchskörper wurden bei Stahlbaufirmen teilmechanisiert hergestellt, so dass sich eine praxisnahe Streuung der Versuchsergebnisse ergab. Von den 126 Versuchen an Laschenverbindungen waren etwa 25 Mischverbindungen mit Stahlsorten unterschiedlicher Festigkeit und von den 52 Kreuzstößen mit Stirnkehlnähten etwa 11 Mischverbindungen.

Das typische Versagen war jeweils charakterisiert durch einen Bruch in der Schweißnaht, was die Bedeutung des Schweißzusatzwerkstoffs für das Nahtverhalten unterstreicht. Die geringsten Tragfähigkeiten, und damit maßgebend für die Bemessung, lieferten die Flankenkehlnähte an Laschenverbindungen.

Die Versuchsergebnisse zeigten für Schweißverbindungen mit dem Grundwerkstoff S460 M für die Laschenverbindungen gegenüber dem in der damals gültigen Bemessungsnorm DIN EN 1993-1-8:2005-07 angegebenen Wert eine deutlich höhere Tragfähigkeit. Durch eine Anpassung des Korrelationsbeiwerts von  $\beta_w = 1,0$  zu  $\beta_w = 0,85$  konnte eine Steigerung der normativen Tragfähigkeit der Verbindung von ca. 15 % erreicht werden. Für Schweißverbindungen mit dem Grundwerkstoff S690 konnte allerdings bei den geprüften Flankenkehlnahtverbindungen keine Steigerung der Tragfähigkeit gegenüber den zu der Zeit in der Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassung Z-30-1.1 [42] und der europäischen Norm DIN EN 1993-1-12 [11] angegebenen Werten festgestellt werden.

Als weiterer Parameter wurde der Einfluss der Nahtdicke und der Nahtlänge untersucht. Für die Nahtdicke konnte nur ein geringer Einfluss festgestellt werden. Die Untersuchungen zur Nahtlänge haben gezeigt, dass für den Grundwerkstoff S460 bis zu einem Verhältnis von Nahtlänge zu Nahtdicke von  $l/a = 150$  nur ein geringer Einfluss der Nahtlänge auf die Tragfähigkeit zu beobachten war. Für den Grundwerkstoff S690 war aufgrund der Streuung und geringeren Versuchsanzahl das Ergebnis weniger eindeutig.

Für die Schweißverbindungen höherfester Baustähle S690 konnte nur eine geringfügig höhere Tragfähigkeit als für S460 erreicht werden. Das steht im Widerspruch zu den Regelungen nach DIN EN 1993-1-12 [11], nach der die Grenzschnitznahtspannung für solche Stähle proportional zur Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs ist. Eine Erklärung für das vergleichsweise ungünstige Verhalten lässt sich auf das Verhältnis zwischen der Festigkeit des Grundwerkstoffs zur Festigkeit des verwendeten Schweißzusatzwerkstoffs zurückführen. Es hat sich gezeigt, dass bei Kehlnahtverbindungen, da sie im Schweißgut versagen, die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs maßgebend wird. Bei normalfesten Stählen liegt die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs stets höher als die des Grundwerkstoffs. Somit führt die Berechnung der Tragfähigkeit der Schweißverbindung in Abhängigkeit der Festigkeit des Grundwerkstoffs nur zu geringen Abminderungen. Bei den Schweißverbindungen mit den härtesten Baustählen S690 hat sich gezeigt, dass der Schweißzusatzwerkstoff keine Überfestigkeit mehr gegenüber dem Grundwerkstoff hat. Aus diesem Grund führt die Darstellung der Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Festigkeit des Grundwerkstoffs zu Abminderungen.

### 5.3 Unabhängige Zusatzversuche

Im Anschluss an das Forschungsvorhaben *FOSTA P652* [71] wurden zur weiteren Klärung der Tragfähigkeit von Schweißverbindungen mit dem Grundwerkstoff S690 erste Zusatzversuche [70] durchgeführt. Im Rahmen dieser 8 zusätzlichen Bauteilversuche wurde das Ziel verfolgt, mögliche weitere Einflussfaktoren wie Mechanisierungsgrad, Prüfkörperform und Schweißzusatzwerkstoff auf die Tragfähigkeit von Flankenkehlnahtverbindungen mit dem Grundwerkstoff S690 herauszuarbeiten.

Die Ergebnisse der durchgeführten Zusatzversuche bestätigten, dass durch den gewählten vollmechanisierten Fertigungsprozess und die gewählte Prüfkörperform (ohne Nahtanfangs- und Nahtendbereich, vgl. Abb. 5-1 b)), eine deutlich geringere Streuung der Versuchsergebnisse im Vergleich zu den in *FOSTA P652* [71] durchgeführten Untersuchungen erzielt werden konnte. Auswertungen der Versuchsergebnisse zeigten, dass entgegen den bisherigen normativen Berechnungsansätzen die ermittelten Traglasten, bedingt durch das Versagen bzw. den Bruch im Schweißgut, sehr gut mit den Zugfestigkeitskennwerten des reinen Schweißguts korrelierten und damit die Tragfähigkeit der untersuchten Flankenkehlnahtverbindungen tatsächlich im Wesentlichen durch die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs bestimmt wird.

### 5.4 Forschungsvorhaben - *FOSTA P812*

In dem sich anschließenden Forschungsvorhaben *FOSTA P812 Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen höherfester Baustähle S690 im Stahlbau* [72] lag der Schwerpunkt auf der Ermittlung der Tragfähigkeit von Flanken- und Stirnkehlnahtverbindungen höherfester Baustähle. Im Einzelnen wurden Tragfähigkeitsuntersuchungen mit den Grundwerkstoffen S460, S690 und S700 und unterschiedlichen Schweißzusatzwerkstoffen durchgeführt (Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe). Die Besonderheit des vollmechanisiert geschweißten Versuchskörpers für die Flankenkehlnahtverbindungen, vgl. Abb. 5-1 b), liegt darin, dass durch die mechanische Nachbearbeitung eine Schweißnaht ermöglicht wird, die geometrisch ohne große Toleranzabweichungen, insbesondere ohne Nahtanfangs- und Nahtendbereich, auskommt. Auch schweißtechnisch befindet sich die tragende Schweißnaht nicht im Anfangs- und Endbereich, sondern in einem Bereich, in dem sehr gleichmäßige Bedingungen vorliegen. Durch den gezielten Ausschluss aller möglichen unplanmäßigen Einflüsse aus der Fertigung, konnten die verschiedenen Einflüsse der gewählten Parameter wie: Zusammenhang Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff, Schweißparameter, geometrische Parameter wie Nahtlänge und Nahtdicke und Beanspruchungsrichtung eindeutig identifiziert werden. Insgesamt wurden 65 Flankenkehlnahtverbindungen und 22 Stirnkehlnahtverbindungen geprüft, jeweils immer mit Grundwerkstoffen derselben Festigkeit.

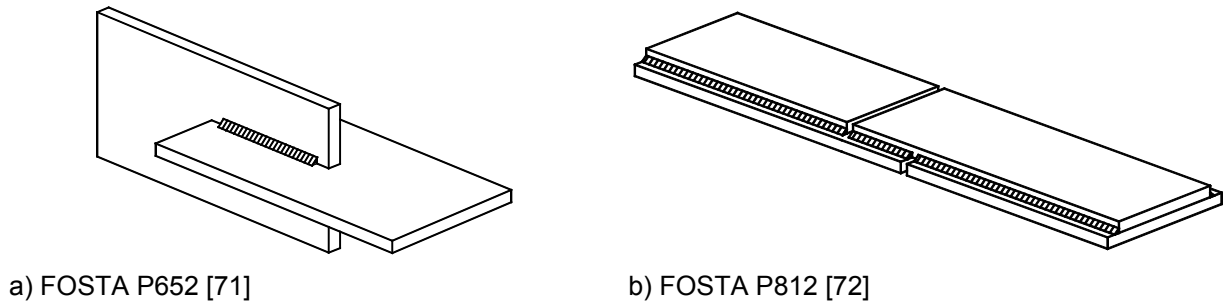


Abb. 5-1: Versuchskörper für Flankenkehlnahtverbindungen

Für die Flankenkehlnahtverbindungen konnten nur sehr geringe Streuungen festgestellt werden. Ursächlich hierfür ist der vollmechanisierte Fertigungsprozess. Weiterhin zeigten die Versuchsergebnisse eine höhere Tragfähigkeit bei Schweißverbindungen mit der Stahlgüte S690 im Vergleich mit Verbindungen der Stahlgüte S460. Zusätzlich wurde der Einfluss von Unter- und Überfestigkeiten des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Tragfähigkeit der Verbindung S690 ermittelt. Es stellte sich heraus, dass bei Verwendung von niederfesten Schweißzusatzwerkstoffen die Tragfähigkeit nur wenig geringer ist. Allerdings konnte durch die Verwendung von höherfesten Schweißzusatzwerkstoffen eine Steigerung der Tragfähigkeit festgestellt werden. Insgesamt konnte somit ein entscheidender Einfluss der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Tragfähigkeit der Verbindung ermittelt werden. Obgleich der Einfluss der Festigkeit des Grundwerkstoffs ebenfalls bei der Bestimmung der Tragfähigkeit mit zu berücksichtigen ist.

## 5.5 Dissertation Rasche

### 5.5.1 Grundlage für das erweiterte Bemessungsmodell

In den in Kapitel 4.3 vorgestellten Bemessungsansätzen wird für die Ermittlung der Tragfähigkeit der Schweißnaht ausschließlich die Festigkeit des Grundwerkstoffs berücksichtigt, während für den Schweißzusatzwerkstoff mindestens die gleiche Festigkeit wie die des Grundwerkstoffs gefordert wird. Grundsätzlich ist diese Vereinfachung für normalfeste Baustähle wie bspw. S235 und S355 sinnvoll, da die zugehörigen Schweißzusatzwerkstoffe immer eine höhere Festigkeit als die Grundwerkstoffe haben. Im Gegensatz dazu kann für die Fertigung oder in Abhängigkeit von der Beanspruchung für höherfeste Stähle (S460 und S690) sowohl der Einsatz von Schweißzusatzwerkstoffen mit geringerer als auch mit höherer Festigkeit sinnvoll sein. Um diese Werkstoffkombinationen wirtschaftlich zu verwenden, bedarf es Bemessungsregeln, die neben der Festigkeit des Grundwerkstoffs auch die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs berücksichtigen.

Rasche hat in ihrer Dissertation [84] sowohl eine Überarbeitung der Korrelationsbeiwerte für das bestehende Bemessungsmodell in DIN EN 1993-1-8 [9] vorgenommen, als auch einen



neuen Bemessungsansatz entwickelt, der eine wirtschaftliche Auslegung von Kehlnähten bei höherfesten Stählen erlaubt. Als Grundlage hierfür wurden insgesamt die Versuchsergebnisse von 103 eigenen Versuchen an Flankenkehlnähten aus den Forschungsvorhaben *FOSTA P652* [71], den Zusatzversuchen [70] und *FOSTA P812* [72] verwendet, sowie zusätzlich 160 Versuche aus der Literatur von Kob et al. (1987) [69], Niemi (1988) [80], Saal (2005) [87] und Collin/Johansson (2005) [50]. Eine detaillierte Beschreibung und Auswertung der jeweiligen Versuchsreihen findet sich in der Dissertation von Rasche [84]. Die überarbeiteten Korrelationsbeiwerte für Kehlnahtverbindungen nach DIN EN 1993-1-8 [9] und DIN EN 1993-1-12 [11] und der neu entwickelte Bemessungsvorschlag für Kehlnahtverbindungen werden im Folgenden vorgestellt.

### 5.5.2 Bemessungsvorschlag für Kehlnahtverbindungen nach Eurocode 3

Auf der Grundlage einer statistischen Auswertung aller Versuche mit gleichen Grund- und zugehörigen Schweißzusatzwerkstoffen wurde ein Vorschlag für die Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,GW}$  gemäß dem bestehenden Bemessungsmodell nach DIN EN 1993-1-8 [9] und DIN EN 1993-1-12 [11] zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen erarbeitet. Der Index *GW* beim Korrelationsbeiwert steht dafür, dass sich der Beiwert auf den verbundenen Grundwerkstoff bezieht. Für die Verbindungen mit dem Grundwerkstoff S460 und zugehörigem Schweißzusatzwerkstoff wurde ein Beiwert  $\beta_{w,GW} = 0,85$  ermittelt. Schweißverbindungen mit dem Grundwerkstoff S690 sollten mit einem Beiwert  $\beta_{w,GW} = 1,10$  bemessen werden (vgl. Tab. 5-1).

Tab. 5-1: Vorschlag der Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,GW}$  für Flankenkehlnahtverbindungen S460 und S690 nach EN 1993-1-8 und EN 1993-1-12 aus Rasche [84]

Stahlgüte	Korrelationsbeiwert $\beta_{w,GW}$
S460 N/NL; M/ML	0,85
S690 Q/QL/QL1	1,10

Im Vergleich mit den derzeit gültigen Korrelationsbeiwerten nach DIN EN 1993-1-8 [9] mit  $\beta_w = 1,00$  ergibt sich für die Schweißverbindungen mit dem Grundwerkstoff S460 eine Verbesserung der normativen Tragfähigkeit. Für die Schweißverbindungen S690 ergeben sich geringere Tragfähigkeiten als nach DIN EN 1993-1-12 [11] mit  $\beta_w = 1,00$ .

### 5.5.3 Modifizierter Bemessungsvorschlag für Kehlnahtverbindungen

Auf Basis der Versuchsergebnisse aus den Forschungsvorhaben und der Ergebnisse aus der Literatur konnte Rasche einen modifizierten Bemessungsansatz für Flanken- und Stirnkehlnahtverbindungen entwickeln, der zusätzlich den Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Tragfähigkeit berücksichtigt. Die statistische Auswertung der Versuche wurde in Anlehnung an DIN EN 1990 Anhang D [6] durchgeführt. Dabei wurde für die Nahtbruchfläche der Schweißnaht ein Variationskoeffizient von  $V_{A_w} = 10\%$  angesetzt, analog zum Background Document D.03 [46]. Der Variationskoeffizient für die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs (GW) und des Schweißzusatzwerkstoffs (SZW) wurde mit  $V_{f_{u,GW}} = V_{f_{u,SZW}} = 7\%$  angenommen, ebenfalls wie im Background Document D.03 [46]. Die gezielte vollmechanisierte Fertigung wurde dadurch berücksichtigt, dass jeweils 2 Versuche mit gleichen Parametern nur einmal gezählt wurden. Ansonsten ergab die Variation der übrigen Parameter eine durchaus realistische Streuung.

Da in den zugrunde liegenden experimentellen Untersuchungen auch die Festigkeit der Schweißzusatzwerkstoffe variiert wurde, konnte Rasche den Einfluss unterschiedlicher Festigkeiten von Grund- und Schweißzusatzwerkstoff in ihren Bemessungsansatz implementieren. Dies geschieht über eine Wichtung der unterschiedlichen Festigkeiten. Demzufolge ist bei der Ermittlung der Grenzspannung für Flanken- und Stirnkehlnahtverbindungen die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs mit 25 % und die des Schweißzusatzwerkstoffs mit 75 % zu berücksichtigen, vgl. Gleichung (5.1).

$$\sigma_{v,Ed} \leq \sigma_{u,Rd} \Rightarrow \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{0,25 \cdot f_{u,GW} + 0,75 \cdot f_{u,SZW}}{\beta_{w,SZW} \cdot \gamma_{M2}} \quad (5.1)$$

mit

$\sigma_{v,Ed}$	Vergleichsspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{u,Rd}$	Bemessungsgrenzspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{\perp}$	Normalspannung senkrecht zur Schweißnahtachse	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{\perp}$	Schubspannung (in der Ebene der Kehlnahtfläche) senkrecht zur Schweißnahtachse	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{\parallel}$	Schubspannung (in der Ebene der Kehlnahtfläche) parallel zur Schweißnahtachse	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{u,GW}$	Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{u,SZW}$	Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\beta_{w,SZW}$	Korrelationsbeiwert nach Tab. 5-2	[-]
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert (hier: 1,25)	[-]

Nach Gleichung (5.1) ergibt sich der Bemessungsansatz für Flankenkehlnähte zu

$$\tau_{Rd} = \frac{0,25 \cdot f_{u,GW} + 0,75 \cdot f_{u,SZW}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,SZW} \cdot \gamma_{M2}} \quad (5.2)$$

und für Stirnkehlnähte zu

$$\sigma_{Rd} = \frac{0,25 \cdot f_{u,GW} + 0,75 \cdot f_{u,SZW}}{\sqrt{2} \cdot \beta_{w,SZW} \cdot \gamma_{M2}} \quad (5.3)$$

Die Gewichtung von 75 % der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs  $f_{u,SZW}$  und 25 % der Festigkeit des Grundwerkstoffs  $f_{u,GW}$  zeigt deutlich die Bedeutung des Zusatzwerkstoffs für die Schweißnahttragfähigkeit. Für verschiedene Schweißzusatzwerkstoffe wurden für Verbindungen mit gleichen Grundwerkstoff entsprechende unterschiedliche  $\beta_{w,SZW}$ -Werte hergeleitet, vgl. Tab. 5-2. Eine Gruppenbetrachtung von Massivdraht-, Fülldraht- und umhüllte Stabelektroden wie in Tab. 5-2 ist zulässig, da für die angegebenen Kennziffern der Schweißzusatzwerkstoffe die Zugfestigkeit  $f_{u,SZW}$  jeweils identisch ist. Im Gegensatz zu den in Tab. 4-1 gelisteten Korrelationsbeiwerten sind die Korrelationsbeiwerte für den Bemessungsansatz von Rasche nicht abhängig vom Grundwerkstoff, sondern vom verwendeten Schweißzusatzwerkstoff zu wählen. Deshalb wird auch in dieser Arbeit bei den Korrelationsbeiwerten der Index SZW verwendet, um deutlich zu machen, dass sich diese Korrelationsbeiwerte auf den Schweißzusatzwerkstoff beziehen.

Tab. 5-2: Vorschlag für Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,SZW}$  nach EN 1993-1-8 und EN 1993-1-12 aus Rasche [84]

Schweißzusatzwerkstoff	Korrelationsbeiwert $\beta_{w,SZW}$
G42 / E42	0,89
G46 / E46 / T46	0,85
G69 / T69	1,09
G89	1,19

Diese Art der Ermittlung der Grenzsweißnahtspannung eröffnet die Möglichkeit die Nahtfestigkeit durch höherfeste Schweißzusatzwerkstoffe gezielt zu erhöhen aber auch, falls das z. B. aus Zähigkeitsgründen gewünscht wird, Schweißnähte mit Unterfestigkeit auszuführen.

In Abb. 5-2 ist ein Vergleich der Bemessungsgrenzspannungen für eine Flankenkehlnahtverbindung nach Gleichung (5.2) über die nominelle Zugfestigkeit der gängigsten Baustähle, für die in Tab. 5-2 aufgeführten Schweißzusatzwerkstoffe, aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch die Wahl des Schweißzusatzwerkstoffs die Bemessungsgrenzspannung der Schweißverbindung zunimmt.

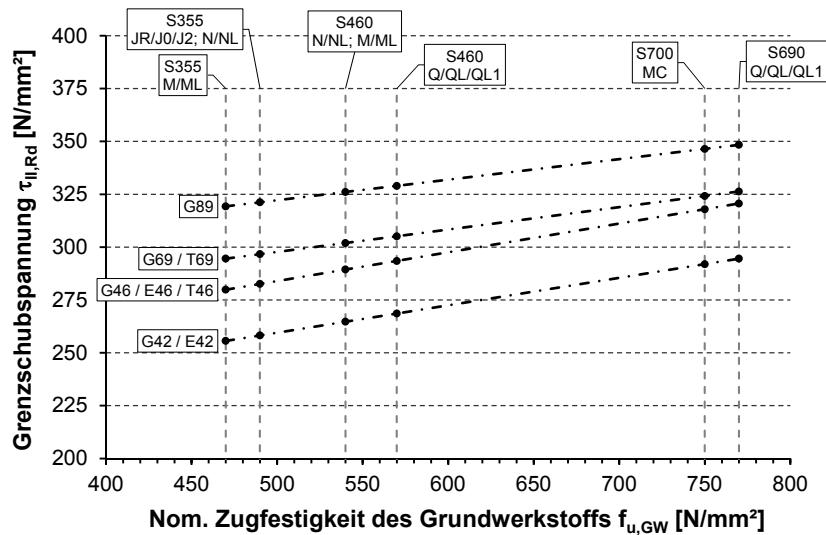


Abb. 5-2: Grenzschubspannungen des modifizierten Bemessungsvorschlags nach Rasche einer Flankenkehlnahtverbindung in Abhängigkeit der Festigkeit des Grundwerkstoffs

Ein Vorteil des modifizierten Bemessungsansatz nach Rasche [84] liegt darin, dass unterschiedliche Festigkeiten für Grund- und Schweißzusatzwerkstoff berücksichtigt werden können. Somit sind einerseits nun auch Verbindungen mit Schweißzusatzwerkstoffen niedrigerer Festigkeit möglich. Andererseits können höhere Bemessungsgrenzspannungen infolge höherer Festigkeiten des Schweißzusatzwerkstoffs erzielt werden.

Die Bemessungsgleichung (5.1) wurde an Flankenkehlnahtverbindungen mit Bauteilen gleicher Stahlgüten und verschiedenen Schweißzusatzwerkstoffen entwickelt. Für Stirnkehlnahtverbindungen wurde kein separater Bemessungsvorschlag gemacht, da nur wenige Ergebnisse für Stirnkehlnähte vorlagen und diese sehr stark streuten. Rasche zeigt anschaulich in ihrer Dissertation [84], dass die Bemessungstragfähigkeiten für Stirnkehlnähte im Vergleich zu den Flankenkehlnähten als konservativ angesehen werden können. Somit können die auf Basis der Flankenkehlnahtverbindungen hergeleiteten Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,SZW}$  (vgl. Tab. 5-2) auch für die Bemessung von Stirnkehlnähten (siehe hierzu Gleichung (5.3)) angewendet werden.

### 5.5.4 Vergleich der Bemessungsvorschläge mit dem bestehenden Bemessungskonzept nach Eurocode 3

In Abb. 5-3 werden die Bemessungsgrenzspannungen für eine Flankenkehlnahtverbindung des bestehenden Bemessungskonzepts nach DIN EN 1993-1-8 [9] und DIN EN 1993-1-12 [11] mit dem modifizierten Bemessungsvorschlag nach Rasche [84] verglichen. Außerdem sind die Bemessungsgrenzspannungen für die entsprechenden Verbindungen nach den Nationalen Anhängen DIN EN 1993-1-8/NA [10] und DIN EN 1993-1-12/NA [12], für die entsprechend Tab. 4-1 andere Korrelationsbeiwerte  $\beta_w$  gelten, dargestellt.

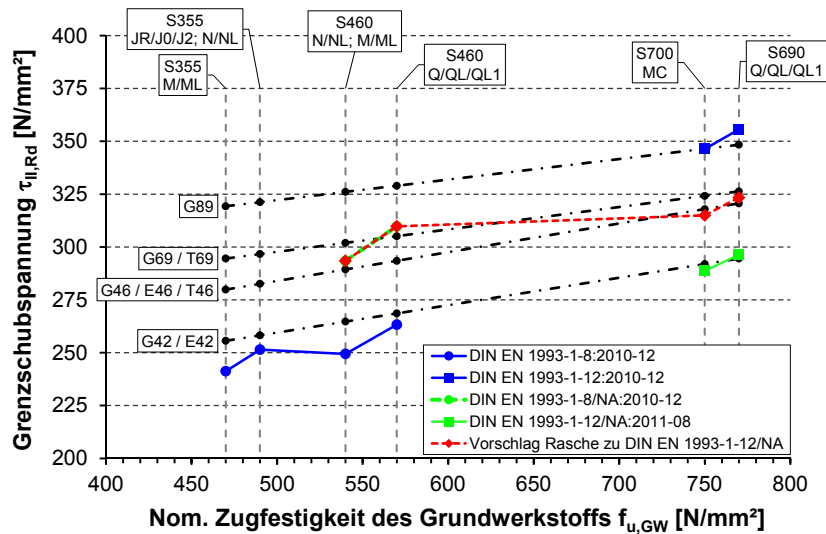


Abb. 5-3: Vergleich der Grenzschubspannungen des modifizierten Bemessungsvorschlags nach Rasche mit dem bestehenden Bemessungsmodell nach DIN EN 1993-1-8 und DIN EN 1993-1-12

Für das Bemessungsmodell nach DIN EN 1993-1-8 [9] wird bei der Ermittlung der Bemessungsgrenzspannung die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs nicht berücksichtigt, so dass sich bis einschließlich der Baustahlgüte S460 jeweils nur ein Wert ergibt. Es gilt jedoch anzumerken, dass für diese Verbindungen nur Schweißzusatzwerkstoffe erlaubt sind, deren Festigkeit mindestens der Festigkeit des Grundwerkstoffs entspricht.

Für den modifizierten Bemessungsansatz nach Rasche [84] sind sowohl Schweißzusatzwerkstoffe geringerer sowie höherer Festigkeit als die des Grundwerkstoffs möglich. Somit liegt ein Vorteil des neuen Bemessungsansatzes nach Rasche darin, dass bei Verwendung von höherfesten Schweißzusatzwerkstoffen höhere Bemessungsgrenzspannungen als nach dem Bemessungskonzept nach DIN EN 1993-1-8 [9] und DIN EN 1993-1-12 [11] in Anspruch genommen werden können.



## 6 Experimentelle Untersuchungen an Mischverbindungen

### 6.1 Allgemeines

Im Rahmen eines am Institut für Konstruktion und Entwurf (Universität Stuttgart) durchgeführten Forschungsprojekts wurde die Trag- und Verformungsfähigkeit von geschweißten Kehlnahtverbindungen aus normal- und höherfestem Baustahl experimentell ermittelt. Die Versuche erfolgten innerhalb eines europäischen Forschungsvorhabens mit dem Titel *Standardization of Safety Assessment Procedures across Brittle to Ductile Failure Modes* (Kurztitel: *SAFEBRITILE* [52]). Das Forschungsvorhaben verfolgte das übergeordnete Ziel einer konsistenten globalen Sicherheitsbeurteilung für die drei Versagensmodi duktil, semi-duktil und Versagen durch Bruch an gezielt ausgewählten Bauteilen des konstruktiven Stahlbaus. Innerhalb eines eigenständigen Arbeitspaketes wurde am Institut für Konstruktion und Entwurf (Universität Stuttgart) gezielt eine Sicherheitsbetrachtung bei Bruchversagen am Beispiel von geschweißten Flankenkehlnahtverbindungen aus normal- und höherfesten Baustählen (Mischverbindungen) durchgeführt. Besonders für geschweißte Verbindungen aus normal- und höherfestem Stahl führen die derzeitigen Entwurfsregeln nach DIN EN 1993-1-8 [9] zu verhältnismäßig unwirtschaftlichen Kehlnähten. Das derzeitige Bemessungskonzept für die sogenannten Mischverbindungen ist unzureichend, da das Konzept und die Sicherheitsbeurteilung für Standardstähle entwickelt und auf höherfeste Stähle übertragen wurde. In vergangenen Forschungsprojekten, *FOSTA P652 Wirtschaftliche Schweißverbindungen höherfester Baustähle* [71] und *FOSTA P812 Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen höherfester Baustähle S690 im Stahlbau* [72] hat sich gezeigt, dass die Tragfähigkeit einer geschweißten Kehlnahtverbindung maßgeblich durch die Tragfähigkeit  $f_{u,SZW}$  des Schweißzusatzwerkstoffs beeinflusst wird. Dies war der Anlass für ein Versuchsprogramm an Kehlnahtverbindungen aus normal- und höherfesten Baustählen kombiniert mit verschiedenen Schweißzusatzwerkstoffen, um so für die kommende Normengeneration Empfehlungen für geschweißte Mischverbindungen im Hinblick auf Trag- und Verformungsfähigkeit zu erarbeiten.

Die experimentellen Untersuchungen wurden an Flankenkehlnahtverbindungen durchgeführt, da diese Verbindungsform im Gegensatz zu Stirnkehlnahtverbindungen im Allgemeinen die geringsten Schweißnahttragfähigkeiten liefert [46] und maßgebend für die Ermittlung des Korrelationsbeiwerts  $\beta_w$  ist.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die verwendeten Grund- und Schweißzusatzwerkstoffe vorgestellt. Neben der Darstellung der mechanischen Eigenschaften und der chemischen Zusammensetzung werden zur Beschreibung des Versuchsprogramms die angewandten Schweißparameter erläutert. Im Anschluss daran werden die Versuchsergebnisse aufgeführt und die Begleituntersuchungen vorgestellt.

## 6.2 Verwendete Werkstoffe

### 6.2.1 Grundwerkstoffe

Zur Bestimmung der experimentellen Tragfähigkeit an Flankenkehlnahtverbindungen wurden unter Berücksichtigung der perspektivischen Anwendung im Stahlbau drei verschiedene Stahlgüten ausgewählt: Die Stahlgüte S355 J2+N nach DIN EN 10025-2 [14], S460 ML nach DIN EN 10025-4 [16] und S690 QL nach DIN EN 10025-6 [18].

Die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der verwendeten Grundwerkstoffe erfolgte anhand von unabhängigen Zugversuchen entsprechend DIN EN ISO 6892-1 [30]. Die Zugproben wurden den Grundblechen mit einer Blechdicke von 15 mm entnommen. In Tab. 6-1 sind für die drei verwendeten Stahlsorten neben dem nominellen Mindestwert für die Streckgrenze ( $R_{eH} / R_{p0,2}$ ), die Zugfestigkeit ( $R_m$ ) und die Bruchdehnung ( $A$ ) der experimentelle Mittelwert aus den drei unabhängig durchgeführten Zugversuchen aufgeführt. Die in den Zugversuchen ermittelten Festigkeitswerte  $R_{eH} / R_{p0,2}$  und  $R_m$  dienen als Grundlage für die rechnerische Bestimmung der maximalen theoretischen Beanspruchbarkeiten in Kapitel 11.

Tab. 6-1: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Grundwerkstoffe

Mechanische Eigenschaften			S355 J2+N	S460 ML	S690 QL
			1.0577 DIN EN 10025-2:2005-04 Tabelle 7 [14]	1.8838 DIN EN 10025-4:2005-04 Tabelle 5 [16]	1.8928 DIN EN 10025-6:2009-08 Tabelle 5 [18]
$R_{eH} / R_{p0,2}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	nom.	355	460	690
		exp.	425,0	512,0	824,3
$R_m$	[N/mm <sup>2</sup> ]	nom.	470 - 630	540 - 720	770 - 940
		exp.	545,7	575,0	873,7
$A$	[%]	nom.	22	17	14
		exp.	26,92	25,20	14,75

Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen, dass die Mindestanforderungen an den Werkstoff übertroffen wurden. Die Kerbschlagarbeit und die chemische Zusammensetzung der in den Versuchen verwendeten Grundwerkstoffe sind den Abnahmeprüfzeugnissen 3.1 nach DIN EN 10204 [21] entnommen und in Anhang A zusammengestellt.



## 6.2.2 Schweißzusatzwerkstoffe

Als Schweißzusatzwerkstoffe wurden die Massivdrähte mit den Kurzzeichen G46 4 M21 4Si gemäß DIN EN ISO 14341 [33], G69 6 M21 Mn4Ni1,5CrMo und G89 6 M21 Mn4Ni2CrMo gemäß DIN EN ISO 16834 [36] mit einem Drahtdurchmesser von 1,2 mm eingesetzt. Tab. 6-2 gibt einen Überblick über die Mindeststreckgrenze  $R_{eH} / R_{p0,2}$ , die Zugfestigkeit  $R_m$  und die Mindestbruchdehnung  $A$  der verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe nach der entsprechenden Norm.

Tab. 6-2: Nominelle Kennwerte der verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe

Produktbezeichnung	Normbezeichnung	Kurzzeichen	Einstufung	$R_{eH} / R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A$ [%]
Union K56	DIN EN ISO 14341 2011-04; Tabelle 1A [33]	G46 4 M21 4Si1	G46	460	530-680	20
Union NiMoCr	DIN EN ISO 16834 2012-08, Tabelle 1A [36]	G69 6 M21 Mn4Ni1,5CrMo	G69	690	770-940	17
Union X90	DIN EN ISO 16834 2012-08, Tabelle 1A [36]	G89 6 M21 Mn4Ni2CrMo	G89	890	940-1180	15

Für die Durchführung der Zugversuche nach DIN EN ISO 6892-1 [30] sind aus jeder Schweißgutprobe entsprechend DIN EN ISO 15792-1 [35] drei Rundzugproben der Probenform B nach DIN EN ISO 50125[2] entnommen worden. Die Entnahme dieser Proben erfolgte so, dass die Längsachse in Schweißrichtung lag.

Tab. 6-3 fasst die experimentell ermittelten mechanischen Eigenschaften des reinen Schweißguts gemäß DIN EN ISO 15792-1 [35] zusammen. Wie auch beim Grundwerkstoff entspricht der experimentelle Wert einem Mittelwert aus drei Zugversuchen.

Tab. 6-3: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe

Mechanische Eigenschaften			G46	G69	G89
			4 M21 4Si1 DIN EN ISO 14341:2011-04 Tabelle 1A [33]	6 M21 Mn4Ni1,5CrMo DIN EN ISO 16834:2012-08 Tabelle 1A [36]	6 M21 Mn4Ni2CrMo DIN EN ISO 16834:2012-08 Tabelle 1A [36]
$R_{eH} / R_{p0,2}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	nom.	460	690	890
		exp.	519,0	646,3	729,3
$R_m$	[N/mm <sup>2</sup> ]	nom.	530 - 680	770 - 940	940 - 1180
		exp.	606,3	774,0	939,3
$A$	[%]	nom.	20	17	15
		exp.	28,10	20,84	18,75

Auffallend ist, dass für die beiden Schweißzusatzwerkstoffe G69 und G89 der Mindestwert der Streckgrenze experimentell nicht nachgewiesen werden konnte. Die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung erfüllten jedoch die Mindestanforderungen. Die Kerbschlagarbeit und die chemische Zusammensetzung der verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe sind den Abnahmeprüfzeugnissen 3.1 nach DIN EN 10204 [21] entnommen und in Anhang A zusammengestellt.

## 6.3 Versuchsprogramm

### 6.3.1 Allgemeines

In der Regel geht der Tragwerksplaner bei der Planung und Berechnung geschweißter Bauteile davon aus, dass sich eine Schweißverbindung innerhalb einer Bauteilstruktur ebenso verhält wie der homogene Grundwerkstoff. In Kapitel 4 wurde erläutert, dass sich das derzeitige Bemessungskonzept unter Berücksichtigung geeigneter Sicherheitsfaktoren bei Auslegung der Schweißnahttragfähigkeit an der Festigkeit des Grundwerkstoffs orientiert. Die Unterschiede im Hinblick auf die Festigkeit und Zähigkeit der Grund- und Schweißzusatzwerkstoffe werden im Allgemeinen als Mismatch bezeichnet [78].

Der Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen lag auf der Ermittlung der Trag- und Verformungsfähigkeit von geschweißten Kehlnahtverbindungen unter besonderer Berücksichtigung der Variation von Grund- und Schweißzusatzwerkstoffen. Hierbei stand vor allem der Einfluss der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Trag- und Verformungsfähigkeit der Schweißverbindung im Vordergrund. Sowohl der Mechanisierungsgrad des Schweißprozesses, voll- oder teilmechanisiert, als auch die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  wurden bei den Schweißungen verändert. Dabei wurde die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  zwischen einer minimalen und einer maximalen Grenze variiert, mit der Folge von unterschiedlichen Energieeinbringungen in die Naht und daraus resultierenden unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften. Die Variation der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  kann als die in der Praxis vorhandene Streuung interpretiert werden.

### 6.3.2 Versuchskörperform

Die Versuchskörperform wurde mit dem Ziel der Vergleichbarkeit der Ergebnisse in Anlehnung an die Versuchskörpergeometrie des Forschungsvorhabens *FOSTA P812 Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen höherfester Baustähle S690 im Stahlbau* [72] gewählt. Hierbei wurden zwei Bleche unterschiedlicher Breite, jedoch gleicher Blechdicke miteinander verschweißt. Die Schweißnaht wurde entsprechend den Vorgaben der Schweißprozessparameter (siehe Kapitel 6.3.4) voll- oder teilmechanisiert als einlagige Kehlnaht ausgeführt (vgl. Abb. 6-1).

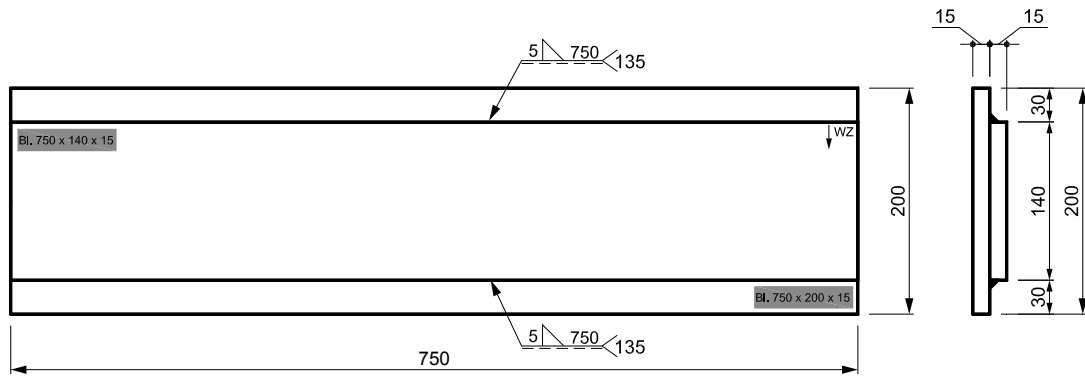


Abb. 6-1: Versuchskörper - Schweißnahtausführung

Die Besonderheit der Versuchskörperform liegt in der anschließenden mechanischen Bearbeitung: Für eine definiert zu prüfende Nahtlänge, die geometrisch ohne große Toleranzen, insbesondere ohne Nahtanfangs- und Nahtendbereich auskommt, wurden zwei Nuten in den Probekörper gefräst (vgl. Abb. 6-2). Die so erzeugte tragende Schweißnaht mit der Länge  $l_{eff}$  befindet sich nicht im Anfangs- und Endbereich sondern in einem Bereich, in dem sehr gleichmäßige Bedingungen vorliegen.

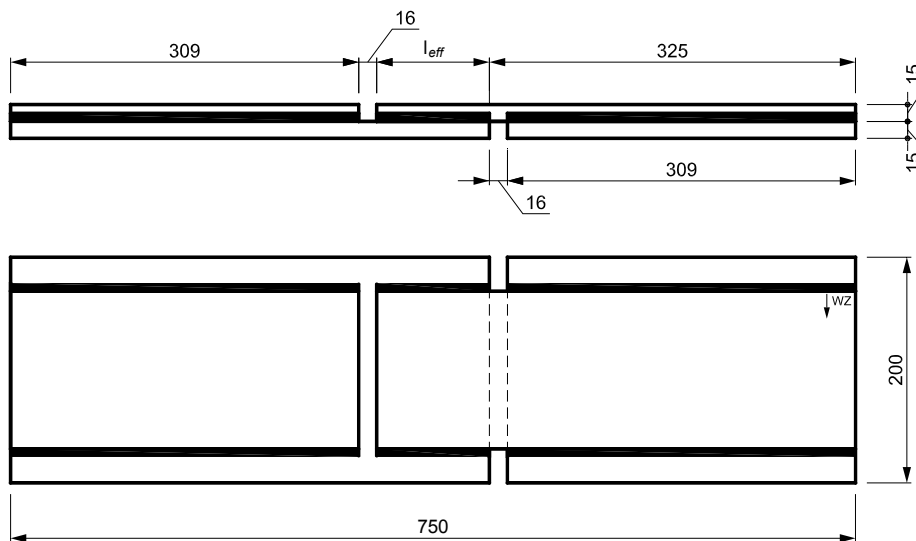


Abb. 6-2: Mechanische Bearbeitung des Versuchskörpers

### 6.3.3 Versuchskonfigurationen

#### 6.3.3.1 Parameterwahl

Das Hauptaugenmerk des Versuchsprogramms lag auf der Verbesserung der Kenntnisse über die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten von geschweißten Kehlnahtverbindungen aus normal- und höherfesten Baustählen, den sogenannten Mischverbindungen. Hierzu wurden zwei unterschiedliche Gruppen von Versuchskörperkonfigurationen untersucht:

- Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe
- Mischverbindungen

In den folgenden Abbildungen, Tabellen und Erläuterungen wird übersichtlichkeithalber der Begriff Grundwerkstoff mit *GW* und der Begriff Schweißzusatzwerkstoff mit *SZW* abgekürzt. Für den zu untersuchenden Versuchskörpertyp, bestehend aus zwei aufeinander gelegten Blechen, wird das obere Blech jeweils mit *GW 1* und das untere Blech mit *GW 2* benannt (vgl. Abb. 6-3).

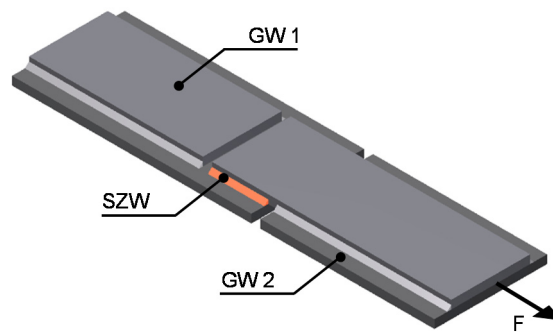


Abb. 6-3: Bezeichnung der einzelnen Elemente des Versuchskörpers

Bei den Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe besitzen die beiden Grundwerkstoffe jeweils die gleiche Festigkeit ( $GW 1 = GW 2$ ), während sich die Festigkeit der beiden Grundwerkstoffe bei den Mischverbindungen ( $GW 1 \neq GW 2$ ) unterscheidet. Die Gesamtanzahl der durchgeführten Versuche betrug 52.

Für die Bestimmung der experimentellen Trag- und Verformungsfähigkeit an Kehlnahtverbindungen wurden bei der Herstellung der Versuchskörper drei Parameter variiert, die in Abb. 6-4 als Gruppen (1 bis 3) zusammengefasst und dargestellt sind.

Die erste Gruppe beinhaltet die verschiedenen Grund- und Schweißzusatzwerkstoffe. Hierzu gehören die in Kapitel 6.2 vorgestellten normal- und höherfesten Baustähle und die unterschiedlichen Schweißzusatzwerkstoffe. Die Variation des Schweißzusatzwerkstoffs zielt vor allem darauf ab, den Einfluss auf die Trag- und Verformungsfähigkeit herauszuarbeiten. Vor allem im Hinblick auf die Tragfähigkeit werden in Kapitel 11.8 die für die Schweißnahtbeurteilung relevanten Korrelationskoeffizienten  $\beta_{w,SZW}$  bestimmt, die vom Schweißzusatzwerkstoff abhängig sind.

Übergeordnet lassen sich die verschiedenen Kombinationen aus Grund- und Schweißzusatzwerkstoffen zu den beiden Verbindungstypen *Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe* und *Mischverbindungen* zusammenfassen.

Die Variation der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  in Gruppe 2 verfolgt das Ziel möglichst eine praxisnahe Streuung der Versuchsergebnisse zu erzeugen. Hierzu wird für die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  jeweils eine untere ( $\min v_s$ ) und eine obere ( $\max v_s$ ) Grenze gewählt.

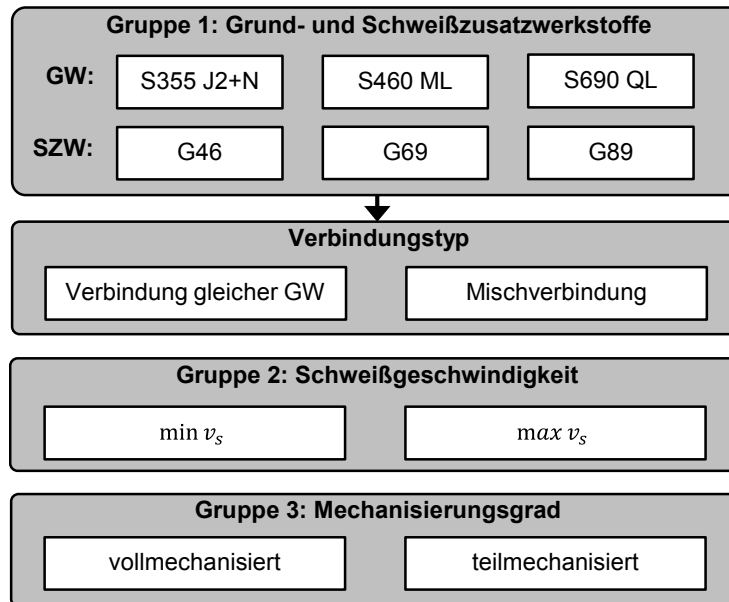


Abb. 6-4: Versuchsprogramm des Forschungsprojekts *SAFEBRICKTILE* [52]

Als dritte zu untersuchende Gruppe wurde der Mechanisierungsgrad variiert. Hierbei wird zwischen einem voll- und teilmechanisierten Fertigungsprozess unterschieden. Üblicherweise ist die Qualität bei einer vollmechanisierten Herstellung besser, so dass durch diese Art der Fertigung eher die *Laborbedingungen* abgebildet werden. Im Gegensatz dazu repräsentiert die teilmechanisierte Herstellung die baupraktischen Bedingungen. In Tab. 6-4 sind die einzelnen Gruppen mit den Variationsparametern und den jeweiligen Zielen nochmals zusammengefasst.

Tab. 6-4: Schwerpunkte der experimentellen Untersuchungen an Flankenkehlnahtverbindungen

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Variation	Grund- und Schweißzusatzwerkstoffe	Schweißgeschwindigkeit	Mechanisierungsgrad
Ziel	Einfluss auf Trag- und Verformungsfähigkeit	Generierung einer praxisnahen Streuung	Einfluss auf Trag- und Verformungsfähigkeit

## 6.3.3.2 Definition: Verbindung gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindung

In diesem Kapitel sollen die beiden Begriffe *Verbindung gleicher Grundwerkstoffe* und *Mischverbindung* voneinander abgegrenzt werden. In Tab. 6-5 sind die Charakteristika aufgeführt. Der gewählte Schweißzusatzwerkstoff kann eine zum Grundwerkstoff passende oder abweichende Festigkeitsklasse besitzen. Prinzipiell wird der Festigkeitsunterschied zwischen dem Grund- und dem Schweißzusatzwerkstoff als *Mismatch* bezeichnet, wobei der Begriff *Mismatch* den Festigkeitsunterschied aus der Perspektive des Schweißzusatzwerkstoffs beschreibt.

Tab. 6-5: Definition der Begriffe *Verbindung gleicher Grundwerkstoffe* und *Mischverbindung*

<b>Verbindung gleicher Grundwerkstoffe</b>	<b>Mischverbindung</b>
Gleiche Festigkeitsklasse der verschweißten Grundwerkstoffe und dazu passende oder abweichende Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs	Unterschiedliche Festigkeitsklasse der verschweißten Grundwerkstoffe und dazu passende oder abweichende Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs

Ansatzpunkt der Untersuchungen in Gruppe 1 (vgl. Tab. 6-4) ist die Beurteilung des Einflusses der unterschiedlichen Eigenschaften von Schweißzusatzwerkstoff und Grundwerkstoff auf das Trag- und Verformungsverhalten der Flankenkehlnahtverbindung. Zur Quantifizierung des Mismatch wird ein Mismatch-Faktor  $M$  eingeführt, der das Verhältnis der Streckgrenze von Schweißzusatzwerkstoff  $f_{y,SZW}$  und Grundwerkstoff  $f_{y,GW}$  beschreibt [78]. Sofern an dieser Stelle von der Streckgrenze des Schweißzusatzwerkstoffs und des Grundwerkstoffs gesprochen wird, handelt es sich hierbei um die Nennwerte (Mindestwerte des zulässigen Bereichs) entsprechend den jeweiligen Produktnormen.

$$M = \frac{f_{y,SZW}}{f_{y,GW}} \quad [-] \quad (6.1)$$

mit

$f_{y,SZW}$	Streckgrenze des Schweißzusatzwerkstoffs	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{y,GW}$	Streckgrenze des Grundwerkstoffs	[N/mm <sup>2</sup> ]

Ist der Mismatch-Faktor  $M$  kleiner als 1 spricht man von einer Undermatching-, bei  $M = 1$  von einer Matching- (oder Evenmatching-) und bei  $M > 1$  von einer Overmatching-Verbindung.

Tab. 6-6: Mismatch-Faktor  $M$ 

<b>Mismatch-Faktor <math>M</math></b>	<b>Verbindungstyp</b>
< 1	Undermatching
= 1	Matching (oder Evenmatching)
> 1	Overmatching

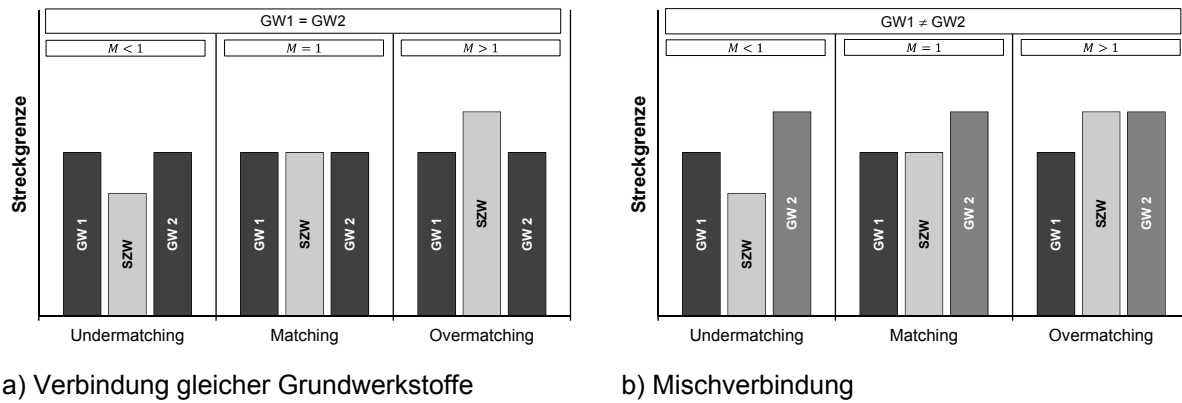


Abb. 6-5: Qualitative Darstellung des Mismatch-Faktors bei Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen

In Abb. 6-5 ist qualitativ der Mismatch-Faktor für a) Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und für b) Mischverbindungen dargestellt. Im Gegensatz zu Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe sind Mischverbindungen dadurch gekennzeichnet, dass die Festigkeiten der Grundwerkstoffe bei einer davon abweichenden Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs nicht identisch sind.

In DIN EN 1993-1-8 [9] Abschnitt 4.2 (2) wird explizit für die Wahl der Schweißzusätze verlangt, dass „die für das Schweißgut spezifizierten Werte der Streckgrenze, Bruchfestigkeit, ... in der Regel mindestens den spezifizierten Werten für den verschweißten Grundwerkstoff entsprechen müssen.“ Die Wahl des Schweißzusatzwerkstoffs ist bei Mischverbindungen dementsprechend nach dem Grundwerkstoff mit der höheren Festigkeit auszurichten. Die Bestimmung des Mismatch-Faktors  $M$  für Mischverbindungen orientiert sich jedoch am Bemessungskonzept nach DIN EN 1993-1-8 [9] Abschnitt 4.5.3.2 (6). Demzufolge darf bei der Bemessung nur der Festigkeitswert des schwächeren Grundwerkstoffs angesetzt werden. Der Mismatch-Faktor  $M$  für Mischverbindungen bestimmt sich demzufolge aus dem Quotient der Streckgrenze des Schweißzusatzwerkstoffs und der Streckgrenze des Grundwerkstoffs mit der geringeren Festigkeit.

$$M = \frac{f_{y,SZW}}{\min f_y \{f_{y,GW1}; f_{y,GW2}\}} \quad [-] \quad (6.2)$$

mit

$f_{y,SZW}$  Streckgrenze des Schweißzusatzwerkstoffs [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\min f_y$  Streckgrenze des Grundwerkstoffs mit der geringeren Festigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

## 6.3.3.3 Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe

Grundsätzlich gilt für alle Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe, dass sich die Festigkeit der verwendeten Grundwerkstoffe nicht unterscheiden ( $GW 1 = GW 2$ ). Die drei verwendeten Grundwerkstoffe wurden jeweils mit Massivdrähten der Festigkeitsklassen G46, G69 und G89 entsprechend Tab. 6-2 verschweißt. Jeweils ein Versuchskörper wurde mit minimaler und mit maximaler Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  vollmechanisiert hergestellt. Die Schweißprozessparameter sind Kapitel 6.3.4 zu entnehmen. Es wurden sowohl Undermatching- als auch Overmatchingverbindungen hergestellt, um so den Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs herauszuarbeiten. In Tab. 6-7 ist eine Übersicht über die insgesamt 16 Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe inklusive dem Mismatch-Faktor  $M$  gegeben.

Tab. 6-7: Versuchskonfigurationen der Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe

Grundwerkstoff		Schweißzusatzwerkstoff	Mismatch-Faktor	Schweißgeschwindigkeit	Mechanisierungsgrad	Anzahl
GW 1	GW 2	SZW	$M$ [-]	$v_s$		$n$ [-]
S355 J2+N	S355 J2+N	G46	1,3	min $v_s$ max $v_s$	vollmechanisiert	1 1
		G69	1,9	min $v_s$ max $v_s$	vollmechanisiert	1 1
S460 ML	S460 ML	G46	1,0	min $v_s$ max $v_s$	vollmechanisiert	1 1
		G69	1,5	min $v_s$ max $v_s$	vollmechanisiert	1 1
		G89	1,9	min $v_s$ max $v_s$	vollmechanisiert	1 1
S690 QL	S690 QL	G46	0,7	min $v_s$ max $v_s$	vollmechanisiert	1 1
		G69	1,0	min $v_s$ max $v_s$	vollmechanisiert	1 1
		G89	1,3	min $v_s$ max $v_s$	vollmechanisiert	1 1



## 6.3.3.4 Mischverbindungen

Als Mischverbindungen ( $GW\ 1 \neq GW\ 2$ ) wurden zwei Hauptgruppen gebildet, bei der jeweils der Grundwerkstoff 2 mit der Stahlgüte S690 QL konstant blieb und Grundwerkstoff 1 zwischen den beiden Stahlgüten S355 J2+N und S460 ML variierte.

- Hauptgruppe 1: S355 J2+N / S690 QL
- Hauptgruppe 2: S460 ML / S690 QL

Diese beiden Gruppen wurden jeweils mit den Massivdrähten der Festigkeitsklassen G46, G69 und G89 kombiniert.

Um eine mögliche Streuung der Ergebnisse und den Einfluss des Mechanisierungsgrades herauszufiltern, wurden jeweils zwei Versuchskörper einer Konfiguration teilmechanisiert hergestellt und ein Versuchskörper gleicher Konfiguration vollmechanisiert gefertigt. Außerdem wurde die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  variiert. Insgesamt wurden 36 Versuchskörper als Mischverbindungen hergestellt.

Tab. 6-8: Versuchskonfigurationen der Hauptgruppe 1: S355 J2+N / S690 QL

Grundwerkstoff		Schweißzusatzwerkstoff SZW	Mismatch-Faktor $M$ [-]	Schweißgeschwindigkeit $v_s$	Mechanisierungsgrad	Anzahl $n$ [-]		
GW 1	GW 2							
S355 J2+N	S690 QL	G46	1,3	min $v_s$	teilmechanisiert	2		
					vollmechanisiert	1		
				max $v_s$	teilmechanisiert	2		
					vollmechanisiert	1		
				G69	1,9	min $v_s$	teilmechanisiert	2
							vollmechanisiert	1
		max $v_s$	teilmechanisiert			2		
			vollmechanisiert			1		
		G89	2,5			min $v_s$	teilmechanisiert	2
							vollmechanisiert	1
				max $v_s$	teilmechanisiert	2		
					vollmechanisiert	1		

Tab. 6-9: Versuchskonfigurationen der Hauptgruppe 2: S460 ML / S690 QL

Grundwerkstoff		Schweißzusatzwerkstoff SZW	Mismatch-Faktor $M$ [-]	Schweißgeschwindigkeit $v_s$	Mechanisierungsgrad	Anzahl $n$ [-]		
GW 1	GW 2							
S460 ML	S690 QL	G46	1,0	min $v_s$	teilmechanisiert	2		
					vollmechanisiert	1		
				max $v_s$	teilmechanisiert	2		
					vollmechanisiert	1		
				G69	1,5	min $v_s$	teilmechanisiert	2
							vollmechanisiert	1
		max $v_s$	teilmechanisiert			2		
			vollmechanisiert			1		
		G89	1,9			min $v_s$	teilmechanisiert	2
							vollmechanisiert	1
				max $v_s$	teilmechanisiert	2		
					vollmechanisiert	1		

In den folgenden Diagrammen wird aus Gründen der Übersichtlichkeit der Mechanisierungsgrad *teilmechanisiert* mit *m* (engl.: *manual*) und *vollmechanisiert* mit *a* (engl.: *automatic*) abgekürzt. Außerdem werden die Zusatzsymbole der verwendeten Baustähle ebenfalls aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht weiter geführt.

### 6.3.4 Schweißprozessparameter

Für die Ermittlung der Schweißprozessparameter (vgl. Kapitel 3.6 und Kapitel 3.7) wurde in einem ersten Schritt das *CE*- bzw. das *CET*-Äquivalent nach dem Stahleisenwerkstoffblatt [41] herangezogen, um auch der Kaltrissanfälligkeit vorzubeugen. Aus dem *CET*-Äquivalent, der Wärmeeinbringung  $Q$  und der Blechdicke  $d$  wurde die Mindestvorwärmtemperatur  $T_p$  nach Gleichung (3.1) errechnet, die einzuhalten ist, um Kaltrisse zu vermeiden. Für alle Versuchskonfigurationen wurde eine durchweg einheitliche Vorwärmtemperatur von  $T_p = 120\text{ °C}$  festgelegt. In einem zweiten Schritt wurden in zahlreichen Testschweißungen die Schweißprozessparameter abgeglichen und festgelegt.

Für die Schweißungen kam als Schweißverfahren das Metall-Aktivgasschweißen 135 (Metall-Aktivgasschweißen mit Massivdrahtelektrode und Mischgas) nach DIN EN ISO 14341 [33] und DIN EN ISO 16834 [36] zur Anwendung. Dabei wurde als Schutzgas ein Mischgas M21-ArC-18 (Corgon® 18: 82 % Argon / 18 % CO<sub>2</sub>) nach DIN EN ISO 14175 [32] eingesetzt. In Tab. 6-10 sind die SOLL-Werte der Schweißprozessparameter sowohl für die Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe als auch die Mischverbindungen aufgelistet.

Tab. 6-10: SOLL-Werte der Schweißprozessparameter für die Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen

Naht- geometrie	Spannung $U$ [V]	Schweiß- strom $I$ [A]	Vorwärm- temperatur $T_p$ [C°]	Schutzgas	Schweiß- position	Draht- vorschub [m/min]	Schweiß- verfahren
Einlagig	30	284	120	Corgon® 18	PB	9,7	MAG 135

Abb. 6-6 und Abb. 6-7 zeigen exemplarisch, anhand der Werkstoffkombination S355 J2+N / S690 QL mit dem Schweißzusatzwerkstoff G69, das Arbeitsfenster für die in Tab. 6-10 gegebenen SOLL-Werte der Schweißprozessparameter.

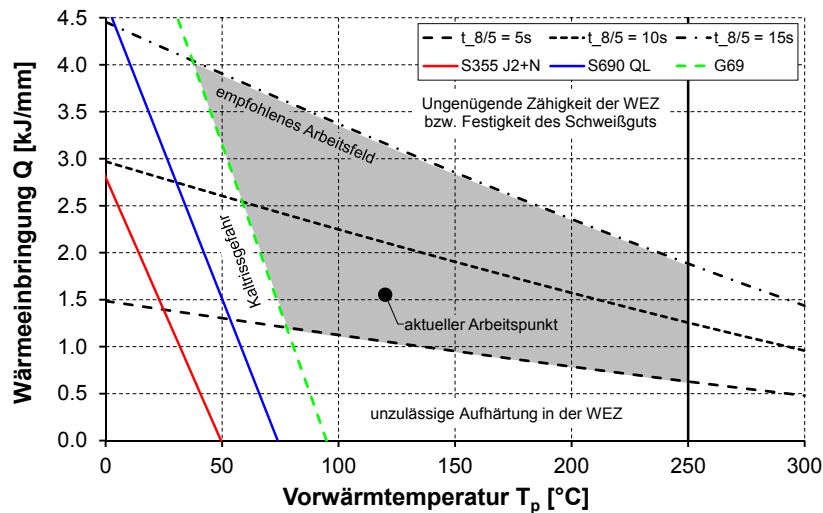


Abb. 6-6: Arbeitsfenster für S355/S690-G69, vollmechanisiert geschweißt,  
Schweißgeschwindigkeit:  $\min v_s = 28 \text{ cm/min}$

Für einen vollmechanisiert hergestellten Versuchskörper ergibt sich für eine minimal gewählte Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  von 28 cm/min bei einer Vorwärmtemperatur von 120 °C eine Wärmeeinbringung  $Q$  von 1,6 kJ/mm.

Abb. 6-7 zeigt für die gleiche Werkstoffkombination den Arbeitspunkt für eine maximal gewählte Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  von 38 cm/min mit einer Wärmeeinbringung  $Q$  von 1,1 kJ/mm.

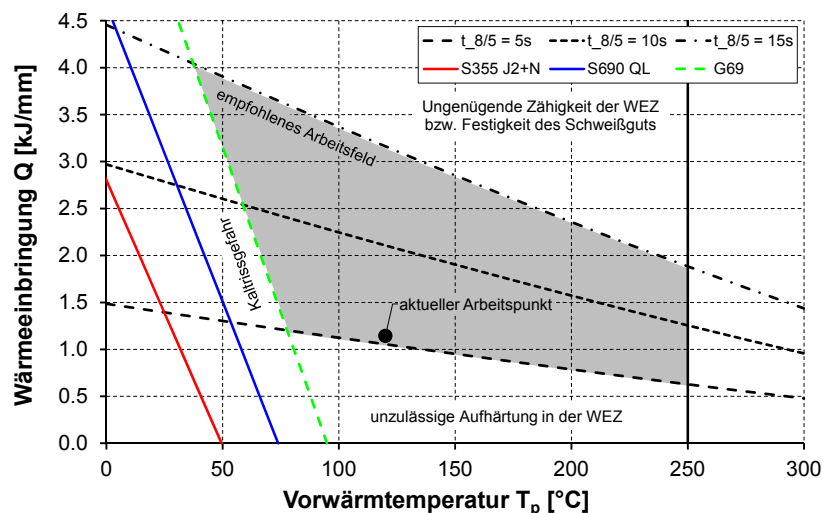


Abb. 6-7: Arbeitsfenster für S355/S690-G69, vollmechanisiert geschweißt,  
Schweißgeschwindigkeit:  $\max v_s = 38 \text{ cm/min}$

Während des Schweißprozesses wurden die IST-Werte für die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$ , die Spannung  $U$ , den Strom  $I$  und die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  aufgezeichnet. Diese Werte und die daraus berechnete Streckenenergie  $E$  sind in Tab. 6-11 für die Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und in Tab. 6-12 für die Mischverbindungen aufgeführt.

Tab. 6-11: IST-Werte der Schweißprozessparameter der Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe

Versuchskörperkonfiguration			$v_s$	$v_s$	$U$	$I$	$E$	$t_{8/5}$
			SOLL	IST	IST	IST	IST	IST
			[cm/min]	[cm/min]	[V]	[A]	[kJ/mm]	[s]
S355-S355	G46	min $v_s$	28	28,62	30,10	300,56	1,90	10,68
		max $v_s$	38	37,56	30,27	289,21	1,40	6,45
	G69	min $v_s$	28	28,70	30,06	298,25	1,87	9,51
		max $v_s$	38	38,12	30,21	285,98	1,36	5,82
S460-S460	G46	min $v_s$	28	28,60	30,05	301,90	1,90	10,97
		max $v_s$	38	37,92	30,19	296,70	1,42	6,38
	G69	min $v_s$	28	28,64	30,16	292,17	1,85	9,01
		max $v_s$	38	38,09	30,13	296,58	1,41	6,09
	G89	min $v_s$	28	28,53	29,96	304,95	1,92	10,76
		max $v_s$	38	38,05	29,94	305,88	1,44	6,49
S690-S690	G46	min $v_s$	28	28,54	30,31	293,75	1,87	9,61
		max $v_s$	38	38,08	30,35	286,21	1,37	6,25
	G69	min $v_s$	28	28,58	30,33	286,81	1,83	8,86
		max $v_s$	38	38,04	30,30	287,31	1,37	5,32
	G89	min $v_s$	28	28,64	30,03	302,51	1,90	9,82
		max $v_s$	38	37,98	30,09	297,43	1,41	5,30

Da pro Versuchskörper jeweils zwei Flankenkehlnähte geschweißt wurden, sind in Tab. 6-11 und Tab. 6-12 jeweils die Werte der Naht aufgelistet, die bei der späteren Traglastprüfung zuerst versagte. Sofern beide Nähte gleichzeitig versagten, wurde ein Mittelwert aus den Prozessparametern von Naht 1 und Naht 2 gebildet.

Tab. 6-12: IST-Werte der Schweißprozessparameter der Mischverbindungen

Versuchskörperkonfiguration			$v_s$	$v_s$	$U$	$I$	$E$	$t_{8/5}$	
			SOLL	IST	IST	IST	IST	IST	
			[cm/min]	[cm/min]	[V]	[A]	[kJ/mm]	[s]	
G46	min $v_s$	m-1	32	32,28	30,19	281,55	1,58	11,32	
		m-2	32	32,08	30,61	260,31	1,49	8,94	
		a	28	28,57	30,32	286,69	1,83	10,56	
	max $v_s$	m-1	42	41,88	30,13	284,22	1,23	8,01	
		m-2	32	32,24	30,06	287,31	1,61	11,12	
		a	38	38,00	30,30	287,60	1,38	6,52	
	S355-S690	min $v_s$	m-1	19	19,83	30,65	250,39	2,32	25,80
			m-2	28	28,15	29,69	251,21	1,59	8,70
			a	28	28,61	30,27	288,46	1,83	8,65
max $v_s$		m-1	34	33,98	30,38	261,79	1,40	9,33	
		m-2	36	35,75	30,41	259,82	1,33	8,03	
		a	38	40,78	30,26	284,90	1,28	5,77	
G89		min $v_s$	m-1	30	29,71	30,58	254,33	1,57	9,86
			m-2	26	25,57	30,43	262,31	1,87	17,82
			a	28	28,57	30,02	301,45	1,90	9,61
	max $v_s$	m-1	35	35,12	30,43	260,37	1,35	6,25	
		m-2	34	34,15	30,09	282,28	1,49	5,64	
		a	38	37,89	29,93	305,25	1,45	5,30	

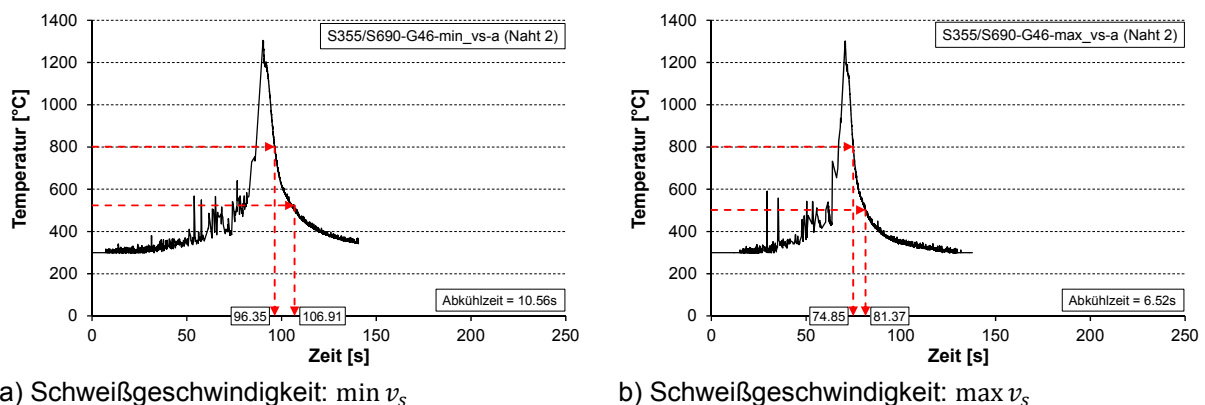
Fortsetzung von Tab. 6-12

Versuchskörperkonfiguration			$v_s$	$v_s$	$U$	$I$	$E$	$t_{8/5}$	
			SOLL	IST	IST	IST	IST	IST	
			[cm/min]	[cm/min]	[V]	[A]	[kJ/mm]	[s]	
G46	min $v_s$	m-1	29	29,00	30,63	257,67	1,63	10,50	
		m-2	21	21,46	30,29	270,65	2,29	26,29	
		a	28	28,63	30,36	288,39	1,83	10,55	
	max $v_s$	m-1	38	36,55	29,96	291,86	1,44	7,89	
		m-2	35	35,82	30,55	263,92	1,35	7,69	
		a	38	38,04	30,37	285,29	1,37	6,10	
S460-S690	G69	min $v_s$	m-1	25	24,86	29,99	281,24	2,04	13,00
			m-2	29	29,72	30,26	269,00	1,64	k.A.
			a	28	28,64	30,25	287,20	1,82	10,00
	max $v_s$	m-1	34	34,29	30,39	263,88	1,40	9,36	
		m-2	38	37,23	30,39	263,43	1,29	5,91	
		a	38	38,15	30,26	286,62	1,36	5,86	
G89	min $v_s$	m-1	31	31,43	30,12	277,41	1,60	12,15	
		m-2	30	29,62	30,13	277,39	1,69	13,39	
		a	28	28,57	29,98	303,64	1,91	9,79	
	max $v_s$	m-1	34	34,49	30,77	246,46	1,32	9,33	
		m-2	34	34,14	30,34	267,59	1,43	7,45	
		a	38	37,95	29,97	303,58	1,44	5,34	

m = teilmechanisiert  
a = vollmechanisiert

m-1: Versuchskörper 1 | m-2: Versuchskörper 2

Die in Tab. 6-11 und Tab. 6-12 aufgeführten Werte für die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  wurden mittels eines Pyrometers ermittelt. Hierbei wurde beim Abkühlen der Schweißraupe die Abkühlzeit von 800 °C auf 500 °C auf der Oberfläche der Naht gemessen (vgl. Abb. 3-5) und wie in Abb. 6-8 aufgezeichnet und ausgewertet. Der dargestellte Temperatur-Zeit-Verlauf setzt sich aus einer kurzen Aufheizphase und einer im Allgemeinen wesentlich längeren Abkühlphase zusammen. In Abb. 6-8 zeigt sich anschaulich, dass bei Annäherung des Lichtbogens die Temperatur rasch auf einen Höchstwert ansteigt und nach dem Durchgang des Lichtbogens wieder abfällt, wobei sich dabei die Abkühlgeschwindigkeit stetig verringert. Im Schweißgut selbst werden überall gleiche Spitzentemperaturen auftreten, wobei die verschiedenen Bereiche der Wärmeeinflusszone auf unterschiedliche Spitzenwerte erwärmt werden.

a) Schweißgeschwindigkeit: min  $v_s$ b) Schweißgeschwindigkeit: max  $v_s$ Abb. 6-8: Bestimmung der Abkühlzeit  $t_{8/5}$

In einer Gegenüberstellung des Temperatur-Zeit-Verlaufs in Abb. 6-8 wird deutlich, dass auf eine a) niedrig gewählte Schweißgeschwindigkeit ( $\min v_s$ ) ein höhere Abkühlzeit  $t_{8/5}$  folgt. Demgegenüber bedingt eine b) hohe Schweißgeschwindigkeit ( $\max v_s$ ) eine geringe Abkühlzeit  $t_{8/5}$ .

#### 6.4 Versuchsdurchführung

Die experimentellen Untersuchungen wurden an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMPA)), Fachbereich 2: Baukonstruktionen und Werkstofftechnik, Abteilung 21: Baukonstruktionen und Bauteilprüfung durchgeführt. Die Prüfung der Versuchskörper erfolgte in einer servo-hydraulischen Prüfmaschine (Fa. Schenk) mit einer maximalen Maschinenkraft von 1 MN. In Abb. 6-9 ist ein eingebauter Versuchskörper in der Prüfmaschine dargestellt.

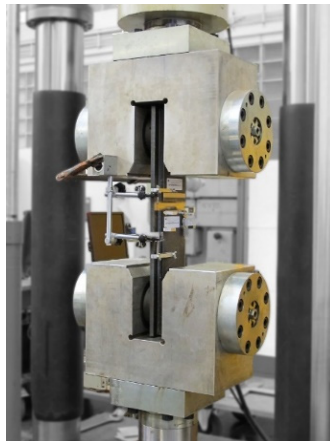


Abb. 6-9: Schenk 1 MN Prüfmaschine mit eingebautem Versuchskörper

Die Versuchskörper mit Nahtlängen von überwiegend 100 mm wurden weggesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,5 mm/min bis zum Versagen der Schweißnähte bei Raumtemperatur geprüft. Teilweise war die Maschinenkraft nicht ausreichend, so dass die Nahtlänge bei ausgewählten Versuchskörpern auf eine Länge von 70 mm oder gar teilweise 50 mm gekürzt werden musste. Die Kraftmessung erfolgte über eine in die Prüfmaschine integrierte Kraftmessdose. Neben der Aufzeichnung des Traversenweges wurde die Verformung gemäß Abb. 6-10 mit vier induktiven Wegaufnehmern (HBM W5TK) gemessen. Mit Hilfe der beiden Wegaufnehmer DT\_1\_ex und DT\_2\_ex wurde die Absolutverschiebung des Nahtanfangs (DT\_1\_ex) und des Nahtendes (DT\_2\_ex) gemessen. Die Relativverschiebung des Schweißnahtanfangs konnte mit DT\_1 und des Schweißnahtendes mit DT\_2 aufgezeichnet werden. Für die Evaluation der Schweißnahtverformung wurde die Relativverschiebung am Nahtanfang DT\_1 ausgewertet.

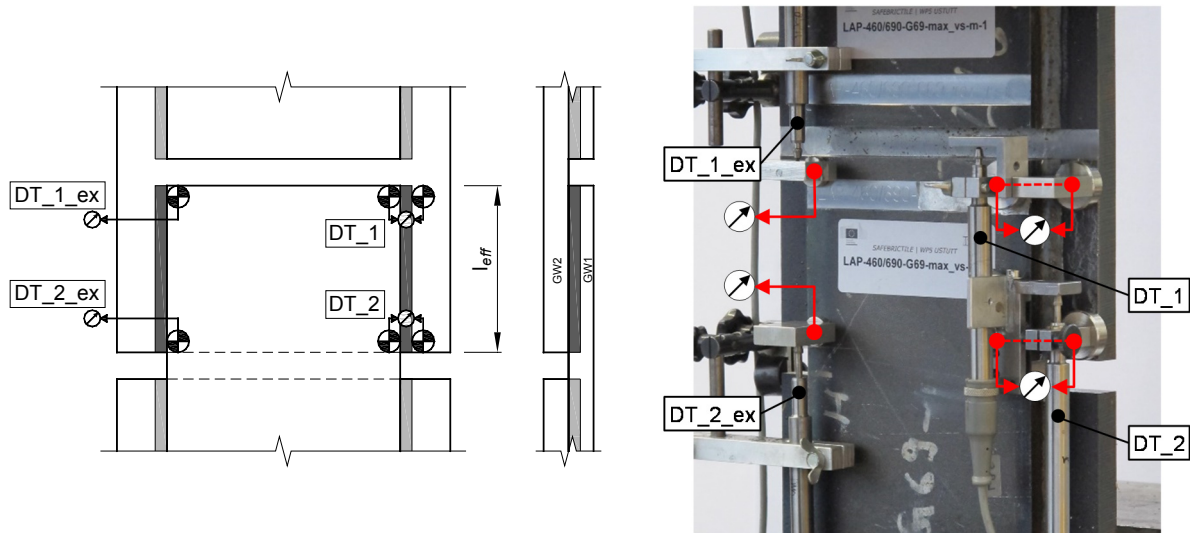


Abb. 6-10: Messvorrichtung der experimentellen Untersuchungen

Nach dem Versagen des Versuchskörpers wurde die Bruchfläche der zuerst versagten Naht gekennzeichnet, um eine Nachverfolgung für die anschließenden Begleituntersuchungen zu gewährleisten.

## 6.5 Begleituntersuchungen

### 6.5.1 Allgemeines

Zusätzlich zu den Traglast- und Verformungsuntersuchungen wurden aufwändige Begleituntersuchungen durchgeführt. Anhand von Makroschliffen konnten Härtemessungen erstellt und die tatsächliche Nahtdicke bestimmt werden, um so eine detaillierte Kenntnis über die Schweißverbindung zu erhalten. Weiterhin wurde mittels der Methode des *Reverse Engineering* die Bruchflächen der Nähte dreidimensional rekonstruiert.

Bei der Herstellung der geschweißten Kehlnahtverbindungen stellt sich infolge der teilweisen Aufschmelzung des Werkstoffs und anschließendem Erstarren ein Volumendefizit in der Naht ein. Im Schweißgut entstehen daher Zug- und in den nahtnahen Bereichen Druckspannungen, sogenannte Schweißeigenspannungen. Zwar können durch eine geeignete Wahl der Schweißparameter und der Schweißreihenfolge die Spannungen auf ein Minimum begrenzt werden, jedoch ist es nicht möglich die Eigenspannungen komplett zu vermeiden. Der Einfluss dieser Eigenspannungen auf die Tragfähigkeit von Schweißverbindungen ist unter vorwiegend quasi-statischer Beanspruchung als nicht kritisch anzusehen, wenn ein Plastizieren des Werkstoffs möglich ist und die Eigenspannungen dadurch abgebaut werden können. Die maximale Schweißnahttragfähigkeit bildet sich i. d. R. erst nach dem Plastizieren der Schweißnaht aus, so dass eine Messung der Schweißeigenspannungen daher bei der Herstellung der Versuchskörper nicht durchgeführt wurde.

### 6.5.2 Makroschliffe und Nahtdickenbestimmung

An jedem Versuchskörper wurde nach der Versuchsdurchführung mindestens ein Prüfstück zur Herstellung eines Makroschliffs entnommen. Die Entnahme erfolgte in einem ungeprüften Teil des Versuchskörpers (vgl. Abb. 6-11) der zuerst versagten Naht. Bei teilmechanisiert geschweißten Versuchskörpern wurden insgesamt drei Prüfstücke entnommen, um so eine mögliche Streuung der Nahtdicke festzustellen (vgl. Abb. 6-12). An dem Makroschliff wurden zusätzlich zur Nahtdickenbestimmung auch Härtemessungen (vgl. Kapitel 6.5.3) durchgeführt.

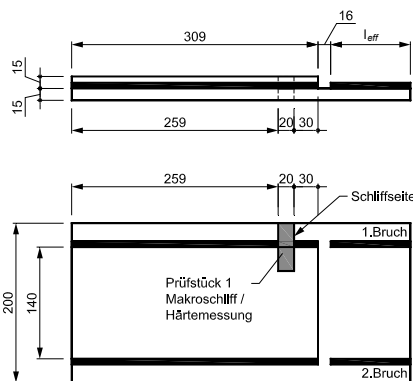


Abb. 6-11: Entnahme des Prüfstücks für Makroschliff und Härtemessungen

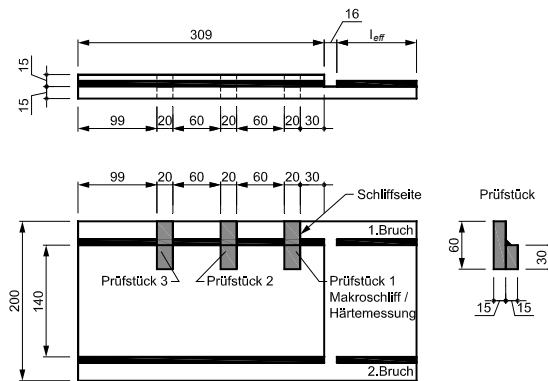


Abb. 6-12: Zusätzliche Entnahme von zwei weiteren Prüfstücken an teilmechanisiert geschweißtem Versuchskörpern

Die Makroschliffbilder erlauben eine genaue Bestimmung der Kehlnahtdicken ( $a_{EC}$  und  $a_{EC,th.}$ ) unter Berücksichtigung des Wurzelpunktes und der Einbrandtiefe (vgl. Abb. 6-13).

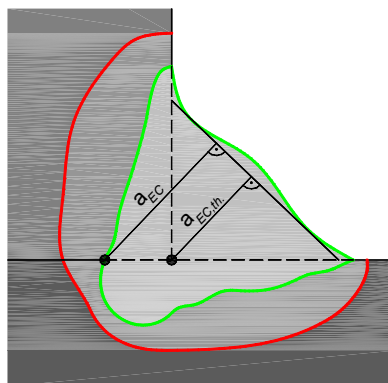


Abb. 6-13: Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8 [9]



### 6.5.3 Härtemessungen

Ein weiterer Untersuchungsabschnitt beinhaltet die Ermittlung der Härteprüfung nach Vickers, die an den angefertigten Makroschliffen durchgeführt wurde. Für die Härteprüfung wurde die Vickershärte HV10 durch Einzeleindrücke nach DIN EN ISO 9015-1 [31] bestimmt. Hierzu wurden 2 Härtemesspunkte pro Grundwerkstoff (GW 1, GW 2), je 3 Härtemesspunkte pro Wärmeinflusszone (WEZ 1 und WEZ 2) und 5 Härtemesspunkte im Schweißgut (SG) getätigt. Somit wurden insgesamt 15 Härtemesspunkte (HMP) pro Makroschliff erfasst. In Abb. 6-14 ist die Anordnung der Messreihe auf einem Makroschliff eines Versuchskörpers mit den Einzeleindrücken symbolisch dargestellt.

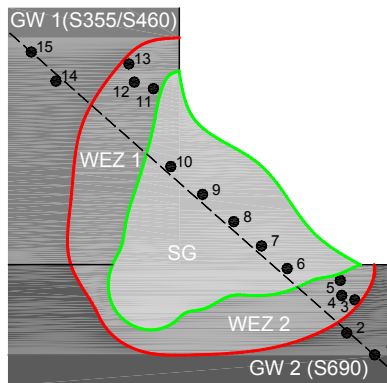


Abb. 6-14: Härtemessungen am Makroschliff

#### 6.5.4 Digitalisierung der Nahtbruchfläche

In Abb. 6-15 ist deutlich zu erkennen, dass während der Versuchsdurchführung stets zwei Flankenkehlnähte der Schubbeanspruchung ausgesetzt waren. Das Versagen des Versuchskörpers trat stets in der Kehlnaht auf, nie im Grundwerkstoff. In der Regel versagten die beiden Nähte nicht zum selben Zeitpunkt, so dass die zuerst versagte Naht eindeutig visuell identifiziert und gekennzeichnet werden konnte. Nach dem ersten Nahtversagen folgte schlagartig eine Kraftumlagerung auf die zweite noch intakte Naht, was demzufolge zu einem sofortigen Versagen der zweiten Naht führte.

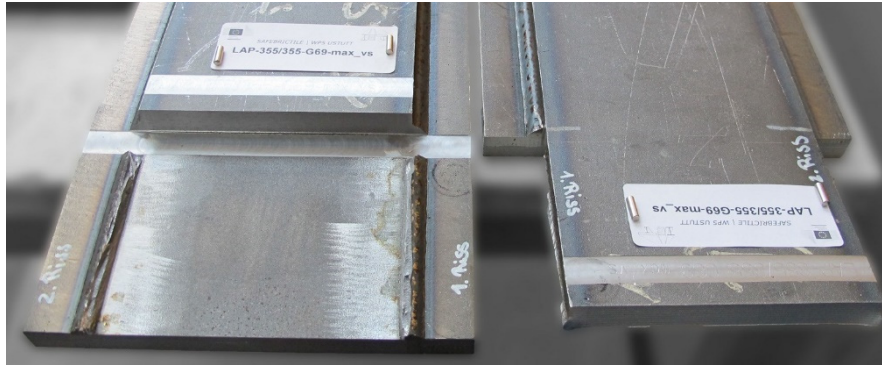
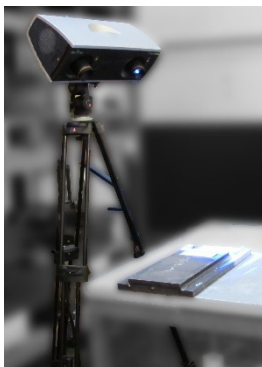


Abb. 6-15: Versuchskörperhälften nach der Versuchsdurchführung

Mit Hilfe eines Streifenlichtprojektors (Comet L3D) wurde auf Basis eines optischen Messverfahrens eine Flächenrückführung der Bruchfläche der zuerst versagten Naht durchgeführt (Reverse Engineering). Das bedeutet, dass die Nahtbruchflächen gescannt und somit ein dreidimensionales Modell der Topografie der Bruchfläche erstellt werden konnte (vgl. Abb. 6-16).



a) Streifenlichtprojektor



b) Topografie der Nahtbruchfläche

Abb. 6-16: Reverse Engineering

Anschließend wurden vier virtuelle Schnitte durch das dreidimensionale Modell gelegt, um so eine Ableitung der Fläche an vier diskreten Stellen aus dem dreidimensionalen Raum in der zweidimensionalen Ebene zu erhalten (vgl. Abb. 6-17).

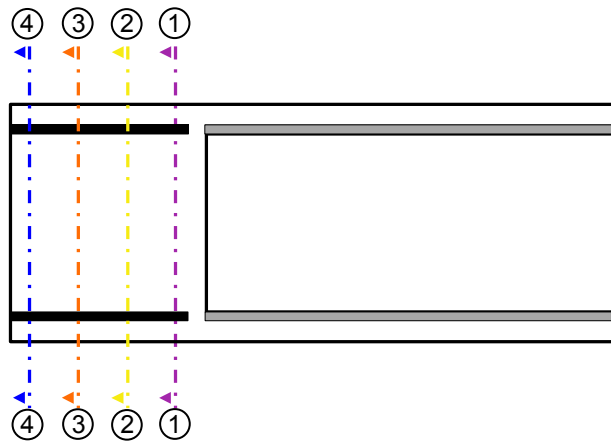
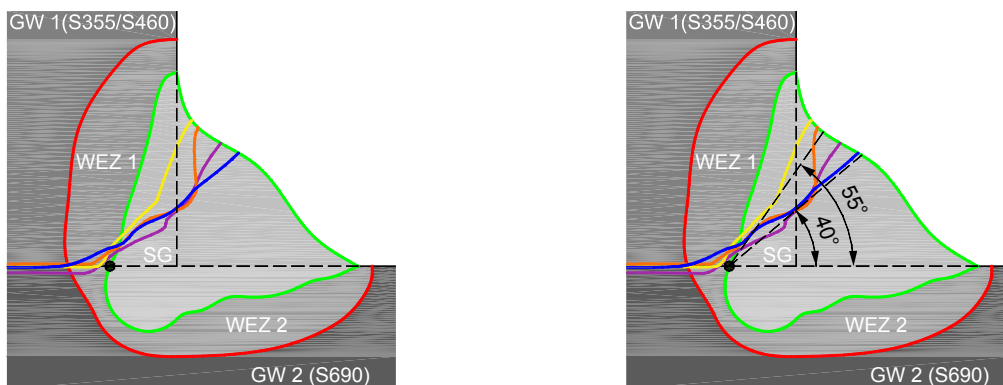


Abb. 6-17: Lage der virtuellen Schnitte durch die gescannte Nahtbruchfläche

Die so erzeugten Bruchflächen-Schnittkanten konnten auf die zugehörigen Makroschliffbilder projiziert werden. In Abb. 6-18 a) ist schematisch das so erzeugte Ergebnis dargestellt. Durch diesen Prozess kann der Verlauf der Bruchflächen-Schnittkanten in der Kehlnaht grafisch dargestellt werden und somit Rückschlüsse über das Bruchverhalten der jeweiligen Naht gezogen werden. Es wird somit klar ersichtlich, in welchem Bereich bzw. in welchem Bruchwinkelintervall der Bruch in der Naht stattfand (vgl. Abb. 6-18 b)). Hierzu wurde jeweils eine Ausgleichsgerade durch die beiden äußersten Bruchflächen-Schnittkanten grafisch bestimmt. Bei einem Winkel von  $45^\circ$  wäre der Bruch in der Mitte der Naht, dementsprechend mit gleichem Abstand zu Grundwerkstoff 1 und Grundwerkstoff 2. Besitzt der Winkel einen größeren Wert als  $45^\circ$ , ist die Tendenz des Bruches eher in Richtung des Grundwerkstoffs 1 als zu Grundwerkstoff 2. Die Analyse und Interpretation dieser gewonnenen Information erfolgt in Kapitel 8.6.



a) Projektion der Bruchflächen-Schnittkanten

b) Bestimmung Bruchwinkelintervall

Abb. 6-18: Bruchflächen-Schnittkanten und Bruchwinkelintervall

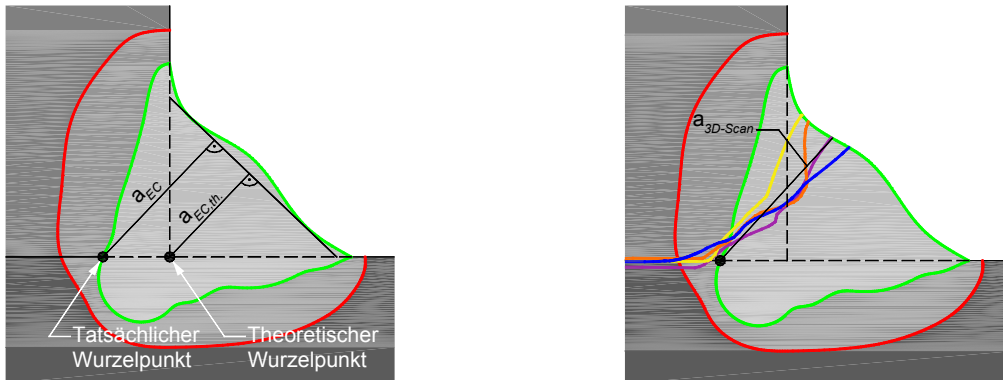
Die digital erfasste Nahtbruchfläche  $A_{3D-Scan}$  erfasst sowohl den Einbrand der Naht als auch die tatsächliche Topografie des Bruchs. Nach Gleichung (6.3) lässt sich aus der digitalisierten Nahtbruchfläche  $A_{3D-Scan}$  eine abgeleitete Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  der Bruchfläche bestimmen.

$$a_{3D-Scan} = \frac{A_{3D-Scan}}{l_{eff}} \quad [mm] \quad (6.3)$$

mit

$a_{3D-Scan}$	Abgeleitet Kehlnahtdicke der Nahtbruchfläche	[mm]
$A_{3D-Scan}$	Digitalisierte Nahtbruchfläche	[mm <sup>2</sup> ]
$l_{eff}$	Wirksame Schweißnahtlänge nach Abb. 4-2	[mm]

In Abb. 6-19 ist grafisch der Vergleich der Methoden zu Bestimmung der Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8 [9] mit der abgeleiteten Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  der Nahtbruchfläche nach Gleichung (6.3) dargestellt. Die beiden Kehlnahtdicken nach DIN EN 1993-1-8 [9] in Abb. 6-19 a) beziehen sich zum einen auf den theoretischen Wurzepunkt ( $a_{EC,th.}$ ) und zum anderen auf den tatsächlichen Wurzepunkt ( $a_{EC}$ ).



a) Kehlnahtdicken nach DIN EN 1993-1-8 [9]

b) Abgeleitete Kehlnahtdicke aus Nahtbruchfläche

Abb. 6-19: Grafischer Vergleich der drei Methoden zur Nahtdickenbestimmung

Im Gegensatz dazu stellt die Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  eine abgeleitete Größe der Projektion der Topografie der Nahtbruchfläche dar. Darüber hinaus zeigt sich in Abb. 6-19 b) ein entscheidender Vorteil der Bruchflächen-Schnittkanten: Es ist deutlich zu erkennen, dass der Bruch durch die Naht und auch durch den tatsächlichen Wurzepunkt verläuft. Demzufolge unterscheiden sich die Kehlnahtdicke bei tiefem Einbrand ( $a_{EC}$ ) und die abgeleitete Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  der Nahtbruchfläche nur geringfügig. Für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit wird aufgrund der detaillierteren Abbildung die nach Gleichung (6.3) abgeleitete Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  zugrunde gelegt.

## 6.6 Ergebnisgrößen: Tragfähigkeit

### 6.6.1 Schubspannung

Die Kehlnähte werden während den Traglastprüfungen planmäßig auf Schub beansprucht, so dass die dadurch ermittelte Längsschubspannung mit  $\tau_{\parallel}$  bezeichnet wird. Entsprechend Gleichung (6.5) ergibt sich die maximale Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$  in der Naht aus der im Versuch maximal gemessenen Prüfkraft  $F_{max}$  dividiert durch die wirksame Kehlnahtfläche  $A_w$ . Der Faktor 2 rührt daher, dass der Versuchskörper zwei Kehlnähte besitzt (vgl. Abb. 6-2 und Abb. 6-3). Nach DIN EN 1993-1-8 [9] Abschnitt 4.5.3.2 (2) ist die wirksame Kehlnahtfläche  $A_w$  entsprechend Gleichung (4.6) definiert:

$$A_w = \sum a \cdot l_{eff} \quad [mm^2] \quad (6.4)$$

mit

$a$	Wirksame Nahtdicke	[mm]
$l_{eff}$	Wirksame Schweißnahtlänge nach Abb. 4-2	[mm]

An dieser Stelle wird von der Vorstellung ausgegangen, dass sich zum Zeitpunkt der maximalen gemessenen Prüfkraft  $F_{max}$  gleichförmig ausplastizierte Nähte eingestellt haben, so dass auf dieser Basis die maximal ertragbaren Spannungen  $\tau_{\parallel,max}$  nach Gleichung (6.5) ermittelt werden können.

$$\tau_{\parallel,max} = \frac{F_{max}}{A_w} = \frac{F_{max}}{2 \cdot a \cdot l_{eff}} \quad [N/mm^2] \quad (6.5)$$

mit

$F_{max}$	Maximal gemessene Prüfkraft	[kN]
$A_w$	Wirksame Kehlnahtfläche	[mm <sup>2</sup> ]
$a$	Wirksame Nahtdicke	[mm]
$l_{eff}$	Wirksame Schweißnahtlänge nach Abb. 4-2	[mm]

Für die wirksame Nahtdicke  $a$  kann je nach Auswerteverfahren entweder eine der am Makroschliff ermittelten Nahtdicken ( $a_{EC,th.}$  oder  $a_{EC}$ ) oder die von der digitalisierten Nahtbruchfläche abgeleitete Nahtdicke  $a_{3D-Scan}$  angesetzt werden (vgl. Abb. 6-19).

### 6.6.2 Schubfluss

Einer der zu untersuchenden Parameter im Rahmen des Versuchsprogramms ist die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$ , die sich zwischen einem minimalen ( $\min v_s$ ) und einem maximalen ( $\max v_s$ ) Wert bewegt. Bereits an dieser Stelle sei auf die Abb. 8-5 in Kapitel 8.3 verwiesen, in der deutlich ersichtlich wird, dass ein Zusammenhang zwischen Schweißgeschwindigkeit und Nahtdicke besteht. In Kapitel 6.6.1 wird erläutert, dass bei der Berechnung der Schubspannung in Gleichung (6.5) die Nahtdicke  $a$  in den Nenner mit eingeht. Demzufolge besteht eine Korrelation zwischen der Nahtdicke  $a$  und der Schubspannung  $\tau_{\parallel, \max}$ .

Eine von der wirksamen Nahtdicke  $a$  unabhängige Ergebnisgröße stellt der Schubfluss  $T_{\parallel, \max}$  dar.  $T_{\parallel, \max}$  berechnet sich nach Gleichung (6.6) als Quotient aus maximal gemessener Prüfkraft  $F_{\max}$  und wirksamer Schweißnahtlänge  $l_{eff}$ . Der Faktor 2 ist darin begründet, dass die aufgebrachte Kraft über zwei Kehlnähte abgetragen wird.

$$T_{\parallel, \max} = \frac{F_{\max}}{2 \cdot l_{eff}} \quad [kN/mm] \quad (6.6)$$

mit

$F_{\max}$	Maximal gemessene Prüfkraft	[kN]
$l_{eff}$	Wirksame Schweißnahtlänge nach Abb. 4-2	[mm]

## 6.7 Ergebnisgrößen: Verformungsfähigkeit

### 6.7.1 Allgemeines

Die Verformung einer Flankenkehlnahtverbindung unter reiner Zugbeanspruchung wird in zwei Bereiche unterteilt: Die elastische und die plastische Verformung. Die Abgrenzung der beiden Bereiche erfolgt durch die Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn. Die Verformung zum Zeitpunkt des Probenversagens wird mit  $\Delta_u$  gekennzeichnet. Nachfolgend werden in Kapitel 6.7.2 die Methoden zur Bestimmung der Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn erläutert. Daran anschließend wird in Kapitel 6.7.3 auf die genaue Definition der Verformung  $\Delta_u$  zum Zeitpunkt des Probenversagens eingegangen. Die gesamte Vorgehensweise zur Evaluation des Verformungsvermögens wird in Kapitel 6.7.4 vorgestellt. Die sich daraus ergebenden Kenngrößen bilden die Grundlage für den in Kapitel 12 ermittelten analytischen Ansatz zur Verformungsberechnung einer Flankenkehlnaht.

### 6.7.2 Bestimmung der Verformung bei Fließbeginn

#### Methode 1: 10 % – $K_{ini}$

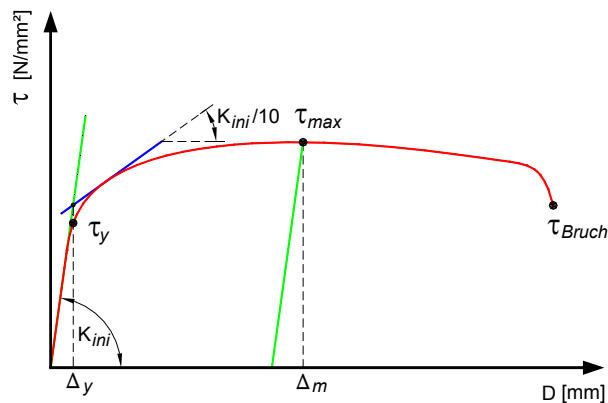


Abb. 6-20: Evaluation Fließbeginn - Methode 1

Methode 1 zur Bestimmung des Fließbeginns basiert auf einem Verfahren, das im ECCS Document *Recommended Testing Procedure for Assessing the Behaviour of Steel Elements under Cyclic Loads* [56] beschrieben wird. Hierbei wird ein Versuchsprotokoll für die Beurteilung und Bewertung des Verhaltens von Stahlbauteilen unter einer zyklischen Beanspruchung erläutert. Für das zyklische Belastungsprotokoll wird zuerst die Verformung zum Zeitpunkt des Fließbeginns bestimmt. Hierzu wird die Anfangssteifigkeit  $K_{ini}$  eines monoton quasi-statischen Zugversuchs mit Hilfe einer linearen Regression im elastischen Bereich ermittelt. Als repräsentativ hat sich ein Bereich zwischen 5 % und 25 – 30 % der maximalen Spannung erwiesen.

Die Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn und die zugehörige Spannung  $\tau_y$  ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Anfangssteifigkeit  $K_{ini}$  und einer Tangente an die Spannungs-Verformungs-Kurve mit einer Steigung von 10 % der Anfangssteifigkeit  $K_{ini}$ .

### Methode 2: 2/3 – $K_{ini}$

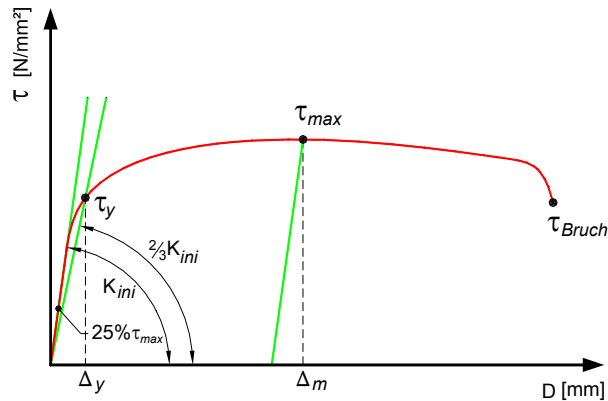


Abb. 6-21: Evaluation Fließbeginn - Methode 2

In Anlehnung an die Bestimmung der Rotationssteifigkeit in DIN EN 1993-1-8 [9] ist die Anfangssteifigkeit  $K_{ini}$  durch eine Gerade zwischen 0 % (Ursprung) und 25 % der maximalen Spannung  $\tau_{max}$  an der Spannungs-Verformungs-Kurve definiert. Der Schnittpunkt einer um 2/3 geneigten Gerade mit der Spannungs-Verformungs-Kurve bestimmt die Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn.

### Methode 3: 75 % / 100 %

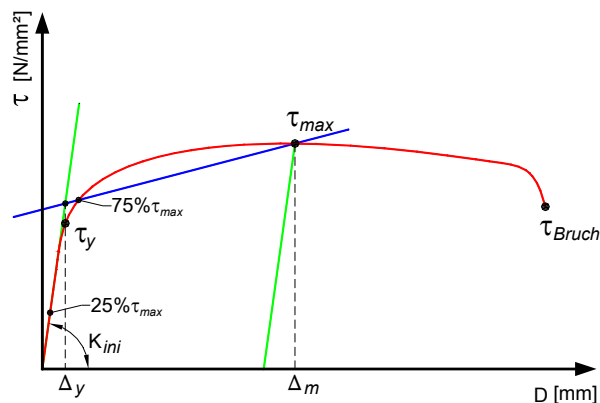


Abb. 6-22: Evaluation Fließbeginn - Methode 3

Die Anfangssteifigkeit  $K_{ini}$  wird durch eine Gerade zwischen 0 % (Ursprung) und 25 % der maximalen Spannung  $\tau_{max}$  an die Spannungs-Verformungs-Kurve bestimmt. Eine zweite Gerade ist durch 75 % und 100 % der maximalen Spannung  $\tau_{max}$  definiert. Der Schnittpunkt dieser beiden Geraden definiert die Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn.



## Methode 4: 3/4 - Regel

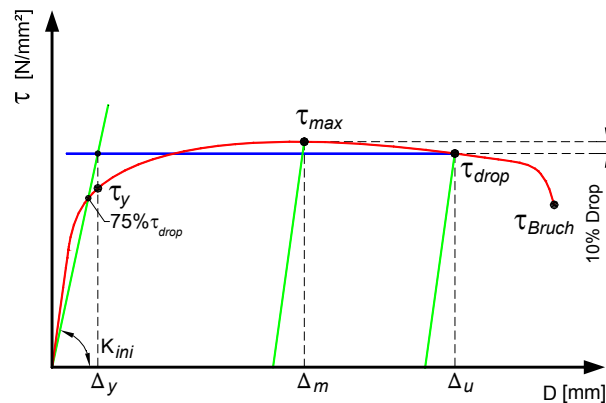


Abb. 6-23: Evaluation Fließbeginn - Methode 4

Die 3/4 - Regel zur Bestimmung der Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn wurde von Bachmann [44] mit der Definition von Duktilität in Zusammenhang mit der Erdbebensicherung von Bauwerken eingeführt. Bachmann definiert die Duktilität als „*Verhältnis einer totalen elastisch-plastischen Verformung zur elastischen Verformung bei Fließbeginn*“ auf Grundlage einer bilinearen, ideal elastisch-plastischen Kennlinie. In Abb. 6-23 ist ersichtlich, dass die experimentell ermittelte Spannungs-Verformungs-Kurve gekrümmt verläuft. Dementsprechend wird die idealisierte bilineare Kurve und insbesondere die als Bezugsgröße sehr wichtige Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn nach der sogenannten 3/4 - Regel ermittelt. Hierbei wird eine horizontale Fließgerade entsprechend einem rechnerischen Tragwiderstand angenommen und die elastische Gerade so eingelegt, dass sie den wirklichen Kraft-Verformungsverlauf bei 3/4 des Tragwiderstands kreuzt. Für die Auswertungen der experimentellen Untersuchungen hinsichtlich der Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn wurde der rechnerische Tragwiderstand auf Höhe der Spannung bei Probenversagen  $\tau_{drop}$  festgelegt. Die ausführliche Ermittlung des Probenversagen  $\tau_{drop}$  wird in Kapitel 6.7.3 erläutert. Ausgehend vom Schnittpunkt der elastischen und der horizontalen Gerade wird das Lot auf die Abszissenachse gefällt. Der Schnittpunkt der Lotgeraden mit der Spannungs-Verformungs-Kurve bildet die Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn nach Methode 4.

### 6.7.3 Bestimmung der Verformung bei Probenversagen

Bei einem spröden Werkstoff (bspw. bei einer HV-Schraube) lässt sich das Versagen bei einer Traglastprüfung durch einen abrupten Abfall des Kraft-Verformungsverlaufs deutlich erkennen. Im Gegensatz dazu gestaltet sich die Bestimmung des Versagens bei einem duktilen Werkstoff wesentlich komplexer. In diesem Zusammenhang sollen in diesem Kapitel die Begriffe *Probenversagen* und *Probenbruch* deutlich voneinander abgegrenzt werden. Hierzu werden drei Methoden vorgestellt, anhand derer sich das Probenversagen und die dazugehörige Verformung  $\Delta_u$  bestimmen lässt.

#### Methode I: 10 % - Drop

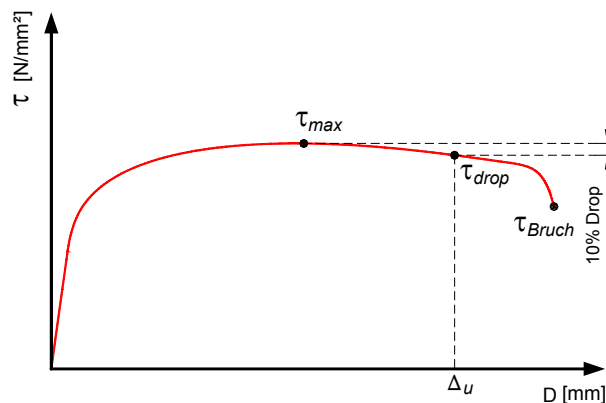


Abb. 6-24: Evaluation Probenversagen - Methode I

Das Probenversagen und die dazugehörige Verformung  $\Delta_u$  ist bei einem Lastabfall von 10 % der maximalen Spannung  $\tau_{max}$  definiert.

#### Methode II: Spannungsabfall pro Zeitintervall

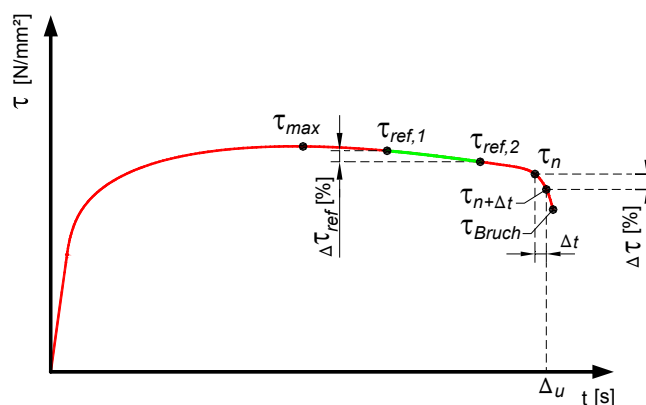


Abb. 6-25: Evaluation Probenversagen - Methode II

Methode II wurde in Anlehnung an Anhang A, Abschnitt A.4.6 der DIN EN ISO 6892-1 [30] entwickelt. Anfangs wird in einem manuell definierten Spannungsintervall im Nachtraglastbereich (siehe Abb. 6-25 grün markiert) der prozentuale tendenzielle Lastabfall  $\Delta\tau_{ref}$  entsprechend Gleichung (6.7) bestimmt:

$$\Delta\tau_{ref} = \frac{\tau_{ref,1} - \tau_{ref,2}}{\tau_{ref,1}} [\%] \quad (6.7)$$

Anschließend wird ein Startwert  $\tau_n$  [N/mm<sup>2</sup>] und ein Zeitintervall  $\Delta t$  [s] manuell definiert und der prozentuale Lastabfall innerhalb dieses Zeitintervalls nach Gleichung (6.8) bestimmt.

$$\Delta\tau = \frac{\tau_n - \tau_{n+\Delta t}}{\tau_n} [\%] \quad (6.8)$$

Das Probenversagen und die dazugehörige Verformung  $\Delta_u$  ist definiert, sobald der Quotient aus Lastabfall pro Zeitintervall und tendenziellem Lastabfall im Nachtraglastbereich einen manuell definierten Grenzwert von  $X$  % überschritten hat.

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta\tau_{ref}} > X [\%] \quad (6.9)$$

Im Rahmen der Auswertungen der Versuchsergebnisse des Forschungsprojekts *SAFEBRICKTILE* [52] hat sich als Grenzwert  $X$  im Mittel ein Wert von 5 % als plausibel und repräsentativ erwiesen.

### Methode III: Physikalischer Probenbruch

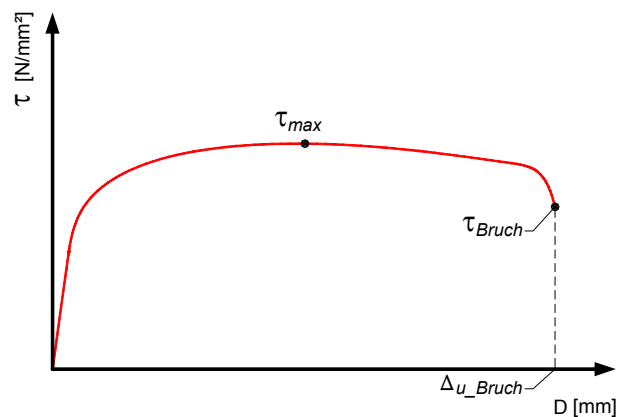


Abb. 6-26: Evaluation Probenversagen - Methode III

Bei Methode III ist das Probenversagen und die dazugehörige Verformung  $\Delta_u$  definiert als der letzte Datenpunkt im Datensatz (siehe Abb. 6-26). Dies entspricht der gesamten Verformung zum Zeitpunkt des physikalischen Probenbruchs.

### 6.7.4 Vorgehensweise zur Bestimmung der Verformungsfähigkeit

Bachmann definiert in [44] die Duktilität in Zusammenhang mit der Erdbebensicherung von Bauwerken als „Verhältnis einer totalen elastisch-plastischen Verformung zur elastischen Verformung bei Fließbeginn“ auf Grundlage einer bilinearen, ideal elastisch-plastischen Kennlinie. Nach Meinung des Autors ist allerdings der Begriff *Duktilität* bei der Bewertung des Verformungsverhaltens einer Schweißnahtverbindung, vor allem vor dem allgemeingültigen Verständnis von *Duktilität*, nicht adäquat. Deshalb wird im weiteren Verlauf der Arbeit der Begriff des *Verformungsvermögens* verwendet. Dieser Begriff vereint die Fähigkeit einer Verbindung vor dem Versagen, ohne Verlust seiner Tragfähigkeit, weitere Verformungen zu erfahren.

Für die Bestimmung des Verformungsvermögens an den zu untersuchenden Flankenkehlnahtverbindungen und den entsprechend zugehörigen Ergebnisgrößen sind die Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn und die Verformung  $\Delta_u$  bei Probenversagen von entscheidender Bedeutung. Die Auswertung des Verformungsvermögens der Flankenkehlnahtverbindungen erfolgt nach folgenden Methoden:

- Verformung bei Fließbeginn  $\Delta_y$ : **Methode 3 (75 % / 100 %)**
- Verformung bei Probenversagen  $\Delta_u$ : **Methode I (10 % - Drop)**

Beide Methoden sind in einem Diagramm in Abb. 6-27 zusammengefasst dargestellt. In Kapitel 8.7.2 und 8.7.3 werden die Entscheidungen für die jeweilige Methode detailliert begründet.

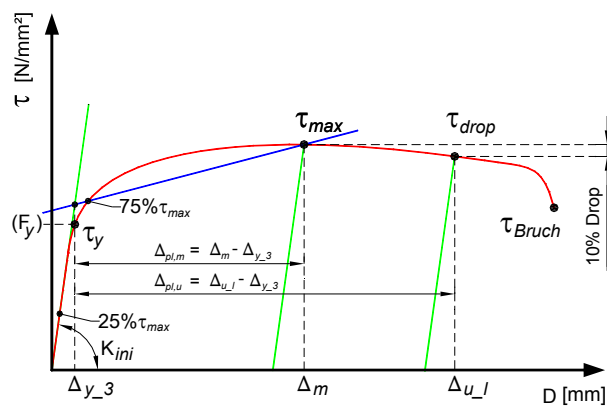


Abb. 6-27: Evaluation des Verformungsvermögens

Das plastische Verformungsvermögen einer Verbindung kann einerseits durch die Differenz der maximalen Verformung  $\Delta_m$  bei maximaler Spannung  $\tau_{max}$  zur Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn ermittelt werden.

$$\Delta_{pl,m} = \Delta_m - \Delta_y \quad [mm] \quad (6.10)$$

mit

$\Delta_{pl,m}$	Plastisches Verformungsvermögen (Bezug: Maximale Spannung $\tau_{max}$ )	[mm]
$\Delta_m$	Verformung bei maximaler Spannung $\tau_{max}$	[mm]
$\Delta_y$	Verformung bei Fließbeginn (Hier: $\Delta_{y,3}$ nach Methode 3)	[mm]

Andererseits kann auch der Bezug das Probenversagen sein, so dass sich das plastische Verformungsvermögen entsprechend Gleichung (6.11) ermittelt.

$$\Delta_{pl,u} = \Delta_u - \Delta_y \quad [mm] \quad (6.11)$$

mit

$\Delta_{pl,u}$	Plastisches Verformungsvermögen (Bezug: Probenversagen)	[mm]
$\Delta_u$	Verformung bei Probenversagen (Hier: $\Delta_{u,I}$ nach Methode I)	[mm]
$\Delta_y$	Verformung bei Fließbeginn (Hier: $\Delta_{y,3}$ nach Methode 3)	[mm]

Nach Meinung des Autors definiert sich das Verformungsvermögen als eine Eigenschaft einer Verbindung ohne Verlust der Tragfähigkeit weitere Verformungen zu erfahren. Dementsprechend wurde für die Auswertungen bzgl. der Verformungsfähigkeit an den Flankenkehlnahtverbindungen Gleichung (6.10) angewendet.

Für die Umrechnung der absoluten Größen in relative Größen werden die Kennwerte aus Gleichung (6.10) und (6.11) durch die wirksame Schweißnahtlänge  $l_{eff}$  (vgl. Tab. 7-1 und Tab. 7-2) entsprechend Gleichung (6.12) und (6.13) dividiert.

$$\varepsilon_{pl,m} = \frac{\Delta_{pl,m}}{l_{eff}} = \frac{\Delta_m - \Delta_y}{l_{eff}} \quad [\%] \quad (6.12)$$

$$\varepsilon_{pl,u} = \frac{\Delta_{pl,u}}{l_{eff}} = \frac{\Delta_u - \Delta_y}{l_{eff}} \quad [\%] \quad (6.13)$$

Neben dem plastischen Verformungsvermögen  $\varepsilon_{pl,m}$  und  $\varepsilon_{pl,u}$  sind die Verschiebeduktilität  $\mu_{\Delta,m}$  und das Duktilitätsvermögen  $\mu_{\Delta,u}$  weitere Indikatoren für das Verformungsvermögen eines Werkstoffs bzw. einer Verbindung.

Bachmann [44] definiert in Zusammenhang mit der Erdbebensicherung von Bauwerken die Verschiebeduktilität  $\mu_{\Delta,m}$  entsprechend Gleichung (6.14). Sie wird auch als *Duktilitätsbedarf* bezeichnet und gibt Auskunft darüber, bis zu welchem Vielfachen der Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn der Werkstoff bzw. die Verbindung verformt werden kann.

$$\mu_{\Delta,m} = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} [-] \quad (6.14)$$

Das Verformungsvermögen  $\mu_{\Delta,u}$  bis zum Erreichen des Probenbruchs wird als Grenzduktilität definiert.

$$\mu_{\Delta,u} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} [-] \quad (6.15)$$

## 7 Versuchsergebnisse an Flankenkehlnahtverbindungen

### 7.1 Versuchsergebnisse: Tragfähigkeit

Die Versuchsergebnisse aller durchgeführten Traglastversuche an Flankenkehlnahtverbindungen im Rahmen des Forschungsprojekts *SAFEBRICKTILE* [52] sind tabellarisch in Tab. 7-1 für die Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und in Tab. 7-2 für die Mischverbindungen dargestellt. Es sind die maximal gemessene Prüfkraft  $F_{max}$ , die wirksame Schweißnahtlänge  $l_{eff}$ , die digitalisierte Nahtbruchfläche  $A_{3D-Scan}$ , die abgeleitete Kehlnahtdicke der Nahtbruchfläche  $a_{3D-Scan}$ , die Kehlnahtdicke bei tiefem Einbrand  $a_{EC}$ , die Kehlnahtdicke bezogen auf den theoretischen Wurzelpunkt  $a_{EC,th.}$ , der maximale Schubfluss  $T_{\parallel,max}$  und die maximale Schubspannung  $\tau_{\parallel,max(3D-Scan)}$  aufgeführt.

Die dargestellten Spannungen  $\tau_{\parallel,max(3D-Scan)}$  ergeben sich aus der maximal gemessenen Prüfkraft  $F_{max}$  dividiert durch das Produkt aus wirksamer Schweißnahtlänge  $l_{eff}$  und abgeleiteter Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$ . Das Versagen trat stets in der Naht auf, nie im Grundwerkstoff.

Tab. 7-1: Versuchsergebnisse der Traglastuntersuchungen - Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe

Versuchskörperbezeichnung			$F_{max}$ [kN]	$l_{eff}$ [mm]	$A_{3D-Scan}$ [mm <sup>2</sup> ]	$a_{3D-Scan}$ [mm]	$a_{EC}$ [mm]	$a_{EC,th.}$ [mm]	$T_{\parallel,max}$ [kN/mm]	$\tau_{\parallel,max(3D-Scan)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
S355-S355	G46	min $v_s$	743,19	100	1692,87	8,46	8,26	5,78	3,72	439,01
		max $v_s$	715,48	100	1589,68	7,95	7,29	5,25	3,58	450,08
	G69	min $v_s$	761,51	100	1756,13	8,78	7,96	5,83	3,81	433,63
		max $v_s$	731,11	100	1582,91	7,91	6,83	4,94	3,66	461,88
S460-S460	G46	min $v_s$	770,43	100	1891,98	9,46	7,90	5,79	3,85	407,21
		max $v_s$	708,70	100	1672,29	8,36	6,72	4,88	3,54	423,79
	G69	min $v_s$	795,83	100	1858,01	9,29	8,01	5,59	3,98	428,32
		max $v_s$	702,74	100	1493,37	7,47	6,77	4,84	3,51	470,57
	G89	min $v_s$	594,46	70	1303,97	9,31	8,17	5,54	4,25	455,88
		max $v_s$	516,53	70	1124,51	8,03	6,94	4,92	3,69	459,34
S690-S690	G46	min $v_s$	726,59	100	1689,34	8,45	7,58	5,89	3,63	430,10
		max $v_s$	700,23	100	1410,12	7,05	6,59	5,04	3,50	496,57
	G69	min $v_s$	813,96	100	1668,46	8,34	7,23	5,70	4,07	487,85
		max $v_s$	771,23	100	1340,50	6,70	6,44	4,97	3,86	575,33
	G89	min $v_s$	698,09	70	1278,41	9,13	7,73	5,69	4,99	546,06
		max $v_s$	632,64	70	1002,37	7,16	6,82	4,85	4,52	631,15

Tab. 7-2: Versuchsergebnisse der Traglastuntersuchungen - Mischverbindungen

Versuchskörperkonfiguration		$F_{max}$ [kN]	$l_{eff}$ [mm]	$A_{3D-Scan}$ [mm <sup>2</sup> ]	$a_{3D-Scan}$ [mm]	$a_{EC}$ [mm]	$a_{EC,th.}$ [mm]	$T_{  ,max}$ [kN/mm]	$\tau_{  ,max (3D-Scan)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
G46	min $v_s$	m-1	582,33	93	1175,13	6,34	7,56	5,46	3,14	495,55
		m-2	616,50	100	1382,48	6,91	6,54	5,84	3,08	445,94
		a	740,24	100	1672,48	8,36	8,06	5,96	3,70	442,60
	max $v_s$	m-1	650,58	100	1442,60	7,21	6,23	5,07	3,25	450,98
		m-2	668,45	100	1729,62	8,65	7,28	5,52	3,34	386,47
		a	681,56	100	1532,34	7,66	6,63	4,73	3,41	444,78
S355-S690	min $v_s$	m-1	716,61	100	1631,12	8,16	7,85	6,52	3,58	439,34
		m-2	702,73	100	1279,14	6,40	5,95	5,61	3,51	549,38
		a	809,01	100	1639,93	8,20	7,48	5,51	4,05	493,32
	max $v_s$	m-1	740,37	100	1600,42	8,00	7,68	5,56	3,70	462,61
		m-2	736,87	100	1457,11	7,29	6,45	4,40	3,68	505,71
		a	734,83	100	1243,13	6,22	6,57	4,77	3,67	591,11
G89	min $v_s$	m-1	761,51	100	1370,85	6,85	5,86	5,47	3,81	555,50
		m-2	538,89	70	989,52	7,07	7,79	6,52	3,85	544,60
		a	895,39	100	1849,11	9,25	8,70	5,72	4,48	484,23
	max $v_s$	m-1	542,98	70	995,78	7,11	5,06	4,38	3,88	545,28
		m-2	576,01	70	1064,05	7,60	7,20	4,99	4,11	541,34
		a	788,08	100	1638,26	8,19	6,84	4,74	3,94	481,05
G46	min $v_s$	m-1	625,97	100	1347,48	6,74	6,92	5,47	3,13	464,55
		m-2	630,24	100	1197,54	5,99	6,76	6,54	3,15	526,28
		a	733,99	100	1648,85	8,24	7,11	5,88	3,67	445,15
	max $v_s$	m-1	696,23	100	1525,90	7,63	6,48	5,15	3,48	456,28
		m-2	583,59	100	1192,55	5,96	4,99	5,14	2,92	489,36
		a	697,18	100	1521,23	7,61	6,63	4,82	3,49	458,30
S460-S690	min $v_s$	m-1	766,50	100	1697,67	8,49	7,95	6,32	3,83	451,50
		m-2	726,23	100	1435,84	7,18	7,79	5,93	3,63	505,79
		a	807,21	100	1709,98	8,55	7,30	5,46	4,04	472,06
	max $v_s$	m-1	691,11	100	1321,94	6,61	6,03	4,42	3,46	522,80
		m-2	700,63	100	1503,76	7,52	6,50	5,02	3,50	465,92
		a	663,55	100	1445,47	7,23	6,38	4,77	3,32	459,06
G89	min $v_s$	m-1	558,17	70	958,63	6,85	7,23	5,66	3,99	582,26
		m-2	511,30	70	1087,69	7,77	6,84	5,07	3,65	470,08
		a	592,62	70	1250,61	8,93	7,92	5,84	4,23	473,86
	max $v_s$	m-1	479,42	70	1011,19	7,22	5,12	4,92	3,42	474,11
		m-2	444,10	70	1075,77	7,68	5,36	4,79	3,17	412,82
		a	493,73	70	1038,90	7,42	6,28	4,83	3,53	475,24

m = teilmechanisiert

m-1: Versuchskörper 1 | m-2: Versuchskörper 2

a = vollmechanisiert



## 7.2 Versuchsergebnisse: Verformungsfähigkeit

Die Ergebnisse der Auswertungen bzgl. dem Verformungsvermögen aller durchgeführten Versuche an Flankenkehlnahtverbindungen im Rahmen des Forschungsprojekts *SAFEBRIC TILE* [52] sind in Tab. 7-3 für die Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und in Tab. 7-4 für die Mischverbindungen aufgeführt. Dargestellt sind im Einzelnen die Verformung bei Fließbeginn  $\Delta_{y,3}$  nach Methode 3, die Verformung bei maximaler Spannung  $\Delta_m$ , die Verformung  $\Delta_{u,I}$  bei Probenversagen nach Methode I, die Verschiebeduktilität  $\mu_{\Delta,m}$ , die Grenzduktilität  $\mu_{\Delta,u}$ , das plastische Verformungsvermögen bei maximaler Schubspannung  $\varepsilon_{pl,m}$  sowie das plastische Verformungsvermögen  $\varepsilon_{pl,u}$  zum Zeitpunkt des Probenversagens. Die Ermittlung der einzelnen Ergebnisgrößen ist in Kapitel 6.7 detailliert erläutert.

Tab. 7-3: Versuchsergebnisse bzgl. Verformungsvermögen - Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe

Versuchskörperbezeichnung			$\Delta_{y,3}$ [mm]	$\Delta_m$ [mm]	$\Delta_{u,I}$ [mm]	$\mu_{\Delta,m}$ [-]	$\mu_{\Delta,u}$ [-]	$\varepsilon_{pl,m}$ [%]	$\varepsilon_{pl,u}$ [%]
S355-S355	G46	min $v_s$	0,065	2,340	4,298	36,14	66,38	2,28	4,23
		max $v_s$	0,111	2,839	4,328	25,53	38,93	2,73	4,22
	G69	min $v_s$	0,192	1,920	3,213	9,99	16,71	1,73	3,02
		max $v_s$	0,135	1,940	3,084	14,35	22,81	1,80	2,95
S460-S460	G46	min $v_s$	0,102	3,398	5,846	33,38	57,42	3,30	5,74
		max $v_s$	0,120	3,582	6,690	29,83	55,72	3,46	6,57
	G69	min $v_s$	0,097	3,132	5,283	32,36	54,58	3,04	5,19
		max $v_s$	0,118	3,552	5,531	30,10	46,86	3,43	5,41
	G89	min $v_s$	0,066	2,302	5,032	34,71	75,88	3,19	7,09
		max $v_s$	0,079	2,786	5,094	35,39	64,71	3,87	7,16
S690-S690	G46	min $v_s$	0,182	1,884	3,211	10,36	17,66	1,70	3,03
		max $v_s$	0,168	1,529	2,873	9,09	17,08	1,36	2,70
	G69	min $v_s$	0,235	1,347	2,620	5,74	11,17	1,11	2,39
		max $v_s$	0,172	0,742	1,660	4,31	9,65	0,57	1,49
	G89	min $v_s$	0,118	0,329	1,800	2,79	15,25	0,30	2,40
		max $v_s$	0,179	0,602	0,992	3,36	5,54	0,60	1,16

Tab. 7-4: Versuchsergebnisse bzgl. Verformungsvermögen - Mischverbindungen

Versuchskörperkonfiguration		$\Delta_{y,3}$ [mm]	$\Delta_m$ [mm]	$\Delta_{u,l}$ [mm]	$\mu_{\Delta,m}$ [-]	$\mu_{\Delta,u}$ [-]	$\epsilon_{pl,m}$ [%]	$\epsilon_{pl,u}$ [%]	
S355-S690	G46	min $v_s$ m-1	0,116	2,114	3,305	18,24	28,51	2,16	3,44
		m-2	0,082	1,968	2,853	24,09	34,92	1,89	2,77
		a	0,181	2,896	4,250	16,01	23,49	2,72	4,07
	max $v_s$	m-1	0,178	2,171	3,408	12,22	19,19	1,99	3,23
		m-2	0,195	2,385	3,319	12,22	17,00	2,19	3,12
		a	0,171	2,467	3,950	14,44	23,13	2,30	3,78
	G69	min $v_s$ m-1	0,145	2,842	4,398	19,53	30,23	2,70	4,25
		m-2	0,126	2,287	3,588	18,19	28,54	2,16	3,46
		a	0,120	2,088	3,528	17,42	29,43	1,97	3,41
max $v_s$	m-1	0,161	2,041	3,185	12,65	19,74	1,88	3,02	
	m-2	0,170	1,545	2,647	9,09	15,57	1,37	2,48	
	a	0,187	1,695	2,992	9,05	15,98	1,51	2,80	
G89	min $v_s$ m-1	0,192	1,920	3,213	9,99	16,71	1,73	3,02	
	m-2	0,101	1,510	2,626	14,93	25,96	2,01	3,61	
	a	fehlerhafte Datenaufzeichnung							
max $v_s$	m-1	0,138	1,977	3,782	14,37	27,49	2,63	5,21	
	m-2	0,139	1,845	3,274	13,26	23,54	2,44	4,48	
	a	fehlerhafte Datenaufzeichnung							
S460-S690	G46	min $v_s$ m-1	0,129	2,440	3,205	18,95	24,89	2,31	3,08
		m-2	0,163	2,674	4,160	16,43	25,56	2,51	4,00
		a	0,196	3,346	5,074	17,10	25,93	3,15	4,88
	max $v_s$	m-1	0,110	2,670	4,873	24,26	44,29	2,56	4,76
		m-2	0,124	2,571	4,055	20,70	32,65	2,45	3,93
		a	0,179	3,318	5,214	18,57	29,19	3,14	5,04
	G69	min $v_s$ m-1	0,183	2,391	4,271	13,10	23,40	2,21	4,09
		m-2	0,152	2,684	4,558	17,66	29,99	2,53	4,41
		a	0,192	3,416	5,253	17,80	27,37	3,22	5,06
max $v_s$	m-1	0,123	2,508	4,070	20,46	33,20	2,39	3,95	
	m-2	0,107	2,514	3,886	23,51	36,34	2,41	3,78	
	a	0,137	2,298	4,134	16,83	30,28	2,16	4,00	
G89	min $v_s$ m-1	0,085	1,771	3,501	20,92	41,35	2,41	4,88	
	m-2	0,100	2,404	3,958	24,04	39,58	3,29	5,51	
	a	0,102	2,081	3,871	20,35	37,86	2,83	5,38	
max $v_s$	m-1	0,090	1,822	3,837	20,23	42,60	2,47	5,35	
	m-2	0,057	1,938	3,594	33,72	62,53	2,69	5,05	
	a	0,095	1,941	3,446	20,44	36,28	2,64	4,79	

m = teilmechanisiert      m-1: Versuchskörper 1 | m-2: Versuchskörper 2  
a = vollmechanisiert

## 8 Diskussion der Versuchsergebnisse

### 8.1 Allgemeines

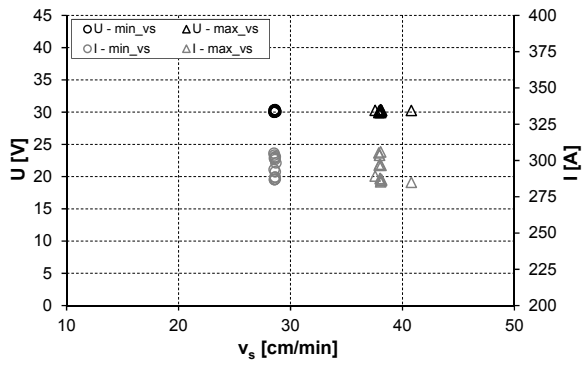
In diesem Kapitel werden die Versuchsergebnisse hinsichtlich der Trag- und Verformungsfähigkeit an Flankenkehlnahtverbindungen der im Rahmen des Forschungsprojekts *SAFEBRIC TILE* [52] durchgeführten experimentellen Untersuchungen analytisch ausgewertet, grafisch aufgearbeitet und diskutiert. Die Versuchsergebnisse sind nach den Schweißprozessparametern, der Nahtdicke, der Tragfähigkeit, der Härte, dem Bruchverhalten und der Verformungsfähigkeit gegliedert. Verstärkt werden hierbei der Einfluss der Schweißprozessparameter und der Nahtdicke auf die experimentellen Ergebnisgrößen Schubfluss  $T_{\parallel, max}$  und Schubspannung  $\tau_{\parallel, max}$  untersucht. Die Ergebnisse der durchgeführten Härtemessungen an den rein auf Schub beanspruchten Flankenkehlnahtverbindungen werden in Relation zur Abkühlzeit  $t_{8/5}$ , zum Schubfluss  $T_{\parallel, max}$ , zur Schubspannung  $\tau_{\parallel, max}$  und zum Bruchverhalten der Schweißnaht gesetzt. Die Versuchsergebnisse werden je nach betrachtetem Schwerpunkt entsprechend der Festigkeit des Grund- oder des Schweißzusatzwerkstoffs geordnet. Weiterhin erfolgt eine detaillierte Analyse hinsichtlich des elastischen und plastischen Verformungsvermögens.

### 8.2 Schweißprozessparameter

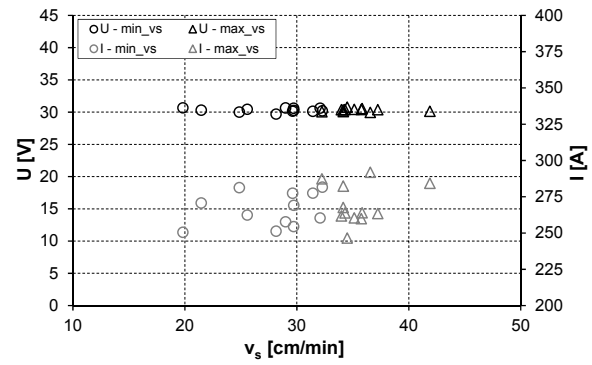
#### 8.2.1 Spannung, Strom und Streckenenergie

Bei der Herstellung der Versuchskörper wurde die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  zwischen einer minimalen und einer maximalen Grenze variiert (vgl. Tab. 6-11 und Tab. 6-12) um so eine praxisnahe Ausführung abzubilden. Trotz der Variation der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  lieferten alle Schweißnähte nach erfolgreicher Prozessparameterfindung optisch ein sehr gutes Schweißnahtergebnis. Als zusätzlicher Parameter wurde für den Mechanisierungsgrad des Schweißprozesses zwischen einem voll- und teilmechanisierten Fertigungsprozess variiert.

In Abb. 8-1 sind die Schweißprozessparameter Spannung  $U$  und Schweißstrom  $I$  über die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  aufgetragen, jeweils für die a) vollmechanisierten und b) teilmechanisierten Probekörper mit der Differenzierung zwischen  $\min v_s$  und  $\max v_s$ . Für die vollmechanisiert geschweißten Nähte zeigt sich in Bezug auf die Spannung  $U$ , den Schweißstrom  $I$  und die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  eine sehr geringe Streuung. Zudem zeichnet sich eine deutliche Gruppierung für die beiden Schweißgeschwindigkeiten ab.



a) Vollmechanisiert

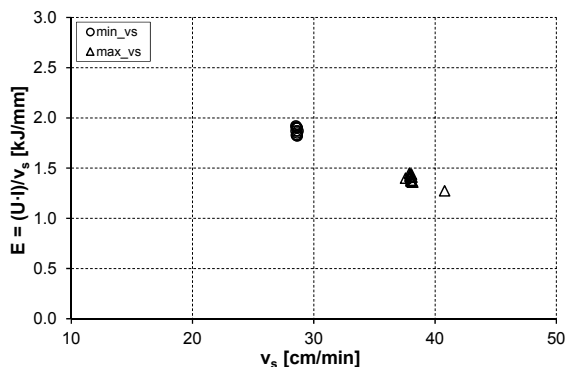


b) Teilmechanisiert

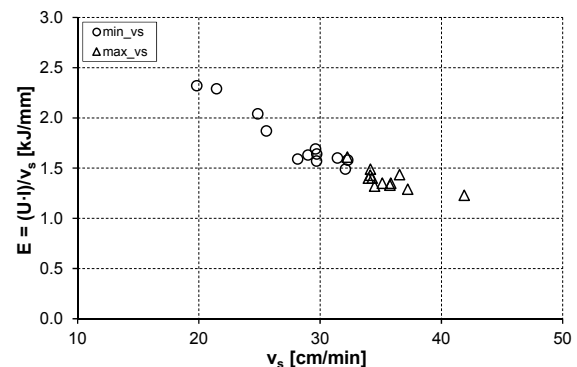
Abb. 8-1: Streuung der Schweißprozessparameter Spannung  $U$  und Strom  $I$

Eine erkennbar größere Streuung ergibt sich im Vergleich zu den vollmechanisiert geschweißten Versuchskörpern bei Betrachtung des Schweißstroms  $I$  für die teilmechanisiert geschweißten Versuchskörper. In der Regel werden beim Metallschutzgasschweißen Stromquellen mit annähernd konstanter Spannung über größere Strombereiche eingesetzt, wodurch die Kennlinie der Stromquelle nahezu konstant ist. Somit führen kleine Schwankungen der Lichtbogenlänge und -spannung zu einer starken Änderung der Stromstärke und der Abschmelzleistung. Durch die *innere Regelung* stabilisiert sich der Prozess selbst und die ursprüngliche Lichtbogenlänge wird bei konstantem Drahtvorschub rasch wiederhergestellt. Abb. 8-1 b) zeigt die ausgeprägte Streuung aller drei aufgeführten Größen für die teilmechanisiert geschweißten Versuchskörper.

In Abb. 8-2 ist der Einfluss der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  auf die Streckenenergie  $E$  aufgezeigt. Für die vollmechanisiert geschweißten Versuchskörper ergibt sich ein nahezu konstanter Wert der Streckenenergie  $E$  für die beiden unterschiedlichen Schweißgeschwindigkeiten mit einer sehr geringen Streubreite.



a) Vollmechanisiert



b) Teilmechanisiert

Abb. 8-2: Streuung der Streckenenergie  $E$

Weiterhin zeigt sich in Abb. 8-2 b) für die teilmechanisiert geschweißten Versuchskörper eine deutlich zu erkennende Streubreite für beide Gruppen der Schweißgeschwindigkeit und unterstreicht in diesem Zusammenhang die Abhängigkeit der Streckenenergie  $E$  von der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$ . Grundsätzlich verdeutlichen die Abb. 8-1 und Abb. 8-2 eindrucksvoll den Unterschied zwischen vollmechanisierten und teilmechanisierten Schweißungen in Bezug auf die Schweißprozessparameter.

### 8.2.2 Abkühlzeit

Im Allgemeinen werden die mechanischen Eigenschaften des Schweißguts primär durch dessen chemische Zusammensetzung und die Geschwindigkeit, mit der die Abkühlung aus der flüssigen Phase erfolgt, bestimmt. Die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  ist hierbei eine der wichtigsten Größen. In Abb. 8-3 sind die Messergebnisse der Abkühlzeiten für a) vollmechanisiert und b) teilmechanisiert geschweißte Versuchskörper wiedergegeben. Beide Abbildungen zeigen bei unterschiedlich starker Streuung, dass eine kleinere Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  eine größere Abkühlzeit  $t_{8/5}$  zur Folge hat.

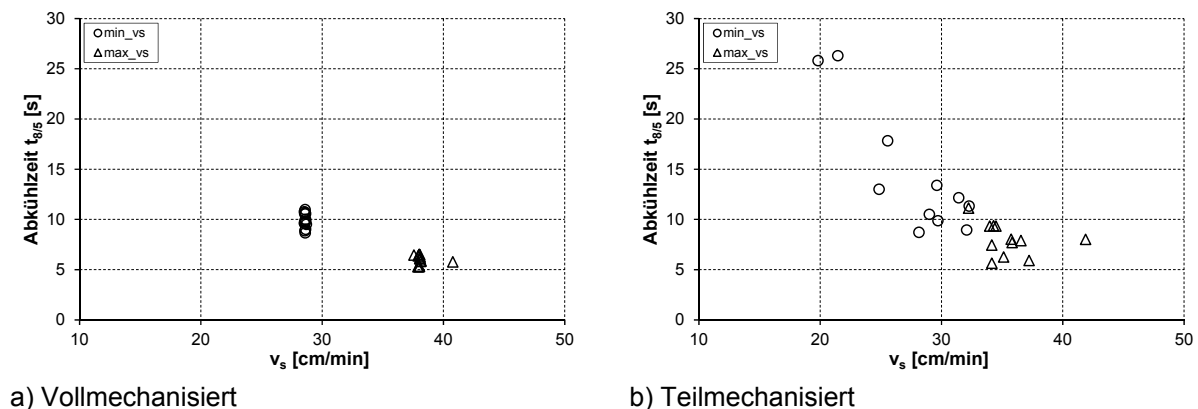


Abb. 8-3: Streuung der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$

In Abb. 8-4 ist die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  über die Streckenenergie  $E$  aufgetragen. Bei nahezu konstanter Spannung  $U$  und Schweißstrom  $I$  wird in Abb. 8-4 sowohl für die vollmechanisiert als auch für die teilmechanisiert geschweißten Versuchskörper ersichtlich, dass eine geringe Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  eine größere Streckenenergie  $E$  bewirkt und somit zu einer längeren Abkühlzeit  $t_{8/5}$  führt.

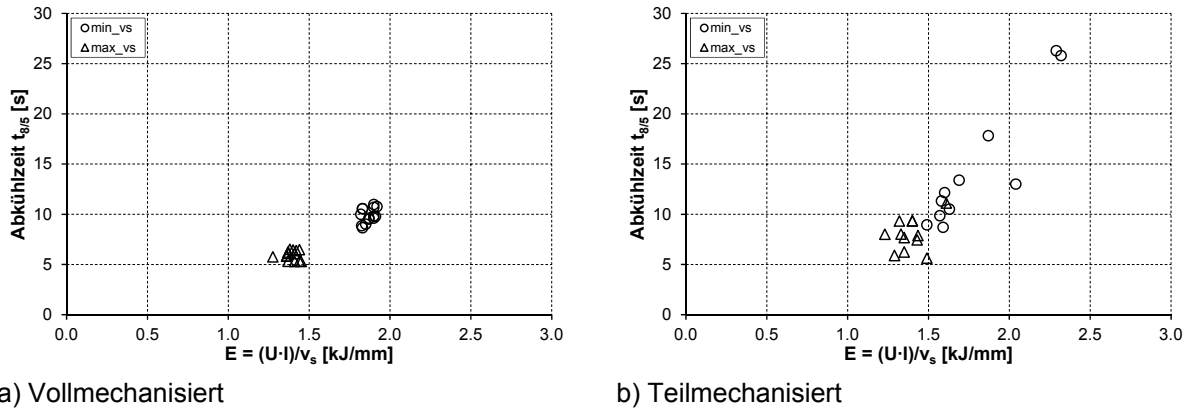


Abb. 8-4: Streuung der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  in Abhängigkeit der Streckenenergie  $E$

### 8.3 Nahtdicke

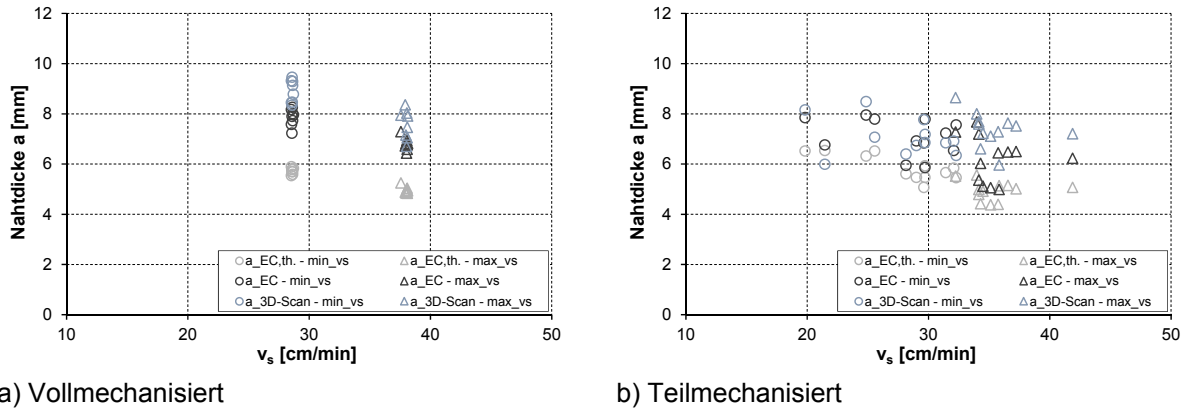
Die mechanischen Eigenschaften der Schweißnahtverbindung werden unter anderem maßgeblich durch die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  beeinflusst. Die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  wiederum hängt sehr stark von der Höhe der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  ab. Im Folgenden wird nun der Einfluss der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  und der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  als auch der Schweißprozessparameter auf die Nahtdicke  $a$  untersucht. In Tab. 8-1 sind die drei verschiedenen Methoden zur Nahtdickenbestimmung aufgeführt.

Tab. 8-1: Definitionen der Nahtdicke

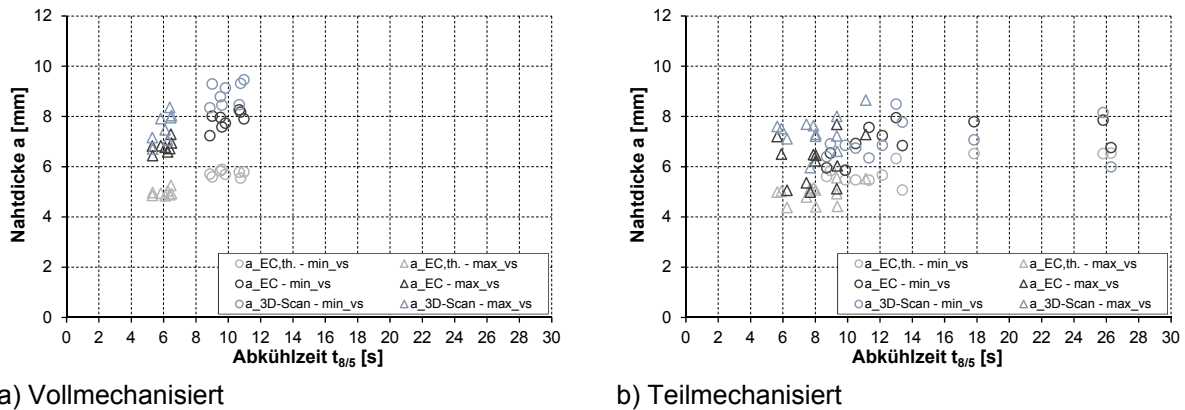
Bezeichnung	Beschreibung
$a_{EC,th.}$	Nach DIN EN 1993-1-8 ermittelte Nahtdicke, als Höhe des einschreibbaren (gleichschenkligen oder nicht gleichschenkligen) Dreiecks bezogen auf den theoretischen Wurzelpunkt
$a_{EC}$	Nach DIN EN 1993-1-8 ermittelte Nahtdicke bezogen auf den tatsächlichen Wurzelpunkt; Kehlnahtdicke bei tiefem Einbrand
$a_{3D-Scan}$	Abgeleitete Kehlnahtdicke aus dem dreidimensionalen Modell der Nahtbruchfläche

In Abb. 8-5 sind die Ergebnisse der drei unterschiedlichen Methoden zur Nahtdickenbestimmung für die a) vollmechanisiert und b) teilmechanisiert geschweißten Versuchskörper in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  dargestellt. Unabhängig von der Methode der Nahtdicke kann mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  eine abnehmende wirksame Nahtdicke festgestellt werden. Dies resultiert aus der Tatsache, dass durch eine schnellere Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  eine geringere Wärmeeinbringung  $Q$  entsteht. Somit fällt der Einbrand bei gleichzeitig kleinerer Volumenzunahme des Schweißguts geringer aus.

Für die Methode  $a_{EC,th.}$  zeigt sich vor allem bei den vollmechanisiert geschweißten Versuchskörpern die kleinste Streuung. Dies erscheint in sofern plausibel, als dass bei dieser Methode im Gegensatz zur Nahtdicke  $a_{EC}$  der Einbrand nicht mit berücksichtigt wird.

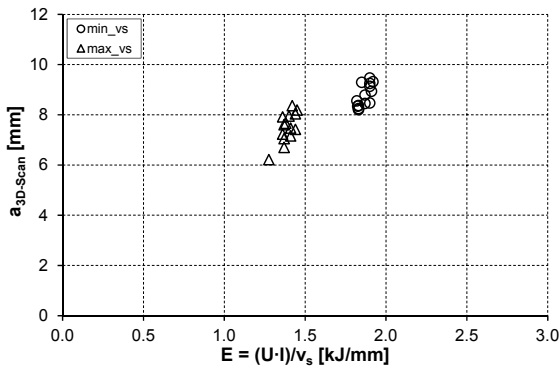
Abb. 8-5: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  auf die Nahtdicke

Die Methode  $a_{EC}$  unterscheidet sich im Gegensatz zur Methode  $a_{3D-Scan}$  dadurch, dass für letztere bei der Digitalisierung der Nahtbruchfläche die Topografie des Bruchs erfasst wird, so dass die Methode  $a_{3D-Scan}$  die größeren Werte für die Nahtdicke liefert. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Digitalisierung der Nahtbruchfläche nach dem Versagen des Prüfkörpers stattgefunden hat und somit auch die plastischen Verformungen nach der maximal gemessenen Prüfkraft  $F_{max}$  beinhaltet. Jedoch sind die Verformungen nach Erreichen der maximalen Prüfkraft  $F_{max}$  verhältnismäßig gering, so dass auch wie bei allen in der Literatur aufgeführten Auswertungen zur Bestimmung der Tragfähigkeit an Flankenkehlnahtverbindungen (vgl. Background Document D.03 [46] und Rasche [84]) die Nahtdicke  $a_{3D-Scan}$  resultierend aus der digitalisierten Nahtbruchfläche angesetzt wird.

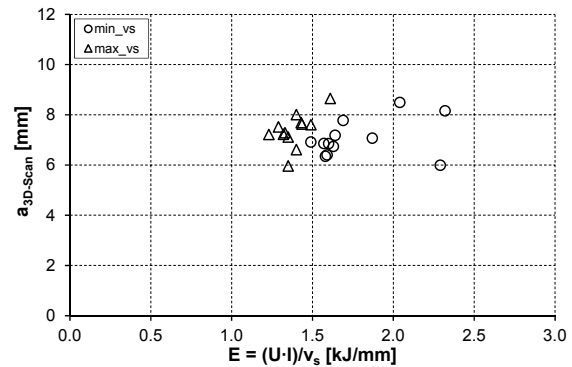
Abb. 8-6: Einfluss der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  auf die Nahtdicke

In Abb. 8-6 a) und b) sind die drei verschiedenen Methoden zur Nahtdickenbestimmung zusätzlich über die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  aufgetragen und verdeutlichen nochmals, dass die Methode  $a_{3D-Scan}$  die größten Werte für die Nahtdicke liefert. Zusätzlich wird erkennbar, vor allem für die vollmechanisiert geschweißten Versuchskörper, dass eine größere Abkühlzeit  $t_{8/5}$  zu einer größeren Nahtdicke führt. Ursächlich hierfür ist die erhöhte Streckenenergie  $E$  bzw. die geringere Schweißgeschwindigkeit  $v_s$ .

Der Zusammenhang zwischen der Streckenenergie  $E$  und ausschließlich der Nahtdicke  $a_{3D-Scan}$  ist in Abb. 8-7 a) und b) dargestellt. Vor allem aus der Darstellung für die vollmechanisiert geschweißten Versuchskörper geht hervor, dass mit steigender Streckenenergie  $E$  die Nahtdicke zunimmt. Zusätzlich ist auf die ausgeprägte Streuung der Nahtdicke vor allem bei den teilmechanisiert geschweißten Versuchskörpern hinzuweisen. Die Quantifizierung der Streuung der Nahtdicke  $a_{3D-Scan}$ , resultierend aus der digitalisierten Nahtbruchfläche, bzw. die Herleitung des Variationskoeffizienten für die Nahtbruchfläche  $V_{A_{Bruch}}$  wird in Kapitel 11.4.4 behandelt.



a) Vollmechanisiert



b) Teilmechanisiert

Abb. 8-7: Zusammenhang zwischen Streckenenergie  $E$  und Nahtdicke  $a_{3D-Scan}$ 

Abschließend lässt sich unabhängig vom Mechanisierungsgrad des Schweißprozesses (voll- oder teilmechanisiert) der Einfluss der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  auf die Streckenenergie  $E$ , die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  und die Nahtdicke  $a$  entsprechend Abb. 8-8 darstellen.

Abb. 8-8: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  auf die Streckenenergie  $E$ , die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  und die Nahtdicke  $a$ 

Demzufolge induziert bei relativ konstanter Spannung  $U$  und relativ konstantem Schweißstrom  $I$  eine geringe Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  eine große Streckenenergie  $E$  bei gleichzeitig größerer Abkühlzeit  $t_{8/5}$  und größerer Nahtdicke  $a$ . Andererseits folgt auf eine höhere Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  eine geringe Streckenenergie  $E$ , eine geringe Abkühlzeit  $t_{8/5}$  und eine kleinere Nahtdicke  $a$ .

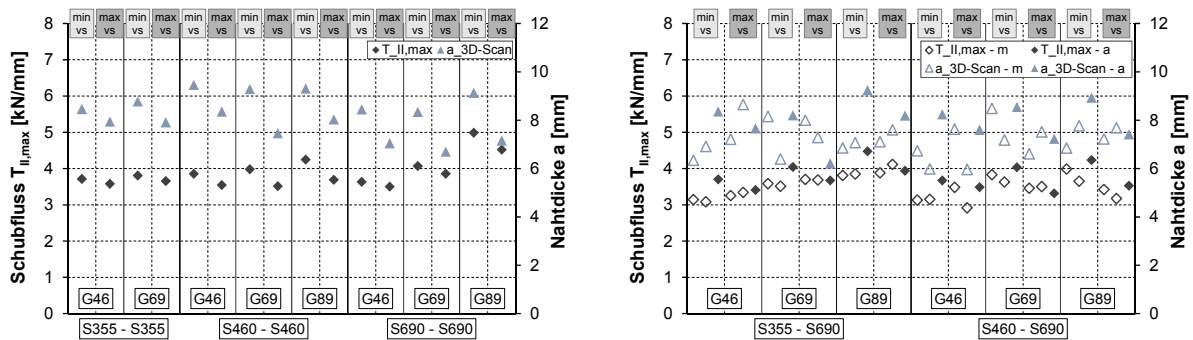


## 8.4 Tragfähigkeit

### 8.4.1 Schubfluss

In den nachfolgenden Abbildungen wird bei der Darstellung der Versuchsergebnisse zwischen den a) Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe (Gleiche Festigkeitsklasse der verschweißten Grundwerkstoffe und dazu passende oder abweichende Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs) und den b) Mischverbindungen (Unterschiedliche Festigkeitsklasse der verschweißten Grundwerkstoffe und dazu passende oder abweichende Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs) unterschieden. Die ausgefüllten Datenpunkte repräsentieren sowohl bei den Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe als auch bei den Mischverbindungen die vollmechanisiert geschweißten Versuchskörper. Im Gegensatz dazu werden die teilmechanisierten Probekörper als nicht ausgefüllte Datenpunkte dargestellt.

In Abb. 8-9 ist der Einfluss der Nahtdicke  $a_{3D-Scan}$  auf den maximalen Schubfluss  $T_{\parallel,max}$  über die einzelnen Schweißkonfigurationen, jeweils differenziert nach minimaler und maximaler Schweißgeschwindigkeit  $v_s$ , dargestellt. Der Schubfluss  $T_{\parallel,max}$  soll hier als Evaluationsgröße (Kraft/Längeneinheit) interpretiert werden, die die Schweißnaht als Widerstand der Beanspruchung entgegensetzt.

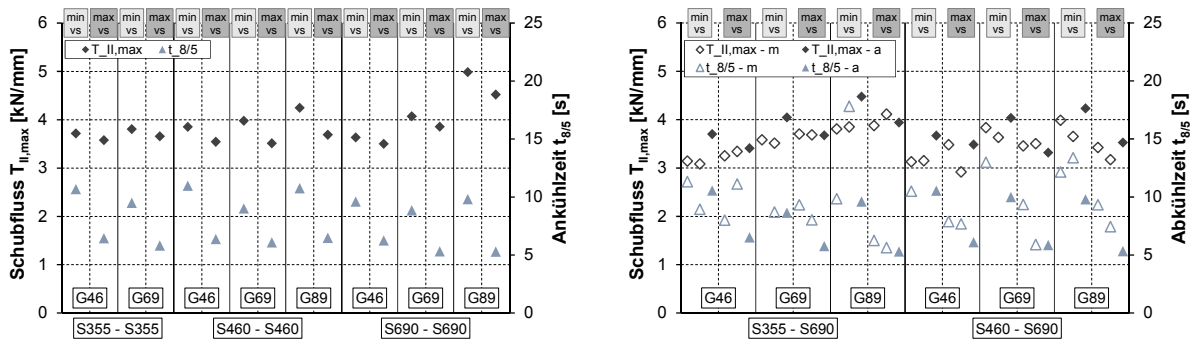


a) Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe

b) Mischverbindungen

Abb. 8-9: Einfluss der Nahtdicke  $a$  auf den Schubfluss  $T_{\parallel,max}$ 

Sofern für einen einzelnen Schweißzusatzwerkstoff das Ergebnis für die minimale mit der maximalen Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  verglichen wird, zeigt sich ein größerer Schubfluss  $T_{\parallel,max}$  bei größerer Nahtdicke  $a$ . Dies war insofern zu erwarten, dass die Schweißnaht bei größerer wirksamer Nahtdicke  $a$  resultierend aus einer höheren Streckenenergie  $E$  mit anschließendem tieferen Einbrand eine höhere Beanspruchbarkeit hat. Zusätzlich ist innerhalb einer Grundwerkstoffpaarung ein tendenzieller Anstieg des Schubflusses  $T_{\parallel,max}$  mit zunehmender Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs zu beobachten. Wiederum deutlich zu erkennen ist die ausgeprägte Streuung bei den Versuchsergebnissen für die teilmechanisiert geschweißten Versuchskörper.



a) Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe      b) Mischverbindungen

Abb. 8-10: Korrelation von Schubfluss  $T_{||,max}$  und Abkühlzeit  $t_{8/5}$

In Abb. 8-10 ist die Korrelation des Schubflusses  $T_{||,max}$  und der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  wiedergegeben. Auch hier zeigt sich eine deutliche positive Korrelation: Innerhalb einer Schweißzusatzwerkstoffpaarung ist mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  und der Schubfluss  $T_{||,max}$  geringer. Entsprechend der Abb. 3-11 in Kapitel 3.10 bedingt eine geringe Abkühlzeit  $t_{8/5}$  einen hohen Martensitanteil. Martensit besitzt eine hohe Härte, ist dafür aber sehr spröde. Dies äußert sich in einem geringeren Schubfluss  $T_{||,max}$  und einer stark eingeschränkten Verformungsfähigkeit. Zusammenfassend lässt sich unabhängig vom Mechanisierungsgrad des Schweißprozesses (voll- oder teilmechanisiert) bei einer größeren Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  eine kleinere wirksame Nahtdicke  $a$  feststellen. Der Schubfluss  $T_{||,max}$  als Quotient aus der maximal gemessenen Prüfkraft  $F_{max}$  und der wirksamen Schweißnahtlänge  $l_{eff}$  (konstant) nimmt mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  ab.

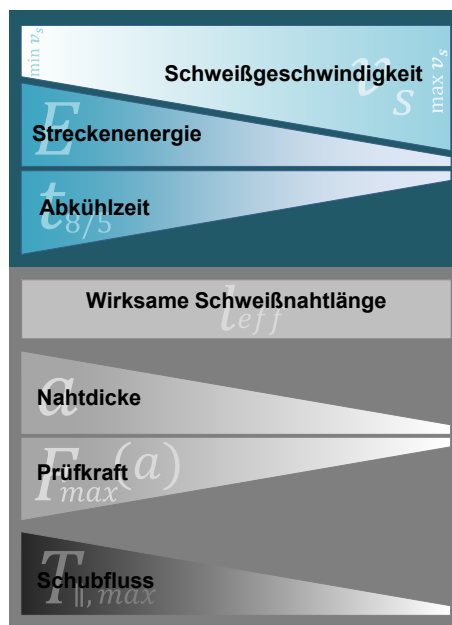
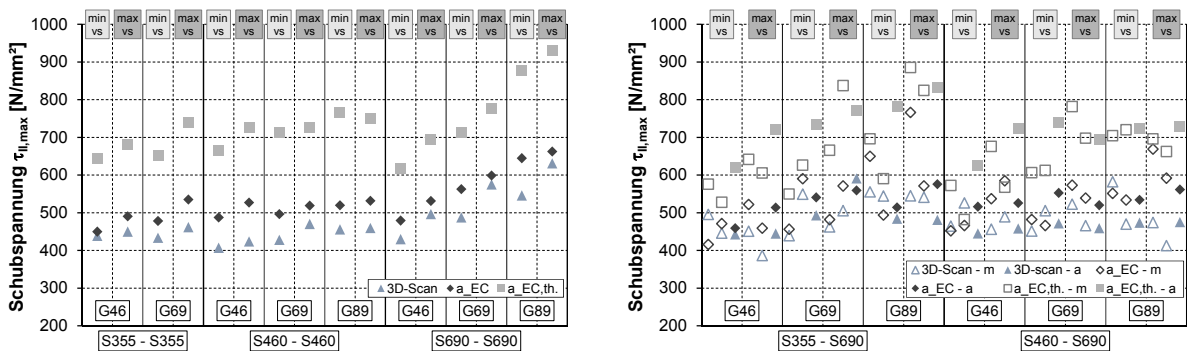


Abb. 8-11: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  auf die Ergebnisgröße Schubfluss  $T_{||,max}$

### 8.4.2 Schubspannung

Eine weitere Ergebnisgröße zur Bestimmung der Tragfähigkeit an geschweißten Flankenkehlnahtverbindungen unter reiner Schubbeanspruchung ist die Schubspannung  $\tau_{\parallel}$ . Die maximale Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$  berechnet sich als Quotient aus der maximal gemessenen Prüfkraft  $F_{max}$  und dem Produkt aus wirksamer Nahtdicke  $a$  und wirksamer Schweißnahtlänge  $l_{eff}$  (vgl. Kapitel 6.6.1). Folglich bezieht sich die Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$  im Gegensatz zum Schubfluss  $T_{\parallel,max}$  auf den Nahtquerschnitt. In Abb. 8-12 ist die Abhängigkeit der Methode zur Bestimmung der Nahtdicke  $a$  auf die Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$  dargestellt.

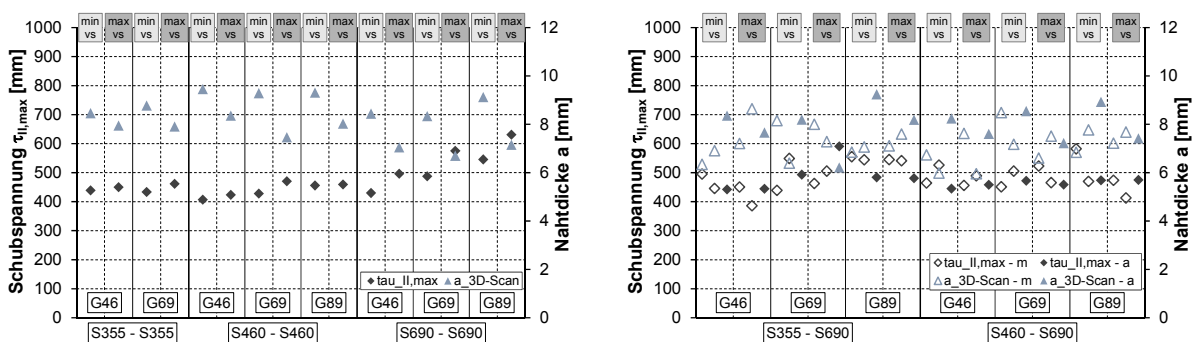


a) Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe

b) Mischverbindungen

Abb. 8-12: Abhängigkeit der Nahtdicken-Methode auf die Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$ 

Es zeigt sich, dass sich mit der Nahtdicken-Methode  $a_{3D-Scan}$  die kleinsten Schubspannungen ergeben. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass durch die dreidimensionale Erfassung der Nahtbruchfläche eine detailgetreue Abbildung erstellt werden kann, die der tatsächlichen Spannungsverteilung am nächsten kommt. Dementsprechend wird im weiteren Verlauf der Arbeit die Nahtdicke  $a_{3D-Scan}$  als Bezugswert verwendet. In Abb. 8-13 ist die Korrelation der Nahtdicke  $a_{3D-Scan}$  und der maximalen Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$  dargestellt.



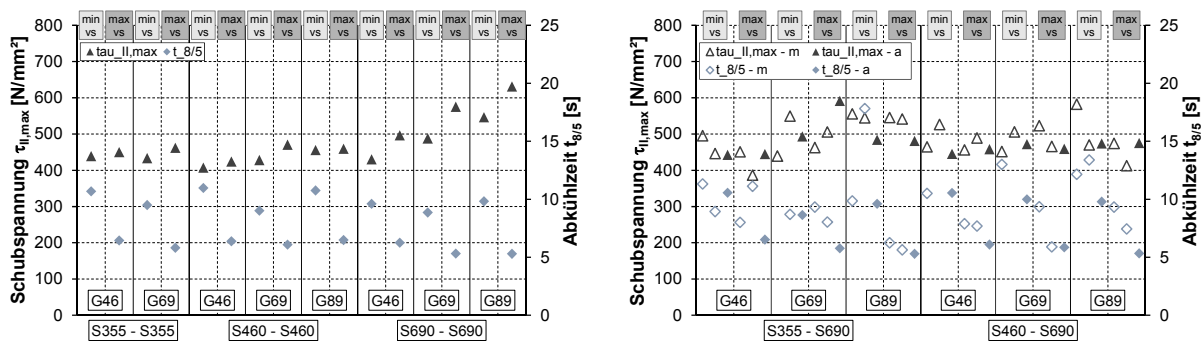
a) Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe

b) Mischverbindungen

Abb. 8-13: Korrelation von Nahtdicke  $a_{3D-Scan}$  und Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$ 

Es lässt sich eine negative Korrelation erkennen, so dass bei zunehmender Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  die Nahtdicke geringer wird und die Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$  ansteigt.

In Abb. 8-14 ist die Korrelation zwischen der maximalen Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$  und der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  aufgetragen. Hier zeigt sich deutlich der Einfluss der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  bzw. der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  auf die maximale Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$  der Schweißnahtverbindung. Dementsprechend hat eine geringe Abkühlzeit  $t_{8/5}$  eine größere Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$  zur Folge als eine größere Abkühlzeit  $t_{8/5}$ . Auch hier ist die deutlich ausgeprägte Streuung der Ergebnisse der teilmechanisiert geschweißten Versuchskörper zu erkennen.

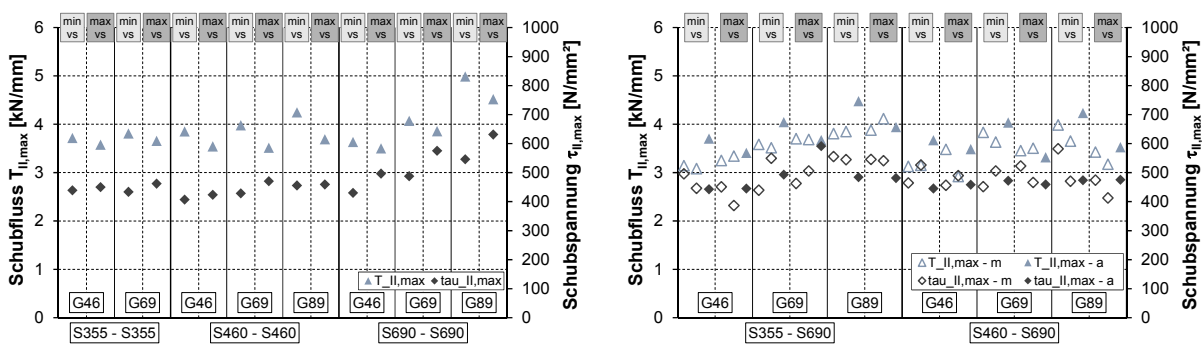


a) Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe

b) Mischverbindungen

Abb. 8-14: Korrelation von Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$  und Abkühlzeit  $t_{8/5}$

Der Zusammenhang zwischen dem maximalen Schubfluss  $T_{\parallel,max}$  und der maximalen Schubspannungen  $\tau_{\parallel,max}$  ist in Abb. 8-15 wiedergegeben. Deutlich zu erkennen ist bei dieser Darstellung die Tatsache, dass mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  der Schubfluss  $T_{\parallel,max}$  abnimmt, jedoch die Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$  in der Naht zunimmt.



a) Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe

b) Mischverbindungen

Abb. 8-15: Korrelation von Schubfluss  $T_{\parallel,max}$  und Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$

Zusätzlich zum Einfluss der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  ist deutlich der Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Festigkeit der Naht zu erkennen. Es zeigt sich eine Tendenz, dass mit zunehmender Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs die Festigkeit der Naht ansteigt. Diese Feststellung wird in Kapitel 11 bei der statistischen Auswertung wieder aufgegriffen.

Wie in Abb. 8-16 dargestellt, kann zusammengefasst festgestellt werden, dass die bei maximaler Prüfkraft auftretenden Ergebnisgrößen Schubfluss  $T_{\parallel,max}$  und Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$  durch die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  und letztendlich durch die vorhandene wirksame Nahtdicke  $a$  beeinflusst werden. So ergibt sich bei einer hohen Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  ein geringes Nahtvolumen, das zu einem geringen Schubfluss  $T_{\parallel,max}$ , jedoch aber zu einer großen Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$  in der Naht führt.

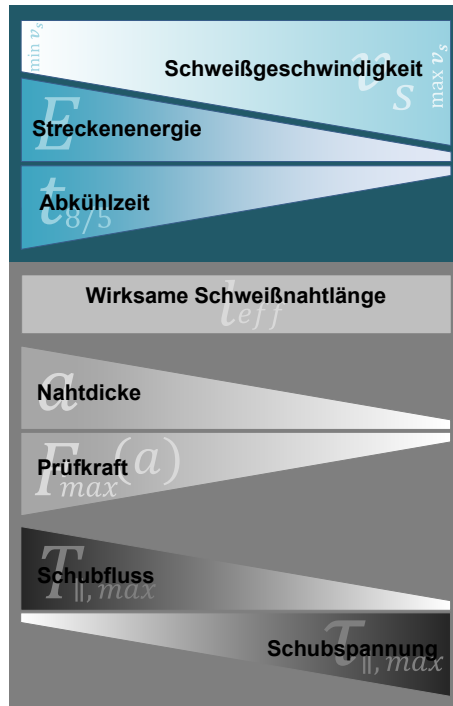


Abb. 8-16: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  auf die Ergebnisgröße Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$

## 8.5 Härte

### 8.5.1 Einfluss der Abkühlzeit auf die Härte in der Wärmeeinflusszone

Von entscheidender Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften ist der Temperatur-Zeit-Verlauf beim Schweißen. Zur Kennzeichnung wird, wie bereits in Kapitel 3.8 erläutert, die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  gewählt. In Abb. 8-17 sind die Mittelwerte der Härte HV10 aus der Wärmeeinflusszone (WEZ) der einzelnen Schweißkonfigurationen über die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  aufgetragen. Bei den in Abb. 8-17 a) dargestellten Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe zeigt der Verlauf der Verbindung S690/S690 mit zunehmender Abkühlzeit  $t_{8/5}$  eine deutlich abnehmende Tendenz der Härte. Ursächlich hierfür ist ein geringer Martensitgehalt des Gefüges und somit eine geringe Härte bei langsamer Abkühlgeschwindigkeit. Dieser tendenzielle Abfall der Härtewerte in der Wärmeeinflusszone ist bei den Verbindungen S355/S355 und S460/S460 zwar erkennbar, aber in einem geringeren Maße ausgeprägt.

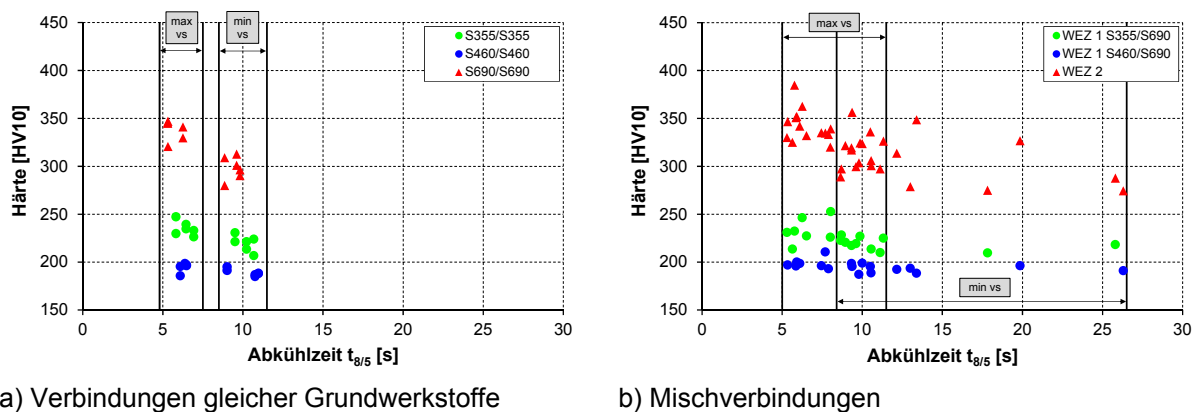


Abb. 8-17: Einfluss der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  auf die Härte HV10 in der WEZ

Hervorzuheben ist, dass die Härte in der Wärmeeinflusszone der Verbindungen mit dem Grundwerkstoff S355 J2+N bei Abkühlzeiten zwischen 5 und 10 Sekunden trotz niedrigerer Festigkeit des Grundwerkstoffs höhere Werte annimmt, als die Härte in der Wärmeeinflusszone des Grundwerkstoffs S460 ML. Dies beruht darauf, dass der geringe Kohlenstoffgehalt des thermomechanisch gewalzten Stahls S460 ML zu einer niedrigeren Martensithärte führt, die bei kurzen Abkühlzeiten die Härte der WEZ bestimmt. Erst bei sehr viel höheren Abkühlzeiten, die bei den Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe nicht auftraten, kommt der Einfluss der Legierungselemente, die die Durchhärtung erhöhen, zunehmend zum Tragen [66].

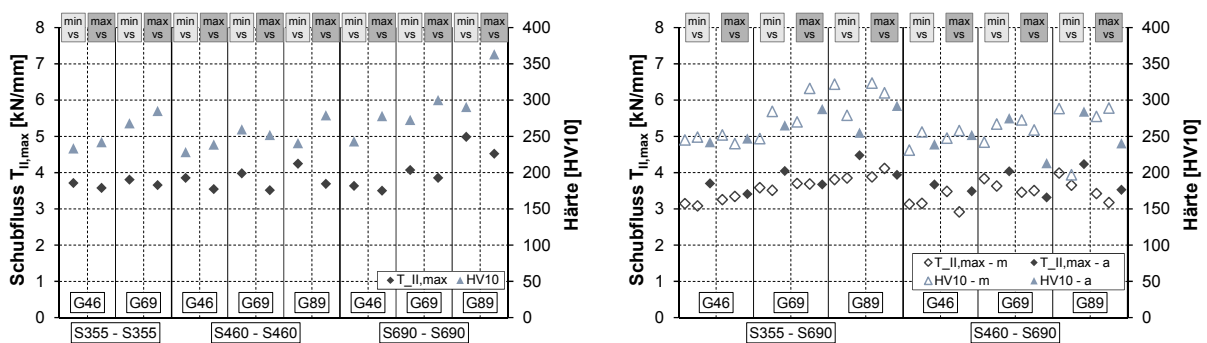
Die in Abb. 8-17 b) aufgeführten Härtewerte stellen die Abhängigkeit der Härte in der Wärmeeinflusszone der Mischverbindungen von der Abkühlzeit dar. Die Werte der WEZ 2, die an den höherfesten Grundwerkstoff (S690 QL) anschließt, zeigen eine deutlich stärker fallende Tendenz, als die Werte in der WEZ 1, die nahezu konstant verlaufen.

Obwohl die WEZ 2 eine größere Streuung der Werte aufweist, kann hier durch die stärkere Neigung der Streubreite der Datenpunkte eine deutlichere Korrelation der Härte und der Abkühlzeit abgelesen werden. Im Gegensatz dazu ist bei den Härtewerten in der WEZ 1 eine schwächere Abhängigkeit von der Dauer der Abkühlzeit zu erkennen.

Bei einem direkten Vergleich zwischen Abb. 8-17 a) und Abb. 8-17 b) lässt sich feststellen, dass bei den Mischverbindungen deutlich größere Abkühlzeiten auftraten, als bei den Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe. Dies resultiert hauptsächlich daraus, dass die aus minimaler Schweißgeschwindigkeit ( $\min v_s$ ) entstandenen Abkühlzeiten durch den Einfluss des teilmechanisierten Schweißens der Mischverbindungen über einen sehr breiten Bereich der Abkühlzeit streuen. Abschließend lässt sich festhalten, dass mit zunehmender Abkühlzeit die Härte in der Wärmeeinflusszone sinkt.

### 8.5.2 Korrelation zwischen Härte, Schubfluss und Schubspannung

In Abb. 8-18 ist die Korrelation zwischen der Härte HV10 in der Wärmeeinflusszone (WEZ) und dem maximalen Schubfluss  $T_{\parallel, \max}$  für die einzelnen Schweißkonfigurationen dargestellt.



a) Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe

b) Mischverbindungen

Abb. 8-18: Korrelation zwischen der Härte HV10 in der WEZ und dem Schubfluss  $T_{\parallel, \max}$

Sowohl aus den Ergebnissen für die Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe als auch für die Mischverbindungen geht hervor, dass die Härte im Allgemeinen mit zunehmender Festigkeit des Grund- und Schweißzusatzwerkstoffs ansteigt. Vergleicht man den Verlauf des Schubflusses und der Härte innerhalb einer Schweißkonfigurationspaarung zwischen minimaler und maximaler Schweißgeschwindigkeit, zeigt sich vor allem für die in Abb. 8-18 a) dargestellten Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe eine deutlich negative Korrelation beider Größen. Dies bedeutet, dass bei einer größeren Schweißgeschwindigkeit ( $\max v_s$ ) und demzufolge einer kürzeren Abkühlzeit  $t_{8/5}$  die Härte ansteigt, jedoch der Schubfluss  $T_{\parallel, \max}$  abnimmt.

Im Gegensatz dazu lässt sich in Abb. 8-19 sowohl für die Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe als auch für die Mischverbindungen ein Zusammenhang zwischen der maximalen Schubspannung  $\tau_{II,max}$  und der Härte erkennen.

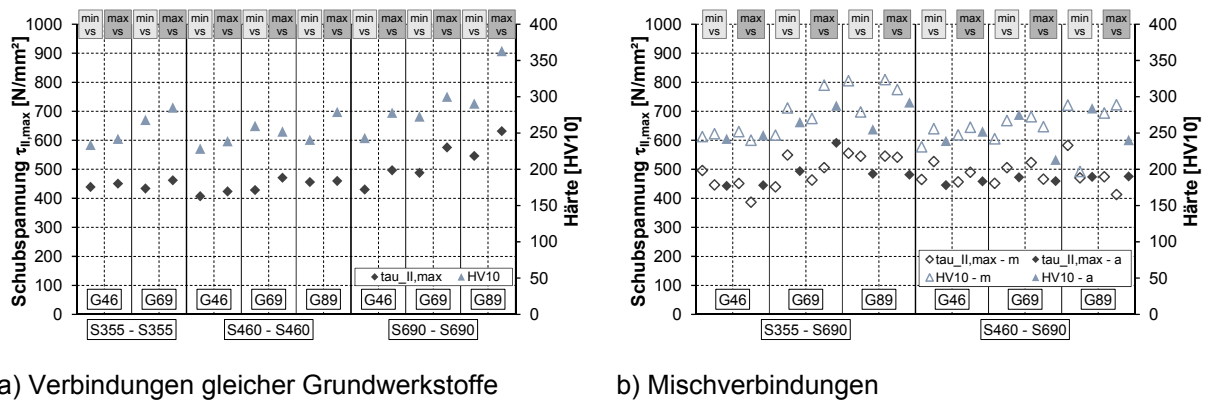


Abb. 8-19: Korrelation zwischen der Härte HV10 in der WEZ und der Schubspannung  $\tau_{II,max}$

Das bedeutet, dass die Härte in der Wärmeeinflusszone in Bezug auf die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  mit der Schubspannung  $\tau_{II,max}$  bei maximaler Prüfkraft tendenziell positiv korreliert. Letztendlich kann diese Feststellung auf Basis der begrenzt vorhandenen und teilweise stark streuenden Versuchsergebnisse nicht abschließend dokumentiert werden. Eine detaillierte Auswertung der Härtemessungen und ein Vergleich mit analytischen Ansätzen zur Berechnung der Härte in der Wärmeeinflusszone findet sich in der Bachelorarbeit von Sautter [88].

## 8.6 Bruchverhalten

Das in Kapitel 6.5.4 vorgestellte Verfahren zur Digitalisierung der Nahtbruchfläche bietet für die Bewertung des Bruchverhaltens der geschweißten Flankenkehlnahtverbindung zwei entscheidende Vorteile: Zum einen liegt die digitalisierte Nahtbruchfläche als 3D-Modell vor, so dass an konkreten Stellen quer zur Nahtlängsachse vier virtuelle Schnitte durch das Modelle gelegt werden können, um so die Nahtbruchfläche durch eine Ableitung der Fläche an vier diskreten Stellen aus dem dreidimensionalen Raum in der zweidimensionalen Ebene darzustellen (vgl. Abb. 6-17). Zum anderen stellt diese Methode eine Alternative zu numerischen Untersuchungen bzgl. des Bruchverhaltens auf Basis der Methode der finiten Elemente dar. Denn für diesbezügliche numerische Analysen bedarf es einer möglichst detailgetreuen Abbildung sowohl der Gefügestruktur der Schweißnaht als auch der angrenzenden Bereiche der Grundwerkstoffe. Da während des Schweißprozesses mehrere komplexe Gefügeumwandlungen in den genannten Bereichen stattfinden, ist die Aufzeichnung der maßgebenden Parameter i. d. R. mit sehr viel Aufwand verbunden. Im Vergleich dazu bietet die Nahtbruchflächen-Digitalisierung die Möglichkeit einer detailgetreuen Rekonstruktion des Bruchverhaltens.



Die so genannten Bruchflächen-Schnittkanten bilden den Verlauf der Nahtbruchfläche am jeweiligen Schnitt durch die Schweißnaht in der zweidimensionalen Eben ab. Durch die Projektion der Bruchflächen-Schnittkanten auf einen Makroschliff der Schweißnaht, der aus einem nicht geprüften Nahtbereich entnommen wurde, kann der Bereich, in dem der Bruch durch die Naht stattfand, dargestellt werden. Eine Ausgleichsgerade durch die beiden äußersten Bruchflächen-Schnittkanten bildet die jeweilige Grenze des Bruchwinkelintervalls. In Abb. 8-20 ist das Abtragen des Winkels auf die Horizontale der beiden Grenzen des Bruchwinkelintervalls schematisch dargestellt.

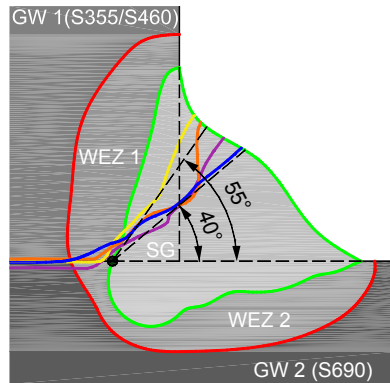
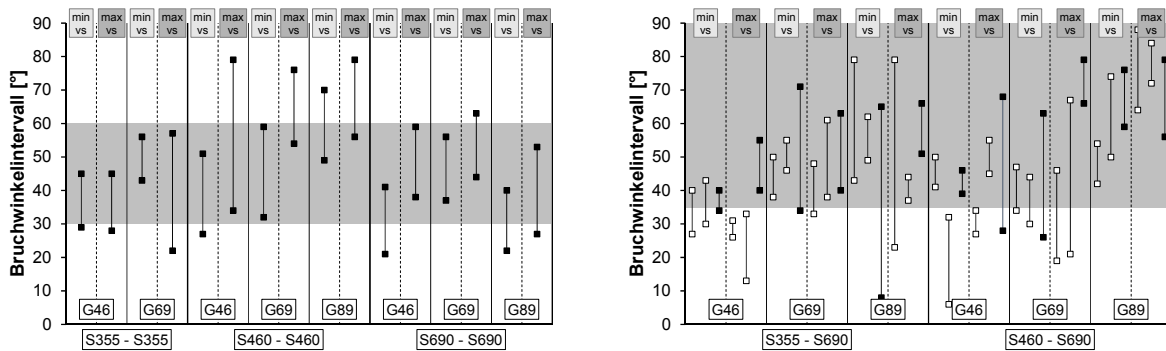


Abb. 8-20: Definition des Bruchwinkelintervalls

Die Ergebnisse der einzelnen Bruchwinkelintervalle sind in Abb. 8-21 für jeden Versuchskörper sowohl für die a) Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe als auch für die b) Mischverbindungen dargestellt.



a) Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe

b) Mischverbindungen

Abb. 8-21: Ergebnisse der Bruchwinkelintervalle

Für die Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe zeichnet sich im Durchschnitt ein Bruchwinkelintervall zwischen 30° und 60° ab. Das bedeutet, dass die Nahtbruchfläche nahe an der Winkelhalbierenden mit 45° liegt. Für die Mischverbindungen zeigt sich eine größere Tendenz zu einem Bruchwinkelintervall das größer als 35° ist.

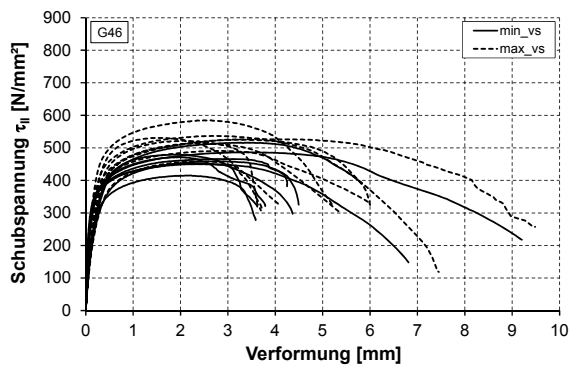
Diese Beobachtungen lassen die Folgerung zu, dass bei geschweißten Mischverbindungen der Bruchwinkel steiler ist und dementsprechend in Richtung des schwächeren der beiden verbundenen Grundwerkstoffe tendiert.

Für das Widerstandsmodell zur Bestimmung der Tragfähigkeit der Flankenkehlnahtverbindung in Kapitel 11.8.3 wird sowohl die Festigkeit des Grund- als auch des Schweißzusatzwerkstoffs berücksichtigt. Offen ist dabei aber die Wahl der Festigkeit des Grundwerkstoffs bei den sogenannten Mischverbindungen, wenn Grundwerkstoffe mit unterschiedlichen Festigkeitsklassen und einer dazu passenden oder abweichenden Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs verschweißt werden. Basierend auf den Ergebnissen in diesem Kapitel kann für die Bestimmung von Mischverbindungen die Annahme getroffen werden, dass für die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs im Bemessungsmodell der schwächere der beiden verschweißten Grundwerkstoffe angesetzt werden darf.

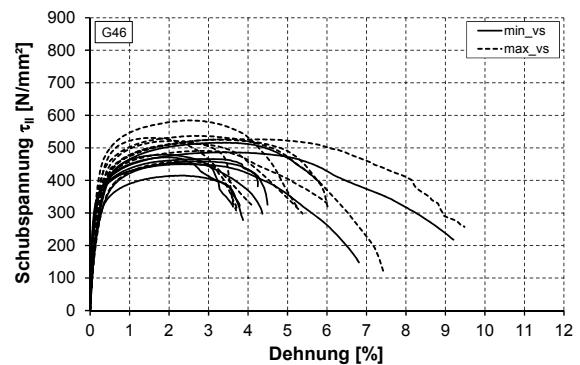
## 8.7 Verformungsfähigkeit

### 8.7.1 Verformungsverhalten

Das Verformungsverhalten einer Flankenkehlnaht lässt sich prinzipiell in zwei Bereiche gliedern: Einen anfänglichen elastischen und einen daran anschließenden plastischen Bereich. Bis zur Schubspannung  $\tau_y$  stellt sich eine nahezu ideal-elastische Charakteristik ein (vgl. Kapitel 6.7.2). Ab diesem Punkt wächst die Verformung der Naht bei mäßigem Lastanstieg an und zeigt ein annähernd ideal-plastisches Verhalten. Eine deutlich ausgeprägte Streckgrenze wie bei Zugversuchen an üblichen Baustählen lässt sich hier nicht feststellen. Abb. 8-22, Abb. 8-23 und Abb. 8-24 zeigen die aufgezeichneten Verformungskurven der im Forschungsprojekt *SAFEBRIC TILE* [52] geprüften Versuchskörper, abhängig vom jeweiligen Schweißzusatzwerkstoff. Hierbei sind die Datensätze bis zum Probenbruch, d. h. bis zum letzten aufgezeichneten Datenpunkt, aufgetragen.



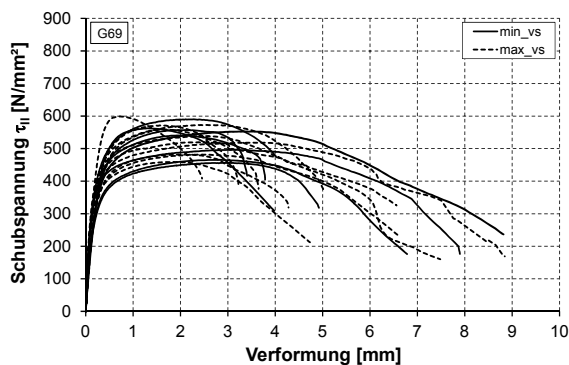
a) Schubspannung - Verformung



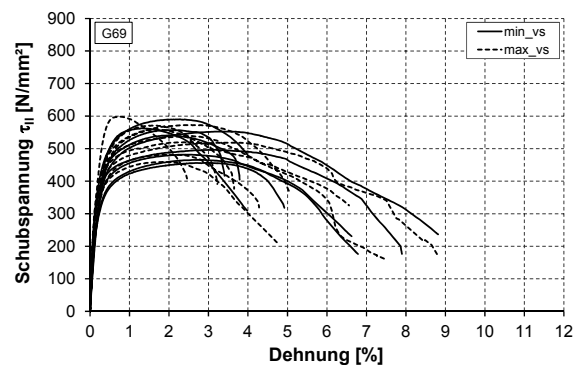
b) Schubspannung - Dehnung

Abb. 8-22: Verformungsverhalten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen mit Schweißzusatzwerkstoff G46

Da teilweise unterschiedliche wirksame Schweißnahtlängen bei den Versuchskörper vorhanden waren, sind in den Abb. 8-22 bis Abb. 8-24 sowohl die a) Schubspannungs-Verformungs- als auch die b) Schubspannungs-Dehnungs-Kurven dargestellt.



a) Schubspannung - Verformung



b) Schubspannung - Dehnung

Abb. 8-23: Verformungsverhalten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen mit Schweißzusatzwerkstoff G69

Eine aufgeschlüsselte Darstellung der Verformungskurven nach dem Verbindungstyp (Verbindung gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindung) und den verschweißten Grundwerkstoffen befindet sich in Anhang C.

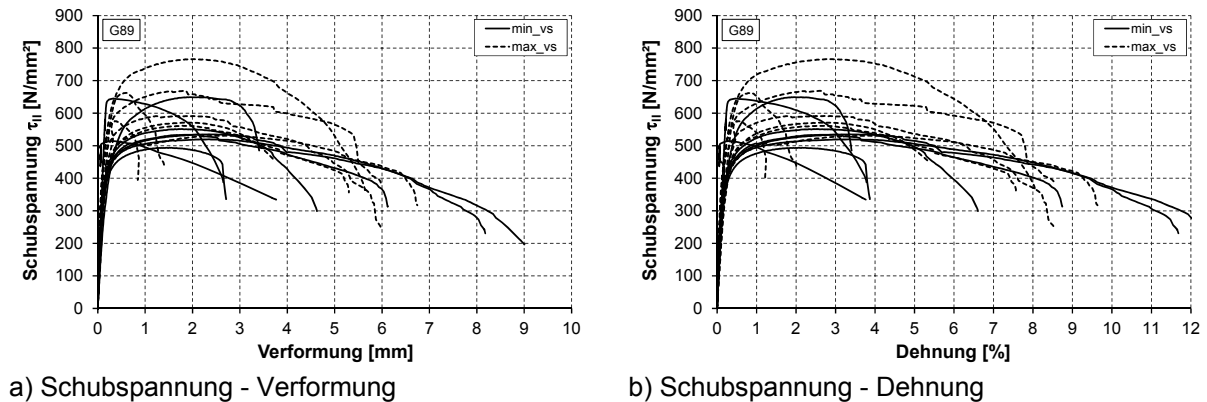


Abb. 8-24: Verformungsverhalten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen mit Schweißzusatzwerkstoff G89

Die beträchtliche Streuung im Hinblick auf die Verformung der Flankenkehlnähte innerhalb einer betrachteten Schweißzusatzwerkstoffgruppe ist vornehmlich auf zwei Einflüsse zurückzuführen: Durch die Variation der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  kommt es zu unterschiedlichen Streckenenergien  $E$  und Abkühlzeiten  $t_{8/5}$ , die wiederum einen unterschiedlichen tiefen Einbrand der Naht bzw. eine unterschiedliche Nahtdicke  $a$  zur Folge haben. Weiterhin ist die ungleiche Spannungsverteilung über die Länge der Naht als Ursache für die bemerkenswerte Streuung der Verformung zu nennen. Von geringerer Bedeutung sind die plastischen Verformungen der verbundenen Laschen in der Umgebung der Messpunkte und eine mögliche, aber schwerlich messbare, ungleiche Lastverteilung.

### 8.7.2 Verformung bei Fließbeginn

Abb. 8-25 zeigt die statistischen Kenngrößen der Auswertung zur Bestimmung der Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn entsprechend Kapitel 6.7.2 abhängig der drei verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe G46, G69 und G89. Aufgrund der teilweise unterschiedlichen wirksamen Schweißnahtlängen  $l_{eff}$  wurde die Auswertung an den korrespondierenden Dehnungen bei Fließbeginn  $\varepsilon_y$  vorgenommen. In Abb. 8-25 sind auf der Primärachse die Mittelwerte der Dehnungen  $\varepsilon_y$  und auf der Sekundärachse der Variationskoeffizient  $V$  und die dazugehörige Standardabweichung (qualitativ) dargestellt.

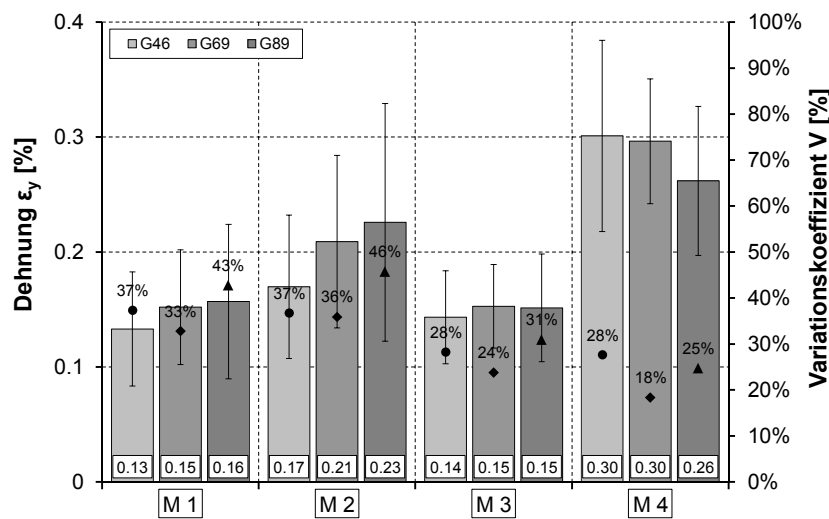


Abb. 8-25: Statistische Kenngrößen der verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn

Auffallend ist, dass die Mittelwerte der Methode 4 im Vergleich zu den anderen drei Methoden stark abweichen und demzufolge für weitere Betrachtungen nicht berücksichtigt werden. Die Methode 1, 2 und 3 ergaben ähnliche Mittelwerte, wobei die Standardabweichungen und die Variationskoeffizienten für Methode 3 am geringsten sind. Aufgrund der geringen Streuung für die drei Schweißzusatzwerkstoffe bei Methode 3 zwischen 24 – 31 %, wird zur Bestimmung der Verformung  $\Delta_y$  die Methode 3 festgelegt. Im weiteren Verlauf wird der Index 3 (Methode 3) der Verformung  $\Delta_{y,3}$  angehängt, um so einen eindeutigen Bezug herzustellen.

### 8.7.3 Verformung bei Probenversagen

Analog zur Ermittlung der statistischen Kenngrößen in Abb. 8-25 wird die Auswertung zur Bestimmung der Verformung  $\Delta_u$  zum Zeitpunkt des Probenversagens auf Basis der Dehnungen bei Probenversagen  $\varepsilon_u$  vorgenommen (vgl. Kapitel 6.7.3).

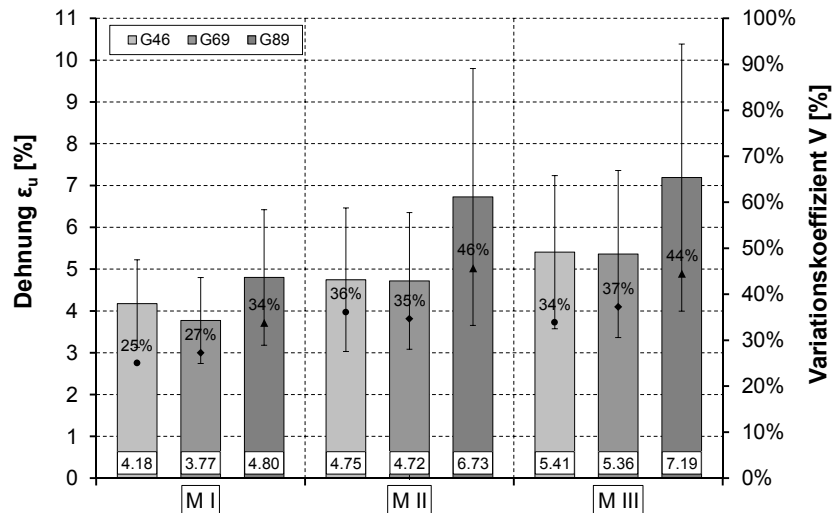


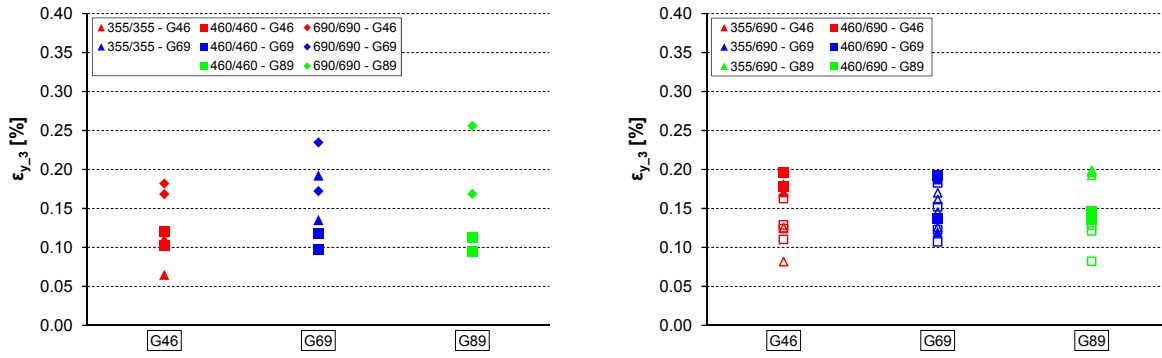
Abb. 8-26: Statistische Kenngrößen der Methoden zur Bestimmung der Verformung  $\Delta_u$  bei Probenversagen

In Abb. 8-26 sind grafisch die statistischen Kenngrößen abhängig der drei verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe G46, G69 und G89 dargestellt. Mit der verhältnismäßig geringsten Streuung zwischen 25 – 34 % erweist sich Methode I als repräsentativ und wird als Methode zur Bestimmung der Verformung  $\Delta_{u,I}$  (Index I für Methode I) zum Zeitpunkt des Probenversagens definiert.

### 8.7.4 Elastisches und plastisches Verformungsvermögen

Die in diesem Kapitel aufgeführten Abbildungen geben Auskunft über das elastische und plastische Verformungsvermögen der Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und den Mischverbindungen für Flankenkehlnahtverbindungen der im Rahmen des Forschungsprojekts *SAFEBRIC TILE* [52] geprüften Versuchskörper. Auf der Ordinatenachse ist das jeweilige Verformungsvermögen in Prozent und auf der Abszissenachse die einzelnen Grund- und Schweißzusatzwerkstoffkombinationen dargestellt. Für das elastisch-plastische Verformungsverhalten der Flankenkehlnahtverbindung wird die Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn als charakteristischen Punkt definiert, der die beiden Bereiche voneinander abgrenzt und zur Bestimmung des plastischen Verformungsvermögens herangezogen wird.

In Abb. 8-27 ist das elastische Verformungsvermögen  $\varepsilon_{y,3}$  bei Fließbeginn nach Methode 3 entsprechend Kapitel 6.7.2 für a) die Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und b) die Mischverbindungen über die verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe aufgetragen.

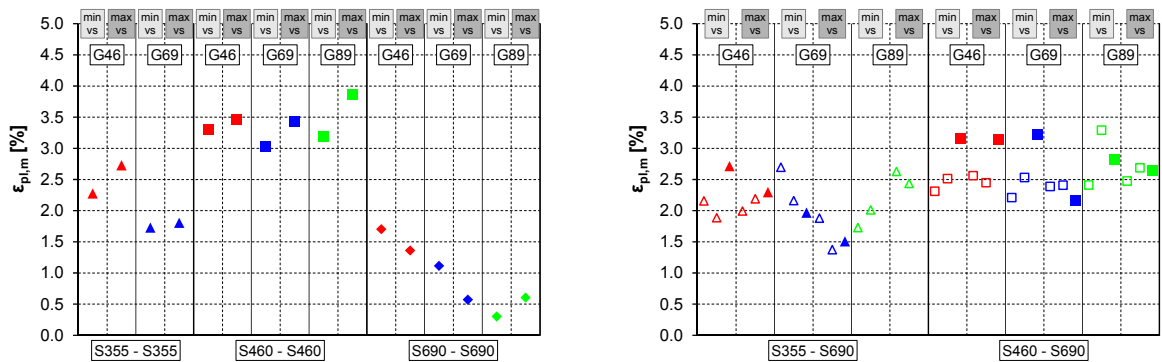


a) Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe      b) Mischverbindungen

Abb. 8-27: Elastisches Verformungsvermögen  $\epsilon_{y,3}$  in Abhängigkeit vom Schweißzusatzwerkstoff

Für die Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe mit den Grundwerkstoffen S355 und S690 zeichnet sich eine tendenzielle Zunahme des elastischen Verformungsvermögens mit steigender Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs ab. Dagegen zeigt sich für den Grundwerkstoff S460 ein nahezu konstantes elastisches Verformungsvermögen über alle drei Schweißzusatzwerkstoffe. Für die Mischverbindungen bewegt sich das elastische Verformungsvermögen zwischen 0,10 – 0,20 % wobei sich keine klare Tendenz bzgl. dem Einfluss der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs erkennen lässt.

Abb. 8-28 zeigt das plastische Verformungsvermögen  $\epsilon_{pl,m}$  als Differenz der maximalen Verformung  $\Delta_m$  bei maximaler Spannung zur Verformung  $\Delta_y$  bei Fließbeginn bezogen auf die wirksame Schweißnahtlänge  $l_{eff}$  entsprechend Gleichung (6.12) in Kapitel 6.7.4.



a) Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe      b) Mischverbindungen

Abb. 8-28: Plastisches Verformungsvermögen  $\epsilon_{pl,m}$

Für die in Abb. 8-28 a) aufgeführten Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe heben sich die Verbindungen mit dem Grundwerkstoff S460 eindeutig von den restlichen Verbindungen ab. Durch die Wahl des thermomechanisch gewalzten Baustahls S460 ML ergibt sich unabhängig vom Schweißzusatzwerkstoff ein deutlich größeres plastisches Verformungsvermögen (3,04 – 3,87 %). Dies lässt die Folgerung zu, dass das Verformungsvermögen einer Flankenkehlnaht auch von dem an die Naht angrenzenden Grundwerkstoff beeinflusst wird.

Weiterhin ist zu erkennen, dass sich zwar ein Unterschied im Verformungsvermögen bzgl. der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  ergibt, jedoch lässt sich eine klare Tendenz, vor allem bei einem Vergleich zwischen Grundwerkstoff S355 und S690, nicht ableiten. Außer für die Konfigurationen mit dem Grundwerkstoff S460 sinkt das plastische Verformungsvermögen mit zunehmender Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs. Dieses Verhalten zeigt sich auch tendenziell für die in Abb. 8-28 b) dargestellten Mischverbindungen. Hier ergibt sich ein durchschnittlich 1 % geringeres plastisches Verformungsvermögen der Verbindungen S355/S690 als bei den Verbindungen S460/S690.

In Abb. 8-29 ist nochmals das plastische Verformungsvermögen aller Verbindungen geordnet nach den drei verwendeten Schweißzusatzwerkstoffen aufgeführt. Hierbei kann der Einfluss der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs noch deutlicher dargestellt werden.

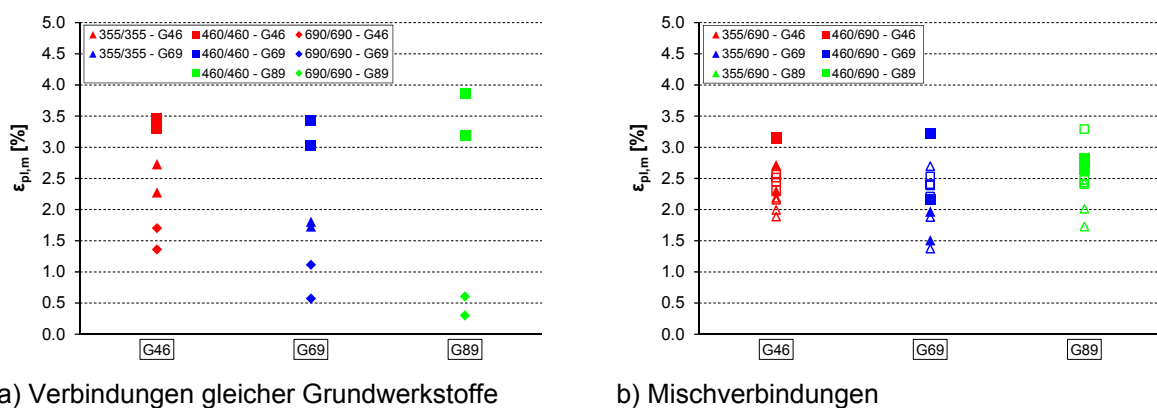
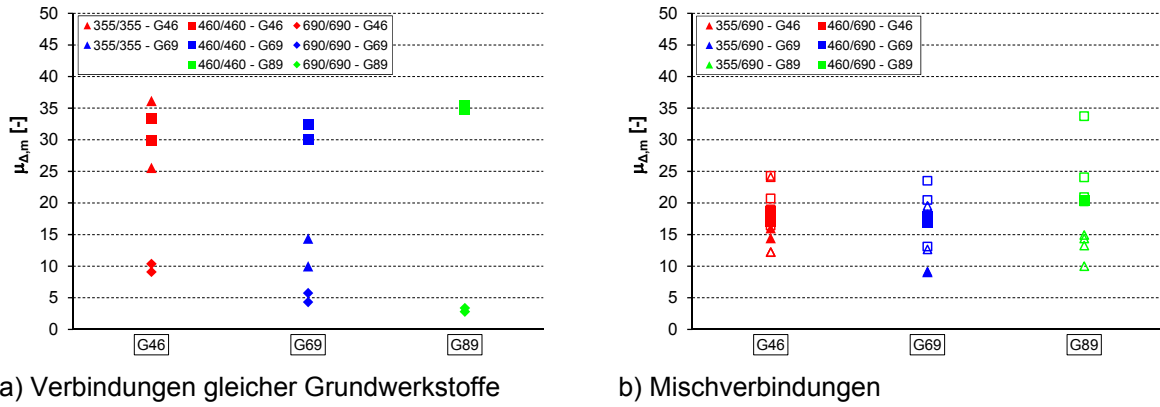


Abb. 8-29: Plastisches Verformungsvermögen  $\epsilon_{pl,m}$  in Abhängigkeit vom Schweißzusatzwerkstoff

Für die Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe, mit Ausnahme des Grundwerkstoffs S460, zeigt sich deutlich eine tendenzielle Abnahme des plastischen Verformungsvermögens mit zunehmender Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs. Bei den Mischverbindungen scheint der Einfluss der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs geringer zu sein, da sich das plastische Verformungsvermögen nahezu konstant zwischen 1,9 – 3,2 % bewegt. Aufgrund dieser großen Streuung lässt sich keine eindeutige Tendenz sowohl primär für den Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs als auch sekundär der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  erkennen.

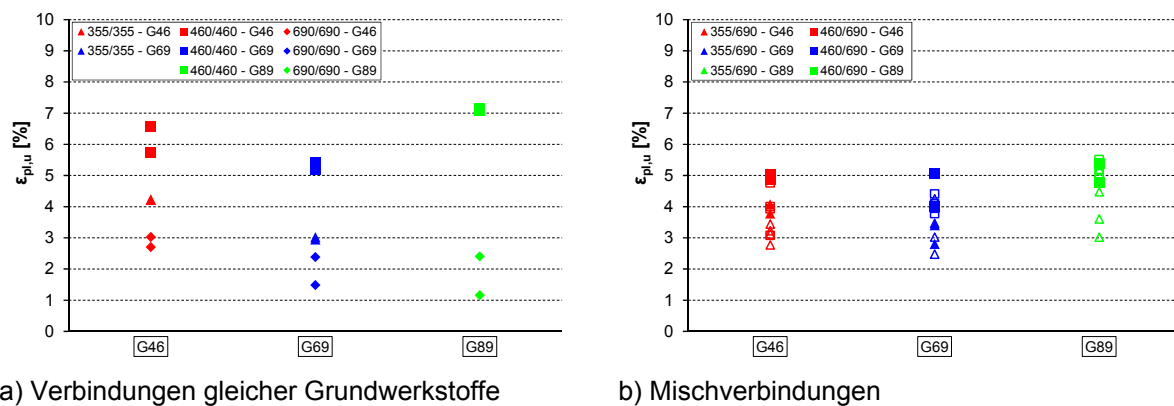
Eine weitere Methode um den Einfluss der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs auf das plastische Verformungsvermögen herauszuarbeiten, ist die Darstellung der Verschiebeduktilität  $\mu_{\Delta,m}$  als Quotient aus dem plastischen und dem elastischen Verformungsvermögen entsprechend Gleichung (6.14) in Abb. 8-30.



Abb. 8-30: Verschiebeduktilität  $\mu_{\Delta,m}$  in Abhängigkeit vom Schweißzusatzwerkstoff

Bei einer detaillierteren Betrachtung der Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und der entsprechenden Datenpunkte der einzelnen Konfigurationen der Grundwerkstoffe S355, S460 und S690 zeigt sich nochmals die negative Korrelation zwischen dem plastischen Verformungsvermögen und der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs. Weiterhin ist innerhalb einer Schweißzusatzwerkstoffgruppe deutlich der Einfluss des Grundwerkstoffs zu erkennen. Dies zeigt sich dadurch, dass bspw. die Verschiebeduktilität einer Verbindung mit dem Schweißzusatzwerkstoff G69 mit dem Grundwerkstoff S355 bei ca. 12, bei einem Grundwerkstoff S460 bei ca. 31 und bei einem Grundwerkstoff S690 bei ca. 5 liegt. Die großen Streuungen des plastischen Verformungsvermögens spiegeln sich auch in den Verschiebeduktilitäten zwischen 10 und 25 bei den Mischverbindungen wider.

In Abb. 8-31 ist das plastische Verformungsvermögen  $\varepsilon_{pl,u}$  nach Gleichung (6.13) bis zum Probenversagen aller Verbindungen geordnet nach Schweißzusatzwerkstoff aufgeführt. Das generelle Verformungsverhalten bzgl. dem Einfluss des Grund- und Schweißzusatzwerkstoffs unterscheidet sich nicht wesentlich vom plastischen Verformungsvermögen  $\varepsilon_{pl,m}$  in Abb. 8-29.

Abb. 8-31: Plastisches Verformungsvermögen  $\varepsilon_{pl,u}$  in Abhängigkeit vom Schweißzusatzwerkstoff

Jedoch zeigt sich bei einem Vergleich zwischen dem plastischen Verformungsvermögen  $\varepsilon_{pl,m}$  und  $\varepsilon_{pl,u}$ , dass durchschnittlich noch zusätzlich 1,5 – 2,0 % an plastischem Verformungsvermögen ab dem Zeitpunkt der maximalen Beanspruchung bis zum Zeitpunkt des Probenversagens (hier nach Methode I, vgl. Kapitel 6.7.3) von der Verbindung aufgenommen werden können.

## 9 Sicherheit und Zuverlässigkeit

### 9.1 Einführung in die Sicherheitsbetrachtung von Bauwerken

Täglich hat der Mensch direkten Kontakt mit Produkten, die er nicht selbst hergestellt hat: Beispielsweise mit Lebensmitteln, mit Fahrzeugen, mit Medikamenten aber auch dem Arbeiten und Leben in Gebäuden. Alle Beispiele unterliegen der Forderung nach Sicherheit. Diese Forderung kann erfüllt werden, indem jedes Produkt ein Höchstmaß an Vertrauen vermittelt, so dass sich der Nutzer bei der Anwendung über die Sicherheit keine Gedanken machen muss. Denn nur in den seltensten Fällen ist der Nutzer in der Lage dazu, die Sicherheit eines Produkts objektiv zu beurteilen.

Speziell bei der Tragwerksplanung von Gebäuden ist neben dem technischen Sicherheitsaspekt auch die Sicherheit als subjektiv einschätzbare Größe zu berücksichtigen. Dieses subjektive Sicherheitsempfinden ist bei jedem Menschen individuell gemäß seinen Erfahrungen ausgeprägt und kann durch eine Vielzahl an Informationsquellen beeinflusst werden. Beispielsweise löst bei vielen Menschen das Betreten einer Aussichtswarte ein Unbehagen aus, wie etwa der in Abb. 9-1 dargestellte Grand Canyon Skywalk. Er besteht aus einer über den Rand des Canyon auskragenden Plattform aus Stahlträgern mit Glasboden und Glasgeländer. Das Gefühl des Unwohlseins während dem Betreten kann durch persönliche Erfahrungen mit den Werkstoffen der Konstruktion begründet sein.



Abb. 9-1: Geringes subjektives Sicherheitsempfinden am Beispiel des Grand Canyon Skywalk [111]

Grundsätzlich definiert sich im Bauwesen der Begriff Sicherheit als die qualitative Fähigkeit eines Tragwerks Einwirkungen zu widerstehen. Um das Vorhandensein dieser Fähigkeit in ein quantitatives Maß zu fassen, verwendet man den Begriff der Zuverlässigkeit eines Tragwerks [51]. Wenn auch bei Bauwerken, wie bspw. einem Skywalk, gezielt mit dem Empfinden des Menschen gespielt wird, so ist doch eine der Kernaufgaben eines Tragwerksplaners Bauwerke zu errichten, die sowohl technische Zuverlässigkeit als auch subjektive Sicherheit vermitteln.

Bekanntlich ist die Sicherheit ein grundlegendes Bedürfnis eines jeden einzelnen Menschen. So hat der Staat als Gesetzgeber das Recht nach Sicherheit gesetzlich verankert. Als Beispiel sei an dieser Stelle die Landesbauordnung für Baden Württemberg (LBO) in der Fassung vom 5. März 2010 [40] aufgeführt, in der es im ersten Teil *Allgemeine Vorschriften* im § 3 *Allgemeine Anforderungen*, Absatz (1) heißt: „*Bauliche Anlagen sowie Grundstücke, andere Anlagen und Einrichtungen im Sinne von § 1 Abs. 1 Satz 2 sind so anzuordnen und zu errichten, dass die öffentliche Sicherheit oder Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit oder die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht bedroht werden und dass sie ihrem Zweck entsprechend ohne Missstände benutzbar sind. Für den Abbruch baulicher Anlagen gilt dies entsprechend.*“

Als übergeordnetes Sicherheitsziel kann die Sicherung von Leib und Leben des Menschen verstanden werden und zwar unmittelbar und mittelbar, räumlich und zeitlich unbeschränkt. Das bedeutet, dass Menschen versuchen, soweit ihnen Gefährdungen bekannt sind, diesen auszuweichen oder vorbeugende Maßnahmen zu ergreifen. Somit definiert sich der Sicherheitsanspruch als die Vermeidung von Gefahren. Sicherheit als qualitativer Begriff gilt als vorhanden, wenn das Risiko für Personenschäden auf vergleichbar kleine und damit akzeptierbare Werte beschränkt bleibt. Konsequenterweise ist nicht ein Tragwerk als sicher zu bezeichnen, sondern vielmehr die Menschen, die sich im Einflussbereich desselben befinden. Beispielsweise ist der Einsturz eines Aussichtsturmes auf einem unbewohnten Hügel bei anhaltenden Stürmen kein Sicherheitsproblem, da sich bei den beschriebenen Umständen kein Mensch in der Nähe oder gar auf dem Turm aufhalten würde [92].

Der Begriff *Risiko* bezeichnet zum einen die Möglichkeit einen Schaden zu erleiden, zum anderen ist das Risiko aber auch ein Maß für die Größe einer Gefahr, das es zu quantifizieren gilt. Das Risiko  $R_E$  ist eine Funktion der Eintretenswahrscheinlichkeit  $p_E$  ( $p$  für engl.: *probability*) eines Ereignisses und dem Erwartungswert des Schadens bei Eintritt dieses Ereignisses, mit  $E(S)$  bezeichnet (in Euro, Verletzten oder Toten pro Ereignis). Dies führt zur einfachsten Form der Quantifizierung von Risiken  $R_E$ :

$$R_E = p_E \cdot E(S) \quad (9.1)$$

Wahrscheinlichkeiten  $p$  nehmen Werte zwischen 0 und 1 an und sind dimensionslos, so dass das Risiko die Dimension des Schadens hat. Werden die Risiken auf ein bestimmtes Zeitintervall, z. B. auf ein Jahr bezogen, spricht man nicht mehr von Wahrscheinlichkeiten  $p$  sondern von Häufigkeiten  $h$  [92].

In Tab. 9-1 sind zum Vergleich ausgewählte Todesursachen oder Sachverhalte und die dazugehörige relative Sterbehäufigkeit bzw. das Sterberisiko pro Jahr und Person aufgelistet. Es ist sehr bemerkenswert, dass das Risiko für den Verlust von Leib und Leben durch ein Bauwerksversagen äußerst gering ist.

Tab. 9-1: Ausgewählte relative Sterbehäufigkeiten pro Jahr [83]

Todesursache oder Sachverhalt	Relative Sterbehäufigkeit $h$ pro Jahr
Alpines Klettern	$1,5 \times 10^{-3}$
Autofahren	$2,0 \times 10^{-4}$
Schwimmen	$1,7 \times 10^{-4}$
Fliegen	$1,2 \times 10^{-4}$
Brände	$8,0 \times 10^{-6}$
<b>Bauwerksversagen</b>	<b><math>1,0 \times 10^{-7}</math></b>

Im Gegensatz zur Sicherheit ist die Zuverlässigkeit  $Z$  messbar und ist als Komplement zur Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  definiert.

$$Z = 1 - P_f \quad (9.2)$$

Demnach kann die Zuverlässigkeit mit Hilfe der Zuverlässigkeitstheorie bewertet werden und ist definiert als eine Tragwerkseigenschaft, die die Erfüllung einer festgelegten Funktion unter vorgegebenen Bedingungen während einer festgelegten Zeitdauer mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit gewährleistet [76]. Konkret bedeutet dies für Bauwerke, dass die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  ein Maß für die Größe der Gefahr des Tragfähigkeitsverlustes darstellt und die Wahrscheinlichkeit beschreibt, mit der das Tragwerk in einem definierten Zeitraum einen Schaden erleiden kann.

Nicht selten wird statt der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  auch der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  als Maß für die Zuverlässigkeit benutzt, mit dem Vorteil, dass  $\beta$  mit steigender Sicherheit anwächst und sich in einer gängigen Größenordnung befindet (vgl. Tab. 9-2). Auf die Herleitung und den Zusammenhang zwischen  $P_f$  und  $\beta$  wird in Kapitel 9.4.3 eingegangen.

Tab. 9-2: Zusammenhang zwischen Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  und Zuverlässigkeitsindex  $\beta$

$P_f$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$\beta$	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

## 9.2 Strategien zur Gewährleistung der Tragwerkssicherheit

Um eine hohe Zuverlässigkeit von Bauwerken und die Tragwerkssicherheit zu gewährleisten, werden im Wesentlichen drei Strategien verfolgt, die zeitlich nacheinander wirken und nachfolgend aufgeführt sind:

### a) Schaffung eines ausreichenden Sicherheitsabstands zwischen Beanspruchung und Widerstand

Kernpunkt einer jeden Bemessung ist, die Abmessungen der Konstruktion und die zu verwendenden Materialien so festzulegen, dass während der gesamten Nutzungsdauer des Tragwerks der Widerstand  $R$  mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit größer ist als die Beanspruchung  $E$ . Die zentrale Sicherheitszone ist hierbei in Abb. 9-2 durch den Abstand der Mittelwerte  $m_E$  und  $m_R$  festgelegt. Die kleinere nominale Sicherheitszone ist durch den Abstand der für die Bemessung verwendeten charakteristischen Werte  $E_k$  und  $R_k$  definiert.

Je größer die nominale Sicherheitszone, umso höher ist die Sicherheit bzw. die Zuverlässigkeit. Für die detaillierte Bestimmung des Sicherheitsabstandes sei auf Kapitel 9.5 verwiesen.

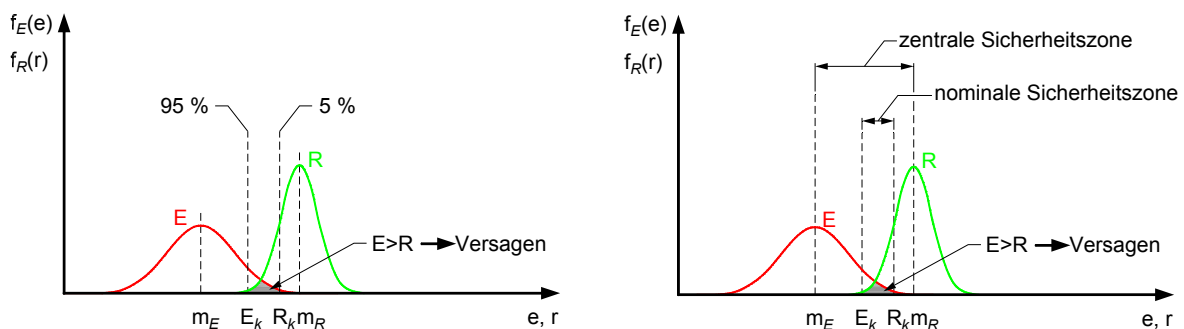


Abb. 9-2: Definitionen der Sicherheitszonen nach [108]

### b) Maßnahmen zur Vermeidung menschlicher Fehlhandlungen

Analysen hinsichtlich eingetretener Schäden haben gezeigt, dass die Mehrzahl der Versagensfälle durch Fehler der direkt am Bau beteiligten Personen verursacht werden. Als eine mögliche Ursache wurde der mangelnde Wissensstand genannt. Eine stetige persönliche Weiterbildung kann hier ganz entscheidend im Sinne der Reduktion von Gefahren sein. Zusätzlich können wirkungsvolle Kontroll- und Überwachungssysteme und die Organisation einer lückenlosen Verantwortlichkeit unterstützend wirken.

**c) Maßnahmen zur Begrenzung des Schadensausmaßes**

Trotz der beiden genannten Strategien können Versagensfälle nie gänzlich ausgeschlossen werden. Der Tragwerksplaner hat einerseits die Möglichkeit zur Wahl eines redundanten Tragsystems im Sinne der Robustheit. Hierbei wird das Tragsysteme so gewählt, dass bei Versagen eines lokalen Bauteils ein Totaleinsturz vermieden wird. Das übergeordnete Ziel ist die Beschränkung des Versagens auf einen lokalen, möglichst geringen Bereich. Andererseits bietet sich die Möglichkeit, das Bauwerk so zu konzipieren, dass sich ein Versagensfall vorab, bspw. durch große Verformungen der Konstruktion ankündigt. Dies lässt sich durch die Wahl duktiler Materialien/Werkstoffe und/oder durch Konstruktionsformen mit großem Verformungsvermögen erreichen. Eine Umlagerung der Beanspruchung von hochbeanspruchten Zonen in weniger beanspruchte Bereiche kann dadurch auch möglich sein.

## 9.3 Zuverlässigkeitsmethoden

### 9.3.1 Überblick

In Abb. 9-3 ist die Hierarchie der verschiedenen Methoden zur Kalibrierung der Bemessungsgleichungen (für die Grenzzustände) mit Teilsicherheitsbeiwerten dargestellt. Das übergeordnete Ziel der Zuverlässigkeitsmethoden ist die Quantifizierung der Versagenswahrscheinlichkeit. Grundsätzlich lassen sich die Zuverlässigkeitsmethoden in zwei Hauptgruppen aufteilen: *Deterministische Methoden* und *Probabilistische Methoden*.

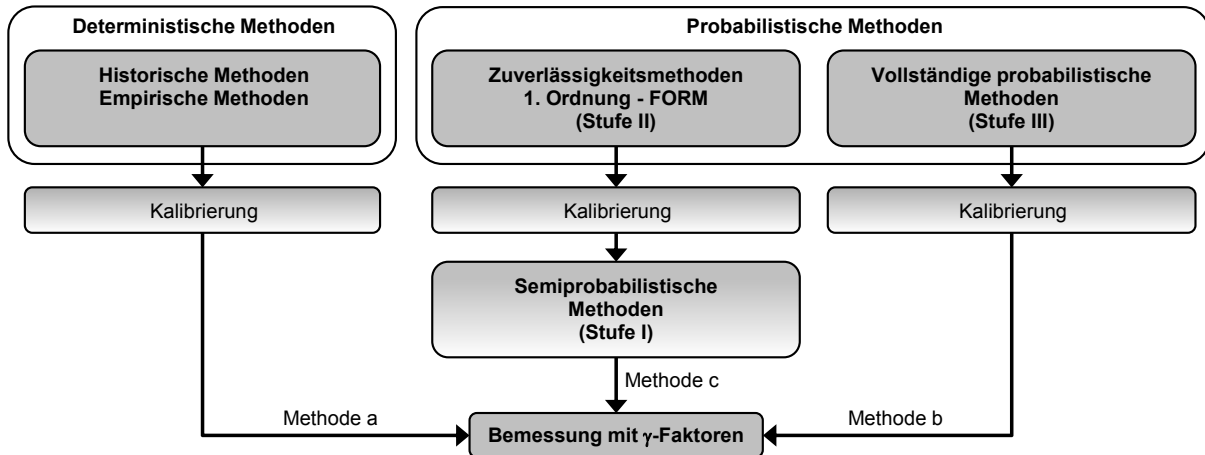


Abb. 9-3: Überblick über Zuverlässigkeitsmethoden nach DIN EN 1990 [6]

### 9.3.2 Deterministische Methoden

Frühere Nachweiskonzepte in den einzelnen nationalen Normenwerken basieren auf dem Konzept der *Methode der zulässigen Spannungen*.

$$\sigma \leq \sigma_{zul} \quad (9.3)$$

Das Sicherheitsmaß der traditionellen, empirischen Vorgehensweise ist der globale Sicherheitsbeiwert  $\gamma_0$ . Die zulässigen Spannungen repräsentieren einen materialabhängigen Festigkeitswert  $\beta_F$ , der um den pauschalen Sicherheitsbeiwert  $\gamma_0$  abgemindert ist.

$$\sigma_{zul} = \frac{\beta_F}{\gamma_0} \quad (9.4)$$

Der Wert  $\sigma_{zul}$  ist ein deterministisch festgelegter Wert, der mit steigender Erfahrung und besserer Ausführung schrittweise erhöht wurde (empirische Methoden). Der *globale Sicherheitsbeiwert*  $\gamma_0$  deckt pauschal sowohl alle Streuungen auf der Einwirkungs- als auch auf der Widerstandsseite ab.



Dies hat den Nachteil, dass sich die Anteile der Streuung nicht differenzieren lassen und somit auch die Zuverlässigkeit bzw. die Versagenswahrscheinlichkeit nicht quantifiziert werden kann [6].

### 9.3.3 Probabilistische Methoden

Die neueren Nachweisverfahren, wie sie auch in den Eurocodes angewendet werden, beruhen auf einem Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten, bei dem die Auswirkung einer Einwirkung  $E$  einem Widerstand  $R$  gegenübergestellt wird. Hierbei wird der globale Sicherheitsbeiwert in den Teil seitens der Einwirkungen ( $\gamma_F$ ) und den Teil seitens der Widerstände ( $\gamma_M$ ) aufgesplittet. Eine Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten bedeutet, dass für jede Bemessungssituation die Auswirkung der charakteristischen Einwirkungen  $E_k$  um den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_F$  erhöht und die charakteristische Beanspruchbarkeit  $R_k$  um den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  abgemindert wird. Hierbei berücksichtigt der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_F$  die Streuungen auf Seite der Lasten und der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  die Streuungen auf Seite des Materials. Der Vorteil dieses einheitlichen Konzepts besteht darin, dass baustoffunabhängig eine bestimmte Zuverlässigkeit bzw. Versagenswahrscheinlichkeit vorgegeben werden kann und die Berechnungen demzufolge für alle Baustoffe auf denselben Konzepten basieren [6].

#### Semiprobabilistische Methode (Stufe I - Verfahren)

Grundlage der DIN EN 1990 [6] ist die semiprobabilistische Methode (Stufe I - Verfahren). Die Methode verwendet deterministische Sicherheitselemente (Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte), die mit Hilfe vereinfachter probabilistischer Methoden (Stufe II - Verfahren) und empirisch-historischer Kalibrierung bestimmt werden. Der Tragfähigkeitsnachweis (ULS) wird nach dem Verfahren der Teilsicherheitsbeiwerte für definierte Grenzzustände geführt (Limit state design). Sofern mehrere Einwirkungen ( $F_{j=1,2,\dots,n}$ ) auf ein Tragsystem wirken, das aus den Materialien ( $X_{i=1,2,\dots,m}$ ) besteht, ergibt sich folgende Schreibweise [63]:

$$\gamma_E \cdot E(\gamma_{f,j} \cdot F_{k,j=1,2,\dots,n}) \leq \frac{1}{\gamma_R} \cdot R \left( \frac{X_{k,i=1,2,\dots,m}}{\gamma_{m,i}} \right) \quad (9.5)$$

mit

$E$	Effekte aus den Einwirkungen
$\gamma_E$	Teilsicherheitsbeiwert für die Modellunsicherheit bei den Einwirkungen sowie im statistischen Modell (Auswirkungen der Einwirkungen)
$\gamma_{f,j}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Unsicherheit eines repräsentativen Werts einer Einwirkung
$F_{k,j}$	charakteristischer Wert der Einwirkung $F_j$ (in der Regel oberer Fraktilwert: 95 %)
$R$	Widerstand (resistance) des Bauteils
$\gamma_R$	Teilsicherheitsbeiwert für die Modellunsicherheit bei der Beschreibung der Bauteilwiderstände
$X_{k,i}$	charakteristischer Wert einer Materialfestigkeit $X_i$ (in der Regel unterer Fraktilwert: 5 %)
$\gamma_{m,i}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Unsicherheit einer Baustoffeigenschaft

Die Teilsicherheitsbeiwerte können auf der Einwirkungs- und der Widerstandseite zusammengefasst werden:

$$\gamma_{F,j} = \gamma_E \cdot \gamma_{f,j} \quad (9.6)$$

$$\gamma_{M,i} = \gamma_R \cdot \gamma_{m,i} \quad (9.7)$$

mit

$\gamma_{F,j}$	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen, unter Berücksichtigung von Modellunsicherheiten und Größenabweichungen
$\gamma_{M,i}$	Teilsicherheitsbeiwert für einen Bauteilwiderstand, unter Berücksichtigung von Modellunsicherheiten und Größenabweichungen

### Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung - FORM (Stufe II - Verfahren)

Die Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung (First Ordner Reliability Method) zählt zu den Stufe II - Verfahren. Bei dieser Methode handelt es sich um ein Näherungsverfahren zur Bestimmung des Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  bzw. der äquivalenten operativen Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$ . Die Verfahren dieser Stufe werden als probabilistisch bezeichnet und berücksichtigen Mittelwert, Streuung und näherungsweise den Verteilungstyp der Einzeleinflüsse. Außerdem eröffnet dieses Verfahren die Nachrechnung üblicher Bemessungen nach geltenden Normen, um so Rückschlüsse auf den angewandten Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  ziehen zu können.

Für den Fall, dass die Einwirkung  $E$  und der Widerstand  $R$  normalverteilt sind, gilt:

$$\text{Grenzzustandsgleichung:} \quad E_d \leq R_d \quad (9.8)$$

$$\text{Bemessungswert der Einwirkung:} \quad E_d = m_E + \alpha_E \cdot \beta \cdot \sigma_E \quad (9.9)$$

$$\text{Bemessungswert des Widerstands:} \quad R_d = m_R + \alpha_R \cdot \beta \cdot \sigma_R \quad (9.10)$$

mit

$m_E, m_R$  Mittelwerte von Einwirkung und Widerstand der Standardnormalverteilung

$\sigma_E, \sigma_R$  Standardabweichung

$\beta$  Zuverlässigkeitsindex (siehe Kapitel 9.4.3)

$\alpha_E, \alpha_R$  Wichtungsfaktoren (siehe Kapitel 9.5)

Die Wichtungsfaktoren stellen eine Näherung dar und ermöglichen eine getrennte Betrachtung der Einwirkungs- und Widerstandsseite. Demzufolge hängt der Bemessungswert der Einwirkung  $E_d$  nur von der Streuung der Einwirkungen und der Bemessungswert des Widerstands  $R_d$  nur von der Streuung des Widerstands ab [6]. Die Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung ist das zentrale Thema in Kapitel 9.5.

### **Vollständig probabilistische Methode (Stufe III - Verfahren)**

Die vollständig probabilistischen Methoden gehören zu den Stufe III - Verfahren. Hierbei handelt es sich um wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden für das gesamte Tragwerk oder seine Elemente mit wirklichkeitsnahen Ansätzen für die Verteilungsfunktion der Basisvariablen und der genauen Grenzzustandsgleichungen.

Ziel ist die Ermittlung der operativen Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$ , die maßgeblich von den rechnerisch zu berücksichtigenden Basisvariablen mit ihren Verteilungstypen abhängt [6]. Somit beinhaltet zwar ein Nachweis nach Stufe III die exakte Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit für alle Einzeleinflüsse der Einwirkungs- und Widerstandsseite, jedoch sind für die praktische Bemessung die Verfahren der Stufe III belanglos, da diese mit einem unverhältnismäßig großen Aufwand verbunden sind [81].

In Tab. 9-3 sind die aufgeführten Stufen der Zuverlässigkeitstheorie mit dem jeweilig zugehörigen Zuverlässigkeitsmaß zusammengefasst dargestellt.

Tab. 9-3: Stufen der Zuverlässigkeitstheorie nach [96]

Stufe	Sicherheitskonzept	Anmerkungen	Zuverlässigkeitsmaß
0	Deterministisch (konventionell)	Traditionell, empirische Vorgehensweise	Globaler Sicherheitsbeiwert $\gamma_0$
I	Semiprobabilistisch (quasi-deterministisch)	Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten; Für die Ingenieurpraxis relevant	Teilsicherheitsfaktoren $\gamma_F; \gamma_M; \dots$
II	Probabilistische Näherung	Berücksichtigt Mittelwert, Streuung und Verteilung der Einzeleinflüsse; Grundlage für die Neubearbeitung von Last- und Bemessungsnormen	Zuverlässigkeitsindex $\beta$
III	Probabilistisch <i>exakte</i> Lösung	<i>Exakte</i> Anwendung der Wahrscheinlichkeitstheorie; Keine Bedeutung für die praktische Bemessung	Versagenswahrscheinlichkeit $P_f$

## 9.4 Anforderungen an das Bauwerk

### 9.4.1 Grundlegende Anforderungen

In DIN EN 1990 [6] ist die geplante Nutzungsdauer definiert als „*angenommene Zeitdauer, innerhalb der ein Tragwerk unter Berücksichtigung vorgesehener Instandhaltungsmaßnahmen für seinen vorgesehenen Zweck genutzt werden soll, ohne dass jedoch eine wesentliche Instandsetzung erforderlich ist*“ [6]. Dies bedeutet für die Planung und Ausführung eines Tragwerks, dass es während der Errichtung und in der vorgesehenen Nutzungszeit mit angemessener Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit den möglichen Einwirkungen und Einflüssen standhält und die geforderten Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit erfüllt. Die geplante Nutzungsdauer steht in Zusammenhang mit den Bemessungswerten der Einwirkung. Bei sehr kurzer Nutzungsdauer ist auf Grundlage statistischer Verfahren eine Reduktion der Bemessungswerte möglich. Die geplante Nutzungsdauer wird über den Bezugszeitraum klassifiziert (siehe Tab. 9-4) und fließt direkt in die Bestimmung des Zuverlässigkeitsindex (siehe Kapitel 9.4.3) ein.

Tab. 9-4: Klassifizierung der Nutzungsdauer nach [6]

Klasse der Nutzungsdauer	Planungsgröße der Nutzungsdauer (in Jahren)	Beispiele
1	10	Tragwerke mit befristeter Standzeit <sup>a</sup>
2	10 - 25	Austauschbare Tragwerksteile, z. B. Kranbahnträger, Lager
3	15 - 30	Landwirtschaftlich genutzte und ähnliche Tragwerke
4	50	Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke
5	100	Monumentale Gebäude, Brücken und andere Ingenieurbauwerke

<sup>a</sup> **Anmerkung:** Tragwerke oder Teile eines Tragwerks, die mit der Absicht der Wiederverwendung demontiert werden können, sollten nicht als Tragwerke mit befristeter Standzeit betrachtet werden.

### 9.4.2 Behandlung der Zuverlässigkeit

In Kapitel 9.1 wurde bereits die Bezifferung der Sicherheit durch die Zuverlässigkeit erläutert und in Gleichung (9.2) definiert. Hierbei ist das Komplement der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  die Zuverlässigkeit  $Z$ . Somit lässt sich bei einer Zuverlässigkeitsanalyse sowohl die Versagenswahrscheinlichkeit als auch die Zuverlässigkeit für die Nutzungsdauer bestimmen. Sofern der Entwurf und die Bemessung eines Bauwerks nach Eurocode (EN 1990 bis EN 1999) erfolgt, können abhängig von Art und Nutzung differenzierte Zuverlässigkeitsniveaus für die Tragfähigkeit oder die Gebrauchstauglichkeit zugrunde gelegt werden [6]. Sofern eine Differenzierung des Zuverlässigkeitsniveaus für ein bestimmtes Tragwerk erfolgt, sind folgende Aspekte zu beachten:

- Mögliche Ursachen und Formen des Versagens,
- mögliche Versagensfolgen in Hinblick auf Leben und Unversehrtheit von Personen und auf wirtschaftliche Verluste,

- öffentliche Einstellung zu dem Versagen,
- Kosten und Aufwendungen, um das Versagensrisiko zu vermindern.

Für die Differenzierung der Zuverlässigkeit werden in Anhang B der DIN EN 1990 [6] Schadensfolgeklassen (CC) eingeführt, die von CC 1 bis CC 3 gestaffelt sind. Die Staffelung erfolgt nach der Bedeutung des Tragwerks oder seiner Teile im Hinblick auf Versagensfolgen (siehe Tab. 9-5).

Tab. 9-5: Klassen für Schadensfolgen

Schadensfolgeklassen	Merkmale	Beispiele im Hochbau oder bei sonstigen Ingenieurbauwerken
CC 3	Hohe Folgen für Menschenleben <u>oder</u> sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (z. B. eine Konzerthalle)
CC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen (z. B. ein Bürogebäude)
CC 1	Niedrige Folgen für Menschenleben <u>und</u> kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr (z. B. Scheunen, Gewächshäuser)

DIN EN 1990 [6] erlaubt darüber hinaus, dass je nach Tragwerksart und Bemessungsstrategie verschiedene Teile eines Tragwerks auch einer höheren oder niedrigeren Schadensfolgeklasse zugewiesen werden können als das Gesamttragwerk.

Mit den drei Schadensfolgeklassen CC 1 bis CC 3 sind direkt die Zuverlässigkeitsklassen RC 1 bis RC 3 verknüpft (siehe Tab. 9-7). Somit lassen sich die Bauwerke entsprechend der Schadensfolgeklasse den geforderten Zuverlässigkeitsklassen zuordnen.

### 9.4.3 Bestimmung des Zuverlässigkeitsindex

Sehr viele Größen aus Natur und Technik, aber auch den Ingenieurwissenschaften folgen mit guter Näherung (einer elementaren, stetigen und symmetrischen Verteilung) der Normalverteilung.

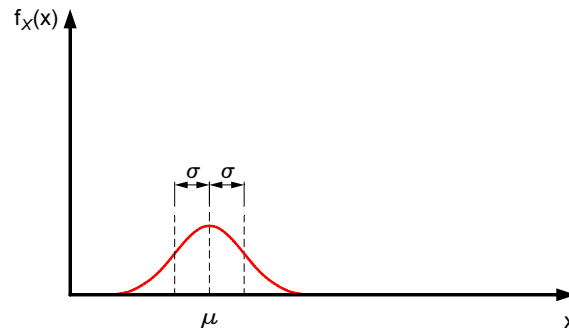


Abb. 9-4: Gauß'sche Glockenkurve - Normalverteilung

Die symmetrische Dichtefunktion, die Gauß'sche Glockenkurve nach Abb. 9-4, ist durch den Mittelwert  $\mu$  und die Standardabweichung  $\sigma$  über Gleichung (9.11) beschrieben.

$$f(x | \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{mit } -\infty \leq x \leq \infty \quad (9.11)$$

Die Normierung von  $\mu = 0$  und  $\sigma = 1$  führt zur standardisierten Normalverteilung, deren Verteilungsfunktion wie folgt definiert ist:

$$F(x | \mu, \sigma) = \Phi(x | \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \quad (9.12)$$

Das übergeordnete Ziel ist, mit Hilfe eines Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  eine bestimmte gewünschte rechnerische Versagenswahrscheinlichkeit auszudrücken. Somit lässt sich der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  aus der vorgegebenen Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  für den Bezugszeitraum von einem Jahr mittels der inversen kumulativen Verteilungsfunktion nach Gleichung (9.13) berechnen.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (9.13)$$

Gleichung (9.13) zeigt, dass der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  direkt von der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  funktional abhängt. Der nichtlineare Zusammenhang mit der Standardnormalverteilung gemäß Gleichung (9.13) ist in Abb. 9-5 exemplarisch für die beiden Bezugszeiträume ein Jahr und 50 Jahre grafisch dargestellt.

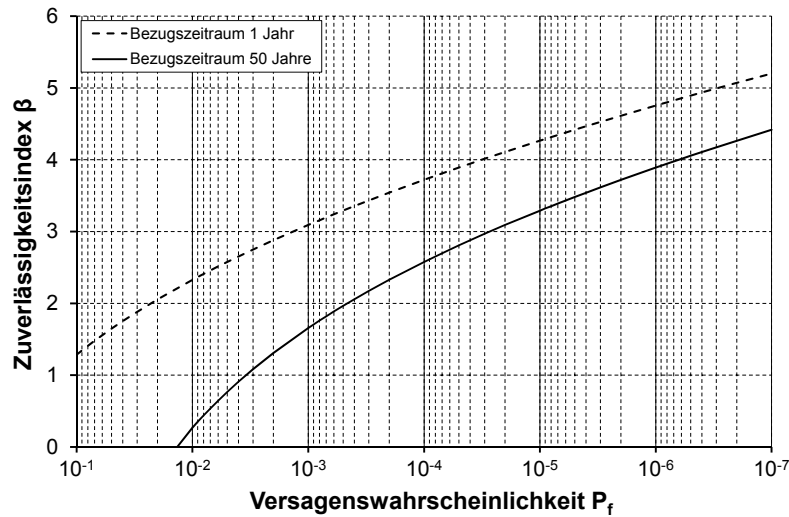


Abb. 9-5: Beziehung zwischen Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  und Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$

Anhang C der DIN EN 1990 [6] gibt ein Näherungsverfahren entsprechend Gleichung (9.14) für die Berechnung des Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  für andere Bezugszeiträume an, sofern die wesentlichen Unsicherheiten von Einwirkungen herrühren, die statistisch unabhängige Jahresmaxima aufweisen.

$$\Phi(\beta_n) = [\Phi(\beta_1)]^n \tag{9.14}$$

mit

- $\beta_n$  Zuverlässigkeitsindex für den Zeitraum von  $n$  Jahren
- $\beta_1$  Zuverlässigkeitsindex für den Zeitraum 1 Jahr

Der zahlenmäßige Zusammenhang zwischen einigen ausgewählten Versagenswahrscheinlichkeiten  $P_f$  und den zugehörigen Zuverlässigkeitsindizes  $\beta_1$  für ein Jahr bzw.  $\beta_{50}$  für 50 Jahre ist in Tab. 9-6 aufgeführt. Die Berechnung erfolgt dabei mit den Gleichungen (9.13) und (9.14).

Tab. 9-6: Beziehung zwischen Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  und Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$

$P_f$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$\beta_1$	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20
$\beta_{50}$	-	0,27	1,66	2,58	3,29	3,89	4,42

Der Unterschied des Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  für einen Bezugszeitraum von einem Jahr zu 50 Jahren begründet sich im Wesentlichen durch die Zeitabhängigkeit der Belastungen und Materialeigenschaften. Je größer der Bezugszeitraum, desto geringer ist der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  bei einer konkreten Versagenswahrscheinlichkeit (vgl. hierzu Abb. 9-5). Dem Eintreten einer extremen Beanspruchung in einem kürzeren Zeitraum wird eine geringere Wahrscheinlichkeit zugeordnet als in einem sehr langen Zeitraum.



Somit wird bspw. bei einem Nachweis für 50 Jahre eine höhere Last angesetzt, so dass sich ein niedrigerer Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  ergibt.

Anhang C der DIN EN 1990 [6] weist ausdrücklich in Abschnitt C.6 (2) darauf hin, dass „die wirkliche Versagenshäufigkeit im Wesentlichen im Zusammenhang mit menschlichem Versagen steht, das bei der Bestimmung der Teilsicherheitsbeiwerte unberücksichtigt bleibt. Insofern stellt  $\beta$  nicht notwendigerweise ein Indiz für die wirkliche Versagenshäufigkeit dar.“

In Anhang B der DIN EN 1990 [6] sind für jede der drei Zuverlässigkeitsklassen ein mindestens zu erreichender Zielwert  $\beta$  angegeben, der wiederum für eine Versagenswahrscheinlichkeit steht (siehe Tab. 9-7). Die tabellierten Mindestwerte für den Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  weichen aufgrund der besseren Handhabbarkeit von den Werten in Tab. 9-6 ab. Für die weitere Betrachtung werden die Werte aus Tab. 9-7 zugrunde gelegt.

Tab. 9-7: Empfehlungen für Mindestwerte des Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  [6]

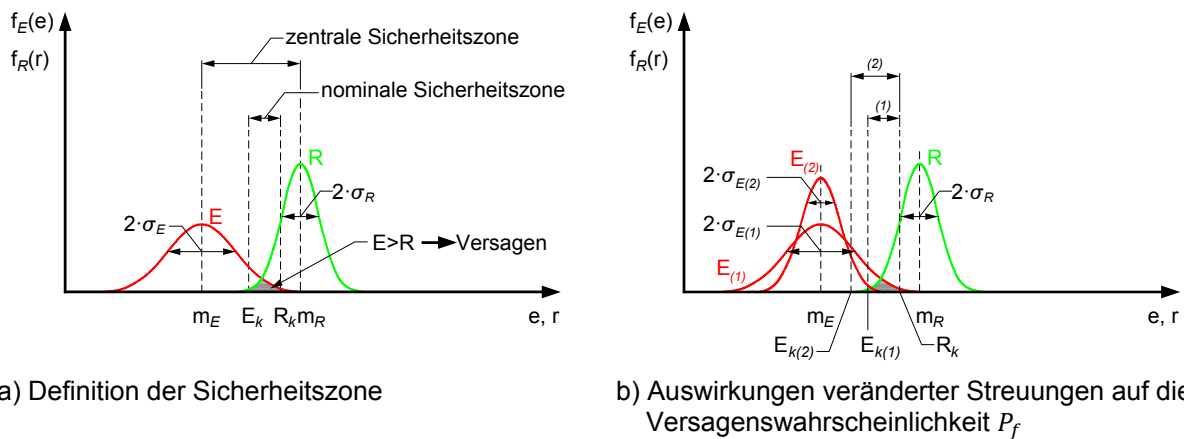
Zuverlässigkeitsklasse	$P_f$	Mindestwert für $\beta$	
		Bezugszeitraum 1 Jahr	Bezugszeitraum 50 Jahre
RC 3	$\approx 10^{-7}$	5,2	4,3
RC 2	$\approx 10^{-6}$	4,7	3,8
RC 1	$\approx 10^{-5}$	4,2	3,3

**Anmerkung:** Die Bemessung nach EN 1990 mit den Teilsicherheitsbeiwerten nach Anhang A sowie nach EN 1991 bis EN 1999 führt in der Regel zu einem Tragwerk mit einer Mindestzuverlässigkeit  $\beta \geq 3,8$  für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren. Größere Zuverlässigkeitsklassen als RC 3 werden in diesem Anhang nicht weiter betrachtet, da für die betroffenen Bauteile Sonderuntersuchungen angestellt werden müssen.

## 9.5 Aufteilung der geforderten globalen Sicherheit auf Beanspruchung und Widerstand

Der Kernpunkt einer statischen Bemessung liegt in der Gegenüberstellung der Beanspruchung  $E$  und des Widerstands  $R$ . Die Betrachtung kann sowohl an einem einzelnen Querschnitt des Bauteils oder am globalen System durchgeführt werden. Das übergeordnete Ziel liegt darin, basierend auf dem stochastischen Charakter der Beanspruchung  $E$  und des Widerstands  $R$  mit Hilfe der Zuverlässigkeitstheorie eine mögliche, objektive Quantifizierung der notwendigen Zuverlässigkeit zu bestimmen [108].

Unter der Annahme, dass die Beanspruchung  $E$  und der Widerstand  $R$  jeweils durch stochastisch voneinander unabhängige Normalverteilungen beschrieben werden können, ergeben sich die in Abb. 9-6 dargestellten Dichtefunktionen. Die Beanspruchung wird dabei mit der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f_E(e)$  modelliert und die Dichtefunktion des Widerstands mit  $f_R(r)$ . Die Werte  $m_E$  und  $m_R$  repräsentieren die Mittelwerte der Beanspruchung und des Widerstands und  $\sigma_E$  und  $\sigma_R$  die zugehörigen Standardabweichungen.

Abb. 9-6: Verteilungsdichten von Beanspruchung  $E$  und Widerstand  $R$ 

Da die Dichtefunktionen nicht begrenzt sind, gibt es stets Bereiche, in denen die Beanspruchung  $E$  den Widerstand  $R$  übersteigt. Nach Abb. 9-6 a) ist die zentrale Sicherheitszone über den Abstand der Mittelwerte  $m_E$  und  $m_R$  definiert. Während dagegen die kleinere nominale bzw. dezentrale Sicherheitszone durch den Abstand der für die Bemessung verwendeten charakteristischen Werte  $E_k$  und  $R_k$  festgelegt ist. In Abb. 9-6 b) ist zu erkennen, dass die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  stark von den Streuungen von  $E$  und  $R$  abhängig ist. Es zeigt sich, dass bei unverändertem Widerstand  $R$  und deutlich kleineren Unsicherheiten der Beanspruchung  $E$  ( $\sigma_{E(2)} < \sigma_{E(1)}$ ) die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  sinkt.

Zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  wird eine Zustandsfunktion eingeführt, oft als Sicherheitsmarge (safety margin) bezeichnet. Diese beinhaltet die Beanspruchungen  $E$  und die Widerstände  $R$  und lässt sich wie folgt schreiben:

$$G = R - E \quad (9.15)$$

mit

$G > 0$  Grenzzustand wird nicht erreicht (sicherer Bereich)

$G < 0$  Grenzzustand wird erreicht (unsicherer Bereich - Versagensbereich)

$G = 0$  Grenzt den sicheren Bereich vom Versagensbereich ab (eigentliche Grenzzustandsgleichung)

Der Bereich  $G < 0$  beschreibt den Versagensbereich und ist in Abb. 9-7 grau schraffiert dargestellt.

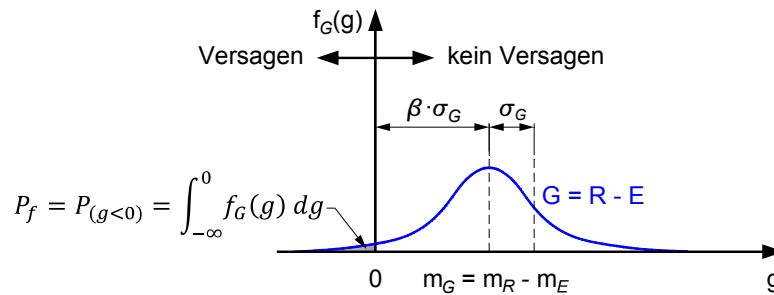


Abb. 9-7: Definition von Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  und Zuverlässigkeitsindex  $\beta$

Unter der Annahme, dass die Beanspruchungen  $E$  und die Widerstände  $R$  unabhängig normalverteilt sind, ist auch die Differenz  $G$  normalverteilt und es gelten die Beziehungen:

$$\text{Mittelwert: } m_G = m_R - m_E \quad (9.16)$$

$$\text{Standardabweichung: } \sigma_G = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2} \quad (9.17)$$

Die zentrale Sicherheitszone ist nun über den Abstand des Mittelwerts  $m_G$  zu  $G = 0$  definiert (siehe Abb. 9-7 und Gleichung (9.18)). Der Quotient  $\beta$  wird als Zuverlässigkeitsindex bezeichnet und entspricht dem inversen Variationskoeffizienten der Zustandsfunktion [108].

$$\beta = \frac{m_G}{\sigma_G} = \frac{m_R - m_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \quad (9.18)$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  ist definiert als die Fläche unter der Dichtefunktion  $f_G(g)$  für  $G < 0$  entsprechend Gleichung (9.19) und Abb. 9-7 für einen vorgegebenen Bezugszeitraum. Man spricht von einer operativen Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$ .

$$P_f = P_{(G < 0)} = \int_{-\infty}^0 f_G(g) dg = \Phi\left(-\frac{m_G}{\sigma_G}\right) = \Phi(-\beta) \quad (9.19)$$

Generell dient die operative Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  als Definition eines einzuhaltenden Zuverlässigkeitsniveaus und sollte nicht mit der relativen Häufigkeit eines Versagensereignisses verwechselt werden. Die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  und der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  sind somit über die Standardnormalverteilung verknüpft.

In Abb. 9-7 zeigt sich ebenfalls, dass der Abstand zwischen  $m_G$  und  $G = 0$  durch die Streuungen von  $E$  und  $R$  bestimmt wird. Allerdings ist die Verknüpfung von  $\sigma_G$  mit den Standardabweichungen  $\sigma_E$  und  $\sigma_R$  nach Gleichung (9.17) nichtlinear. Eine Linearisierung erfolgt durch die Einführung von Wichtungsfaktoren  $\alpha_E$  und  $\alpha_R$  entsprechend Gleichung (9.20).

$$\sigma_G = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2} = \alpha_R \cdot \sigma_R + \alpha_E \cdot \sigma_E \quad (9.20)$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  nach Gleichung (9.19) beinhaltet in dieser Schreibweise die Anteile beider Variablen, der Beanspruchung und des Widerstands. Die Wichtungsfaktoren ermöglichen eine Aufteilung der Streuung der Variablen und beschreiben dadurch den Anteil der jeweiligen Variable an der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  (vgl. Abb. 9-8). Das Verfahren einer klaren Aufteilung zwischen Beanspruchung und Widerstand bildet die Grundlage eines standardisierten Auswertverfahrens (siehe Kapitel 10) bspw. für die Ermittlung des Teilsicherheitsbeiwerts  $\gamma_M$  auf Basis von Versuchsdaten [99].

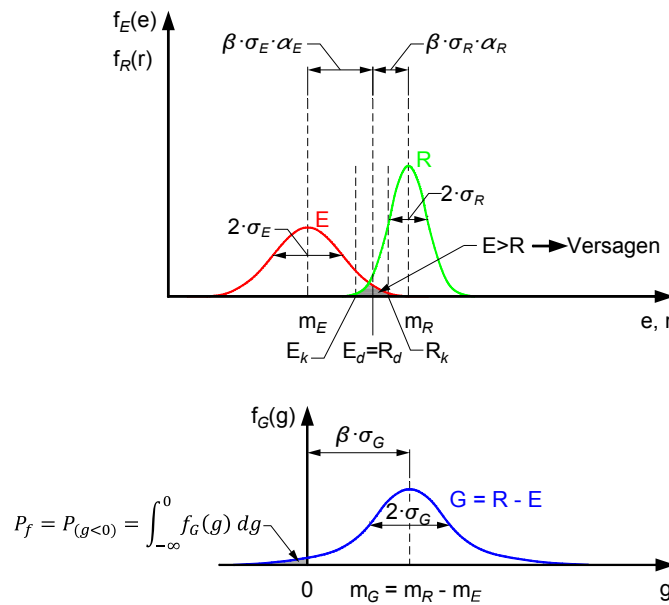


Abb. 9-8: Grenzzustandsfunktion  $G = R - E$ ; Wichtungsfaktoren

Die Wichtungsfaktoren stellen geometrisch gesehen die Richtungskosinusse der Normalen auf die Grenzzustandsgerade dar (Abb. 9-9) und lassen sich über die Gleichungen (9.21) und (9.22) mit den Standardabweichungen von  $E$  und  $R$  verknüpfen.

$$\alpha_E = \frac{\sigma_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \quad (9.21)$$

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \quad (9.22)$$

Abb. 9-9 verdeutlicht den geometrischen Zusammenhang der Wichtungsfaktoren über ein rechtwinkliges Dreieck. Dementsprechend gilt:

$$\sqrt{\alpha_E^2 + \alpha_R^2} = 1 \quad (9.23)$$

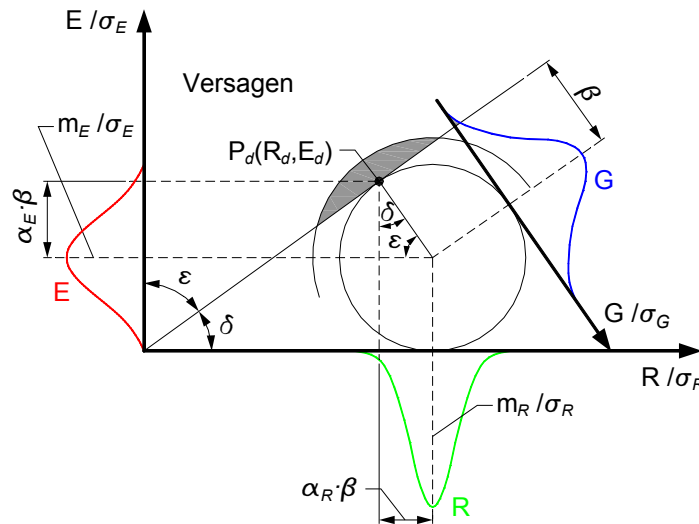


Abb. 9-9: Definition der Bemessungswerte  $E_d$  und  $R_d$

Im Rahmen einer Bemessung wird eine zentrale Sicherheitszone  $m_G = m_R - m_E$  gefordert, die sich über die operative Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  bzw. den Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  definiert. Die Forderung lautet  $\beta \geq \beta_0$ , wobei  $\beta_0$  das bspw. in DIN EN 1990 [6] vorgeschriebene *Sicherheitsniveau* ist. Mit reiner Algebra ergibt sich unter Berücksichtigung der Wichtungsfaktoren aus Gleichung (9.17) und (9.18):

$$m_R - m_E \geq \beta_0 \cdot \sigma_G \quad (9.24)$$

$$\geq \beta_0 \cdot \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \cdot \sigma_R + \beta_0 \cdot \frac{\sigma_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \cdot \sigma_E \quad (9.25)$$

$$\geq \beta_0 \cdot \alpha_R \cdot \sigma_R + \beta_0 \cdot \alpha_E \cdot \sigma_E \quad (9.26)$$

Durch entsprechendes Umformen und Ordnen der Terme nach  $R$  und  $E$  lässt sich aus Gleichung (9.26) die allgemeine Nachweisgleichung des Grenzzustandes herleiten:

$$m_R - \beta_0 \cdot \alpha_R \cdot \sigma_R \geq m_E + \beta_0 \cdot \alpha_E \cdot \sigma_E \quad (9.27)$$

$$R_d \geq E_d \quad (9.28)$$

Die Gleichung (9.28) besagt, dass der Bemessungswert  $R_d$  des Bauteilwiderstands im Grenzzustand größer oder gleich dem Bemessungswert  $E_d$  der Beanspruchungen sein muss. Die Bemessungswerte  $R_d$  und  $E_d$  sind im allgemeinen Fall die Koordinaten des sogenannten Bemessungspunktes  $P_d$ . Hierbei beschreiben die Wichtungsfaktoren dessen Lage (vgl. Abb. 9-9).

Das zuvor beschriebene Verfahren basiert auf der sogenannten Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung (First Order Reliability Method - FORM, vgl. Kapitel 9.3.3) und liegt der DIN EN 1990 [6] zugrunde. Dabei bildet der Bemessungspunkt  $P_d$  den Punkt auf der Grenzzustandsfunktion  $G = 0$  mit dem kürzesten Abstand zum Mittelpunkt im Raum der normalisierten Variablen, wobei der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  (= Lot) den Abstand vom Ursprung der Mittelwerte von Beanspruchung  $E$  und Widerstand  $R$  zu dem Bemessungspunkt  $P_d$  entspricht. Dies bedeutet, je größer die Entfernung (= Lotabstand) der Grenzzustandsgeraden vom Koordinatenursprung in Abb. 9-9, desto größer ist die vorhandene Zuverlässigkeit (Sicherheit) in der betrachteten Bemessungssituation. Hierbei gilt es zu beachten, dass wenn der Bemessungspunkt  $P_d$  nicht dem Lotfußpunkt entspricht und man die Entfernung von Bemessungspunkt und Koordinatenursprung dem Zuverlässigkeitsindex gleichsetzt, so würde man eine scheinbar größere Zuverlässigkeit (Sicherheit) ermitteln, die tatsächlich so nicht vorhanden ist [81]. DIN EN 1990 [6] legt die Wichtungsfaktoren mit  $\alpha_E = 0,7$  und  $\alpha_R = 0,8$  fest, um dieser Unsicherheit bei Verwendung eines fixen Bemessungspunktes entgegenzuwirken. Die Wichtungsfaktoren gelten, wenn folgende Bedingung eingehalten ist:

$$0,16 < \frac{\sigma_E}{\sigma_R} < 7,6 \quad (9.29)$$

Mit den genannten Wichtungsfaktoren ergibt sich ein Bemessungspunkt, der um 6 % außerhalb des mit dem geforderten Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  umschriebenen Kreises liegt.

$$\sqrt{\alpha_E^2 + \alpha_R^2} = \sqrt{0,7^2 + 0,8^2} \cong 1,06 > 1,0 \quad (9.30)$$

Demnach wird bei der Verwendung des fest gewählten Bemessungspunktes eine Zuverlässigkeit (Sicherheit) angenommen, die in dieser Größe nicht vorhanden ist. Für die Bemessungssituation tritt eine Abweichung zum geforderten Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  von  $1,06 \cdot \beta$  zur unwirtschaftlichen Seite auf [81].

Für die in dieser Arbeit betrachteten Ausführungen wird ein Bauwerk der Zuverlässigkeitsklasse RC 2 und eine geplante Nutzungsdauer von 50 Jahren (Bezugszeitraum) mit einer operativen Versagenswahrscheinlichkeit von maximal  $P_f = 10^{-6}$  zugrunde gelegt.

Nach Tab. 9-7 wird ein Mindestwert für den Zuverlässigkeitsindex von  $\beta = 3,8$  gefordert. Unter Berücksichtigung des Wichtungsfaktors  $\alpha_R = 0,8$  für die Widerstandsseite, berechnet sich der Fraktilefaktor  $k_{d,\infty}$  nach Gleichung (9.31) zu  $k_{d,\infty} = 3,04$ .

$$k_{d,\infty} = \alpha_R \cdot \beta = 0,8 \cdot 3,8 = 3,04 \quad (9.31)$$





## 10 Statistische Auswerteverfahren für Versuchsergebnisse

### 10.1 Prinzipielle Vorgehensweise statistischer Auswerteverfahren

Die Grundidee einer statistischen Auswertung besteht darin, ein Bemessungsmodell aus versuchstechnischen oder theoretischen Überlegungen aufzustellen und es statistisch anhand von verfügbaren Versuchsdaten zu überprüfen. Dafür ist für das Bemessungsmodell eine theoretische Widerstandsfunktion zu entwickeln. Innerhalb dieser Vorgehensweise sind alle möglichen Streuungen der Ergebnisse zu berücksichtigen, abzuschätzen und innerhalb der Widerstandsfunktion zu kombinieren. Alle in diesem Kapitel 10 erläuterten statistischen Auswerteverfahren finden sich ausführlich in DIN EN 1990 Anhang D wieder.

In DIN EN 1990 Anhang D [6] *Versuchsgestützte Bemessung* ist die Festlegung von Bemessungswerten von Bauteilwiderständen auf Basis von Versuchsergebnissen geregelt. Es werden hierbei zwei Methoden unterschieden:

- Methode 1: Statistische Bestimmung einer einzelnen Eigenschaft
- Methode 2: Statistische Bestimmung eines Widerstandsmodells

### 10.2 Statistische Bestimmung einer einzelnen Eigenschaft

#### 10.2.1 Allgemeines

Dieses Verfahren kommt hauptsächlich im Zulassungswesen von Bauprodukten zur Anwendung. Hierbei soll eine spezielle Eigenschaft, bspw. die Tragfähigkeit einer Schraubenverbindung in einer besonderen Anwendungssituation, auf Basis einer definierten Anzahl von eigens durchgeführten experimentellen Untersuchungen festgelegt werden.

Für die Bestimmung der Bemessungswerte werden prinzipiell zwei Methoden angewandt:

- Bestimmung des Bemessungswerts über den charakteristischen Wert (Division durch einen Teilsicherheitsbeiwert und in einigen Fällen Multiplikation mit einem Umrechnungsfaktor),
- direkte Bestimmung des Bemessungswerts unter Berücksichtigung der Transferfunktion und der geforderten Zuverlässigkeit.

### 10.2.2 Bestimmung des Bemessungswerts über den charakteristischen Wert

Basierend auf den Grundlagen der DIN EN 1990 Anhang D [6] kann der Bemessungswert eines Parameters entsprechend Gleichung (10.1) bestimmt werden.

$$X_d = \eta_d \cdot \frac{X_k}{\gamma_m} = \frac{\eta_d}{\gamma_m} \cdot (m_X - k_n \cdot \sigma_X) \quad (10.1)$$

mit

$m_X$	Mittelwert der Eigenschaft $X$
$\sigma_X$	Standardabweichung der Eigenschaft $X$
$k_n$	Fraktilwert zur Bestimmung des charakteristischen Werts (5 %-Fraktile)
$\eta_d$	Umrechnungsfaktor
$\gamma_m$	Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand

Somit kann der Bemessungswert auf einfache Weise in Abhängigkeit der Versuchsanzahl  $n$  unter Berücksichtigung der statistischen Kenngrößen (Mittelwert  $m_X$  und Standardabweichung  $\sigma_X$ ) über den charakteristischen Wert bestimmt werden. Für die Ermittlung des Umrechnungsfaktors  $\eta_d$  gilt zu berücksichtigen, dass dieser einerseits von der Versuchsart und andererseits von den verwendeten Materialien abhängt. Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_m$  ist entsprechend dem Anwendungsfall festzulegen. Die Werte für den Fraktilenfaktor  $k_n$  sind in Tabelle D.1 in DIN EN 1990 Anhang D [6] mit einem Vertrauensniveau von 95 % aufgelistet und in Tab. 10-1 wiedergegeben.

Tab. 10-1: Werte  $k_n$  für charakteristische Werte (5 %-Fraktilwert) nach DIN EN 1990 [6]

$n$	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$V_X$ bekannt	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
$V_X$ unbekannt	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Die Zeile  $V_X$  *bekannt* in Tab. 10-1 sollte dann verwendet werden, wenn der Variationskoeffizient  $V_X$  oder ein oberer Schätzwert dafür aus Vorinformationen bekannt sind. Dagegen kommt die Zeile  $V_X$  *unbekannt* zur Anwendung, wenn der Variationskoeffizient  $V_X$  nicht aus Vorinformationen bekannt ist und auf Basis der Versuche durch folgende Gleichungen geschätzt werden kann:

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_X)^2 \quad (10.2)$$

$$V_X = \frac{\sigma_X}{m_X} \quad (10.3)$$

Abb. 10-1 verdeutlicht die Ableitung von Bauteilwiderständen auf Basis von Versuchsergebnissen nach DIN EN 1990 Anhang D [6] entsprechend der Bestimmung des Bemessungswerts über den charakteristischen Widerstand  $R_k$ .

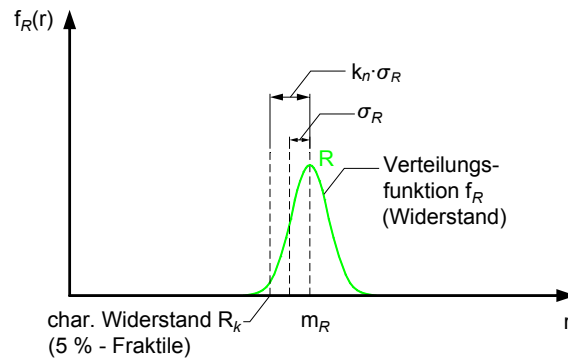


Abb. 10-1: Ableitung von Bauteilwiderständen auf Basis von Versuchsergebnissen nach DIN EN 1990 [6]

### 10.2.3 Direkte Bestimmung des Bemessungswerts für Tragfähigkeitsnachweise

Alternativ besteht auch nach DIN EN 1990 Anhang D [6] die Möglichkeit, den Bemessungswert der Eigenschaft  $X$  direkt unter Anwendung des Fraktilwerts  $k_{d,n}$  gemäß Gleichung (10.4) zu bestimmen. Hierbei sind sowohl die relevanten Grenzzustände als auch die notwendigen Sicherheitsniveaus zu berücksichtigen.

$$X_d = \eta_d \cdot (m_X - k_{d,n} \cdot \sigma_X) \quad (10.4)$$

Der Umrechnungsfaktor  $\eta_d$  sollte alle Unsicherheiten abdecken, die durch die Versuche selbst nicht erfasst werden. Werte für den Fraktilenfaktor  $k_{d,n}$  sind in Tabelle D.2 in DIN EN 1990 Anhang D [6] mit aufgelistet und in Tab. 10-2 wiedergegeben.

Tab. 10-2: Werte  $k_{d,n}$  für den Bemessungswert für Tragfähigkeitsnachweise nach DIN EN 1990 [6]

$n$	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$V_X$ bekannt	4,36	3,77	3,56	3,44	3,37	3,33	3,27	3,23	3,16	3,13	3,04
$V_X$ unbekannt	-	-	-	11,4	7,85	6,36	5,07	4,51	3,64	3,44	3,04

ANMERKUNG: Diese Tabelle beruht auf der Annahme, dass der Bemessungswert dem Produkt  $\alpha_R \cdot \beta = 0,8 \cdot 3,8 = 3,04$  (siehe Anhang C) entspricht und  $X$  normalverteilt ist. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit ist etwa 0,1 %.

## 10.3 Statistische Bestimmung eines Widerstandsmodells

### 10.3.1 Überblick

Bei dieser Methode handelt es sich um ein Verfahren zur Festlegung und Kalibrierung von Widerstands- und Bemessungsmodellen basierend auf DIN EN 1990 Anhang D [6]. Anhand von Versuchen oder theoretischen Überlegungen ist ein Bemessungsmodell  $g_{rt}(X)$  zu entwickeln, das zu einer Funktion  $r_t$  für den Widerstand führt. In der Regel ist für das Bemessungsmodell  $g_{rt}(X)$  eine funktionale Form zu wählen, die für normative Zwecke im Sinne der Bemessung angewendet werden kann. Ferner ist die Gültigkeit des Modells mit Hilfe der statistischen Auswertung aller verfügbaren Versuchsdaten zu überprüfen und darüber hinaus die Streuung der Vorhersage mit Hilfe des Bemessungsmodells (d. h. die Variation des Streuwerts  $\delta$ ) ebenfalls mit den Versuchen zu bestimmen. Diese Streuung ist mit der Streuung der anderen Einflussgrößen, wie Materialfestigkeiten und geometrischen Eigenschaften, in der Widerstandsfunktion zu kombinieren. Prinzipiell gehen als Unsicherheiten auf der Widerstandsseite zum einen die Streuungen der Basisvariablen und zum anderen die Modellsicherheiten ein. Letztere werden durch die Abbildung des tatsächlichen Verhaltens in ein vereinfachtes Bemessungsmodell erzeugt. Die grundsätzliche Vorgehensweise zur statistischen Kalibrierung eines Widerstands- und Bemessungsmodells lässt sich in folgende Stufen gliedern:

Tab. 10-3: Stufen des statistischen Auswerteverfahrens nach DIN EN 1990 [6]

Stufe	Inhalt
1	Entwicklung einer Funktion für das Widerstands-/ Bemessungsmodell; Vergleich der experimentellen und theoretischen Werte
2	Schätzung der Mittelwertkorrektur $b$ ; Schätzung des Variationskoeffizienten $V_\delta$ der Streugröße $\delta_i$
3	Bestimmung des Variationskoeffizienten $V_{rt}$ aller Basisvariablen (für jeden Versuch $i$ )
4	Bestimmung des Bemessungswerts $r_d$ der Widerstandsfunktion; Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwerts $\gamma_M^*$ (für jeden Versuch $i$ )

Aufgrund der Tatsache, dass die in dieser Arbeit zu untersuchenden Flankenkehlnahtverbindungen stets ein Versagen durch Bruch zeigten, wird für die Stufe 3 zur Bestimmung des Variationskoeffizienten  $V_\delta$  der Streugröße  $\delta_i$  in Kapitel 11.5 ein speziell angepasstes Verfahren (Verfahren 2) konzipiert, das generell auf Fälle angewendet werden kann, die ein Bauteilversagen auf Bruch aufweisen. In den folgenden Kapiteln (10.3.2 bis 10.3.11) werden die einzelnen Teilschritte der jeweiligen Stufen erklärt.

### 10.3.2 Schritt 1: Entwicklung einer Funktion für das Widerstandsmodell

DIN EN 1990 Anhang D [6] fordert: „Es ist ein Bemessungsmodell in Form der theoretischen Widerstandsfunktion  $r_t$  für ein Bauteil oder eine Konstruktion zu entwickeln, das zu dem Ausdruck

$$r_t = g_{r_t}(\underline{X}) = g_{r_t}(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_k) \quad (10.5)$$

führt. Die Widerstandsfunktion sollte alle maßgebenden Basisvariablen  $\underline{X}$  enthalten, die Einfluss auf den betrachteten Grenzzustand haben.“ Die verwendete Schreibweise des Vektors  $\underline{X}$  beinhaltet alle maßgebenden Basisvariablen  $X_j$ . Demzufolge ist  $g_{r_t}(\underline{X})$  die Widerstandsfunktion der Basisvariablen  $X_j$ , die das Bemessungsmodell darstellt.

### 10.3.3 Schritt 2: Vergleich der experimentellen und theoretischen Werte der Widerstände

Auf Grundlage einer theoretischen Widerstandsfunktion, die das Bemessungsmodell  $r_t = g_{r_t}(\underline{X})$  darstellt, werden unter Verwendung von gemessenen geometrischen Abmessungen und tatsächlich vorhandenen Materialkennwerten die theoretischen Bemessungswerte der Tragfähigkeit  $r_{t,i}$  für jeden Versuch  $i$  berechnet und den experimentell ermittelten Tragfähigkeiten  $r_{e,i}$  gegenübergestellt. Für die Bestimmung der theoretischen Tragfähigkeit  $r_{t,i}$  werden für jeden einzelnen Versuch  $i$  sowohl die tatsächlich gemessenen geometrischen Abmessungen als auch die tatsächlich gemessenen Materialeigenschaften verwendet. Die Materialkennwerte  $\underline{X}_{i,m}$  sind Mittelwerte einer unabhängigen Werkstoffprüfung, für die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen verwendeten Materialien. „Die Punkte, die Wertepaare  $(r_{t,i}, r_{e,i})$  darstellen, sind in einem Diagramm, wie in Abb. 10-2 darzustellen.“ [6]

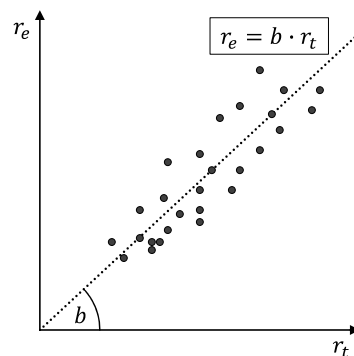


Abb. 10-2:  $r_{e,i} - r_{t,i}$  - Diagramm

### 10.3.4 Schritt 3: Schätzung der Mittelwertkorrektur

Aus der Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten  $r_{e,i}$  mit den Bemessungswerten der Tragfähigkeit  $r_{t,i}$  ergibt sich mit Hilfe des Minimums der Abstandsquadrate die Mittelwertabweichung  $b$  nach Gleichung (10.6). Demzufolge gestaltet sich die probabilistische Widerstandsfunktion in der Form  $r = b \cdot r_t \cdot \delta$ .

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n r_{e,i} \cdot r_{t,i}}{\sum_{i=1}^n (r_{t,i})^2} \quad (10.6)$$

Grafisch dargestellt entspricht dieses Vorgehen einer Ausgleichsgeraden durch die experimentellen Messwerte  $r_{e,i}$ , die über die modellbasierenden Tragfähigkeiten  $r_{t,i}$  aufgetragen werden. Sofern das analytische Modell exakt wäre und alle beeinflussenden Parameter in dem Modell berücksichtigt wären, ergäbe sich eine Mittelwertabweichung von  $b = 1,0$ . Jedoch werden aufgrund von Streuungen der experimentellen Tragfähigkeiten  $r_{e,i}$  und der Basisvariablen  $X_j$  Abweichungen zwischen den experimentell und den theoretisch ermittelten Tragfähigkeiten existieren. Diese Abweichungen sind detailliert zu betrachten, ob sie durch einen systematischen Fehler bei der Versuchsdurchführung oder durch eine unzureichende Abbildung der Realität durch das analytische Modell selbst hervorgerufen werden.

An dieser Stelle soll angemerkt werden, dass falls bei der Berechnung der Mittelwertkorrektur  $b$  die Werte stark von 1,0 abweichen ( $0,85 \leq b \leq 1,15$ ), ein größerer systematischer Fehler im analytischen Modell vorliegen muss und einer genaueren Prüfung unterzogen werden sollte [52].

### 10.3.5 Schritt 4: Schätzung des Variationskoeffizienten der Streugröße

Die Streugröße  $\delta$  beschreibt die Modellunsicherheit des Bemessungsmodells. Für jeden experimentellen Wert  $r_{e,i}$  des Widerstands sollte die Streugröße  $\delta_i$  bestimmt werden.

$$\delta_i = \frac{r_{e,i}}{b \cdot r_{t,i}} \quad (10.7)$$

Für die Streugröße  $\delta_i$  wird eine logarithmische Normalverteilung angenommen, so dass mit den daraus resultierenden logarithmischen Streugrößen  $\Delta_i$  nach Gleichung (10.8) der Schätzwert  $\bar{\Delta}$  für den Mittelwert  $E(\Delta)$  nach Gleichung (10.9) berechnet werden kann.

$$\Delta_i = \ln(\delta_i) \quad (10.8)$$

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (10.9)$$

$s_{\Delta}^2$  repräsentiert den Schätzwert der quadrierten Standardabweichung  $\sigma_{\Delta}^2$  der logarithmischen Streugrößen  $\Delta_i$ , deren Mittelwert  $\bar{\Delta}$ , sowie der Versuchsanzahl  $n$  und berechnet sich nach Gleichung (10.10).

$$s_{\Delta}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2 \quad (10.10)$$

Die Schätzung des Variationskoeffizienten der Streugröße  $\delta$  bestimmt sich nach folgendem Ausdruck mit dem Schätzwert  $s_{\Delta}^2$  der Varianz der logarithmischen Streugrößen  $\Delta_i$ .

$$V_{\delta} = \sqrt{e^{(s_{\Delta}^2)} - 1} \quad (10.11)$$

$V_{\delta}$  darf als Variationskoeffizient für die Streugröße  $\delta$  verwendet und als vorläufiges Maß betrachtet werden, das die Qualität der Widerstandsfunktion beschreibt. Sofern der Variationskoeffizient  $V_{\delta}$  größer als 10 % ist, kann dies als Indikator gesehen werden, dass die Widerstandsfunktion angepasst werden sollte, um später keine zu große Abminderung durch den erforderlichen Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  herbeizuführen [52].

### 10.3.6 Schritt 5: Verträglichkeitsprüfung

Eine Verträglichkeitsprüfung der Annahmen des Bemessungsmodells ist durchzuführen, wenn die Streuung der Werte  $(r_{e,i}, r_{t,i})$  derart groß ist, dass die Widerstandsfunktion unwirtschaftliche Ergebnisse liefert. Die Streuung kann auf folgende Weise verkleinert werden:

- Verbesserung der Bemessungsfunktion, durch die Aufnahme zusätzlicher nicht berücksichtigter Modellparameter.
- Optimierung des Mittelwertkorrekturwerts  $b$  und der Varianz  $V_{\delta}$  der Streugröße  $\delta$  durch die Aufteilung der für das Widerstandsmodell herangezogenen Stichprobe in geeignete Untergruppen, für die der Einfluss solcher zusätzlicher Parameter konstant ist.

Hierbei ist besonders zu beachten, dass die Reduktion der Stichprobenanzahl eine höhere statistische Unsicherheit zur Folge hat [6].

### 10.3.7 Schritt 6: Bestimmung der Variationskoeffizienten der Basisvariablen

„Wenn nachgewiesen werden kann, dass der Gesamtumfang der Versuche repräsentativ für die wirklichen Streuungsverhältnisse ist, dann können die Variationskoeffizienten  $V_{X_j}$  der Basisvariablen aus den Versuchsdaten bestimmt werden. Da dies jedoch in der Regel nicht zutrifft, werden die Variationskoeffizienten  $V_{X_j}$  aufgrund von Vorinformationen bestimmt.“ [6]

Dies bedeutet konkret, dass bei einem ausreichend großen Stichprobenumfang die Variationskoeffizienten  $V_{X_j}$  der Basisvariablen  $X_j$  mit den gemessenen Standardabweichungen  $\sigma_{X_i}$  und Mittelwerten  $\underline{X}_{i,m}$  nach Gleichung (10.12) ermittelt werden können.

$$V_{X_i} = \frac{\sigma_{X_i}}{\underline{X}_{i,m}} \quad (10.12)$$

Sofern jedoch eine relativ geringe Versuchsanzahl (i. d. R.  $n < 100$ ) vorliegt, ist die Ermittlung der Variationskoeffizienten  $V_{X_j}$  aus den Messwerten nicht möglich. Diese Informationen sollten dann der Literatur entnommen oder sinnvoll abgeschätzt werden.

### 10.3.8 Schritt 7: Bestimmung des Variationskoeffizienten aller Basisvariablen

Ist die Widerstandsfunktion eine Funktion in Produktform mit den Basisvariablen  $X_1$  bis  $X_j$  wie in Gleichung (10.13)

$$r = b \cdot r_t = b \{X_1 \times X_2 \times \dots \times X_j\} \delta \quad (10.13)$$

so setzt sich der Variationskoeffizient  $V_r$  nach Gleichung (10.14) aus dem Schätzwert für den Variationskoeffizienten  $V_\delta$  für das Streumaß  $\delta$  und den Variationskoeffizienten  $V_{X_j}$  der Basisvariablen  $X_1$  bis  $X_j$  zusammen.

$$V_r^2 = (V_\delta^2 + 1) \left[ \prod_{j=1}^k (V_{X_j}^2 + 1) \right] - 1 \quad (10.14)$$

Für kleine Werte von  $V_\delta^2$  und  $V_{X_j}^2$  darf der Variationskoeffizient  $V_r$  der gesamten Widerstandsfunktion nach folgender Näherung berechnet werden:

$$V_r^2 = V_\delta^2 + V_{rt}^2 \quad (10.15)$$

mit

$$V_{rt}^2 = \sum_{j=1}^k V_{X_j}^2 \quad (10.16)$$



Ist die Widerstandsfunktion eine komplexe Funktion mit den Basisvariablen  $X_1$  bis  $X_j$  in der Form

$$r = b \cdot r_t \cdot \delta = b \cdot g_{r_t}(X_1, X_2, \dots, X_j) \cdot \delta \quad (10.17)$$

so kann der Variationskoeffizient aller Basisvariablen  $V_{rt}$  für jeden einzelnen Versuch ( $i = 1 \dots n$ ) nach Gleichung (10.18) bestimmt werden

$$V_{rt,i}^2 = \frac{1}{r_{t,i}(X_{j,m})^2} \cdot \sum_{j=1}^k \left( \frac{\partial r_{t,i}(X_j)}{\partial X_j} \cdot \sigma_j \right)^2 \quad (10.18)$$

Hierbei entspricht der Term

$$\sum_{j=1}^k \left( \frac{\partial r_{t,i}(X_j)}{\partial X_j} \cdot \sigma_j \right)^2$$

der Summe aus den quadrierten partiellen Ableitungen nach den Basisvariablen  $X_j$  multipliziert mit der zugehörigen Standardabweichung  $\sigma_j$  der Basisvariablen  $X_j$ . Der Laufindex  $j = 1 \dots k$  steht für die Anzahl  $k$  an Basisvariablen  $X_j$  im Widerstandsmodell. Für die Berechnung des Widerstandsmodells  $r_{t,i}(X_{j,m})^2$  werden die Mittelwerte der Basisvariablen  $X_j$  verwendet.

Der Variationskoeffizient  $V_{rt}$  ermittelt sich aus der Summe der einzelnen Variationskoeffizienten  $V_{rt,i}^2$  eines jeden Versuchs.

$$V_{rt}^2 = \sum_{i=1}^n V_{rt,i}^2 \quad (10.19)$$

Die gemeinsame Standardabweichung der Basisvariablen  $Q_{rt}$  wird mit Gleichung (10.20), die Standardabweichung der Streugröße  $Q_\delta$  mit Gleichung (10.21) und die Standardabweichung der gesamten Widerstandsfunktion  $Q$  mit Gleichung (10.24) ermittelt.

$$Q_{rt,i} = \sqrt{\ln(V_{rt,i}^2 + 1)} \quad (10.20)$$

$$Q_\delta = \sqrt{\ln(V_\delta^2 + 1)} \quad (10.21)$$

$$Q_i = \sqrt{\ln(V_{r,i}^2 + 1)} \quad (10.22)$$

mit 
$$V_{r,i}^2 = V_\delta^2 + V_{rt,i}^2 \quad (10.23)$$

folgt 
$$Q_i = \sqrt{\ln(V_\delta^2 + V_{rt,i}^2 + 1)} \quad (10.24)$$

Es gilt erneut anzumerken, dass  $V_{rt}$  für jeden einzelnen Versuch zu ermitteln ist, so dass  $Q_{rt}$  und  $V_r$  ebenfalls für jeden einzelnen Versuche entsprechend  $Q_{rt,i}$  und  $V_{r,i}$  bestimmt werden können.

### 10.3.9 Schritt 8: Bestimmung des Bemessungswerts der Widerstandsfunktion

Für eine geringe Versuchsanzahl (i. d. R.  $n < 100$ ) ergibt sich der Bemessungswert der Widerstandsfunktion  $r_d$  entsprechend Gleichung (10.25). Bei ausreichend großer Versuchsanzahl (i. d. R.  $n > 100$ ) kann der Bemessungswert der Widerstandsfunktion  $r_d$  nach Gleichung (10.26) ermittelt werden.

$$n \leq 100: \quad r_{d,i} = b \cdot r_{t,i}(X_{j,m}) \cdot \exp\left(-k_{d,\infty} \cdot \frac{Q_{rt,i}^2}{Q_i} - k_{d,n} \cdot \frac{Q_\delta^2}{Q_i} - 0,5 \cdot Q_i^2\right) \quad (10.25)$$

$$n > 100: \quad r_{d,i} = b \cdot r_{t,i}(X_{j,m}) \cdot \exp(-k_{d,\infty} \cdot Q_i - 0,5 \cdot Q_i^2) \quad (10.26)$$

mit

$k_{d,n}$  Fraktilefaktor für den Bemessungswert nach Tab. 10-2 für den Fall  $V_x$  unbekannt

$k_{d,\infty}$  Fraktilefaktor  $k_{d,n}$  für  $n \rightarrow \infty$  [ $k_{d,\infty} = 3,04$ ]

Der Bemessungswert der Widerstandsfunktion  $r_d$  wird für jeden einzelnen Versuch  $n$  bestimmt, so dass sich eine Anzahl von  $n$  Werten für  $r_{d,i}$  ergeben.

### 10.3.10 Schritt 9: Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwerts

Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$  wird als Mittelwert aller einzelnen Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{M,i}^*$  nach Gleichung (10.27) ermittelt.

$$\gamma_M^* = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{r_{t,nom,i}}{r_{d,i}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \gamma_{M,i}^* \quad (10.27)$$

Wobei  $r_{t,nom,i}$  den theoretischen Werten des Bemessungsmodells mit nominellen Werten für die Basisvariablen entspricht.

$$r_{t,nom,i} = g_{r,t}(\underline{X}_{nom,i}) \quad (10.28)$$

### 10.3.11 Schritt 10: Korrektur der Widerstandsfunktion

Grundsätzlich repräsentiert der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  den Abstand zwischen dem *Bezugswert der Festigkeit* und dem *Bemessungswert*  $r_d$ . Im Stahlbau entspricht der *Bezugswert der Festigkeit* den *nominellen Werten*. Im Gegensatz dazu wird der *Bemessungswert*  $r_d$  auf Grundlage der Streueigenschaften der Bemessungsformel selbst ( $V_\delta$ ) und der Fehlerfortpflanzung der Streuung der Basisvariablen dieser Formel ( $V_{rt}$ ) nach DIN EN 1990 Anhang D [6] bestimmt.

Der geforderte Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  ist je nach Bemessungssituation festzulegen und wird als Zielwert  $\gamma_{M,target}$  definiert. Mit Hilfe des in Schritt 9 ermittelten Teilsicherheitsbeiwerts  $\gamma_M^*$  (Mittelwert aller einzelnen Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{M,i}^*$ ) und des geforderten Teilsicherheitsbeiwerts  $\gamma_{M,target}$  wird das Bemessungsmodell  $g_{rt}(\underline{X})$  entsprechend Gleichung (10.29) kalibriert.

Der Korrekturfaktor  $\gamma_{M,target}/\gamma_M^*$  wird als  $k_c$  definiert.

$$g_{rt}(\underline{X}) = \frac{\gamma_{M,target}}{\gamma_M^*} \cdot g_{rt}(\underline{X}_{nom}) = k_c \cdot g_{rt}(\underline{X}_{nom}) \quad (10.29)$$

Abb. 10-3 verdeutlicht die Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwerts  $\gamma_M^*$  anhand einer schematischen Darstellung. Der *Bemessungswert*  $r_d$  nach DIN EN 1990 Anhang D [6] ist hier als konstant zu betrachten. Der geforderte Sicherheitsabstand wird durch die Anwendung des Korrekturfaktors  $k_c$  auf den nominellen theoretischen Widerstand  $r_{t,nom}$  hergestellt.

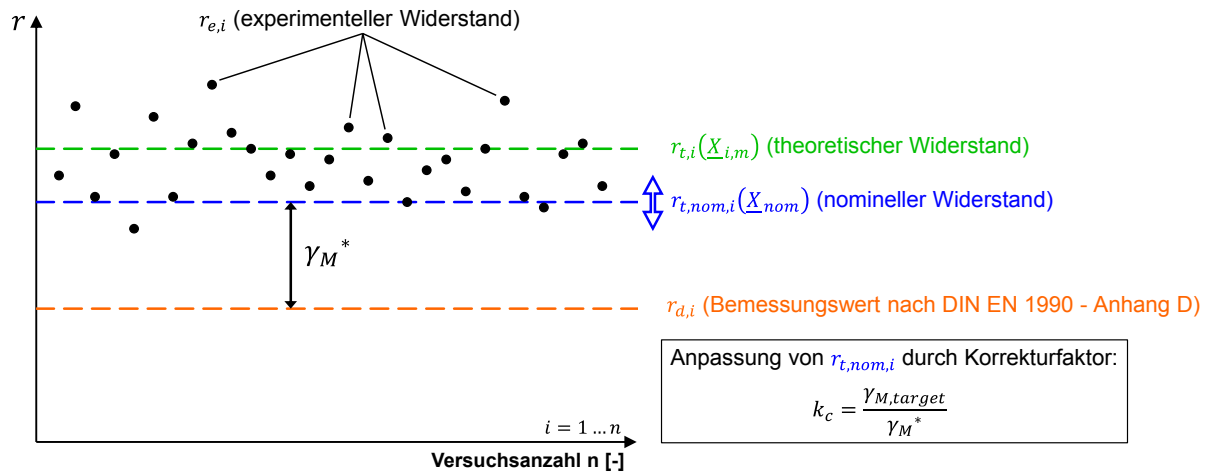


Abb. 10-3: Schematische Darstellung der Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwerts  $\gamma_M^*$

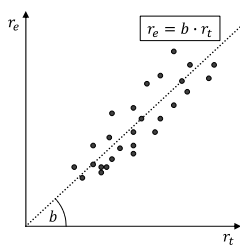
### 10.4 Ablaufschema: Statistisches Auswertverfahren nach DIN EN 1990 Anhang D

Die aufgeführten Schritte des statistischen Auswertverfahrens nach DIN EN 1990 Anhang D [6] ermöglichen eine Kalibrierung eines Widerstands- bzw. Bemessungsmodells an Versuchsergebnissen in funktionaler Form.

Das in Kapitel 10.3.2 bis 10.3.11 (Schritt 1 bis 10) schrittweise beschriebene statistische Auswertverfahren ist in folgendem Ablaufschema zusammengefasst dargestellt.

Schritt 1 und 2				
Theoretische Widerstandsfunktion	Vorinformationen Bezug: Stichprobe	Vorinformationen Bezug: Grundgesamtheit	Theoretischer Widerstand	Experimenteller Widerstand
$r_t = g_{r_t}(\underline{X}) = g_{r_t}(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_k)$	$\underline{X}_i$	$\underline{X}_{j,m} \mid \sigma_j$	$r_{t,i}$	$r_{e,i}$
Die theoretische Widerstandsfunktion beinhaltet alle maßgebenden Basisvariablen $X_j$	Tatsächlich gemessene Eigenschaften (Geometrie, Material, etc.) der auszuwertenden Versuche	Mittelwert und Standardabweichung der Basisvariablen $X_j$	Ermittelt mit den tatsächlich gemessenen Werten $\underline{X}_i$	Versuchsergebnisse für jeden einzelnen Versuch (experimentell oder numerisch)

**Anmerkung:** Bei der hier angeführten Schreibweise beinhaltet der Vektor  $\underline{X}$  alle maßgebenden Basisvariablen  $X_j$ .

Schritt 3, 4 und 5	
<p><b>Mittelwertkorrektur <math>b</math></b></p> $b = \frac{\sum_{i=1}^n r_{e,i} \cdot r_{t,i}}{\sum_{i=1}^n (r_{t,i})^2}$ <p><math>n</math> entspricht der Anzahl an auszuwertenden Versuchen</p> <p>Die Mittelwertabweichung ist ein globaler Wert der ausgewählten Gruppe und ein Indikator für die Genauigkeit des Modells (<math>0,85 \leq b \leq 1,15</math>)</p>	<p><b>Variationskoeffizient <math>V_\delta</math> für die Streugröße <math>\delta</math></b></p> $\delta_i = \frac{r_{e,i}}{b \cdot r_{t,i}}$ $\Delta_i = \ln(\delta_i)$ $s_{\Delta}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2$ $V_\delta = \sqrt{\exp(s_{\Delta}^2) - 1}$ <p><math>V_\delta</math> darf als Variationskoeffizient für die Streugröße <math>\delta</math> verwendet und als vorläufiges Maß betrachtet werden, das die Qualität der Widerstandsfunktion beschreibt.</p>
	

## Schritt 6 und 7

**Variationskoeffizient  $V_{rt}$  der Basisvariablen  $X_j$** Fehlerfortpflanzung der Streuung der Basisvariablen der Widerstandsfunktion  $r_t$ 

a) Widerstandsfunktion in einfacher Produktform:  $V_{rt}^2 = \sum_{j=1}^k V_{X_j}^2$

b) Widerstandsfunktion in komplexer Form:  
 $V_{rt}$  für **jeden einzelnen Versuch**  $V_{rt,i}^2 = \frac{1}{r_{t,i}(\underline{X}_{j,m})^2} \cdot \sum_{j=1}^k \left( \frac{\partial r_{t,i}(X_j)}{\partial X_j} \cdot \sigma_j \right)^2$

**Bestimmung der Standardabweichungen**

Standardabweichung der Basisvariablen  $Q_{rt,i} = \sqrt{\ln(V_{rt,i}^2 + 1)}$

Standardabweichung der Streugröße  $Q_\delta = \sqrt{\ln(V_\delta^2 + 1)}$

Standardabweichung der  
gesamten Widerstandsfunktion  $Q_i = \sqrt{\ln(V_{r,i}^2 + 1)}$

mit  $V_{r,i}^2 = V_\delta^2 + V_{rt,i}^2$  folgt  $Q_i = \sqrt{\ln(V_\delta^2 + V_{rt,i}^2 + 1)}$

## Schritt 8

**Bestimmung des Bemessungswerts  $r_d$  der Widerstandsfunktion**

$$n \leq 100 \quad r_{d,i} = b \cdot r_{t,i}(\underline{X}_{j,m}) \cdot \exp(-k_{d,\infty} \cdot \frac{Q_{rt,i}^2}{Q_i} - k_{d,n} \cdot \frac{Q_\delta^2}{Q_i} - 0,5 \cdot Q_i^2)$$

$$n > 100 \quad r_{d,i} = b \cdot r_{t,i}(\underline{X}_{j,m}) \cdot \exp(-k_{d,\infty} \cdot Q_i - 0,5 \cdot Q_i^2)$$

## Schritt 9

**Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwerts aus den einzelnen Sicherheitsbeiwerten eines jeden Versuchs**

$$r_{t,nom,i} = g_{r_t}(\underline{X}_{nom})$$

$$\gamma_{M,i}^* = \frac{r_{t,nom,i}}{r_{d,i}}$$

$$\gamma_M^* = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \gamma_{M,i}^*$$

**Anmerkung:**  $\underline{X}_{nom}$  entspricht den nominellen geometrischen Abmessungen und Festigkeitswerten

## Schritt 10

**Definition des geforderten Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,target}$** 

$$\gamma_{M,target} \Rightarrow \begin{cases} \gamma_{M0} = 1,00 \\ \gamma_{M1} = 1,10 \\ \gamma_{M2} = 1,25 \end{cases}$$

**Korrektur der Widerstandsfunktion**

$$g_{r_t}(\underline{X}) = \gamma_{M,target} \cdot \frac{r_{nom}}{\gamma_M^*} = \frac{\gamma_{M,target}}{\gamma_M^*} \cdot r_{nom}$$

$$g_{r_t}(\underline{X}) = k_c \cdot r_{nom}$$

## 11 Weiterentwicklung der Tragfähigkeit einer Flankenkehlnaht

### 11.1 Allgemeines

Anhand bereits abgeschlossener Forschungsvorhaben (siehe Kapitel 5) konnte ein signifikanter Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Festigkeit der Kehlnahtverbindung festgestellt werden. Demzufolge hat Rasche [84] ein neues Bemessungsmodell entwickelt, das den Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs ebenfalls berücksichtigt. Offen ist dabei aber das Vorgehen bei sogenannten Mischverbindungen, wenn Grundwerkstoffe mit unterschiedlichen Festigkeitsklassen und einer dazu passenden oder abweichenden Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs verschweißt werden

In diesem Kapitel wird am Beispiel der Flankenkehlnahtverbindungen zunächst ein speziell angepasstes statistisches Auswerteverfahren basierend auf dem Vorgehen in Kapitel 10.3 konzipiert, das generell auf Fälle angewendet werden kann, die ein Bauteilversagen auf Bruch aufweisen. Anhand dieses neu entwickelten Auswerteverfahrens wird die Anwendbarkeit der Bemessungsmodelle zur Bestimmung der Tragfähigkeit einer Flankenkehlnaht nach DIN EN 1993-1-8 [9] und Rasche [84] überprüft und eine Weiterentwicklung bzw. Optimierung der Bemessungsmodelle aufgezeigt. Weiterhin wird für das Bemessungsmodell nach Rasche [84] eine Sensitivitätsanalyse bzgl. den Faktoren zur differenzierten Gewichtung der Festigkeit von Grund- und Schweißzusatzwerkstoff durchgeführt. Darüber hinaus wird ein neuer Ansatz einer theoretischen Widerstandsfunktion ausgewertet, bei dem zur Ermittlung der Tragfähigkeit ausschließlich die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs, unabhängig vom Grundwerkstoff, Eingang findet.

### 11.2 Vorstellung der Datenbasis für die statistische Auswertung

#### 11.2.1 Datenbasis aus der Dissertation von Rasche

Rasche hat in ihrer Dissertation [84] zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen höherfester Baustähle neben eigenen Versuchen auf bereits bestehende Versuchsergebnisse zurückgegriffen. In Kapitel 5 der Dissertation wurden bestehende unabhängige Versuchsreihen von Flankenkehlnaht- und Stirnkehlnahtverbindungen aus der Literatur zusammengestellt, systematisch ausgewertet und so die Tragfähigkeit bestimmt. Charakteristisch für die bisherigen Versuche ist, dass sie vorwiegend Werkstoffkombinationen mit Schweißzusatzwerkstoffen behandelten, deren Festigkeiten von der des Grundwerkstoffs abwichen und somit Über- oder Unterfestigkeiten verursachten.

Da in der Literatur nur wenige Versuchsdaten an Schweißverbindungen höherfester Baustähle bekannt waren, hat Rasche eigene experimentelle Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens *FOSTA P652 Wirtschaftliche Schweißverbindungen höherfester Bau-*

*stähle* [71] an praxisgerechten Handschweißungen höherfester Stähle S460 und S690 durchgeführt, die in Kapitel 6 der Dissertation beschrieben und ausgewertet sind. In Ergänzung zu den Ergebnissen aus dem Forschungsvorhaben *FOSTA P652* [71] wurden 8 zusätzliche Bauteilversuche mit dem Ziel durchgeführt, mögliche weitere Einflussfaktoren wie Mechanisierungsgrad, Prüfkörperform und Schweißzusatzwerkstoff auf die Tragfähigkeit von Flankenkehlnahtverbindungen mit dem Grundwerkstoff S690 zu untersuchen [70]. Die Ergebnisse der durchgeführten Zusatzversuche bestätigten, dass durch den gewählten vollmechanisierten Fertigungsprozess und die gewählte Prüfkörperform (ohne Nahtanfangs- und Nahtendbereich) eine deutlich geringere Streuung der Versuchsergebnisse im Vergleich zu den in *FOSTA P652* [71] durchgeführten Untersuchungen erzielt werden konnte.

In dem sich anschließenden Forschungsvorhaben *FOSTA P812 Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen höherfester Baustähle S690 im Stahlbau* [72] wurden weitere Untersuchungen an vollmechanisiert geschweißten Versuchskörpern mit Kehlnähten zum Tragverhalten von Schweißverbindungen höherfester Baustähle durchgeführt und ausgewertet. Im Einzelnen beinhaltete das Versuchsprogramm Flanken- und Stirnkehlnahtverbindungen mit den Grundwerkstoffen S690 Q und S700 M und unterschiedlichen Schweißzusatzwerkstoffen. Die bestehenden Versuchsreihen aus der Literatur unterschieden sich von den Werkstoffkombinationen der von Rasche eigens durchgeführten Untersuchungen und ergänzten diese damit.

In dieser Arbeit wird ausschließlich die Tragfähigkeit von Flankenkehlnahtverbindungen untersucht, so dass in Tabelle Tab. 11-1 ausschließlich die Versuchsreihen aus der Literatur und der von Rasche durchgeführten Versuche an Flankenkehlnähte verschiedener Grund- und Schweißzusatzwerkstoffe aufgeführt sind. Zusätzlich zur Herkunft einer jeden Versuchsreihe sind die Werkstoffkombination, die Versuchsanzahl, die Stahlgüte des Grundwerkstoffs (GW) und der Schweißzusatzwerkstoff (SZW) angegeben.

Tab. 11-1: Versuche an Flankenkehlnähten aus der Dissertation von Rasche [84]

Gruppe	Projekt/Literatur	Werkstoffkombination	Anzahl	GW	SZW
G/T/E46 n = 70	FOSTA P652	S355/S355-G46	2	S355 J2	G46
	Saal [87]		34	S460 ML	T46
	FOSTA P652	S460/S460-G/T/E46	20	S460 M/ML	G/T/E46
	FOSTA P812		4	S460 ML	G46
	FOSTA P652	S690/S690-G46	1	S690 Q	G46
	FOSTA P812		2	S690 Q	G46
	FOSTA P812	S700/S700-G46	3	S700 M	G46
	FOSTA P652	S355/S460-G46	2	S355 J2 / S460 M	G46
	FOSTA P652	S460/S690-G46	2	S460 M / S690 Q	G46



Fortsetzung von Tab. 11-1

Gruppe	Projekt/Literatur	Werkstoffkombination	Anzahl	GW	SZW
G/T69 n = 59	FOSTA P652	S460/S460-G69	2	S460 M	G69
	FOSTA P652		9	S690 Q/QL	G/T69
	Zusatzversuche	S690/S690-G/T/69	4	S690 QL	G69
	FOSTA P812		16	S690 Q	G/T69
	FOSTA P812	S700/S700-G/T69	24	S700 M	G/T69
	FOSTA P652	S355/S690-G69	2	S355 J2 / S690 Q	G69
	FOSTA P652	S460/S690-G69	2	S460 M / S690 Q	G69
G89 n = 10	Zusatzversuche	S355/S355-G89	1	S355 J2	G89
	Zusatzversuche	S690/S690-G89	4	S690 QL	G89
	FOSTA P812		2	S690 Q	G89
	FOSTA P812	S700/S700-G89	3	S700 M	G89

### 11.2.2 Datenbasis aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRIC TILE*

Als Teil eines europäischen Forschungsprojekts wurde in einem eigenständigen Arbeitspaket speziell die Tragfähigkeit von geschweißten Flankenkehlnahtverbindungen aus normal- und höherfesten Stählen mit unterschiedlichen Schweißzusatzwerkstoffen untersucht, den sogenannten Mischverbindungen. Das Versuchsprogramm beinhaltete insgesamt 52 Versuchskörper und umfasste neben unterschiedlichen Werkstoffkombinationen ebenfalls eine Variation des Mechanisierungsgrades für den Schweißprozess (teil- und vollmechanisiert) um daraus resultierende Einflüsse auf die Festigkeit der Naht zu untersuchen. Um zusätzlich eine möglichst realitätsnahe Streuung der Versuchsergebnisse zu erzeugen, wurde die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  entsprechend einer oberen und einer unteren Grenze variiert [52].

Tab. 11-2 gibt einen Überblick über die im Forschungsprojekt *SAFEBRIC TILE* [52] untersuchten Werkstoffkombinationen. Zu dem Versuchsprogramm zählten sowohl Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe als auch Mischverbindungen. Erstere sind dadurch gekennzeichnet, dass die verschweißten Grundwerkstoffe die gleiche Festigkeitsklasse bei einer dazu passenden oder abweichenden Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs haben. Mischverbindungen hingegen sind als eine Werkstoffkombination definiert, wenn Grundwerkstoffe mit unterschiedlichen Festigkeitsklassen und einer dazu passenden oder abweichenden Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs verschweißt werden (vgl. Kapitel 6.3.3.2).

Tab. 11-2: Versuche an Flankenkehlnähten aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRICKTILE* [52]

Gruppe	Projekt/Literatur	Werkstoffkombination	Anzahl	GW	SZW
G46 n = 18	SAFEBRICKTILE	S355/S355-G46	2	S355 J2+N	G46
	SAFEBRICKTILE	S460/S460-G46	2	S460 ML	G46
	SAFEBRICKTILE	S690/S690-G46	2	S690 QL	G46
	SAFEBRICKTILE	S355/S690-G46	6	S355 J2+N / S690 QL	G46
	SAFEBRICKTILE	S460/S690-G46	6	S460 ML / S690 QL	G46
G69 n = 18	SAFEBRICKTILE	S355/S355-G69	2	S355 J2+N	G69
	SAFEBRICKTILE	S460/S460-G69	2	S460 ML	G69
	SAFEBRICKTILE	S690/S690-G69	2	S690 QL	G69
	SAFEBRICKTILE	S355/S690-G69	6	S355 J2+N / S690 QL	G69
	SAFEBRICKTILE	S460/S690-G69	6	S460 ML / S690 QL	G69
G89 n = 16	SAFEBRICKTILE	S460/S460-G89	2	S460 ML	G89
	SAFEBRICKTILE	S690/S690-G89	2	S690 QL	G89
	SAFEBRICKTILE	S355/S690-G89	6	S355 J2+N / S690 QL	G89
	SAFEBRICKTILE	S460/S690-G89	6	S460 ML / S690 QL	G89

### 11.3 Vorstellung der theoretischen Widerstandsfunktion

Den ersten Schritt der statistischen Kalibrierung bildet die Entwicklung eines Bemessungsmodells in Form einer theoretischen Widerstandsfunktion  $r_t$ , die alle maßgebenden Basisvariablen beinhaltet, die Einfluss auf die Tragfähigkeit der geschweißten Kehlnahtverbindung haben. Für die Bemessung von Schweißverbindungen mit Grund- und Schweißzusatzwerkstoffen unterschiedlicher Festigkeiten ist es für die Berücksichtigung der Vermischung unterschiedlicher Werkstoffe notwendig, beide Festigkeiten in der Bemessungsgleichung zu berücksichtigen. Rasche hat in ihrer Dissertation [84] eine solche Bemessungsgleichung hergeleitet. Dabei wird vorgeschlagen, die Festigkeit des Grundwerkstoffs und die des Schweißzusatzwerkstoffs mit Faktoren zu gewichten. Demzufolge wird die Festigkeit des Grundwerkstoffs mit einem Gewichtungsfaktor von 0,25 (25 %) und die des Schweißzusatzwerkstoffs mit einem Gewichtungsfaktor von 0,75 (75 %) berücksichtigt. Danach ergibt sich die Grenzschubspannung  $\tau_{\parallel, Rd}$  in Abhängigkeit der Festigkeit von Grund- und Schweißzusatzwerkstoff für Flankenkehlnähte entsprechend Gleichung (11.1):

$$r_t = \tau_{\parallel,Rd} = \frac{0,25 \cdot f_{u,GW} + 0,75 \cdot f_{u,SZW}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,SZW} \cdot \gamma_{M2}} \quad (11.1)$$

mit

$\tau_{\parallel,Rd}$	Grenzschubspannung (Theoretischer Widerstand $r_t$ )	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{u,GW}$	Zugfestigkeit des schwächeren Grundwerkstoffs (GW)	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{u,SZW}$	Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs (SZW)	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\beta_{w,SZW}$	Korrelationsbeiwert abhängig vom Schweißzusatzwerkstoff (SZW) nach Tab. 5-2	[-]
$\gamma_{M2}$	Teilsicherheitsbeiwert (hier: 1,25)	[-]

Die in dieser Arbeit durchgeführte statistische Auswertung verfolgt das Ziel, den von Rasche vorgeschlagenen Bemessungsansatz anhand neu hinzugewonnener Versuchsergebnisse und eines angepassten statistischen Auswerteverfahrens zu verifizieren und gegebenenfalls neu zu kalibrieren. Als Grundlage stehen hierzu die in Kapitel 11.2 aufgeführten Versuchsreihen aus der Dissertation von Rasche [84] und die Versuchsergebnisse aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRITILE* [52] zur Verfügung. Der Fokus bei der statistischen Auswertung liegt sowohl auf der Überarbeitung der Gewichtungsfaktoren als auch auf der Anpassung der Korrelationsbeiwerte. Zusätzlich soll untersucht werden, ob sich der Einfluss des Mechanisierungsgrades für den Schweißprozess, ob teilmechanisiert oder vollmechanisiert hergestellt, anhand eines Anpassungsfaktors  $k_{mf}$  (engl.: *manufacturing*) herausarbeiten lässt.

Im Rahmen des statistischen Auswerteverfahrens werden der experimentelle  $r_{e,i}$  und der theoretische  $r_{t,i}$  Widerstand der Flankenkehlnahtverbindung benötigt. Hierzu werden für die analytische Bestimmung dieser beiden Größen zwei Methoden eingeführt:

- Methode 1: Schubfluss
- Methode 2: Schubspannung

In Kapitel 8.4.1 konnte gezeigt werden, dass zwischen der maximal gemessenen Prüfkraft  $F_{max}$  und dem Schubfluss  $T_{\parallel,max}$  eine positive Korrelation besteht. Auf Grundlage dessen leitet sich die Methode für die analytische Bestimmung des experimentellen Widerstands ab. In Tab. 11-3 ist die analytische Bestimmung sowohl für den experimentellen als auch den theoretischen Widerstand für Methode 1 aufgezeigt. Der Index  $i$  bedeutet, dass für jeden einzelnen Versuch sowohl der experimentelle als auch der theoretische Widerstand bestimmt wird. Hierbei ist der Schubfluss  $T_{\parallel,max}$  ein Maß für die maximal aufnehmbare Kraft  $F_{max}$  pro wirksamer Schweißnahtlänge  $l_{eff}$  (vgl. Abb. 6-2).

Tab. 11-3: Methode 1 - Schubfluss

Experimenteller Widerstand $r_{e,i}$ [kN/mm]	Theoretischer Widerstand $r_{t,i}$ [kN/mm]	Basisvariablen
$r_{e,i} = T_{\parallel,max} = \frac{F_{max}}{l_{eff}}$	$r_{t,i} = \frac{(0,25 \cdot f_{u,GW,i} + 0,75 \cdot f_{u,SZW,i})}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,SZW}} \cdot a_{3D-Scan,i}$	$f_{u,GW}$ $f_{u,SZW}$ $a_{3D-Scan}$

Für die Ermittlung des theoretischen Widerstands des Schubflusses werden drei Kenngrößen als Basisvariablen identifiziert: Die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs  $f_{u,GW}$ , die Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs  $f_{u,SZW}$  und die abgeleitete Kehlnahtdicke aus der 3D-Digitalisierung der Nahtbruchfläche  $a_{3D-Scan}$ . Die Methode 1 setzt die Kenntnis der wirksamen Schweißnahtlänge  $l_{eff}$  voraus. Ein großer Vorteil der Methode 1 besteht darin, dass der in Kapitel 8.4.1, Abb. 8-9 aufgezeigte Einfluss der Nahtdicke  $a$ , resultierend aus der Variation der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$ , bei der Bestimmung des theoretischen Widerstands  $r_t$  berücksichtigt werden kann. Jedoch besteht die Gefahr bei einer unzureichend genauen Erfassung der Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$ , bzw. der daraus abgeleiteten Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$ , dass die Resultate des theoretischen Widerstands extrem stark streuen.

Entsprechend DIN EN 1993-1-8 [9] wird die aus einer Beanspruchung resultierende Spannung in der Schweißnaht zum Zeitpunkt der maximalen Beanspruchung über den Quotienten aus maximal gemessener Prüfkraft  $F_{max}$  und der zugehörigen wirksamen Kehlnahtfläche bestimmt. Aus den Untersuchungen in Kapitel 8.4.2 hat sich gezeigt, dass für die Ermittlung der experimentellen maximalen Schubbeanspruchung  $\tau_{\parallel,max}$  als wirksame Kehlnahtfläche die digitalisierte Nahtbruchfläche  $A_{3D-Scan}$  angesetzt werden darf. Tab. 11-4 gibt die analytischen Bestimmungsgleichungen zur Berechnung der experimentellen und der theoretischen Schubspannung für Methode 2 wieder.

Tab. 11-4: Methode 2 - Schubspannung

Experimenteller Widerstand $r_{e,i}$ [kN/mm]	Theoretischer Widerstand $r_{t,i}$ [kN/mm]	Basisvariablen
$r_{e,i} = \tau_{\parallel,max} = \frac{F_{max}}{A_{3D-Scan}}$	$r_{t,i} = \frac{(0,25 \cdot f_{u,GW,i} + 0,75 \cdot f_{u,SZW,i})}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,SZW}}$	$f_{u,GW}$ $f_{u,SZW}$

Als Basisvariablen sind für die Bestimmung des theoretischen Widerstands der Schubspannung die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs  $f_{u,GW}$  und die Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs  $f_{u,SZW}$  aufzuführen. Im Gegensatz zu Methode 1 wird die Kehlnahtdicke bei der Berechnung des theoretischen Widerstands bei Methode 2 nicht berücksichtigt.

## 11.4 Statistische Verteilung der Basisvariablen

### 11.4.1 Allgemeines

Neben den Modellunsicherheiten, die sich aus dem Vergleich der experimentell gemessenen Versuchsergebnisse mit den theoretisch bestimmten Bemessungswerten im Rahmen des statistischen Auswerteverfahrens nach DIN EN 1990 Anhang D [6] ergeben, gehen als Unsicherheiten auf der Widerstandsseite auch die Streuungen der Basisvariablen mit ein. Für die beiden in Kapitel 11.3 vorgestellten Methoden durch Berechnung des theoretischen Widerstands wurden die in Tab. 11-5 aufgeführten Parameter als Basisvariablen identifiziert. In diesem Kapitel werden die statistischen Kenngrößen der Basisvariablen, sofern aus der Literatur bekannt, vorgestellt oder durch eine entsprechende statistische Erhebung ermittelt.

Tab. 11-5: Basisvariablen der Widerstandsfunktion

Methode 1: Schubfluss		Methode 2: Schubspannung	
Zugfestigkeit der Grundwerkstoffe	$f_{u,GW}$	Zugfestigkeit der Grundwerkstoffe	$f_{u,GW}$
Zugfestigkeit der Schweißzusatzwerkstoffe	$f_{u,SZW}$	Zugfestigkeit der Schweißzusatzwerkstoffe	$f_{u,SZW}$
Abgeleitete Kehlnahtdicke aus 3D-Scan	$a_{3D-scan}$		

In den experimentellen Untersuchungen konnte stets ein Versagen in der Schweißnaht beobachtet werden, so dass der Einfluss des Schweißguts nicht zu vernachlässigen ist. Sowohl bei Methode 1 als auch bei Methode 2 berücksichtigt dementsprechend die vorgestellte Widerstandsfunktion die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs  $f_{u,GW}$  als auch die Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs  $f_{u,SZW}$ .

Für die statistischen Auswertungen in den Kapiteln 11.7, 11.8 und 11.9 werden folgende Kenngrößen der Basisvariablen benötigt: Der Mittelwert  $\bar{x}$ , die Standardabweichung  $\sigma$  und der Variationskoeffizient  $V$ . Im Rahmen des statistischen Auswerteverfahrens wird der Variationskoeffizient auch als  $V_x$  ausgedrückt. Maßgeblich für die Auswertung sind die Kenngrößen bezogen auf die Grundgesamtheit der betrachteten Basisvariablen (Index  $j$ ).

Da meist die vorliegenden Materialprüfungen im Rahmen der experimentellen Untersuchungen nicht ausreichend statistisch repräsentativ sind, musste für eine Aussage bzgl. der Grundgesamtheit auf die Literatur zurückgegriffen werden.

### 11.4.2 Zugfestigkeit der Grundwerkstoffe

#### Background Document D.03, 1990 [46]

Im Background Document D.03 [46] wird für die statistische Auswertung von Schweißverbindungen ein Variationskoeffizient für die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs von  $V_{f_{u,GW}} = 0,07$  angegeben. Da dieser Variationskoeffizient aus dem Jahr 1990 stammt, soll in einer zusätzlichen Recherche untersucht werden, ob der Wert verifiziert oder ein neuer Wert angesetzt werden kann.

#### Probabilistic Model Code [110]

Der Probabilistic Model Code des JCCS [110] schlägt auf Basis mehrerer vorangegangener Arbeiten aus den Jahren 1972 bis 1994 ein vollständiges probabilistisches Materialmodell für Baustahl vor. Das Modell beinhaltet die Verteilung und Korrelation des Elastizitätsmoduls, der Streckgrenze, der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung und der Querdehnzahl. Der Nachteil des Modells der für die in dieser Arbeit betrachteten Baustähle ist, dass das Modell nur gültig ist für Baustahl, der nach DIN EN 10025 hergestellt wurde und dessen nominelle Streckgrenze  $380 \text{ N/mm}^2$  nicht überschreitet. Somit kann der Probabilistic Model Code des JCCS [110] nicht für die Generierung der Kenngrößen herangezogen werden.

#### Da Silva, Luis Simões et al., 2009 [53]

In [53] sind von L. Simões da Silva et al. die Materialkennwerte von Baustahl S355 und S460 aus der Dissertation von Byfield [48] und aus eigenen Untersuchungen an der Universität Coimbra (Portugal) veröffentlicht. Die einzelnen Kenngrößen, gemessen an Flachstahlproben S355 und S460, sind in Tab. 11-6 aufgeführt.

#### Steel Construction Institute (SCI), 2016 [62]

Im Rahmen mehrere europäischen Forschungsprojekte hat das Steel Construction Institute eine statistische Erhebung für Materialkennwerte an Baustählen S690 und S700 durchgeführt. Die Kenngrößen hierzu sind in Tab. 11-6 dargestellt.

Die in Tab. 11-6 angegebenen statistischen Kenngrößen  $X_j$  bilden die Grundgesamtheit der entsprechenden Stahlgüte. Zusätzlich zur entsprechenden Quelle sind der Mittelwert  $\bar{x}$ , die Standardabweichung  $\sigma$ , der Variationskoeffizient  $CoV$ , die Versuchsanzahl  $n$  und die Mindestwerte der Zugfestigkeit aus der entsprechenden Produktnorm angegeben.

Tab. 11-6: Statistische Kenngrößen der Zugfestigkeit  $f_{u,GW}$  der Grundwerkstoffe

Statistische Kenngrößen	<b>S355</b>	<b>S460</b>	<b>S690</b>	<b>S700</b>
	DIN EN 10025-2:2005-04 Tabelle 7 470 - 630 [N/mm <sup>2</sup> ] da Silva et al. (2009), [53] $X_j$	DIN EN 10025-4:2005-04 Tabelle 5 540 - 720 [N/mm <sup>2</sup> ] da Silva et al. (2009), [53] $X_j$	DIN EN 10025-6:2009-08 Tabelle 5 770 - 940 [N/mm <sup>2</sup> ] SCI (2016), [62] $X_j$	DIN EN 10149-2:2013-12 Tabelle 2 750 - 950 [N/mm <sup>2</sup> ] SCI (2016), [62] $X_j$
$\bar{x}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	533,44	632,73	846,20	840,56
$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	16,53	23,18	29,73	24,15
$V$ [%]	3,10	3,66	3,51	2,87
$n$ [-]	1972	672	425	14

In Abb. 11-1 sind sowohl die Kenngrößen der Basisvariable Zugfestigkeit  $f_{u,GW}$  des Grundwerkstoffs der Grundgesamtheit  $X_j$  aus Tab. 11-6 als auch die Mindestwerte  $X_{nom}$  nach der entsprechenden Produktnorm grafisch dargestellt.

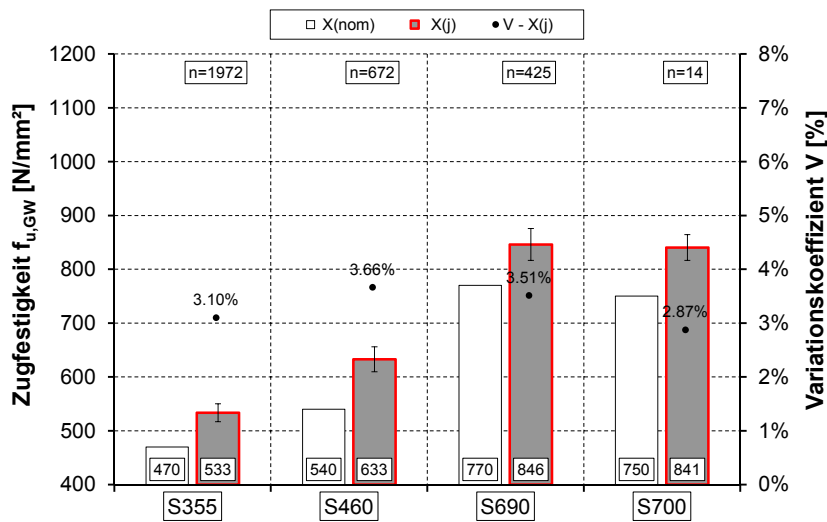


Abb. 11-1: Statistische Verteilung der Zugfestigkeit  $f_{u,GW}$  der Grundwerkstoffe

In Abb. 11-1 ist auf der Primärachse zugehörig zu den Säulen die Zugfestigkeit  $f_{u,GW}$  und auf der Sekundärachse zugehörig zu den Datenpunkten der Variationskoeffizient  $V$  dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Variationskoeffizient für alle drei verwendeten Grundwerkstoffe (S355, S460 und S690) nahezu konstant ist (zwischen 3,10 % und 3,66 %). Für die statistische Auswertung und die Sensitivitätsanalysen wird dementsprechend ein Variationskoeffizient für die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs  $f_{u,GW}$  von  $V_{f_{u,GW}} = 0,04$  angesetzt.

### 11.4.3 Zugfestigkeit der Schweißzusatzwerkstoffe

#### 11.4.3.1 Stichprobenerhebung

Bislang lagen sowohl in der Literatur als auch in vorangegangenen Forschungsprojekten keine gesicherten statistischen Kenngrößen für die Grundgesamtheit hinsichtlich der Zugfestigkeit eines Schweißzusatzwerkstoffs vor. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit eine sogenannte Stichprobenerhebung bzgl. der Zugfestigkeit von Schweißzusatzwerkstoffen durchgeführt. Hierzu wurden sowohl Hersteller von Schweißzusatzwerkstoffen als auch Bau-firmen befragt, denen Kennwerte über die Zugfestigkeit der gewünschten Schweißzusatzwerkstoffe vorlagen. Die Stichprobenerhebung gilt als Methode zur Gewinnung statistischer Daten, bei der nur ein Teil der Grundgesamtheit (Stichprobe) ausgewertet wird. Das Ergebnis der Stichprobenerhebung wurde mittels der *Bootstrapping-Methode* [57] auf die Grundgesamtheit übertragen.

#### 11.4.3.2 Bootstrapping-Methode

Bootstrapping bezeichnet in der Statistik eine Methode des Resampling. Beim Bootstrapping wird nach dem Zufallsprinzip einer der Werte aus der vorhandenen Basisstichprobe (Umfang  $n$ ) ausgewählt, notiert und wieder zurückgelegt. Danach wird der nächste Wert ausgewählt und zurückgelegt bis  $n$  Werte als simulierte Stichprobe vom Umfang  $n$  ausgewählt wurden (zufälliges Ziehen mit Zurücklegen). Dieser Vorgang kann nun  $n^n$  mal wiederholt werden. Die so hinzugewonnenen Stichproben vom Umfang  $n$  aus der Basisstichprobe werden Replikationsstichproben genannt. Ihre Anzahl wird mit  $d$  bezeichnet [57].

Die in dieser Arbeit angewandte Bootstrapping wurde in zwei Stufen gegliedert: In einer ersten Stufe wurden 10.000 Replikationsstichproben simuliert und für jede Replikationsstichprobe die statistischen Kenngrößen, Mittelwert  $\bar{x}$ , Standardabweichung  $\sigma$  und Variationskoeffizient  $V$  ermittelt. Die 10.000 Replikationsstichproben werden zu einem Subset zusammengefasst. Anschließend wurde aus dem Subset die minimalen und maximalen Werte der Mittelwerte  $\bar{x}$ , der Standardabweichungen  $\sigma$  und der Variationskoeffizienten  $V$  bestimmt. Insgesamt wurden 100 Subsets generiert. Hierbei lag der Fokus auf der Abschätzung bzgl. der Streuung des Mittelwerts und des Variationskoeffizienten, um auch in diesem Fall ein Streuband zu generieren. Da es sich bei der Stichprobenerhebung bzgl. der Zugfestigkeit der Schweißzusatzwerkstoffe lediglich um einen Teil der Grundgesamtheit handelt, wurden 1.000.000 Replikationsstichproben durchgeführt.



## 11.4.3.3 Ergebnisse der Stichprobenerhebung und der Bootstrapping-Methode

In Tab. 11-7, Tab. 11-8 und Tab. 11-9 sind die statistischen Kenngrößen aus der Stichprobenerhebung für die drei verwendeten Schweißzusatzwerkstoff aufgeführt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sowohl die Werte für Massiv- als auch Fülldraht gemeinsam ausgewertet wurden, da entsprechend der Produktnorm dieselben Mindestwerte für die Zugfestigkeit gefordert werden. Weiterhin sind in den Tabellen die Mittelwerte aller min.- und max.-Werte der statistischen Kenngrößen aufgelistet, die das Streuband der jeweiligen Kenngröße als Ergebnis der Bootstrapping-Methode wiedergeben.

In Anhang B sind die Streubänder der betrachteten statistischen Kenngröße der Bootstrapping-Methode grafisch in mehreren Abbildungen dargestellt.

Tab. 11-7: Statistische Kenngrößen - Schweißzusatzwerkstoff G46 / T46

<b>G46 / T46</b>				
DIN EN ISO 14341:2011-04 Tabelle 1A (G46) DIN EN ISO 17632:2008-08 Tabelle 1A (T46)				
530 - 680 [N/mm <sup>2</sup> ]				
		<i>Stichprobenerhebung</i>	<i>Mittelwert aller min.-Werte aus Bootstrapping</i>	<i>Mittelwert aller max.-Werte aus Bootstrapping</i>
$\bar{x}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	610,00	598,92	621,55
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	32,77	29,72	34,83
$V$	[%]	<b>5,37</b>	<b>4,96</b>	<b>5,60</b>
$n/d$	[-]	124	1.000.000	1.000.000

Tab. 11-8: Statistische Kenngrößen - Schweißzusatzwerkstoff G69 / T69

<b>G69 / T69</b>				
DIN EN ISO 16834:2012-08 Tabelle 1A (G69) DIN EN ISO 18276:2006-09 Tabelle 1A (T69)				
770 - 940 [N/mm <sup>2</sup> ]				
		<i>Stichprobenerhebung</i>	<i>Mittelwert aller min.-Werte aus Bootstrapping</i>	<i>Mittelwert aller max.-Werte aus Bootstrapping</i>
$\bar{x}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	818,50	797,74	842,55
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	40,98	30,96	47,77
$V$	[%]	<b>5,01</b>	<b>3,88</b>	<b>5,67</b>
$n/d$	[-]	48	1.000.000	1.000.000

Tab. 11-9: Statistische Kenngrößen - Schweißzusatzwerkstoff G89 / T89

<b>G89 / T89</b>				
DIN EN ISO 16834:2012-08 Tabelle 1A (G89) DIN EN ISO 18276:2006-09 Tabelle 1A (T89)				
940 - 1180 [N/mm <sup>2</sup> ]				
		<i>Stichprobenerhebung</i>	<i>Mittelwert aller min.-Werte aus Bootstrapping</i>	<i>Mittelwert aller max.-Werte aus Bootstrapping</i>
$\bar{x}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	1001,50	973,93	1030,12
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	57,06	49,66	59,12
$V$	[%]	<b>5,70</b>	<b>5,10</b>	<b>5,74</b>
$n/d$	[-]	60	1.000.000	1.000.000

Mit Hilfe der Bootstrapping-Methode konnte gezeigt werden, dass die Kenngrößen aus der Stichprobenerhebung für die statistische Auswertung als Kenngrößen für die Grundgesamtheit repräsentativ sind.

11.4.3.4 Statistische Kenngrößen der Schweißzusatzwerkstoffe

In Tab. 11-10 sind die statistischen Kenngrößen der Grundgesamtheit des jeweiligen Schweißzusatzwerkstoffs ( $X_j$ ) aufgeführt. Im Vergleich dazu ist die Kenngröße  $X_i$ , bezogen auf eine Stichprobe mit einem Probenumfang von 3 Stück für die verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe (Massivdrähte) im Rahmen des Forschungsprojekts *SAFEBRIC TILE* [52] mit angegeben.

Tab. 11-10: Statistische Kenngrößen der Zugfestigkeit  $f_{u,SZW}$  der Schweißzusatzwerkstoffe

Statistische Kenngrößen	G46 / T46		G69 / T69		G89 / T89		
	DIN EN ISO 14341 [33]: (G46) DIN EN ISO 17632 [37]: (T46)		DIN EN ISO 16834 [36]: (G69) DIN EN ISO 18276 [38]: (T69)		DIN EN ISO 16834 [36]: (G89) DIN EN ISO 18276 [38]: (T89)		
	530 - 680 [N/mm <sup>2</sup> ]		770 - 940 [N/mm <sup>2</sup> ]		940 - 1180 [N/mm <sup>2</sup> ]		
	Kleiner (2016)	SAFEBRIC TILE [52] (2016)	Kleiner (2016)	SAFEBRIC TILE [52] (2016)	Kleiner (2016)	SAFEBRIC TILE [52] (2016)	
	$X_j$	$X_i$	$X_j$	$X_i$	$X_j$	$X_i$	
$\bar{x}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	610,00	606,33	818,50	774,00	1001,50	939,33
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	32,77	7,64	40,98	6,56	57,06	6,03
$V$	[%]	5,37	1,26	5,01	0,85	5,70	0,64
$n$	[-]	124	3	48	3	60	3

In Abb. 11-2 zeigt sich eindrucksvoll, dass der Variationskoeffizient  $V$  für die Stichprobenerhebung unter allen drei Schweißzusatzwerkstoffen nahezu konstant ist (zwischen 5,01 % und 5,70 %). Weiterhin wird deutlich, dass die verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe die Anforderungen nach der Produktnorm, bei gleichzeitig geringer Streuung, erfüllen.

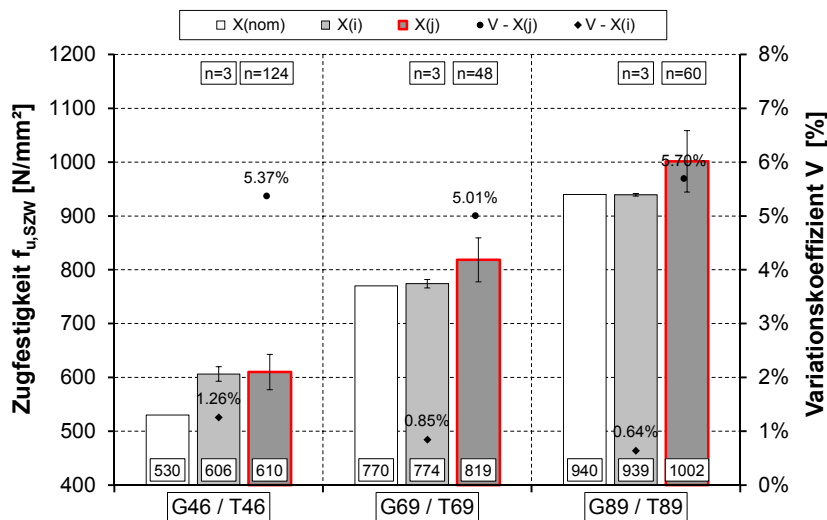


Abb. 11-2: Statistische Verteilung der Zugfestigkeit  $f_{u,SZW}$  der Schweißzusatzwerkstoffe

Für die statistische Auswertung und die Sensitivitätsanalysen wird dementsprechend ein Variationskoeffizient für die Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs  $f_{u,SZW}$  von  $V_{f_{u,SZW}} = 0,06$  festgelegt.

#### 11.4.4 Nahtbruchfläche

Die Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$  ist die nach dem Versagen der Naht direkt ausgemessene Fläche, die gegebenenfalls plastische Verformungen enthält. Bei allen experimentellen Untersuchungen konnte ein Scherversagen im Schweißgut beobachtet werden. Jedoch ist das Fließen des Schweißguts angesichts der relativ geringen Verformungen nach Erreichen der maximalen Prüfkraft als unmaßgeblich anzusehen. Die Nahtbruchfläche stellt für die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse eine Basisvariable dar, so dass in diesem Kapitel die statistischen Kenngrößen der Nahtbruchfläche ermittelt und dargestellt werden. Da bei den experimentellen Untersuchungen teilweise die wirksame Nahtlänge  $l_{eff}$  unterschiedlich war, wurde aus der Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$  die zugehörige Nahtdicke  $a$  abgeleitet. Für die Nahtdicke  $a$  gibt es i. Allg. verschiedene Definitionen, die in Kapitel 6.5.2 erläutert wurden.

Im Background Document D.03 [46] wird für die statistische Auswertung von Schweißverbindungen ein Variationskoeffizient für die Nahtbruchfläche von  $V_{A_{Bruch}} = 0,10$  angegeben. Auf Grundlage der ausgemessenen Nahtbruchflächen im Rahmen des Forschungsprojekts *SAFEBRIC TILE* [52] soll in diesem Kapitel überprüft werden, ob der Wert verifiziert werden kann oder ob für die statistische Auswertung ein neuer Wert angesetzt werden sollte. Das Versuchsprogramm im Forschungsprojekt *SAFEBRIC TILE* [52] beinhaltete, wie bereits in Kapitel 6.3.3.1 beschrieben, verschiedene Parameter, so dass bei der Ermittlung des Variationskoeffizienten der Nahtbruchfläche verschiedene Untergruppen betrachtet werden, um so deren Einfluss darzustellen.

Im Folgenden wird das Vorgehen zur Bestimmung des Variationskoeffizienten der Nahtbruchfläche  $V_{A_{Bruch}}$  basierend auf den 52 Versuchsergebnissen des Forschungsprojekts *SAFEBRIC TILE* [52] aufgezeigt. Für die Ermittlung des Variationskoeffizienten  $V_{A_{Bruch}}$  der Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$  wird, wie in Abb. 11-3 gezeigt, die nach DIN EN 1993-1-8 [9] ermittelte Nahtdicke  $a_{EC}$ , bezogen auf den tatsächlichen Wurzelpunkt, als Referenz festgelegt. Dies hat den Hintergrund, dass es sich bei der Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$  um eine geometrische Größe handelt, die individuell je nach Vorgabe der nominellen Kehlnahtdicke variieren kann. Um eine allgemeingültige Aussage über die Streuung der Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$  treffen zu können, bedarf es einer Referenz- bzw. Bezugsfläche. Durch das Verfahren der Digitalisierung der Nahtbruchfläche und der Generierung der Bruchflächen-Schnittkanten konnte anhand der Makroschliffbilder der Verlauf der Bruchflächen-Schnittkanten in der Kehlnaht grafisch dargestellt werden (vgl. Kapitel 6.5.4). Somit konnten Rückschlüsse über das Bruchverhalten der jeweiligen Naht gezogen werden. Es hat sich gezeigt, dass der Bruch jeweils vom tatsächlichen Wurzelpunkt ausging, so dass die nach DIN EN 1993-1-8 [9] ermittelte Nahtdicke  $a_{EC}$  als Bezugsgröße verifiziert werden kann.

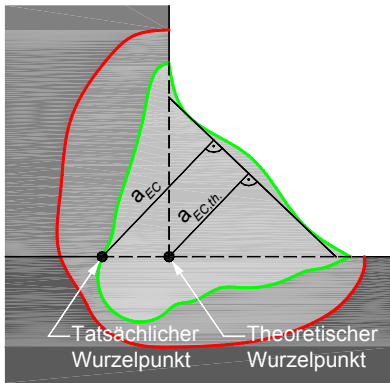


Abb. 11-3: Referenz-Kehlnahtdicke  $a_{EC}$

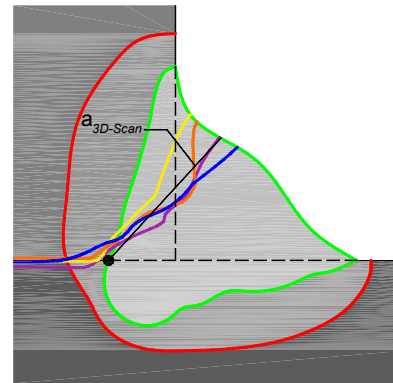


Abb. 11-4: Abgeleitete Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$

Die Differenz zwischen der abgeleiteten Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  und der Kehlnahtdicke bei tiefem Einbrand  $a_{EC}$  wird für jede gemessene Nahtbruchfläche (Index  $i$ ) entsprechend Gleichung (11.2) ermittelt.

$$\Delta a_i = a_{3D-Scan,i} - a_{EC,i} \quad (11.2)$$

mit

$a_{3D-Scan}$  Abgeleitete Kehlnahtdicke aus dem dreidimensionalen Modell der Nahtbruchfläche

$a_{EC}$  Kehlnahtdicke bei tiefem Einbrand

In Abb. 11-5 ist auf Basis eines konkreten Makroschliffs schematisch die Differenz zwischen der Bezugsgröße  $a_{EC}$  und der aus dem dreidimensionalen Modell der Nahtbruchfläche abgeleiteten Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  dargestellt.

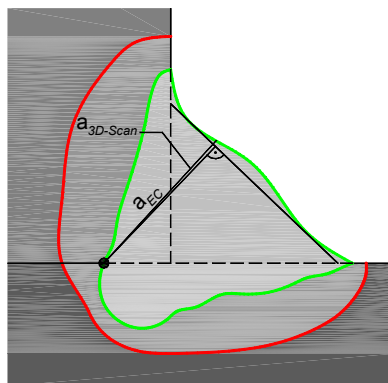


Abb. 11-5: Schematische Darstellung der Differenz  $\Delta a$  zwischen  $a_{EC}$  und  $a_{3D-Scan}$

Der Mittelwert der Differenzen für die jeweils betrachtete Gruppe mit  $n$  Versuchsergebnissen errechnet sich nach Gleichung (11.3).

$$\bar{x}_{\Delta a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta a_i \quad (11.3)$$

Da die gemessenen Nahtbruchflächen nur einer Stichprobe einer Grundgesamtheit entsprechen, ist die Standardabweichung nach Gleichung (11.4) zu bestimmen.

$$\sigma_{\Delta a}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta a_i - \bar{x}_{\Delta a})^2 \quad (11.4)$$

Der Variationskoeffizient der Nahtbruchfläche  $V_{A_{Bruch}}$  bestimmt sich aus dem Quotienten der Standardabweichung  $\sigma_{\Delta a}$  und dem Mittelwert  $\bar{x}_{a_{EC}}$  der Bezugsgröße  $a_{EC}$  (Kehlnahtdicke bei tiefem Einbrand) für die jeweils betrachtete Gruppe.

$$V_{A_{Bruch}} = V_{a_{3D-Scan}} = \frac{\sigma_{\Delta a}}{\bar{x}_{a_{EC}}} \quad (11.5)$$

mit

$\bar{x}_{a_{EC}}$  Mittelwert der betrachteten Untergruppe für die Kehlnahtdicke bei tiefem Einbrand

### Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Nahtdicke

Die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  wirkt sich direkt auf die Streckenenergie  $E$  und den Einbrand aus. Der Einfluss der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  wird in Abb. 11-6 und Abb. 11-7 gezeigt. Als jeweilige Gruppe wird der verwendete Schweißzusatzwerkstoff betrachtet und jeweils nach teilmechanisiert (Kurzzeichen  $m$  für engl.: *manual*) und vollmechanisiert (Kurzzeichen  $a$  für engl.: *automatic*) differenziert.

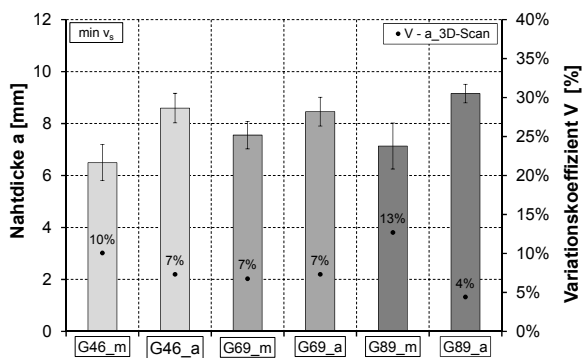


Abb. 11-6: Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  - min  $v_s$

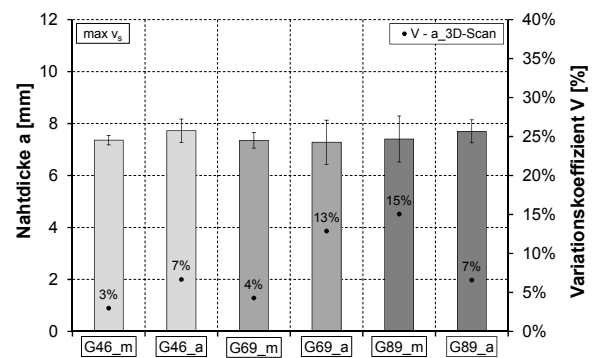


Abb. 11-7: Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  - max  $v_s$

Die abgeleitete Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  ist jeweils über dem verwendeten Schweißzusatzwerkstoff aufgetragen. Zusätzlich sind die Standardabweichung und der Variationskoeffizient der betrachteten Gruppe dargestellt. Wie erwartet zeigt sich, dass mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  die abgeleitete Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  generell abnimmt (siehe Abb. 11-7). Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei einer größeren Schweißgeschwindigkeit ( $\max v_s$ ) die eingebrachte Streckenenergie  $E$  niedriger und damit der Einbrand geringer ist.

Auffallend ist, dass bei den Versuchsergebnissen in Abb. 11-6 die Kehlnahtdicke für die teilmechanisiert geschweißten Versuchskörper geringer ist als für die vollmechanisiert geschweißten Prüfkörper. Einen Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Kehlnahtdicke und die statistischen Kenngrößen lässt sich nicht feststellen.

Abb. 11-8 zeigt zusammengefasst die statistischen Kenngrößen für die abgeleitete Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  im Vergleich zwischen minimaler ( $\min v_s$ ) zu maximaler ( $\max v_s$ ) Schweißgeschwindigkeit.

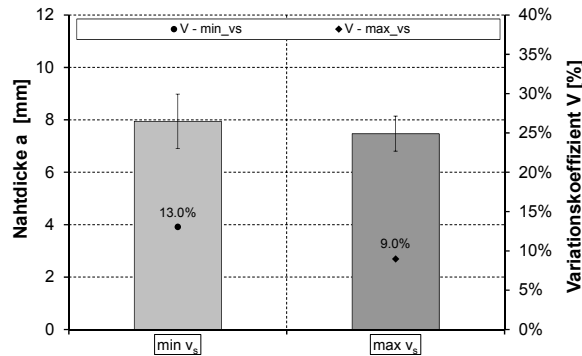


Abb. 11-8: Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  - Einfluss der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$

Für den jeweiligen Probenumfang von 26 Versuchsergebnissen lässt sich mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  eine geringere Kehlnahtdicke feststellen. Des Weiteren kann für eine größere Schweißgeschwindigkeit ( $\max v_s$ ) eine geringere Streuung beobachtet werden.

### Einfluss des Mechanisierungsgrades auf die Nahtdicke

Um den Einfluss des Mechanisierungsgrades herauszuarbeiten, wurde zunächst eine Gruppenbetrachtung bzgl. dem Schweißzusatzwerkstoff und der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  durchgeführt.

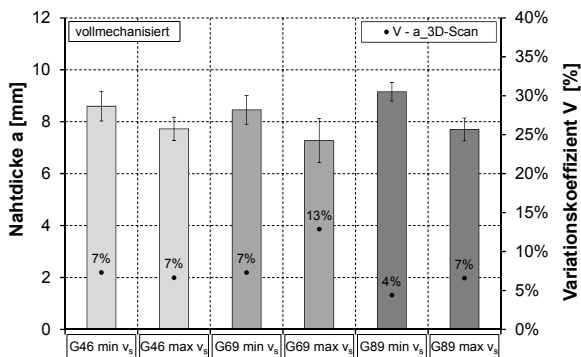


Abb. 11-9: Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  - vollmechanisiert

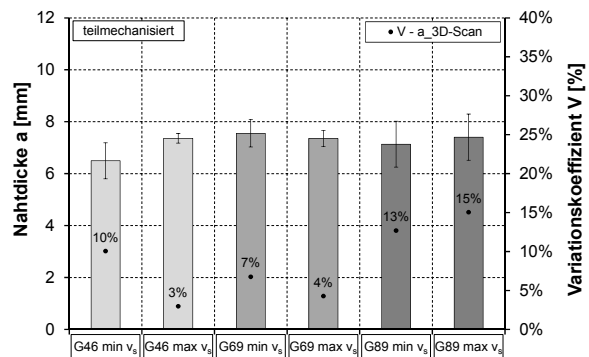


Abb. 11-10: Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  - teilmechanisiert

Vergleicht man für die vollmechanisiert geschweißten Versuchskörper in Abb. 11-9 die Ergebnisse, bestätigt sich, dass die abgeleitete Kehlnahtdicke für die Versuchskörper mit mi-

nimaler Schweißgeschwindigkeit ( $\min v_s$ ) geringer ist. Dieses Muster ist bei den teilmechanisiert geschweißten Versuchskörpern in Abb. 11-10 weniger stark ausgeprägt. Hier ist vor allen Dingen die Streuung der Versuchsergebnisse auffallend.

Abb. 11-11 bekräftigt eindrucksvoll die ausgeprägte Streuung (13,4 %) der Versuchsergebnisse hinsichtlich der abgeleiteten Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  und demzufolge der Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$  für die teilmechanisiert geschweißten Versuchskörper. Im Vergleich dazu ist die Streuung der vollmechanisiert geschweißten Prüfkörper mit 7,3 % nahezu nur halb so groß.

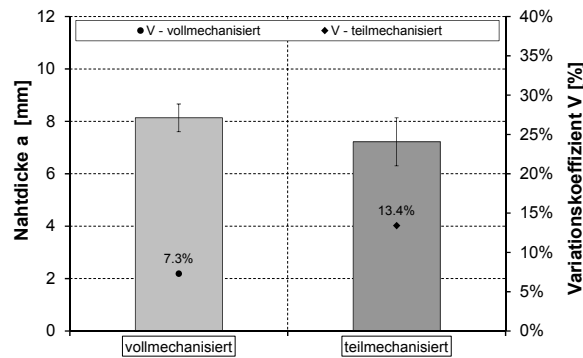


Abb. 11-11: Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  - Einfluss Mechanisierungsgrad

## Zusammenfassung der Ergebnisse

Abb. 11-12 zeigt die statistischen Kenngrößen der verschiedenen Definitionen der Nahtdicken einer Kehlnaht. Hierbei wurden alle 52 Versuchsergebnisse des Forschungsprojekts *SAFEBRICKTILE* [52] gemeinsam nach der jeweiligen Methode der Nahtdefinition in einer Gruppe ausgewertet.

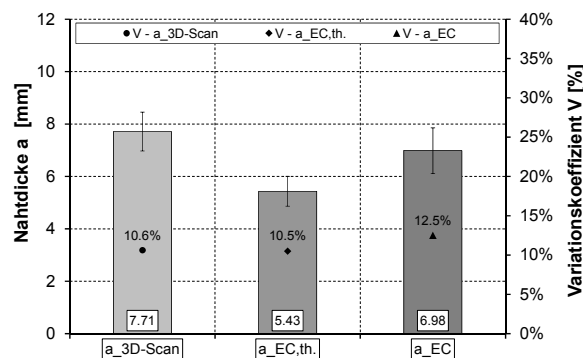


Abb. 11-12: Statistische Kenngrößen der verschiedenen Definitionen der Nahtdicken

Wie erwartet besitzt die nach DIN EN 1993-1-8 [9] ermittelte Nahtdicke  $a_{EC,th.}$  bezogen auf den theoretischen Wurzelpunkt die geringste Nahtdicke mit durchschnittlich 5,43 mm. Bedingt durch den zu berücksichtigenden tiefen Einbrand bei der Ermittlung der Nahtdicke  $a_{EC}$  ergibt sich für diese Methode der Nahtdickenbestimmung im Mittel ein Wert von 6,98 mm.

Die abgeleitete Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  aus dem dreidimensionalen gescannten Modell der Nahtbruchfläche ergibt im Durchschnitt mit 7,71 mm den größten Wert für die Nahtdicke. Auffallend ist, dass sich die Streuungen aller drei Methoden auf einem relativ konstanten Niveau zwischen 10,5 % und 12,5 % bewegen.

Für die abgeleitete Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  bzw. für die Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$  ergibt sich ein Variationskoeffizient von  $V_{A_{Bruch}} = 10,6 \%$ . Somit lässt sich der im Background Document D.03 [46] angegebene Wert für den Variationskoeffizient der Nahtbruchfläche von  $V_{A_{Bruch}} = 10 \%$  nahezu verifizieren.

Für die statistische Auswertung und die Sensitivitätsanalysen hinsichtlich der Tragfähigkeit der Kehlnahtverbindungen wird als Nahtdicke die abgeleitete Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  bzw. die Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$  verwendet. Hierbei wird für die Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$  ein Variationskoeffizient von  $V_{A_{Bruch}} = 0,11$  angesetzt.



### 11.5 Angepasstes statistisches Auswerteverfahren für Bauteilversagen durch Bruch

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse wird in diesem Kapitel einerseits die standardisierte Vorgehensweise nach DIN EN 1990 Anhang D [6] (Verfahren 1) zur Kalibrierung eines Widerstandsmodells erläutert. Andererseits wird eine angepasste Vorgehensweise (Verfahren 2), die eigens am Beispiel der Flankenkehlnahtverbindungen entwickelt wurde, vorgestellt. Dieses speziell angepasste statistische Auswerteverfahren kann generell auf Fälle angewendet werden, die ein Bauteilversagen auf Bruch aufweisen. Anhand beider Verfahren können die experimentell ermittelten Schweißnahttragfähigkeiten in Bezug zu theoretisch ermittelten Werten statistisch ausgewertet werden.

Hierbei werden Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M^*$  ermittelt, die sich aus dem für  $\alpha_R \cdot \beta = 3,04$  berechneten Bemessungswert  $r_d$  und dem nominellen (charakteristischen) Wert  $r_{t,nom}$  ergeben. Für die Ermittlung des nominellen Widerstandswerts  $r_{t,nom}$  wird im Stahlbau üblicherweise der Nennwert der Festigkeit angesetzt, der i. d. R. für die Bemessung als charakteristischer Wert anzunehmen ist (vgl. Kapitel 2.4.8). Demzufolge bestimmt sich der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$  mittels der Anwendung von Nennwerten als Eingangsgröße nach Gleichung (11.6):

$$\gamma_M^* = \frac{g_{r_t}(X_{nom})}{r_d} = \frac{r_{t,nom}}{r_d} \quad (11.6)$$

mit

$\gamma_M^*$	Teilsicherheitsbeiwert
$r_{t,nom}$	Widerstand mit nominellen Eingangswerten ( $X_{nom}$ ) berechnet
$r_d$	Bemessungswert

Die  $r_{t,nom}$ -Funktion ist genau dann die passende charakteristische Funktion, wenn  $\gamma_M^*$  kleiner oder gleich dem nach DIN EN 1993-1-1 [7] Abschnitt 6.1 (2) geforderten Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten bei Bruchversagen infolge Zugbeanspruchung ist. Als Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M2}$  wird für geschweißte Verbindungen ein Wert von  $\gamma_{M2} = 1,25$  festgelegt. Sofern der geforderte Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M2}$  nicht eingehalten ist, lässt sich anhand des Verfahrens ein Korrekturfaktor (für Schweißnahtverbindungen: Korrelationsbeiwert  $\beta_w$ ) ermitteln, der das geforderte Sicherheitsniveau zwischen nominellem Widerstand und Bemessungswert definiert.

Mit Hilfe der in Tab. 11-11 beschriebenen beiden Verfahren lassen sich die existierenden Bemessungsgleichungen nach DIN EN 1993-1-8 [9] und Rasche [84] für Flankenkehlnahtverbindungen unter reiner Schubbeanspruchung kalibrieren. Weiterhin kann ein eventuell notwendiger Anpassungsfaktor bzgl. des Mechanisierungsgrades bei der Ermittlung von Bemessungstragfähigkeiten bestimmt werden.

Die in Kapitel 11.2.1 beschriebene Datenbasis von Rasche stützt sich im Wesentlichen auf zwei Säulen: Die aus der Literatur stammenden Versuche und die eigens im Rahmen der Forschungsprojekte *FOSTA P652* [71], *FOSTA P812* [72] und den unabhängigen Zusatzversuchen [70] durchgeführten Untersuchungen an Kehlnahtverbindungen.

Für die Bestimmung des theoretischen Widerstands bei Methode 1 (Schubfluss) hat die Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$ , bzw. die daraus abgeleitete Kehlnahtdicke  $a_{3D-Scan}$  einen entscheidenden Einfluss. Die Streuung der Nahtbruchfläche ist hauptsächlich von der Messmethode abhängig. Für die Forschungsprojekte *FOSTA P652* [71], den unabhängigen Zusatzversuchen [70] und *FOSTA P812* [72] ist bekannt, dass die Nahtbruchfläche mit einem Klebeband beklebt und mit einem Stift nachgezeichnet wurde. Anschließend wurde diese Umrandung der Nahtbruchfläche in ein CAD-Programm eingelesen und die Größe der Fläche grafisch bestimmt. Diese Methode führt aufgrund der Tatsache, dass durch das Klebeband die Topografie der Naht nicht gänzlich erfasst werden kann, zu einer großen Streuung der gemessenen Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$ . Für die aus der Literatur aufgearbeiteten Versuche liegt keine Kenntnis über die Methode zur Messung der Nahtbruchfläche vor. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass durch eine unzureichend genauen Erfassung der Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$ , bzw. der daraus abgeleiteten Kehlnahtdicke die Resultate des theoretischen Widerstands extrem stark streuen.

Für die statistische Auswertung und die Sensitivitätsanalysen der Kapitel 11.7, 11.8 und 11.9 sollen sowohl die Datenbasis von Rasche [84] als auch die Versuchsergebnisse aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRICKTILE* [52] verwendet werden. Aufgrund der mangelnden Kenntnis über die Messmethode zur Nahtbruchflächenbestimmung bzw. der unzureichend genauen Erfassung der Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$  wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit für die statistische Auswertung der theoretische Widerstand  $r_t$  nach Methode 2 (Schubspannung) aus Kapitel 11.3 bestimmt.

Aufgrund der Tatsache, dass der experimentelle Widerstand  $r_e$  nach Methode 2 (Schubspannung) die Nahtbruchfläche  $A_{Bruch}$  beinhaltet, gilt es die Streuung der Nahtbruchfläche im Rahmen der statistischen Auswertung mit zu erfassen. Hierfür wurden basierend auf der standardisierten Vorgehensweise zur versuchsgestützten Bemessung nach DIN EN 1990 Anhang D [6] zwei Verfahren abgeleitet. Die in Tab. 11-11 beschriebenen Verfahren 1 und 2 differenzieren die in Kapitel 10.4 beschriebenen Schritte 6 und 7, bei denen der Variationskoeffizient  $V_{r_t}^2$  der Basisvariablen  $X_j$  und die Standardabweichung  $Q$  der Widerstandsfunktion  $r_t$  ermittelt werden.

Tab. 11-11: Differenzierung der Ermittlung des Variationskoeffizienten  $V_{rt}^2$  der Basisvariablen  $X_j$  und der Standardabweichung  $Q$  der Widerstandsfunktion  $r_t$ 

Differenzierung zu Schritt 6 und 7 des Ablaufschemas in Kapitel 10.4	
Verfahren 1 - V1 -	Verfahren 2 - V2 -
<b>Variationskoeffizient <math>V_r</math> des Werts der Widerstandsfunktion <math>r_t</math></b> für kleine Werte von $V_\delta^2$ und $V_{X_i}^2$ darf folgende Näherung benutzt werden: $V_r^2 = V_\delta^2 + V_{rt}^2$	
<b>Variationskoeffizient <math>V_{rt}</math> der Basisvariablen <math>X_j</math></b> Fehlerfortpflanzung der Streuung der Basisvariablen der Widerstandsfunktion $r_t$	
$V_{rt}^2 = \sum_{j=1}^k V_{X_j}^2$	(für jeden einzelnen Versuch $i$ ) $V_{rt,i}^2 = \frac{1}{r_{t,i}(\underline{X}_{j,m})^2} \cdot \sum_{j=1}^k \left( \frac{\partial r_{t,i}(X_j)}{\partial X_j} \cdot \sigma_j \right)^2$ <b>Anmerkung:</b> Partielle Ableitungen für Methode 2 (Schubspannungen) siehe Gleichungen (11.8) und (11.9) (global für die betrachtete Gruppe) $V_{rt}^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{r_{t,i}(\underline{X}_{j,m})^2} \cdot \sum_{j=1}^k \left( \frac{\partial r_{t,i}(X_j)}{\partial X_j} \cdot \sigma_j \right)^2 \right) / n + V_{X_j}^2$
<b>Bestimmung der Standardabweichungen</b>	
$Q_{rt} = \sqrt{\ln(V_{rt}^2 + 1)}$	(für jeden einzelnen Versuch $i$ ) $Q_{rt,i} = \sqrt{\ln(V_{rt,i}^2 + V_{X_j}^2 + 1)}$
<b>Standardabweichung <math>Q_\delta</math> der Streugröße <math>\delta</math></b>	
$Q_\delta = \sqrt{\ln(V_\delta^2 + 1)}$	
<b>Standardabweichung <math>Q</math> der gesamten Widerstandsfunktion <math>r_t</math></b>	
$Q = \sqrt{\ln(V_\delta^2 + V_{rt}^2 + 1)}$	(für jeden einzelnen Versuch $i$ ) $Q_i = \sqrt{\ln(V_\delta^2 + V_{rt,i}^2 + V_{X_j}^2 + 1)}$ <b>Anmerkung:</b> Für $V_{X_j}$ kann bei Methode 2 (Schubspannungen) ein globaler Variationskoeffizient einer maßgebenden Basisvariablen $X_j$ angesetzt werden.

Die in Tab. 11-11 als Verfahren 1 bezeichnete Methode, entspricht der standardisierten Vorgehensweise nach DIN EN 1990 Anhang D [6]. Hierbei wird für die Ermittlung des Variationskoeffizienten  $V_{rt}^2$  die Summe aus den einzelnen Variationskoeffizienten der Basisvariablen  $X_j$  gebildet. Im Kontext des Auswerteverfahrens nach Methode 2 (Schubspannung) bedeutet dies, dass für die Ermittlung des Variationskoeffizienten  $V_{rt}^2$  die einzelnen Variationskoeffizienten der Basisvariablen  $X_j$  entsprechend Gleichung (11.7) addiert werden.

$$V_{rt}^2 = \sum_{j=1}^k V_{X_j}^2 = V_{f_{u,GW}}^2 + V_{f_{u,SZW}}^2 + V_{A_{Bruch}}^2 \quad (11.7)$$

mit

- $V_{f_{u,GW}}$  Variationskoeffizient der Basisvariablen Zugfestigkeit Grundwerkstoff ( $f_{u,GW}$ )  
 $V_{f_{u,SZW}}$  Variationskoeffizient der Basisvariablen Zugfestigkeit Schweißzusatzwerkstoff ( $f_{u,SZW}$ )  
 $V_{A_{Bruch}}$  Variationskoeffizient der Basisvariablen Nahtbruchfläche ( $A_{Bruch}$ )

Bei Verfahren 2 wird für die Bestimmung des Variationskoeffizienten  $V_{rt}$  der Basisvariablen  $X_j$  die theoretische Widerstandsfunktion nach jeder Basisvariablen  $X_j$  partiell abgeleitet und mit der Standardabweichung  $\sigma_j$  der zugehörigen Basisvariablen  $X_j$  multipliziert.

Für das statistische Auswerteverfahren nach Methode 2 (Schubspannung) ergibt sich die partielle Ableitung nach der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs für das theoretische Widerstandsmodell nach Rasche [84] entsprechend Gleichung (11.8).

$$\frac{\partial r_{t,i}(f_{u,GW,i})}{\partial f_{u,GW,i}} \cdot \sigma_{f_{u,GW,j}} = \frac{0,25}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,SZW}} \cdot \sigma_{f_{u,GW,j}} \quad (11.8)$$

mit

- $\sigma_{f_{u,GW,j}}$  Standardabweichung der Basisvariablen Zugfestigkeit Grundwerkstoff (Bezug: Grundgesamtheit)

Die partielle Ableitung nach der Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs bestimmt sich nach Gleichung (11.9).

$$\frac{\partial r_{t,i}(f_{u,SZW,i})}{\partial f_{u,SZW,i}} \cdot \sigma_{f_{u,SZW,j}} = \frac{0,75}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,SZW}} \cdot \sigma_{f_{u,SZW,j}} \quad (11.9)$$

mit

- $\sigma_{f_{u,SZW,j}}$  Standardabweichung der Basisvariablen Zugfestigkeit Schweißzusatzwerkstoff (Bezug: Grundgesamtheit)

Das theoretische Widerstandsmodell  $r_t$  von Rasche [84] beinhaltet als Basisvariable nicht die Nahtbruchfläche bzw. die abgeleitete Kehlnahtdicke und demzufolge ist auch keine Ableitung nach dieser Größe möglich. Jedoch gilt es, bedingt durch den großen Einfluss der Nahtbruchfläche bei der Ermittlung des experimentellen Widerstands, die Streuung der Nahtbruchfläche im Rahmen der statistischen Auswertung mit zu erfassen. Demzufolge wird für das Verfahren 2 bei der Ermittlung der Standardabweichung  $Q_{rt}$  der Basisvariablen  $X_j$  und der Standardabweichung  $Q$  der gesamten Widerstandsfunktion  $r_t$  neben dem Variationskoeffizienten  $V_{rt}$  zusätzlich der Variationskoeffizienten  $V_{A_{Bruch}}$  der Nahtbruchfläche in der Summe unter der Wurzel mit angesetzt (vgl. Tab. 11-11).

## 11.6 Nennwerte der Zugfestigkeiten der Basisvariablen

Die in der Datenbasis von Rasche [84] und dem Forschungsprojekt *SAFEBRIC TILE* [52] verwendeten Grund- und Schweißzusatzwerkstoffe werden in diesem Kapitel den derzeit gültigen Normen zugeordnet. Wie in Kapitel 11.5 erläutert, ergibt sich der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$  als Quotient aus dem Widerstand  $r_{t,nom}$  mit nominellen (charakteristischen) Eingangswerten und dem mit  $\alpha_R \cdot \beta = 3,04$  berechneten Bemessungswert  $r_d$ . Für die Bestimmung des nominellen Widerstandswerts  $r_{t,nom}$  wird im Stahlbau üblicherweise der Nennwert der Festigkeit angesetzt, der i. d. R. für die Bemessung als charakteristischer Wert anzunehmen ist. Demzufolge bestimmt sich der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$  mittels der Anwendung von Nennwerten als Eingangsgröße.

In Tab. 11-12 sind die verwendeten Grundwerkstoffe aufgeführt. Für die betrachteten Versuche war die Blechdicke  $t \leq 15 \text{ mm}$ , so dass als nomineller Werte der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs die hervorgehobenen Werte angesetzt werden dürfen.

Tab. 11-12: Nennwerte der Zugfestigkeit  $f_{u,GW}$  für Baustähle nach DIN EN 1993-1-1 [7], Tabelle 3.1 und DIN EN 1993-1-12 [11], Tabelle 1 und 2

Produktnorm und Stahlsorte	Nennwerte nach	Dicken			$t \leq t_1$	$t_1 < t \leq t_2$	$t_2 < t \leq t_3$
		$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	$t_3$ [mm]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]
EN 10025-2 <b>S355</b>	DIN EN 1993-1-1 [7] Tabelle 3.1	40	80		<b>490</b>	470	
EN 10025-4 <b>S460 N/NL   S460 M/ML</b>	DIN EN 1993-1-1 [7] Tabelle 3.1	40	80		<b>540</b>	540   530	
EN 10025-6 <b>S690 Q/QL/QL1</b>	DIN EN 1993-1-12 [11] Tabelle 1	50	100	150	<b>770</b>	760	710
EN 10149-2 <b>S700 MC</b>	DIN EN 1993-1-12 [11] Tabelle 2	1,5	8	16		750	<b>750</b>

In Tab. 11-13 sind die verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe aufgeführt und jeweils nach der Kennziffer in Gruppen zusammengefasst. Als nomineller Wert der Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs wird der Mindestwert des zulässigen Bereiches festgelegt.

Tab. 11-13: Nennwerte der Zugfestigkeit  $f_{u,SZW}$  für Schweißzusatzwerkstoffe

Kennziffer	Art des Produkts	Produktnorm		$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]
46	Massivdrahtelektrode	DIN EN ISO 14341 [33] Tabelle 1A	G46	<b>530</b> - 680
	Fülldrahtelektrode	DIN EN ISO 17632 [37] Tabelle 1A	T46	<b>530</b> - 680
	Umhüllte Stabelektrode	DIN EN ISO 2560 [28] Tabelle 1A	E46	<b>530</b> - 680
69	Massivdrahtelektrode	DIN EN ISO 16834 [36] Tabelle 1A	G69	<b>770</b> - 940
	Fülldrahtelektrode	DIN EN ISO 18276 [38] Tabelle 1A	T69	<b>770</b> - 940
89	Massivdrahtelektrode	DIN EN ISO 16834 [36] Tabelle 1A	G89	<b>940</b> - 1180

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass eine gemeinsame Auswertung der in Tab. 11-13 aufgeführten Schweißzusatzwerkstoffe unabhängig von der Art des Produkts (Massivdraht-, Fülldraht- oder umhüllte Stabelektrode) zulässig ist, da entsprechend der

Produktnorm dieselben Mindestwerte für die Zugfestigkeit gefordert werden.

### 11.7 Sensitivitätsanalyse - Einfluss der Gewichtungsfaktoren

Rasche hat in ihrer Dissertation [84] einen Bemessungsvorschlag entwickelt, der die Tragfähigkeit einer Flankenkehlnahtverbindungen in Abhängigkeit von Grund- und Schweißzusatzwerkstoff beurteilt. Dazu wurde die Bemessungsgleichung nach DIN EN 1993-1-8 [9] modifiziert, so dass die Festigkeit von Grund- und Schweißzusatzwerkstoff in der Bemessungsgleichung durch Gewichtungsfaktoren Eingang findet. Dabei wird vorgeschlagen, die Festigkeit des Grundwerkstoffs mit einem Gewichtungsfaktor von 0,25 (25 %) und die des Schweißzusatzwerkstoffs mit einem Gewichtungsfaktor von 0,75 (75 %) zu berücksichtigen. Anhand dieser modifizierten Bemessungsgleichung wurden die Korrelationsbeiwerte in Abhängigkeit der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs bestimmt. Um deutlich zu machen, dass diese neuen Korrelationsbeiwerte abhängig vom jeweiligen Schweißzusatzwerkstoff sind, werden diese Beiwerte mit dem Index *SZW* versehen. Durch die zusätzlich hinzugewonnenen Versuche aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRICKTILE* [52] und dem angepassten statistischen Auswerteverfahren in Kapitel 11.5 soll in diesem Kapitel eine Sensitivitätsanalyse bezüglich den beiden Gewichtungsfaktoren für den Anteil der Festigkeit des Grund- und Schweißzusatzwerkstoffs durchgeführt werden. Mit Hilfe der Sensitivitätsanalysen soll bewertet werden, wie empfindlich bestimmte Kennzahlen auf Änderungen von Eingangsparametern im statistischen Auswerteverfahren reagieren.

Der theoretische Widerstand einer Flankenkehlnahtverbindungen berechnet sich für die Sensitivitätsanalyse im Rahmen des statistischen Auswerteverfahrens nach Methode 2 (Schubspannungen) entsprechend Gleichung (11.10).

$$r_{t,i} = \frac{x \cdot f_{u,GW,i} + y \cdot f_{u,SZW,i}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,SZW}^{KI}} \quad (11.10)$$

mit

$r_{t,i}$	Theoretischer Widerstand (Schubspannung)	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{u,GW,i}$	Zugfestigkeit des schwächeren Grundwerkstoffs (GW)	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{u,SZW,i}$	Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs (SZW)	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\beta_{w,SZW}^{KI}$	Angepasster Korrelationsbeiwert abhängig vom Schweißzusatzwerkstoff (SZW) nach Kleiner	[-]

Als Daten stehen alle aus der Datenbasis von Rasche [84] (siehe Tab. 11-1) und dem Forschungsprojekt *SAFEBRICKTILE* [52] (siehe Tab. 11-2) zur Verfügung. In Abb. 11-13 sind die Datengruppen in einem Flussdiagramm dargestellt, die die Grundlage der Sensitivitätsanalyse bilden.

Hierbei bildet die Datengruppe *Praxisnahe Streuung* die Versuchsergebnisse aus dem For-

schungsprojekt *SAFEBRIC TILE* [52] ab, bei denen die Versuchskörper mit einer minimalen und einer maximalen noch zulässigen Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  geschweißt wurden. Durch die Datengruppe *Mechanisierungsgrad* werden die voll- und teilmechanisiert geschweißten Versuchskörper erfasst. Die Datenbasis wird vervollständigt durch die Datengruppe *Verbindungstyp*, die sowohl Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe als auch Mischverbindungen enthält.

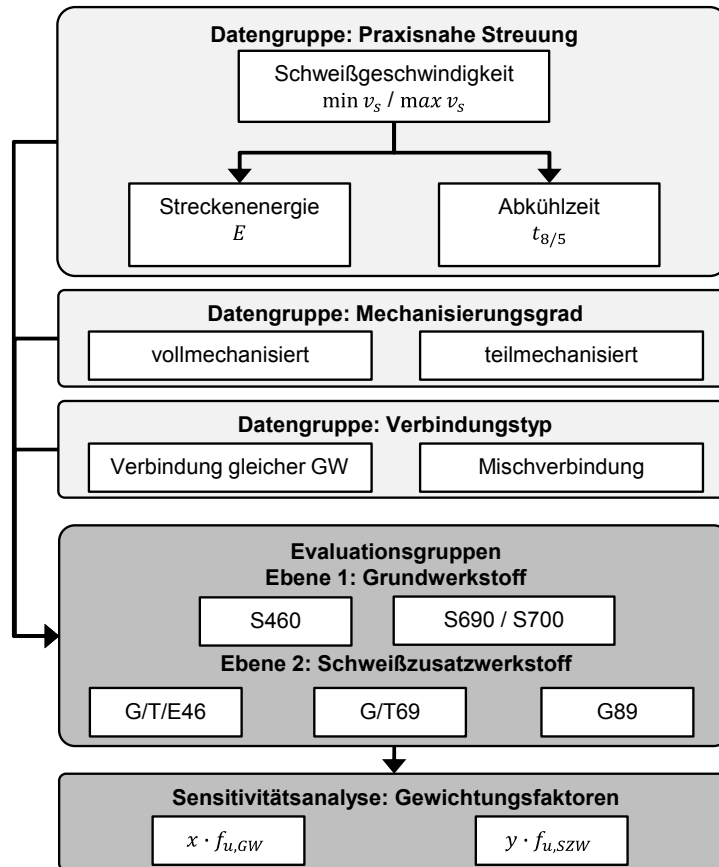


Abb. 11-13: Flussdiagramm: Sensitivitätsanalyse - Einfluss der Gewichtungsfaktoren

Die in Abb. 11-13 dargestellten Evaluationsgruppen repräsentieren die für die Sensitivitätsanalyse festgelegte Datenbasis. Dies bedeutet, dass auf der Ebene 1 alle zur Verfügung stehenden Versuchsergebnisse, bei denen als Grundwerkstoff die Stahlgüte S460 und S690 verwendet wurde, zusammengefasst wurden. Die somit in Ebene 1 verfügbaren zwei Gruppen der Grundwerkstoffe werden in Abhängigkeit der in Ebene 2 aufgeführten Schweißzusatzwerkstoffe ausgewertet und eine Sensitivitätsanalyse bezüglich den Gewichtungsfaktoren durchgeführt. In der Ebene 2 werden die drei in dieser Arbeit fokussierten Schweißzusatzwerkstoffe festgelegt. Das bedeutet, dass die Sensitivitätsanalyse jeweils für die drei Evaluationsgruppen des Schweißzusatzwerkstoffs durchgeführt wird.

Für den Grundwerkstoff S460 wurden die in Tab. 11-14 aufgeführten Werkstoffkombinatio-

nen zusammengefasst. Diese Gruppe beinhaltet sowohl Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe als auch Mischverbindungen. Für die Mischverbindungen galt für die Kategorisierung nach dem Grundwerkstoff als Auswahlkriterium der schwächere der beiden Grundwerkstoffe. Insgesamt stehen in Ebene 1 für den Grundwerkstoff S460 88 Versuchsergebnisse zur Verfügung.

Tab. 11-14: Datenbasis für die Evaluationsgruppe Ebene 1 - Grundwerkstoff S460

Kombination		Projekt/Literatur	Werkstoffkombination	Anzahl	GW	SZW
1.1 Matching n = 68	Verb. gl. GW	Saal [87]	S460/S460-T46	34	S460 ML	T46
		FOSTA P652	S460/S460-G/T/E46	20	S460 M/ML	G/E/T46
		FOSTA P812	S460/S460-G46	4	S460 ML	G46
		SAFEBRICKTILE	S460/S460-G46	2	S460 ML	G46
	Misch	FOSTA P652	S460/S690-G46	2	S460 M / S690 Q	G46
		SAFEBRICKTILE	S460/S690-G46	6	S460 ML / S690 QL	G46
1.2 Overmatching n = 12	Verb. gl. GW	FOSTA P652	S460/S460-G69	2	S460 M	G69
		SAFEBRICKTILE	S460/S460-G69	2	S460 ML	G69
	Misch	FOSTA P652	S460/S690-G69	2	S460 M / S690 Q	G69
		SAFEBRICKTILE	S460/S690-G69	6	S460 ML / S690 QL	G69
1.3 Overmatching n = 8	Verb. gl. GW	SAFEBRICKTILE	S460/S460-G89	2	S460 ML	G89
	Misch	SAFEBRICKTILE	S460/S690-G89	6	S460 ML / S690 QL	G89

Für die Evaluationsgruppe des Grundwerkstoffs S690 wurden dieselben Auswahlkriterien wie für den Grundwerkstoff S460 angewandt, so dass insgesamt 74 Versuchsergebnisse entsprechend Tab. 11-15 vorliegen.

Tab. 11-15: Datenbasis für die Evaluationsgruppe Ebene 1 - Grundwerkstoff S690

Kombination		Projekt/Literatur	Werkstoffkombination	Anzahl	GW	SZW
2.1 Undermatching n = 8	Verb. gl. GW	FOSTA P652	S690/S690-G46	1	S690 Q	G46
		FOSTA P812	S690/S690-G46	2	S690 Q	G46
		FOSTA P812	S700/S700-G46	3	S700 M	G46
		SAFEBRICKTILE	S690/S690-G46	2	S690 QL	G46
2.2 Matching n = 55	Verb. gl. GW	FOSTA P652	S690/S690-G/T/69	9	S690 Q/QL	G/T69
		Zusatzversuche	S690/S690-G69	4	S690 QL	G69
		FOSTA P812	S690/S690-G/T/69	16	S690 Q	G/T69
		FOSTA P812	S700/S700-G/T69	24	S700 M	G/T69
		SAFEBRICKTILE	S690/S690-G69	2	S690 QL	G69
2.3 Overmatching n = 11	Verb. gl. GW	Zusatzversuche	S690/S690-G89	4	S690 QL	G89
		FOSTA P812	S690/S690-G89	2	S690 Q	G89
		FOSTA P812	S700/S700-G89	3	S700 M	G89
		SAFEBRICKTILE	S690/S690-G89	2	S690 QL	G89

Für die Sensitivitätsanalyse bezüglich den Gewichtungsfaktoren wird als Bezugsgröße die Grenzs Schubspannung, entsprechend dem Bemessungsvorschlag von Rasche [84], gewählt. Hierzu ist in Tab. 11-16 für die jeweilig betrachtete Evaluationsgruppe die Grenzs Schubspannung  $\tau_{\parallel, Rd}$  angegeben.



Für die Berechnung der Grenzscherung sind die Nennwerte für die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs  $f_{u,GW}$  der Tab. 11-12 und die Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs  $f_{u,SZW}$  der Tab. 11-13 zu entnehmen.

Tab. 11-16: Kombinationen und Grenzscherungen nach Rasche

Grenzscherung nach Rasche [N/mm <sup>2</sup> ]	Kombi- nation	Ebene 1 GW	Ebene 2 SZW	$\beta_{w,SZW}$ [-]	$\tau_{  ,Rd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{  ,Rd} = \frac{0,25 \cdot f_{u,GW} + 0,75 \cdot f_{u,SZW}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,SZW} \cdot \gamma_{M2}}$	1.1	S460	G/T/E46	0,85	289,4
	1.2		G/T69	1,09	301,9
	1.3		G89	1,19	326,0
	2.1	S690/(S700)	G/T/E46	0,85	320,6
	2.2		G/T69	1,09	326,3
	2.3		G89	1,19	348,4

Für die Evaluationsgruppe der Ebene 1 wurden bei den Grundwerkstoffen die Stahlgüten S690 und S700 bei der Sensitivitätsanalyse zusammengefasst. Für den Vergleich der Grenzscherungen in Tab. 11-18 wurde die Grenzscherung  $\tau_{||,Rd}$  der Kombinationen 2.2 und 2.3 mit dem Nennwert der Zugfestigkeit der Stahlgüte S690 entsprechend Tab. 11-12 berechnet.

Bei der theoretischen Widerstandsfunktion nach Methode 2 (Scherung) handelt es sich um eine lineare Funktion, bei der die Gewichtungsfaktoren  $x$  und  $y$  die Anteile der Zugfestigkeiten von Grund- und Schweißzusatzwerkstoff darstellen. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse sollen die optimal angepassten Gewichtungsfaktoren erarbeitet werden. Hierfür werden zwei Optimierungsvarianten untersucht, die jeweils innerhalb jeder Evaluationsgruppe angewendet werden und in Tab. 11-17 dargestellt sind.

Tab. 11-17: Optimierungsvarianten innerhalb einer Evaluationsgruppe

Optimierungsvariante 1		Optimierungsvariante 2	
<b>Zielwert:</b> Mittelwertkorrektur	<b>Nebenbedingung:</b> Keine	<b>Zielwert:</b> Variationskoeffizient für die Streugröße $\delta$	<b>Nebenbedingung:</b> Mittelwertkorrektur
$b \stackrel{!}{=} 1,0$	-	$V_{\delta} \rightarrow \text{Minimum}$	$b \stackrel{!}{=} 1,0$

Das in Kapitel 10.4 beschriebene statistische Auswerteverfahren nach DIN EN 1990 Anhang D [6] wurde, inklusive der beiden Verfahren V1 und V2 nach Tab. 11-11 zur Ermittlung des Variationskoeffizienten  $V_{rt}^2$  der Basisvariablen  $X_j$  und der Standardabweichung  $Q$  der Widerstandsfunktion  $r_t$ , im Rahmen dieser Arbeit als Optimierungsalgorithmus programmiert. Hierbei bildet die Gleichung (11.10) die Zielfunktion und entspricht dem theoretischen Widerstand nach Methode 2 (Scherungen). Für den Optimierungsalgorithmus wurde für die Variante 1 als Zielwert die Mittelwertkorrektur  $b$  formuliert. Die Mittelwertabweichung bildet das Minimum der Abstandsquadrate und stellt als globaler Wert der betrachteten Gruppe ein Indikator für die Genauigkeit des Modells dar. Grafisch dargestellt entspricht die Mittelwertkorrektur einer Ausgleichsgeraden durch die experimentellen Messwerte  $r_{e,i}$ , die über die

modellbasierten Tragfähigkeiten  $r_{t,i}$  aufgetragen werden. Wenn das analytische Modell exakt wäre, ergäbe sich eine Mittelwertabweichung von  $b = 1,0$ . Dieser Wert ( $b = 1,0$ ) wird als Zielwert für den Optimierungsalgorithmus bei Variante 1 definiert.

Für die Variante 2 wird bei der Zielwertsuche der Variationskoeffizient  $V_\delta$  für die Streugröße  $\delta$  als Zielwert festgelegt. Im Rahmen des statistischen Auswerteverfahrens wird für jeden experimentellen Wert  $r_{e,i}$  des Widerstands die Streugröße  $\delta_i$  bestimmt, die die Modellunsicherheit des Bemessungsmodells beschreibt. Der Variationskoeffizient  $V_\delta$  gilt als ein Indikator für die Qualität der Widerstandsfunktion. Das bedeutet, je kleiner der Variationskoeffizient  $V_\delta$ , desto genauer beschreibt das theoretische Widerstandsmodell den experimentellen Widerstand und desto geringer die Abminderung durch den erforderlichen Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M2}$ . Als Zielwert für Variante 2 wird dementsprechend das Minimum des Variationskoeffizienten  $V_\delta$  für die Streugröße  $\delta$  definiert. Zusätzlich wird als Nebenbedingung die Mittelwertabweichung  $b = 1,0$  festgelegt.

Für die Sensitivitätsanalyse wurden folgende Variationskoeffizienten der Basisvariablen zugrunde gelegt:  $V_{f_{u,GW}} = 0,04$ ,  $V_{f_{u,SZW}} = 0,06$  und  $V_{A_{Bruch}} = 0,11$ .

In Tab. 11-18 sind als Ergebnisgrößen der einzelnen Gruppen (1.1-1 bis 2.3-2 nach Tab. 11-14 und Tab. 11-15) der Sensitivitätsanalyse jeweils der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$ , der entsprechende Korrelationsbeiwert  $\beta_{w,SZW}^{kl}$  (nach Kleiner) resultierend aus  $\gamma_M^*$  mit  $\gamma_{M,target} = 1,25$ , die zugehörige Grenzscherbspannung  $\tau_{\parallel,Rd}$  und der prozentuale Unterschied  $\Delta\tau_{\parallel,Rd}$  zwischen der Grenzscherbspannung nach Rasche (vgl. Tab. 11-16) und der berechneten Gruppe angegeben.

Tab. 11-18: Evaluationsergebnisse: Sensitivitätsanalyse - Einfluss der Gewichtungsfaktoren

Kombination- Opt.-Var.	Anzahl $n$	$x \cdot f_{u,GW}$	$y \cdot f_{u,SZW}$	Verfahren 1 (V1)							Verfahren 2 (V2)						
				$b$	$V_\delta$	$V_r$	$\gamma_M^*$	$\beta_{w,SZW}^{kl}$	$\tau_{\parallel,Rd}$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}$	$b$	$V_\delta$	$V_r$	$\gamma_M^*$	$\beta_{w,SZW}^{kl}$	$\tau_{\parallel,Rd}$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}$
				[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
1.1-1	68	<b>0,37</b>	<b>0,97</b>	1,0	6,84	0,148	1,38	1,10	299,8	<b>+3,6</b>	1,0	6,84	0,136	1,32	1,06	311,1	<b>+7,5</b>
1.1-2	68	<b>0,85</b>	<b>0,49</b>	1,0	6,61	0,147	1,36	1,09	304,5	<b>+5,2</b>	1,0	6,61	0,132	1,30	1,04	319,2	<b>+10,3</b>
1.2-1	12	0,29	0,81	1,0	7,79	0,153	1,56	1,25	288,3	-4,5	1,0	7,79	0,141	1,51	1,21	297,9	-1,3
1.2-2	12	1,38	0,00	1,0	7,79	0,153	1,45	1,16	296,7	-1,7	1,0	7,79	0,140	1,39	1,11	310,1	+2,7
1.3-1	8	0,24	0,73	1,0	9,58	0,163	1,72	1,38	273,0	-16,3	1,0	9,58	0,153	1,68	1,35	279,1	-14,4
1.3-2	8	0,24	0,73	1,0	9,58	0,163	1,72	1,38	273,0	-16,3	1,0	9,58	0,153	1,68	1,35	279,1	-14,4
2.1-1	8	0,38	0,87	1,0	9,08	0,160	1,61	1,29	269,9	-15,8	1,0	9,08	0,147	1,56	1,25	278,5	-13,1
2.1-2	8	0,99	0,00	1,0	8,84	0,158	1,64	1,31	268,8	-16,2	1,0	8,84	0,145	1,58	1,27	277,2	-13,5
2.2-1	55	<b>0,30</b>	<b>0,80</b>	1,0	7,32	0,151	1,50	1,20	326,0	<b>-0,1</b>	1,0	7,32	0,137	1,44	1,15	340,2	<b>+4,3</b>
2.2-2	55	<b>0,77</b>	<b>0,29</b>	1,0	6,98	0,149	1,46	1,17	322,2	<b>-1,2</b>	1,0	6,98	0,133	1,39	1,11	339,6	<b>+4,1</b>
2.3-1	11	0,27	0,78	1,0	5,23	0,142	1,48	1,19	365,3	+4,9	1,0	5,23	0,130	1,43	1,15	378,0	+8,5
2.3-2	11	0,53	0,56	1,0	5,10	0,141	1,47	1,17	368,9	+5,9	1,0	5,10	0,126	1,41	1,12	385,4	+10,6

Für Tab. 11-18 zeichnen sich zwei klare Tendenzen ab: Eine deutliche Differenzierung der Gewichtungsfaktoren für die Optimierungsvariante 1 und eine tendenziell wirtschaftlichere Grenzschubspannung für das Verfahren 2 im Vergleich zu Verfahren 1 und der Grenzschubspannung nach Rasche.

Die zusätzliche Nebenbedingung der Optimierungsvariante 2 führt zwar zu kleineren Variationskoeffizienten  $V_r$ , aber nicht zwangsläufig zu wirtschaftlicheren Grenzschubspannungen im Vergleich zur Optimierungsvariante 1. Die Optimierungsvariante 1 zeigt vor allem für die Gruppen 1.1-1 und 2.2-1 eine deutliche Differenzierung der Gewichtungsfaktoren, wobei der Schwerpunkt der Gewichtung bei der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs liegt. Zwar zeichnet sich für die restlichen Gruppen eine ähnliche Tendenz ab, jedoch sind diese Gruppen aufgrund ihrer geringen Anzahl weniger repräsentativ, zumal der Variationskoeffizient  $V_r$  sich auch stark abhebt. Auffallend ist, dass für die Optimierungsvariante 2 bzgl. den Gewichtungsfaktoren umgekehrte Verhältnisse ergeben. So liegt der Schwerpunkt bei den Gruppen 1.1-2 und 2.2-2 eher bei der Festigkeit des Grundwerkstoffs.

Schlussendlich lässt sich festhalten, dass aufgrund der linearen Verknüpfung der Gewichtungsfaktoren, diese sich zwar bestmöglich optimieren lassen, jedoch stark von der betrachteten Gruppe und deren Streuung abhängig sind. Einen Vergleich unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren zu den von Rasche [84] vorgeschlagenen Faktoren, die bei der Bemessung der Grenzschubspannung einer Flankenkehlnaht die Festigkeit des Grundwerkstoffs (25 %) und die des Schweißzusatzwerkstoffs (75 %) berücksichtigen, wird in Kapitel 11.8.3 ange stellt.

## 11.8 Ermittlung des Korrelationsbeiwerts

### 11.8.1 Evaluationsgruppe - Grundwerkstoff (Bemessungsmodell nach EC 3)

#### 11.8.1.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird die normative Tragfähigkeit für Flankenkehlnahtverbindungen nach DIN EN 1993-1-8 [9] für die Baustahlgüte S460 und nach DIN EN 1993-1-12 [11] für die Baustahlgüte S690 bestimmt. Auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Versuchsergebnisse wird ein Vergleich zu den bestehenden normativen Tragfähigkeiten hergestellt. Mit Hilfe des statistischen Auswerteverfahrens lassen sich neue Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,GW}$  herleiten, die abhängig vom Grundwerkstoff sind (Index GW). Daraus wird ein Vorschlag für das bestehende Bemessungsmodell nach DIN EN 1993-1-8 erarbeitet.

Der theoretische Widerstand der Flankenkehlnahtverbindungen berechnet sich im Rahmen des statistischen Auswerteverfahrens entsprechend Gleichung (11.11).

$$r_{t,i} = \frac{f_{u,GW,i}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,GW}^{KI}} \quad (11.11)$$

mit

$r_{t,i}$	Theoretischer Widerstand (Schubspannung)	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{u,GW,i}$	Zugfestigkeit des schwächeren Grundwerkstoffs (GW)	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\beta_{w,GW}^{KI}$	Angepasster Korrelationsbeiwert abhängig vom Grundwerkstoff (GW) nach Kleiner	[-]

Entsprechend DIN EN 1993-1-8 [9] Abschnitt 4.2 ist für die Wahl der Schweißzusätze folgende Bestimmung getroffen: „Die für das Schweißgut spezifizierten Werte der Streckgrenze, Bruchfestigkeit, Bruchdehnung und Mindestkerbschlagarbeit müssen in der Regel mindestens den spezifizierten Werten für den verschweißten Grundwerkstoff entsprechen.“ Das bedeutet, dass für diese Art von Kehlnahtverbindungen sowohl Matching- als auch Overmatchingverbindungen, jedoch keine Undermatchingverbindungen, zulässig sind.

In Abb. 11-14 sind die Datengruppen für die statistische Auswertung dargestellt. Hierbei wird die praxisnahe Streuung durch die beiden Schweißgeschwindigkeiten der Versuchsergebnisse aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRIC TILE* [52] repräsentiert. Außerdem werden sowohl voll- als auch teilmechanisiert geschweißte Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen herangezogen. Die statistische Auswertung erfolgt für die beiden Grundwerkstoffe S460 und S690. Als Ergebnis der statistischen Auswertung dieser beiden Serien wird der angepasste Korrelationsbeiwert  $\beta_{w,GW}^{KI}$  (nach Kleiner) in Bezug auf den Grundwerkstoff ermittelt.

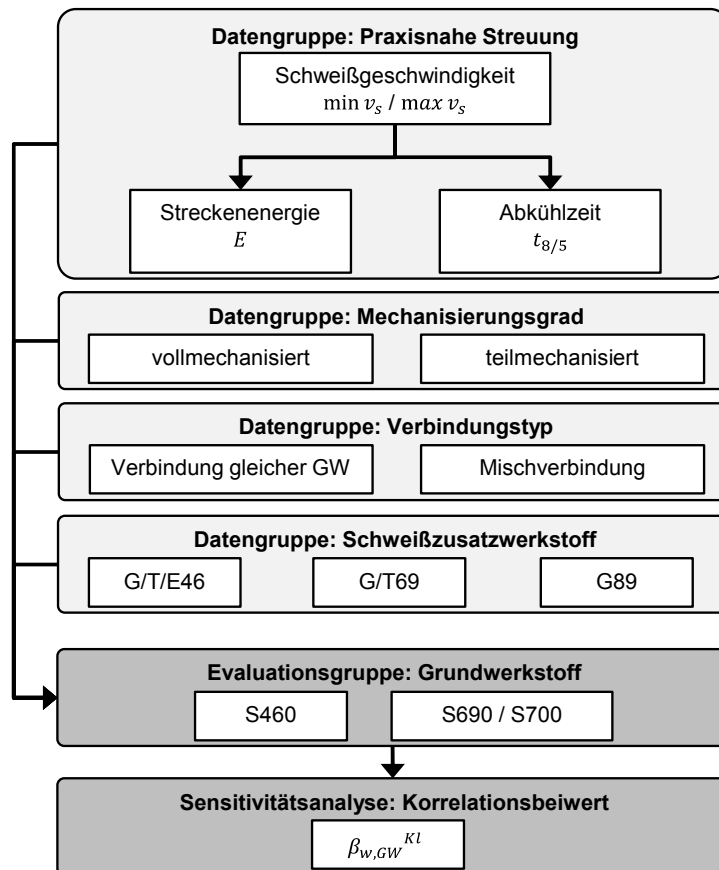


Abb. 11-14: Flussdiagramm - Evaluationsgruppe: Grundwerkstoff (Bemessungsmodell nach EC 3)

Für die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse in Bezug auf den Grundwerkstoff werden zwei Alternativen untersucht, die sich durch die Variationskoeffizienten der Basisvariablen unterscheiden. Bei Alternative 1 werden die in Kapitel 11.4 ermittelten Variationskoeffizienten der Basisvariablen  $V_{f_{u,GW}} = 0,04$ ,  $V_{f_{u,SZW}} = 0,06$  und  $V_{A_{Bruch}} = 0,11$  verwendet. Um einen Vergleich zur Auswertung von Rasche anzustellen, werden bei Alternative 2 die Variationskoeffizienten der Basisvariablen angesetzt, die Rasche in der Dissertation zugrunde gelegt hat. Dies sind im Einzelnen die Variationskoeffizienten  $V_{f_{u,GW}} = 0,07$ ,  $V_{f_{u,SZW}} = 0,07$  und  $V_{A_{Bruch}} = 0,10$ .

Weiterhin werden auf jede Alternative die beiden Verfahren (Verfahren 1 und Verfahren 2 nach Tab. 11-11 zur Differenzierung der Ermittlung des Variationskoeffizienten  $V_{r_t}^2$  der Basisvariablen  $X_j$  und der Standardabweichung  $Q$  der Widerstandsfunktion  $r_t$ ) angewendet.

## 11.8.1.2 Statistische Auswertung - Grundwerkstoff S460

**Versuchsergebnisse**

Tab. 11-19 fasst die zur Verfügung stehenden Versuchsergebnisse an Flankenkehlnähten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen für den Grundwerkstoff S460 zusammen. Hierbei werden nur Werkstoffkombinationen berücksichtigt, bei denen die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs mindestens den spezifizierten Werten des Grundwerkstoffs entsprechen. Bei Mischverbindungen bezieht sich diese Definition immer auf den schwächeren Grundwerkstoff. Es stehen insgesamt 66 Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und 22 Mischverbindungen für den Grundwerkstoff S460 zur Verfügung.

Tab. 11-19: Versuche an Flankenkehlnähten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen - Grundwerkstoff S460

Verbindungstyp		Projekt/Literatur	Werkstoffkombination	Anzahl	GW	SZW
Verb. gl. GW n = 66	Matching n = 60	Saal [87]	S460/S460-T46	34	S460 ML	T46
		FOSTA P652	S460/S460-G/T/E46	20	S460 M/ML	G/E/T46
		FOSTA P812	S460/S460-G46	4	S460 ML	G46
		SAFEBRICTILE	S460/S460-G46	2	S460 ML	G46
	Overmatching n = 4	FOSTA P652	S460/S460-G69	2	S460 M	G69
		SAFEBRICTILE	S460/S460-G69	2	S460 ML	G69
	Overmatching n = 2	SAFEBRICTILE	S460/S460-G89	2	S460 ML	G89
Misch n = 22	Matching n = 8	FOSTA P652	S460/S690-G46	2	S460 M / S690 Q	G46
		SAFEBRICTILE	S460/S690-G46	6	S460 ML / S690 QL	G46
	Overmatching n = 8	FOSTA P652	S460/S690-G69	2	S460 M / S690 Q	G69
		SAFEBRICTILE	S460/S690-G69	6	S460 ML / S690 QL	G69
	Overmatching n = 6	SAFEBRICTILE	S460/S690-G89	6	S460 ML / S690 QL	G89

**Evaluationsergebnisse**

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung für die beiden Verfahren sind in Tab. 11-20 aufgeführt.

Tab. 11-20: Statistische Auswertung bzgl. Grundwerkstoff: S460

Alternative	Anzahl n	Verfahren 1 (V1)									Verfahren 2 (V2)					
		$V_{f,u,GW}$	$V_{f,u,SZW}$	$V_{A,Bruch}$	$b$	$V_{\delta}$	$V_r$	$\gamma_M^*$	$\beta_{w,GW}^{KL}$	$\tau_{  ,R,d}$	$b$	$V_{\delta}$	$V_r$	$\gamma_M^*$	$\beta_{w,GW}^{KL}$	$\tau_{  ,R,d}$
		[%]	[%]	[%]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]
1	88	4	6	11	1,36	7,39	0,151	1,01	<b>0,81</b>	307,9	1,36	7,39	0,137	0,97	<b>0,77</b>	323,9
2	88	7	7	10	1,36	7,39	0,159	1,03	0,83	300,5	1,36	7,39	0,130	0,94	0,75	332,6

Mit einer verhältnismäßig großen Mittelwertkorrektur  $b = 1,36$  und einem Variationskoeffizienten  $V_{\delta} = 7,39\%$  für das Streumaß  $\delta$  verdeutlicht Tab. 11-20 anschaulich, dass das Ver-

fahren 2 bei gleichzeitig geringerem Variationskoeffizienten  $V_r$ , wirtschaftlichere Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,GW}^{Kl}$  liefert. Die Auswertung der Alternative 2 mit dem Verfahren 1 kommt mit einem Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,GW}^{Kl} = 0,83$  dem Korrelationsbeiwert nach Rasche [84]  $\beta_{w,GW}^{Ra} = 0,85$  sehr nahe.

In Tab. 11-21 sind die Grenzs Schubspannungen  $\tau_{\parallel,Rd}$  und die zugehörigen Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,GW}$  nach DIN EN 1993-1-8 [9], DIN EN 1993-1-8/NA [10] und Rasche [84] angegeben. Für die Berechnung der Grenzs Schubspannung sind die Nennwerte für die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs  $f_{u,GW}$  der Tab. 11-12 zu entnehmen.

Tab. 11-21: Grenzs Schubspannungen: Grundwerkstoff S460 N/NL bzw. S460 M/ML

Grenzs Schubspannung	Alternative	DIN EN 1993-1-8 [9]				DIN EN 1993-1-8/NA [10]				Rasche [84]			
		$\beta_{w,GW}$	$\tau_{\parallel,Rd}$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\beta_{w,GW}$	$\tau_{\parallel,Rd}$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\beta_{w,GW}^{Ra}$	$\tau_{\parallel,Rd}$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V2)$
[N/mm <sup>2</sup> ]		[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]
$\tau_{\parallel,Rd} = \frac{f_{u,GW}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,GW} \cdot \gamma_{M2}}$	$\frac{1}{2}$	1,00	249,4	+23,5	+29,9	0,85	293,4	+4,9	<b>+10,4</b>	0,85	293,4	+4,9	<b>+10,4</b>
				+20,5	+33,3			+2,4	+13,3			+2,4	+13,3

Durch die erweiterte Datenbasis zeigt sich eine durchweg wirtschaftlichere Bemessung der Flankenkehlnahtverbindungen. Beispielsweise würde sich für die Alternative 1 unter Berücksichtigung des Verfahrens 2 und einem Korrelationsbeiwerte von  $\beta_{w,GW}^{Kl} = 0,77$  eine um ca. 10,4 % höhere Grenzs Schubspannung ergeben, verglichen mit dem von Rasche vorgeschlagenen Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,GW}^{Ra} = 0,85$ .

## 11.8.1.3 Statistische Auswertung - Grundwerkstoff S690/S700

**Versuchsergebnisse**

Für die statistische Auswertung mit dem Grundwerkstoff S690/S700 stehen entsprechend Tab. 11-22 insgesamt 66 Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe zur Verfügung.

Tab. 11-22: Versuche an Flankenkehlnähten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe  
- Grundwerkstoff S690/S700

Verbindungstyp		Projekt / Literatur	Werkstoffkombination	Anzahl	GW	SZW
Verb. gl. GW n = 66	Matching n = 55	FOSTA P652	S690/S690-G/T/69	9	S690 Q/QL	G/T69
		Zusatzversuche	S690/S690-G69	4	S690 QL	G69
		FOSTA P812	S690/S690-G/T/69	16	S690 Q	G/T69
		FOSTA P812	S700/S700-G/T69	24	S700 M	G/T69
		SAFEBRIC TILE	S690/S690-G69	2	S690 QL	G69
	Overmatching n = 11	Zusatzversuche	S690/S690-G89	4	S690 QL	G89
		FOSTA P812	S690/S690-G89	2	S690 Q	G89
		FOSTA P812	S700/S700-G89	3	S700 M	G89
		SAFEBRIC TILE	S690/S690-G89	2	S690 QL	G89

Sowohl Matching- als auch Overmatchingverbindungen werden berücksichtigt, wobei die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs mindestens den spezifizierten Werten des Grundwerkstoffs entsprechen.

**Evaluationsergebnisse**

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung für die beiden Verfahren 1 und 2 sind in Tab. 11-23 dargestellt. Für die Berechnung der Bemessungsgrenzspannung  $\tau_{\parallel,Rd}$  in Tab. 11-23 wird für die Zugfestigkeit  $f_{u,GW}$  des Grundwerkstoffs der Nennwert (770 N/mm<sup>2</sup>) der Baustahlgüte S690 Q/QL/QL1 entsprechend Tab. 11-12 angesetzt.

Tab. 11-23: Statistische Auswertung bzgl. Grundwerkstoff S690/S700

Alternative	Anzahl n				Verfahren 1 (V1)						Verfahren 2 (V2)					
		$V_{f_{u,GW}}$	$V_{f_{u,SZW}}$	$V_{A_{Bruch}}$	b	$V_{\delta}$	$V_r$	$\gamma_M^*$	$\beta_{w,GW}^{KL}$	$\tau_{\parallel,Rd}$	b	$V_{\delta}$	$V_r$	$\gamma_M^*$	$\beta_{w,GW}^{KL}$	$\tau_{\parallel,Rd}$
		[%]	[%]	[%]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]
1	66	4	6	11	1,06	8,55	0,157	1,40	<b>1,12</b>	317,5	1,06	8,55	0,143	1,34	<b>1,07</b>	332,4
2	66	7	7	10	1,06	8,55	0,165	1,43	1,15	309,3	1,06	8,55	0,136	1,31	1,05	338,7

Wie bereits für die Evaluationsgruppe S460 gemäß Tab. 11-20 ergeben sich auch für den Grundwerkstoff S690/S700 in Tab. 11-23 wirtschaftlichere Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,GW}^{KL}$  für das Verfahren 2 bei gleichzeitig geringerem Variationskoeffizienten  $V_r$  gegenüber Verfahren 1. Zwar zeigt sich für die Evaluationsgruppe S690/S700 eine geringere Mittelwertkorrektur  $b = 1,06$ , jedoch einen größeren Variationskoeffizienten  $V_{\delta} = 8,55\%$  für das Streumaß  $\delta$



gegenüber der Evaluationsgruppe S460. Diese Tatsache lässt darauf schließen, dass die Evaluationsgruppe S690/S700 eine größere Streuung besitzt. In Tab. 11-24 sind die Grenzschubspannungen  $\tau_{\parallel,Rd}$  und die zugehörigen Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,GW}$  nach DIN EN 1993-1-12 [11], DIN EN 1993-1-12/NA [12] und Rasche [84] angegeben.

Tab. 11-24: Grenzschubspannungen: Grundwerkstoff S690 Q/QL/QL1

Grenzschubspannung	Alternative	DIN EN 1993-1-12 [11]				DIN EN 1993-1-12/NA [12]				Rasche [84]			
		$\beta_{w,GW}$	$\tau_{\parallel,Rd}$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\beta_{w,GW}$	$\tau_{\parallel,Rd}$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\beta_{w,GW}^{Ra}$	$\tau_{\parallel,Rd}$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V2)$
$[N/mm^2]$		$[-]$	$[N/mm^2]$	$[\%]$	$[\%]$	$[-]$	$[N/mm^2]$	$[\%]$	$[\%]$	$[-]$	$[N/mm^2]$	$[\%]$	$[\%]$
$\tau_{\parallel,Rd} = \frac{f_{u,GW}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,GW} \cdot \gamma_{M2}}$	1 2	1,00	355,6	-10,7 -13,0	-6,5 -4,8	1,20	296,4	+7,1 +4,3	<b>+12,1</b> <b>+14,3</b>	1,10	323,3	-1,8 -4,3	<b>+2,8</b> <b>+4,8</b>

Tab. 11-24 zeigt eindrucksvoll, dass eine Bestimmung der Grenzschubspannungen mit dem derzeitigen Korrelationsbeiwert nach DIN EN 1993-1-12 [11] *nicht konservative* Werte liefert. Durch die erweiterte Datenbasis ergeben sich mit einem Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,GW}^{Kl} = 1,07$  basierend auf Alternative 1 unter Berücksichtigung des Verfahrens 2 eine um ca. 12,1 % im Vergleich zu DIN EN 1993-1-12/NA [12] und eine um ca. 2,8 % höhere Grenzschubspannung im Vergleich zu dem von Rasche vorgeschlagenen Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,GW}^{Ra} = 1,10$ .

11.8.1.4 Zusammenfassung der Evaluationsergebnisse

Auf Grundlage der in Kapitel 11.4 statistisch neu ermittelten Variationskoeffizienten der Basisvariablen (Alternative 1) und der modifizierten Vorgehensweise (Verfahren 2) zur statistischen Auswertung von Versuchsergebnissen ergeben sich die in Tab. 11-25 aufgeführten Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,GW}^{KI}$  abhängig vom Grundwerkstoff.

Tab. 11-25: Bemessungsvorschlag für Flankenkehlnahtverbindungen nach DIN EN 1993-1-8 und DIN EN 1993-1-12

Bemessungsgleichung für Flankenkehlnahtverbindungen	Stahlgüte	Korrelationsbeiwert $\beta_{w,GW}^{KI}$ [-]
$\tau_{  ,Rd} = \frac{f_{u,GW}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,GW} \cdot \gamma_{M2}}$	S460 N/NL; S460 M/ML	0,77
	S690 Q/QL/QL1	1,07

In Abb. 11-15 sind die Versuchsergebnisse im Vergleich zu den Grenzs Schubspannungen nach DIN EN 1993-1-8/-12, nach DIN EN 1993-1-8/-12-NA und nach dem Bemessungsvorschlag von Rasche [84] dargestellt.

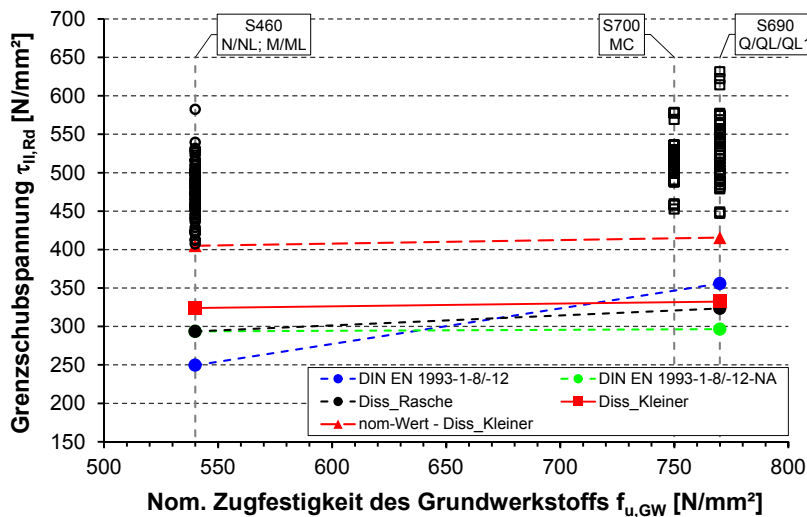


Abb. 11-15: Bemessungsvorschlag im Vergleich zu den Versuchsergebnissen und bestehenden Bemessungsmodellen

Die Versuchsergebnisse sind auf der Abszissenachse nach der nominellen Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs sortiert. Zusätzlich zu den Bemessungsgrenzs Schubspannungen ist die nominelle Schubspannung nach dem Bemessungsvorschlag von Kleiner entsprechend Tab. 11-25 aufgeführt. Der Abstand zwischen der nominellen Schubspannung und der Bemessungsgrenzs Schubspannung entspricht dem geforderten Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

Es zeigt sich, dass der Abstand zwischen den Versuchsergebnissen und den nominellen Schubspannungen respektive den Bemessungsgrenzs Schubspannungen für die Evaluationsgruppen S460 geringer als für die Evaluationsgruppe S690/S700 ist. Dies ist darin begründet, dass der Variationskoeffizient  $V_{\delta}$  und dementsprechend die Streuung der Versuchser-

gebnisse für die Evaluationsgruppe S460 mit 7,39 % (vgl. Tab. 11-20) geringer ist als gegenüber der Streuung der Evaluationsgruppe S690/S700 mit einem Variationskoeffizienten von  $V_\delta = 8,55 \%$ . Weiterhin veranschaulicht Abb. 11-15 den wirtschaftlicheren Ansatz der in Tab. 11-25 vorgeschlagen Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,GW}^{Kl}$  nach Kleiner gegenüber den bestehenden Bemessungsmodellen.

## 11.8.2 Evaluationsgruppe - Schweißzusatzwerkstoff (Bemessungsmodell nach EC 3)

### 11.8.2.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird die normative Tragfähigkeit für Flankenkehlnahtverbindungen in einer modifizierten Form des Bemessungsmodells nach DIN EN 1993-1-8 [9] bestimmt. Das Bemessungsmodell sieht bislang vor, dass nur die Festigkeit des Grundwerkstoffs berücksichtigt wird (vgl. Gleichung (11.11)). Rasche hat in ihrer Dissertation [84] ein Bemessungsmodell vorgeschlagen, das die Festigkeit des Grundwerkstoffs mit einem Gewichtungsfaktor von 0,25 (25 %) und die des Schweißzusatzwerkstoffs mit einem Gewichtungsfaktor von 0,75 (75 %) berücksichtigt. Als Vergleich dazu, soll ein abgewandelter Bemessungsansatz untersucht werden, der ausschließlich die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs berücksichtigt.

Mit Hilfe des statistischen Auswerteverfahrens lassen sich auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Versuchsergebnisse angepasste Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,SZW}^*$  herleiten, die ausschließlich abhängig vom Schweißzusatzwerkstoff sind.

Der theoretische Widerstand der Flankenkehlnahtverbindungen berechnet sich im Rahmen des statistischen Auswerteverfahrens entsprechend Gleichung (11.12).

$$r_{t,i} = \frac{f_{u,SZW,i}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,SZW}^*} \quad (11.12)$$

mit

$r_{t,i}$	Theoretischer Widerstand (Schubspannung)	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{u,SZW,i}$	Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\beta_{w,SZW}^*$	Angepasster Korrelationsbeiwert abhängig vom Schweißzusatzwerkstoff (SZW) nach Kleiner	[-]

Dieses Modell stellt einen völlig neuen Ansatz zur Bemessung von Flankenkehlnahtverbindungen dar. Der Gedanke, ausschließlich die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs zu berücksichtigen, soll vielmehr veranschaulichen, in wieweit dieser neue Ansatz vom Bemessungsansatz nach Rasche [84] abweicht. Möglicherweise bietet dieser Ansatz eine Alternative zu den bisherigen Bemessungsmodellen.

## 11.8.2.2 Statistische Auswertung - Schweißzusatzwerkstoffe mit Kennziffer 46, 69 und 89

**Versuchsergebnisse**

Für die statistische Auswertung wurden nur Matching- und Overmatchingverbindungen mit den Grundwerkstoffen S460 und S690/S700 berücksichtigt. Insgesamt standen 68 Versuchsergebnisse für den Schweißzusatzwerkstoff G/T/E46, 67 Versuche für den Schweißzusatzwerkstoff G/T69 und 19 Versuche des Schweißzusatzwerkstoffs G89 zur Verfügung. Hierbei wurden sowohl Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe als auch Mischverbindungen berücksichtigt. (vgl. Tab. 11-26)

Tab. 11-26: Versuche an Flankenkehlnähten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen

Verbindungstyp			Projekt/ Literatur	Werkstoff- kombination	An- zahl	GW	SZW
G/T/E46	Verb. gl. GW n = 60	Matching n = 60	Saal [87]	S460/S460-T46	34	S460 ML	T46
			FOSTA P652	S460/S460-G/T/E46	20	S460 M/ML	G/T/E46
			FOSTA P812	S460/S460-G46	4	S460 ML	G46
			SAFEBRIC TILE	S460/S460-G46	2	S460 ML	G46
	Misch n = 8	Matching n = 8	FOSTA P652	S460/S690-G46	2	S460 M / S690 Q	G46
			SAFEBRIC TILE	S460/S690-G46	6	S460 ML / S690 QL	G46
G/T69	Verb. gl. GW n = 59	Matching n = 55	FOSTA P652	S690/S690-G/T/69	9	S690 Q/QL	G/T69
			Zusatzversuche	S690/S690-G69	4	S690 QL	G69
			FOSTA P812	S690/S690-G/T/69	16	S690 Q	G/T69
			FOSTA P812	S700/S700-G/T69	24	S700 M	G/T69
			SAFEBRIC TILE	S690/S690-G69	2	S690 QL	G69
			Over- matching n = 4	Over- matching n = 4	FOSTA P652	S460/S460-G69	2
	SAFEBRIC TILE	S460/S460-G69			2	S460 ML	G69
	Misch n = 8	Over- matching n = 8	FOSTA P652	S460/S690-G69	2	S460 M / S690 Q	G69
			SAFEBRIC TILE	S460/S690-G69	6	S460 ML / S690 QL	G69
	G89	Verb. gl. GW n = 13	Over- matching n = 13	Zusatzversuche	S690/S690-G89	4	S690 QL
FOSTA P812				S690/S690-G89	2	S690 Q	G89
FOSTA P812				S700/S700-G89	3	S700 M	G89
SAFEBRIC TILE				S460/S460-G89	2	S460 ML	G89
SAFEBRIC TILE				S690/S690-G89	2	S690 QL	G89
Misch n = 6		Over- matching n = 6	SAFEBRIC TILE	S460/S690-G89	6	S460 ML / S690 QL	G89

**Evaluationsergebnisse**

Die statistische Auswertung wurde mit folgenden Variationskoeffizienten für die Basisvariablen durchgeführt:  $V_{f_{u,GW}} = 0,04$ ,  $V_{f_{u,SZW}} = 0,06$  und  $V_{A_{Bruch}} = 0,11$ . Die Ergebnisse der statistischen Auswertung für die beiden Verfahren 1 und 2 sind in Tab. 11-27 dargestellt. Für die Berechnung der Bemessungsgrenzspannung  $\tau_{\parallel,Rd}$  wird für die Zugfestigkeit  $f_{u,SZW}$  des Schweißzusatzwerkstoffs der Nennwert entsprechend Tab. 11-13 angesetzt.

Tab. 11-27: Ergebnisse der statistischen Auswertung bzgl. SZW

SZW	Anzahl $n$	Verfahren 1 (V1)						Verfahren 2 (V2)					
		$b$	$V_{\delta}$	$V_r$	$\gamma_M^*$	$\beta_{w,SZW}^*$	$\tau_{\parallel,Rd}$	$b$	$V_{\delta}$	$V_r$	$\gamma_M^*$	$\beta_{w,SZW}^*$	$\tau_{\parallel,Rd}$
		[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]
G/T/E46	68	1,33	7,30	0,150	1,05	0,84	291,4	1,33	7,30	0,143	1,02	<b>0,82</b>	298,5
G/T69	67	1,10	8,46	0,156	1,40	1,12	317,5	1,10	8,46	0,148	1,36	<b>1,09</b>	326,3
G89	19	0,96	10,35	0,167	1,73	1,38	314,6	0,96	10,35	0,161	1,70	<b>1,36</b>	319,2

Neben der Anzahl  $n$  der betrachteten Gruppe ist in Tab. 11-27 die Mittelwertkorrektur  $b$ , der Variationskoeffizient  $V_{\delta}$  für das Streumaß  $\delta$ , der Variationskoeffizient  $V_r$ , der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$ , der hierzu angepasste Korrelationsbeiwert  $\beta_{w,SZW}^*$  und die dazu korrespondierende Bemessungsgrenzspannung  $\tau_{\parallel,Rd}$  gegeben. Bis auf die Schweißzusatzwerkstoffgruppe G89 befinden sich die Streuungen in einer akzeptablen Größenordnung. Jedoch zeigt sich am Beispiel des Variationskoeffizienten  $V_{\delta} = 10,35\%$  für die Schweißzusatzwerkstoffgruppe G89, dass sich eine relativ große Modellunsicherheit im Variationskoeffizienten  $V_r$  niederschlägt und letztendlich in einen relativ großen Korrelationsbeiwert  $\beta_{w,SZW}^* = 1,36$  mündet.

In Tab. 11-28 ist ein Vergleich der Grenzscherbspannungen nach dem modifizierten Bemessungsmodell nach Rasche [84], der sowohl die Festigkeit des Grund- als auch des Schweißzusatzwerkstoffs berücksichtigt und dem in diesem Kapitel untersuchten neuen Bemessungsansatz mit ausschließlicher Berücksichtigung der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs dargestellt. Es sind jeweils die prozentualen Unterschiede für die beiden Verfahren V1 und V2 angegeben.

Tab. 11-28: Vergleich der Grenzscherbspannungen

Grenzscherbspannung	Variante	Rasche [84] GW: S460 N/NL; M/ML			Rasche [84] GW: S690 Q/QL/QL1		
		$\tau_{\parallel,Rd,Rasche}$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\tau_{\parallel,Rd,Rasche}$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V2)$
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]
$\tau_{\parallel,Rd,Rasche} = \frac{0,25 \cdot f_{u,GW} + 0,75 \cdot f_{u,SZW}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,SZW} \cdot \gamma_{M2}}$	G46	289,4	+0,7	+3,2	320,6	-9,1	-6,9
	G69	301,9	+5,2	+8,1	326,3	-2,7	±0,0
	G89	326,0	-3,5	-2,1	348,4	-9,7	-8,4

Abb. 11-16 zeigt eindrucksvoll in Kombination mit Tab. 11-28, dass ein Bemessungsansatz für Flankenkehlnahtverbindungen, der ausschließlich die Festigkeit  $f_{u,SZW}$  des Schweißzusatzwerkstoffs berücksichtigt, keinesfalls abwegig ist.

Für die Schweißzusatzwerkstoffgruppe G/T69 ergibt sich bspw. eine identische Bemessungsgrenzspannung wie beim Bemessungsansatz nach Rasche [84] unter Berücksichtigung eines Grundwerkstoffs der Güte S690.

Tab. 11-28 zeigt weiterhin, dass sowohl für Verfahren V1 als auch V2 keine größeren Unterschiede als 10 % zwischen den beiden Bemessungsansätzen liegen.

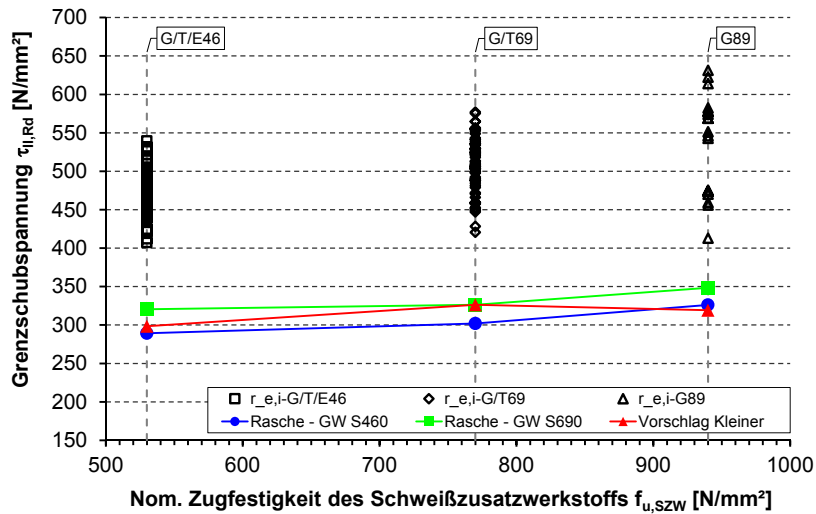


Abb. 11-16: Vorschlag eines Bemessungsmodells ausschließlich abhängig vom Schweißzusatzwerkstoff im Vergleich zu den Versuchsergebnissen und dem Bemessungsmodell nach Rasche [84]

Auf Grundlage der in dieser Arbeit statistisch ermittelten Variationskoeffizienten der Basisvariablen und der modifizierten Vorgehensweise (Verfahren 2) zur statistischen Auswertung von Versuchsergebnissen ergibt sich der in Tab. 11-29 dargestellte Bemessungsvorschlag unter ausschließlicher Berücksichtigung der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs.

Tab. 11-29: Bemessungsvorschlag für Flankenkehlnahtverbindungen bei ausschließlicher Berücksichtigung des Schweißzusatzwerkstoffs

Bemessungsgleichung für Flankenkehlnahtverbindungen	Schweißzusatzwerkstoff	Korrelationsbeiwert $\beta_{w,SZW}^*$ [-]
$\tau_{  ,Rd} = \frac{f_{u,SZW}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,SZW}^* \cdot \gamma_{M2}}$	G/T/E46	0,82
	G/T/69	1,09
	G89	1,36

Abb. 11-16 veranschaulicht deutlich, dass dieser modifizierte Ansatz eine Alternative zu dem Bemessungsmodell nach Rasche [84] darstellt.

### 11.8.3 Evaluationsgruppe - Schweißzusatzwerkstoff (Bemessungsmodell nach Rasche)

#### 11.8.3.1 Allgemeines

Dieses Kapitel befasst sich mit der statistischen Auswertung der Tragfähigkeit von Flankenkehlnahtverbindungen in Abhängigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs. Das Bemessungsmodell des theoretischen Widerstands berücksichtigt mit Gewichtungsfaktoren sowohl die Festigkeit des Grund- als auch des Schweißzusatzwerkstoffs. Abb. 11-17 zeigt in einem Flussdiagramm die für die Auswertung zur Verfügung stehenden Datengruppen und die Evaluationsgruppe.

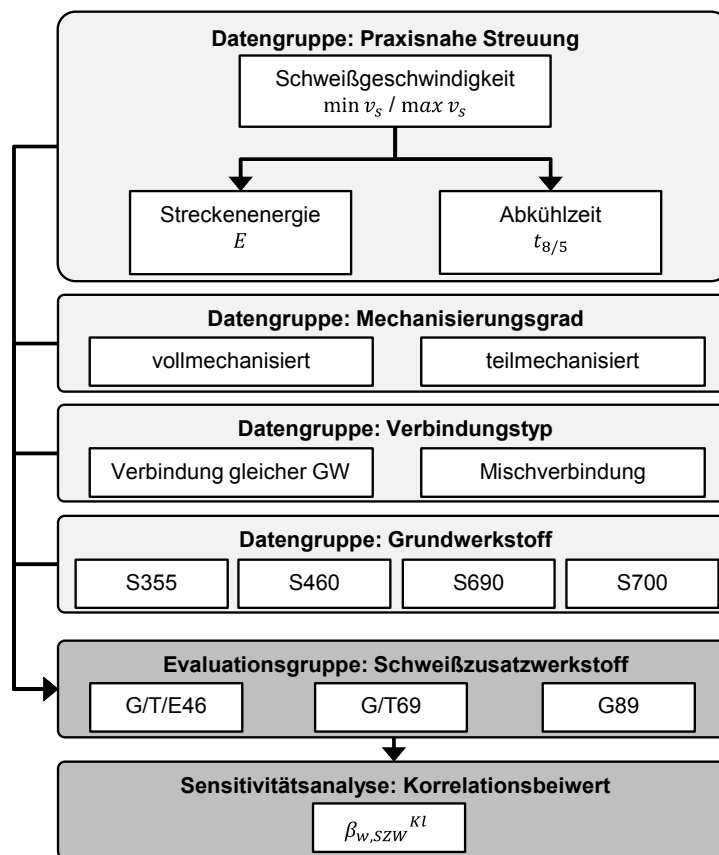


Abb. 11-17: Flussdiagramm - Evaluationsgruppe: Schweißzusatzwerkstoff  
(Bemessungsmodell nach Rasche)

Durch die Variation der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  ergeben sich unterschiedliche Streckenenergien  $E$  und Abkühlzeiten  $t_{8/5}$ , so dass dadurch eine praxisnahe Streuung erzeugt wird, die einer praxisüblichen Schweißnahtherstellung nahe kommt. Als weitere Datengruppen für die statistische Auswertung werden voll- und teilmechanisiert geschweißte Flankenkehlnähte, sowohl als Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe als auch Mischverbindungen herangezogen. Die Bemessung einer Flankenkehlnahtverbindung in Abhängigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs erlaubt die Betrachtung von Versuchsergebnissen mit Grundwerkstoffen unterschiedlicher Festigkeiten. Als Grundwerkstoffe werden Baustahlgüten S355, S460, S690 und S700 berücksichtigt.



Die Versuchsergebnisse mit nominell gleicher Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs werden gemeinsam statistisch ausgewertet und im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse jeweils der Korrelationsbeiwert  $\beta_{w,SZW}^{Kl}$  (nach Kleiner) ermittelt. Es werden sowohl Under-, Matching- als auch Overmatchingverbindungen berücksichtigt.

Die Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung des Korrelationsbeiwerts  $\beta_{w,SZW}^{Kl}$  wird für unterschiedliche Alternativen durchgeführt. Tab. 11-30 gibt einen Überblick über die sechs untersuchten Alternativen und den dabei verwendeten Variationskoeffizienten der Basisvariablen. Zusätzlich sind die verwendeten Versuchsergebnisse und das Ziel der Sensitivitätsanalyse und einer eventuell angewandten Optimierungsvariante mit angegeben.

Tab. 11-30: Untersuchte Alternativen

Alternative	$V_{f_u,GW}$ [%]	$V_{f_u,SZW}$ [%]	$V_{A_{Bruch}}$ [%]	Verwendete Versuchsergebnisse	Ziel   Optimierungsvariante
1.1	4	6	11	SAFEBRICTILE (Tab. 11-2)	Verifikation $\beta_{w,SZW}^{Ra}$   -
1.2					Ermittlung $\beta_{w,SZW}^{Kl}$   -
2	7	7	10	Dissertation Rasche (Tab. 11-1)	Ermittlung $\beta_{w,SZW}^{Kl}$   -
3	4	6	11	SAFEBRICTILE & Dissertation Rasche	Ermittlung $\beta_{w,SZW}^{Kl}$   -
4	7	7	10	SAFEBRICTILE & Dissertation Rasche	Ermittlung $\beta_{w,SZW}^{Kl}$   -
5	4	6	11	SAFEBRICTILE & Dissertation Rasche	Ermittlung $\beta_{w,SZW}^{Kl}$   Opt.-Var. 1
6	4	6	11	SAFEBRICTILE & Dissertation Rasche	Ermittlung $\beta_{w,SZW}^{Kl}$   Opt.-Var. 2

Alternative 1 gliedert sich in zwei separate Auswertungen, wobei jeweils ausschließlich die aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRICTILE* [52] stammenden Versuchsergebnisse verwendet werden. Bei Alternative 1.1 wird der theoretische Widerstand  $r_{t,i}$  eines jeden einzelnen Versuchs mit dem von Rasche [84] hergeleiteten Korrelationsbeiwert  $\beta_{w,SZW}^{Ra}$  nach Tab. 5-2 bestimmt und anhand des Teilsicherheitsbeiwerts  $\gamma_M^*$  überprüft, inwieweit das geforderte Sicherheitsniveau von  $\gamma_{M,target} = 1,25$  erreicht ist. Die Alternativen 1.2 bis 6 verfolgen das Ziel einen neuen Korrelationsbeiwert  $\beta_{w,SZW}^{Kl}$  (nach Kleiner) für die betrachtete Schweißzusatzwerkstoffgruppe herzuleiten. Dementsprechend wird der theoretische Widerstand  $r_{t,i}$  für jeden Versuch ohne einen (Eingangs-) Korrelationsbeiwert  $\beta_{w,SZW}$  berechnet. Sowohl Alternative 1.1 als auch Alternative 1.2 berücksichtigen die in dieser Arbeit statistisch ermittelten Variationskoeffizienten der Basisvariablen nach Kapitel 11.4.

Alternative 2 basiert auf den Versuchsergebnissen und den Variationskoeffizienten der Basisvariablen aus der Dissertation von Rasche [84]. Für Alternative 3 und 4 werden die Versuche aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRICTILE* [52] und der Dissertation von Rasche [84] zusammengefasst und mit den Variationskoeffizienten nach Kleiner (Alternative 3) und nach Rasche (Alternative 4) ausgewertet.

Bei Alternative 5 und 6 werden ebenfalls alle zur Verfügung stehenden Versuchsergebnisse herangezogen und jeweils mit zwei unterschiedlichen Optimierungsvarianten statistisch ausgewertet. Bei der theoretischen Widerstandsfunktion handelt es sich um eine lineare Funktion, bei der die Gewichtungsfaktoren  $x$  und  $y$  die Anteile der Zugfestigkeiten von Grund- und Schweißzusatzwerkstoff darstellen und mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus die optimal angepassten Gewichtungsfaktoren erarbeitet werden.

Als Variante 1 des Optimierungsalgorithmus wurde als Zielwert die Mittelwertkorrektur  $b$  formuliert. Die Mittelwertabweichung bildet das Minimum der Abstandsquadrate und stellt als globaler Wert der betrachteten Gruppe ein Indikator für die Genauigkeit des Modells dar. Grafisch dargestellt entspricht die Mittelwertkorrektur einer Ausgleichsgeraden durch die experimentellen Messwerte  $r_{e,i}$ , die über die modellbasierenden Tragfähigkeiten  $r_{t,i}$  aufgetragen werden. Wenn das analytische Modell exakt wäre, ergäbe sich eine Mittelwertabweichung von  $b = 1,0$ . Dieser Wert ( $b = 1,0$ ) wird als Zielwert für den Optimierungsalgorithmus bei Variante 1 definiert.

Für die Variante 2 wird bei der Zielwertsuche der Variationskoeffizient  $V_\delta$  für die Streugröße  $\delta$  als Zielwert festgelegt. Im Rahmen des statistischen Auswerteverfahrens wird für jeden experimentellen Wert  $r_{e,i}$  des Widerstands die Streugröße  $\delta_i$  bestimmt, die die Modellunsicherheit des Bemessungsmodells beschreibt. Der Variationskoeffizient  $V_\delta$  gilt als ein Indikator für die Qualität der Widerstandsfunktion. Das bedeutet, je kleiner der Variationskoeffizient  $V_\delta$ , desto exakter beschreibt das theoretische Widerstandsmodell den experimentellen Widerstand und desto geringer die Abminderung durch den erforderlichen Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M2}$ . Als Zielwert für Variante 2 wird dementsprechend das Minimum des Variationskoeffizienten  $V_\delta$  für die Streugröße  $\delta$  definiert. Zusätzlich wird als Nebenbedingung die Mittelwertabweichung  $b = 1,0$  festgelegt.

## 11.8.3.2 Statistische Auswertung - Schweißzusatzwerkstoffe mit Kennziffer 46

**Versuchsergebnisse**

Für die statistische Auswertung der Tragfähigkeit von Flankenkehlnahtverbindungen mit einem Schweißzusatzwerkstoff der nominellen Festigkeit  $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$  stehen insgesamt 88 Versuchsergebnisse, davon 72 Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und 16 Mischverbindungen zur Verfügung. Entsprechend Tab. 11-31 stammen 18 Versuchsergebnisse aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRIC TILE* [52] und 70 Versuchsergebnisse aus der Datenbasis der Dissertation von Rasche [84].

Tab. 11-31: Versuche an Flankenkehlnähten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen - Schweißzusatzwerkstoffe G/T/E46

Verbindungstyp		Projekt/Literatur	Werkstoffkombination	Anzahl	GW	SZW	
Verb. gl. GW n = 72	Undermatching n = 8	FOSTA P652	S690/S690-G46	1	S690 Q	G46	
		FOSTA P812	S690/S690-G46	2	S690 Q	G46	
		SAFEBRIC TILE	S690/S690-G46	2	S690 QL	G46	
		FOSTA P812	S700/S700-G46	3	S700 M	G46	
	Matching n = 60	Saal [87]	S460/S460-T46	34	S460 ML	T46	
		FOSTA P652	S460/S460-G/T/E46	20	S460 M/ML	G/E/T46	
		FOSTA P812	S460/S460-G46	4	S460 ML	G46	
		SAFEBRIC TILE	S460/S460-G46	2	S460 ML	G46	
		Overmatching n = 4	FOSTA P652	S355/S355-G46	2	S355 J2	G46
			SAFEBRIC TILE	S355/S355-G46	2	S355 J2+N	G46
Misch n = 16	Matching n = 8	SAFEBRIC TILE	S460/S690-G46	6	S460 ML/ S690 QL	G46	
		FOSTA P652	S460/S690-G46	2	S460 M/ S690 Q	G46	
	Overmatching n = 8	FOSTA P652	S355/S460-G46	2	S355 J2 / S690 Q	G46	
		SAFEBRIC TILE	S355/S690-G46	6	S355 J2+N/ S690 QL	G46	

**Evaluationsergebnisse**

Tab. 11-32 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Schweißzusatzwerkstoffgruppe G/T/E46. Für jede Alternative ist die Anzahl  $n$  an ausgewerteten Versuchen und die berücksichtigten Variationskoeffizienten der Basisvariablen aufgeführt. Für die Alternativen 1 bis 4 sind die Gewichtungsfaktoren nach Rasche [84] angesetzt, während bei Alternative 5 und 6 die Gewichtungsfaktoren ein Ergebnis der Optimierungsvarianten sind. Weiterhin sind die statistischen Ergebnisgrößen der beiden Verfahren V1 und V2 (vgl. Kapitel 11.5) gegeben. Hierzu zählen die Mittelwertkorrektur  $b$ , der Variationskoeffizient  $V_\delta$  für das Streumaß  $\delta$ , der resultierende Variationskoeffizient  $V_r$ , der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$  und der entsprechende Korrelationsbeiwert  $\beta_{w,SZW}^{kl}$  (nach Kleiner).

Tab. 11-32: Statistische Auswertung bzgl. Schweißzusatzwerkstoffe G/T/E46

Alternative	Anzahl $n$	Verfahren 1 (V1)			Verfahren 2 (V2)											
		$V_{f,u,GW}$ [%]	$V_{f,u,SZW}$ [%]	$V_{A,Bruch}$ [%]	$x \cdot f_{u,GW}$ [-]	$y \cdot f_{u,SZW}$ [-]	$b$ [-]	$V_{\delta}$ [%]	$V_r$ [-]	$\gamma_M^*$ [-]	$\beta_{w,SZW}^{kl}$ [-]	$b$ [-]	$V_{\delta}$ [%]	$V_r$ [-]	$\gamma_M^*$ [-]	$\beta_{w,SZW}^{kl}$ [-]
1.1	18	4	6	11	0,25	0,75	1,10	7,88	0,153	1,32	0,90	1,10	7,88	0,141	1,27	0,86
1.2	18	4	6	11	0,25	0,75	1,30	7,88	0,153	1,12	0,90	1,30	7,88	0,141	1,08	0,86
2	66	7	7	10	0,25	0,75	1,33	7,48	0,159	1,08	0,86	1,33	7,48	0,131	0,99	0,79
3	88	4	6	11	0,25	0,75	1,32	7,82	0,153	1,06	0,85	1,32	7,82	0,141	1,02	<b>0,82</b>
4	88	7	7	10	0,25	0,75	1,32	7,82	0,161	1,09	0,87	1,32	7,82	0,133	1,00	0,80
5	88	4	6	11	0,37	0,94	1,00	7,81	0,153	1,40	1,12	1,00	7,81	0,141	1,35	1,08
6	88	4	6	11	<b>0,37</b>	<b>0,95</b>	1,00	7,81	0,153	1,40	1,12	1,00	7,81	0,141	1,35	1,08

Bei Alternative 1.1 zeigt sich, dass die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRITILE* [52] mit dem Korrelationsbeiwert  $\beta_{w,SZW}^{Ra} = 0,85$  einen Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$  größer als  $\gamma_{M,target} = 1,25$  ergibt. Dies bedeutet, dass der Abstand zwischen dem nominellen Widerstand  $r_{t,nom}$  und dem Bemessungswert  $r_d$  größer als der geforderte Sicherheitsabstand ist. Folglich liefert die Ermittlung der Tragfähigkeiten unter Berücksichtigung eines Korrelationsbeiwerts von  $\beta_{w,SZW}^{Ra} = 0,85$  und einer begrenzten Datenmenge *nicht konservative* Werte.

Abb. 11-18 zeigt schematisch die beiden Fälle:  $\gamma_M^* < \gamma_{M,target}$  und  $\gamma_M^* > \gamma_{M,target}$ . Das Ziel ist, durch den Korrelationsbeiwert  $\beta_{w,SZW}^{kl}$  den nominellen Widerstand  $r_{t,nom}$  dementsprechend anzupassen, so dass der geforderte Sicherheitsabstand  $\gamma_{M,target}$  erreicht wird.

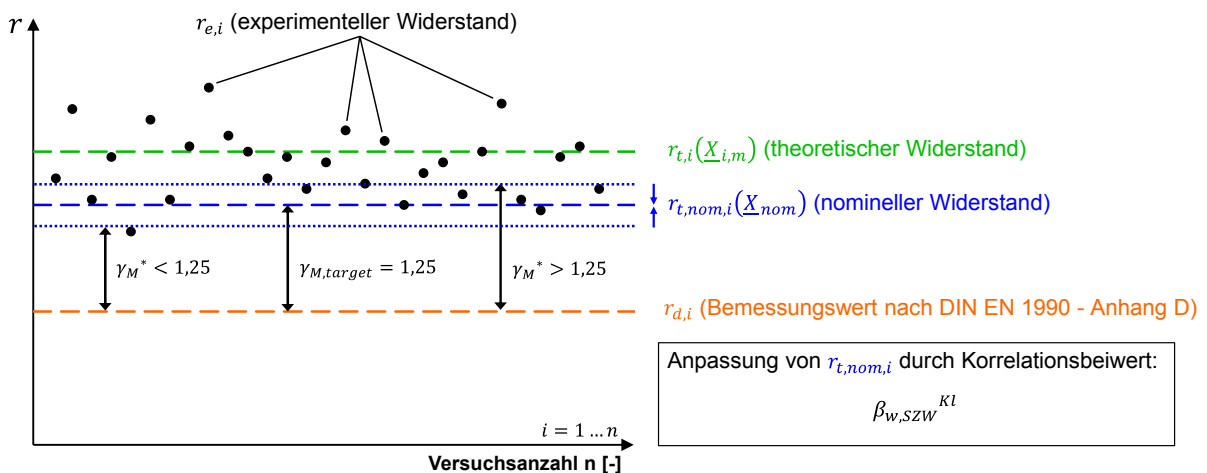


Abb. 11-18: Interpretation des Teilsicherheitsbeiwerts  $\gamma_M^*$

Für die Alternative 1.2 wurde bei der Ermittlung des theoretischen Widerstands  $r_{t,i}$  kein (Eingangs-) Korrelationsbeiwert  $\beta_{w,SZW}$  verwendet, so dass sich zwar verglichen mit Alternative 1.1 eine größere Mittelwertkorrektur  $b$  ergibt, jedoch dieselben Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,SZW}^{Kl}$  für Verfahren 1 und 2. Alternative 2 soll für die gleichen Voraussetzungen wie in Rasche [84] ausgewertet werden. Deshalb wurden auch nur 66 Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe angesetzt. Als Ergebnis liefert die statistische Auswertung unter denselben Voraussetzungen wie in Rasche [84] bei dem Verfahren 1 den nahezu identischen Korrelationsbeiwert mit  $\beta_{w,SZW}^{Kl} = 0,86$  als der von Rasche ermittelte Wert von  $\beta_{w,SZW}^{Ra} = 0,85$ . Alternative 3 fasst alle Versuchsergebnisse zusammen und ergibt für das Verfahren 2 einen geringeren Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,SZW}^{Kl} = 0,82$ .

In Tab. 11-33 sind die Bemessungstragfähigkeiten  $\tau_{\parallel,Rd}^{Ra}$  einer Flankenkehlnahtverbindung mit einem Schweißzusatzwerkstoff der nominellen Festigkeit  $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$  nach Rasche [84] aufgeführt. Im Vergleich dazu sind sowohl die absoluten Werte der Bemessungstragfähigkeiten mit den ermittelten Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,SZW}^{Kl}$  nach Tab. 11-32 als auch der prozentuale Unterschied gegeben.

Tab. 11-33: Vergleich der Grenzs Schubspannungen für Schweißzusatzwerkstoffe G/T/E46

Alternative	S460 N/NL; M/ML					S690 Q/QL/QL1					S700 MC				
	$\tau_{\parallel,Rd}^{Ra}$	$\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\tau_{\parallel,Rd}^{Ra}$	$\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\tau_{\parallel,Rd}^{Ra}$	$\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V2)$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
3	289,4	289,4	±0,0	299,9	<b>+3,7</b>	320,6	320,6	±0,0	332,3	<b>+3,7</b>	317,9	317,9	±0,0	329,5	<b>+3,7</b>
6	289,4	290,0	+0,2	300,8	+3,9	320,6	325,1	+1,4	337,2	+5,2	317,9	322,1	+1,3	334,0	+5,1

Auf Grundlage von Alternative 3 ist mit einem Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,SZW}^{Kl} = 0,82$  ein wirtschaftlicherer Ansatz zur Bemessung von Flankenkehlnahtverbindungen möglich. Die Tragfähigkeit kann im Vergleich zum bisherigen Ansatz um 3,7 % gesteigert werden. Alternative 4 steigert die Tragfähigkeit lediglich für Verfahren 2 noch weiter, sofern die Variationskoeffizienten der Basisvariablen nach Rasche verwendet werden. Die beiden Alternativen 5 und 6, bei denen der Fokus auf der Optimierung der Gewichtungsfaktoren zur Berücksichtigung der Festigkeitsanteile des Grund- und Schweißzusatzwerkstoffs liegt, zeigen für beide Optimierungsvarianten nahezu identische Ergebnisse. Mit einem Gewichtungsfaktor von 37 % der Festigkeit des Grundwerkstoffs und einem Gewichtungsfaktor von 95 % der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs liefert das Widerstandsmodell bei einer Mittelwertkorrektur von  $b = 1,0$  einen relativ geringen Variationskoeffizienten von  $V_\delta = 7,81 \%$ . Für die drei betrachteten Grundwerkstoffe können die Tragfähigkeiten mit diesem Ansatz zwischen 3,9 – 5,2 % gesteigert werden.

Abb. 11-19 zeigt die Versuchsergebnisse im Vergleich zu den bisherigen Bemessungstragfähigkeiten nach Rasche [84] und dem in Alternative 3 erarbeiteten Bemessungsvorschlag mit einem Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,SZW}^{Kl} = 0,82$ . Zusätzlich ist der nominelle Widerstand  $r_{t,nom}$  dargestellt, um den geforderten Sicherheitsabstand von  $\gamma_{M2} = 1,25$  zu verdeutlichen.

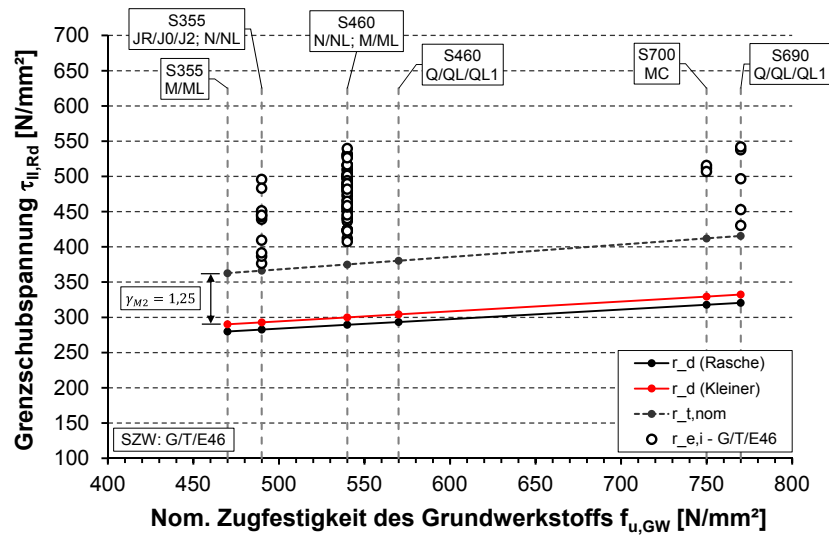


Abb. 11-19: Bemessungsvorschlag im Vergleich zu den Versuchsergebnissen und bestehendem Bemessungsmodell - Schweißzusatzwerkstoffe G/T/E46

Die Steigerung der Tragfähigkeit um 3,7 % ist deutlich zu erkennen, so dass als Ergebnis der statistischen Auswertung an Flankenkehlnahtverbindungen mit Schweißzusatzwerkstoffen der Festigkeitsklasse 46 ein Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,SZW}^{Kl} = 0,82$  vorgeschlagen werden kann.

## 11.8.3.3 Statistische Auswertung - Schweißzusatzwerkstoffe mit Kennziffer 69

**Versuchsergebnisse**

Für die statistische Auswertung der Tragfähigkeit von Flankenkehlnahtverbindungen mit einem Schweißzusatzwerkstoff der nominellen Festigkeit  $f_y = 690 \text{ N/mm}^2$  stehen insgesamt 77 Versuchsergebnisse, davon 61 Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und 16 Mischverbindungen zur Verfügung. Tab. 11-34 gibt einen Überblick über die Herkunft der Versuchsergebnisse. Aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRIC TILE* [52] stammen 18 Versuchsergebnisse und aus der Datenbasis der Dissertation von Rasche [84] konnten 59 Versuchsergebnisse herangezogen werden.

Tab. 11-34: Versuche an Flankenkehlnähten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen - Schweißzusatzwerkstoffe G/T69

Verbindungstyp		Projekt/Literatur	Werkstoffkombination	Anzahl	GW	SZW
Verb. gl. GW n = 61	Matching n = 55	FOSTA P652	S690/S690-G/T/69	9	S690 Q/QL	G/T69
		Zusatzversuche	S690/S690-G69	4	S690 QL	G69
		FOSTA P812	S690/S690-G/T/69	16	S690 Q	G/T69
		SAFEBRIC TILE	S690/S690-G69	2	S690 QL	G69
		FOSTA P812	S700/S700-G/T69	24	S700 M	G/T69
	Overmatching n = 6	SAFEBRIC TILE	S355/S355-G69	2	S355 J2+N	G69
		FOSTA P652	S460/S460-G69	2	S460 M	G69
		SAFEBRIC TILE	S460/S460-G69	2	S460 ML	G69
Misch n = 16	Overmatching n = 16	FOSTA P652	S355/S690-G69	2	S355 J2/ S690 Q	G69
		SAFEBRIC TILE	S355/S690-G69	6	S355 J2+N/ S690 QL	G69
		FOSTA P652	S460/S690-G69	2	S460 M/ S690 Q	G69
		SAFEBRIC TILE	S460/S690-G69	6	S460 ML/ S690 QL	G69

**Evaluationsergebnisse**

Tab. 11-35 fasst die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Schweißzusatzwerkstoffgruppe G/T69 tabellarisch zusammen.

Tab. 11-35: Statistische Auswertung bzgl. Schweißzusatzwerkstoffe G/T69

Alternative	Anzahl $n$	$V_{f,u,GW}$			$x \cdot f_{u,GW}$	$y \cdot f_{u,SZW}$	Verfahren 1 (V1)					Verfahren 2 (V2)				
		[%]	[%]	[%]			$b$	$V_\delta$	$V_r$	$\gamma_M^*$	$\beta_{w,SZW}^{kl}$	$b$	$V_\delta$	$V_r$	$\gamma_M^*$	$\beta_{w,SZW}^{kl}$
1.1	18	4	6	11	0,25	0,75	1,26	8,88	0,159	1,26	1,10	1,26	8,88	0,147	1,21	1,06
1.2	18	4	6	11	0,25	0,75	1,16	8,88	0,159	1,37	1,10	1,16	8,88	0,147	1,32	1,06
2	55	7	7	10	0,25	0,75	1,09	7,45	0,151	1,38	1,10	1,09	7,45	0,138	1,32	1,06
3	77	4	6	11	0,25	0,75	1,10	8,81	0,154	1,37	1,10	1,10	8,81	0,142	1,32	<b>1,06</b>
4	77	7	7	10	0,25	0,75	1,10	8,81	0,162	1,41	1,13	1,10	8,81	0,134	1,29	1,03
5	77	4	6	11	0,30	0,80	1,00	8,14	0,155	1,51	1,21	1,00	8,14	0,142	1,45	1,16
6	77	4	6	11	<b>0,25</b>	<b>0,85</b>	1,00	8,09	0,154	1,51	1,21	1,00	8,09	0,142	1,46	1,17

An dieser Stelle sei nochmals angemerkt, dass Alternative 2 unter den gleichen Voraussetzungen wie in Rasche [84] ausgewertet wurde. Dementsprechend wurden keine Mischverbindungen berücksichtigt. Alternative 1.1, bei der die Gewichtungsfaktoren nach Rasche [84] Eingang fanden und auf die Versuchsergebnisse des Forschungsprojekts *SAFEBRIC TILE* [52] angewendet wurden, zeigt für das Verfahren 1, dass mit einem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^* = 1,26$  eine hinreichend genaue Übereinstimmung vorliegt. Verfahren 2 erlaubt sogar die Möglichkeit einer Optimierung der Bemessungstragfähigkeit mit einem Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_M^* = 1,21$ . Alternative 1.2 liefert zwar bei unterschiedlicher Mittelwertkorrektur  $b$  aber identischen Streuungen  $V_\delta$  und  $V_r$  dieselben Korrelationsbeiwerte  $\beta_{w,SZW}^{Kl}$ . Alternative 3 fasst alle vorhandenen Versuchsergebnisse zusammen. Ein Vergleich der resultierenden Variationskoeffizienten  $V_r$  von Alternative 2, Verfahren 1 mit dem Verfahren 2 bei Alternative 3 zeigt, dass eine geringere Streuung ( $V_r = 0,142$ ) vorliegt. Dies bietet die Möglichkeit einer wirtschaftlicheren Bemessung der Flankenkehlnahtverbindung um durchschnittlich 2,8 % (vgl. hierzu Tab. 11-36).

Tab. 11-36: Vergleich der Grenzschubspannungen für Schweißzusatzwerkstoffe G/T69

Alternative	S460 N/NL; M/ML					S690 Q/QL/QL1					S700 MC				
	$\tau_{\parallel,Rd}^{Ra}$	$\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\tau_{\parallel,Rd}^{Ra}$	$\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\tau_{\parallel,Rd}^{Ra}$	$\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V1)$	$\tau_{\parallel,Rd}(V2)$	$\Delta\tau_{\parallel,Rd}(V2)$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
3	301,9	299,2	-0,9	310,5	<b>+2,8</b>	326,3	323,3	-0,9	335,5	<b>+2,8</b>	324,2	321,2	-0,9	333,3	<b>+2,8</b>
6	301,9	301,4	-0,2	311,7	+3,2	326,3	323,3	-0,9	334,4	+2,5	324,2	321,4	-0,9	332,4	+2,5

Alternative 4, ausgewertet mit den Variationskoeffizienten der Basisvariablen nach Rasche [84] zeigt bei einer größeren Streuung  $V_\delta$  deutliche Abweichungen zu dem von Rasche [84] hergeleiteten Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,SZW}^{Ra} = 1,09$ . Alternative 5 und 6 spiegeln den bisherigen Ansatz wider, dass ein signifikanter Schwerpunkt bei der Bestimmung der Bemessungstragfähigkeit der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs zukommt. Jedoch würde sich bei einem Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,SZW}^{Kl} = 1,17$  (Alternative 6, Verfahren 2) eine um durchschnittlich 2,5 – 3,2 % höhere Tragfähigkeit ergeben als der bisherige Ansatz nach Rasche [84].

Abb. 11-20 zeigt alle Versuchsergebnisse mit den Schweißzusatzwerkstoffen G/T69 gemeinsam mit den Bemessungswerten nach Rasche [84] und dem in Alternative 3 erarbeiteten Bemessungsvorschlag mit einem Korrelationsbeiwerte von  $\beta_{w,SZW}^{Kl} = 1,06$  in Abhängigkeit der nominellen Zugfestigkeit der Grundwerkstoffe. Der nominelle Widerstand  $r_{t,nom}$  verdeutlicht den geforderten Sicherheitsabstand von  $\gamma_{M2} = 1,25$ .



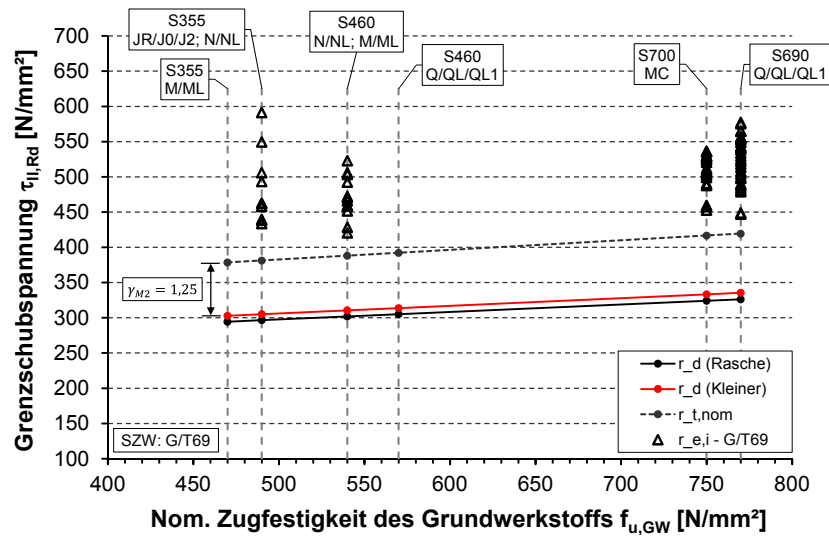


Abb. 11-20: Bemessungsvorschlag im Vergleich zu den Versuchsergebnissen und bestehendem Bemessungsmodell - Schweißzusatzwerkstoffe G/T69

Die Optimierung der Grenzscherbspannung bzw. der Tragfähigkeit um 2,8 % ist ersichtlich, so dass als Ergebnis der statistischen Auswertung der Flankenkehlnahtverbindungen mit Schweißzusatzwerkstoffen der Festigkeitsklasse 69 ein Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,SZW}^{KL} = 1,06$  vorgeschlagen werden kann.

## 11.8.3.4 Statistische Auswertung - Schweißzusatzwerkstoffe mit Kennziffer 89

**Versuchsergebnisse**

Um den Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs mit einer nominellen Festigkeit von  $f_y = 890 \text{ N/mm}^2$  auf die Tragfähigkeit von Flankenkehlnahtverbindungen zu bestimmen, stehen insgesamt 26 Versuchsergebnisse, davon 14 Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und 12 Mischverbindungen zur Verfügung. Verglichen mit den Schweißzusatzwerkstoffen mit den Kennziffern 46 und 69 entspricht dies lediglich etwa einem Drittel an Versuchsergebnissen. Insgesamt stammen entsprechend Tab. 11-37 16 Versuchsergebnisse aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRICKTILE* [52] und 10 Versuchsergebnisse und aus der Datenbasis der Dissertation von Rasche [84].

Tab. 11-37: Versuche an Flankenkehlnähten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen - Schweißzusatzwerkstoff G89

Verbindungstyp		Projekt / Literatur	Werkstoffkombination	Anzahl	GW	SZW
Verb. gl. GW n = 14	Overmatching n = 14	Zusatzversuche	S355/S355-G89	1	S355 J2	G89
		SAFEBRICKTILE	S460/S460-G89	2	S460 ML	G89
		Zusatzversuche	S690/S690-G89	4	S690 QL	G89
		FOSTA P812	S690/S690-G89	2	S690 Q	G89
		SAFEBRICKTILE	S690/S690-G89	2	S690 QL	G89
		FOSTA P812	S700/S700-G89	3	S700 M	G89
Misch n = 12	Overmatching n = 12	SAFEBRICKTILE	S355/S690-G89	6	S355 J2+N/ S690 QL	G89
		SAFEBRICKTILE	S460/S690-G89	6	S460 ML/ S690 QL	G89

**Evaluationsergebnisse**

Tab. 11-38 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Schweißzusatzwerkstoffgruppe G89.

Tab. 11-38: Statistische Auswertung bzgl. Schweißzusatzwerkstoff G89

Alternative	Anzahl n	$V_{f_u, GW}$			$x \cdot f_{u, GW}$	$y \cdot f_{u, SZW}$	Verfahren 1 (V1)					Verfahren 2 (V2)					
		$V_{f_u, GW}$	$V_{f_u, SZW}$	$V_{Abbruch}$			b	$V_\delta$	$V_r$	$\gamma_M^*$	$\beta_{w, SZW}^{KL}$	b	$V_\delta$	$V_r$	$\gamma_M^*$	$\beta_{w, SZW}^{KL}$	
		[%]	[%]	[%]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]
1.1	16	4	6	11	0,25	0,75	1,23	10,02	0,165	1,34	1,28	1,23	10,02	0,156	1,31	1,25	
1.2	16	4	6	11	0,25	0,75	1,03	10,02	0,165	1,60	1,28	1,03	10,02	0,156	1,56	1,25	
2	10	7	7	10	0,25	0,75	1,04	3,53	0,136	1,39	1,11	1,04	3,53	0,124	1,34	1,07	
3	26	4	6	11	0,25	0,75	1,03	8,07	0,154	1,48	1,19	1,03	8,07	0,144	1,44	<b>1,15</b>	
4	26	7	7	10	0,25	0,75	1,03	8,07	0,162	1,52	1,22	1,03	8,07	0,137	1,41	1,13	
5	26	4	6	11	0,26	0,77	1,00	8,05	0,154	1,53	1,23	1,00	8,05	0,144	1,49	1,19	
6	26	4	6	11	<b>0,34</b>	<b>0,71</b>	1,00	7,98	0,154	1,53	1,22	1,00	7,98	0,143	1,48	1,18	

Bei einem Vergleich der Versuchsergebnisse aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRICKTILE* [52] (Alternative 1.2) mit den Ergebnissen aus der Dissertation von Rasche [84]

(Alternative 2) zeigt sich ein nahezu 3-fach so großer Variationskoeffizient  $V_\delta$ , der darauf hindeutet, dass die Widerstandsfunktion für diese betrachtete Gruppe an Versuchsergebnissen nicht hinreichend genau genug ist. Indessen deuten bei Alternative 1.1 die Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M^* = 1,34$  für Verfahren 1 und  $\gamma_M^* = 1,31$  für Verfahren 2 darauf hin, dass die betrachtete Gruppe von Versuchsergebnissen einen zu großen nominellen Widerstand  $r_{t,nom}$  ergeben, so dass der Bemessungswert  $r_d$  in diesem Fall ebenfalls zu groß wäre und die Tragfähigkeit als *nicht konservativ* bewertet werden kann. Das Verfahren 1 der Alternative 2 kommt der statistischen Auswertung von Rasche [84] am nächsten. Jedoch ergibt sich ein wirtschaftlicherer Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,SZW}^{Kl} = 1,11$  als den bisherigen Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,SZW}^{Ra} = 1,19$ . Verfahren 2 würde für diese betrachtete Gruppe mit einem Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,SZW}^{Kl} = 1,07$  eine noch größere Bemessungstragfähigkeit erlauben.

Alternative 3 fasst alle Versuchsergebnisse mit den Schweißzusatzwerkstoffen G89 zusammen und ergibt mit einem Variationskoeffizient von  $V_\delta = 8,07\%$  eine mehr als doppelt so große Streuung als bei den in Alternative 2 betrachteten Versuchsergebnissen. Die größere Streuung der Versuchsergebnisse wirkt sich auf den Bemessungswert bzw. den Korrelationsbeiwert  $\beta_{w,SZW}^{Kl}$  aus. Allerdings kann bei einer Auswertung der Versuchsergebnisse basierend auf dem Verfahren 2 mit einem Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,SZW}^{Kl} = 1,15$  eine durchschnittliche Steigerung der Tragfähigkeit entsprechend Tab. 11-39 von 3,5 % erreicht werden.

Tab. 11-39: Vergleich der Grenzs Schubspannungen für Schweißzusatzwerkstoff G/T69

Alternative	S460 N/NL; M/ML					S690 Q/QL/QL1					S700 MC				
	$\tau_{  ,Rd}^{Ra}$	$\tau_{  ,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{  ,Rd}(V1)$	$\tau_{  ,Rd}(V2)$	$\Delta\tau_{  ,Rd}(V2)$	$\tau_{  ,Rd}^{Ra}$	$\tau_{  ,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{  ,Rd}(V1)$	$\tau_{  ,Rd}(V2)$	$\Delta\tau_{  ,Rd}(V2)$	$\tau_{  ,Rd}^{Ra}$	$\tau_{  ,Rd}(V1)$	$\Delta\tau_{  ,Rd}(V1)$	$\tau_{  ,Rd}(V2)$	$\Delta\tau_{  ,Rd}(V2)$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
3	326,0	326,0	±0,0	337,4	<b>+3,5</b>	348,4	348,4	±0,0	360,5	<b>+3,5</b>	346,4	346,4	±0,0	358,5	<b>+3,5</b>
6	326,0	322,2	-1,2	333,1	+2,2	348,4	351,8	+1,0	363,7	+4,4	346,4	349,2	+0,8	361,0	+4,2

Weiterhin zeigt das Verfahren 2 bei Alternative 4 den Vorteil, dass mit den eher konservativen Variationskoeffizienten der Basisvariablen nach Rasche [84] eine Steigerung der Tragfähigkeit mit einem Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,SZW}^{Kl} = 1,13$  erzielt werden kann. Alternative 5 und 6 unterstreichen nochmals die bereits gewonnene Erkenntnis, dass im Rahmen eines Optimierungsalgorithmus hinsichtlich der Mittelwertkorrektur  $b$  und dem Variationskoeffizient  $V_\delta$ , der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs eine entscheidende Bedeutung bei der Bemessung einer Flankenkehlnahtverbindung zukommt. Der geringere Variationskoeffizient  $V_\delta$  bei Alternative 6 im Vergleich zu Alternative 3 zeigt, dass sofern das Widerstandsmodell op-

timal an die Versuchsergebnisse angepasst ist, eine Steigerung der Tragfähigkeit zwischen 2,2 – 4,4 % möglich ist.

Abb. 11-21 zeigt alle Versuchsergebnisse mit den Schweißzusatzwerkstoffen G89 gemeinsam mit den Bemessungswerten nach Rasche [84] und dem in Alternative 3 erarbeiteten Bemessungsvorschlag mit einem Korrelationsbeiwerte von  $\beta_{w,SZW}^{Kl} = 1,15$  in Abhängigkeit der nominellen Zugfestigkeit der Grundwerkstoffe.

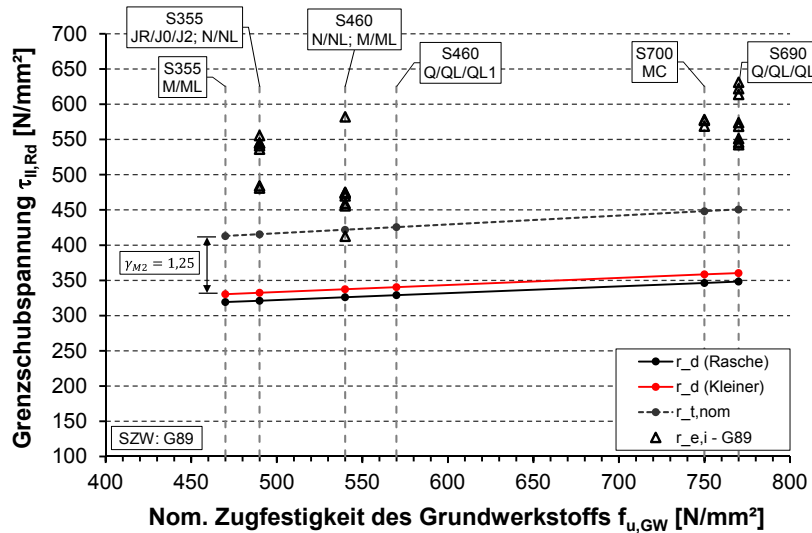


Abb. 11-21: Bemessungsvorschlag im Vergleich zu den Versuchsergebnissen und bestehendem Bemessungsmodell - Schweißzusatzwerkstoff G89

Neben der teilweise großen Streuung der Versuchsergebnisse ist die Steigerung der Tragfähigkeit der Flankenkehlnahtverbindung mit zunehmender nomineller Festigkeit des Grundwerkstoffs deutlich zu erkennen. Demzufolge kann als Ergebnis der statistischen Auswertung der Flankenkehlnahtverbindungen mit Schweißzusatzwerkstoffen der Festigkeitsklasse 89 ein Korrelationsbeiwert von  $\beta_{w,SZW}^{Kl} = 1,15$  vorgeschlagen werden.

## 11.9 Sensitivitätsanalyse - Einfluss des Mechanisierungsgrades

In diesem Kapitel soll der Einfluss des Mechanisierungsgrades für den Schweißprozess untersucht werden. Hierbei wird das Ziel verfolgt, einen Anpassungsfaktors  $k_{mf}$  (engl.: *manufacturing*) herauszuarbeiten, der zwischen einem voll- oder teilmechanisierten Fertigungsprozess unterscheidet. Dieser Anpassungsfaktor könnte dann bei der Ermittlung der Bemessungstragfähigkeiten berücksichtigt werden.

### Versuchsergebnisse

Für die statistische Auswertung werden ausschließlich die Versuche aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRICKTILE* [52] nach Tab. 11-2 berücksichtigt. Als theoretische Widerstandsfunktion wird der modifizierte Bemessungsansatz nach Rasche [84] entsprechend Gleichung (11.13) vorgeschlagen, der die Festigkeit des Grundwerkstoffs mit einem Gewichtungsfaktor von 0,25 (25 %) und die des Schweißzusatzwerkstoffs mit einem Gewichtungsfaktor von 0,75 (75 %) berücksichtigt.

$$r_{t,i} = \tau_{\parallel,Rd} = k_{mf} \cdot \frac{0,25 \cdot f_{u,GW} + 0,75 \cdot f_{u,SZW}}{\sqrt{3} \cdot \beta_{w,SZW}} \quad (11.13)$$

mit

$\tau_{\parallel,Rd}$	Grenzschubspannung (Theoretischer Widerstand $r_t$ )	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{u,GW}$	Zugfestigkeit des schwächeren Grundwerkstoffs	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{u,SZW}$	Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\beta_{w,SZW}$	Korrelationsbeiwert nach Tab. 5-2	[-]
$k_{mf}$	Anpassungsfaktor (engl.: <i>manufacturing</i> )	[-]

Die statistische Auswertung erfolgt ausschließlich nach dem Verfahren 2 aus Kapitel 11.5. Die Versuchsergebnisse sind jeweils nach den verwendeten Schweißzusatzwerkstoffen und dem Mechanisierungsgrad gruppiert. Hierbei steht das Kürzel *a* für vollmechanisiert (engl.: *automatic*) und *m* für teilmechanisiert (engl.: *manual*). Abb. 11-22 zeigt anschaulich, dass die praxisnahe Streuung der Versuchsergebnisse durch die Variation der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  gegeben ist, die sich folglich auch auf die Streckenenergie  $E$  und die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  auswirkt. Für die Evaluation werden sowohl Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe als auch Mischverbindungen herangezogen, bei denen Baustähle der Güte S355, S460 und S690 verwendet wurden. Als Evaluationsgruppe werden die drei Schweißzusatzwerkstoffe G46, G69 und G89 definiert.

Im Rahmen der statistischen Auswertung werden für die einzelnen Evaluationsgruppen, getrennt nach Mechanisierungsgrad, die theoretischen Widerstände nach Gleichung (11.13) bestimmt und mit den Versuchsergebnissen verglichen.

Unter Berücksichtigung der Korrelationsbeiwerte nach Tab. 5-2 für den theoretischen Widerstand werden für jede Gruppe die Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M^*$  bestimmt. Als geforderten Teilsicherheitsbeiwert wird  $\gamma_{M2} = \gamma_{M,target} = 1,25$  festgelegt.

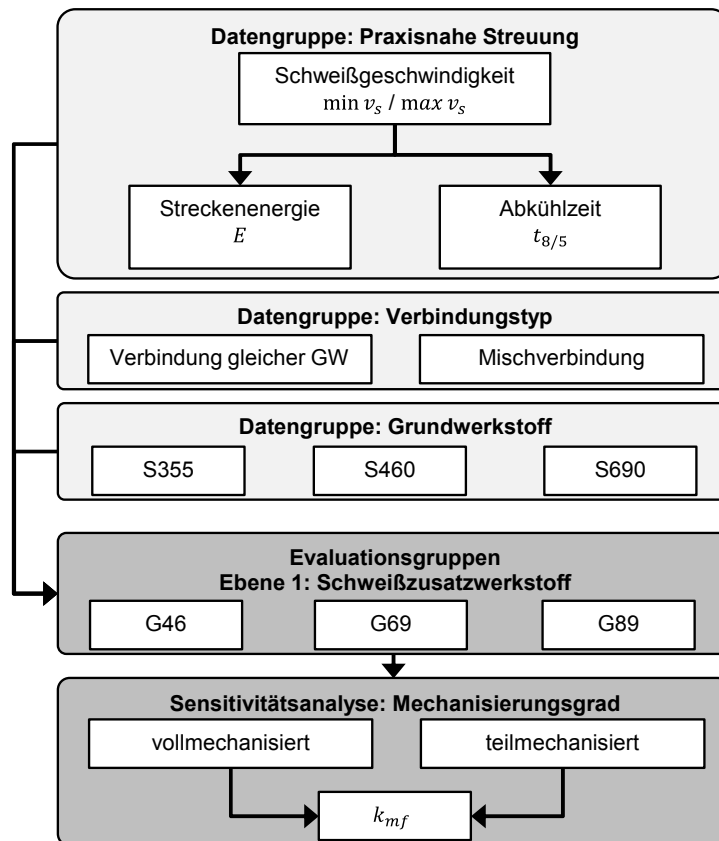


Abb. 11-22: Flussdiagramm - Einfluss des Mechanisierungsgrades

Der Anpassungsfaktor  $k_{mf}$ , abhängig vom Mechanisierungsgrad, ergibt sich dann als Quotient aus dem geforderten Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,target}$  und dem vorhandenen Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$ .

An dieser Stelle sei nochmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass der Anpassungsfaktor  $k_{mf}$  nicht mit dem Korrelationsbeiwert  $\beta_w$  zu verwechseln ist. Der Anpassungsfaktor  $k_{mf}$  wird zusätzlich bei der Ermittlung der Bemessungsgrenzspannung einer Flankenkehlnaht (vgl. Gleichung (11.13)) berücksichtigt und geht entgegen dem Korrelationsbeiwert  $\beta_w$  in den Zähler des Quotienten des Bemessungsmodells mit ein. Dementsprechend bedeutet ein Anpassungsfaktor  $k_{mf} > 1,0$ , dass durch den Mechanisierungsgrad die Grenzschubspannung im Vergleich zur konventionellen Bemessungstragfähigkeit nach Rasche [84] angehoben bzw. optimiert werden kann. Sofern sich ein Anpassungsfaktor  $k_{mf} < 1,0$  ergibt, ist das geforderte Sicherheitsniveau von  $\gamma_{M,target} = 1,25$  nicht eingehalten und die Grenzschubspannung wird entsprechend abgemindert.

## Evaluationsergebnisse

In Tab. 11-40 sind jeweils die einzelnen Gruppen, sortiert nach Schweißzusatzwerkstoff und Mechanisierungsgrad mit der entsprechenden Anzahl  $n$  aufgeführt. Weiterhin sind die verwendeten Variationskoeffizienten der Basisvariablen wiedergegeben. Hierbei wurden für den Variationskoeffizienten der Nahtbruchfläche entsprechend Kapitel 11.4.4 Abb. 11-11 eine Differenzierung vorgenommen: Für teilmechanisierte Versuchskörper ergab sich für die Nahtbruchfläche ein nahezu doppelt so große Streuung als für vollmechanisierte Versuchskörper. Diese Tatsache spiegelt sich in den vergleichsweise hohen Werten für den Variationskoeffizienten  $V_\delta$  zwischen 7,91 – 11,89 % und dem Variationskoeffizienten  $V_r$  mit 0,161 – 0,185 der teilmechanisiert geschweißten Versuchskörper wider.

Ein Vergleich zwischen den vollmechanisiert und den teilmechanisiert geschweißten Gruppen anhand des Variationskoeffizienten  $V_r$  wäre an dieser Stelle nicht zielführend, da durch die Differenzierung des Variationskoeffizienten der Nahtbruchfläche  $V_{A_{Bruch}}$  keine gleichen Eingangsgrößen bzw. Einzelstreuungen der Basisvariablen vorliegen.

Tab. 11-40: Ergebnisse der statistischen Auswertung bzgl. dem Einfluss des Mechanisierungsgrades

SZW	Mechanisierungsgrad	Anzahl $n$	$V_{f_{u,GW}}$	$V_{f_{u,SZW}}$	$V_{A_{Bruch}}$	$\beta_{w,SZW}$	Verfahren 2 (V2)				
							$b$	$V_\delta$	$V_r$	$\gamma_M^*$	$k_{mf} = \frac{\gamma_{M,target}}{\gamma_M^*}$
			[%]	[%]	[%]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]
G46	a	10	4	6	7,3	0,85	1,07	5,76	0,102	1,18	<b>1,06</b>
	m	8	4	6	13,4	0,85	1,15	8,89	0,166	1,40	<b>0,89</b>
G69	a	10	4	6	7,3	1,09	1,25	9,87	0,129	1,24	<b>1,01</b>
	m	8	4	6	13,4	1,09	1,28	7,91	0,161	1,30	<b>0,96</b>
G89	a	8	4	6	7,3	1,19	1,20	7,62	0,116	1,23	<b>1,02</b>
	m	8	4	6	13,4	1,19	1,26	11,89	0,185	1,54	<b>0,81</b>

In Abb. 11-23 sind die Versuchsergebnisse im Vergleich zu den konventionellen Bemessungstragfähigkeiten ohne (schwarz) und mit (rot) Anpassungsfaktor am Beispiel einer Werkstoffkombination mit einem Grundwerkstoff der Stahlgüte S460 dargestellt.

Die bereits diskutierte signifikante Streuung der teilmechanisiert geschweißten Versuchskörper, insbesondere der Gruppe G46-m und G89-m mit den entsprechenden Variationskoeffizienten  $V_\delta = 8,89\%$  und  $V_\delta = 11,89\%$  zeigt sich ebenfalls deutlich in Abb. 11-23. Folglich führt diese Streuung, bedingt durch den teilmechanisierten Fertigungsprozess zu einem Anpassungsfaktor von  $k_{mf} < 1,0$ .

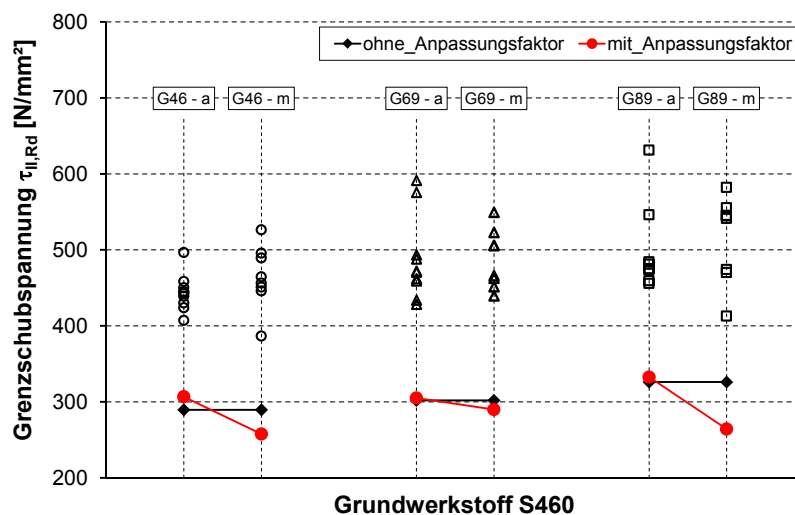


Abb. 11-23: Versuchsergebnisse im Vergleich mit den konventionellen Bemessungstragfähigkeiten ohne und mit Anpassungsfaktor am Beispiel einer Werkstoffkombination mit einem Grundwerkstoff der Stahlgüte S460

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung aus Tab. 11-40 lassen sich für die teil- und vollmechanisiert geschweißten experimentellen Untersuchungen, unabhängig vom Schweißzusatzwerkstoff, zu zwei Gruppen zusammenfassen und interpretieren.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass ein Einfluss des Mechanisierungsgrades auf die Bemessungstragfähigkeiten herausarbeitet werden konnte. Der Einfluss bedingt durch einen vollmechanisierten Fertigungsprozess ist mit einem Anpassungsfaktor von durchschnittlich  $k_{mf} = 1,03$  eher gering. Dies entspricht einer Verbesserung der Bemessungstragfähigkeit im Durchschnitt um 3 %. Dagegen ist der Einfluss auf die Bemessungstragfähigkeit bei einem teilmechanisierten Fertigungsprozess mit einem Anpassungsfaktor von durchschnittlich  $k_{mf} = 0,89$  nicht unwesentlich. Bedingt durch die große Streuung führt dies zu einer Abminderung der Bemessungstragfähigkeit um ca. 11 %.

Aufgrund der begrenzten Versuchsanzahl sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass sich zwar ein tendenzieller Einfluss des Mechanisierungsgrades abzeichnet, jedoch sollte nach Meinung des Autors durch ein umfangreiches und gezieltes Versuchsprogramm hierzu der Einfluss noch detaillierter herausgearbeitet werden, um so für die Baupraxis aussagekräftige Empfehlungen aussprechen zu können.



## 12 Analytischer Ansatz zur Verformungsberechnung einer Flankenkehlnaht

### 12.1 Beweggrund zur Verformungsbetrachtung einer Flankenkehlnaht

In DIN EN 1993-1-8 [9] Abschnitt 4.9 (4) wird in Hinblick auf die Verteilung der Kräfte bei Schweißverbindungen explizit gefordert, dass Schweißanschlüsse folgendes Kriterium erfüllen sollen: *„Schweißanschlüsse sind in der Regel so zu konstruieren, dass sie ein ausreichendes Verformungsvermögen aufweisen. Allerdings sollte die Duktilität von Schweißnähten nicht von vornherein in Ansatz gebracht werden“* [9]. Demzufolge sollen Schweißanschlüsse also insgesamt ausreichend duktil ausgebildet sein. Die Duktilität der Schweißnähte selbst kann jedoch nicht ohne zusätzliche Nachweise angesetzt werden. Unklar bleibt jedoch an dieser Stelle, was unter einem ausreichenden Verformungsvermögen verstanden werden kann und wann eine Konstruktion ausreichend Duktilität aufweist, um die in der Norm geforderten Eigenschaften zu erfüllen.

In verschiedenen kanadischen Forschungsvorhaben ([49], [54]) wurde in der Vergangenheit der Einfluss der unterschiedlichen Orientierung von Kehlnähten und deren Auswirkung auf die Tragfähigkeit untersucht. Hierbei hat sich u. a. gezeigt, dass sich in Abhängigkeit von der konstruktiven Ausbildung einer Schweißverbindung unterschiedliche Anforderungen an das Verformungsvermögen der Schweißnaht ergeben. Demzufolge müssen beispielsweise Flankenkehlnähte von Laschenstößen im Vergleich zu Stirnkehlnähten oder Stumpfnahverbindungen ein höheres Verformungsvermögen aufweisen um die Tragfähigkeit über die gesamte Schweißnahtlänge zu aktivieren. Abb. 12-10 in Kapitel 12.4.3 zeigt hierzu prinzipiell die deutlichen Unterschiede einer schubbeanspruchten Flankenkehlnaht zwischen den Nahtenden und der Nahtmitte.

Demzufolge kann die Bestimmung des Verformungsvermögens einer Flankenkehlnaht eine Vorhersage des Verhaltens eines Anschlusses unter verschiedenen Einwirkungen ermöglichen. Dies wäre gerade bei der Bemessung für den Lastfall Erdbeben von enormer Bedeutung. Im Rahmen der Kapazitätsbemessung werden hohe Anforderungen an die Schweißnaht bzgl. dem Verformungsvermögen im Bereich von plastischen Gelenken und den damit einhergehenden Spannungsumlagerungen gestellt. Hierzu bedarf es allerdings Möglichkeiten, das Verformungsvermögen einer Schweißnaht möglichst genau zu definieren und vor allem berechnen zu können.

In diesem Kapitel wird zunächst die Philosophie und die Methodik der Kapazitätsbemessung im Erdbebeningenieurwesen erläutert und eine Literaturrecherche bzgl. der Verformungsberechnung von Schweißverbindungen durchgeführt. Daran anknüpfend wird auf Basis der Versuchsergebnisse aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRICKTILE* [52] ein analytisches Modell zur Abschätzung der Verformung einer Flankenkehlnahtverbindung hergeleitet und mit den in Kapitel 10 vorgestellten statistischen Kriterien abgesichert.

## 12.2 Methode der Kapazitätsbemessung

### 12.2.1 Philosophie der Kapazitätsbemessung

Bachmann fasst in [43] die generelle Idee der Kapazitätsbemessung sehr gut in einem Satz zusammen: „Der Ingenieur *“sagt“ dem Tragwerk ganz genau, wo es plasifizieren darf und soll und wo nicht. Damit können für große Beanspruchungen ein klar definierter Mechanismus und ein hoher Schutzgrad gegen Einsturz erreicht werden.*“

Die Kapazitätsbemessung wurde bereits in den 1970er Jahren in Neuseeland für Stahlbetonrahmen entwickelt und hat mit der Zeit Einzug in die meisten modernen Erdbebennormen, u. a. auch im Eurocode 8 [13] erhalten. Die wichtigsten grundsätzlichen Merkmale der Methode der Kapazitätsbemessung lassen sich anhand dem Beispiel einer duktilen Kette (vgl. Abb. 12-1) erläutern. Diese ist für eine statische Erdbebeneinwirkung  $F_E$  bemessen.

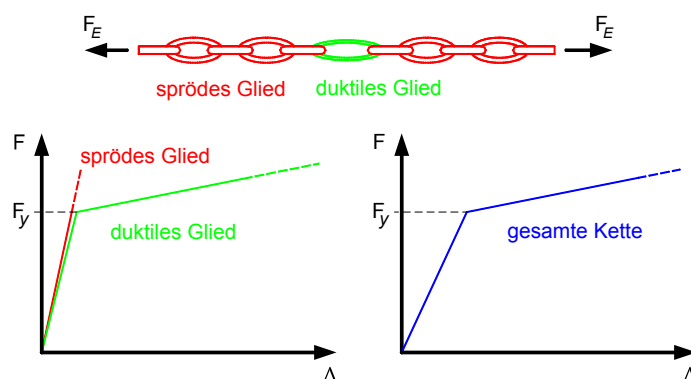


Abb. 12-1: Prinzip der Widerstandsbegrenzung durch eine duktile Kette nach [95]

$F_y$  ist die Fließkraft des duktilen Glieds und entspricht dem Gesamtwiderstand der Kette, der mit der statischen Erdbebeneinwirkung  $F_E$  gleichzusetzen ist ( $F_y = F_E$ ). Demzufolge ist der Gesamtwiderstand der Kette und somit des Tragwerks direkt vom Widerstand seines schwächsten Glieds abhängig. Ist das schwächste Glied spröde ausgebildet, folgt ein sprödes Versagen des gesamten Tragwerks, während bei duktiler Ausbildung des schwächsten Glieds die Möglichkeit für das Tragwerk besteht, sich vor dem Versagen plastisch zu verformen. Vor allem im Lastfall Erdbeben sollte sprödes und damit plötzliches Versagen des Tragwerks vermieden werden und das schwächste Glied somit duktil gewählt werden [95].

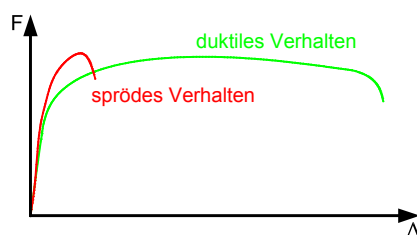


Abb. 12-2: Sprödes und duktileres Verhalten

In Abb. 12-2 sind zwei Kraft-Verformungs-Beziehungen dargestellt, die qualitativ den Unterschied zwischen einem spröden und einem duktilen Verhalten verdeutlichen. Das Modell der duktilen Kette (vgl. Abb. 12-1) zeigt anschaulich, dass der Ort, an dem Plastizierung stattfindet, genau definiert ist und i. d. R. dem Glied entspricht, das über ein duktileres Verhalten verfügt. Die restlichen spröden Glieder der Kette dürfen ihren Widerstand nicht erreichen und müssen deshalb einen höheren Widerstand aufweisen und demnach im elastischen Zustand bleiben. Sind diese Voraussetzungen gegeben, kann das gesamte Verhalten des Systems als duktil bezeichnet werden.

Abb. 12-3 zeigt die beiden Möglichkeiten eines Systems, im Erdbebenfall Energie zu dissipieren. Für die Kapazitätsbemessung werden beide Fälle kombiniert, um so ein möglichst ideales Verhalten und eine wirtschaftliche Bemessung zu ermöglichen.

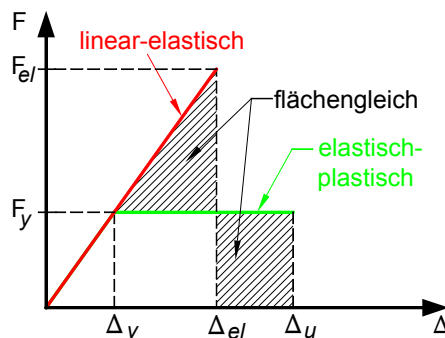


Abb. 12-3: Energiedissipation nach [85]

Spröde Bauteile weisen ein linear-elastisches Verhalten auf. Bis zum Erreichen von  $F_{el}$  steigt die elastische Verformung linear zur angreifenden Kraft, danach kommt es zum Bruch. Duktile Bauteile zeigen bis zum Fließbeginn das gleiche Verhalten. Die elastische Dehnung beträgt hier  $\Delta_y$ . Danach erfährt der Werkstoff plastische Verformungen bei gleich bleibender Fließkraft  $F_y$ , bis die maximale Dehnung  $\Delta_u$  erreicht ist. Der Anteil der Energie, der von beiden Möglichkeiten dissipiert werden kann, wird durch die Schraffur dargestellt und ist flächengleich [85].

### 12.2.2 Methodik der Kapazitätsbemessung

In der Kapazitätsbemessung wird das Versagen durch eine klar definierte Hierarchie der Widerstände unterschiedlicher Bereiche im Tragwerk so gesteuert, dass ein gezielter plastischer Mechanismus entsteht, der ein Bauwerksversagen im Erdbebenfall verhindert. Vorwiegend werden hierzu Riegelmechanismen (vgl. Abb. 12-4 a)) gewählt. Hierbei findet die Energiedissipation zum größten Teil in den zahlreichen Fließgelenken der Riegel (dissipative Bereiche) statt, so dass lokal nur ein geringer Verformungsbedarf erforderlich ist.

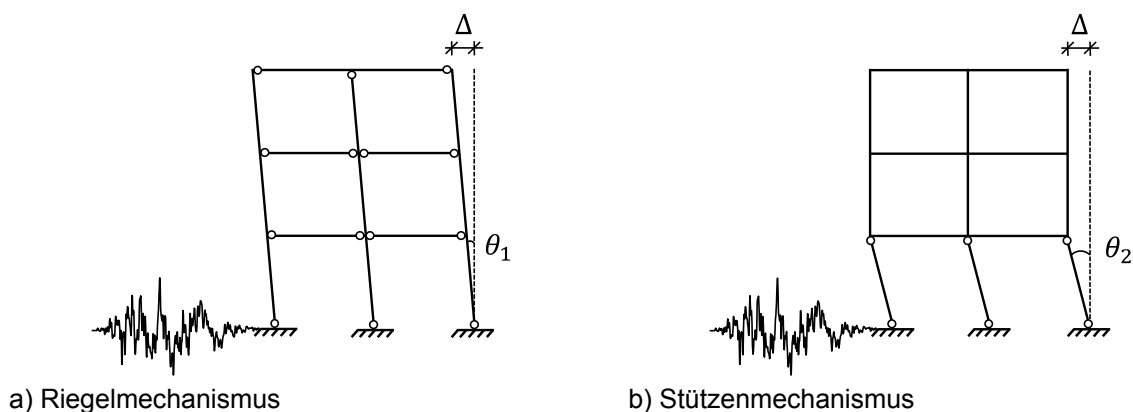


Abb. 12-4: Vergleich verschiedener Mechanismen nach [44]

Im Gegensatz dazu treten bei einem Stützenmechanismus (vgl. Abb. 12-4 b)) die plastischen Verformungen konzentriert in einem Stockwerk auf und erfordern so einen großen lokalen Deformationsbedarf. Demzufolge ist in den plastischen Gelenken des Riegelmechanismus ein wesentlich kleinerer plastischer Rotationswinkel ( $\theta_1$ ) als in den plastischen Gelenken des Stützenmechanismus ( $\theta_2$ ) erforderlich, um die gleiche Gesamtverformung  $\Delta$  zu erreichen. Solche Überlegungen führen dazu, Rahmensysteme für Erdbebeneinwirkung wenn möglich nach dem Prinzip *strong column - weak beam* auszulegen um einen Einsturz des Tragwerks zu verhindern. Hierbei muss jedoch sichergestellt werden, dass dissipative Stellen über ein ausreichendes plastisches Verformungsvermögen verfügen, um die globale Verformungsfähigkeit des Tragwerks sicherzustellen. Die nichtdissipativen Bereiche (hier die Stützen) werden mit einem erhöhten Widerstand ausgelegt, damit diese planmäßig im elastischen Bereich verbleiben. Die einzigen beim Riegelmechanismus unvermeidbaren potentiellen plastischen Gelenke in Stützen sind diejenigen am Rahmenfuss. Bei einem relativ kleinen plastischen Rotationswinkel ist dennoch an dieser Stelle eine sehr sorgfältige Bemessung und konstruktive Durchbildung erforderlich [44].

Die Kapazitätsbemessung zeigt, dass das Duktilitätsangebot und die möglichen Verschiebungen wesentlich sind im Vergleich zu den auftretenden Kräften bei dynamischer Einwirkung. Wächst die Beanspruchung über den Widerstand des Tragwerks hinaus, würde dies bei reiner Betrachtung der Kräfte zum Bruch führen. Bei ausreichend großen Duktilitäten besteht jedoch die Möglichkeit, die restliche Energie unter Aufrechterhaltung des Tragwiderstands über plastische Verformungen abzutragen um somit ein vorzeitiges Bauwerksversagen zu verhindern [85].

## 12.3 Übersicht bisheriger Ansätze zur analytischen Verformungsberechnung

### 12.3.1 Allgemeines

Die Auslegungsregeln für Verbindungen in dissipativen Bereichen im Rahmen der Methode der Kapazitätsbemessung wird in DIN EN 1998-1 [13] Abschnitt 6.5.5 geregelt. Nach Abschnitt 6.1.3 (2) sind generell für die Nachweise im Rahmen der Kapazitätsbemessung Überfestigkeiten der Streckgrenze (Überfestigkeit des Nennwerts der Streckgrenze gegenüber der tatsächlich messbaren Streckgrenze) durch die Anwendung eines Überfestigkeitsfaktors  $\gamma_{OV}$  zu berücksichtigen. Für Kehlnahtverbindungen ist nach Abschnitt 6.5.5 (3) die Tragfähigkeit mit dem Überfestigkeitsfaktor  $\gamma_{OV} = 1,25$  und einem zusätzlichen Faktor von 1,1 gegenüber der plastischen Tragfähigkeit des angeschlossenen dissipativen Bauteils unter Verwendung der Bemessungsstreckgrenze zu erhöhen.

Neben der Tragfähigkeit einer Kehlnahtverbindung gewinnt in diesen plastischen Bereichen die Fähigkeit Spannungsspitzen abzubauen zunehmend an Bedeutung. Dies äußert sich in Abschnitt 6.5.5 (1) durch die Forderung Konzentrationen plastischer Dehnungen zu begrenzen. Spannungsspitzen resultieren nicht nur aus dem Schweißprozess selbst, sondern sind auch von Art und Richtung der wirkenden Belastung abhängig. Der Abbau dieser Spannungen ist durch Spannungsumlagerung bei ausreichendem Verformungsvermögen möglich und erfolgt bei Erreichen der Fließspannung. Bei einer Spannungsumlagerung erfolgt der Abbau von Spannungen durch Plastizieren in den höchstbeanspruchten Bereichen und Vergrößerung der Spannung in den weniger stark beanspruchten Bereichen. Sobald der höchstbeanspruchte Bereich die Fließgrenze überschreitet, werden benachbarte Bereiche, die die Fließgrenze noch nicht erreicht haben, stärker zum Lastabtrag herangezogen. Steigt die Last weiter an, dehnt sich der plastizierende Bereich weiter aus, bis er sich bei Erreichen der Traglast über den gesamten Querschnitt erstreckt. Eine weitere Steigerung der Last ist dann nicht mehr möglich.

Demzufolge ist eine der grundlegendsten Voraussetzung für eine Spannungsumlagerung ein ausreichendes Verformungsvermögen bzw. ein duktileres Verhalten bei gleichzeitig ausreichendem Tragwiderstand. Um das Verformungsvermögen einer Kehlnaht für die Bemessung mit zu berücksichtigen, müssen Möglichkeiten gefunden werden, die Verformung abschätzen und im besten Fall auf analytischem Wege bestimmen zu können. Bereits an dieser Stelle ist deutlich darauf hinzuweisen, dass die Verformung einer Kehlnaht von vielen Einflussfaktoren abhängig ist: Die Zähigkeit und Festigkeit der verschweißten Grund- und Schweißzusatzwerkstoffe, die Inhomogenitäten im Schweißnahtgefüge, die Nahtdicke und die Nahtlänge, ebenso wie die Richtung der Belastung, um nur einige wenige zu nennen. Auf Basis dieser Erkenntnisse und mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen wurden in der Vergangenheit verschiedene Ansätze für die Verformungsberechnung einer Schweißnaht entwickelt. Jedoch fallen aufgrund der vielen Einflussfaktoren die Ansätze zur Verformungsberechnung

sehr unterschiedlich aus. In den folgenden Kapiteln werden einige ausgewählte Ansätze und deren Schlussfolgerungen vorgestellt. Eine detaillierte Betrachtung findet sich in der Bachelorarbeit von Schalk [89].

### 12.3.2 Lesik und Kennedy

Lesik und Kennedy [75] führten 42 Versuche an verschiedenen Kehlnähten mit zwei verschiedenen Nahtlängen durch. Es wurden nur Schweißzusatzwerkstoffe der gleichen Festigkeit verwendet und der Angriffswinkel  $\theta$  der Last variiert. Die maximale Verformung kann laut Lesik und Kennedy als die Verformung bei maximaler Last ( $\Delta_m$ ) oder bei Probenbruch ( $\Delta_u$ ) interpretiert werden. Für beide Fälle wurden hierzu analytische Ansätze aus den Messergebnissen der Testreihen abgeleitet. Als einziger Einflussparameter gilt hier der Lastangriffswinkel  $\theta$ . Dieser variiert zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$ , wobei die Last bei  $0^\circ$  parallel zur Schweißnahtachse angreift. In Abb. 12-5 ist die normalisierte Verformung  $\Delta_m$  zum Zeitpunkt der maximalen Last und in Abb. 12-6 die normalisierte Verformung  $\Delta_u$  zum Zeitpunkt des Probenbruchs über dem Lastangriffswinkel  $\theta$  aufgetragen. Die normalisierte Verformung auf der Ordinatenachse in Abb. 12-5 und Abb. 12-6 berechnet sich aus dem Quotienten der entsprechenden absoluten Verformung  $\Delta$  und der Schenkellänge  $d$  der Naht.

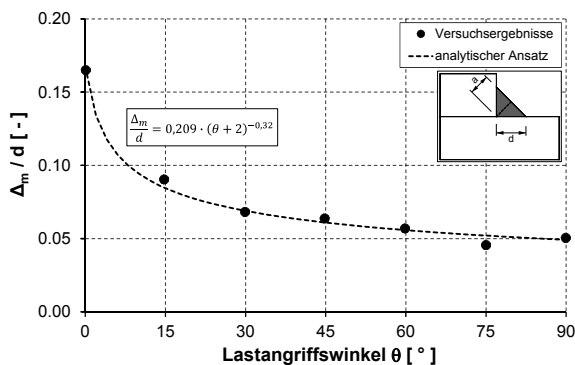


Abb. 12-5: Normalisierte Verformung  $\Delta_m$  zum Zeitpunkt der maximalen Last nach [75]

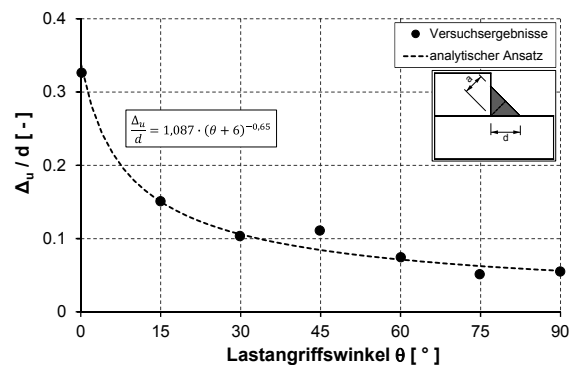


Abb. 12-6: Normalisierte Verformung  $\Delta_u$  zum Zeitpunkt des Probenbruchs nach [75]

Sowohl in Abb. 12-5 als auch in Abb. 12-6 ist deutlich zu erkennen, dass sich die Verformungsfähigkeit der Schweißnaht mit größer werdendem Lastangriffswinkel verringert. Demzufolge besitzt eine Flankenkehlnaht ( $\theta = 0^\circ$ ) eine größere Verformungsfähigkeit als eine Stirnkehlnaht ( $\theta = 90^\circ$ ).

### 12.3.3 Feder

Feder beschäftigte sich in seiner Dissertation [61] vorwiegend mit spannungsoptischen Modellversuchen an überlappten Kehlnaht-Laschenverbindungen und verschiedenen theoretischen Ansätzen zur Ermittlung der Kraftverteilung in den Schweißnähten. Feder konnte in

zwei Versuchsreihen mit spannungsoptischen Versuchen eine hinreichend genaue Bestimmung der Kraftanteile von Stirn- und Flankenkehlnähten ableiten. Er verfolgte einen geometrisch basierten Ansatz zur Berechnung der Verschiebung einer Schweißnaht unter Verwendung des Schubmoduls  $G$  von Baustahl und leitet einen Ansatz zur Berechnung des elastischen *Verschiebungsmoduls*  $k$  ab. Des Weiteren wies er darauf hin, dass sich nur dann vernünftige Werte für die Verschiebungsmodule  $k$  ergeben, wenn die Verformung des an die Naht angrenzenden Laschenbereichs in die Betrachtung miteinbezogen wird. Der in Kapitel 12.4 vorgestellte Ansatz zur Abschätzung der Verformung einer Flankenkehlnaht stützt sich auf den Grundgedanken von Feder. Eine detailliertere Beschreibung hierzu befindet sich in Kapitel 12.4.

### 12.3.4 Valtinat

Valtinat beschäftigte sich u. a. in seiner Dissertation [105] mit der Bestimmung des Verschiebungsmoduls. Jedoch wählte er den Begriff *Federwert*  $c$  und bestimmte diesen experimentell für verschiedene Nahtdicken und Nahtlängen im elastischen und plastischen Bereich. Das Versuchsprogramm umfasste 22 Probekörpergeometrien, die in insgesamt 53 Versuchen als doppelasschige Kehlnahtverbindungen geprüft wurden. Für die Versuchskörper wurde Baustahl mit der Materialgüte St 37 (S235) verwendet. Neben der Variation der Nahtdicke  $a$  und der Nahtlänge  $l$  wurde in einer Unterguppe zusätzlich der Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs untersucht.

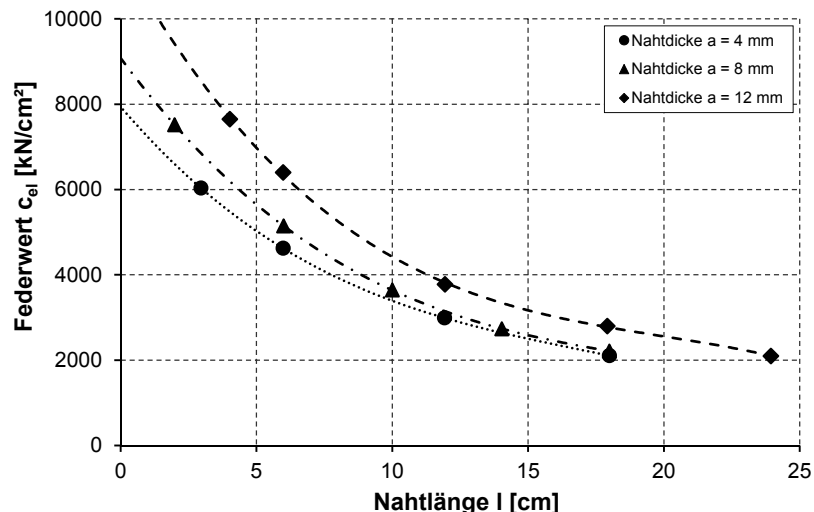


Abb. 12-7: Nahtlängen - Federwert - Diagramm im elastischen Bereich nach [105]

In Abb. 12-7 sind die einzelnen Ergebnisse der elastischen Federwerte  $c_{el}$  für die drei untersuchten Nahtdicken über den zugehörigen Nahtlängen dargestellt. Nach Valtinat wird der Federwert  $c_{el}$  durch Elastizitäts- und Schubmodul sowie durch die Reibungskraft aus Schrumpf- und Anpresswirkung beeinflusst.

Da die Reibungskraft nicht erfasst werden konnte und Elastizitäts- und Schubmodul nach der Auffassung von Valtinat bei allen Verbindungen übereinstimmen, gliedern sich die ermittelten Werte in Abb. 12-7 nach Nahtdicke  $a$  und Nahtlänge  $l$ . Die Trendlinien durch die einzelnen Versuchsergebnisse der entsprechenden Nahtdicken zeigen deutlich, dass der Federwert  $c_{el}$  sowohl von der Nahtdicke  $a$  als auch der Nahtlänge  $l$  abhängig ist. Mit zunehmender Nahtlänge  $l$  nimmt der Federwert  $c_{el}$  ab, wobei eine größere Nahtdicke  $a$  eine Steigerung des Federwerts  $c_{el}$  bewirkt.

### 12.3.5 Wenk

Wenk befasste sich in seiner Dissertation [107] mit Traglastuntersuchungen an langen Flankenkehlnähten. Die Grundlage seiner Untersuchungen war die Tatsache, dass infolge von Dehnungsunterschieden über die Länge in solchen Nähten stark unterschiedliche Beanspruchungen entstehen, die bei sprödem Materialverhalten frühzeitig an der ungünstigsten Stelle zu Rissen führen. Wenk konnte an kurzen Schweißnahtproben zeigen, dass unter praxisnahen Schweißbedingungen Nähte erzeugt werden, die ein beträchtliches Verformungsvermögen besitzen. Diese Erkenntnis konnte mit Versuchen an Langproben, bei denen dieses Verformungsvermögen wesentliche Laststeigerungen zuließ, bestätigt werden. Mit Hilfe der Methode der finiten Elemente konnte Wenk anschließend das tatsächliche Tragverhalten wirklichkeitsnaher erfassen.

Das Plastizieren der Nahtelemente berücksichtigte Wenk durch eine schrittweise Systemänderung und als Traglastkriterium wurde das Erreichen einer Grenzverschiebung eingeführt. Die Variation der verschiedenen Parameter lieferte das Ergebnis, dass die bestimmenden Faktoren für die Tragfähigkeit der Naht die Nahtlänge, die Nahtdicke und die Art des Lastabtrags sind. Wenk entwickelte sowohl für die Bestimmung der Tragfähigkeit als auch der Verformung der Schweißnaht ein verhältnismäßig aufwendiges Verfahren, das teilweise auf einer Methode der finiten Elemente stützt und letztendlich keinen ingenieurmäßigen Ansatz für die Praxis darstellt.



## 12.4 Bestimmung eines analytischen Ansatzes zur Verformungsberechnung

### 12.4.1 Allgemeines

In diesem Kapitel soll ein analytischer Ansatz zur Abschätzung der Verformung einer Flankenkehlnahtverbindung auf Basis der Versuchsergebnisse aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRICKTILE* [52] hergeleitet und mit statistischen Kriterien abgesichert werden.

Das Verformungsverhalten einer Flankenkehlnaht lässt sich grundsätzlich in zwei Bereiche gliedern: Einen anfänglichen elastischen und einen daran anschließenden plastischen Bereich. In Abb. 12-8 ist in rot ein typisches Verformungsverhalten dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich bis zur Fließlast  $F_y$  eine nahezu ideal-elastische Charakteristik einstellt. Ab diesem Punkt wächst die Relativverschiebung der Naht bei mäßigem Lastanstieg an und zeigt ein annähernd ideal-plastisches Verhalten.

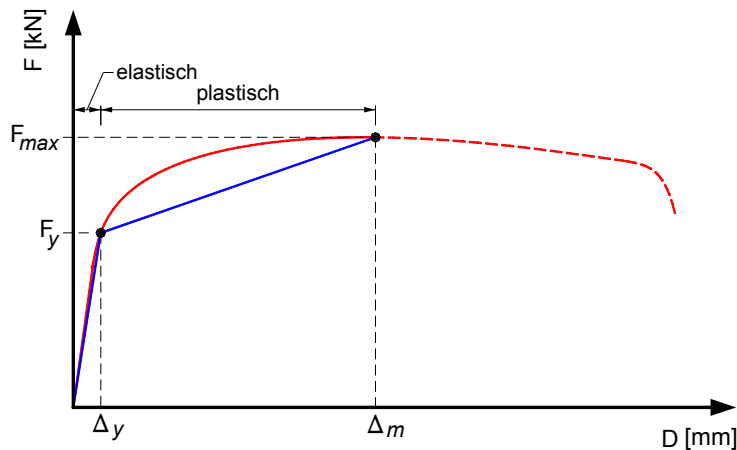


Abb. 12-8: Ergebnisgrößen des analytischen Ansatzes

Zur Berechnung des Verformungsvermögens einer Flankenkehlnaht ist eine Vereinfachung der tatsächlichen Verformungskurve unumgänglich. Gewählt wird hier, wie in Abb. 12-8 in blau dargestellt, eine bilineare Idealisierung mit einer elastischen Gerade und einer Verfestigungsgerade. Als markante Punkte sind die Kraft bei Fließbeginn  $F_y$  und die maximal gemessene Kraft  $F_{max}$  mit den zugehörigen Verformungen  $\Delta_y$  und  $\Delta_m$  zu nennen.

### 12.4.2 Verhältnis der Kraft bei Fließbeginn zu maximal gemessener Kraft

Unter Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden Versuchsergebnisse aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRICTILE* [52] an Flankenkehlnahtverbindungen unter reiner Schubbeanspruchung wurde in einem ersten Schritt das Verhältnis zwischen der Kraft bei Fließbeginn  $F_y$  und der maximal gemessenen Kraft  $F_{max}$  gebildet, um daraus eine entsprechende Tendenz abzuleiten. In Abb. 12-9 sind die Quotienten aus  $F_y$  und  $F_{max}$  getrennt für a) die Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und b) die Mischverbindungen aufgetragen.

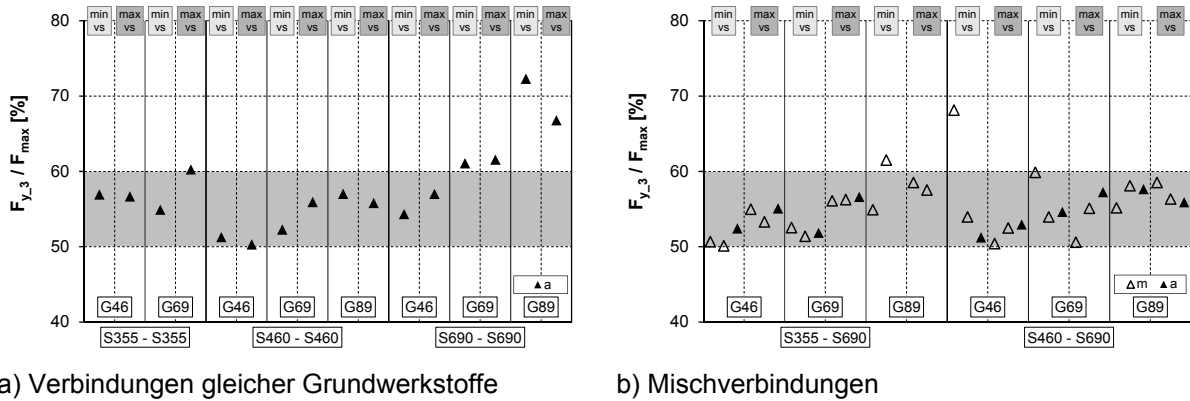


Abb. 12-9: Verhältnis der Kraft bei Fließbeginn zu maximal gemessener Kraft

Das Streuband der Werte lässt sich auf ein Verhältnis von 50 – 60 % eingrenzen. Für die weiteren Betrachtungen, vor allem zur Abschätzung der Verformung einer Flankenkehlnaht, wird für das Ende der elastischen Gerade der in Abb. 12-8 gezeichneten bilinearen Idealisierung die untere Grenze (50 %) des Streubandes nach Abb. 12-9 gewählt.

$$\frac{F_y}{F_{max}} = 0,5 \tag{12.1}$$

mit

- $F_y$  Kraft bei Fließbeginn [kN]
- $F_{max}$  Maximal gemessenen Kraft [kN]

Mit Hilfe von Gleichung (12.1) lässt sich für eine Flankenkehlnahtverbindung unter der Voraussetzung, dass die experimentell ermittelte maximal gemessene Kraft  $F_{max}$  bekannt ist, die Kraft zum Zeitpunkt des Fließbeginns  $F_y$  bzw. der Anfangspunkt der Verfestigungskurve abschätzen. Auf Grundlage dessen, kann eine vorhandene Längsschubkraft  $F_{\parallel, vorh}$  entsprechend Abb. 12-8 entweder dem elastischen oder dem plastischen Bereich der bilinearen Kurve zugeordnet werden.

### 12.4.3 Berechnung der Schubfederzahl

Abb. 12-10 zeigt zwei Laschen, die durch eine Flankenkehlnaht mit konstanter Nahtdicke  $a$  miteinander verschweißt sind. Die Verbindung wird mit der Zugkraft  $F$  beansprucht. In der Schweißnaht wirkt die Schubkraft bzw. der Schubfluss  $T_{\parallel}$  über die wirksame Schweißnahtlänge  $l_{eff}$ , so dass in der Lasche 1 die Normalkraft  $N_1$  und in der Lasche 2 die Normalkraft  $N_2$  herrschen. Bedingt durch die angreifenden Kräfte ist am linken Ufer die Lasche 1 hoch beansprucht, während die jeweils gegenüberliegende Lasche gering beansprucht ist.

Wenk hat in seiner Dissertation [107] detailliert die analytischen Gleichungen zur Berechnung der tatsächlichen Schubspannungs- und Normalkraftverläufe aufgeführt. In den meisten Fällen werden die tatsächlichen Verläufe durch idealisierte lineare Verläufe angenähert. Die Normalkraftverläufe verhalten sich bzgl. der Abweichung vom gestrichelt gezeichneten linearen Verlauf antimetrisch.

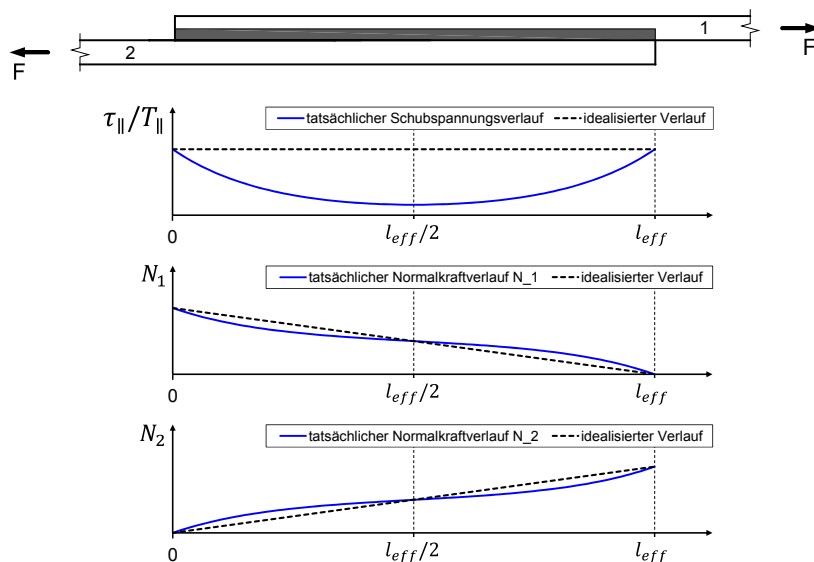


Abb. 12-10: Tatsächliche und idealisierte Schubspannungs- und Normalkraftverläufe einer Flankenkehlnaht nach Wenk [107]

Feder hat in seiner Dissertation [61] den *Verschiebungsmodul*  $k$  als Proportionalitätskonstante zwischen Kraft pro Längeneinheit (Schubkraft bzw. Schubfluss  $T_{\parallel}$ ) und der Verformung  $\Delta$  entsprechend Gleichung (12.2) eingeführt.

$$T_{\parallel} = K \cdot \Delta \quad [\text{kN/cm}] \quad (12.2)$$

mit

$T_{\parallel}$	Schubfluss	[kN/cm]
$K$	Schubfederzahl	[kN/cm <sup>2</sup> ]
$\Delta$	Verformung	[cm]

Häufig findet man auch die Begriffe *Federzahl* oder *Federwert* für den *Verschiebungsmodul*  $k$ . Im Folgenden wird in Anlehnung an die Überlegungen von Wenk [107] der Begriff der *Schubfederzahl*  $K$  verwendet.

Abb. 12-11 zeigt die Verformung  $\Delta$  einer Flankenkehlnaht unter einer reinen Schubbeanspruchung. Aus Gründen der geometrischen Verträglichkeit wird angenommen, dass sich das dunkelgrau schraffierte Nahtdreieck infolge der Schubbeanspruchung um die der oberen Lasche anliegenden Kante (Kante zwischen hell- und dunkelgrauer Fläche) neigt.

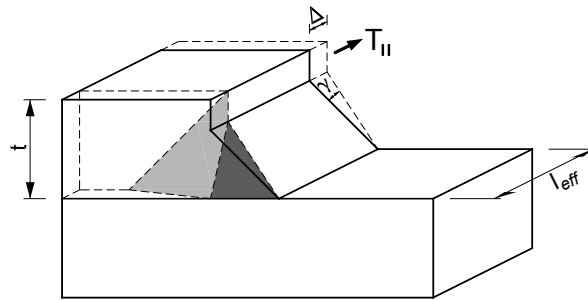


Abb. 12-11: Verformung und Verschiebung bei einer Flankenkehlnaht nach Feder [61]

In der Literatur basierte die Schubfederzahl stets auf dem Schubmodul  $G$  von Baustahl oder wurde in prozentualer Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls  $E$  ausgedrückt. Für die zur Verfügung stehenden experimentellen Ergebnisse wird die Schubfederzahl  $K$  in einem neuen Ansatz abhängig vom Schweißzusatzwerkstoff bestimmt. Dies basiert auf den gewonnenen Erkenntnissen aus den experimentellen Untersuchungen des Forschungsprojekts *SAFEBRITILE* [52]. Hier hat sich gezeigt, dass der Bruch stets in der Schweißnaht stattgefunden hat und das Verformungsverhalten stark von der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs abhängig ist (vgl. Schubspannungs-Verformungs-Diagramme aus Kapitel 8.7.1). Das Verformungsverhalten einer Flankenkehlnaht gliedert sich in einen elastischen und einen plastischen Bereich (vgl. Abb. 12-8), so dass für jeden der drei verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe (G46, G69 und G89) in dem Forschungsprojekt *SAFEBRITILE* eine elastische Schubfederzahl  $K_{el}$  und eine plastische Schubfederzahl  $K_{pl}$  ermittelt wurden.

Die elastische Schubfederzahl  $K_{el}$  nach Gleichung (12.3) berechnet sich mit dem Quotienten aus dem Schubfluss bei Fließbeginn  $T_{\parallel, \Delta y}$  und der zugehörigen Verformung  $\Delta y$ . Diese beiden Größen beziehen sich entsprechend den Erläuterungen aus Kapitel 6.7.2 auf die Evaluationsmethode 3 (75 % / 100 %).

$$K_{el}^* = \frac{T_{\parallel, \Delta y}}{\Delta y} \quad [kN/cm^2] \quad (12.3)$$

mit

$K_{el}^*$	Elastische Schubfederzahl	[kN/cm <sup>2</sup> ]
$T_{\parallel, \Delta y}$	Schubfluss bei Fließbeginn (Hier: $\Delta y_{,3}$ nach Methode 3)	[kN/cm]
$\Delta y$	Verformung bei Fließbeginn (Hier: $\Delta y_{,3}$ nach Methode 3)	[cm]

Die plastische Schubfederzahl  $K_{pl}$  nach Gleichung (12.4) ermittelt sich mit dem Quotienten aus dem Schubfluss zum Zeitpunkt der maximalen Spannung  $T_{\parallel, max}$  (vgl. Kapitel 6.6.2) und der zugehörigen Verformung  $\Delta_m$  (vgl. Kapitel 6.7.2).

$$K_{pl}^* = \frac{T_{\parallel, max}}{\Delta_m} \quad [kN/cm^2] \quad (12.4)$$

mit

$K_{pl}^*$	Plastischer Federwert	[kN/cm <sup>2</sup> ]
$T_{\parallel, max}$	Schubfluss bei maximaler Spannung $\tau_{\parallel, max}$	[kN/cm]
$\Delta_m$	Verformung bei maximaler Spannung $\tau_{\parallel, max}$	[cm]

Für eine allgemeingültige Anwendung der Schubfederzahl in Abhängigkeit vom Schweißzusatzwerkstoff wird entsprechend Gleichung (12.5) mit einem ersten Term eine Flächennormierung und mit einem zweiten Term eine Korrektur auf die tatsächliche Verformungshöhe durchgeführt. Die Flächennormierung ist dadurch begründet, dass die nach Gleichung (12.3) und (12.4) berechneten Schubfederzahlen auf die tatsächlich vorhandene Nahtdicke mit Einbrand zu beziehen sind. Die Korrektur auf die tatsächliche Verformungshöhe  $h$  wird in Kapitel 12.4.4 detailliert erläutert.

$$K = K^* \cdot \frac{\bar{a}_{EC}^2}{\bar{a}_{3D-Scan}^2} \cdot \frac{\bar{a}_{EC} + \frac{t}{\sqrt{2}}}{2 \cdot \bar{a}_{EC}} \quad [kN/cm^2] \quad (12.5)$$

mit

$K^*$	Schubfederzahl nach Gleichung (12.3) oder (12.4)	[kN/cm <sup>2</sup> ]
$\bar{a}_{3D-Scan}$	Mittelwert der abgeleiteten Nahtdicke aus dem dreidimensionalen Modell der Nahtbruchfläche	[cm]
$\bar{a}_{EC}$	Mittelwert der Nahtdicke bezogen auf den tatsächlichen Wurzelpunkt	[cm]

### Statistische Verteilung der elastischen und plastischen Schubfederzahlen

In Abb. 12-12 und Abb. 12-13 sind die Verteilungen und die statistischen Kenngrößen der elastischen und plastischen Schubfederzahlen abhängig vom Schweißzusatzwerkstoff dargestellt (vgl. Kapitel 8.7.4).

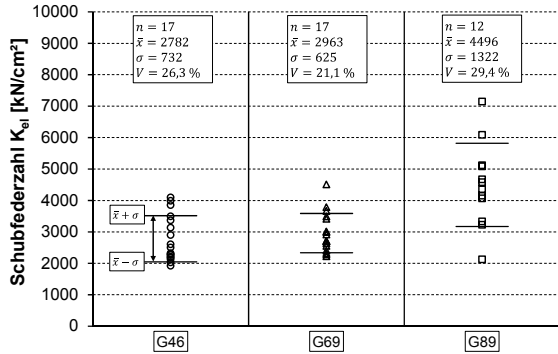


Abb. 12-12: Stat. Verteilung Schubfederzahl  $K_{el}$

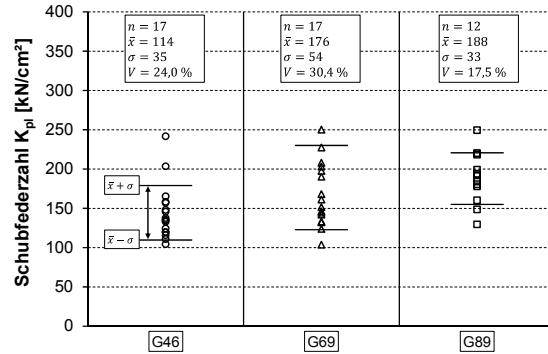


Abb. 12-13: Stat. Verteilung Schubfederzahl  $K_{pl}$

Tab. 12-1 fasst die statistischen Kenngrößen der elastischen und plastischen Schubfederzahlen der drei Schweißzusatzwerkstoffe zusammen. Die aufgeführten Werte sind bereits flächennormiert und auf die tatsächliche Verformungshöhe angepasst.

Tab. 12-1: Zusammenfassung der stat. Kenngrößen der el. und pl. Schubfederzahlen

	G46		G69		G89	
	$K_{el}$	$K_{pl}$	$K_{el}$	$K_{pl}$	$K_{el}$	$K_{pl}$
$\bar{x}$ [kN/cm²]	2782	114	2963	176	4496	188
$\sigma$ [kN/cm²]	732	35	625	54	1322	33
V [%]	26,3	24,0	21,1	30,4	29,4	17,5

Auffallend ist die starke Streuung bei allen drei Schweißzusatzwerkstoffen, sowohl für die elastischen (21,1 – 29,4 %) als auch für die plastischen (17,5 – 30,4 %) Schubfederzahlen, vgl. hierzu auch Abb. 12-14 und Abb. 12-15.

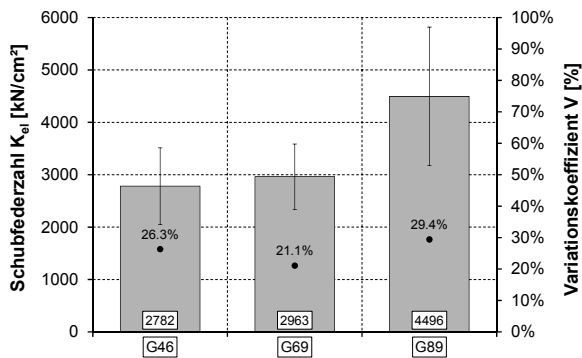


Abb. 12-14: Stat. Kenngrößen der elastischen Schubfederzahl  $K_{el}$

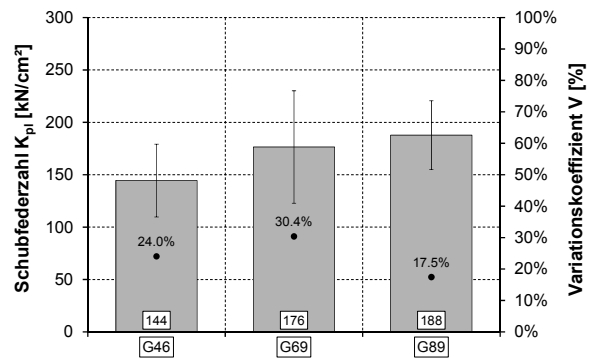
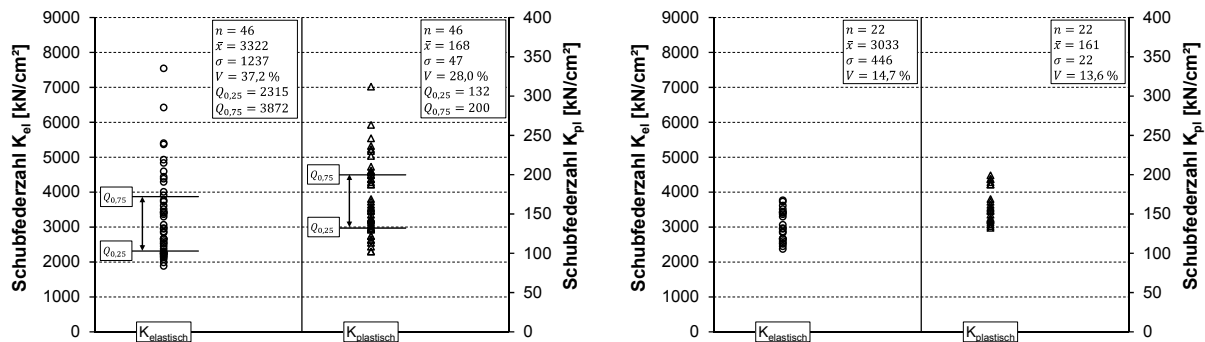


Abb. 12-15: Stat. Kenngrößen der plastischen Schubfederzahl  $K_{pl}$

Der Mittelwert der elastischen Schubfederzahl  $K_{el}$  (vgl. Abb. 12-14) des Schweißzusatzwerkstoffs G89 mit  $4496 \text{ kN/cm}^2$  hebt sich stark von den beiden anderen, relativ konstanten Werten mit  $2782 \text{ kN/cm}^2$  und  $2963 \text{ kN/cm}^2$  ab. Für die plastischen Schubfederzahlen  $K_{pl}$  zeigt sich mit zunehmender Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs eine tendenziell größer werdende Schubfederzahl. Diese Charakteristik spiegelt sich auch in den Schubspannungs-Verformungs-Diagrammen (vgl. Abb. 8-22, Abb. 8-23 und Abb. 8-24) in Kapitel 8.7.1 wider, die verdeutlicht haben, dass das Verformungsverhalten stark von der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs abhängig ist. Für die statistische Auswertung des analytischen Ansatzes zur Verformungsberechnung in Kapitel 12.4.5 wird die Schubfederzahl als Basisvariable des analytischen Verformungsmodells identifiziert. Da bislang keine Werte aus der Literatur vorlagen, wurden mit allen 46 zur Verfügung stehenden Versuchsergebnissen der elastischen und plastischen Schubfederzahlen die statistischen Kenngrößen der Basisvariable Schubfederzahl ermittelt, die in Abb. 12-16 a) dargestellt sind. Die tatsächliche Verteilung aller Versuchsergebnisse zeigt für den Variationskoeffizienten der plastischen Schubfederzahl mit  $V_{K_{pl}} = 28,0 \%$  zwar eine etwas geringere Streuung als für die elastische Schubfederzahl mit  $V_{K_{el}} = 37,2 \%$ , jedoch sind global betrachtet diese Streuungen nicht repräsentativ, so dass auf den Quartilabstand bzw. Quartilabstand  $QA = Q_{0,75} - Q_{0,25}$  zurückgegriffen wird. Unter dem Quartilsabstand versteht man die Differenz zwischen dem oberen  $Q_{0,75}$  und dem unterem  $Q_{0,25}$  Quartil. Der Quartilsabstand gibt an, in welchen Bereich sich die mittleren 50 % der Werte innerhalb einer betrachteten Gruppe befinden.



a) Tatsächliche Verteilung

b) Verteilung entsprechend Quartilabstand

Abb. 12-16: Statistische Verteilung der elastischen und plastischen Schubfederzahlen

Nach der Reduktion der Daten innerhalb der betrachteten Gruppe entsprechend dem Quartilsabstand ergibt sich, wie in Abb. 12-16 b) gezeigt, für die elastische Schubfederzahl ein Variationskoeffizient von  $V_{K_{el}} = 14,7 \%$  und für die plastische Schubfederzahl ein etwas geringerer Variationskoeffizient von  $V_{K_{pl}} = 13,6 \%$ . Für die statistischen Auswertungen in Kapitel 12.4.5 wird unter einer konservativen Annahme der Variationskoeffizient sowohl für die elastische als auch für die plastische Schubfederzahl zu  $V_{K_{el}} = V_{K_{pl}} = 15 \%$  angesetzt.

#### 12.4.4 Analytisches Modell zur Verformungsberechnung

Der nachfolgend entwickelte Ansatz zur analytischen Berechnung der Verformung einer Flankenkehlnaht baut auf den theoretischen Überlegungen von Feder [61] auf.

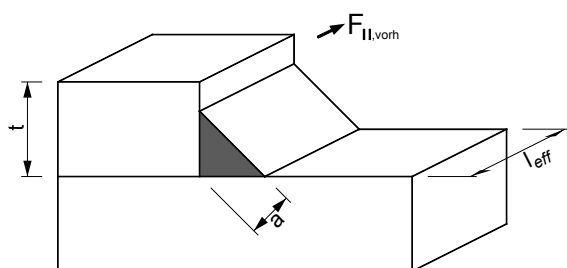


Abb. 12-17: Unverformte Flankenkehlnaht

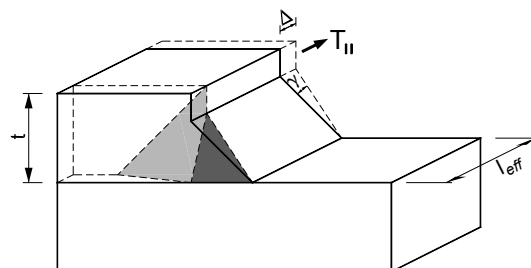


Abb. 12-18: Verformte Flankenkehlnaht

In Abb. 12-17 ist exemplarisch eine unverformte Flankenkehlnaht mit der angreifenden Schubbeanspruchung dargestellt. Der Schubfluss  $T_{||}$  berechnet sich nach Gleichung (12.6) als Quotient aus der angreifenden Längsschubkraft  $F_{||,vorh}$  an der belasteten kleineren, schmaleren Lasche und der wirksamen Schweißnahtlänge  $l_{eff}$  (vgl. Abb. 12-17).

$$T_{||} = \frac{F_{||,vorh}}{l_{eff}} \quad [kN/cm] \quad (12.6)$$

Abb. 12-18 zeigt exemplarisch das idealisierte Verformungsbild einer Flankenkehlnaht. Der theoretische Ansatz basiert auf der Annahme, dass sich das dunkelgrau schraffierte Nahtdreieck in Abb. 12-18 infolge der Schubbeanspruchung um die an der schmaleren Lasche anliegende Kante neigt. Für eine annähernd geometrisch verträgliche Verformung mit konstanter Schubverzerrung an der Nahtoberfläche bildet sich gleichzeitig innerhalb der schmaleren Lasche ein *Knick* (Übergang zwischen hellgrauer und neutraler Fläche) aus.

Für den theoretischen Ansatz wird entgegen dem in Kapitel 12.4.3 vorgestellten parabelförmigen Schubspannungsverlauf eine idealisierte konstante Schubspannungsverteilung entsprechend Gleichung (12.7) angenommen.

$$\tau_{||} = \frac{T_{||}}{a} \quad [kN/cm^2] \quad (12.7)$$

Die zugehörige konstante Schubverzerrung  $\gamma$  auf der Nahtoberfläche, auch Scherung genannt, bestimmt sich als Quotient aus Schubspannung  $\tau_{||}$  und Schubmodul  $G$ .

$$\gamma = \frac{\tau_{||}}{G} \quad [-] \quad (12.8)$$



Mit der in Kapitel 12.4.3 ermittelten Abhängigkeit der Schubfederzahl vom verwendeten Schweißzusatzwerkstoff der Flankenkehlnaht folgt durch die Substitution des Schubmoduls  $G$  durch die Schubfederzahl  $K$  bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Gleichung (12.7) die Berechnung der Schubverzerrung  $\gamma$  nach Gleichung (12.9).

$$\gamma = \frac{T_{\parallel}}{a \cdot K} \quad [-] \quad (12.9)$$

Die Verformung  $\Delta$  in der Ebene der Nahtoberfläche berechnet sich nach dem Produkt aus Schubverzerrung  $\gamma$  und der Verformungshöhe  $h$  (vgl. Abb. 12-19).

$$\Delta = \gamma \cdot h \quad [\text{cm}] \quad (12.10)$$

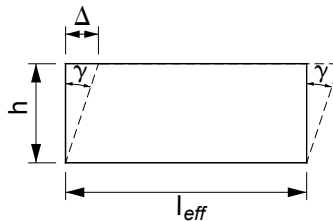


Abb. 12-19: Verformung in der Nahtoberfläche

Entsprechend Abb. 12-18 bildet sich für eine annähernd geometrisch verträgliche Verformung mit konstanter Schubverzerrung an der Nahtoberfläche innerhalb der schmaleren Lasche ein *Knick* aus. Dies bedeutet, dass sich der an die Kehlnaht angrenzende Bereich der belasteten kleineren Lasche an der Verformung mit beteiligt. Dieses Verhalten hat sich auch während und nach den experimentellen Untersuchungen an dem verformten Versuchskörper gezeigt (vgl. hierzu Abb. 12-20).

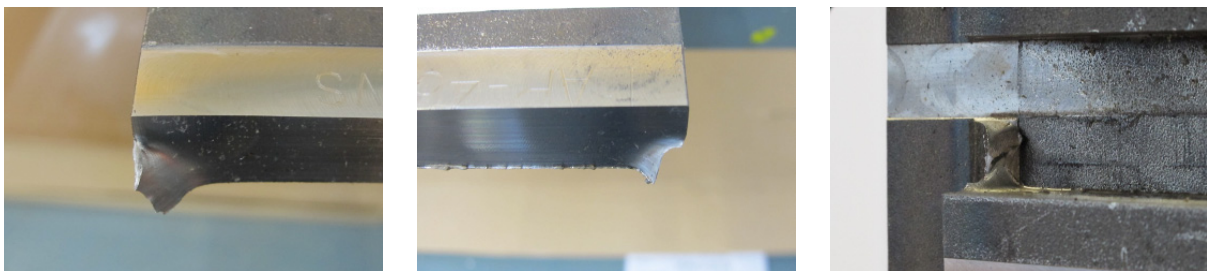


Abb. 12-20: Beteiligung angrenzender Bereiche der schmaleren Lasche

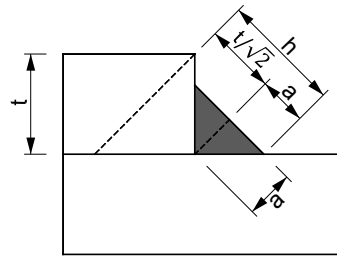


Abb. 12-21: Tatsächliche Verformungshöhe

Abb. 12-21 zeigt den Ansatz, dass der gesamte Bereich des oberen Laschenquerschnitts bis zur freien Ecke als Verformungshöhe  $h$  (vgl. Gleichung (12.11)) für die Berechnung der Verformung angesetzt werden kann.

$$h = \frac{t}{\sqrt{2}} + a \quad [\text{cm}] \quad (12.11)$$

Mit Gleichung (12.9) und (12.11) in Gleichung (12.10) eingesetzt, folgt der analytische Ansatz zur Abschätzung der Verformung einer Flankenkehlnaht nach Gleichung (12.12).

$$\Delta = \frac{T_{\parallel}}{a \cdot K} \cdot h = \frac{T_{\parallel}}{a \cdot K} \cdot \left( \frac{t}{\sqrt{2}} + a \right) = \frac{F_{\parallel, \text{vorh}}}{l_{\text{eff}} \cdot a \cdot K} \cdot \left( \frac{t}{\sqrt{2}} + a \right) \quad [\text{cm}] \quad (12.12)$$

mit

$F_{\parallel, \text{vorh}}$	Vorhandene Längsschubkraft	[kN]
$l_{\text{eff}}$	Wirksame Schweißnahtlänge nach Abb. 4-2	[cm]
$K$	Schubfederzahl abhängig von el. ( $K_{el}$ ) oder pl. ( $K_{pl}$ ) Verformung und Schweißzusatzwerkstoff	[kN/cm <sup>2</sup> ]
$t$	Blechdicke der schmaleren der verbundenen Laschen	[cm]
$a$	Nahtdicke	[cm]

## 12.4.5 Statistische Auswertung des analytischen Ansatzes zur Verformungsberechnung

### 12.4.5.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die experimentell ermittelten Verformungen, die in Kapitel 7.2 dokumentiert sind, mit den rechnerisch ermittelten Verformungen entsprechend dem analytischen Ansatz zur Bestimmung der Verformung einer Flankenkehlnaht nach Gleichung (12.13) verglichen. Anschließend erfolgt eine statistische Auswertung anhand der in Kapitel 10 vorgestellten Vorgehensweise.

Aufgrund der beschränkten Versuchsanzahl ( $n = 46$ ) für insgesamt drei unterschiedliche Schweißzusatzwerkstoffe und den vielen Einflussfaktoren auf das Verformungsverhalten der Schweißnaht, die in Kapitel 12.3 erläutert sind, sei bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der analytische Ansatz zur Verformungsberechnung einer Flankenkehlnaht zwar mit statistischen Methoden abgesichert wird, jedoch aufgrund der genannten Faktoren lediglich als Abschätzung der Verformung zu interpretieren ist.

Für das statistische Auswerteverfahren wird als theoretische Widerstandsfunktion  $r_t$  der in Gleichung (12.13) aufgeführte analytische Ansatz für die Verformung einer Flankenkehlnaht gewählt. Der Ansatz wird anhand von zwei Faktoren kalibriert: Der Anpassungsfaktor  $c_\Delta$  differenziert das Verformungsmodell, ob die elastische oder die plastische Verformung bestimmt werden soll. Der Korrelationsfaktor  $\beta_{\Delta,SZW}$  ist abhängig vom verwendeten Schweißzusatzwerkstoff und definiert das geforderte Sicherheitsniveau.

$$r_t = \Delta_t = c_\Delta \cdot \frac{F_{\parallel, \text{vorh}}}{\beta_{\Delta, SZW} \cdot l_{\text{eff}} \cdot a \cdot K} \cdot \left( \frac{t}{\sqrt{2}} + a \right) \quad [\text{cm}] \quad (12.13)$$

mit

$F_{\parallel, \text{vorh}}$	Vorhandene Längsschubkraft	[kN]
$l_{\text{eff}}$	Wirksame Schweißnahtlänge nach Abb. 4-2	[cm]
$K$	Schubfederzahl abhängig von el. ( $K_{el}$ ) oder pl. ( $K_{pl}$ ) Verformung und Schweißzusatzwerkstoff	[kN/cm <sup>2</sup> ]
$t$	Blechdicke der schmaleren der verbundenen Laschen	[cm]
$a$	Nahtdicke	[cm]
$c_\Delta$	Anpassungsfaktor abhängig von el. ( $c_{\Delta, el}$ ) oder pl. ( $c_{\Delta, pl}$ ) Verformung (vgl. Kapitel 12.4.5.2)	[-]
$\beta_{\Delta, SZW}$	Korrelationsfaktor abhängig vom Schweißzusatzwerkstoff (SZW)	[-]

Die Zuverlässigkeitsanforderung an den rechnerischen Nachweis wird durch die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  definiert. Diese Bedingung lässt sich, wie in Kapitel 9.4.3 dokumentiert, mit dem Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  ausdrücken. An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Teilsicherheitsbeiwerte für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) i. d. R. für eine Einstufung des Bauwerks in die Zuverlässigkeitsklasse RC 2 gemäß DIN EN 1990 Anhang B [6] gelten.

Für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren wird ein zugehöriger Zielwert für den Zuverlässigkeitsindex von  $\beta = 3,8$  bei einer zugehörigen Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  von  $10^{-6}$  gewählt. Der für den genannten Zeitraum zugehörige Zielwert für den Zuverlässigkeitsindex für nicht umkehrbare Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (GZG) ist mit  $\beta = 1,5$  wesentlich geringer. Aufgrund der begrenzt zur Verfügung stehenden Datenmenge (vgl. Tab. 12-2) und der in Kapitel 8.7.2 und 8.7.3 aufgezeigten verhältnismäßig großen Streuung der Versuchsergebnisse wird das Bemessungsmodell in Gleichung (12.13) als eine Abschätzung der Flankenkehlnahtverformung ausgelegt. Demzufolge wird für die Kalibrierung des Verformungsmodells analog zum Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) entsprechend Tab. 9-7 für eine Zuverlässigkeitsklasse RC 2 mit einer Versagenswahrscheinlichkeit von  $P_f = 10^{-6}$  ein zugehöriger Zielwert für den Zuverlässigkeitsindex von  $\beta = 3,8$  gewählt.

Aufgrund von Messfehlern bei der Datenaufzeichnung und offensichtlichen Ausreißern konnten nicht von allen 52 Versuchskörpern die experimentell ermittelten Verformungen für die statistische Auswertung herangezogen werden. Tab. 12-2 gibt einen Überblick über die Anzahl zur Verfügung stehender experimenteller Werte je Schweißzusatzwerkstoff.

Tab. 12-2: Zur Verfügung stehende Versuchsergebnisse für die statistische Auswertung bzgl. dem Verformungsvermögen

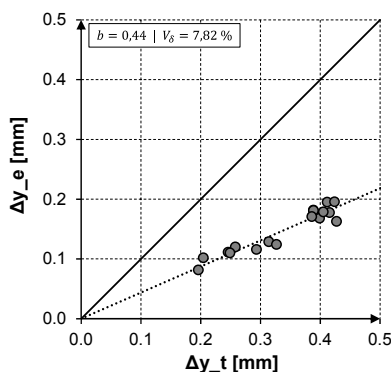
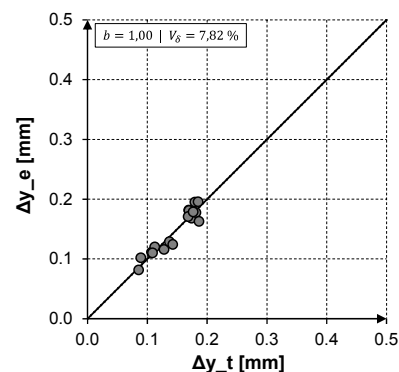
	<b>G46</b>	<b>G69</b>	<b>G89</b>
Anzahl $n$	17	17	12

## 12.4.5.2 Bestimmung des Anpassungsfaktors

In einem ersten Schritt wird für das Verformungsmodell ein Anpassungsfaktor  $c_{\Delta}$  bestimmt, der abhängig davon ist, ob die elastische Verformung  $\Delta_y$  zum Zeitpunkt des Fließbeginns oder die Verformung  $\Delta_m$  zum Zeitpunkt der maximalen Spannung ermittelt werden soll. Sowohl für die Ermittlung des Anpassungsfaktors  $c_{\Delta}$  und später auch für die Bestimmung des Korrelationsfaktors  $\beta_{\Delta, SZW}$  wurde die in Kapitel 10.4 beschriebene statistische Vorgehensweise nach DIN EN 1990 Anhang D [6] für das Verfahren V1 (vgl. Kapitel 11.5, Tab. 11-11) zur Ermittlung des Variationskoeffizienten  $V_{r_t}^2$  der Basisvariablen  $X_j$  und der Standardabweichung  $Q$  der Widerstandsfunktion  $r_t$  im Rahmen dieser Arbeit als Optimierungsalgorithmus programmiert. Hierbei entspricht die Gleichung (12.13) für die theoretische Verformung der Zielfunktion. Für den Optimierungsalgorithmus wurde als Zielwert die Mittelwertkorrektur  $b$  formuliert. Die Mittelwertabweichung bildet das Minimum der Abstandsquadrate und stellt als globaler Wert der betrachteten Gruppe ein Indikator für die Genauigkeit des Modells dar.

Grafisch dargestellt entspricht die Mittelwertkorrektur einer Ausgleichsgeraden durch die experimentellen Messwerte  $\Delta_{e,i}$ , die über die modellbasierenden Verformungen  $\Delta_{t,i}$  aufgetragen werden. Sofern das analytische Modell exakt wäre, ergäbe sich eine Mittelwertabweichung von  $b = 1,0$ . Dieser Wert ( $b = 1,0$ ) wird als Zielwert für den Optimierungsalgorithmus zur Bestimmung des Anpassungsfaktors  $c_{\Delta}$  definiert.

Abb. 12-22 zeigt die Ermittlung des elastischen Anpassungsfaktors  $c_{\Delta, el}$  am Beispiel des Schweißzusatzwerkstoffs G46. In Abb. 12-22 a) sind die experimentellen Messwerte der Verformung bei Fließbeginn  $\Delta_{y_e, i}$  über die theoretischen Verformungen  $\Delta_{y_t, i}$  aufgetragen. Ein Anpassungsfaktor  $c_{\Delta, el}$  von 0,437 bewirkt eine Korrektur der Mittelwertabweichung  $b$  von 0,44 auf den geforderten Wert von  $b = 1,0$ .

a) Mittelwertkorrektur:  $b = 0,44$ b) Mittelwertkorrektur:  $b = 1,00$  |  $c_{\Delta, el} = 0,437$ Abb. 12-22: Schweißzusatzwerkstoff G46 -  $\Delta_e$ - $\Delta_t$  - Korrelation (elastische Verformung  $\Delta_y$ )

In Tab. 12-3 sind die Ergebnisse des Optimierungsalgorithmus bzgl. den elastischen und plastischen Anpassungsfaktoren für jeden Schweißzusatzwerkstoff angegeben. Aus den jeweils drei vorhandenen Ergebnissen wird ein Mittelwert  $\bar{x}$  für einen plastischen und einen elastischen Anpassungsfaktor gebildet. Für den plastischen Anpassungsfaktor  $c_{\Delta,pl}$  ergibt sich mit einem Variationskoeffizienten von 3,4 % eine sehr geringe Streuung der drei Werte. Im Gegensatz dazu ist die Streuung bei den elastischen Anpassungsfaktoren  $c_{\Delta,el}$  mit 18,1 % zwar um ein Vielfaches höher, jedoch noch in einem akzeptablen Rahmen.

Tab. 12-3: Ergebnisse des Optimierungsalgorithmus bzgl. den el. und pl. Anpassungsfaktoren  $c_{\Delta}$

	elastischer Anpassungsfaktor $c_{\Delta,el}$	plastischer Anpassungsfaktor $c_{\Delta,pl}$
	[J]	[J]
G46	0,437	0,203
G69	0,478	0,202
G89	0,332	0,191
$\bar{x}$	0,416 $\Rightarrow$ <b>0,4</b>	0,199 $\Rightarrow$ <b>0,2</b>
$V$	18,1 %	3,4 %

Für die statistische Auswertung zur Bestimmung des Korrelationsfaktors  $\beta_{\Delta,SZW}$  wird unabhängig vom Schweißzusatzwerkstoff der elastische Anpassungsfaktor zu  $c_{\Delta,el} = 0,4$  und der plastische Anpassungsfaktor zu  $c_{\Delta,pl} = 0,2$  festgelegt. Eine Übersicht aller Schweißzusatzwerkstoffe bzgl. den Ergebnissen zur Ermittlung des elastischen und plastischen Anpassungsfaktors  $c_{\Delta}$  ist in Anhang D dargestellt.

### 12.4.5.3 Bestimmung des Korrelationsfaktors

Zur Kalibrierung des Verformungsmodells nach Gleichung (12.13) anhand des Korrelationsfaktors  $\beta_{\Delta,SZW}$  wird die in Kapitel 10.4 beschriebene statistische Vorgehensweise nach DIN EN 1990 Anhang D [6] mit dem Verfahren V1 (vgl. Kapitel 11.5, Tab. 11-11) zur Ermittlung des Variationskoeffizienten  $V_{r_t}^2$  der Basisvariablen  $X_j$  und der Standardabweichung  $Q$  der Widerstandsfunktion  $r_t$  gewählt. Im Rahmen der statistischen Auswertung werden für jeden der drei Schweißzusatzwerkstoffe sowohl für die elastische ( $\Delta_y$ ) als auch die plastische ( $\Delta_m$ ) Verformung Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M^*$  ermittelt, die sich aus dem für  $\alpha_R \cdot \beta = 3,04$  berechneten Bemessungswert  $\Delta_d$  und dem nominellen Wert  $\Delta_{t,nom}$  nach Gleichung (12.13) ergeben. Für die Ermittlung der nominellen Verformung  $\Delta_{t,nom}$  werden die Nennwerte angesetzt. Demzufolge bestimmt sich der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$  mittels der Anwendung von Nennwerten als Eingangsgröße nach Gleichung (12.14).

$$\gamma_M^* = \frac{\Delta_{t,nom}}{\Delta_d} \quad (12.14)$$

mit

$\gamma_M^*$	Teilsicherheitsbeiwert
$\Delta_{t,nom}$	Verformung mit nominellen Eingangswerten berechnet
$\Delta_d$	Bemessungswert der Verformung

Die  $\Delta_{t,nom}$ -Funktion ist genau dann die richtige charakteristische Funktion, wenn  $\gamma_M^*$  kleiner oder gleich als der geforderte Teilsicherheitsbeiwert für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ist. Da der Eurocode 3 keine Angaben über einen Teilsicherheitsbeiwert für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit macht, wird an dieser Stelle auf das Element 722 der DIN 18800-1 [1] referenziert, in dem für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit im Allgemeinen ein Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_M = 1,0$  festgelegt wird.

Sofern der geforderte Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,target} = 1,0$  nicht eingehalten ist, bestimmt sich der Korrelationsfaktor  $\beta_{\Delta,SZW}$  als Quotient aus dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M^*$  und dem geforderten Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,target}$ . Durch den Korrelationsfaktor  $\beta_{\Delta,SZW}$ , der als Divisor in das Bemessungsmodell eingeht, wird das geforderte Sicherheitsniveau zwischen nomineller Verformung  $\Delta_{t,nom}$  und dem Bemessungswert der Verformung  $\Delta_d$  definiert. Neben den Mittelwertabweichungen und Modellunsicherheiten, die sich aus dem Vergleich der Versuchsergebnisse mit den theoretischen Ergebnissen ergeben, werden auch weitere Streuungen von Basisvariablen berücksichtigt, die durch die vorhandenen Versuchskörper nicht ausreichend statistisch repräsentiert sind.

Als Basisvariablen für das Verformungsmodell nach Gleichung (12.13) werden die Schubfederzahl  $K$ , die Blechdicke  $t$  und die Nahtdicke  $a$  definiert. Die dafür ermittelten und schlussendlich für die statistische Auswertung gewählten Variationskoeffizienten sind in Tab. 12-4 aufgeführt. Für die Ermittlung der Variationskoeffizienten  $V_K$  der Schubfederzahl sei auf Kapitel 12.4.3 und für den Variationskoeffizienten  $V_{a_{EC}}$  auf Kapitel 11.4.4 verwiesen. Der Variationskoeffizient  $V_t$  der Blechdicke  $t$  ist der Dissertation von Stangenberg [97] entnommen.

Tab. 12-4: Variationskoeffizienten der Basisvariablen

Schubfederzahl $K$		Blechdicke $t$	Nahtdicke $a_{EC}$
$V_{K,el}$	$V_{K,pl}$	$V_t$	$V_{a_{EC}}$
15,0 %	15,0 %	3,0 %	12,5 %

In Tab. 12-5 sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung bzgl. der Korrelationsfaktoren  $\beta_{\Delta,SZW}$  aufgeführt. Auffallend ist, dass sich die Variationskoeffizienten  $V_r$ , bestehend aus dem Schätzwert für den Variationskoeffizienten  $V_\delta$  für das Streumaß  $\delta$  und dem Variationskoeffizienten  $V_{X_j}$  aller Basisvariablen, für die beiden Schweißzusatzwerkstoffe G69 und G89 für den elastischen Bereich abheben. Dies lässt sich auf den deutlich größeren Variationskoeffizienten  $V_\delta$  für das Streumaß  $\delta$  zurückführen.

Tab. 12-5: Ergebnisse der statistischen Auswertung bzgl. der Korrelationsfaktoren  $\beta_{\Delta,SZW}$

SZW	el / pl	n	$V_{K,el}$	$V_{K,pl}$	$V_t$	$V_{a_{EC}}$	$c_\Delta$	Verfahren 1 (V1)				
								$b$	$V_\delta$	$V_r$	$\gamma_M^*$	$\beta_{\Delta,SZW} = \frac{\gamma_M^*}{\gamma_{M,target}}$
			[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]
G46	el	17	15,0	-	3,0	12,5	0,4	1,09	7,82	0,212	2,36	<b>2,36</b>
G69	el	17	15,0	-	3,0	12,5	0,4	1,20	14,50	0,245	2,56	<b>2,56</b>
G89	el	12	15,0	-	3,0	12,5	0,4	0,83	15,08	0,249	3,88	<b>3,88</b>
G46	pl	17	-	15,0	3,0	12,5	0,2	1,01	8,62	0,216	2,58	<b>2,58</b>
G69	pl	17	-	15,0	3,0	12,5	0,2	1,01	8,72	0,216	2,63	<b>2,63</b>
G89	pl	12	-	15,0	3,0	12,5	0,2	0,96	8,11	0,214	2,77	<b>2,77</b>

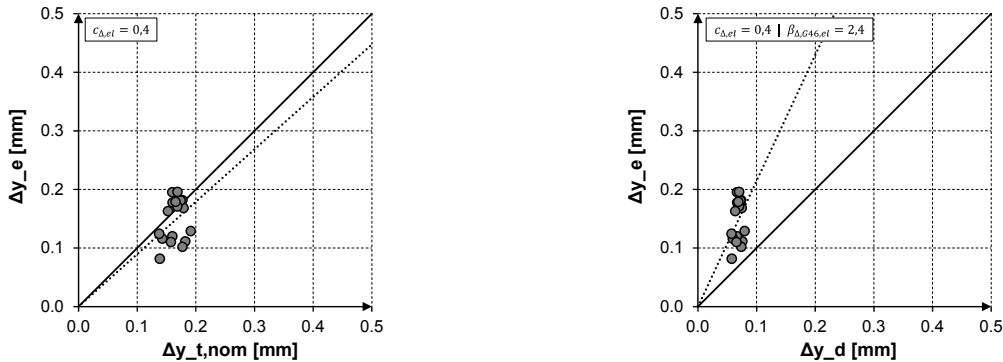
Als Ergebnis der statistischen Auswertung zur Bestimmung des Korrelationsfaktors  $\beta_{\Delta,SZW}$  werden die Tab. 12-6 aufgeführten Werte für den analytischen Ansatz zur Bestimmung der Verformung einer Flankenkehlnaht festgelegt.

Tab. 12-6: Vorschlag für Korrelationsfaktoren  $\beta_{\Delta,SZW}$

			G46	G69	G89
elastisch	$\beta_{\Delta,SZW,el}$	[-]	<b>2,4</b>	<b>2,6</b>	<b>3,9</b>
plastisch	$\beta_{\Delta,SZW,pl}$	[-]	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>2,8</b>



In Abb. 12-23 a) ist die Korrelation zwischen den experimentellen Messwerten der Verformung bei Fließbeginn  $\Delta y_{e,i}$  und den nominellen theoretischen Verformungen  $\Delta y_{t,nom,i}$  inklusive eines elastischen Anpassungsfaktors von  $c_{\Delta,el} = 0,4$  aufgezeigt. Die nominellen theoretischen Verformungen  $\Delta y_{t,nom,i}$  sind nach Tab. 12-1 mit den Mittelwerten der elastischen und plastischen Schubfederzahlen entsprechend des Schweißzusatzwerkstoffs berechnet.



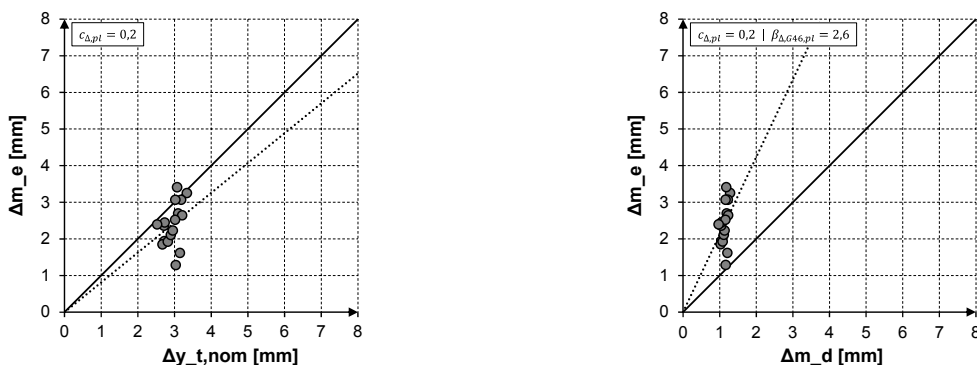
a) Experimentelle vs. nominelle Werte

b) Experimentelle vs. Bemessungswerte

Abb. 12-23: Schweißzusatzwerkstoff G46 -  $\Delta_e - \Delta_{t,nom} / \Delta_e - \Delta_d$  - Korrelation (elastische Verformung  $\Delta_y$ )

Abb. 12-23 b) zeigt die experimentellen Messwerte der Verformung bei Fließbeginn  $\Delta y_{e,i}$  über die Bemessungswerte  $\Delta y_{d,i}$  aufgetragen. Die Bemessungswerte  $\Delta y_{d,i}$  erfüllen durch Anwendung des Korrelationsfaktors  $\beta_{\Delta,SZW}$  auf die nominellen Verformung  $\Delta_{t,nom,i}$  das geforderte Sicherheitsniveau.

Abb. 12-24 zeigt für denselben Schweißzusatzwerkstoff G46 die Korrelation zwischen den experimentellen Messwerten der Verformung bei maximaler Spannung  $\Delta_m$  und den a) nominellen theoretischen Verformungen  $\Delta y_{t,nom,i}$  inklusive eines elastischen Anpassungsfaktors von  $c_{\Delta,el} = 0,2$  und b) den Bemessungswerten  $\Delta y_{d,i}$  inklusive des Korrelationsfaktors  $\beta_{\Delta,SZW}$ .



a) Experimentelle vs. nominelle Werte

b) Experimentelle vs. Bemessungswerte

Abb. 12-24: Schweißzusatzwerkstoff G46 -  $\Delta_e - \Delta_{t,nom} / \Delta_e - \Delta_d$  - Korrelation (plastische Verformung  $\Delta_m$ )

Eine Übersicht der Ergebnisse zur Ermittlung des elastischen und plastischen Korrelationsfaktors  $\beta_{\Delta,SZW}$  aller Schweißzusatzwerkstoffe ist in Anhang E gegeben.

## 12.5 Vorschlag eines analytischen Ansatzes zur Verformungsberechnung

In diesem Kapitel soll der analytische Ansatz zur Abschätzung der Verformung einer Flankenkehlnahtverbindung dargestellt werden. Ziel des analytischen Ansatzes ist, die Verformung einer Flankenkehlnaht an einer beliebigen Stelle entlang der bilinearen Kurve gemäß Abb. 12-25 zu bestimmen. Voraussetzung für die Berechnung ist die Kenntnis der vorhandenen Kehlnahtdicke  $a$ , der wirksamen Schweißnahtlänge  $l_{eff}$ , der vorhandenen Längsschubkraft  $F_{\parallel, vorh}$  und des verwendeten Schweißzusatzwerkstoffs. An dieser Stelle sei nochmal darauf hingewiesen, dass der analytische Ansatz ausschließlich auf Flankenkehlnahtverbindungen unter reiner Schubbeanspruchung anzuwenden ist.

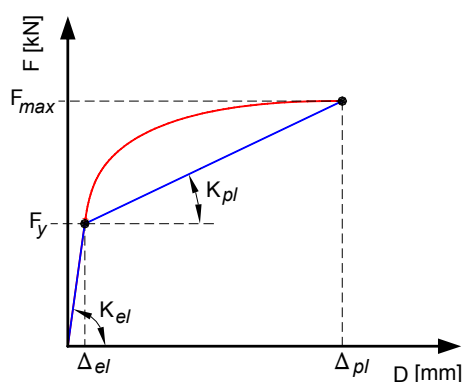


Abb. 12-25: Bilineare Verformungskurve einer Flankenkehlnaht

In Gleichung (12.15) ist der allgemein gefasste Ausdruck zur Bestimmung der Verformung einer Flankenkehlnaht dargestellt.

$$\Delta = c_{\Delta} \cdot \frac{F_{\parallel, vorh}}{\beta_{\Delta, SZW} \cdot l_{eff} \cdot a \cdot K} \cdot h \quad [\text{cm}] \quad (12.15)$$

mit

$F_{\parallel, vorh}$	Vorhandene Längsschubkraft	[kN]
$l_{eff}$	Wirksame Schweißnahtlänge nach Abb. 4-2	[cm]
$K$	Schubfederzahl abhängig von el. ( $K_{el}$ ) oder pl. ( $K_{pl}$ ) Verformung und Schweißzusatzwerkstoff	[kN/cm <sup>2</sup> ]
$a$	Nahtdicke	[cm]
$h$	Tatsächliche Verformungshöhe	[cm]
$c_{\Delta}$	Anpassungsfaktor abhängig von el. ( $c_{\Delta, el}$ ) oder pl. ( $c_{\Delta, pl}$ ) Verformung	[-]
$\beta_{\Delta, SZW}$	Korrelationsfaktor abhängig vom Schweißzusatzwerkstoff (SZW)	[-]

Dem Verformungsmodell in Gleichung (12.15) liegt eine vereinfachte Spannungsverteilung zugrunde, die zwar dem Gleichgewicht entspricht, aber nicht die tatsächliche Verteilung widerspiegelt. Für die Berechnung der Verformung der Flankenkehlnaht wird in der tatsächlichen Verformungshöhe  $h$  (vgl. Abb. 12-21) sowohl der Anteil der Naht selbst als auch ein Anteil der angrenzenden, schmaleren Lasche mit berücksichtigt.

Die tatsächliche Verformungshöhe  $h$  wurde in Kapitel 12.4.4 in Gleichung (12.11) zu  $h = t/\sqrt{2} + a$  festgelegt. Feder hat in seiner Dissertation [61] bereits festgestellt, dass sich für die Verformung einer Flankenkehlnaht nur sinnvolle Werte ergeben, wenn man gleichzeitig die Verformung der an die Schweißnaht grenzenden schmaleren Lasche mit berücksichtigt, so dass er den Ansatz für die tatsächliche Verformungshöhe nach Gleichung (12.11) definierte. Nach Meinung des Autors kann dieser Ansatz jedoch nicht auf beliebig große Laschendicken  $t$  angewendet werden. Demzufolge wurde die Grenzbedingung nach Gleichung (12.16) formuliert. Hierbei soll eine obere Grenze für die tatsächliche Verformungshöhe über einen Faktor  $x$  der Nahtdicke  $a$  festgelegt werden.

$$h \leq x \cdot a \quad \text{bzw.} \quad \frac{t}{\sqrt{2}} + a \leq x \cdot a \quad (12.16)$$

Der hier beschriebene analytische Ansatz wurde anhand der Daten aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRICKTILE* [52] kalibriert und die Grenzbedingung (12.16) dementsprechend mit der Nahtdicke  $a = 5 \text{ mm}$  und der Laschendicke  $t = 15 \text{ mm}$  verifiziert. Als Ergebnis lässt sich daraus konservativ betrachtet ein Faktor  $x = 3$  ableiten. Dementsprechend wird die tatsächliche Verformungshöhe  $h$  für die Berechnung der Verformung in zwei Bereiche eingeteilt: Sofern die vorhandene Verformungshöhe  $h_{vorh} = t_{vorh}/\sqrt{2} + a_{vorh}$  kleiner als das 3-fache der Nahtdicke  $a$  ist, gilt Gleichung (12.17). Ist jedoch die vorhandene Verformungshöhe  $h_{vorh}$  größer oder gleich dem 3-fachen der Nahtdicke  $a$ , gilt für die Verformungshöhe  $h$  die Obergrenze nach Gleichung (12.18).

$$\text{Bereich 1:} \quad h_{vorh} < 3 \cdot a \quad \Rightarrow \quad h = \frac{t}{\sqrt{2}} + a \quad (12.17)$$

$$\text{Bereich 2:} \quad h_{vorh} \geq 3 \cdot a \quad \Rightarrow \quad h = 3 \cdot a \quad (12.18)$$

Die Unterteilung in zwei Bereiche basiert auf der Grundlage der Daten aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRICKTILE* [52], die zur statistischen Auswertung des Verformungsvermögens zur Verfügung standen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Ansatz zur bereichsweisen Einteilung anhand zusätzlicher Untersuchungen an geschweißten Flankenkehlnahtverbindungen mit unterschiedlichen Laschen- und Nahtdicken zu verifizieren ist, um den Einfluss der Laschendicke  $t$  und der Nahtdicke  $a$  detaillierter herauszuarbeiten.

Abb. 12-26 zeigt grafisch aufgearbeitet die beiden Bereiche 1 und 2 für den Ansatz der tatsächlichen Verformungshöhe  $h$  für gängige Nahtdicken.

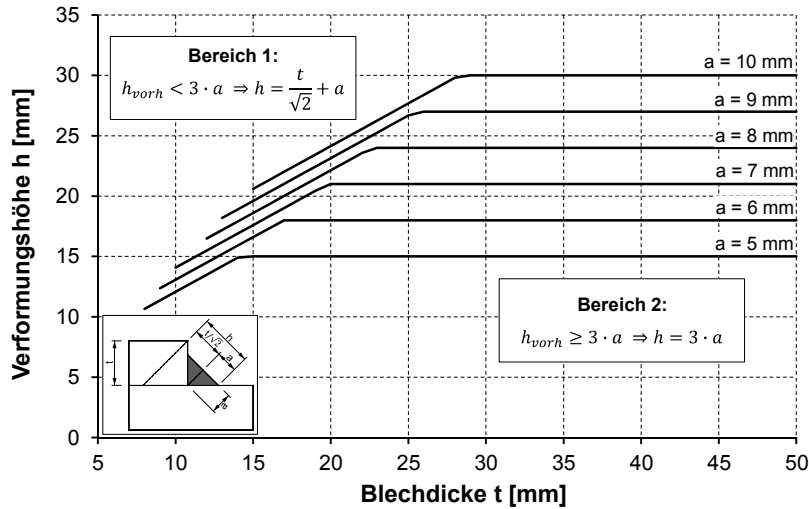


Abb. 12-26: Differenzierung der tatsächlichen Verformungshöhe  $h$

In Abb. 12-27 ist als Flussdiagramm zusammengefasst die Berechnungsabfolge für die analytischen Bestimmung der Verformung eine Flankenkehlnaht abgebildet.

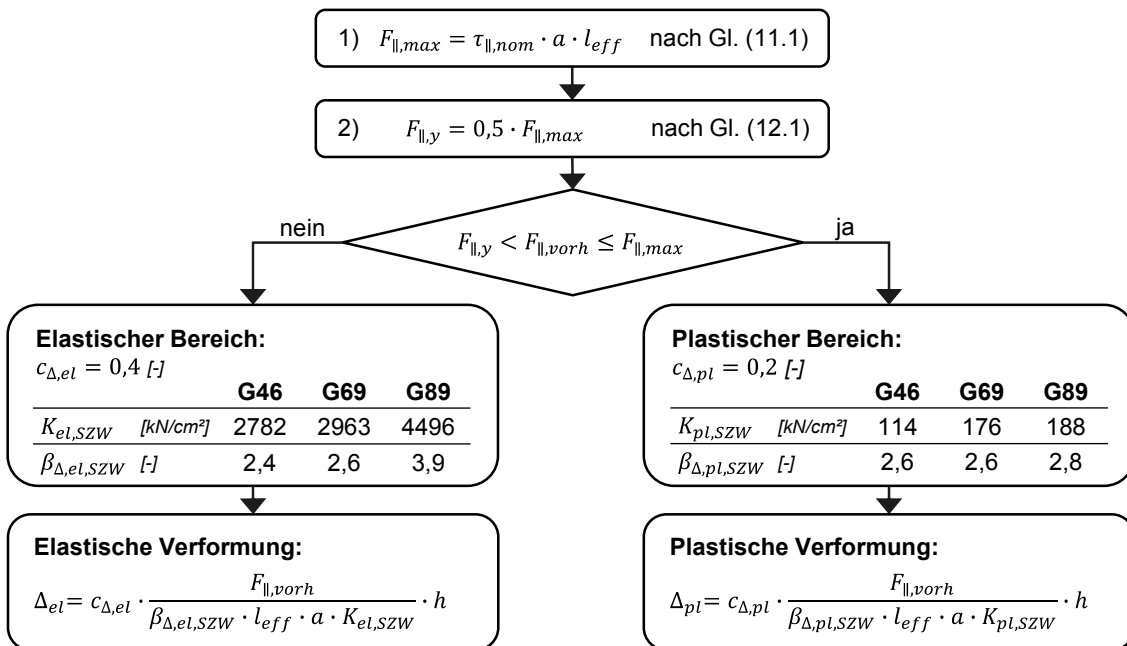


Abb. 12-27: Flussdiagramm zur analytischen Verformungsberechnung einer Flankenkehlnaht

Demzufolge wird in einem ersten Schritt die maximal aufnehmbare Längsschubkraft  $F_{\parallel,max}$  über die nominelle Längsschubspannung  $\tau_{\parallel,nom}$  nach Gleichung (11.1) (ohne Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M2}$ ) berechnet. In einem zweiten Schritt wird die Längsschubkraft  $F_{\parallel,y}$  konservativ nach Gleichung (12.1) abgeschätzt. Die sich daran anschließende Prüfung stellt fest,

ob sich die vorhandene Längsschubkraft  $F_{\parallel, vorh}$  im elastischen oder plastischen Bereich der bilinearen Idealisierung des tatsächlichen Verformungsverhaltens der Flankenkehlnaht befindet. Die elastische oder plastische Verformung berechnet sich unter Berücksichtigung des jeweiligen Anpassungsfaktors  $c_{\Delta}$ , der entsprechenden Schubfederzahl  $K_{el, SZW}$  und des entsprechenden Korrelationsfaktor  $\beta_{\Delta, SZW}$ . Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass sowohl die Schubfederzahl als auch der Korrelationsfaktor vom verwendeten Schweißzusatzwerkstoff abhängig ist. Für den Ansatz der Verformungshöhe  $h$  wird auf Abb. 12-26 und die Gleichungen (12.17) und (12.18) verwiesen.

Wenk hat in seiner Dissertation [107] detailliert die analytischen Gleichungen zur Bestimmung der tatsächlichen Schubspannungs- und Normalkraftverläufe an einer schubbeanspruchten Flankenkehlnaht erläutert. In Abb. 12-10 ist deutlich der Unterschied der Schubspannungen und den damit auch direkt korrelierenden Dehnungen zwischen den Nahtenden und der Nahtmitte über die wirksame Schweißnahtlänge  $l_{eff}$  zu erkennen. Die Spannungen in Nahtmitte werden dabei erst bei einer ausreichend großen Dehnungsdifferenz für die Kraftübertragung aktiviert [90]. Demzufolge werden mit zunehmender Schweißnahtlänge höhere Anforderungen an das Verformungsvermögen der Naht gestellt, um die gesamte Schweißnahtlänge für die volle Kraftübertragung zu aktivieren. In DIN EN 1993-1-8 [9] Abschnitt 4.11 wird zudem gefordert, dass aufgrund der ungleichmäßigen Spannungsverteilung bei Überlappungsstößen mit Schweißnähten länger als  $150a$  die Tragfähigkeit der Kehlnaht mit  $\beta_{Lw,1}$  entsprechend Gleichung (12.19) abzumindern ist, sofern die ungleichmäßige Spannungsverteilung rechnerisch nicht berücksichtigt wird. Für Stahlsorten über S460 bis S700 gemäß DIN EN 1993-1-12 [11] ist in Gleichung (12.19) ein Wert von 50 anstatt 150 im Nenner einzusetzen.

$$\beta_{Lw,1} = 1,2 - \frac{0,2 \cdot L_j}{150 \cdot a} \leq 1,0 \quad (12.19)$$

mit

$L_j$	Gesamtlänge der Überlappung in Richtung der Kraftübertragung	[kN]
$a$	Nahtdicke	[cm]

Der in diesem Kapitel ermittelte Vorschlag eines analytischen Ansatzes zur Verformungsberechnung bietet folglich die Möglichkeit die elastische und plastische Verformung einer Flankenkehlnaht analytisch zu bestimmen. Dementsprechend kann im Rahmen einer Kapazitätsbemessung die Forderung nach DIN EN 1998-1 [13] Abschnitt 6.5.5 (1) überprüft werden, ob bei ausreichendem Verformungsvermögen Spannungsspitzen abgebaut werden können um somit eine Konzentration plastischer Dehnungen zu verhindern. Weiterhin bietet der Ansatz zur analytischen Verformungsberechnung den Vorteil im Rahmen von Untersuchungen an Flankenkehlnahtverbindungen mit Hilfe der Methode der finiten Elemente die numerischen

Verformungen zu verifizieren. Hierbei kann ein direkter Abgleich mit der elastischen und plastischen Verformung durchgeführt werden.

## 13 Zusammenfassung und Ausblick

### 13.1 Zusammenfassung

Sowohl an das Bauwerk im Ganzen als auch an die Verbindung im Detail werden konkrete Anforderungen an die Sicherheit für den Benutzer gestellt. Die Zuverlässigkeit stellt in diesem Zusammenhang ein quantitatives Maß der Sicherheit dar und wird auf die beiden Größen Einwirkung  $E$  und Widerstand  $R$  aufgeteilt. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf der Betrachtung der Zuverlässigkeit auf der Widerstandsseite. Grundlage für diese Untersuchungen ist die Vorgehensweise zur statistischen Kalibrierung eines Widerstands- und Bemessungsmodells nach DIN EN 1990 Anhang D [6]. Die grundsätzliche Zielsetzung dieser Arbeit war, das Tragverhalten von Flankenkehlnahtverbindungen aus normal- und höherfestem Baustahl unter Berücksichtigung statistischer Kriterien zu beurteilen. Hierzu unterteilt sich die Beurteilung in experimentelle und analytische Untersuchungen hinsichtlich der Trag- und Verformungsfähigkeit.

Flankenkehlnahtverbindungen stellen im konstruktiven Stahlbau mit ihrer recht einfachen geometrischen Form eine wirtschaftliche Möglichkeit zur Kraftübertragung für die Verbindung zweier zug- oder druckbeanspruchter Bauteile dar. Insbesondere für Kehlnahtverbindungen wird in den derzeit gültigen Bemessungskonzepten des Eurocode 3 lediglich die Festigkeit des Grundwerkstoffs berücksichtigt. Zusätzlich wird explizit verlangt, dass die für das Schweißgut spezifizierten Materialeigenschaften mindestens denen des verschweißten Grundwerkstoffs entsprechen müssen. In vergangenen Forschungsvorhaben konnte ein signifikanter Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs auf die Festigkeit der Kehlnahtverbindung festgestellt und ein neues Bemessungsmodell entwickelt werden, das den Einfluss des Schweißzusatzwerkstoffs ebenfalls berücksichtigt. Offen ist dabei aber das Vorgehen bei sogenannten Mischverbindungen, wenn Grundwerkstoffe mit unterschiedlichen Festigkeitsklassen und einer dazu passenden oder abweichenden Festigkeitsklasse des Schweißzusatzwerkstoffs verschweißt werden

Hier setzte die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit an, nämlich auf Basis von zusätzlichen experimentellen Untersuchungen an geschweißten Kehlnahtverbindungen aus normal- und höherfestem Baustahl sowohl die Anwendbarkeit des bestehenden als auch des neu entwickelten Bemessungsmodells zur Bestimmung der Tragfähigkeit zu verifizieren und weiterzuentwickeln. Für die Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwerts  $\gamma_M^*$  wurde in Anlehnung an DIN EN 1990 Anhang D [6] ein speziell angepasstes statistisches Auswerteverfahren konzipiert, das generell auf Fälle angewendet werden kann, die ein Bauteilversagen auf Bruch aufweisen. Im Rahmen der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Bemessungsmodelle für die Mischverbindungen eine akzeptable Übereinstimmung liefern. Darüberhinaus können durch angepasste Korrelationsbeiwerte die Bemessungstragfähigkeiten wirtschaftlich

optimiert werden. Zusätzlich konnte auf Grundlage der Versuchsergebnisse ein analytischer Ansatz zur Abschätzung der Verformung einer Flankenkehlnaht vorgeschlagen werden, der mit dem vorgestellten statistischen Auswerteverfahren abgesichert wurde. Der analytische Ansatz ist maßgeblich vom verwendeten Schweißzusatzwerkstoff abhängig und bietet die Möglichkeit, sowohl die elastische als auch die plastische Verformung einer Flankenkehlnaht zu bestimmen. Dementsprechend kann im Rahmen einer Kapazitätsbemessung überprüft werden, ob bei ausreichendem Verformungsvermögen Spannungsspitzen abgebaut werden können um somit eine Konzentration plastischer Dehnungen zu verhindern. Weiterhin bietet der Ansatz den Vorteil im Rahmen von numerischen Untersuchungen an Flankenkehlnahtverbindungen im Vorfeld die elastischen und plastischen Verformungen abzuschätzen und die Ergebnisse zu verifizieren.

Durch die Weiterentwicklung der Bemessungsmodelle hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Möglichkeit zur Abschätzung der Verformung einer Flankenkehlnaht kann ein wirtschaftlicher, zukunftsorientierter und ressourcenschonender Einsatz, vor allem von höherfesten Baustählen sichergestellt und intensiviert werden.

## **13.2 Ausblick**

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zur Trag- und Verformungsfähigkeit von Flankenkehlnahtverbindungen aus normal- und höherfestem Baustahl, den sogenannten Mischverbindungen. Es konnte gezeigt werden, dass sich auf Grundlage neu gewonnener Erkenntnisse über die Streuung der Basisvariablen des Widerstandsmodells die Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen durch angepasste Korrelationsbeiwerte wirtschaftlich optimieren lässt. Weitergehende Untersuchungen an Stirnkehlnahtverbindungen aus normal- und höherfestem Baustahl können die Anwendbarkeit der Bemessungsmodelle und der angepassten Korrelationsbeiwerte zusätzlich sicherstellen.

Die üblicherweise in der Praxis beim Fertigungsprozess vorhandene Streuung konnte durch eine Variation der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$ , sowohl beim teil- als auch vollmechanisierten Schweißverfahren berücksichtigt werden. Als Ergebnis zeichnete sich ein tendenzieller Einfluss des Mechanisierungsgrades ab. Jedoch könnte nach Meinung des Autors durch ein umfangreiches und gezieltes Versuchsprogramm hierzu der Einfluss noch detaillierter herausgearbeitet werden, um so für die Baupraxis aussagekräftige Empfehlungen auszusprechen.

Der konzipierte analytische Ansatz zur Verformungsberechnung einer Flankenkehlnaht konnte lediglich aufgrund der zur Verfügung stehenden Versuchsergebnisse an drei Festigkeitsklassen von Schweißzusatzwerkstoffen für genau eine definierte Nahtlänge und eine Nahtdicke verifiziert werden. Es wird deshalb darauf hingewiesen, dass dementsprechend bewusst



der Begriff einer *Abschätzung* gewählt wurde. Dies beruht auch auf der Tatsache, dass in der Vergangenheit gezeigt werden konnte, dass zusätzlich zur Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs die Nahtlänge und die Nahtdicke einen nicht zu vernachlässigbaren Einfluss auf die Verformungsfähigkeit der Naht haben. Deshalb sind für eine genaue analytische Bestimmung der Verformung experimentelle Untersuchungen mit einer Variation der genannten Parameter und einem erweiterten Feld von Schweißzusatzwerkstoffen erforderlich.



## 14 Bezeichnungen

Die in dieser Arbeit verwendeten Bezeichnungen sind i. d. R. in Übereinstimmung mit den allgemeinen Formelzeichen nach DIN EN 1990 und DIN EN 1993 gewählt. Die verwendeten Bezeichnungen und Abkürzungen werden bereits in den einzelnen Kapiteln nach der erstmaligen Verwendung derer erläutert. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit sind die am häufigsten verwendeten Bezeichnungen der nachfolgenden Zusammenstellung zu entnehmen.

### Gebräuchliche Bezeichnungen im Zusammenhang mit einer Kehlnaht

$a$	Wirksame Nahtdicke einer Kehlnaht
$a_{EC,th.}$	Theoretische Kehlnahtdicke
$a_{EC}$	Kehlnahtdicke bei tiefem Einbrand
$a_{3D-scan}$	Abgeleitete Kehlnahtdicke aus dem dreidimensionalen Modell der Nahtbruchfläche
$E$	Streckenenergie
$f_{y,GW}$	Streckgrenze des Grundwerkstoffs (GW)
$f_{u,GW}$	Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs (GW)
$f_{y,SZW}$	Streckgrenze des Schweißzusatzwerkstoffs (SZW)
$f_{u,SZW}$	Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs (SZW)
$I$	Stromstärke
$l_{eff}$	Wirksame Schweißnahtlänge
$Q$	Wärmeeinbringung
$r_t$	Widerstandsfunktion
$r_{e,i}$	Experimenteller Widerstand
$r_{t,i}$	Theoretischer Widerstand
$T_{  }$	Schubfluss
$T_p$	Vorwärmtemperatur
$t_{8/5}$	Abkühlzeit
$U$	Elektrische Spannung
$v_s$	Schweißgeschwindigkeit
$\beta_w$	Korrelationsbeiwert
$\sigma_{\perp}$	Normalspannung senkrecht zur Schweißnahtachse
$\sigma_{  }$	Normalspannung parallel zur Schweißnahtachse
$\tau_{  }$	Schubspannung (in der Ebene der Kehlnahtfläche) parallel zur Schweißnahtachse
$\tau_{\perp}$	Schubspannung (in der Ebene der Kehlnahtfläche) senkrecht zur Schweißnahtachse

## Allgemeine Abkürzungen

<i>CET</i>	Kohlenstoffäquivalent
<i>FKBS</i>	Feinkornbaustahl
<i>FKZ</i>	Feinkornzone
<i>FORM</i>	First Order Reliability Method
<i>GKZ</i>	Grobkornzone
<i>GW</i>	Grundwerkstoff
<i>HMP</i>	Härtemesspunkt
<i>M</i>	Mismatch-Faktor
<i>SG</i>	Schweißgut
<i>SZW</i>	Schweißzusatzwerkstoff
<i>V</i>	Variationskoeffizient
<i>Verb. gl. GW</i>	Verbindung gleicher Grundwerkstoffe
<i>WEZ</i>	Wärmeeinflusszone

## 15 Literaturverzeichnis

### Normen und Richtlinien

- [1] DIN 18800:2008-11: Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion.
- [2] DIN 50125:2009-07: Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben.
- [3] DIN EN 1011-2:2001-05: Schweißen - Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe, Teil 2: Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen; Deutsche Fassung EN 1011-2:2011.
- [4] DIN EN 1090-2:2011-10: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN 1090-2:2008 + A1:2011.
- [5] DIN EN 1910-100:2008-02: Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN EN 14610:2005.
- [6] DIN EN 1990:2010-12: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990: 2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010.
- [7] DIN EN 1993-1-1:2010-12: 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.
- [8] DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter.
- [9] DIN EN 1993-1-8:2010-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005 + AC:2009.
- [10] DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-8/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter.
- [11] DIN EN 1993-1-12:2010-12: 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.
- [12] DIN EN 1993-1-12/NA:2011-08: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-12/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter.
- [13] DIN EN 1998-1:2010-12: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009.
- [14] DIN EN 10025-2:2011-04: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen; Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle; Deutsche Fassung EN 10025-2:2004.
- [15] DIN EN 10025-3:2005-02: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen; Teil 3: Technische Lieferbedingungen für normalgeglühte/ normalisierend gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle; Deutsche Fassung EN 10025-3:2004.

- [16] DIN EN 10025-4:2005-04: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen; Teil 4: Technische Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle; Deutsche Fassung EN 10025-4:2004.
- [17] DIN EN 10025-5:2005-02: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen; Teil 5: Technische Lieferbedingungen für wetterfeste Baustähle; Deutsche Fassung EN 10025-2:2004.
- [18] DIN EN 10025-6:2009-08: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen; Teil 6: Technische Lieferbedingungen für Flacherzeugnisse aus Stählen mit höherer Streckgrenze im vergüteten Zustand; Deutsche Fassung EN 10025-6:2004 + A1:2009.
- [19] DIN EN 10027-1:2005-10: Bezeichnungssysteme für Stähle - Teil 1: Kurznamen; Deutsche Fassung EN 10027-1:2005.
- [20] DIN EN 10149-2:2013-12: Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte Stähle; Deutsche Fassung EN 10149-2:2013.
- [21] DIN EN 10204:2005-01: Metallische Erzeugnisse - Arten von Prüfbescheinigungen, Deutsche Fassung EN 10204:2004.
- [22] DIN EN 10210-1:2006-07: Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen; Teil 1: Technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN 10210-1:2006.
- [23] DIN EN 10219:2006-07: Kaltgefertigte geschweißte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen; Teil 1: Technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN 10219-1:2006.
- [24] DIN EN 13479:2005-03: Schweißzusätze - Allgemeine Produktnorm für Zusätze und Pulver zum Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen; Deutsche Fassung EN 13479:2004.
- [25] DIN EN 14532-1:2005-02: Schweißzusätze - Prüfverfahren und Qualitätsanforderungen - Teil 1: Grundprüfungen und Konformitätsbewertung von Schweißzusätzen für Stahl, Nickel und Nickellegierungen; Deutsche Fassung EN 14532-1:2004.
- [26] DIN EN 14610:2005-02: Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe für Metallschweißprozesse; Dreisprachige Fassung EN 14610:2004.
- [27] DIN EN ISO 544:2011-06: Schweißzusätze - Technische Lieferbedingungen für Schweißzusätze und Pulver - Art des Produkts, Maße, Grenzabmaße und Kennzeichnung; Deutsche Fassung EN ISO 544:2011.
- [28] DIN EN ISO 2560:2010-03: Schweißzusätze - Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornbaustählen - Einteilung (ISO 2560:2009); Deutsche Fassung EN ISO 2560:2009.
- [29] DIN EN ISO 3690:2012-07: Schweißen und verwandte Prozesse - Bestimmung des Wasserstoffgehaltes im Lichtbogenschweißgut (ISO 3690:2012); Deutsche Fassung EN ISO 3690:2012.
- [30] DIN EN ISO 6892:2009-12: Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2009.

- 
- [31] DIN EN ISO 9015-1:2001-05: Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Härteprüfung -Teil 1: Härteprüfung für Lichtbogenschweißverbindungen (ISO 9015-1:2001); Deutsche Fassung EN ISO 9015-1:2011.
- [32] DIN EN ISO 14175:2008-06: Schweißzusätze - Gase und Mischgase für das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse (ISO 14175:2008); Deutsche Fassung EN ISO 14175:2008.
- [33] DIN EN ISO 14341:2011-04: Schweißzusätze - Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall-Schutzgasschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornbaustählen - Einteilung (ISO 14341:2010); Deutsche Fassung EN ISO 14341:2011.
- [34] DIN EN ISO 15614-1:2012-06: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Schweißverfahrensprüfung - Teil 1: Lichtbogen- und Gas-schweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen; Deutsche Fassung EN ISO 15614-1:2004 + A1:2008 + A2:2012.
- [35] DIN EN ISO 15792-1:2012-01: Schweißzusätze - Prüfverfahren - Teil 1: Prüfverfahren für Prüfstücke zur Entnahme von Schweißgutproben an Stahl, Nickel und Nickellegierungen, Deutsche Fassung EN ISO 15792-1:2008 + A1:2011.
- [36] DIN EN ISO 16834:2012-08: Schweißzusätze - Drahtelektroden, Drähte, Stäbe und Schweißgut zum Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen - Einteilung (ISO 16834:2012); Deutsche Fassung EN ISO 16834:2012.
- [37] DIN EN ISO 17632:2008-08: Schweißzusätze - Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von legierten Stählen und Feinkornbaustählen - Einteilung (ISO 17632:2004); Deutsche Fassung EN ISO 17632:2008.
- [38] DIN EN ISO 18276:2006-09: Schweißzusätze - Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von hochfesten Stählen - Einteilung (ISO 18276:2005); Deutsche Fassung EN ISO 18276:2006.
- [39] DVS 0916:2012-04: Metall-Schutzgasschweißen von Feinkornbaustählen; DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
- [40] Landesbauordnung für Baden-Württemberg (LBO) in der Fassung vom 5. März 2010.
- [41] SEW 088: Schweißgeeignete Feinkornbaustähle. Stahleisenwerkstoffblatt, Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Verlag Stahleisen, Düsseldorf, Oktober 1993.
- [42] Zulassung Z-30-1.1: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.1-1: Flacherzeugnisse aus hochfestem schweißgeeigneten Feinkornbaustahl S690 QL1 und die daraus hergestellten Bauteile. Geltungsdauer bis 31. Januar 2010.

**Fachbücher und Publikationen**

- [43] Bachmann, H.: Die Methode der Kapazitätsbemessung. ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), IBK Sonderdruck Nr. 0005, Basel: Birkhäuser Verlag, 1994.
- [44] Bachmann, H.: Erdbebensicherung von Bauwerken. 2. Auflage. Basel: Birkhäuser Verlag, 2002.
- [45] Background Documentation Document 6.05, Evaluation of test results on welded connections in order to obtain strength functions and suitable model factors, Part A, Results, 1989.
- [46] Background Documentation Document D.03 Annex D, Evaluations of test results on welded connections made from FeE 460 in order to obtain strength functions and suit-able model factors, 1990.
- [47] Bornscheuer, F. W.; Feder, D.: Traglastversuche an Laschenverbindungen aus St 37 mit Flanken- und Stirnkehlnähten. In: Schweißen und Schneiden 18 (1966), Heft Nr. 7, S. 305-308.
- [48] Byfield, M. P.: Steel design and reliability using Eurocode 3. PhD. Thesis. Nottingham, University of Nottingham, 1996.
- [49] Callele, L. J.; Grondin, G. Y.; Driver, R. G.: Strength and behaviour of multi-orientation fillet weld connections. Structural Engineering Report No. 255. Alberta, University of Alberta, 2005.
- [50] Collin, P.; Johansson, B.: Design of welds in high strength steel. In: Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Conference on Steel and Composite Structures (2005), Maastricht, Volume C., S. 4.10-89-4.10-98.
- [51] Curbach, M.; Proske, D.: Einführung in die Sicherheitsbetrachtung von Bauwerken. 1. Dresdner Probabilistik-Symposium - Sicherheit und Risiko im Bauwesen. Dresden, Technische Universität Dresden, November 2003, S. 1-8.
- [52] Da Silva, L. S.; et al.: Standardization of safety assessment procedures across brittle to ductile failure modes - Mid Term Report. Research Fund for Coal and Steel, Forschungsbericht, RFSR-CT-2013-00023, 2015 (unveröffentlicht).
- [53] Da Silva, L. S.; et al: Statistical evaluation of the lateral-torsional buckling resistance of steel I-beams, Part 2: Variability of steel properties. In: Journal of Constructional Steel Research 65 (2009), S. 832-849.
- [54] Deng, K.; Grondin, G. Y.; Driver, R. G.: Effect of loading angle on the behaviour of fillet welds. Structural Engineering Report No. 251, Alberta, University of Alberta, 2003.
- [55] Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen. 3. Bearbeitete Auflage. Springer Verlag, 2004.
- [56] ECCS: Recommended Testing Procedure for Assessing the Behaviour of Steel Elements under Cyclic Loads, Nr.45, 1986.
- [57] Efron, B.; Tibshirani, R. J.: An Introduction to the Bootstrap. New York: Chapman & Hall/CRC., 1993.



- [58] Empfehlungen für das Schweißen von N-A-XTRA, ThyssenKrupp Steel Europe, Ausgabe 09, 2004.
- [59] Eurocode No. 3: Einheitliche Regeln für den Stahlbau, Kommission der Europäischen Gemeinschaft, Brüssel, 1984, Report EUR 8849 DE.
- [60] Feder, D.: Einfluß der Nahtdicke auf die statische Festigkeit von Flankenkehlnähten. In: Schweißen und Schneiden 19 (1967), Heft Nr. 7, S. 299-305.
- [61] Feder, D.: Spannungsoptische und theoretische Untersuchungen zur Kraftverteilung in Kehlnaht-Laschenverbindungen. Stuttgart, TH Stuttgart, Dissertation, 1967.
- [62] Francis, P; Aggelopoulos, E., Baddoo, N.; et al.: High Strength Long Span Structures, HILONG (RFSR-CT-2012-00028), Final Report, 2016.
- [63] Grünberg, J.: Grundlagen der Tragwerksplanung: Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln für den konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2004.
- [64] Hanus, F.: Abschlussbericht: Forschungsvertrag Nr. 7210-MC/105 Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf die Schweißeignung von Stählen des Typs 450 für Offshore-Anwendungen. Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften, Luxemburg, 1999.
- [65] Hanus, F.: Thermomechanisch gewalzte Stähle für den Stahl- und Behälterbau. Vortrag zum Seminar „Schweißen der thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustähle“ der SLV-Duisburg, Oktober 2000.
- [66] Hanus, F.; Schütz, J.; Grünwald, J.: Härte in der WEZ: Wirkung der chemischen Zusammensetzung des Stahls, der Schweißbedingungen und des Spannungsarmglühens. In: DVS-Berichte 176 (1996), S. 81-85.
- [67] Klöppel, K.; Petri, R.: Statische Versuche und Dauerversuche mit geschweißten Stabanschlüssen. In: Stahlbau 38 (1969), Heft Nr. 5, S. 129-140.
- [68] Klöppel, K.; Petri, R.: Versuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Kehlnähten. In: Stahlbau 35 (1966), Heft Nr. 1, S. 9-25.
- [69] Kob, P.; Harre, W.; Schmidt, H.: Einfluß geometrischer Verhältnisse auf die Tragfähigkeit statisch beanspruchter Kehlnahtverbindungen. Otto-Graf-Institut; Forschungs- und Materialprüfanstalt Baden-Württemberg, Schriftenreihe Heft 78, Stuttgart 1987.
- [70] Kuhlmann, U.; Günther, H.-P.; Rasche, C.: Versuche zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Flankenkehlnahtverbindungen höherfester Baustähle S690Q. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, Versuchsbericht, Mitteilung Nr. 2008-21X, 2008 (unveröffentlicht).
- [71] Kuhlmann, U.; Günther, H.-P.; Rasche, C.; et al.: Abschlussbericht: AiF-Vorhaben-Nr. 14195 BG (2007) Wirtschaftliche Schweißverbindungen höherfester Baustähle. Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF), FOSTA P652, Düsseldorf, August 2008.
- [72] Kuhlmann, U.; Rasche, C.: Abschlussbericht: AiF-Vorhaben-Nr. 16097 Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen höherfester Baustähle S690 im Stahlbau, Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF), FOSTA P812, Düsseldorf, Februar 2012.

- [73] Langenberg, P.; Nießen, T.; Dahl, W.: Bruch- und Verformungsverhalten von hochfesten Stählen mit Streckgrenzen von 690 bis 890 MPa. In: Stahlbau 69 (2000), Heft Nr. 4, S. 283-291.
- [74] Lehnert, T.; Schröter, F.: Stähle für den Stahlbau - Herstellung, Normung und Anwendung. Beitrag im Stahlbau-Kalender 2016, Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. U. Kuhlmann. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2016.
- [75] Lesik, D. F.; Kennedy, D. J. L.: Ultimate strength of eccentrically loaded fillet welded connections. Alberta, University of Alberta, Structural Engineering Report 159, 1988.
- [76] Mannsfeld, T. R.: Tragverhalten von Stahlbetonflächentragwerken unter Berücksichtigung der temperaturbedingten Nichtlinearitäten im Brandfall. Wuppertal, Bergische Universität Wuppertal, Abteilung Bauingenieurwesen im Fachbereich D, Dissertation, 2011.
- [77] Martin, F.; Schröter, F.: Neueste Entwicklungen von thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustählen: Erfahrungen aus Offshore-Industrie und Stahlwasserbau. In: Stahlbau 75 (2006), Heft Nr. 11, S. 875-881.
- [78] Müsch, K.: Untersuchungen zum Einfluss örtlicher Festigkeitsunterschiede (Mismatch) auf das Versagensverhalten von Schweißverbindungen aus höherfesten Feinkornbaustählen. Aachen, Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1998.
- [79] Ng, A. K. F.; Driver, R. G.; Grondin G. Y.: Behaviour of transverse fillet welds. Structural Engineering Report No. 245. Alberta, University of Alberta, 2002.
- [80] Niemi, E.: Tests on fillet weld joints with high strength steel specimens. Lappeenranta, 1988.
- [81] Novák, B.; Kuhlmann, U.; Euler, M.: Werkstoffübergreifendes Entwerfen und Konstruieren: Einwirkung, Widerstand, Tragwerk. 1.Auflage. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2012.
- [82] Pedro, J.: Challenges and Benefits of High Strength Steel (HSS) in Highway Bridges. OptiBri-Workshop „Design Guidelines for Optimal Use of HSS in Bridges“, RFCS-Project-Workshop (RFSR-CT-2014-00026), Stuttgart, 2017.
- [83] Proske, D.: Katalog der Risiken: Risiken und ihre Darstellung. Dresden: Eigenverlag, 2004.
- [84] Rasche, C.: Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Kehlnahtverbindungen höherfester Baustähle. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, Dissertation, 2012.
- [85] Röhm, C.: Zum Tragverhalten von Rahmenknoten mit Stahlfaserbeton unter zyklischer Belastung. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren, Dissertation, 2012.
- [86] Roos, E.; et al.: Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung. 4. Auflage. Springer Verlag, 2011.
- [87] Saal, H.; Hölbling, W.: Zusammenfassung der Ergebnisse von Versuchen an Kehlnahtprüfkörpern aus HISTAR460/460L hergestellt im Blockgussverfahren. Bericht Nr. 042119-2, 2005.

- [88] Sautter, S.: Analytische Untersuchungen zu Härtemessungen an geschweißten Mischverbindungen. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, Bachelorarbeit, 2015.
- [89] Schalk, A.: Experimentelle und analytische Untersuchungen zum Verformungsvermögen an geschweißten Mischverbindungen. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, Bachelorarbeit, 2016.
- [90] Schilling, S.: Stahlbaunormen - Anwendung der DIN EN 1993-1-8: Bemessung von Anschlüssen. Beitrag im Stahlbau-Kalender 2014, Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. U. Kuhlmann, Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2014.
- [91] Schmidt, H.; et al.: Ausführung von Stahlbauten: Kommentare zu DIN EN 1090-1 und DIN EN 1090-2. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2012.
- [92] Schneider, J.: Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen: Grundwissen für Ingenieure. Stuttgart: Verlag der Fachvereine Zürich und B.G. Teubner, 1994.
- [93] Schröter, F.: Höherfeste Stähle für den Stahlbau: Auswahl und Anwendung. In: Bauingenieur 78 (2003), S. 426-432.
- [94] Schulze, G.: Die Metallurgie des Schweißens. 4. Auflage, Springer Verlag, 2010.
- [95] Sommer, A.: Torsion und Duktilitätsbedarf bei Hochbauten unter Erdbebeneinwirkung. Zürich, Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, Dissertation, 2000.
- [96] Spaethe, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. 2. neubearbeitete Auflage. Wien: Springer Verlag, 1992.
- [97] Stangenberg, H.: Zum Bauteilnachweis offener, stabilitätsgefährdeter Stahlbauprofile unter Einbeziehung seitlicher Beanspruchungen und Torsion. In: Schriftenreihe des Lehrstuhls für Stahlbau und Leichtmetallbau der RWTH Aachen, Heft Nr. 61 (2007), Shaker-Verlag.
- [98] Stroetmann, R.; et al.: Bemessung von Tragwerken aus höherfesten Stählen bis S700 nach EN 1993-1-12. In: Stahlbau 81 (2012), Heft Nr. 4, S. 332-342.
- [99] Taras, A.; et al.: Deliverable D1.1: Guideline for the Safety Assessment of Design Rules for Steel Structures in Line with EN 1990. Standardization of Safety Assessment Procedures across Brittle to Ductile Failure Modes, SAFEBRITILE (RFSR-CT-2013-00023), 2017.
- [100] TNO-IBBC, TU Delft (Hrsg.): International test series - final report: Report BI-68-25, Doc XV-225-67, März 1968.
- [101] Ummenhofer, T.; et al.: Die Anwendung hochfester Feinkornbaustähle im konstruktiven Ingenieurbau. In: Stahlbau 82 (2013), Heft Nr. 4, S. 236-245.
- [102] Ungermann, D.; Schneider, S.: Stahlbaunormen - Kommentar zu DIN EN 1993-1-8: Bemessung von Anschlüssen. Beitrag im Stahlbau-Kalender 2012, Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. U. Kuhlmann. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2012.
- [103] Uwer, D.; et al.: Charakterisierung des Kaltrissverhaltens von Stählen beim Schweißen. In: Schweißen und Schneiden 43 (1991), Heft Nr. 4.
- [104] Uwer, D.; Wegmann, H.: Schweißtechnische Verarbeitung niedriglegierter hochfester Baustähle. In: Grobblech - Herstellung und Anwendung, Dokumentation 570 des Stahlinformationszentrums (2001), S. 91-96.

- [105] Valtinat, G.: Die Untersuchung von Schweißverbindungen mittels der Analogie der elastisch-randgelagerten Scheibe. Karlsruhe, TH Karlsruhe, Dissertation, 1966.
- [106] Volz, M.; Schröter, F.; Steidl, G.: Baustähle im konstruktiven Ingenieurbau. In: Stahlbau 77 (2008), Heft Nr. 11, S. 781-790.
- [107] Wenk, P.: Traglastuntersuchungen an vorwiegend ruhend beanspruchten langen Flankenkehlnähten. Dortmund, Universität Dortmund, Dissertation, 1988.
- [108] Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau. 1.Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2006.

### **Software**

- [109] Anwendungssoftware: proWeld 5.4, Formelsammlung zum Schweißen von Grobblech, ThyssenKrupp Steel Europe (Hrsg.)

### **Internetquellen**

- [110] Joint Committee on Structural Safety: JCSS Probabilistic Model Code, Part 3.02, Resistance Models, Static Properties of Structural Steel (Rolled Sections), 2001.  
[http://www.jcss.byg.dtu.dk/Publications/Probabilistic\\_Model\\_Code.aspx](http://www.jcss.byg.dtu.dk/Publications/Probabilistic_Model_Code.aspx)  
Zugegriffen am: 05.07.2016
- [111] Skywalk from outside ledge. ComplexSimpleLLC at English Wikipedia  
Lizenz: CC by 2.5  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SkywalkFromOutsideLedge.jpg>  
Zugegriffen am: 09.09.2016

## 16 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Unterscheidung von Stirn- und Flankenkehlnaht.....	2
Abb. 1-2: Erforderliche Nahtdicke $a$ und Schweißnahtvolumen einer Flankenkehlnaht abhängig von der Festigkeit des Grundwerkstoffs .....	3
Abb. 2-1: Entwicklung der durch technische Lieferbedingungen gewährleisteten Streckgrenzenwerte nach [101] .....	9
Abb. 2-2: Typisches Spannungs-Dehnungsdiagramm eines unlegierten Baustahls mit Lüders-Plateau nach DIN EN ISO 6892-1 [30] .....	14
Abb. 2-3: Vorteile der Verwendung von höherfesten bzw. TM-gewalzten Stählen nach [74].....	22
Abb. 2-4: Shanghai World Financial Center (links), Shanghai (China) [eigene Aufnahme].....	23
Abb. 2-5: Samuel Beckett Schrägseilbrücke, Dublin (Irland) [eigene Aufnahme].....	24
Abb. 3-1: Aufbau der Wärmeeinflusszone einer Kehlnaht .....	28
Abb. 3-2: Entstehung des Martensitgitters aus dem kfz-Gitter nach Bain [94] .....	29
Abb. 3-3: Schweißignung eines Grundwerkstoffs basierend auf der chemischen Zusammensetzung und den metallurgischen und physikalischen Eigenschaften nach [55].	30
Abb. 3-4: Vergleich der Vorwärmtemperaturen S460 N und S460 M nach DIN EN 1011-2 [3].....	32
Abb. 3-5: Definition der Abkühlzeit $t_{8/5}$ .....	38
Abb. 3-6: Einfluss der Schweißbedingungen auf die mechanischen Eigenschaften in der WEZ .....	39
Abb. 3-7: Zweidimensionaler Wärmefluss nach [94].....	40
Abb. 3-8: Dreidimensionaler Wärmefluss nach [94].....	40
Abb. 3-9: Übergangsblechdicke $dt$ in Abhängigkeit der Wärmeeinbringung $Q$ und der Vorwärmtemperatur $T_p$ nach [3] .....	42
Abb. 3-10: Arbeitsfenster zur möglichen Parameterwahl beim Schweißen einer Stahlgüte S690 QL mit einem Schweißzusatzwerkstoff G69 .....	44
Abb. 3-11: Wechselbeziehung zwischen Schweißparametern und Eigenschaften der Schweißnaht..	45
Abb. 4-1: Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8 [9].....	47
Abb. 4-2: Definition der wirksamen Schweißnahtlänge $l_{eff}$ .....	48
Abb. 4-3: Auf eine Kehlnaht einwirkende Kräfte je Längeneinheit.....	50
Abb. 4-4: Spannungskomponenten im wirksamen Kehlnahtquerschnitt.....	51
Abb. 4-5: Qualitativer Spannungsverlauf in einem Kehlnahtanschluss nach [45].....	54
Abb. 4-6: Schweißnahtgeometrie der Versuchskörper nach [45].....	56
Abb. 4-7: Sensitivitätsdiagramm für Stahlgüte S235 in Abhängigkeit der verschiedenen Schweißnahtgeometrien nach [45] .....	56
Abb. 4-8: Sensitivitätsdiagramm für Stahlgüte S355 in Abhängigkeit der verschiedenen Schweißnahtgeometrien nach [45] .....	57
Abb. 4-9: Prinzipielle Darstellung des Tragverhaltens einer Flankenkehlnahtverbindung.....	59
Abb. 4-10: Stumpfnahntverbindungen.....	60
Abb. 4-11: Prinzipielle Darstellung des Tragverhaltens einer durchgeschweißten Stumpfnahntverbindung (Doppel-V-Naht).....	61
Abb. 5-1: Versuchskörper für Flankenkehlnahtverbindungen .....	66
Abb. 5-2: Grenzschiebspannungen des modifizierten Bemessungsvorschlags nach Rasche einer Flankenkehlnahtverbindung in Abhängigkeit der Festigkeit des Grundwerkstoffs .....	70
Abb. 5-3: Vergleich der Grenzschiebspannungen des modifizierten Bemessungsvorschlags nach Rasche mit dem bestehenden Bemessungsmodell nach DIN EN 1993-1-8 und DIN EN 1993-1-12.....	71
Abb. 6-1: Versuchskörper - Schweißnahtausführung .....	77
Abb. 6-2: Mechanische Bearbeitung des Versuchskörpers .....	77
Abb. 6-3: Bezeichnung der einzelnen Elemente des Versuchskörpers .....	78
Abb. 6-4: Versuchsprogramm des Forschungsprojekts <i>SAFEFRICTILE</i> [52] .....	79
Abb. 6-5: Qualitative Darstellung des Mismatch-Faktors bei Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen .....	81
Abb. 6-6: Arbeitsfenster für S355/S690-G69, vollmechanisiert geschweißt, Schweißgeschwindigkeit: $\min v_s = 28 \text{ cm/min}$ .....	85

Abb. 6-7: Arbeitsfenster für S355/S690-G69, vollmechanisiert geschweißt, Schweißgeschwindigkeit: $\max vs = 38 \text{ cm/min}$ .....	85
Abb. 6-8: Bestimmung der Abkühlzeit $t8/5$ .....	87
Abb. 6-9: Schenk 1 MN Prüfmaschine mit eingebautem Versuchskörper .....	88
Abb. 6-10: Messvorrichtung der experimentellen Untersuchungen .....	89
Abb. 6-11: Entnahme des Prüfstücks für Makroschliff und Härtemessungen .....	90
Abb. 6-12: Zusätzliche Entnahme von zwei weiteren Prüfstücken an teilmechanisiert geschweißtem Versuchskörpern .....	90
Abb. 6-13: Kehlnahtdicke nach DIN EN 1993-1-8 [9] .....	90
Abb. 6-14: Härtemessungen am Makroschliff .....	91
Abb. 6-15: Versuchskörperhälften nach der Versuchsdurchführung .....	92
Abb. 6-16: Reverse Engineering .....	92
Abb. 6-17: Lage der virtuellen Schnitte durch die gescannte Nahtbruchfläche .....	93
Abb. 6-18: Bruchflächen-Schnittkanten und Bruchwinkelintervall .....	93
Abb. 6-19: Grafischer Vergleich der drei Methoden zur Nahtdickenbestimmung .....	94
Abb. 6-20: Evaluation Fließbeginn - Methode 1 .....	97
Abb. 6-21: Evaluation Fließbeginn - Methode 2 .....	98
Abb. 6-22: Evaluation Fließbeginn - Methode 3 .....	98
Abb. 6-23: Evaluation Fließbeginn - Methode 4 .....	99
Abb. 6-24: Evaluation Probenversagen - Methode I .....	100
Abb. 6-25: Evaluation Probenversagen - Methode II .....	100
Abb. 6-26: Evaluation Probenversagen - Methode III .....	101
Abb. 6-27: Evaluation des Verformungsvermögens .....	102
Abb. 8-1: Streuung der Schweißprozessparameter Spannung $U$ und Strom $I$ .....	110
Abb. 8-2: Streuung der Streckenenergie $E$ .....	110
Abb. 8-3: Streuung der Abkühlzeit $t8/5$ in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit $vs$ .....	111
Abb. 8-4: Streuung der Abkühlzeit $t8/5$ in Abhängigkeit der Streckenenergie $E$ .....	112
Abb. 8-5: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit $vs$ auf die Nahtdicke .....	113
Abb. 8-6: Einfluss der Abkühlzeit $t8/5$ auf die Nahtdicke .....	113
Abb. 8-7: Zusammenhang zwischen Streckenenergie $E$ und Nahtdicke $a3D - Scan$ .....	114
Abb. 8-8: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit $vs$ auf die Streckenenergie $E$ , die Abkühlzeit $t8/5$ und die Nahtdicke $a$ .....	114
Abb. 8-9: Einfluss der Nahtdicke $a$ auf den Schubfluss $T \parallel, max$ .....	115
Abb. 8-10: Korrelation von Schubfluss $T \parallel, max$ und Abkühlzeit $t8/5$ .....	116
Abb. 8-11: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit $vs$ auf die Ergebnisgröße Schubfluss $T \parallel, max$ .....	116
Abb. 8-12: Abhängigkeit der Nahtdicken-Methode auf die Schubspannung $\tau \parallel, max$ .....	117
Abb. 8-13: Korrelation von Nahtdicke $a3D - Scan$ und Schubspannung $\tau \parallel, max$ .....	117
Abb. 8-14: Korrelation von Schubspannung $\tau \parallel, max$ und Abkühlzeit $t8/5$ .....	118
Abb. 8-15: Korrelation von Schubfluss $T \parallel, max$ und Schubspannung $\tau \parallel, max$ .....	118
Abb. 8-16: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit $vs$ auf die Ergebnisgröße Schubspannung $\tau \parallel, max$ .....	119
Abb. 8-17: Einfluss der Abkühlzeit $t8/5$ auf die Härte HV10 in der WEZ .....	120
Abb. 8-18: Korrelation zwischen der Härte HV10 in der WEZ und dem Schubfluss $T \parallel, max$ .....	121
Abb. 8-19: Korrelation zwischen der Härte HV10 in der WEZ und der Schubspannung $\tau \parallel, max$ .....	122
Abb. 8-20: Definition des Bruchwinkelintervalls .....	123
Abb. 8-21: Ergebnisse der Bruchwinkelintervalle .....	123
Abb. 8-22: Verformungsverhalten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen mit Schweißzusatzwerkstoff G46 .....	125
Abb. 8-23: Verformungsverhalten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen mit Schweißzusatzwerkstoff G69 .....	125
Abb. 8-24: Verformungsverhalten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen mit Schweißzusatzwerkstoff G89 .....	126
Abb. 8-25: Statistische Kenngrößen der verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Verformung $\Delta y$ bei Fließbeginn .....	127

Abb. 8-26: Statistische Kenngrößen der Methoden zur Bestimmung der Verformung $\Delta u$ bei Probenversagen.....	128
Abb. 8-27: Elastisches Verformungsvermögen $\varepsilon_{y,3}$ in Abhängigkeit vom Schweißzusatzwerkstoff .	129
Abb. 8-28: Plastisches Verformungsvermögen $\varepsilon_{pl,m}$ .....	129
Abb. 8-29: Plastisches Verformungsvermögen $\varepsilon_{pl,m}$ in Abhängigkeit vom Schweißzusatzwerkstoff	130
Abb. 8-30: Verschiebeduktilität $\mu\Delta, m$ in Abhängigkeit vom Schweißzusatzwerkstoff .....	131
Abb. 8-31: Plastisches Verformungsvermögen $\varepsilon_{pl,u}$ in Abhängigkeit vom Schweißzusatzwerkstoff	131
Abb. 9-1: Geringes subjektives Sicherheitsempfinden am Beispiel des Grand Canyon Skywalk [111] .....	133
Abb. 9-2: Definitionen der Sicherheitszonen nach [108] .....	136
Abb. 9-3: Überblick über Zuverlässigkeitsmethoden nach DIN EN 1990 [6] .....	138
Abb. 9-4: Gauß'sche Glockenkurve - Normalverteilung .....	145
Abb. 9-5: Beziehung zwischen Zuverlässigkeitsindex $\beta$ und Versagenswahrscheinlichkeit $P_f$ .....	146
Abb. 9-6: Verteilungsdichten von Beanspruchung $E$ und Widerstand $R$ .....	148
Abb. 9-7: Definition von Versagenswahrscheinlichkeit $P_f$ und Zuverlässigkeitsindex $\beta$ .....	149
Abb. 9-8: Grenzzustandsfunktion $G = R - E$ ; Wichtungsfaktoren.....	150
Abb. 9-9: Definition der Bemessungswerte $E_d$ und $R_d$ .....	151
Abb. 10-1: Ableitung von Bauteilwiderständen auf Basis von Versuchsergebnissen nach DIN EN 1990 [6].....	157
Abb. 10-2: $re, i - rt, i$ - Diagramm.....	159
Abb. 10-3: Schematische Darstellung der Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwerts $\gamma_M^*$ .....	166
Abb. 11-1: Statistische Verteilung der Zugfestigkeit $f_u, GW$ der Grundwerkstoffe .....	177
Abb. 11-2: Statistische Verteilung der Zugfestigkeit $f_u, SZW$ der Schweißzusatzwerkstoffe .....	180
Abb. 11-3: Referenz-Kehlnahtdicke $a_{EC}$ .....	182
Abb. 11-4: Abgeleitete Kehlnahtdicke $a_{3D} - Scan$ .....	182
Abb. 11-5: Schematische Darstellung der Differenz $\Delta a$ zwischen $a_{EC}$ und $a_{3D} - Scan$ .....	182
Abb. 11-6: Kehlnahtdicke $a_{3D} - Scan - \min v_s$ .....	183
Abb. 11-7: Kehlnahtdicke $a_{3D} - Scan - \max v_s$ .....	183
Abb. 11-8: Kehlnahtdicke $a_{3D} - Scan$ - Einfluss der Schweißgeschwindigkeit $v_s$ .....	184
Abb. 11-9: Kehlnahtdicke $a_{3D} - Scan$ - vollmechanisiert .....	184
Abb. 11-10: Kehlnahtdicke $a_{3D} - Scan$ - teilmechanisiert .....	184
Abb. 11-11: Kehlnahtdicke $a_{3D} - Scan$ - Einfluss Mechanisierungsgrad .....	185
Abb. 11-12: Statistische Kenngrößen der verschiedenen Definitionen der Nahtdicken .....	185
Abb. 11-13: Flussdiagramm: Sensitivitätsanalyse - Einfluss der Gewichtungsfaktoren .....	193
Abb. 11-14: Flussdiagramm - Evaluationsgruppe: Grundwerkstoff (Bemessungsmodell nach EC 3)	199
Abb. 11-15: Bemessungsvorschlag im Vergleich zu den Versuchsergebnissen und bestehenden Bemessungsmodellen.....	204
Abb. 11-16: Vorschlag eines Bemessungsmodells ausschließlich abhängig vom Schweißzusatzwerkstoff im Vergleich zu den Versuchsergebnissen und dem Bemessungsmodell nach Rasche [84].....	209
Abb. 11-17: Flussdiagramm - Evaluationsgruppe: Schweißzusatzwerkstoff (Bemessungsmodell nach Rasche).....	210
Abb. 11-18: Interpretation des Teilsicherheitsbeiwerts $\gamma_M^*$ .....	214
Abb. 11-19: Bemessungsvorschlag im Vergleich zu den Versuchsergebnissen und bestehendem Bemessungsmodell - Schweißzusatzwerkstoffe G/T/E46 .....	216
Abb. 11-20: Bemessungsvorschlag im Vergleich zu den Versuchsergebnissen und bestehendem Bemessungsmodell - Schweißzusatzwerkstoffe G/T69.....	219
Abb. 11-21: Bemessungsvorschlag im Vergleich zu den Versuchsergebnissen und bestehendem Bemessungsmodell - Schweißzusatzwerkstoff G89.....	222
Abb. 11-22: Flussdiagramm - Einfluss des Mechanisierungsgrades .....	224
Abb. 11-23: Versuchsergebnisse im Vergleich mit den konventionellen Bemessungstragfähigkeiten ohne und mit Anpassungsfaktor am Beispiel einer Werkstoffkombination mit einem Grundwerkstoff der Stahlgüte S460 .....	226
Abb. 12-1: Prinzip der Widerstandsbegrenzung durch eine duktile Kette nach [95].....	228

Abb. 12-2: Sprödes und duktils Verhalten.....	228
Abb. 12-3: Energiedissipation nach [85].....	229
Abb. 12-4: Vergleich verschiedener Mechanismen nach [44].....	230
Abb. 12-5: Normalisierte Verformung $\Delta m$ zum Zeitpunkt der maximalen Last nach [75].....	232
Abb. 12-6: Normalisierte Verformung $\Delta u$ zum Zeitpunkt des Probenbruchs nach [75].....	232
Abb. 12-7: Nahtlängen - Federwert - Diagramm im elastischen Bereich nach [105].....	233
Abb. 12-8: Ergebnisgrößen des analytischen Ansatzes.....	235
Abb. 12-9: Verhältnis der Kraft bei Fließbeginn zu maximal gemessener Kraft.....	236
Abb. 12-10: Tatsächliche und idealisierte Schubspannungs- und Normalkraftverläufe einer Flankenkehlnaht nach Wenk [107].....	237
Abb. 12-11: Verformung und Verschiebung bei einer Flankenkehlnaht nach Feder [61].....	238
Abb. 12-12: Stat. Verteilung Schubfederzahl $K_{el}$ .....	240
Abb. 12-13: Stat. Verteilung Schubfederzahl $K_{pl}$ .....	240
Abb. 12-14: Stat. Kenngrößen der elastischen Schubfederzahl $K_{el}$ .....	240
Abb. 12-15: Stat. Kenngrößen der plastischen Schubfederzahl $K_{pl}$ .....	240
Abb. 12-16: Statistische Verteilung der elastischen und plastischen Schubfederzahlen.....	241
Abb. 12-17: Unverformte Flankenkehlnaht.....	242
Abb. 12-18: Verformte Flankenkehlnaht.....	242
Abb. 12-19: Verformung in der Nahtoberfläche.....	243
Abb. 12-20: Beteiligung angrenzender Bereiche der schmaleren Lasche.....	243
Abb. 12-21: Tatsächliche <i>Verformungshöhe</i> .....	244
Abb. 12-22: Schweißzusatzwerkstoff G46 - $\Delta e - \Delta t$ - Korrelation (elastische Verformung $\Delta y$ ).....	247
Abb. 12-23: Schweißzusatzwerkstoff G46 - $\Delta e - \Delta t, nom / \Delta e - \Delta d$ - Korrelation (elastische Verformung $\Delta y$ ).....	251
Abb. 12-24: Schweißzusatzwerkstoff G46 - $\Delta e - \Delta t, nom / \Delta e - \Delta d$ - Korrelation (plastische Verformung $\Delta m$ ).....	251
Abb. 12-25: Bilineare Verformungskurve eine Flankenkehlnaht.....	252
Abb. 12-26: Differenzierung der tatsächlichen Verformungshöhe $h$ .....	254
Abb. 12-27: Flussdiagramm zur analytischen Verformungsberechnung einer Flankenkehlnaht.....	254
Abb. B-1: Stichprobenerhebung - SZW G46 / T46 n=124.....	284
Abb. B-2: Bootstrapping - SZW G46 / T46 Subset 1: n=10.000.....	284
Abb. B-3: Bootstrapping - SZW G46 / T46 $x$   d=1.000.000.....	284
Abb. B-4: Bootstrapping - SZW G46 / T46 $V$   d=1.000.000.....	284
Abb. B-5: Stichprobenerhebung - SZW G69 / T69 n=48.....	285
Abb. B-6: Bootstrapping - SZW G69 / T69 Subset 1: n=10.000.....	285
Abb. B-7: Bootstrapping - SZW G69 / T69 $x$   d=1.000.000.....	285
Abb. B-8: Bootstrapping - SZW G69 / T69 $V$   d=1.000.000.....	285
Abb. B-9: Stichprobenerhebung - SZW G89 / T89 n=60.....	286
Abb. B-10: Bootstrapping - SZW G89 / T89 Subset 1: n=10.000.....	286
Abb. B-11: Bootstrapping - SZW G89 / T89 $x$   d=1.000.000.....	286
Abb. B-12: Bootstrapping - SZW G89 / T89 $V$   d=1.000.000.....	286
Abb. C-1: S355 J2+N / S355 J2+N.....	287
Abb. C-2: S460 ML / S460 ML.....	287
Abb. C-3: S690 QL / S690 QL.....	287
Abb. C-4: S355 J2+N / S690 QL - G46.....	288
Abb. C-5: S355 J2+N / S690 QL - G69.....	288
Abb. C-6: S355 J2+N / S690 QL - G89.....	288
Abb. C-7: S460 ML / S690 QL - G46.....	288
Abb. C-8: S460 ML / S690 QL - G69.....	288
Abb. C-9: S460 ML / S690 QL - G89.....	288
Abb. C-10: SZW G46 - zusammengefasst.....	289
Abb. C-11: SZW G69 - zusammengefasst.....	289
Abb. C-12: SZW G89 - zusammengefasst.....	289
Abb. C-13: S355 J2+N / S355 J2+N.....	290



---

Abb. C-14: S460 ML / S460 ML .....	290
Abb. C-15: S690 QL / S690 QL .....	290
Abb. C-16: S355 J2+N / S690 QL - G46 .....	291
Abb. C-17: S355 J2+N / S690 QL - G69 .....	291
Abb. C-18: S355 J2+N / S690 QL - G89 .....	291
Abb. C-19: S460 ML / S690 QL - G46 .....	291
Abb. C-20: S460 ML / S690 QL - G69 .....	291
Abb. C-21: S460 ML / S690 QL - G89 .....	291
Abb. C-22: SZW G46 - zusammengefasst .....	292
Abb. C-23: SZW G69 - zusammengefasst .....	292
Abb. C-24: SZW G89 - zusammengefasst .....	292
Abb. D-1: SZW G46 - $\Delta e - \Delta t$ - Korrelation (elastische Verformung $\Delta y$ ) .....	293
Abb. D-2: SZW G69 - $\Delta e - \Delta t$ - Korrelation (elastische Verformung $\Delta y$ ) .....	293
Abb. D-3: SZW G89 - $\Delta e - \Delta t$ - Korrelation (elastische Verformung $\Delta y$ ) .....	293
Abb. D-4: SZW G46 - $\Delta e - \Delta t$ - Korrelation (plastische Verformung $\Delta m$ ) .....	294
Abb. D-5: SZW G69 - $\Delta e - \Delta t$ - Korrelation (plastische Verformung $\Delta m$ ) .....	294
Abb. D-6: SZW G89 - $\Delta e - \Delta t$ - Korrelation (plastische Verformung $\Delta m$ ) .....	294
Abb. E-1: SZW G46 - $\Delta e - \Delta t, nom / \Delta e - \Delta d$ - Korrelation (elastische Verformung $\Delta y$ ) .....	295
Abb. E-2: SZW G69 - $\Delta e - \Delta t, nom / \Delta e - \Delta d$ - Korrelation (elastische Verformung $\Delta y$ ) .....	295
Abb. E-3: SZW G89 - $\Delta e - \Delta t, nom / \Delta e - \Delta d$ - Korrelation (elastische Verformung $\Delta y$ ) .....	295
Abb. E-4: SZW G46 - $\Delta e - \Delta t, nom / \Delta e - \Delta d$ - Korrelation (plastische Verformung $\Delta m$ ) .....	296
Abb. E-5: SZW G69 - $\Delta e - \Delta t, nom / \Delta e - \Delta d$ - Korrelation (plastische Verformung $\Delta m$ ) .....	296
Abb. E-6: SZW G89 - $\Delta e - \Delta t, nom / \Delta e - \Delta d$ - Korrelation (plastische Verformung $\Delta m$ ) .....	296



## 17 Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Kurzbezeichnung der Stähle nach DIN EN 10027-1 [19] .....	16
Tab. 2-2: Zusatzsymbole nach DIN EN 10027-1 [19] .....	16
Tab. 2-3: Einsetzbare Baustähle und Hohlprofile nach DIN EN 1993-1-1 [7] und DIN EN 1993-1-12 [11].....	17
Tab. 2-4: Vergütungsstähle gemäß DIN EN 1993-1-12 [11].....	18
Tab. 2-5: Thermomechanisch gewalzte Stähle zum Kaltumformen gemäß DIN EN 1993-1-12 [11] ...	18
Tab. 2-6: Nennwerte der Streckgrenze $f_y$ und der Zugfestigkeit $f_u$ für Baustähle nach DIN EN 1993-1-1 [7] Tabelle 3.1.....	19
Tab. 2-7: Duktilitätsanforderungen für Stähle nach DIN EN 1993-1-1 [7] und DIN EN 1993-1-12 [11]	20
Tab. 2-8: Angepasste Duktilitätsanforderungen für die zukünftige Fassung von EN 1993-1-1 .....	20
Tab. 3-1: Einstufungssystematik nach DIN EN ISO 14341-A [33] .....	26
Tab. 3-2: Kurzzeichen für Produkt und Schweißprozess des Schweißzusatzwerkstoffs nach DIN EN ISO 544 [27].....	26
Tab. 3-3: Typische Schmelzanalyse eines S355 ML im Vergleich zu einem konventionellen S355 J2+N (Blechdicke: 50 mm) [74] .....	35
Tab. 3-4: Typische Schmelzanalyse eines S460 ML im Vergleich zu einem normalisierten S460 NL (Blechdicke: 50 mm) [74] .....	35
Tab. 3-5 Auswirkungen der Streckenenergie $E$ auf die Schweißverbindung.....	36
Tab. 3-6: Thermischer Wirkungsgrad $k$ in Bezug zu verschiedenen Schweißverfahren [109].....	37
Tab. 3-7: Formfaktor $F_2$ und $F_3$ zur Berücksichtigung des Einflusses der Schweißnahtform auf die Abkühlzeit $t_{8/5}$ [3] .....	41
Tab. 4-1: Korrelationsbeiwerte $\beta_w$ für Kehlnähte nach DIN EN 1993-1-8 [9], DIN EN 1993-1-8/NA [10], DIN EN 1993-1-12 [11] und DIN EN 1993-1-12/NA [12].....	53
Tab. 4-2: Anpassungswerte $\beta_w$ nach Background Document 6.05 Part A [45].....	57
Tab. 4-3: Angehobene Anpassungswerte $\beta_w$ nach Background Document 6.05 Part A [45] .....	58
Tab. 5-1: Vorschlag der Korrelationsbeiwerte $\beta_w$ , $GW$ für Flankenkehlnahtverbindungen S460 und S690 nach EN 1993-1-8 und EN 1993-1-12 aus Rasche [84].....	67
Tab. 5-2: Vorschlag für Korrelationsbeiwerte $\beta_w$ , $SZW$ nach EN 1993-1-8 und EN 1993-1-12 aus Rasche [84] .....	69
Tab. 6-1: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Grundwerkstoffe .....	74
Tab. 6-2: Nominelle Kennwerte der verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe .....	75
Tab. 6-3: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe .....	75
Tab. 6-4: Schwerpunkte der experimentellen Untersuchungen an Flankenkehlnahtverbindungen .....	79
Tab. 6-5: Definition der Begriffe <i>Verbindung gleicher Grundwerkstoffe</i> und <i>Mischverbindung</i> .....	80
Tab. 6-6: Mismatch-Faktor $M$ .....	80
Tab. 6-7: Versuchskonfigurationen der Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe .....	82
Tab. 6-8: Versuchskonfigurationen der Hauptgruppe 1: S355 J2+N / S690 QL.....	83
Tab. 6-9: Versuchskonfigurationen der Hauptgruppe 2: S460 ML / S690 QL .....	83
Tab. 6-10: SOLL-Werte der Schweißprozessparameter für die Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen.....	84
Tab. 6-11: IST-Werte der Schweißprozessparameter der Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe ...	86
Tab. 6-12: IST-Werte der Schweißprozessparameter der Mischverbindungen.....	86
Tab. 7-1: Versuchsergebnisse der Traglastuntersuchungen - Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe .....	105
Tab. 7-2: Versuchsergebnisse der Traglastuntersuchungen - Mischverbindungen.....	106
Tab. 7-3: Versuchsergebnisse bzgl. Verformungsvermögen - Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe .....	107
Tab. 7-4: Versuchsergebnisse bzgl. Verformungsvermögen - Mischverbindungen .....	108
Tab. 8-1: Definitionen der Nachtdicke .....	112
Tab. 9-1: Ausgewählte relative Sterbehäufigkeiten pro Jahr [83] .....	135
Tab. 9-2: Zusammenhang zwischen Versagenswahrscheinlichkeit $P_f$ und Zuverlässigkeitsindex $\beta$	135
Tab. 9-3: Stufen der Zuverlässigkeitstheorie nach [96].....	142

Tab. 9-4: Klassifizierung der Nutzungsdauer nach [6] .....	143
Tab. 9-5: Klassen für Schadensfolgen .....	144
Tab. 9-6: Beziehung zwischen Zuverlässigkeitsindex $\beta$ und Versagenswahrscheinlichkeit $P_f$ .....	146
Tab. 9-7: Empfehlungen für Mindestwerte des Zuverlässigkeitsindex $\beta$ [6] .....	147
Tab. 10-1: Werte $kn$ für charakteristische Werte (5 %-Fraktilwert) nach DIN EN 1990 [6].....	156
Tab. 10-2: Werte $kd, n$ für den Bemessungswert für Tragfähigkeitsnachweise nach DIN EN 1990 [6] .....	157
Tab. 10-3: Stufen des statistischen Auswerteverfahrens nach DIN EN 1990 [6].....	158
Tab. 11-1: Versuche an Flankenkehlnähten aus der Dissertation von Rasche [84].....	170
Tab. 11-2: Versuche an Flankenkehlnähten aus dem Forschungsprojekt <i>SAFEBRICKTILE</i> [52].....	172
Tab. 11-3: Methode 1 - Schubfluss .....	174
Tab. 11-4: Methode 2 - Schubspannung.....	174
Tab. 11-5: Basisvariablen der Widerstandsfunktion.....	175
Tab. 11-6: Statistische Kenngrößen der Zugfestigkeit $f_u, GW$ der Grundwerkstoffe .....	177
Tab. 11-7: Statistische Kenngrößen - Schweißzusatzwerkstoff G46 / T46.....	179
Tab. 11-8: Statistische Kenngrößen - Schweißzusatzwerkstoff G69 / T69.....	179
Tab. 11-9: Statistische Kenngrößen - Schweißzusatzwerkstoff G89 / T89.....	179
Tab. 11-10: Statistische Kenngrößen der Zugfestigkeit $f_u, SZW$ der Schweißzusatzwerkstoffe.....	180
Tab. 11-11: Differenzierung der Ermittlung des Variationskoeffizienten $V_{rt2}$ der Basisvariablen $X_j$ und der Standardabweichung $Q$ der Widerstandsfunktion $rt$ .....	189
Tab. 11-12: Nennwerte der Zugfestigkeit $f_u, GW$ für Baustähle nach DIN EN 1993-1-1 [7], Tabelle 3.1 und DIN EN 1993-1-12 [11], Tabelle 1 und 2.....	191
Tab. 11-13: Nennwerte der Zugfestigkeit $f_u, SZW$ für Schweißzusatzwerkstoffe.....	191
Tab. 11-14: Datenbasis für die Evaluationsgruppe Ebene 1 - Grundwerkstoff S460 .....	194
Tab. 11-15: Datenbasis für die Evaluationsgruppe Ebene 1 - Grundwerkstoff S690 .....	194
Tab. 11-16: Kombinationen und Grenzs Schubspannungen nach Rasche .....	195
Tab. 11-17: Optimierungsvarianten innerhalb einer Evaluationsgruppe.....	195
Tab. 11-18: Evaluationsergebnisse: Sensitivitätsanalyse - Einfluss der Gewichtungsfaktoren.....	196
Tab. 11-19: Versuche an Flankenkehlnähten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen - Grundwerkstoff S460.....	200
Tab. 11-20: Statistische Auswertung bzgl. Grundwerkstoff: S460 .....	200
Tab. 11-21: Grenzs Schubspannungen: Grundwerkstoff S460 N/NL bzw. S460 M/ML .....	201
Tab. 11-22: Versuche an Flankenkehlnähten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe - Grundwerkstoff S690/S700 .....	202
Tab. 11-23: Statistische Auswertung bzgl. Grundwerkstoff S690/S700 .....	202
Tab. 11-24: Grenzs Schubspannungen: Grundwerkstoff S690 Q/QL/QL1 .....	203
Tab. 11-25: Bemessungsvorschlag für Flankenkehlnahtverbindungen nach DIN EN 1993-1-8 und DIN EN 1993-1-12.....	204
Tab. 11-26: Versuche an Flankenkehlnähten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen.....	207
Tab. 11-27: Ergebnisse der statistischen Auswertung bzgl. SZW .....	208
Tab. 11-28: Vergleich der Grenzs Schubspannungen .....	208
Tab. 11-29: Bemessungsvorschlag für Flankenkehlnahtverbindungen bei ausschließlicher Berücksichtigung des Schweißzusatzwerkstoffs .....	209
Tab. 11-30: Untersuchte Alternativen.....	211
Tab. 11-31: Versuche an Flankenkehlnähten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen - Schweißzusatzwerkstoffe G/T/E46 .....	213
Tab. 11-32: Statistische Auswertung bzgl. Schweißzusatzwerkstoffe G/T/E46.....	214
Tab. 11-33: Vergleich der Grenzs Schubspannungen für Schweißzusatzwerkstoffe G/T/E46.....	215
Tab. 11-34: Versuche an Flankenkehlnähten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen - Schweißzusatzwerkstoffe G/T69.....	217
Tab. 11-35: Statistische Auswertung bzgl. Schweißzusatzwerkstoffe G/T69.....	217
Tab. 11-36: Vergleich der Grenzs Schubspannungen für Schweißzusatzwerkstoffe G/T69 .....	218

---

Tab. 11-37: Versuche an Flankenkehlnähten von Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen - Schweißzusatzwerkstoff G89 .....	220
Tab. 11-38: Statistische Auswertung bzgl. Schweißzusatzwerkstoff G89 .....	220
Tab. 11-39: Vergleich der Grenzs Schubspannungen für Schweißzusatzwerkstoff G/T69 .....	221
Tab. 11-40: Ergebnisse der statistischen Auswertung bzgl. dem Einfluss des Mechanisierungsgrades .....	225
Tab. 12-1: Zusammenfassung der stat. Kenngrößen der el. und pl. Schubfederzahlen .....	240
Tab. 12-2: Zur Verfügung stehende Versuchsergebnisse für die statistische Auswertung bzgl. dem Verformungsvermögen .....	246
Tab. 12-3: Ergebnisse des Optimierungsalgorithmus bzgl. den el. und pl. Anpassungsfaktoren $c\Delta$ ..	248
Tab. 12-4: Variationskoeffizienten der Basisvariablen .....	250
Tab. 12-5: Ergebnisse der statistischen Auswertung bzgl. der Korrelationsfaktoren $\beta\Delta, SZW$ .....	250
Tab. 12-6: Vorschlag für Korrelationsfaktoren $\beta\Delta, SZW$ .....	250
Tab. A-1: Kerbschlagarbeit der verwendeten Grundwerkstoffe entsprechend Abnahmeprüfzeugnis 3.1 [21] .....	281
Tab. A-2: Chemische Zusammensetzung (Schmelzanalyse) der Grundwerkstoffe entsprechend Abnahmeprüfzeugnis 3.1 [21] .....	281
Tab. A-3: Kerbschlagarbeit der verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe entsprechend Abnahmeprüfzeugnis 3.1 [21] .....	282
Tab. A-4: Chemische Analyse der Schweißzusatzwerkstoffe entsprechend Abnahmeprüfzeugnis 3.1 [21] .....	282
Tab. B-1: Statistische Kenngrößen - Schweißzusatzwerkstoff G46 / T46 .....	284
Tab. B-2: Statistische Kenngrößen - Schweißzusatzwerkstoff G69 / T69 .....	285
Tab. B-3: Statistische Kenngrößen - Schweißzusatzwerkstoff G89 / T89 .....	286



## Anhang A - Kerbschlagarbeit und chemische Zusammensetzung

### A.1: Grundwerkstoffe

In Tab. A-1 ist die Kerbschlagarbeit und in Tab. A-2 die chemisch Zusammensetzung der im Forschungsprojekt *SAFEBRIC TILE* [52] verwendeten Grundwerkstoffe entsprechend Abnahmeprüfzeugnis 3.1 aufgeführt.

Tab. A-1: Kerbschlagarbeit der verwendeten Grundwerkstoffe entsprechend Abnahmeprüfzeugnis 3.1 [21]

Kerbschlagarbeit		S355 J2+N			S460 ML			S690 QL		
		1.0577 DIN EN 10025-2:2005-04 Tabelle 9 [14]			1.8838 DIN EN 10025-4:2005-04 Tabelle 6 [16]			1.8928 DIN EN 10025-6:2009-08 Tabelle 6 [18]		
Prüftemperatur	[°C]	-20			-50			-40		
Mindestwert	[J]	27			27			30		
Einzelwert (EW)	[J]	63	66	70	374	369	354	192	208	201
Mittelwert (MW)	[J]	66			365			200		

Tab. A-2: Chemische Zusammensetzung (Schmelzanalyse) der Grundwerkstoffe entsprechend Abnahmeprüfzeugnis 3.1 [21]

Legierungselemente			S355 J2+N			S460 ML			S690 QL		
			1.0577 DIN EN 10025-2:2005-04 Tabelle 7 [14] [%]			1.8838 DIN EN 10025-4:2005-04 Tabelle 5 [16] [%]			1.8928 DIN EN 10025-6:2009-08 Tabelle 5 [18] [%]		
Kohlenstoff	C	nom.	max. 0,20			max. 0,16			max. 0,20		
		exp.	0,120			0,030			0,170		
Silicium	Si	nom.	max. 0,55			max. 0,60			max. 0,80		
		exp.	0,350			0,324			0,210		
Mangan	Mn	nom.	max. 1,60			max. 1,70			max. 1,70		
		exp.	1,350			1,630			0,950		
Phosphor	P	nom.	max. 0,025			max. 0,025			max. 0,020		
		exp.	0,013			0,008			0,014		
Schwefel	S	nom.	max. 0,025			max. 0,020			max. 0,010		
		exp.	0,004			0,0006			0,0006		
Aluminium	Al	nom.	-			min. 0,02			-		
		exp.	0,037			0,034			0,095		
Niob	Nb	nom.	max. 0,05			max. 0,05			max. 0,06		
		exp.	0,020			0,038			0,030		
Vanadium	V	nom.	max. 0,13			max. 0,12			max. 0,12		
		exp.	-			0,004			-		
Molybdän	Mo	nom.	max. 0,11			max. 0,20			max. 0,70		
		exp.	0,010			0,007			0,200		
Nickel	Ni	nom.	max. 0,42			max. 0,80			max. 2,00		
		exp.	0,160			0,170			0,050		
Chrom	Cr	nom.	max. 0,42			max. 0,30			max. 1,50		
		exp.	0,050			0,169			0,350		
Kupfer	Cu	nom.	max. 0,55			max. 0,55			max. 0,50		
		exp.	0,160			0,174			0,030		

Fortsetzung von Tab. A-2

Legierungselemente			S355 J2+N	S460 ML	S690 QL
			1.0577 DIN EN 10025-2:2005-04 Tabelle 7 [14] [%]	1.8838 DIN EN 10025-4:2005-04 Tabelle 5 [16] [%]	1.8928 DIN EN 10025-6:2009-08 Tabelle 5 [18] [%]
Titan	Ti	nom.	max. 0,05	max. 0,05	max. 0,05
		exp.	0,017	0,012	0,008
Stickstoff	N	nom.	-	max. 0,025	max. 0,015
		exp.	0,0042	0,0052	0,0033
Bor	B	nom.	-	-	max. 0,005
		exp.	-	0,0003	0,0017
CE / CEV			0,378	0,361	0,444
PCM			0,213	0,145	0,266
CET			0,271	0,215	0,305

## A.2: Schweißzusatzwerkstoffe

In Tab. A-3 ist die Kerbschlagarbeit und in Tab. A-4 die chemisch Zusammensetzung der im Forschungsprojekt *SAFEBRIC TILE* [52] verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe entsprechend Abnahmeprüfzeugnis 3.1 aufgeführt.

Tab. A-3: Kerbschlagarbeit der verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe entsprechend Abnahmeprüfzeugnis 3.1 [21]

G46					G69					G89				
4 M21 4Si1 DIN EN ISO 14341:2011-04 Tabelle 2 [33]					6 M21 Mn4Ni1,5CrMo DIN EN ISO 16834:2012-08 Tabelle 2 [36]					6 M21 Mn4Ni2CrMo DIN EN ISO 16834:2012-08 Tabelle 2 [36]				
T [°C]	EW [J]		MW [J]		T [°C]	EW [J]		MW [J]		T [°C]	EW [J]		MW [J]	
RT	151	166	157	162	RT	131	133	131	132	RT	90	90	89	90
0	143	144	138	142	0	120	118	118	119	0	88	94	82	88
-20	128	121	132	127	-20	108	99	98	102	-20	71	78	80	76
-40	104	89	78	90	-40	79	85	85	83	-40	65	61	66	64
					-50	79	75	80	78	-50	64	58	52	58
					-60	60	71	66	69	-60	54	55	53	54

Tab. A-4: Chemische Analyse der Schweißzusatzwerkstoffe entsprechend Abnahmeprüfzeugnis 3.1 [21]

Legierungselemente			G46	G69	G89
			4Si1 DIN EN ISO 14341:2011-04 Tabelle 3A [33] [%]	Mn4Ni1,5CrMo DIN EN ISO 16834:2012-08 Tabelle 3A [36] [%]	Mn4Ni2CrMo DIN EN ISO 16834:2012-08 Tabelle 3A [36] [%]
Kohlenstoff	C	nom.	0,06 bis 0,14	max. 0,12	max. 0,12
		exp.	0,09	0,09	0,10
Silicium	Si	nom.	0,08 bis 1,20	0,50 bis 0,80	0,60 bis 0,90
		exp.	0,85	0,48	0,65
Mangan	Mn	nom.	1,60 bis 1,90	1,60 bis 2,10	1,60 bis 2,10
		exp.	1,39	1,40	1,54
Phosphor	P	nom.	max. 0,025	max. 0,015	max. 0,015
		exp.	0,008	0,006	0,008



Fortsetzung von Tab. A-4

Legierungselemente			G46	G69	G89
			4Si1 DIN EN ISO 14341:2011-04 Tabelle 3A [33] [%]	Mn4Ni1,5CrMo DIN EN ISO 16834:2012-08 Tabelle 3A [36] [%]	Mn4Ni2CrMo DIN EN ISO 16834:2012-08 Tabelle 3A [36] [%]
Schwefel	S	nom.	max. 0,025	max. 0,018	max. 0,018
		exp.	0,010	0,009	0,010
Aluminium	Al	nom.	max. 0,02	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25
		exp.	0,002	0,002	0,002
Niob	Nb	nom.	-	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25
		exp.	0,003	0,002	0,001
Vanadium	V	nom.	max. 0,03	max. 0,03	max. 0,03
		exp.	<0,001	<0,001	0,001
Molybdän	Mo	nom.	max. 0,15	0,30 bis 0,65	0,45 bis 0,70
		exp.	0,005	0,51	0,62
Nickel	Ni	nom.	max. 0,15	1,30 bis 1,90	1,80 bis 2,30
		exp.	0,021	1,43	2,21
Chrom	Cr	nom.	max. 0,15	0,15 bis 0,40	0,20 bis 0,45
		exp.	0,028	0,17	0,33
Kupfer	Cu	nom.	max. 0,35	max. 0,30	max. 0,30
		exp.	0,063	0,20	0,074
Titan	Ti	nom.	max. 0,15 (Ti + Zr)	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25
		exp.	0,006	0,023	0,032
Stickstoff	N	nom.	-	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25
		exp.	0,008	0,005	0,007
Bor	B	nom.	-	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25
		exp.	0,003	0,001	<0,001
Wolfram	W	nom.	-	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25
		exp.	0,006	0,004	0,003
Cobalt	Co	nom.	-	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25
		exp.	0,003	0,007	0,006
Zinn	Sn	nom.	-	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25
		exp.	<0,001	0,006	0,001
Sauerstoff	O	nom.	-	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25
		exp.	0,031	0,031	0,028
Zink	Zn	nom.	-	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25
		exp.	0,001	<0,001	<0,001
Zirconium	Zr	nom.	max. 0,15 (Ti + Zr)	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25
		exp.	0,001	0,001	0,001
Calcium	Ca	nom.	-	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25	$\Sigma$ andere Elemente max. 0,25
		exp.	<0,001	<0,001	<0,001
Diffusibler Wasserstoff DIN EN ISO 3690 [29] H <sub>D</sub> [ml/100g reines Schweißgut]			2,4	4,0	3,0
CE / CEV			0,334	0,568	0,699
PCM			0,208	0,257	0,302
CET			0,235	0,335	0,391

## Anhang B - Bootstrapping-Methode

In Anhang B.1 bis B.3 sind die Ergebnisse der Bootstrapping-Methode aus Kapitel 11.4.3.3 aufgeführt.

### B.1: Bootstrapping-Methode: Schweißzusatzwerkstoff G46 / T46

Tab. B-1: Statistische Kenngrößen - Schweißzusatzwerkstoff G46 / T46

<b>G46 / T46</b>			
DIN EN ISO 14341:2011-04 Tabelle 1A (G46) DIN EN ISO 17632:2008-08 Tabelle 1A (T46) 530 - 680 [N/mm <sup>2</sup> ]			
	Stichprobenerhebung	Mittelwert aller min.-Werte aus Bootstrapping	Mittelwert aller max.-Werte aus Bootstrapping
$\bar{x}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	610,0	598,92	621,55
$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	32,77	29,72	34,83
$V$ [%]	<b>5,37</b>	<b>4,96</b>	<b>5,60</b>
$n/d$ [-]	124	1.000.000	1.000.000

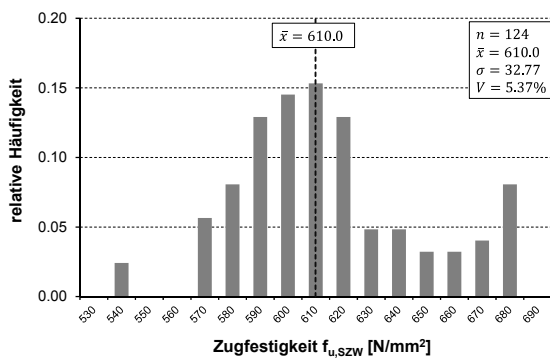


Abb. B-1: Stichprobenerhebung - SZW G46 / T46  
n=124

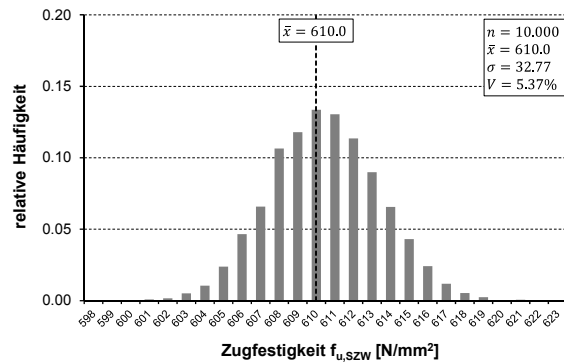


Abb. B-2: Bootstrapping - SZW G46 / T46  
Subset 1: n=10.000

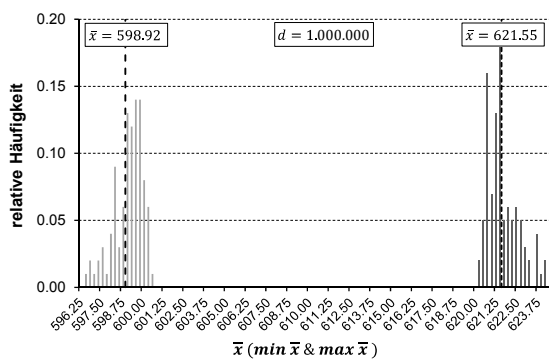


Abb. B-3: Bootstrapping - SZW G46 / T46  
 $\bar{x} \mid d=1.000.000$

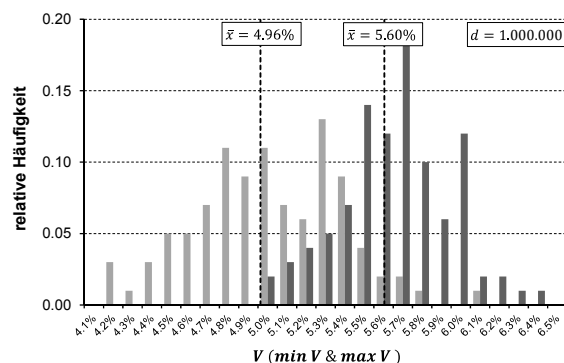


Abb. B-4: Bootstrapping - SZW G46 / T46  
 $V \mid d=1.000.000$

**B.2: Bootstrapping-Methode: Schweißzusatzwerkstoff G69 / T69**

Tab. B-2: Statistische Kenngrößen - Schweißzusatzwerkstoff G69 / T69

<b>G69 / T69</b>			
DIN EN ISO 16834:2012-08 Tabelle 1A (G69) DIN EN ISO 18276:2006-09 Tabelle 1A (T69) 770 - 940 [N/mm <sup>2</sup> ]			
	Stichprobenerhebung	Mittelwert aller min.-Werte aus Bootstrapping	Mittelwert aller max.-Werte aus Bootstrapping
$\bar{x}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	818,5	842,55
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	40,98	47,77
$V$	[%]	5,01	5,67
$n/d$	[-]	48	1.000.000

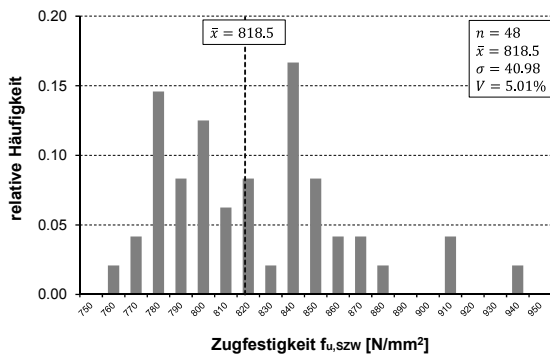


Abb. B-5: Stichprobenerhebung - SZW G69 / T69  
n=48

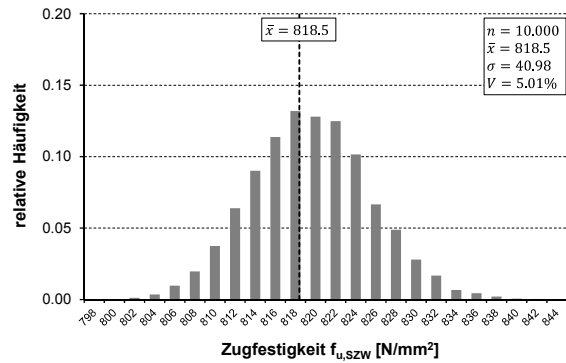


Abb. B-6: Bootstrapping - SZW G69 / T69  
Subset 1: n=10.000

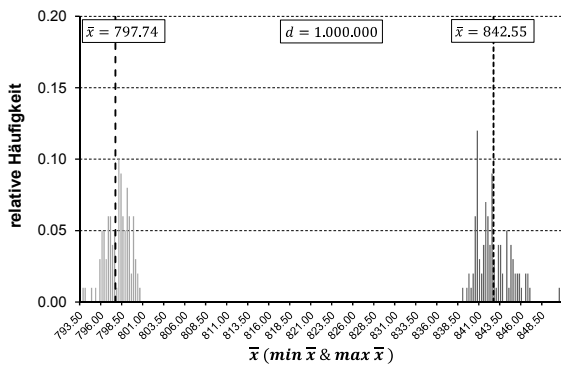


Abb. B-7: Bootstrapping - SZW G69 / T69  
 $\bar{x} \mid d=1.000.000$

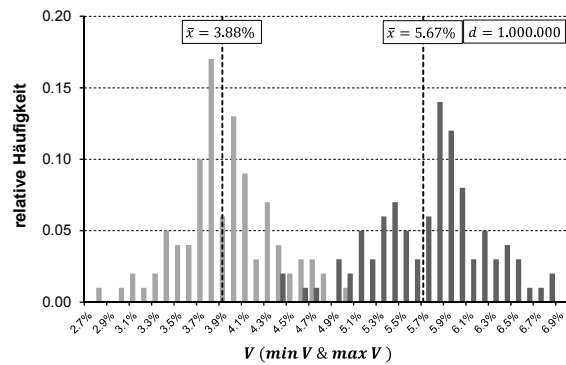


Abb. B-8: Bootstrapping - SZW G69 / T69  
 $V \mid d=1.000.000$

**B.3: Bootstrapping-Methode: Schweißzusatzwerkstoff G89 / T89**

Tab. B-3: Statistische Kenngrößen - Schweißzusatzwerkstoff G89 / T89

<b>G89 / T89</b>			
DIN EN ISO 16834:2012-08 Tabelle 1A (G89) DIN EN ISO 18276:2006-09 Tabelle 1A (T89) 940 - 1180 [N/mm <sup>2</sup> ]			
	Stichprobenerhebung	Mittelwert aller min.-Werte aus Bootstrapping	Mittelwert aller max.-Werte aus Bootstrapping
$\bar{x}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1001,5	973,93	1030,12
$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	57,06	49,66	59,12
$V$ [%]	<b>5,70</b>	<b>5,10</b>	<b>5,74</b>
$n/d$ [-]	60	1.000.000	1.000.000

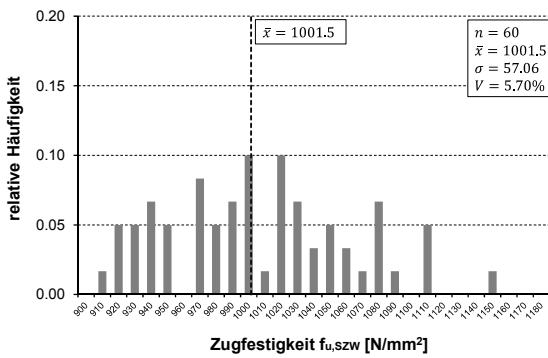


Abb. B-9: Stichprobenerhebung - SZW G89 / T89  
n=60

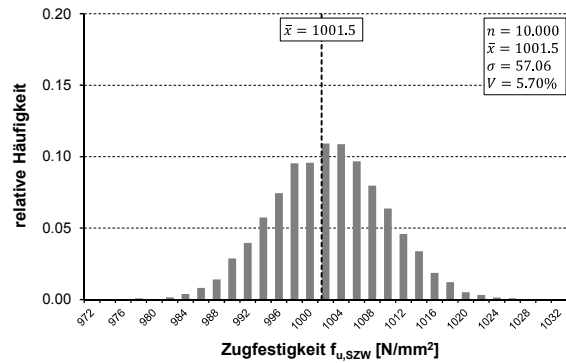


Abb. B-10: Bootstrapping - SZW G89 / T89  
Subset 1: n=10.000

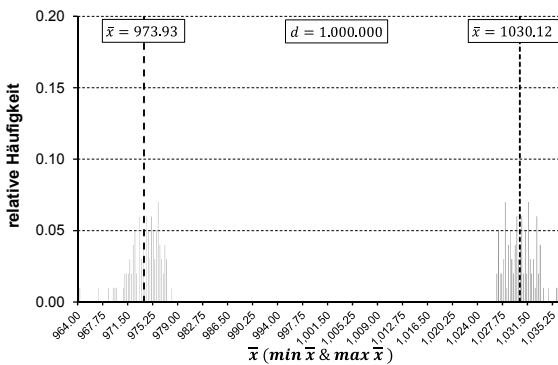


Abb. B-11: Bootstrapping - SZW G89 / T89  
 $\bar{x} \mid d=1.000.000$

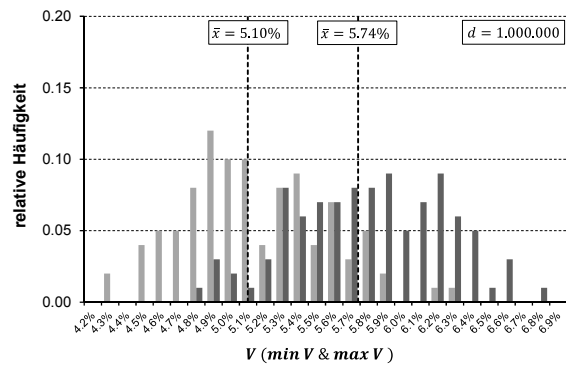


Abb. B-12: Bootstrapping - SZW G89 / T89  
 $V \mid d=1.000.000$

## Anhang C - Verformungsverhalten

### C.1: Verformungsverhalten bis Probenbruch

In Anhang C.1 ist das Verformungsverhalten der Flankenkehlnahtverbindungen der Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRICKTILE* [52] bis Probenbruch nach Methode III entsprechend Kapitel 6.7.3 dargestellt.

#### Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe

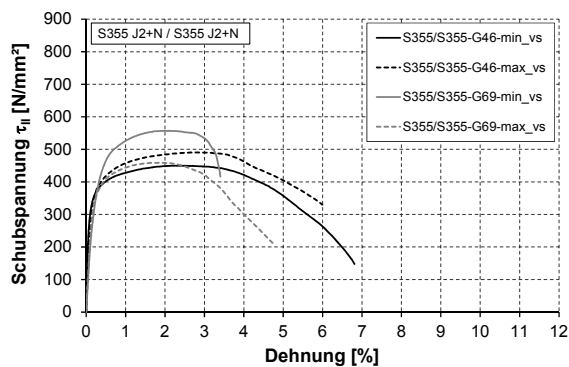


Abb. C-1: S355 J2+N / S355 J2+N

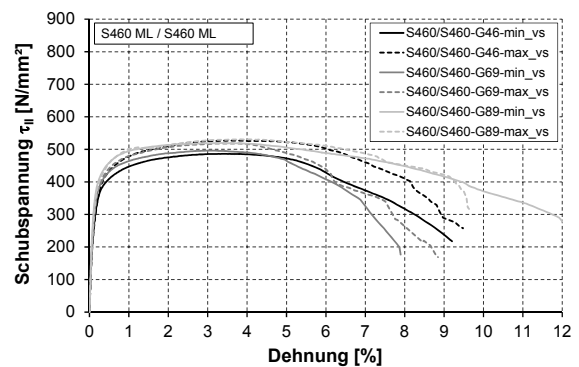


Abb. C-2: S460 ML / S460 ML

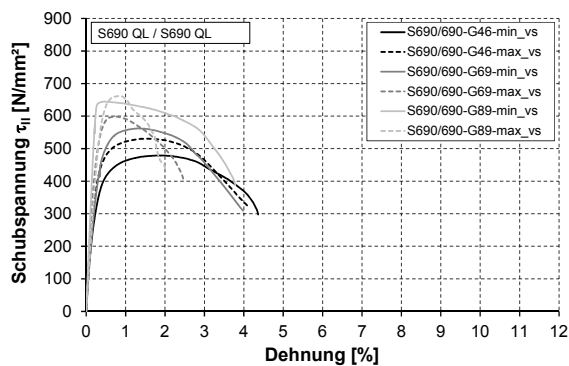


Abb. C-3: S690 QL / S690 QL

Mischverbindungen

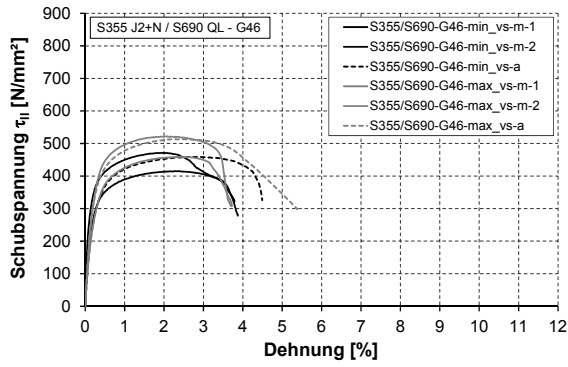


Abb. C-4: S355 J2+N / S690 QL - G46

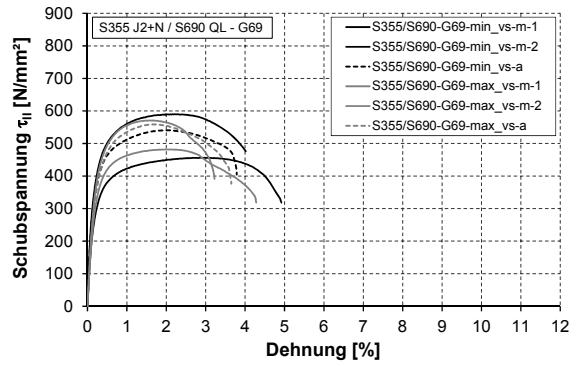


Abb. C-5: S355 J2+N / S690 QL - G69

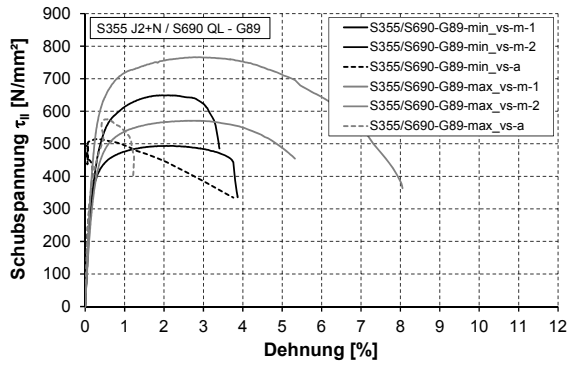


Abb. C-6: S355 J2+N / S690 QL - G89

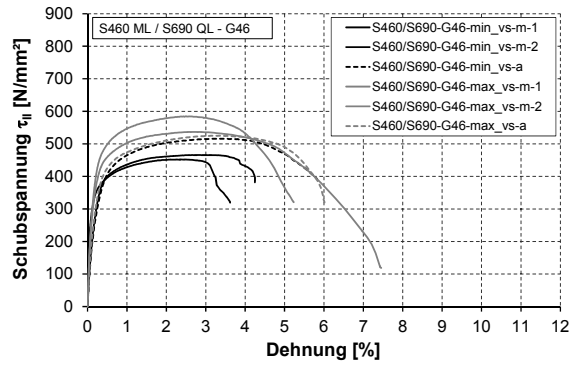


Abb. C-7: S460 ML / S690 QL - G46

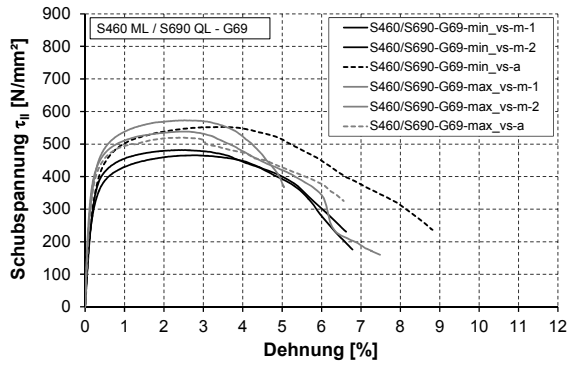


Abb. C-8: S460 ML / S690 QL - G69

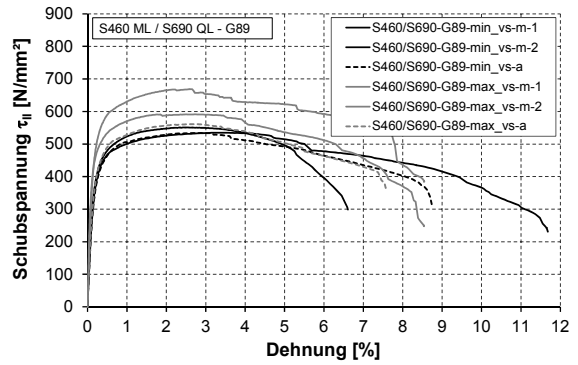


Abb. C-9: S460 ML / S690 QL - G89

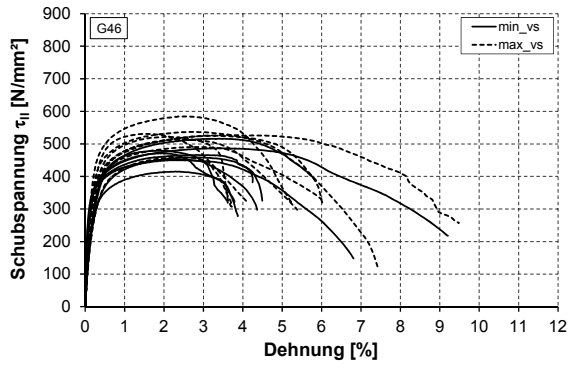


Abb. C-10: SZW G46 - zusammengefasst

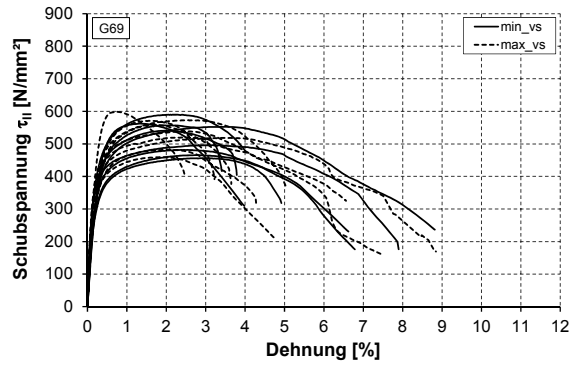


Abb. C-11: SZW G69 - zusammengefasst

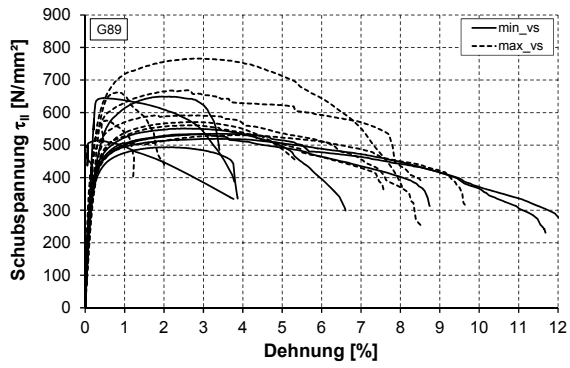


Abb. C-12: SZW G89 - zusammengefasst

## C.2: Verformungsverhalten bis einschließlich der maximalen Last

In Anhang C.2 ist das Verformungsverhalten der Flankenkehlnahtverbindungen der Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe und Mischverbindungen aus dem Forschungsprojekt *SAFEBRIC TILE* [52] bis einschließlich der maximalen Last  $F_{max}$  bzw. der maximalen Schubspannung  $\tau_{\parallel,max}$  dargestellt.

### Verbindungen gleicher Grundwerkstoffe

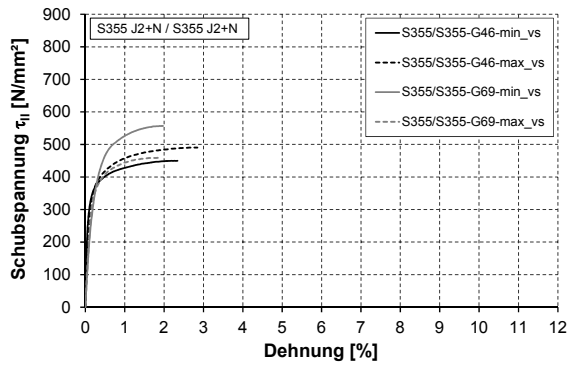


Abb. C-13: S355 J2+N / S355 J2+N

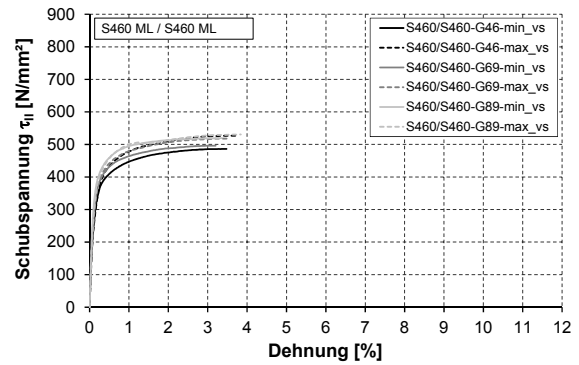


Abb. C-14: S460 ML / S460 ML

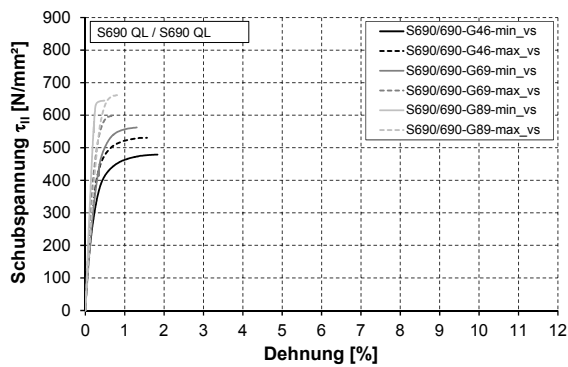


Abb. C-15: S690 QL / S690 QL



Mischverbindungen

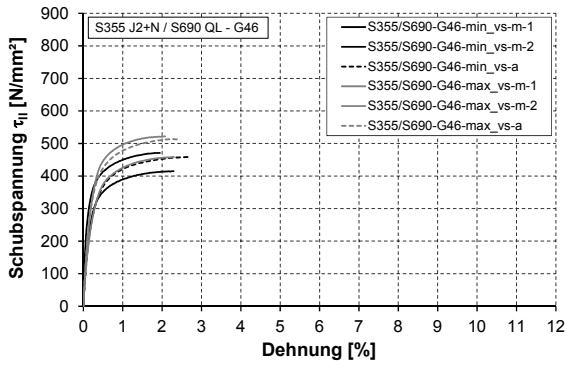


Abb. C-16: S355 J2+N / S690 QL - G46

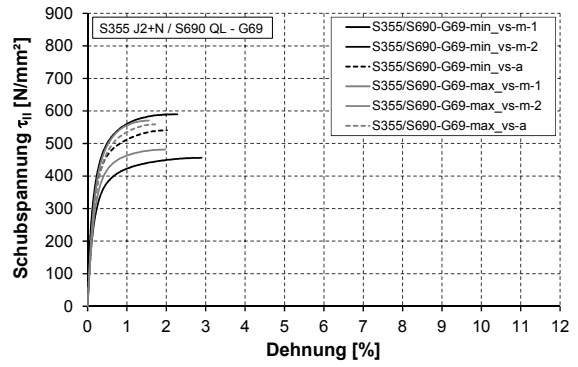


Abb. C-17: S355 J2+N / S690 QL - G69

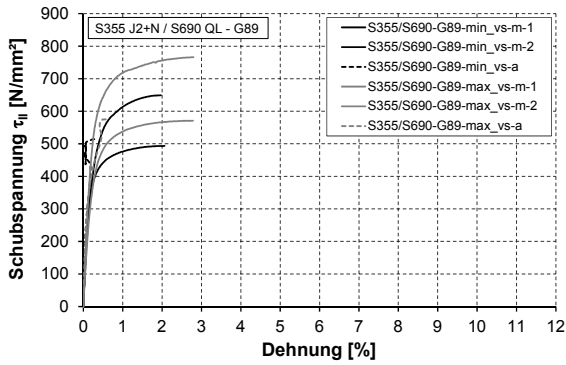


Abb. C-18: S355 J2+N / S690 QL - G89

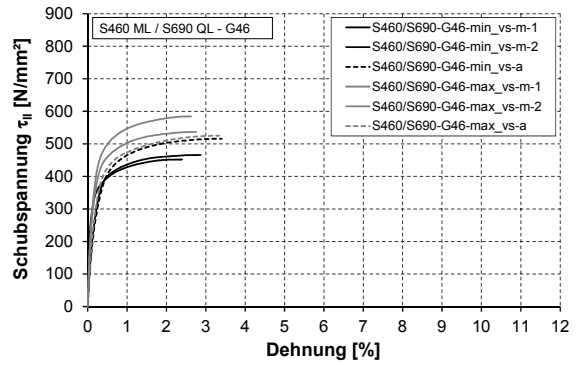


Abb. C-19: S460 ML / S690 QL - G46

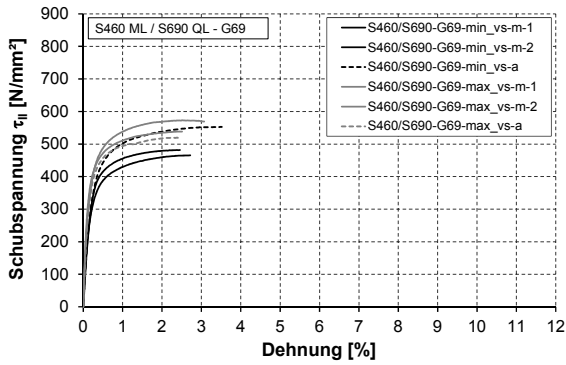


Abb. C-20: S460 ML / S690 QL - G69

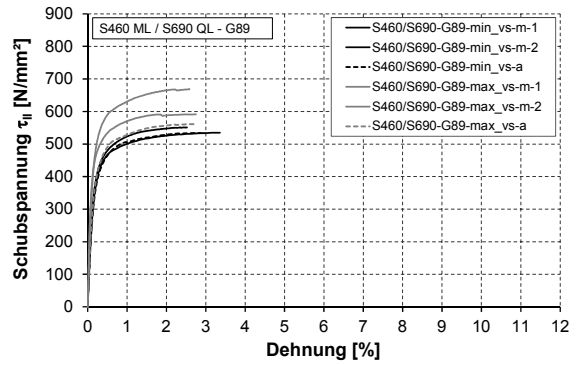


Abb. C-21: S460 ML / S690 QL - G89

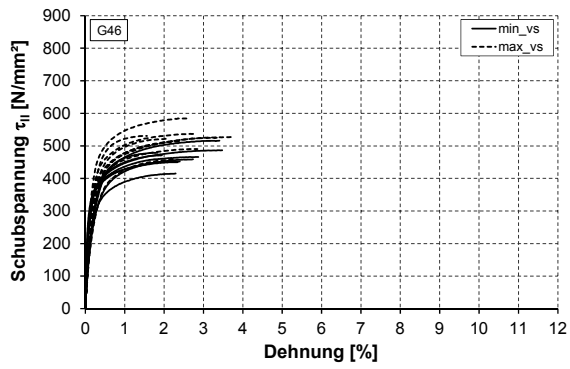


Abb. C-22: SZW G46 - zusammengefasst

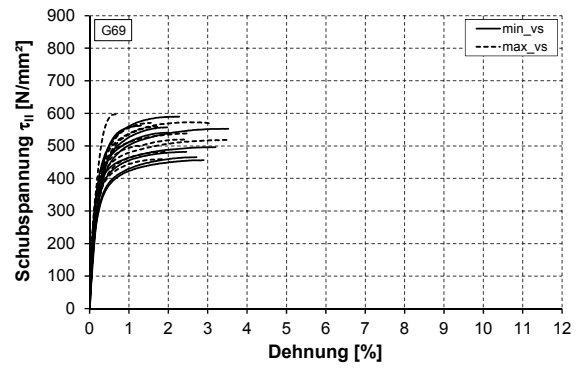


Abb. C-23: SZW G69 - zusammengefasst

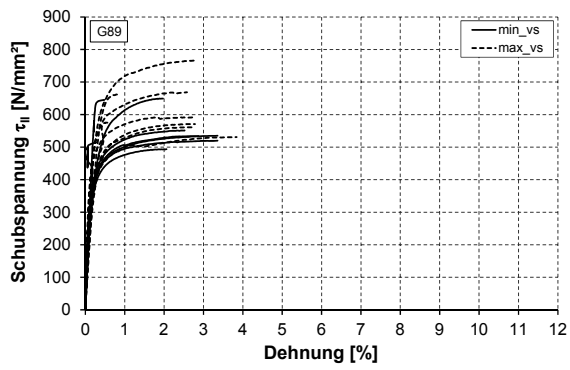
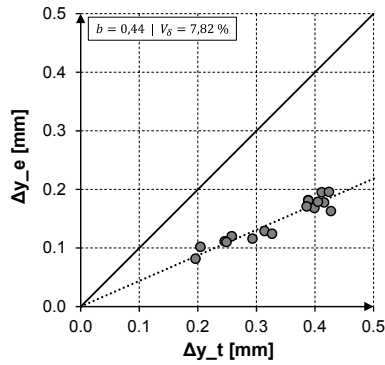


Abb. C-24: SZW G89 - zusammengefasst

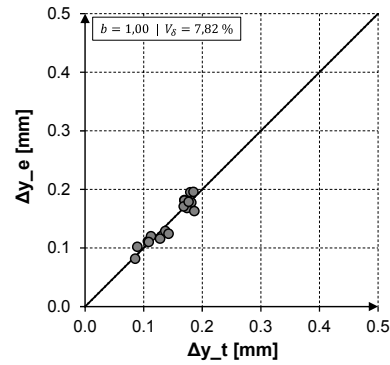
## Anhang D - Anpassungsfaktor

In Anhang D.1 und D.2 sind die Ergebnisse zur Ermittlung des Anpassungsfaktors  $c_{\Delta}$  entsprechend Kapitel 12.4.5 aufgeführt.

### D.1: Elastische Verformung

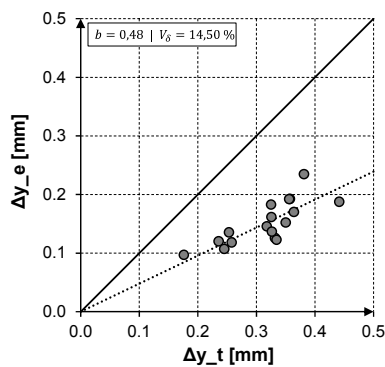


a) Mittelwertkorrektur:  $b = 0,44$

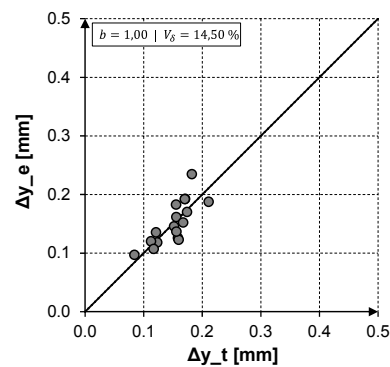


b) Mittelwertkorrektur:  $b = 1,00$ ,  $c_{\Delta,el} = 0,437$

Abb. D-1: SZW G46 -  $\Delta_e$ - $\Delta_t$  - Korrelation (elastische Verformung  $\Delta_y$ )

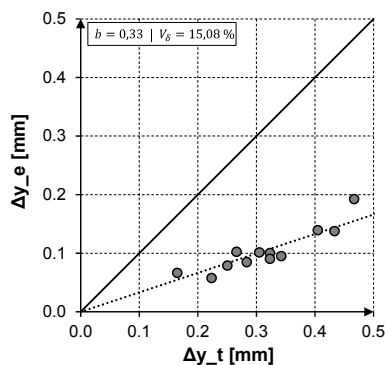


a) Mittelwertkorrektur:  $b = 0,48$

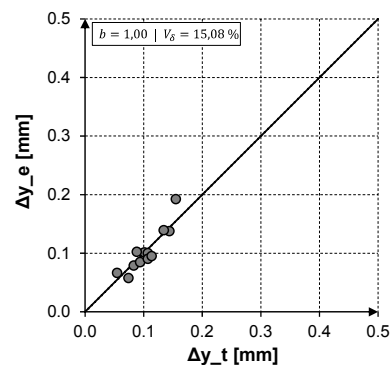


b) Mittelwertkorrektur:  $b = 1,00$ ,  $c_{\Delta,el} = 0,478$

Abb. D-2: SZW G69 -  $\Delta_e$ - $\Delta_t$  - Korrelation (elastische Verformung  $\Delta_y$ )



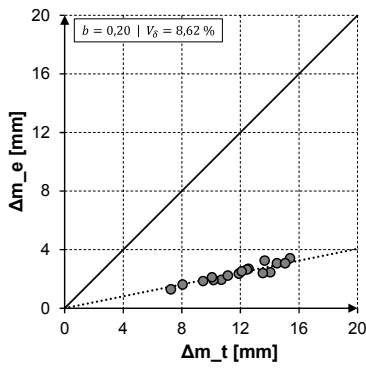
a) Mittelwertkorrektur:  $b = 0,33$



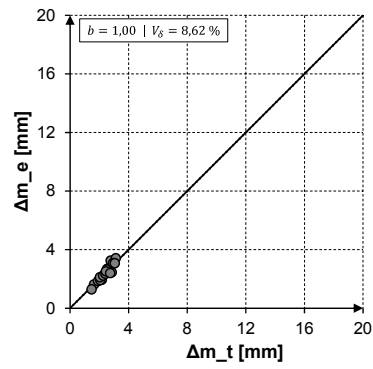
b) Mittelwertkorrektur:  $b = 1,00$ ,  $c_{\Delta,el} = 0,332$

Abb. D-3: SZW G89 -  $\Delta_e$ - $\Delta_t$  - Korrelation (elastische Verformung  $\Delta_y$ )

**D.2: Plastische Verformung**

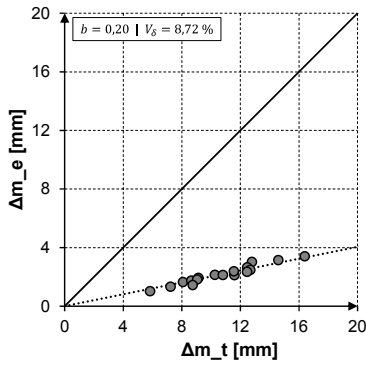


a) Mittelwertkorrektur:  $b = 0,20$

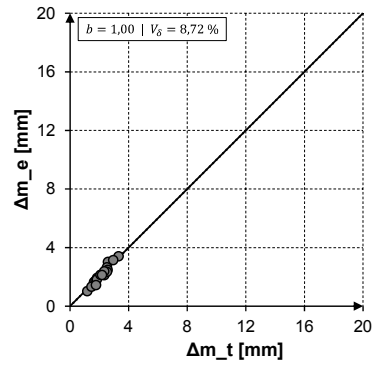


b) Mittelwertkorrektur:  $b = 1,00, c_{\Delta,pl} = 0,203$

Abb. D-4: SZW G46 -  $\Delta_e$ - $\Delta_t$  - Korrelation (plastische Verformung  $\Delta_m$ )

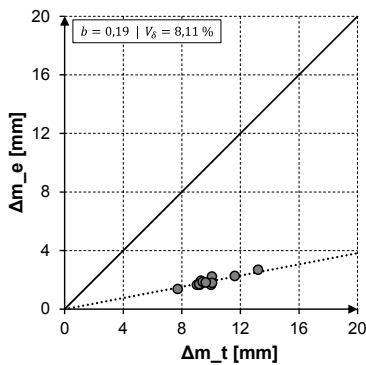


a) Mittelwertkorrektur:  $b = 0,20$

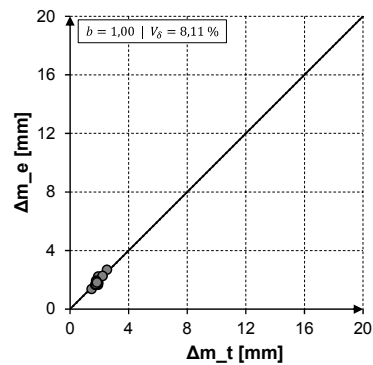


b) Mittelwertkorrektur:  $b = 1,00, c_{\Delta,pl} = 0,202$

Abb. D-5: SZW G69 -  $\Delta_e$ - $\Delta_t$  - Korrelation (plastische Verformung  $\Delta_m$ )



a) Mittelwertkorrektur:  $b = 0,19$



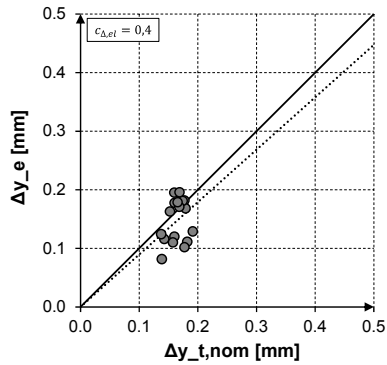
b) Mittelwertkorrektur:  $b = 1,00, c_{\Delta,pl} = 0,199$

Abb. D-6: SZW G89 -  $\Delta_e$ - $\Delta_t$  - Korrelation (plastische Verformung  $\Delta_m$ )

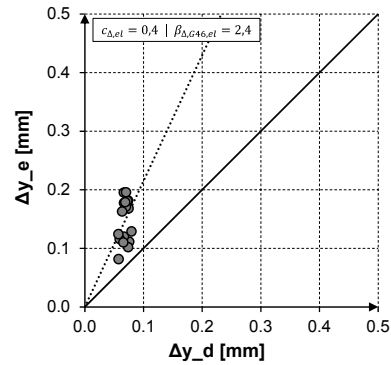
## Anhang E - Korrelationsfaktor

In Anhang E.1 und E.2 sind die Ergebnisse zur Ermittlung des Korrelationsfaktor  $\beta_{\Delta,SZW}$  entsprechend Kapitel 12.4.5 aufgeführt.

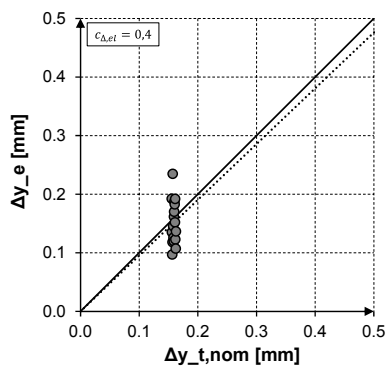
### E.1: Elastische Verformung



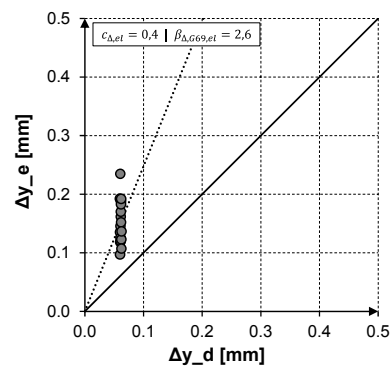
a) Experimentelle vs. nominelle Werte



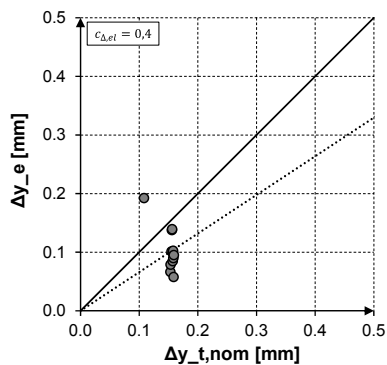
b) Experimentelle vs. Bemessungswerte

Abb. E-1: SZW G46 -  $\Delta_e - \Delta_{t,nom} / \Delta_e - \Delta_d$  - Korrelation (elastische Verformung  $\Delta_y$ )

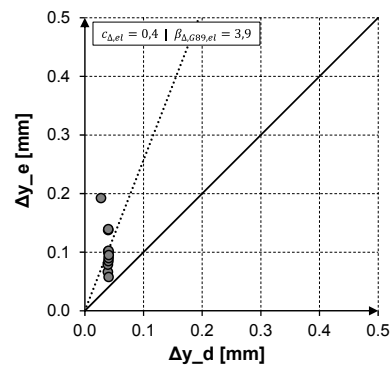
a) Experimentelle vs. nominelle Werte



b) Experimentelle vs. Bemessungswerte

Abb. E-2: SZW G69 -  $\Delta_e - \Delta_{t,nom} / \Delta_e - \Delta_d$  - Korrelation (elastische Verformung  $\Delta_y$ )

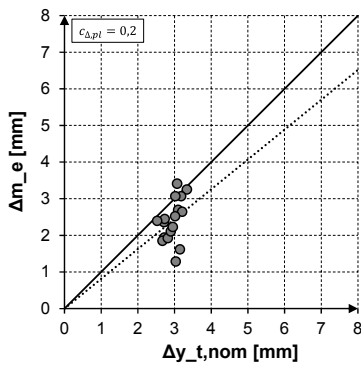
a) Experimentelle vs. nominelle Werte



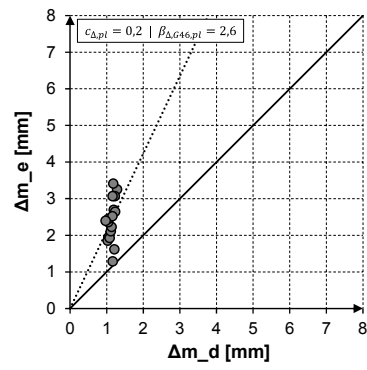
b) Experimentelle vs. Bemessungswerte

Abb. E-3: SZW G89 -  $\Delta_e - \Delta_{t,nom} / \Delta_e - \Delta_d$  - Korrelation (elastische Verformung  $\Delta_y$ )

**E.2: Plastische Verformung**

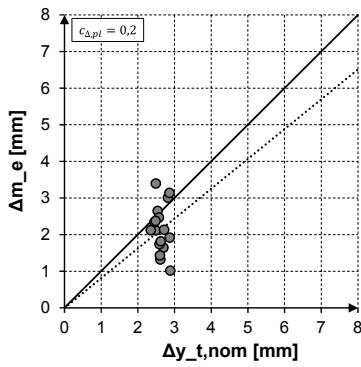


a) Experimentelle vs. nominelle Werte

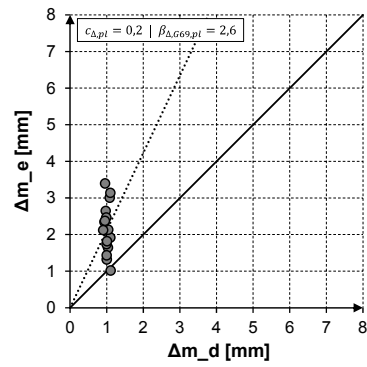


b) Experimentelle vs. Bemessungswerte

Abb. E-4: SZW G46 -  $\Delta_e$ - $\Delta_{t,nom}$  /  $\Delta_e$ - $\Delta_d$  - Korrelation (plastische Verformung  $\Delta_m$ )

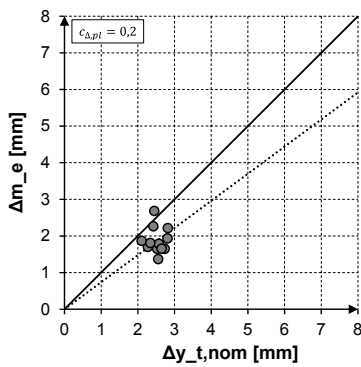


a) Experimentelle vs. nominelle Werte

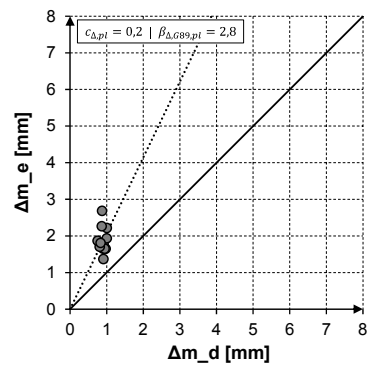


b) Experimentelle vs. Bemessungswerte

Abb. E-5: SZW G69 -  $\Delta_e$ - $\Delta_{t,nom}$  /  $\Delta_e$ - $\Delta_d$  - Korrelation (plastische Verformung  $\Delta_m$ )



a) Experimentelle vs. nominelle Werte



b) Experimentelle vs. Bemessungswerte

Abb. E-6: SZW G89 -  $\Delta_e$ - $\Delta_{t,nom}$  /  $\Delta_e$ - $\Delta_d$  - Korrelation (plastische Verformung  $\Delta_m$ )