

**Abschlussbericht für das AiF-Forschungsvorhaben
IGF-Nr: 17620 BG / DVS-Nr. 09.060**

Laufzeit: 01.12.2013 – 31.12.2015

Cord Hantelmann, Sebastian Fritzsche, Vesselin Michailov, Steffen Risse,
Ralf Boywitt, Dietmar Paulinus

Thema:

Gestaltungshinweise für geschweißte Konstruktionen aus Aluminiumschäumen

Forschungsstelle 1

BTU Cottbus-Senftenberg
Lehrstuhl Füge- und Schweißtechnik (LFT)
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. V. Michailov
Konrad-Wachsmann-Allee 17
03046 Cottbus



Forschungsstelle 2

GSI – Gesellschaft für Schweißtechnik
International mbH
Niederlassung SLV Berlin-Brandenburg
Prof. Dr.-Ing. Dietmar Paulinus
Luxemburger Straße 21
13353 Berlin



Abstract

Aluminium bietet neben seiner geringen Dichte und den guten mechanischen Eigenschaften den Vorteil, dass es sich durch den relativ geringen Schmelzpunkt gut zum Aufschäumen eignet. Weiterhin bietet es die besondere Möglichkeit zur Herstellung einer festen, flächigen Stoffverbindung (bezeichnet als AFS, engl. Aluminium Foam Sandwich) durch Verwendung einer artgleichen Werkstoffkombination – konventionelle Bleche in den Decklagen und Aluminiumschaum im Kern.

Die AFS-Halbzeuge können im noch ungeschäumten oder im bereits fertig geschäumten Zustand flexibel verarbeitet werden. Damit die Vorteile des AFS als Werkstoff für Schweißkonstruktionen effektiv nutzbar werden, sind Untersuchungen zum Schweißen und den resultierenden Verbindungseigenschaften sowie eine Einordnung der Knotenformen in gängige Regelwerke notwendig. Somit hat der Konstrukteur ein Hilfsmittel, welches die Handhabung von AFS in Schweißkonstruktionen vereinfacht.

In der vorgestellten Arbeit wurden systematische Untersuchungen zur Schweißbarkeit mittels Laserstrahlschweißen, einem MSG Kurzlichtbogen und Rührreißschweißen (kurz FSW, engl. Friction Stir Welding) von AFS im geschäumten und ungeschäumten Zustand durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Knotenformen wie I-Stoß- bzw. T-Stoßverbindungen hergestellt und deren mechanisch-technologische Eigenschaften ermittelt. Neben den quasistatischen mechanischen Untersuchungen wurde jede Ausführungsform des Knotens auf Dauerfestigkeit geprüft, um eine entsprechende Klassifizierung vornehmen zu können. Parallel wurden FEM-Modellierungen vorgenommen, um die Möglichkeit der Simulation des Sandwiches an sich sowie die Eigenschaften der Verbindungen zu untersuchen und die Ergebnisse auf weitere Ausführungsformen übertragen zu können.

Die Ergebnisse wurden abschließend als Hilfsmittel für den Konstrukteur in einem Gestaltungskatalog zusammengefasst.

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
TABELLENVERZEICHNIS	IX
FORMELZEICHEN.....	XI
ABKÜRZUNGEN	XII
1 EINLEITUNG	1
2 STAND DER TECHNIK	3
2.1 HERSTELLUNG VON AFS	3
2.2 FÜGEN VON AFS.....	4
2.3 GESTALTUNG UND BERECHNUNG VON GESCHWEIßTEN KONSTRUKTIONEN	7
2.4 SCHLUSSFOLGERUNGEN AUS DEM STAND DER FORSCHUNG	13
3 ZIELSTELLUNG	15
4 AUFSCHÄUMEN	17
4.1 AUFSCHÄUMEN IM OFEN	17
4.2 POROSITÄT.....	21
5 FÜGEN	23
5.1 LICHTBOGENSCHWEIßEN	23
5.1.1 I-STOß AFS / AFS UNGESCHÄUMT	24
5.1.2 I-STOß AFS / AFS GESCHÄUMT	25
5.1.3 I-STOß AFS UNGESCHÄUMT / BLECH	27
5.1.4 T-STOß, AFS / AFS GESCHÄUMT	27
5.1.5 T-STOß AFS GESCHÄUMT / BLECH	28
5.2 LASERSTRAHLSCHWEIßEN.....	29
5.2.1 I-STOß AFS / AFS UNGESCHÄUMT	31
5.2.2 I-STOß AFS / AFS GESCHÄUMT	33
5.2.3 I-STOß AFS UNGESCHÄUMT / BLECH	40
5.3 RÜHRREIBSCHWEIßEN	41
5.3.1 I-STOß AFS / AFS UNGESCHÄUMT	42
5.3.2 I-STOß AFS / AFS GESCHÄUMT	46

5.3.3	I-STOß AFS UNGESCHÄUMT / BLECH	50
6	PRÜFUNG	52
6.1	QUASISTATISCHE UNTERSUCHUNG	52
6.1.1	EIGENSCHAFTSERMITTLUNG AFS.....	52
6.1.2	4-PUNKT BIEGEPRÜFUNG I-STOß	55
6.1.3	T-STOßPRÜFUNG	59
6.2	DAUERFESTIGKEITSUNTERSUCHUNGEN.....	62
6.2.1	ERMITTLUNG DER SPANNUNGSMPLITUDEN I-STOß	63
6.2.2	ERMITTLUNG DER KRÄFTE	65
6.2.3	KONSTRUKTION DER PRÜFVORRICHTUNG.....	66
6.2.4	WERKSTOFFVERHALTEN.....	68
6.2.5	ERGEBNISSE GRUNDWERKSTOFF	71
6.2.6	ERGEBNISSE FÜR GESCHWEIßTE PROBEN	73
6.2.7	T-STOßPRÜFUNG	79
6.2.8	AUSWERTUNG NACH EUROCODE 9	81
7	FE-ANALYSE.....	84
7.1	SIMULATION DES SANDWICHES.....	84
7.2	FEHLERANALYSE	88
7.3	BAUTEILSIMULATION	90
8	DEMONSTRATOR	93
8.1	AUFBAU.....	93
8.2	VERSUCHSAUFBAU - FESTIGKEITSPRÜFUNG	94
8.3	FE-SIMULATION	96
8.4	FESTIGKEITSPRÜFUNG.....	99
9	GESTALTUNGSKATALOG	102
10	ZUSAMMENFASSUNG	105
11	QUELLENVERZEICHNIS	107
11.1	LITERATURVERZEICHNIS	107
11.2	NORMEN	109
11.3	SOFTWARE	109

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aluminiumschaumsandwich im Querschnitt; ungeschäumt oben; geschäumt unten.....	1
Abbildung 2: Schweißnaht MIG AFS	4
Abbildung 3: FSW-Prozess	6
Abbildung 4: Im ungeschäumten Zustand FSW-geschweißtes AFS, oben; nach dem Aufschäumen, unten	6
Abbildung 5: Nachweisablauf nach FKM-Richtlinie	10
Abbildung 6: Abbildungsvarianten von Sandwichtaufbauten im Finite Elemente Modell; a) Schalenelemente, b) Volumenelemente, c) Schalen- und Volumenelemente	12
Abbildung 7: Frontmodul eines Personennahverkehrszuges	17
Abbildung 8: IR-Wärmequellen.....	17
Abbildung 9: Platine mit Hilfsmittel im Ofen.....	18
Abbildung 10: Ungleichmäßig aufgeschäumte Platine	18
Abbildung 11: Beschichtete Platinen, mit Zinkspray, links; lokal am Rand mit Tonerde, rechts	19
Abbildung 12: Sandwich im Ofen geschäumt, oben; gekauftes Sandwich, unten	19
Abbildung 13: Schematischer Temperaturverlauf beim Aufschäumen im Ofen....	20
Abbildung 14: Homogenes Sandwich.....	20
Abbildung 15: Sandwich vollständig, links; Porenverteilung an der Decklage, rechts	21
Abbildung 16: Versuchsaufbau MSG-Schweißen.....	24
Abbildung 17: Schweißverbindung ungeschäumtes AFS, zu geringe Aufschmelzung, links; zu hoher Wärmeeintrag, rechts.....	24
Abbildung 18: I-Stoß ungeschäumtes AFS	25
Abbildung 19: AFS, I-Stoß, Zusatz AlSi5.....	26
Abbildung 20: AFS, I-Stoß, Zusatz AlMg4.5Mn	26
Abbildung 21: I-Stoß Blech / AFS.....	27
Abbildung 22: Versuchsaufbau T-Stoßverbindungen	27
Abbildung 23: T-Stoß AFS / AFS.....	28
Abbildung 24: T-Stoß AFS / Blech.....	28

Abbildung 25: Aufbau Schweißversuche Laser	30
Abbildung 26: Einspannung AFS / Laserstrahlschweißen	31
Abbildung 27: Poren Laserschweißnaht, ungeschäumtes AFS.....	32
Abbildung 28: Unregelmäßigkeiten an der Lasernaht, ungeschäumtes AFS	32
Abbildung 29: Kugelbildung am Zusatzwerkstoff beim Laserstrahlschweißen	32
Abbildung 30: Gute Laserschweißnaht, ungeschäumtes AFS.....	33
Abbildung 31: Laserschweißnaht, AFS geschäumt durchgeschweißt, Nahteinfall; rechts: ohne Wurzel, optisch gute Naht.....	Links: 33
Abbildung 32: Querschnitt AFS aufgeschäumt.....	34
Abbildung 33: Schweißnaht cw-Betrieb.....	34
Abbildung 34: Unterschiedliche Deckblechoberflächen.....	36
Abbildung 35: Versprödete Oberfläche	36
Abbildung 36: Einwölbung in der Oberfläche	36
Abbildung 37: Abgelöste Decklage.....	36
Abbildung 38: Bearbeitetes AFS	37
Abbildung 39: Schweißnahtoberfläche AFS, gefräst	38
Abbildung 40: Wurzelausbildung gefrästes AFS, Eine Decklage geschweißt, aufgebogen	38
Abbildung 41: Nahtvorbereitung mit Inlay.....	39
Abbildung 42: Schweißnahtoberfläche mit Inlay.....	40
Abbildung 43: Laserschweißnaht, AFS / Blech.....	40
Abbildung 44: Rührreibschweißmaschine ESAB LEGIOTM 3UT	41
Abbildung 45: Flachbettfräsmaschine Toledo M.R.F. FBF-1750	41
Abbildung 46: Einseitig durchgeschweißtes ungeschäumtes AFS.....	42
Abbildung 47: Entwicklungsstufen von FSW bei ungeschäumten AFS	43
Abbildung 48: Nach oben offene Schweißnaht.....	44
Abbildung 49: Einseitig rührreibgeschweißte ungeschäumte AFS	44
Abbildung 50: Beidseitig geschweißtes ungeschäumtes AFS.....	44
Abbildung 51: Optimale Verschweißung der oberen und unteren Decklage, ohne Vermischung der einzelnen Komponenten.....	45
Abbildung 52: Beidseitig rührreibgeschweißte ungeschäumte AFS in Kombination mit MIG-Nähten	46
Abbildung 53: Rührreibschweißnaht mit Inlay an geschäumten AFS	47

Abbildung 54: T-Stoß, Auszug aus DIN EN ISO 25239-2	47
Abbildung 55: Riss am Übergang Deckblech zum Inlay	47
Abbildung 56: Inlay in der Schweißnaht mit abgerundeten Ecken.....	48
Abbildung 57: Links – Faltenbildung, rechts – Dellen in der Oberfläche	49
Abbildung 58: rissförmige Strukturen, links; löchrige Oberfläche, rechts.....	49
Abbildung 59: Verbindungsmatrix, vollständig.....	50
Abbildung 60: Zugproben parallel zur Decklage.....	53
Abbildung 61: Zugproben senkrecht zur Decklage.....	53
Abbildung 62: Einspannung der Zugproben AFS mit Extensometer	54
Abbildung 63: Proben für die Druckfestigkeitsprüfung.....	54
Abbildung 64: Zugproben (Decklage) nach dem Ziehen	54
Abbildung 65: Schematischer Versuchsaufbau, 4-Punktbiegeprüfung DIN 5329355	
Abbildung 66: Versuchsaufbau 4-Punktbiegeprüfung	56
Abbildung 67: Versagen am Schaum; 4-Punktbiegeprüfung.....	56
Abbildung 68: Kraft - Weg - Diagramm 4-Punkt Biegeprüfung AFS Grundwerkstoff	57
Abbildung 69: Ergebnisse 4-Punktbiegeprüfung	57
Abbildung 70: 4-Punkt Prüfung von AFS Laserstahl geschweißt.; Zusatz AISi5, oben; mit Steg, unten	58
Abbildung 71: Versagen FSW-Naht statisch	58
Abbildung 72: Versuchsaufbau, T-Stoßprüfung.....	59
Abbildung 73: Ergebnisse der Biegeprüfung an T-Stoßverbindungen.....	60
Abbildung 74: T-Stoß statisch, links Typ1, rechts Typ 3.....	60
Abbildung 75: Wöhlerlinie von Aluminium: Geschweißt Typ I und ungeschweißt Typ II [25]	62
Abbildung 76: Auswahl der FAT-Klasse [25]	63
Abbildung 77: Schematische Darstellung Wechselbelastung.....	66
Abbildung 78: Schematische Darstellung der Prüfvorrichtung.....	66
Abbildung 79: Aufbau der Prüfvorrichtung.....	67
Abbildung 80: Schematische Darstellung der Kraftveränderung im Laufe der Untersuchung der ungeschweißten Proben	68
Abbildung 81: Schematische Darstellung der Kraftveränderung in geschweißten Proben.....	70

Abbildung 82: Ergebnisse der Schwingprüfung am AFS-Grundwerkstoff	71
Abbildung 83: Graphische Darstellung der Ergebnisse I-Stoß geschäumt MSG, FKM.....	74
Abbildung 84: Blechriss an der Übergangskerbe der Schweißnaht.....	74
Abbildung 85: Riss an der Laserstrahlschweißnaht.....	75
Abbildung 86: Ergebnisse I-Stoß Laser, FKM	75
Abbildung 87: Ergebnisse I-Stoß Laser mit Steg, FKM	76
Abbildung 88: Riss an der Laserstrahlschweißnaht mit Steg.....	76
Abbildung 89: Riss an der FSW-Naht.....	77
Abbildung 90: Ergebnisse I-Stoß, FSW, FKM	77
Abbildung 91: Ergebnisse FSW, Inlay Kanten gerundet, FKM	78
Abbildung 92: Riss an der FSW-Naht, neues Inlay	78
Abbildung 93: Riss im Schaum T-Stoß.....	79
Abbildung 94: Kräfteverhältnis an dem T-Stoß.....	79
Abbildung 95: Ergebnisse T-Stoßprüfung, Typ 1 bis Typ III, Bewertung auf Basis der Schweißnaht	80
Abbildung 96: Ergebnisse T-Stoßprüfung, Typ 1 bis Typ III, Bewertung auf Basis einer Grundwerkstoffwöhlerlinie	80
Abbildung 97: Ergebnisse der Schwingprüfung am AFS-Grundwerkstoff, EC9....	81
Abbildung 98: Graphische Darstellung der Ergebnisse I-Stoß geschäumt MSG, EC9	82
Abbildung 99: Ergebnisse I-Stoß Laser mit Steg, EC9.....	82
Abbildung 100: Ergebnisse FSW, Inlay Kanten gerundet, EC9.....	83
Abbildung 101: Vernetzung des Sandwichmodells (Viertelmodell).....	85
Abbildung 102: Variation des E-Moduls im Schaum und Vergleich mit experimentellen Daten, schraffierte Fläche.....	86
Abbildung 103: Vergleich der Verteilung der Biegelinie.....	87
Abbildung 104: Vergleich der Verteilung der Normalspannung über das Sandwich in der Mitte der Probe.....	87
Abbildung 105: Vergleich der Verteilung der Schubspannung über die mittlere Ebene der Probe	87
Abbildung 106: Poren Positionen Fehleranalyse.....	88
Abbildung 107: Fehleranalyse verschiedener Poren	89

Abbildung 108: Poren Positionen Fehleranalyse.....	89
Abbildung 109: Geometrie-Modellierung des Demonstrators.....	90
Abbildung 110: Lastannahme Demonstrator.....	90
Abbildung 111: Simulationsergebnisse Demonstrator Personenlast.....	91
Abbildung 112: Simulationsergebnisse Demonstrator Handlast.....	91
Abbildung 113: Hubarbeitsbühne mit Bodenplatte aus AFS.....	93
Abbildung 114: Aufnehmer und Befestigungsring.....	93
Abbildung 115: Demonstrator, Grundplatte Arbeitskorb mit befestigtem Ring.....	94
Abbildung 116: Beanspruchungsrichtung.....	94
Abbildung 117: Prüfvorrichtung Musterbauteil.....	95
Abbildung 118: FE-Modell – T-Stoß – max. Hauptspannung.....	96
Abbildung 119: FE-Berechnung T-Stoß – Auswertung in der Gurtplatte.....	97
Abbildung 120: links, Volumenmodell und Randbedingungen, rechts FE-Modell - Strukturspannungskonzept.....	97
Abbildung 121: Spannungsberechnung Strukturspannungskonzept.....	98
Abbildung 122: Spannungsberechnung Kerbspannungskonzept.....	99
Abbildung 123: Riss am Demonstrator.....	100
Abbildung 124: Rissverlauf im Demonstrator.....	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Verbindungsknoten.....	15
Tabelle 2: CT-Analyse.....	21
Tabelle 3: Verbindungsmatrix.....	23
Tabelle 4: Schweißparameter I-Stoß ungeschäumtes AFS.....	25
Tabelle 5: Schweißparameter I-Stoß geschäumte AFS.....	26
Tabelle 6: Schweißparameter I-Stoß ungeschäumtes AFS / Blech.....	27
Tabelle 7: Schweißparameter T-Stoß AFS / AFS geschäumt.....	28
Tabelle 8: Schweißparameter T-Stoß AFS / Blech.....	29
Tabelle 9: Parameter für die Laserstrahlbearbeitung.....	31
Tabelle 10: Schweißparameter Laserstrahlschweißen, ungeschäumtes AFS.....	33

Tabelle 11: Schweißparameter Laser gepulst, AISi5.....	34
Tabelle 12: Schweißparameter Laser cw-Betrieb.....	35
Tabelle 13: Schweißparameter, AFS ausgearbeitet.....	37
Tabelle 14: Schweißparameter Laserstrahl, AFS mit Inlay.....	39
Tabelle 15: FSW-Schweißparameter ungeschäumtes AFS, beidseitig geschweißt	45
Tabelle 16: Ergebnisse der Zugversuche; GW = Sandwich; S = Schaumkern; DB = Deckblech.....	52
Tabelle 17: Ergebnisse AFS-Grundwerkstoff	71
Tabelle 18: Ergebnisse der Untersuchung von MSG-geschweißten Proben.....	73
Tabelle 19: Kennwerte der AFS-Einzelkomponenten.....	86

Formelzeichen

Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
R_e	MPa	Streckgrenze
R_m	MPa	Zugfestigkeit
P	kW	Leistung
d	mm	Blechdicke
v_s	m/min	Schweißgeschwindigkeit
f_w	-	Wechselfestigkeitsfaktor
S_w	MPa	Wechselfestigkeit
S_{AK}	MPa	Dauerfestigkeit
S_{BK}	MPa	Betriebsfestigkeit
K_{AK}	-	Mittelspannungsfaktor
K_E	-	Eigenspannungsfaktor
K_{BK}	-	Betriebsfestigkeitsfaktor
k	-	Neigung der Wöhlerlinie
b	mm	Breite der geprüften Sandwiche
$t_1 = t_2 = t$	mm	Decklagendicke am Sandwich
d	mm	mittlere Dicke am Sandwich
h	mm	Sandwichhöhe
L	mm	Sandwichlänge
L_B	mm	Abstand zwischen Stempel und Auflagern
L_s	mm	Abstand zwischen Stempeln
L_A	mm	Abstand zwischen Auflagern
M	Nm	Biegemoment
J	mm ⁴	Trägheitsmoment
F	N	Belastung
F_s	N	Belastung für geschweißte Proben
F_u	N	Belastung für ungeschweißte Proben

N	-	Schwingspielzahl
Nd	-	Schwingspielzahl Abknickpunkt Wöhlerlinie
S _{50%}	MPa	geometrischer Mittelwert experimentell bestimmter Spannungswerte
j _{n,s}	-	statistischer Umrechnungsfaktor
n	-	Anzahl der Einzelversuche
LSD	-	Logarithmische Standard Abweichung
R	-	Spannungsverhältnis

Griechische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
σ_{zd}	MPa	Zugfestigkeit der Deckbleche
σ_w	MPa	Wechselfestigkeit Aluminiumdeckbleche
σ_{HSmax}	MPa	maximale Strukturspannung
σ_{Kmax}	MPa	maximale Kerbspannung
ε	-	Dehnung

Abkürzungen

CMT [®]	Cold Metal Transfer
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V
IKK	Interkristalline Korrosion
LFT	Lehrstuhl Füge- und Schweißtechnik, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg
SLV	Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt
FSW	Friction Stir Welding
AFS	Aluminium Foam Sandwich
MWO	Modulare Schweißoptik
PbA	Projektbegleitender Ausschuss
IIW	International Institute of Welding
FE	Finite Elemente

1 Einleitung

Um im Wettbewerb unter ständig zunehmender Knappheit der Ressourcen wirtschaftlich zu produzieren, ist insbesondere bei großen Konstruktionen der Leichtbau entscheidend. Neben dem Einsatz von leichteren Materialien wie Aluminium, Magnesium oder faserverstärkten Kunststoffen gewinnen Kernverbünde, auch Sandwichelemente genannt, als Konstruktionswerkstoffe immer mehr an Bedeutung. Kernverbünde bestehen aus zugfesten Deckschichten und einem schubsteifen Kern. Abhängig von der Anwendung werden unterschiedliche Materialien verwendet. Der prinzipielle Aufbau variiert allerdings kaum. Im heutigen Leichtbau werden als Decklagen häufig Glas- und Kohlefaser als Gewebe oder Gelege, aber auch Stahl- und Aluminiumblech eingesetzt. Als Kernwerkstoff können u.a. harzgetränktes Aramidpapier oder dünne Aluminiumbleche, welche z.B. in Dickenrichtung wabenförmig strukturiert sind, oder druckfeste Kunststoffschäume verwendet werden. Erst in jüngerer Zeit werden Metallschäume und insbesondere Aluminiumschäume als Kernwerkstoff verwendet. Der Werkstoff ist leicht verfügbar und der Anteil von Sekundäraluminium im Werkstoffkreislauf sehr hoch. Aluminium bietet neben der geringen Dichte und seinen guten mechanischen Eigenschaften den Vorteil, dass es sich durch den relativ geringen Schmelzpunkt gut zum Aufschäumen eignet. Seine niedrige Dichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$ wird durch das Aufschäumen zusätzlich verringert. Dieser Schaum kann zum Verfüllen von Hohlräumen in Bauteilen oder großen Konstruktionen verwendet werden. Dadurch werden die Bauteile belastbarer und steifer oder können durch die verbesserten Eigenschaften leichter gebaut werden. Allerdings bietet Aluminium die wichtige Möglichkeit eines Verbundes von zwei konventionellen Blechen und einer Kernlage aus Schaum als Halbzeug. Dieses Aluminiumschaumsandwich (Aluminium Foam Sandwich - AFS, Abbildung 1) zeichnet sich durch eine Erhöhung der Steifigkeit, speziell der Biegesteifigkeit, mit deutlicher Gewichtseinsparung gegenüber einem einfachen Blech aus.

Die Kombination dieser Eigenschaften macht aus AFS ein gutes Halbzeug für große Bauteile und Konstruktionen im Leichtbau. Dennoch gibt es bei der Verarbeitung Schwierigkeiten. Bereits

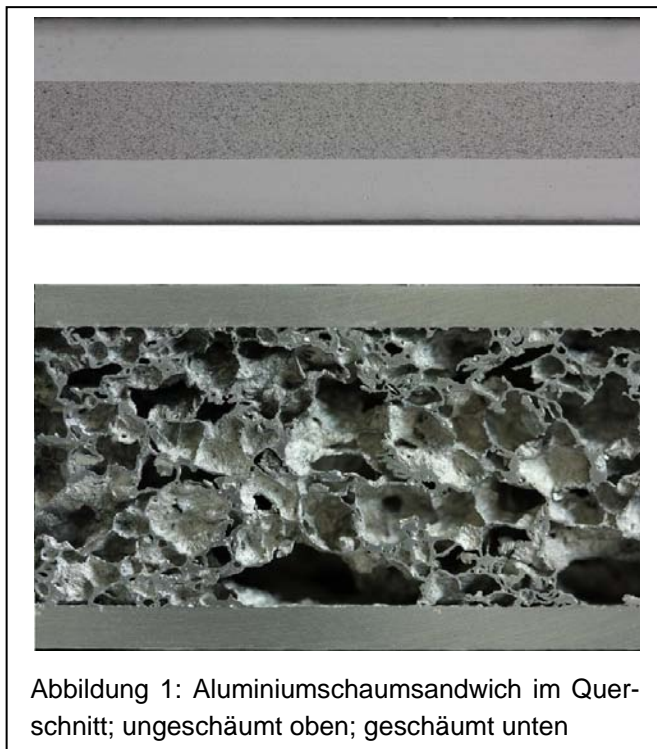


Abbildung 1: Aluminiumschaumsandwich im Querschnitt; ungeschäumt oben; geschäumt unten

aufgeschäumtes Material lässt sich nur bedingt Umformen bzw. Schweißen ohne den Schaumkern zu zerstören. Es fehlen systematische Untersuchungen über die Gestaltungsmöglichkeiten der Verbindungsknoten und über den Einfluss des Schweißens auf die Festigkeit von Konstruktionen aus AFS. Daraus ergibt sich die Problematik komplexe 3-dimensionale Konstruktionen anzufertigen. Um die Vorteile des AFS als Konstruktionswerkstoff nutzen zu können, ist es notwendig umfassende Untersuchungen über den Einfluss der Verbindungsart und -form sowie des Schweißprozesses auf die Festigkeit der geschweißten Knoten durchzuführen, um dem Konstrukteur die entsprechenden Hinweise bereitzustellen.

Das IGF-Vorhaben 17620 BG der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

2 Stand der Technik

2.1 Herstellung von AFS

Aluminiumschaumsandwich (Aluminium Foam Sandwich, AFS) besteht aus Aluminiumblechen als Decklagen und Aluminiumschaum für den Kernwerkstoff. Die Sandwichelemente können mit unterschiedlichen Herstellungsprozessen gefertigt werden. Eine Möglichkeit besteht in der separaten Herstellung eines aufgeschäumten Kerns und dem anschließenden Verkleben mit den jeweiligen Deckblechen. Der Aluminiumschaum wird in diesem Fall nach dem schmelzmetallurgischen Verfahren hergestellt. Bei diesem Prozess wird das Aluminiummatrixmaterial verflüssigt und mit Gas oder mit Treibmittel aufgeschäumt. Der so entstehende flüssige Schaum wird „eingefroren“, um die entstehenden Blasen im Material am Entweichen zu hindern. Es sind beliebige Materialkombinationen durch Mischen verschiedener Legierungen in der Schmelze möglich. Diese kurze Prozesskette läuft in der Regel kontinuierlich ab [1]. Die so erzeugten Strukturen können kaum mehr umgeformt werden, ohne die Schaumstruktur zu zerstören.

Ein weiteres Verfahren zur Fertigung von Aluminiumschaumsandwichelementen ermöglicht die Herstellung des Sandwichaufbaus in einem Prozessschritt. Dazu wird der Aluminiumschaumkern zunächst im ungeschäumten Zustand mit den Decklagen verpresst [1]. Erst in einem nächsten Verarbeitungsschritt wird es auf die benötigte Endkontur aufgeschäumt. Der Aluminiumschaum wird dafür nach dem pulvermetallurgischen Verfahren hergestellt. Die verschiedenen Bestandteile des Schaumes werden als Pulver vermischt und anschließend verpresst. Das Aufschäumen erfolgt durch Wärmezufuhr, z.B. mittels eines Infrarotstrahlers und kann vom Anwender vor Ort ausgeführt werden [2]. Dadurch ist es möglich, nachträglich Hohlräume an vorhandenen Bauteilen zu befüllen und auszuschäumen bzw. Halbzeuge wie Sandwichelemente in einem Prozess herzustellen. Für diese werden i.d.R. dreischichtige Platten gefertigt, die aus verschiedenen Legierungen bestehen können. Die Decklagen bestehen aus einer nicht aufschäumenden Aluminiumlegierung und in der Mitte befindet sich die zu schäumende Aluminiumschaumfüllung. Solche Platten lassen sich bereits im nicht aufgeschäumten Zustand umformen. Nach dem Umformprozess werden diese dann erst auf die benötigte Dicke flexibel aufgeschäumt. Dieser Vorteil der Umformbarkeit, wie bei vergleichbaren konventionellen Blechen, erhöht die möglichen Einsatzbereiche. Als Werkstoffe für die Decklagen werden häufig folgende Aluminiumlegierungen eingesetzt: Al99,5, AlMn1, AlMg1, AlMg3, AlSi1,2Mg0,4, AlMgSi, AlSiMgMn, als Schäume: AlSi7, AlSi6Cu6 oder AlMg3.

Bei der Herstellung muss auf die unterschiedlichen Schmelzpunkte der verwendeten Legierungen geachtet werden. Der Schmelzpunkt des Schaumes muss bei einem pulvermetallurgisch hergestellten Sandwich immer unter dem der Deckbleche liegen. Durch die notwendige Erwärmung für das Aufschäumen des Kerns

werden die Deckbleche sehr weich. Wenn deren Schmelzpunkt unter dem des Schaumes läge, bestünde die Gefahr des Versagens der Struktur bzw. das vollständige Entweichen des Treibmittels. Weiterhin muss auf die Temperaturführung geachtet werden. Grundsätzlich gilt für das Aufschäumen, dass bei sehr hohen Temperaturen bis ca. 800°C, die nur kurzgehalten werden, ein homogeneres Schaumgefüge erzielt wird. Vorversuche haben bei niedrigen Temperaturen um 550°C mit langer Haltezeit gezeigt, dass eine Ausgasung des Treibmittels ohne Ausbildung eines porigen Schaumgefüges stattfindet. Abhängig von der zu erzielenden Schaumdicke und der Art der Wärmequelle können Aufschäumzeiten von unter zwei Minuten erreicht werden. Dementsprechend müssen diese Erkenntnisse beim Umformen und gleichzeitigem Aufschäumen berücksichtigt werden. Da viele Anwendungen auf komplexen Formen beruhen, werden vor allem derartige, mit diesem pulvermetallurgischen Herstellungsverfahren erzeugte ungeschäumte AFS-Sandwiche benutzt.

2.2 Fügen von AFS

In der Fachliteratur werden die Aluminiumschäume als Konstruktionswerkstoff für geschweißte Bauteile kaum erwähnt. Es gibt sehr wenige Untersuchungen zum Schweißen von Schäumen und daraus resultierende mechanische Eigenschaften. Bisherige Veröffentlichungen zur Fügbarkeit von AFS sind allgemein und befassen sich ausschließlich mit der prinzipiellen Fügbarkeit [1, 3, 4].

Grundsätzlich können AFS mit Hilfe von Lichtbogenschweißverfahren wie z.B. MIG-Schweißen fügetechnisch verarbeitet werden, Abb. 2. Im ungeschäumten Zustand kann durch die eingebrachte Wärme das Aufschäumen unerwünscht aktiviert werden. Als Ergebnis wird dieser vorzeitig geschäumte Bereich beschädigt. Im geschäumten Zustand lassen sich nur die Decklagen miteinander verbinden. Der Schaumkern wird teilweise im Anschlussbereich beschädigt und bleibt im Kerninneren unverbunden. Diese biegegewiche Stelle führt zu einer Schwächung des Verbundes und sollte möglichst vermieden werden.

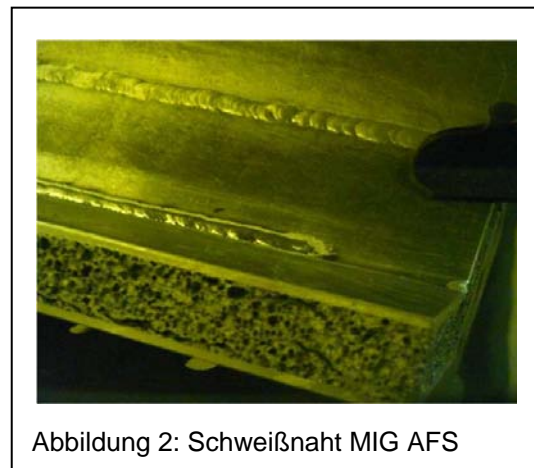


Abbildung 2: Schweißnaht MIG AFS

Bekannt sind Ansätze um bereits geschäumtes AFS zusätzlich seitlich zu plattieren und dadurch eine Schweißkante zu erhalten [5]. Durch diesen zusätzlichen Arbeitsschritt lässt sich ein AFS wie ein konventionelles Blech verarbeiten. Dieser Arbeitsschritt benötigt spezielle Vorrichtungen und verteuert den Einsatz des AFS. Durch die plastische Umformung zum Bauteil wird die Schaumstruktur des Kerns vorgeschädigt und die lokalen mechanischen Eigenschaften des Sandwiches eingeschränkt. Die Wärmeeinbringung durch das anschließende Schweißen wird zu-

sätzlich die Randbereiche des Kerns negativ beeinflussen und die Eigenschaften der geschweißten Konstruktion beeinträchtigen. Die Höhe des Wärmeeintrages ist für die Schädigung entscheidend. Eine Reduzierung des Wärmeeintrages kann sich positiv in dieser Hinsicht auswirken.

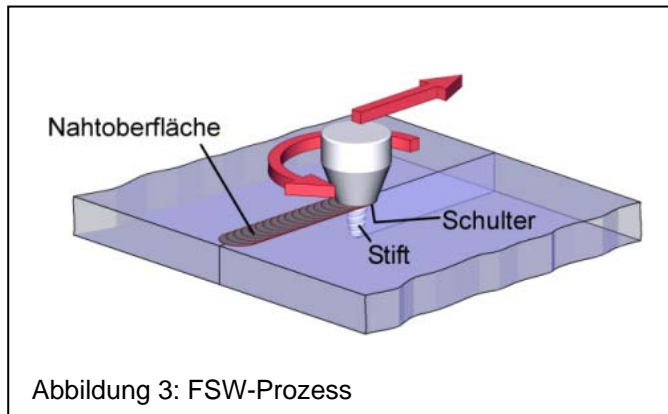
Es existieren keine Untersuchungen, wie sich die neuen wärmearmen MIG-Lichtbogenschweißverfahren wie CMT[®] und ColdArc[®] auswirken. Diese gesteuerten Kurzlichtbogenprozesse erlauben, jeweils mit umfangreicher elektronischer bzw. mechanischer Regelung, den Tropfenübergang so energiearm wie möglich zu gestalten.

Das Laserstrahlschweißen von geschäumtem Aluminiumschaumsandwich ist möglich, in dem nur die Decklagen einzeln verschweißt werden. In einer weiteren Variante wird das Sandwich einseitig über die gesamte Dicke verschweißt. In diesem Fall wird mit Zusatzwerkstoff gearbeitet, da ein massiver Volumenschwund im Bereich des Schaumkerns einsetzte [6]. Die Schweißparameter bewegen sich in einem engen Toleranzfeld und die Energieverteilung hinsichtlich Grund- und Zusatzwerkstoff musste beachtet werden [7]. Der Einfluss auf die Schaumstruktur wurde bisher nicht eingehend untersucht. Das Laserstrahlschweißen von ungeschäumten AFS wurde nicht untersucht. Es ist zu erwarten, dass das Aktivieren des Aufschäumprozesses im Kern bzw. die Gefahr der Porenbildung durch das Ausgasen des Treibmittels, wie beim konventionellen MIG-Schweißen, durch die hohe Schweißgeschwindigkeit und die geringe Wärmeeinflusszone stark minimiert würde. Damit stiege Wahrscheinlichkeit für einen erfolgreichen Einsatz solcher lasergeschweißten Verbindungsknoten.

Als Alternative zum Schmelzschweißen kann das Rührreibschweißen von AFS genutzt werden. Rührreibschweißen ist ein Schweißprozess, der sich zunehmend in der aluminiumverarbeitenden Industrie durchsetzt. Der wesentliche Vorteil gegenüber dem Schmelzschweißen besteht darin, dass die Werkstoffe während des Fügevorgangs nicht aufgeschmolzen werden müssen. Somit besteht keine Gefahr zu Poren- oder Rissbildung. Verzug, Wärmeeinflusszone und Eigenspannungen sind gegenüber Schmelzschweißprozessen ebenfalls deutlich weniger ausgeprägt.

Von der technischen Seite betrachtet, ist der Prozessablauf beim Rührreibschweißen recht einfach. Man benötigt ein warm- und verschleißfestes Werkzeug, ähnlich einem Fräser, was durch seine spezielle Kontur im Prozess für die Wärmeentwicklung mittels Reibung und den Werkstofftransport sorgt. Die einfachste Variante solch eines Werkzeuges besteht aus einem zylindrischen Werkzeugkörper, an dessen Stirnfläche (Schweißschulter) ein kleinerer Zylinder (Schweißstift) angebracht ist, Abb. 3. Die Länge des Schweißstiftes muss an die gewünschte Einschweißtiefe angepasst sein. Dieses Werkzeug wird rotierend mit Kraft am Stoß der Bauteile in diese hineingedrückt, bis die Schweißschulter vollständig auf der Bauteiloberfläche aufliegt. Während dieses Vorgangs wird das Material um

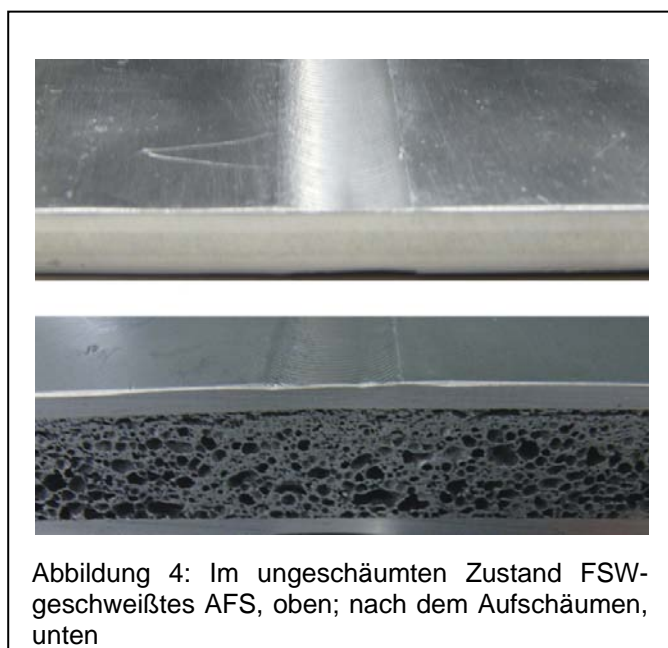
den Schweißstift teigig und um diesen herum transportiert. Nachdem das Werkzeug eingetaucht ist, erfolgt die Bewegung entlang der vorgesehenen Schweißnahtkontur. Hinter dem Werkzeug bildet das verrührte Material die Schweißnaht. Zusätzlich muss das Bauteil rückseitig entlang der Schweißnaht



abgestützt werden. Die Hauptschweißparameter sind Drehzahl, Schweißgeschwindigkeit und Eindringtiefe bzw. die Kraft, die vertikal auf die Bauteiloberfläche wirkt. Eine weitere wichtige Einflussgröße, mit der man die Stabilität des Prozesses beeinflussen kann, ist die Werkzeugkontur. Dazu gehören Größe des Werkzeuges, Verhältnis von Schweißstift- zu Schweißschulterdurchmesser, gewinde- oder schneckenförmige Konturen an Schweißstift, Werkzeugschulter und vieles mehr.

Den statischen und dynamischen Festigkeitseigenschaften von rührreibgeschweißten Aluminiumblechen wurden bereits umfangreiche Untersuchungen gewidmet, wobei allgemein sehr hohe Schweißnahtfestigkeiten bestätigt wurden [8]. Eine wesentliche Feststellung einiger dieser Untersuchungen war jedoch, dass bereits ein minimaler verbleibender Wurzelspalt infolge ungenügenden Durchschweißens die Festigkeiten im Bereich der Zeit- bzw. Dauerschwingfestigkeit auf einen Bruchteil der Werte der statischen Prüfung reduziert. Zu prüfen ist, ob beim Rührreibschweißen von AFS vergleichbare Kerbgeometrien entstehen, wie sie infolge ungenügenden Durchschweißens vorzufinden sind und welchen Einfluss sie auf die Dauerschwingfestigkeit ausüben.

Speziell für das Schweißen von ungeschäumten AFS kann eine weitere Besonderheit des Rührreibschweißens interessant sein, und zwar die Möglichkeit, durch eine geeignete Werkzeuggeometrie und angepasste Parameter den vertikalen Werkstofftransport auf ein Minimum zu reduzieren und somit die Durchmischung der einzelnen AFS-Schichten [9]. Damit können, wie unsere Vorversuche zeigen, Abb. 4, große Paneele einseitig über die gesamte Dicke verschweißt



werden, ohne die Deck- und Kernwerkstoffe miteinander zu vermischen und die spätere Schaumbildung zu beeinflussen. Die Notwendigkeit einer rückseitigen Stützung der Fügepartner, entlang der Schweißnaht bei einfachen Blechen, bedarf wahrscheinlich einer speziellen Anpassung des Fügeverfahrens für AFS. Die Entwicklung eines geeigneten Werkzeuges zur doppelten Nahtabstützung der Decklagen ist eine weitere zu lösende Problematik für den Einsatz des Rührreißschweißens der geschäumten AFS.

Zusammengefasst wurden mit den oben aufgeführten Fügeverfahren einige erfolgreiche Verbindungen von AFS hergestellt. Dennoch behandeln diese Arbeiten nur die grundsätzliche Fügbarkeit von AFS an einzelnen ausgewählten Verbindungsarten. Es wurde der Einfluss auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Fügeverbindung nicht betrachtet. Die Ausarbeitung der Vor- und Nachteile beim Einsatz der unterschiedlichen Fügeverfahren sowie Anwendungsempfehlungen wurden ebenfalls nicht vorgenommen.

2.3 Gestaltung und Berechnung von geschweißten Konstruktionen

Gestaltung

Schweißkonstruktionen bestehen im Allgemeinen aus Blechen, die in unterschiedlichsten Stoßarten miteinander nach DIN 1912 gefügt werden. Zu den häufigsten Verbindungen zählen die Stumpf- und Überlappstöße sowie T-Stoßverbindungen. Abhängig vom eingesetzten Werkstoff, der Materialdicke, dem Schweißverfahren und der konstruktiven Gestaltung des Fügeknötens müssen die Fügestellen angepasst, vorbereitet und gefügt werden (DIN EN ISO 9692). Für den Einsatz von metallischen Sandwichelementen müssen zusätzliche Randbedingungen beachtet werden. So können z. B. durch Kleben hergestellte Sandwichelemente nicht miteinander verschweißt werden, da durch die Temperatureinwirkung die Klebstoffschichten zerstört werden. Weiterhin ist das Fügen von zwei Sandwichelementen im Überlappstoß ungünstig, da durch die großen Elementhöhen der Kraftfluss zwischen den Fügepartnern zu stark umgelenkt wird und nur durch eine Deckschicht übertragen werden kann. Zusätzlich entsteht, durch den größeren Abstand der neutralen Fasern, ein Biegemoment, welches zu einer Belastungserhöhung in der Verbindung führt. Bei mechanischen Verbindungen, wie Schraub- oder Nietverbindungen, werden zusätzliche Spann- bzw. Klemmkräfte eingebracht. Um dabei ein Druckversagen des Sandwichkerns zu verhindern, müssen lokale zusätzliche Versteifungselemente im Bereich der Fügestelle eingebracht werden. Dies führt wiederum zu einer Gewichtserhöhung der Konstruktion und einem erhöhten Produktionsaufwand [10].

Wie oben erwähnt, wurden für die Herstellung von Aluminiumsandwichelementen diverse Fügeverfahren auf ihre Eignung hin untersucht [6]. Des Weiteren wurden von verschiedenen Forschungsstellen [1,3-5,7-9] allgemeine Untersuchungen zur

Fügbare mit Schmelzschweißverfahren und Rührreibschweißen durchgeführt. Diese Untersuchungen beschränken sich auf die grundsätzliche Fügbare von AFS an einzelnen ausgewählten Verbindungsarten, wie I-Stoßverbindungen von geschäumten AFS oder plattierten AFS mit einem einfachen Aluminiumblech. In diesem Zusammenhang wurde der Einfluss der Verbindungsart auf den Verzug und auf die mechanischen Kennwerte der Fügeverbindung nicht betrachtet. Die Ausarbeitung der Vor- und Nachteile beim Einsatz der unterschiedlichen Fügeverfahren sowie die Ableitung von Anwendungsempfehlungen erfolgte nicht. Die komplexen Zusammenhänge von Verbindungsgestaltung und Herstellung sind noch nicht erarbeitet worden. Es wurden bisher keine Arbeiten durchgeführt, welche unterschiedliche Stoßarten und Verbindungsknoten betrachten und vergleichen, sowie den Einfluss verschiedener Fügeverfahren auf die Prozesssicherheit, die Verbindungsqualität und -eigenschaften untersuchen. Bisher stehen dem Anwender keine fundierten Verarbeitungs- und Gestaltungshinweise für den Einsatz von AFS zur Verfügung. Dem Anwender muss u. a. konkret vorgegeben werden, wie die Stöße miteinander verbunden werden können, welche Fügeverfahren jeweils am geeignetsten sind und welche Festigkeiten erreicht werden können.

Berechnung von geschweißten Konstruktionen

Hinweise zur Berechnung von geschweißten Konstruktionen aus AFS sind uns nicht bekannt. Nachfolgend werden die Arbeiten für Aluminiumschaum und Sandwichelemente im Allgemeinen betrachtet.

Berechnungsvarianten Schaum

Für die Kernherstellung von Sandwichelementen werden i.d.R. Materialien in Form von Waben, Wellen, Hohlkugeln oder Schäumen eingesetzt. Die Werkstoffeigenschaften dieser Halbzeuge sind im Detail betrachtet nicht homogen, sondern von Hohlräumen abhängig, d.h. von deren Größe und Verteilung. Die numerische Berechnung der Beanspruchung kann in verschiedenen Detaillierungsstufen erfolgen.

Für die Bewertung der Belastungen von Aluminiumschaum mittels FEM wurden unterschiedliche Modellierungsgrade untersucht. Die genaueste Modellierung kann durch Scannen der 3D-Struktur des Schaumes erfolgen, welche als Volumenmodell direkt ins Berechnungsprogramm übertragen und dort detailliert vernetzt werden kann [11, 12]. Sinnvoll kann dies nur für kleinere Formen oder Detailbetrachtungen sein, z. B. Betrachtungen zum Verhalten einzelner Zellwände. Da sich die Schaumblasen nicht identisch ausbilden und von Ort zu Ort eine andere Hohlraumgeometrie und Dichte vorliegt stiege dafür der Modellierungsaufwand enorm. Für jedes betrachtete Detail muss die Geometriermittlung und Berechnung neu erfolgen. Andere Ansätze nähern die Schaumzellen als Polyeder-Einheitszellen mit Kanten aus Zylindern an. Die relative Dichte des Schaumes wird durch die Änderung des Kantendurchmessers und der Kantenlängen berücksichtigt [11, 13]. Eine weitere Möglichkeit der detaillierten aber vereinfachten Schaummodellierung

besteht in der Abbildung der Schaumstruktur als Voronoi-Polyeder. Hier erfolgt eine Anpassung der Elementgröße an die Größenverteilung der realen Zellstruktur [12].

Die nächste Stufe in der vereinfachten Abbildung und Modellierung der Schaumstruktur besteht darin, die Dichteverteilung des Schaumes über die betrachtete Platte zu ermitteln. Jedem einzelnen modellierten Volumenelement im Bereich des Schaumkerns werden dann, in Abhängigkeit von der Dichte, die entsprechenden Werkstoffeigenschaften zugeordnet. Dazu muss für jedes Schaummaterial das Festigkeitsverhalten in Abhängigkeit von der Schaumdichte ermittelt werden. In vergangenen Untersuchungen zeigte sich für Aluminiumschaum eine lineare Abhängigkeit beider Parameter, so dass zwischen den experimentell ermittelten Werten interpoliert werden kann [14-18].

Die einfachere und praktikablere Methode, das Schaumverhalten in der Simulation zu erfassen, besteht darin, den Schaum als Kontinuum zu betrachten. Obwohl die Porengröße des Schaums im Material leicht variieren kann, stellt sich eine gleichmäßige Verteilung ein. Solange die Porengröße klein gegenüber der betrachteten Fläche bleibt, kann die Inhomogenität der Poren als konstant angenommen werden. Die Werkstoffkennwerte lassen sich gemittelt über das Kernvolumen bestimmen und können in der Materialkarte der FE-Software für den Kern eingegeben werden. Die ermittelten makroskopischen Eigenschaften werden so auf kontinuierliche Volumen oder Schalenelemente übertragen. Je nach Anwendung können plastisches Verhalten und Versagen der Schaumstruktur berücksichtigt werden [19, 20]. Das plastische Verhalten wird über das Werkstoffverhalten, z. B. in Form der Spannungs-Dehnungskurven abgebildet, welches das Versagen der Struktur als maximal erreichbare Dehnungen definiert. Nach Erreichen des Grenzwertes wird das entsprechende Element aus der Berechnung gelöscht.

Nachweis Dauerschwingfestigkeit

In der Fachliteratur sind für geschweißte AFS keine Angaben zur Dauerschwingfestigkeit zu finden. In [21] wurde diese für ein AFS-Halbzeug ermittelt. Für die Festigkeitsbetrachtungen und den Nachweis der Dauerschwingfestigkeit von Bauteilen ist das Wissen über die vorhandenen und zulässigen Spannungen (Beanspruchung und Beanspruchbarkeit) an den kritischen Nachweisorten der Struktur maßgebend. Für die Nachweisführung stehen unterschiedliche Bemessungskonzepte zur Verfügung, wie z.B. das Nennspannungskonzept, das Strukturspannungskonzept oder das Kerbspannungskonzept.

Die drei Bemessungskonzepte unterscheiden sich im Umgang mit der Berechnung der Spannungsüberhöhung durch die Kerbstelle. Vom Nennspannungskonzept bis zum Kerbspannungskonzept wird die Kerbstelle immer detailgetreuer in der FE-Berechnung berücksichtigt, d.h. der Einfluss der Kerbstelle auf den Spannungsanstieg wird mehr in den Bereich der Ermittlung der vorhandenen Beanspruchung des kritischen Bauteildetails verschoben. Im Gegenzug wird die Ermittlung der

zulässigen Beanspruchbarkeit vereinfacht. So wird beim Nennspannungskonzept für unterschiedliche Bauteildetails bzw. Verbindungsknoten ein individueller Ermüdungswiderstand an der Stelle von 2 Millionen Lastspielen (FAT-Klasse) benötigt, für das Kerbspannungskonzept wird dagegen nur noch mit einer einheitlichen FAT-Klasse die zulässige Beanspruchbarkeit ermittelt.

Ausgangspunkt für alle Berechnungen ist eine Kerbstelle in einem Bauteil aus einem durchgehenden Vollmaterial oder aus geschlossenen Hohlprofilen. Für Sandwichelemente hingegen stehen noch keine genormten oder in Regelwerken zusammengefassten und zu berücksichtigenden Besonderheiten für die Berechnung zur Verfügung. Es besteht allerdings die Möglichkeit für geschweißte Bauteildetails den Ermüdungswiderstand (FAT-Klasse) über Ähnlichkeitsbeziehungen in der Berechnung von Verbindungsknoten aus Vollquerschnitten und Sandwichen bzw. AFS zu bestimmen und so die werkstoffbedingten Unterschiede in die Ermittlung der zulässigen Beanspruchbarkeit zu übertragen.

In der folgenden Abbildung 5 ist der allgemeine Ablauf der Nachweisführung nach der FKM-Richtlinie [22] im Überblick dargestellt.

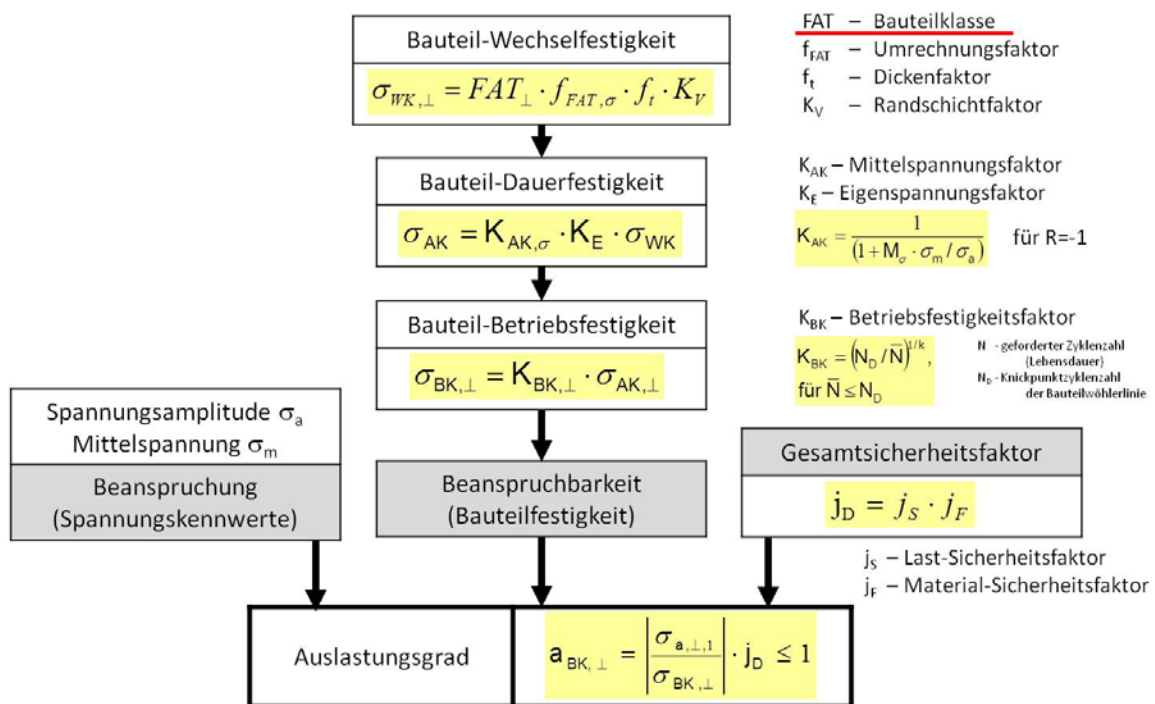


Abbildung 5: Nachweisablauf nach FKM-Richtlinie

Für die Berechnung der vorhandenen Spannungen der aufgeführten Bemessungskonzepte wird linear-elastisches Werkstoffverhalten vorausgesetzt. Die Beanspruchungsermittlung kann mit analytischen oder numerischen Methoden erfolgen. Die Modellierungsvorgaben sind entsprechend dem angewendeten Bemessungskonzept anzupassen.

Zur Ermittlung der zulässigen Spannungen im Schweißnahtbereich wird, ausgehend von einer angenommenen einstufigen Wechselbelastung der Konstruktion mit einer konstanten Amplitude und einem Spannungsverhältnis von $R=-1$ (Mittelspannung gleich null), die Bauteilwechselfestigkeit bestimmt, die dauerhaft ertragen werden kann. Hierin werden konstruktionsabhängig die entsprechenden Bauteilklassen (FAT-Klassen), der Dickenfaktor sowie der Randschichtfaktor benötigt. Diese können der entsprechenden Richtlinie entnommen werden. Zur Auswahl der Bauteilkategorie müssen die geschweißten Verbindungsknoten für die nachzuweisenden kritischen Schweißnahtdetails entsprechend eingeordnet werden. Ist die tatsächliche Mittelspannung ungleich null, wird dies im nächsten Berechnungsschritt mit Ermittlung der Bauteil-Dauerfestigkeit mit Mittelspannung berücksichtigt. Weichen die tatsächlichen Belastungen der Konstruktion von der idealen Einstufenbelastung ab, muss der Einfluss der Spannungskollektive durch die Berechnung der Bauteil-Betriebsfestigkeit berücksichtigt werden. Zusammen mit den berechneten vorhandenen Spannungen und Sicherheitsfaktoren erfolgt der Nachweis über den Vergleich der Auslastungsgrade [23].

Modellierung der Platten

Bleche und andere flächige Konstruktionen werden i. d. R. für die Festigkeitsberechnung vereinfacht als geometrische Fläche betrachtet. Ihre Dicke ist im Vergleich zu ihrer Länge und Breite klein. Da Sandwichelemente diese Bedingung erfüllen, können diese, wie andere flächenhafte Konstruktionen, in das FE-Modell als geometrische Fläche vereinfacht abgebildet werden. Diese Vereinfachung gewährleistet eine einfachere und schnellere Modellbildung und kürzere Rechenzeiten. Da durch diese Vereinfachung die Höheninformation im Geometriemodell verloren geht, müssen die Höhenangaben in den Elementdefinitionen oder dem Werkstoffmodell übernommen werden (Abbildung 6a). Da Sandwichelemente über die Dicke nicht homogen aufgebaut sind, sondern aus mehreren Lagen (Decklagen und Kern) bestehen, muss dieser Schichtaufbau zusätzlich in der Elementbeschreibung definiert werden.

Für die Berechnung solcher Sandwichstrukturen stehen für das FE-Modell spezielle Elemente zur Verfügung, welche diesen schichtweisen Aufbau und die Dicke der einzelnen Schichten in der Elementformulierung berücksichtigen. Dabei spielt es keine Rolle, ob sich der Werkstoff isotrop oder orthotrop verhält. Beides kann in dem Werkstoffmodell entsprechend berücksichtigt werden. Bei dieser Modellierungsvariante kann hinsichtlich der Krafteinleitung bzw. der Anbindung von Anschlussstellen nicht zwischen Ober- und Unterseite unterschieden werden. Die Aufbringung der äußeren Kräfte bzw. Schnittkräfte erfolgt über den gesamten Querschnitt der Sandwichplatte.

Für eine detailliertere Betrachtung der Belastungsverteilungen im Sandwich, z. B. für Anschlussstellen, die nur an den Deckschichten aber nicht am Kern angefügt sind oder an signifikanten, kritischen Belastungsstellen, wie den geschweißten

Verbindungsknoten, ist es für die Berechnung und Nachweisführung der Festigkeit eines Bauteiles notwendig, diese Orte in der FE-Modellierung geometrisch genauer abzubilden. D. h. es muss für diese Fälle auf die aufwändigere und rechenintensivere Volumenmodellierung übergehen. Die Stärke der Deckschichten und die Kernhöhe werden exakt im 3D-Volumenelement abgebildet und in die FE-Modellierung übernommen (Abbildung 6b). Um hierbei eine höhere Auflösung der Spannungsverteilung im relativ hohen Kern erreichen zu können, muss der Kern auf mehrere Elementebenen aufgebaut sein.

Bei vielen Elementformulierungen müssen vorgegebene Anforderungen an das Verhältnis der Elementkantenlängen (Länge, Breite und Höhe) eingehalten werden. Dazu kann es bei entsprechend dünnen Decklagen notwendig sein, die Plattenfläche mit einer hohen Netzdichte abzubilden. Dies führt wiederum zu einem enorm steigenden Modellierungs- und Rechenaufwand.

Aus diesem Grund sind in vielen Fällen Flächenelemente für die Abbildung der Decklagen besser geeignet. D. h. eine Kombination von flächiger Modellierung für die Deckschichten und Volumenmodellierung für den Kern sind für die Berechnung von Sandwichelementen geeignet (Abbildung 6c). In allen Fällen müssen die Werkstoffeigenschaften, wie Elastizitäts- und Schubmodul, der einzelnen Lagen (Decklage und Kern) definiert und den entsprechenden Schichten im FE-Modell zugeordnet werden.

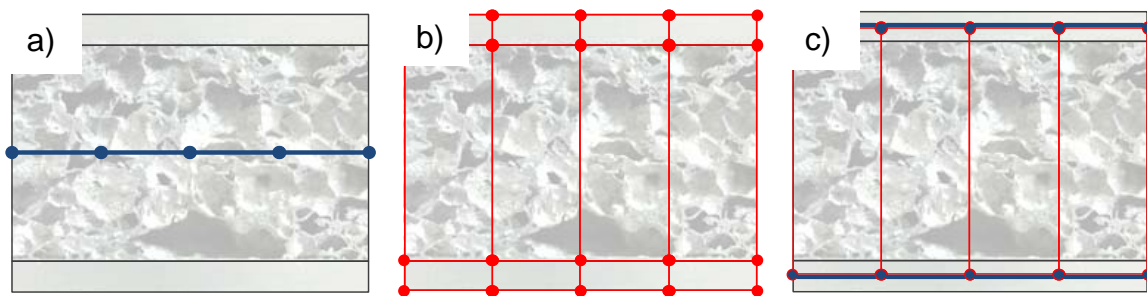


Abbildung 6: Abbildungsvarianten von Sandwichtaufbauten im Finite Elemente Modell;
a) Schalenelemente, b) Volumenelemente, c) Schalen- und Volumenelemente

Somit haben der betrachtete Maßstab und der Detaillierungsgrad des untersuchten Objekts einen erheblichen Einfluss auf die auszuwählende Modellierungsstrategie und die Modellierungsarten ergänzen sich je nach Anwendungsfall [20].

2.4 Schlussfolgerungen aus dem Stand der Forschung

Für Fügeverbindungen aus AFS sind prinzipielle Untersuchungen über die Fügbarkeit mit den konventionellen MIG- und Laserstrahlverfahren und Rührreibschweißen bekannt.

Im geschäumten Zustand können bisher, unabhängig vom Schweißverfahren, nur die Decklagen miteinander verbunden werden. Der Schaumkern in der Fügestelle bleibt unverbunden und wird durch die Wärmeeinwirkung im Anschlussbereich beschädigt. Es entsteht ein zusätzlicher Hohlraum im Sandwichinneren der Fügestelle. Dies stellt eine lokale Instabilität des Plattenelementes dar.

Bei der Anwendung des MIG-Schweißverfahrens für das Fügen im ungeschäumten Ausgangszustand der Sandwichelemente kann ein lokales Aufschäumen, durch die eingebrachte Wärme unerwünscht aktiviert werden. Als Ergebnis wird der vorzeitig geschäumte Bereich beschädigt. Eine Abhilfe diesbezüglich können die wärmearmen MSG-Verfahren wie CMT[®] oder Coldarc[®] sein, deren Einfluss nicht untersucht wurde.

Für das einseitige Laserstrahlschweißen muss mit Zusatzwerkstoff gearbeitet werden, da ein massiver Volumenschwund im Bereich des Schaumkerns auftritt. Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen im ungeschäumten Zustand sind uns nicht bekannt.

Das Rührreibschweißen benötigt für das Fügen generell eine rückseitige Nahtabstützung. Das bedeutet für den Einsatz an geschäumten AFS-Platten, dass die Decklagen einzeln abgestützt werden müssen. Für das einseitige Fügen über die gesamte Plattendicke muss ein geeignetes Werkzeug zur doppelten Nahtabstützung der Decklagen realisiert werden.

Bei allen Schweißuntersuchungen sind überwiegend I-Stoßverbindungen betrachtet worden. Es fehlen Untersuchungen über die Auswirkungen auf den Verzug und die Festigkeit der geschweißten Verbindungen.

In der Nachweisführung der Dauerfestigkeit sind in den Regelwerken Sandwichelemente bisher nicht berücksichtigt. Die dargestellten Verbindungsknoten beziehen sich lediglich auf verschweißten Vollwerkstoff. Es ist zu prüfen, inwieweit und wie die vorhandenen Empfehlungen zum Schwingfestigkeitsnachweis geschweißter Verbindungen und Bauteile [22] für die Berechnung mit AFS angewendet werden können und wie sich die erzeugten Verbindungen in die FAT-Klassen einordnen lassen. Die sich daraus ergebenden möglichen Änderungen in den zulässigen Kennwerten sind bisher nicht bekannt und werden dokumentiert sowie ggf. in die Berechnungsvorschrift übertragen.

Zur Berechnung der vorhandenen Spannungen müssen die gängigen Berechnungsverfahren den Besonderheiten des AFS angepasst werden. Im Speziellen

sind Anpassungen der Werkstoffeigenschaften bzw. der Elementauswahl notwendig, um die Schaumstruktur ausreichend genau modellieren zu können.

Dem Konstrukteur fehlen heute gesicherte Aussagen über den Einfluss des Schweißverfahrens und der Verbindungsart auf den Verzug und die Festigkeit der geschweißten AFS-Verbindungen sowie Hinweise über die Gestaltung und Berechnung von AFS-Strukturen.



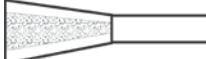
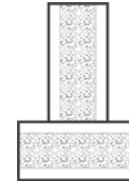

3 Zielstellung

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, die Defizite über den Einfluss der Verbindungsart und -form sowie des Schweißverfahrens auf den Schweißverzug und auf die Festigkeit von Schweißkonstruktionen aus AFS zu beheben und erste quantitative Gestaltungs- und Berechnungshinweise für den Konstrukteur bereit zu stellen.

Die Weiterverarbeitung von AFS und die Gestaltung von Verbindungsknoten sind bisher unzureichend untersucht worden. Für den Einsatz von AFS als Konstruktionswerkstoff fehlten konkrete Vorgaben und Hinweise zur Anwendung. Es wurden bisher keine Arbeiten durchgeführt, welche systematisch unterschiedliche Stoßarten und Verbindungsknoten betrachteten und verglichen sowie den Einfluss von verschiedenen Fügeverfahren auf die Prozesssicherheit, Qualität und Verbindungseigenschaften bewerteten. Die komplexen Zusammenhänge von Verbindungsgestaltung und Herstellung sind nicht erarbeitet worden. Für die industrielle Anwendung müssen sichere Erkenntnisse zur Verfügung stehen, wie die Verbindungsknoten ausgeführt werden, welche Fügeverfahren jeweils am geeignetsten sind, wie der Verzug minimiert und welche Festigkeiten erreicht werden können.

Untersucht wurden ausgewählte Verbindungsknoten, wie I-Stoßverbindungen an geschäumten und ungeschäumten Sandwichelementen sowie T-Stoßverbindungen, Tab. 1.

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Verbindungsknoten

Stoßarten	I-Stöße			T-Stöße	
Verbindungs-knoten	AFS/AFS ungeschäumt	AFS/AFS geschäumt	AFS/Blech ungeschäumt	AFS/AFS geschäumt	AFS/Blech geschäumt
					

Diese wurden mit unterschiedlichen Schweißverfahren hergestellt. Betrachtet wurde der Einfluss der Fügeverbindung auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften. Es wurden die Vor- und Nachteile beim Einsatz der unterschiedlichen Fügeverfahren (Laser, CMT[®], FSW) ausgearbeitet. Die Einflüsse auf die quasistatische Festigkeit und Dauerfestigkeit der Fügeverbindung wurden ermittelt. Es war zu prüfen, wie bestehende Berechnungsvorschriften auf Konstruktionen aus Sandwichstrukturen anzuwenden sind. Im speziellen musste ermittelt werden, wie

die detaillierten Verbindungsknoten in der Lebensdauerberechnung bewertet werden konnten. Für eine spätere Übertragung der Festigkeitsberechnung von AFS und deren Verbindungsknoten auf komplexe Konstruktionen wurden die Belastungen mittels FEM simuliert und anhand der durchgeführten Versuche validiert. Die FE-Berechnung erfolgte in drei Modellierungsstufen mit steigender Vereinfachung in der Modellierung. Dem Anwender sollten die Vor- und Nachteile der Modellierungsvarianten für die Abbildung von Aluminiumschaumsandwichs gegenübergestellt werden. Es sollten ihm Entscheidungskriterien angegeben werden, welche ihn befähigen, entsprechend den ihm vorgegebenen Anforderungen, das passende Berechnungsmodell auszuwählen. Die Einsatzmöglichkeiten werden aufgezeigt und als Anwendungsempfehlungen zusammengefasst.

4 Aufschäumen

4.1 Aufschäumen im Ofen

Wie eingangs erwähnt, lassen sich AFS in zwei Lieferformen beziehen, als Sandwich Halbzeug und als ungeschäumte Platinen. Die Platinen bieten den Vorteil, dass sich diese, vergleichbar eines Bleches, Umformen lassen und dann in speziellen Formen als 3D-Strukturen geschäumt werden können, Bsp. Abb. 7 [24].

Diese Platinen lassen sich schweißen, der Schaum regeneriert die Fehlstelle während des Aufschäumvorgangs. Dies ist besonders interessant, um größere Platinen herzustellen, als die auf dem Markt erhältlichen.

Das in [24] beschriebene Baumuster wurde mit Hilfe von Infrarotstrahlern geschäumt, Abb. 8.

Diese sind sehr kostspielig und von der Steuerung her sehr aufwändig, bieten allerdings den Vorteil einer lokalen Wärmeeinbringung, umso auch 3-dimensionale Strukturen Aufschäumen zu können.



Abbildung 7: Frontmodul eines Personennahverkehrs-zuges

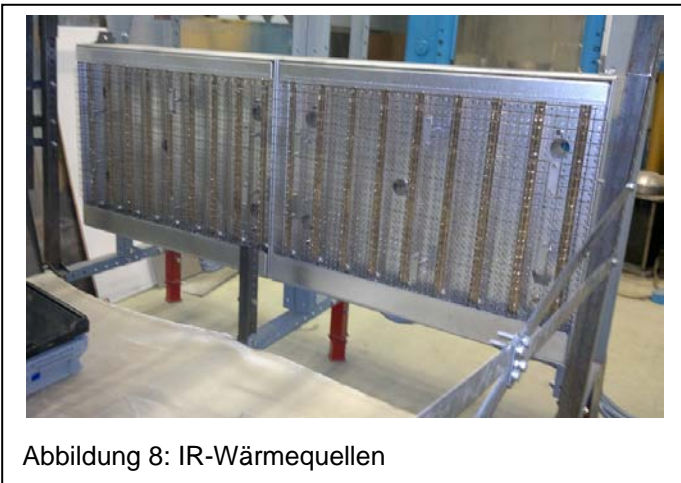


Abbildung 8: IR-Wärmequellen

Das Ziel dieser Untersuchungen war es einfachere technische Möglichkeiten zu überprüfen, mit denen der Anwender das Aufschäumen selber durchführen kann. Eingesetzt wurden dementsprechend als Wärmequellen Wärmestrahleröfen welche, meist in verschiedenen Ausführungen in Werkstätten vorhanden sind.

Der Aufschäumprozess setzt ab Temperaturen von ca. 590°C ein. Daher ist es entscheidend, die Wärme gleichmäßig verteilt in das Bauteil ein zu bringen, um ein Unebenheiten zu vermeiden.

Für die Untersuchungen wurden Platinen mit den folgenden aufgeführten Größen eingesetzt:

- 100 x100 mm²,
- 150 x 150 mm²,
- 200 x 200 mm²,
- 300 x 300 mm²,
- 500 x 500 mm².

Neben der Größe wurden die Temperaturführung und die maximalen Temperaturen variiert. Um die Platinen aus dem Ofen nehmen zu können musste ein geeignetes Handhabungsmittel hergestellt werden, Abb. 9. Dabei handelte es sich um



Abbildung 9: Platine mit Hilfsmittel im Ofen

eine Schweißkonstruktion aus Stahl. Um eine gleichmäßige Sandwichdicke zu generieren, wurde im Laufe der Untersuchungen eine Abdeckung hinzugefügt. Diese musste auch während der Erwärmungsphase mit in dem Ofen gelegt werden. Ohne diese Abdeckung wurden sehr ungleichmäßige Aufschäumergebnisse erzielt, Abb. 10.

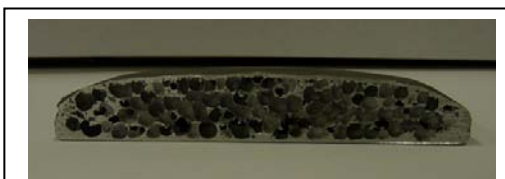


Abbildung 10: Ungleichmäßig aufgeschäumte Platine

Die Maximaltemperaturen wurden von 590 °C bis 700 °C variiert. Dementsprechend verkürzten sich bei höheren Temperaturen die Aufheizzeiten sowie die Haltezeit bis zum vollständigen Aufschäumen. Es zeigte sich, dass die Platinen nach dem vollständigen Aufschäumen sehr labil sind und sehr vorsichtig aus dem Ofen entnommen werden müssen, da sonst ein vollständiges zusammenfallen der Schaumstruktur droht.

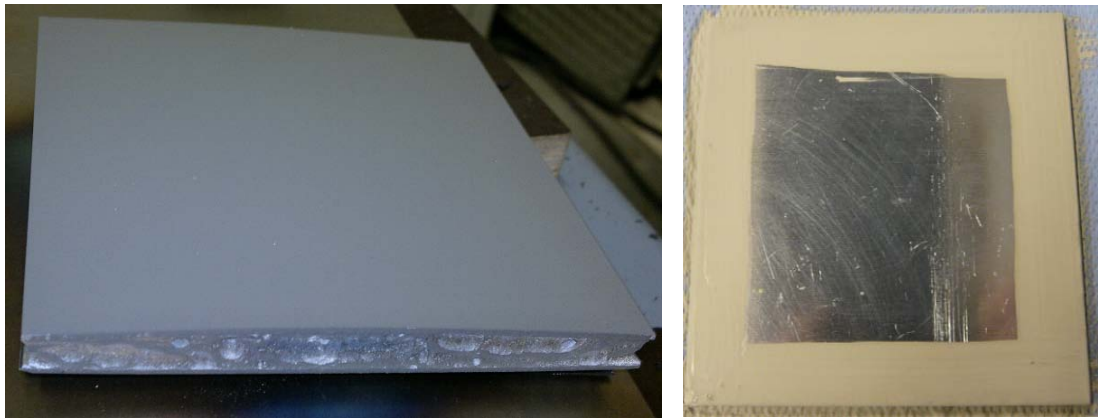


Abbildung 11: Beschichtete Platinen, mit Zinkspray, links; lokal am Rand mit Tonerde, rechts

Um ein homogenes Ergebnis zu erreichen, ist es notwendig, eine gleichmäßige Wärmeeinkopplung über die Fläche zu erreichen. Erfolgt diese nicht, besteht die Gefahr des Verzuges der Platine oder des ungleichmäßigen Aufschäumens. Da die blanke Oberfläche sehr reflektierend wirkt, wurde mittels eines Zinksprays diese mattiert, Abb. 11 links. Allerdings zeigt sich, dass die Randbereiche weniger Aufschäumen als der Bereich in der Mitte der Platinen. Als weitere Variation wurden die Randbereiche mit Tonerde beschichtet, somit konnte die Wärme besser einkoppeln und es entstand eine homogene Struktur, Abb. 11 rechts.

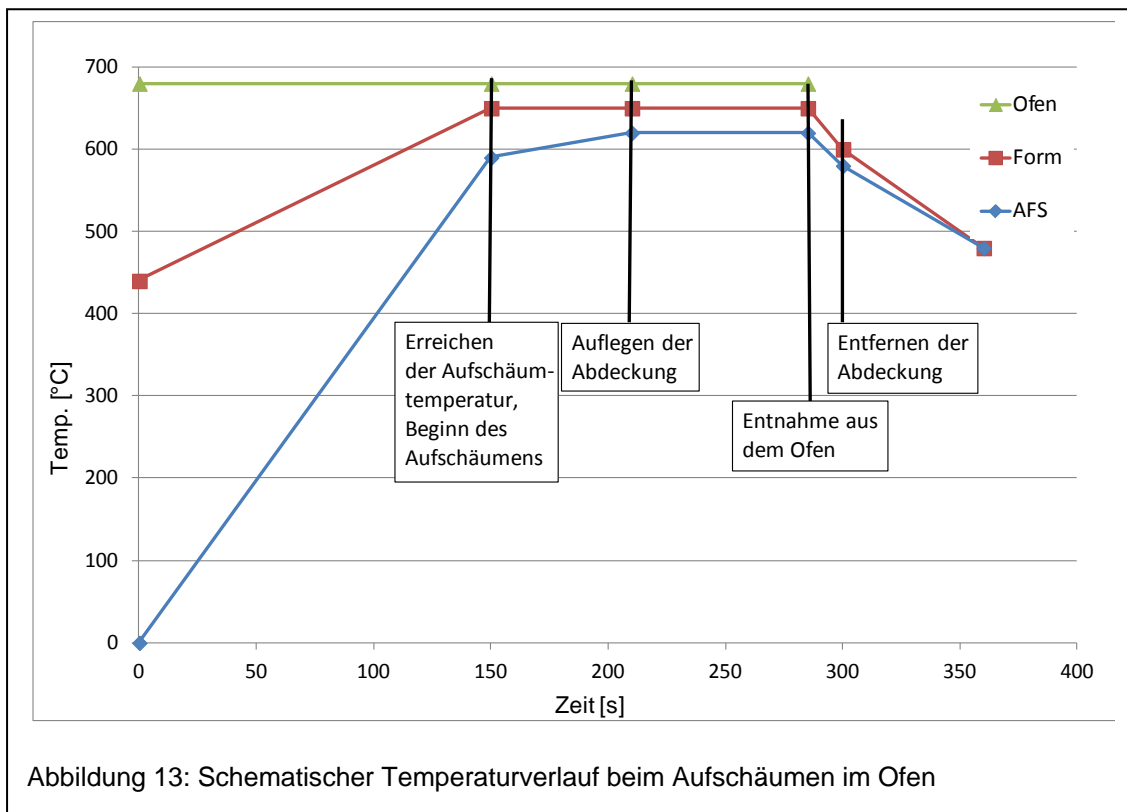
Eine weitere Problematik stellten die Haltezeiten im Ofen dar. Wurden diese zu lange gewählt, konnte es passieren, dass die Decklage in den Schaum übergang und so keine richtige Sandwichstruktur erzeugt wurde. Abb. 12 zeigt den Vergleich zwischen einem gekauften Sandwich (unten) und einem Sandwich, dessen Haltezeit zu hoch gewählt wurde. Deutlich ist der Unterschied der Decklagen zu erkennen. Dabei wird ein weiterer Unterschied deutlich, die Porenstruktur unterscheidet sich erheblich von den gekauften Sandwichen. Die Unterschiede ergeben sich aus dem Kalibrierprozess, der beim Hersteller im Anschluss an das Aufschäumen erfolgt und über mehrere Stunden dauert.



Abbildung 12: Sandwich im Ofen geschäumt, oben; gekauftes Sandwich, unten

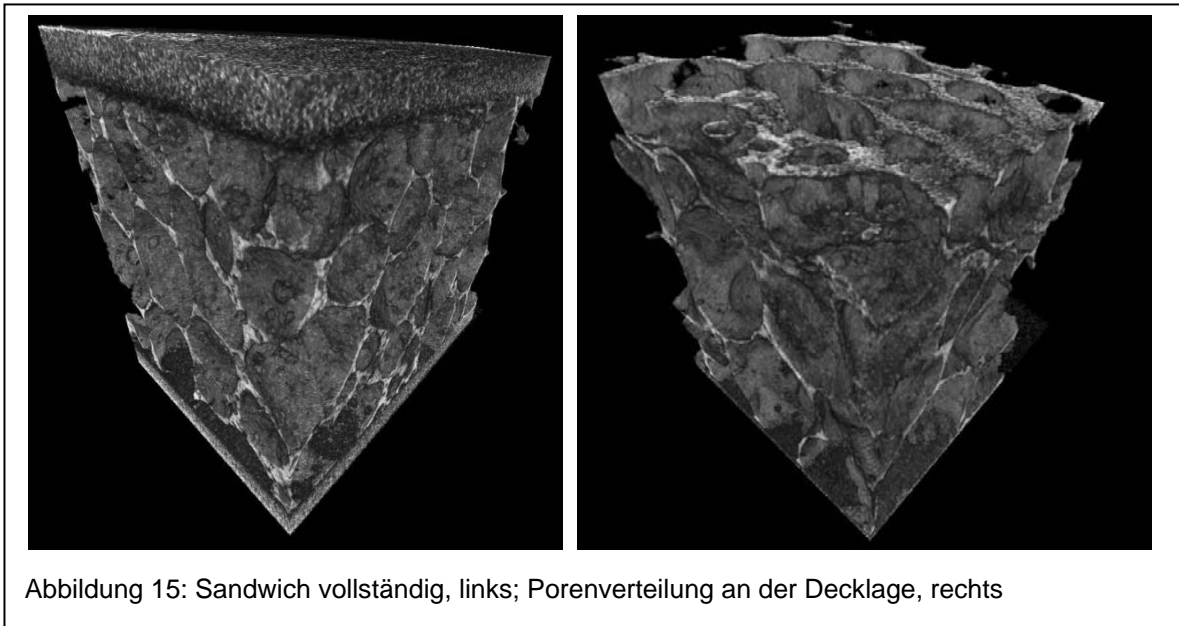
Mit der in Abb. 13 gezeigten Temperaturführung konnten insgesamt die besten Ergebnisse erzielt werden. Dabei wurde der Ofen auf 700 °C geheizt, die Form auf etwa 400 °C vorgewärmt. Bei Erreichen dieser Temperatur wurde die Platine eingelegt und die Form wieder in den Ofen gelegt. Nach einem Aufwärmprozess der Platine von ca. 2 Minuten beginnt die Aufschäumphase. Um genügend Wärme in der Platine zu halten, wurde die Abdeckung erst nach einer weiteren Minute auf-

gelegt. Die Haltezeit von etwa 90 Sekunden gewährleistete eine homogene Schaumstruktur und Sandwichdicke, Abb. 14.



4.2 Porosität

Nach den Aufschäumversuchen wurde mit Hilfe eines Mikrocomputertomographs die Schaumdichte bzw. die Dichte des Sandwichs ermittelt. Dafür wurden Probekörper von etwa 15 mm Kantenlänge aus dem Sandwich getrennt. Um einen Gesamtüberblick über die Porengröße und -verteilung zu erhalten, wurde ein 3D-Scan angefertigt. In Abb. 15 ist links ein vollständiges Sandwich dargestellt und rechts ein Schnitt direkt unterhalb der Decklage, um so die Verbindung Decklage / Schaum untersuchen zu können. Beide Aufnahmen stammen von einem selbstaufgeschäumten Sandwich.



Anhand dieser Scans lassen sich mittels einer Auswertesoftware direkt die Porosität, die Dichte sowie die Porengrößen errechnen. Dabei wurden folgende gemittelten Ergebnisse aus jeweils mehreren Proben ermittelt, Tab. 2:

Tabelle 2: CT-Analyse

	gekauftes AFS	selbstgeschäumtes AFS
Porosität im Schaum/ CT	89,7 %	85,5%
Porosität im Schaum/ berechn.	86,0%	82,9%
Dichte Sandwich [g/cm ³]	0,77	0,84

Die Porengröße ist im Schnitt ca. 1 - 4 mm und bei beiden Schäumen ungleichmäßig verteilt. Es zeigt sich eine leicht höhere Dichte des selbstgeschäumten AFS, gegenüber den fertig gekauften. Dieser Unterschied ergibt sich aus geringfügig dickeren Deckblechen dieser Charge. Trotz der unterschiedlichen Porenausbildungen in der Schaumlage sind die Porosität und Porengrößen annähernd gleich.




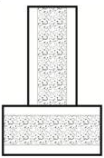
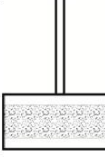
Zusammenfassung:

Es wurde eine Möglichkeit ermittelt, mit derer AFS mit einfachen Hilfsmitteln geschäumt werden kann. Allerdings hat sich gezeigt, dass eine gleichmäßige Wärmeverteilung in der Platine während des Aufschäumens die wesentliche Voraussetzung für ein gleichmäßiges Ergebnis ist. Wenn dies nicht gegeben ist, muss eine Nachbehandlung ähnlich dem eingangs erwähnten Kalibrierprozess erfolgen. Da dies einen erheblichen Aufwand darstellt und die Aufgabe mit der steigenden Größe der Bauteile komplexer wird, was wiederum erhebliche Kosten nach sich zieht, ist dieser Arbeitsvorgang für kleinere und mittlere Anwender eher ungeeignet.

5 Fügen

Innerhalb des Projektes sollten verschiedene I- und T-Stoßverbindungen von ungeschäumten und geschäumten AFS durch ein wärmearmes MSG Schweißverfahren, das Laserstrahlschweißen und das Rührreißschweißen für die weiterführenden Untersuchungen hergestellt werden, Tab. 3.

Tabelle 3: Verbindungsmatrix

Verfahren	I-Stöße			T-Stöße	
	AFS/AFS ungeschäumt	AFS/AFS geschäumt	AFS/Blech ungeschäumt	AFS/AFS geschäumt	AFS/Blech geschäumt
					
Wärmearmes MSG- Schweißen	X	X	X	X	X
Laserstrahl- schweißen	X	X	X		
Rührreib- schweißen	X	X	X		

Voruntersuchungen zum Wasserstoffgehalt am Halbzeug haben gezeigt, dass der H-Anteil im Schaumkern von geschäumten AFS bei ca. 10 ppm und bei ungeschäumten AFS bei über 300 ppm im Pulverkern liegen (Messgrenze des H-Analysators wurde erreicht). Als Treibmittel zum Aufschäumen wird Titanhydrid eingesetzt, welches teilweise auch nach dem Aufschäumen im Halbzeug verbleibt. Durch den verbleibenden Wasserstoff können bei den Schmelzschweißverfahren Poren entstehen. Im Folgenden soll auf die einzelnen Schweißverfahren eingegangen werden.

5.1 Lichtbogenschweißen

Als wärmearmes Schweißverfahren wurde zunächst das CMT[®] von Fronius ausgewählt und bei allen MSG-Verbindungen eingesetzt. Dieses Verfahren ist in vielen Unternehmen vorhanden und sollte durch die geringe Wärmeeinbringung speziell bei den ungeschäumten AFS Vorteile bringen. Für die Erhöhung der Reproduzierbarkeit wurde mit einer Linearführung gearbeitet. Die Sandwiche bzw. Platinen hatten eine Länge von 400 mm und wurden mit Hilfe von Niederhaltern positioniert, Abb. 16.



Abbildung 16: Versuchsaufbau MSG-Schweißen

5.1.1 I-Stoß AFS / AFS ungeschäumt

Um geeignete Schweißparameter zu finden, wurden erste Schweißversuche an 4 mm Blechen derselben Legierung (AL 6082, T651) wie die Decklagen des AFS durchgeführt. Als Zusatz diente bei allen Versuchen AlMg4,5Mn. Später zeigte sich, dass die erwartete Übertragbarkeit auf die ungeschäumten Platinen nicht gegeben war. Das Schweißparameterfeld wurde erheblich eingeschränkt. Bei einer zu geringen Streckenenergie erfolgte kein ausreichendes Anschmelzen der Platinenoberfläche aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit. Die Naht wies eine sehr geringe Einschweißtiefe auf (Abb. 17, links). Bei einer zu hohen Streckenenergie erfolgte ein Ausgasen des Wasserstoffs in die Schmelze, was Porenbildung zur Folge hatte (Abb. 17, rechts).

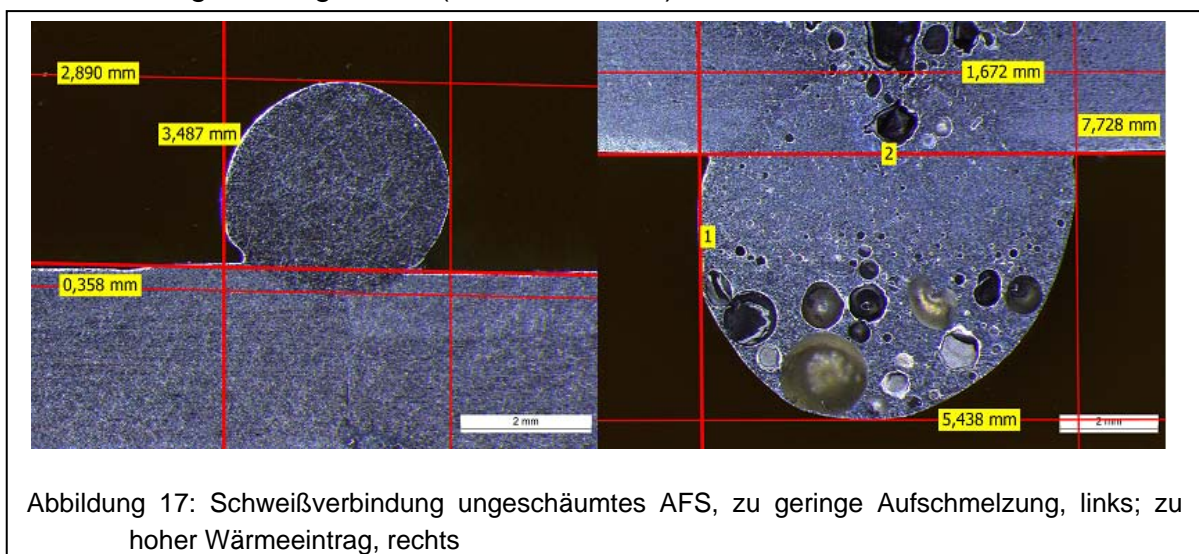


Abbildung 17: Schweißverbindung ungeschäumtes AFS, zu geringe Aufschmelzung, links; zu hoher Wärmeeintrag, rechts

Des Weiteren wurde festgestellt, dass der vorgesehene Kurzlichtbogenprozess, das CMT[®]-Schweißen, nicht geeignet war. Es konnten keine zuverlässigen Schweißparameter gefunden werden, um reproduzierbar Schweißnähte mit guter Qualität zu erzeugen. Es musste in diesem Fall auf einen Impulsprozess zurückgegriffen werden. Dieser zeigte ein wesentlich stabileres Verhalten und gute Schweißbeignung mit einem breiteren Parameterfenster. Als vorteilhafte Parameter haben sich folgende erwiesen, Tab. 4:

Tabelle 4: Schweißparameter I-Stoß ungeschäumtes AFS

Schweißprozess	MIG-Puls
Zusatzwerkstoff	AlMg4,5Mn; 1,2 mm
Schweißstrom [A]	152; (Pulsparameter im Programm hinterlegt)
Spannung [V]	20
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	1,7

Dadurch konnten reproduzierbar qualitativ gute Schweißnähte mit einer geringen Nahtüberhöhung erzeugt werden. Die Porenanzahl bzw. auch die Größe der Poren sind relativ gering, Abb. 18, und entsprechen den Qualitätsanforderungen der DIN EN ISO 10042 Bewertungsgruppe D. Kleinere Unregelmäßigkeiten, wie z.B. Kantenversatz oder unterschiedliche Decklagendicken, wurden durch die innere Regelung des Prozesses ausgeglichen.

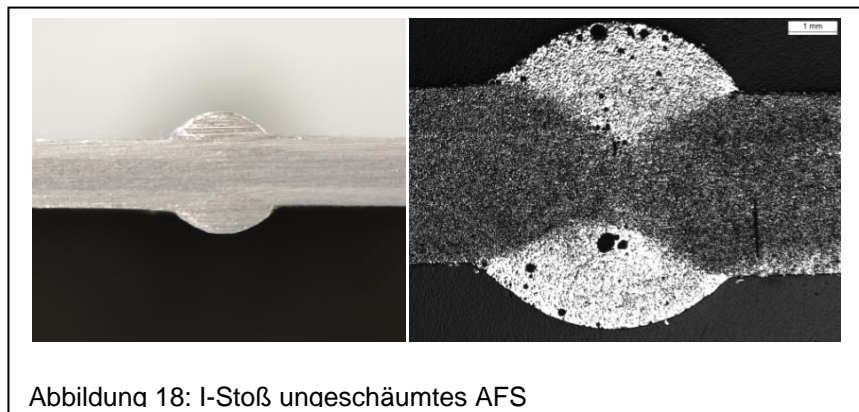


Abbildung 18: I-Stoß ungeschäumtes AFS

5.1.2 I-Stoß AFS / AFS geschäumt

Wie bei den ungeschäumten Platinen wurden bei den aufgeschäumten Sandwichen im Vorfeld erste Schweißversuche an 1 mm Blechen mit dem geplanten CMT[®]-Prozess durchgeführt. Es kam als Zusatzwerkstoff AlSi5 zum Einsatz, Abb. 19. Die Schweißnähte zeigten ein sehr flaches Nahtbild und eine gute Durchschweißung. Später zeigte sich, dass bei dem Einsatz am AFS, dieser Zusatzwerkstoff zur verstärkten Porenbildung neigte. Die gefundenen Parameter für die Bleche konnten nicht auf das AFS übertragen werden.



Abbildung 19: AFS, I-Stoß, Zusatz AlSi5

Es wurde bei den weiteren Untersuchungen auf den Zusatzwerkstoff AlMg4,5Mn zurückgegriffen, welcher für das Schweißen von AlMgSi1 geeignet ist. Dieser Zusatz bildet während des Schweißens eine zähere Schmelze, dadurch ergibt sich insgesamt weniger Einbrand. Bei diesem Werkstoff ist diese Eigenschaft eher von Vorteil und es ließen sich wesentlich porenärmere Nähte erzeugen, die eine größere Nahtüberhöhung auswiesen, Abb. 20.



Abbildung 20: AFS, I-Stoß, Zusatz AlMg4.5Mn

Als gute Parameter für das Schweißen von AFS im I-Stoß haben sich folgende Parameter als gut erwiesen. Weitere Details sind dem Anhang A zu entnehmen. Grundsätzlich reicht für diesen Fügeprozess eine saubere Schnittkante als Nahtvorbereitung aus, Tabelle 5. MIG-Puls wurde nicht untersucht, da gute Ergebnisse mit CMT[®] erzielt werden konnten.

Tabelle 5: Schweißparameter I-Stoß geschäumte AFS

Schweißprozess	CMT [®]
Zusatzwerkstoff	AlMg4,5Mn; 1,2 mm
Schweißstrom [A]	74
Spannung [V]	8,2
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	0,565

5.1.3 I-Stoß AFS ungeschäumt / Blech

Bei den Mischverbindungen von Blech und AFS wurde das gleiche Vorgehen wie bei den Verbindungen aus ungeschäumten AFS gewählt. Wie zuvor kam ein Impulsschweißprozess zum Einsatz, um ein 4 mm dickes AlMgSi1 (AL6082T6) Blech mit dem ungeschäumten AFS zu verbinden. Diese Dicke entspricht den ungeschäumten Platinen, Abb. 21.

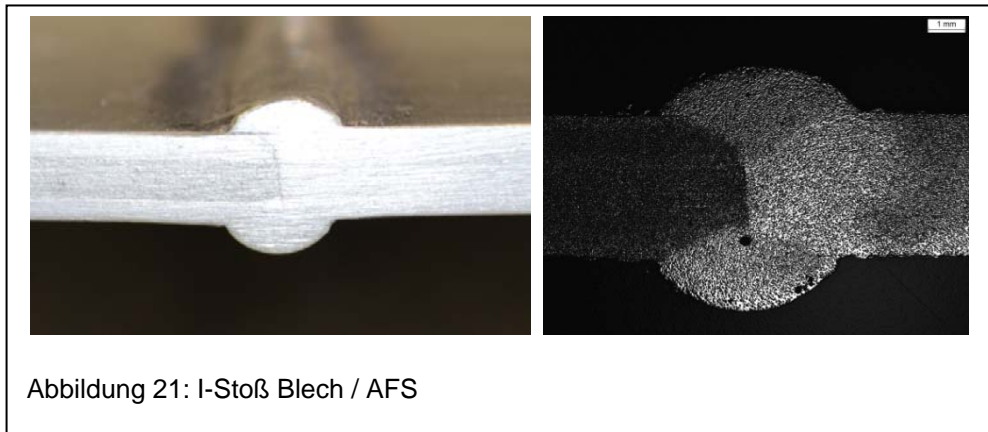


Abbildung 21: I-Stoß Blech / AFS

Die Schweißparameter entsprechen denen, die für die ungeschäumten Platinen ermittelt wurden, Tab. 6.

Tabelle 6: Schweißparameter I-Stoß ungeschäumtes AFS / Blech

Schweißprozess	MIG-Puls
Zusatzwerkstoff	AlMg4,5Mn; 1,2 mm
Schweißstrom [A]	152; (Pulsparameter im Programm hinterlegt)
Spannung [V]	20
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	1,7

5.1.4 T-Stoß, AFS / AFS geschäumt

Wie schon bei den I-Stoßverbindungen kam das CMT[®]-Schweißen erneut zum Einsatz. Der Versuchsaufbau entspricht dem der I-Stoßverbindungen, mit dem Unterschied, dass der Brenner um 45° geneigt wurde, umso besser die Kehlnaht ausführen zu können, Abb. 22.



Abbildung 22: Versuchsaufbau T-Stoßverbindungen

Die Ausführung sollte in einfacher Form erfolgen, d. h. die Sandwiche wurden aufeinandergestellt, und jeweils von beiden Seiten eine Kehlnaht geschweißt, Abb. 23.

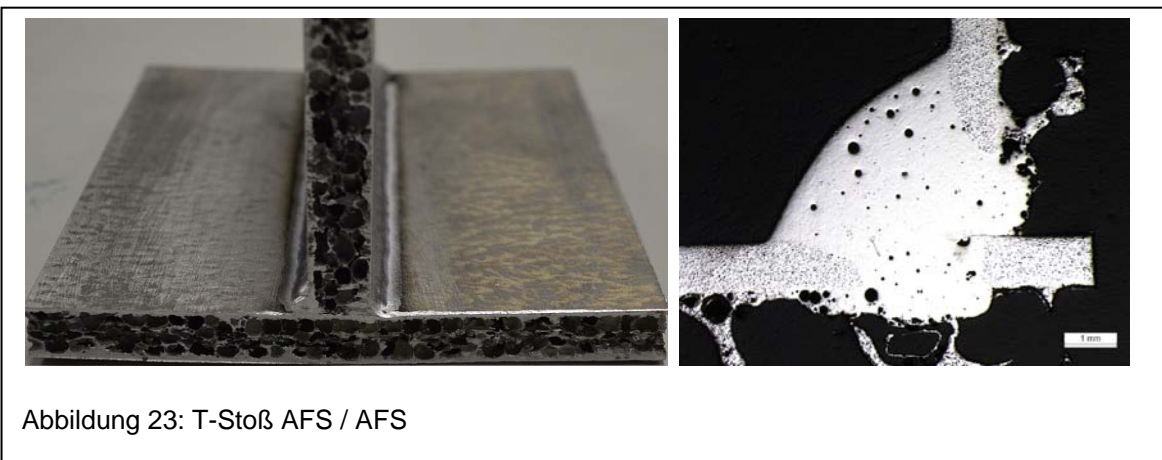


Abbildung 23: T-Stoß AFS / AFS

Durch Anpassung der Schweißparameter konnten relativ porenarme Schweißnähte erzeugt werden, Abb. 23, links. Als gute Schweißparameter haben sich die in Tabelle 7 angegebenen erwiesen.

Tabelle 7: Schweißparameter T-Stoß AFS / AFS geschäumt

Schweißprozess	CMT [®]
Zusatzwerkstoff	AlMg4,5Mn; 1,2 mm
Schweißstrom [A]	108
Spannung [V]	10,1
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	0,5

5.1.5 T-Stoß AFS geschäumt / Blech

Mit dem gleichen Vorgehen wie bei dem T-Stoß aus Sandwich wurden T-Stöße mit einem 4 mm Blech als Steg angefertigt, Abb. 24. Bei dem Blech handelte es sich wie bei den I-Stoßverbindungen um eine AlMgSi1 Legierung (AW 6082 T6). Im Gegensatz zu der Sandwichverbindung musste hier mit höherer Streckenenergie geschweißt werden, da das Blech gegenüber dem Schaum eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit besitzt. Die



Abbildung 24: T-Stoß AFS / Blech

Schweißparameter sind in Tab. 8 angegeben.

Tabelle 8: Schweißparameter T-Stoß AFS / Blech

Schweißprozess	CMT [®]
Zusatzwerkstoff	AlMg4,5Mn; 1,2 mm
Schweißstrom [A]	140
Spannung [V]	13
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	0,5

5.2 Laserstrahlschweißen

Die Schweißungen wurden im Laserbearbeitungszentrum (LBZ) des Lehrstuhls Füge- und Schweißtechnik durchgeführt. Zum Einsatz kam ein Hochleistungs-Faserlaser der Firma IPG Laser GmbH. Das Lasersystem ist für automatisierbare und flexible Schweißanwendungen an einen Knick-arm-Roboter der Firma Reis Robotics integriert. Das aus Ytterbium (Yb) bestehende aktive Medium des Lasers wird durch Laserdioden angeregt. Die entstehende Laserstrahlung hat eine Wellenlänge von 1,07 μm mit einer maximalen Ausgangsleistung von 15 kW.

Die Strahlführung kann durch drei verschiedene Lichtleitfasern mit Durchmessern von 200 μm , 400 μm oder 600 μm erfolgen. Als Bearbeitungsoptik dient eine Modulare Schweißoptik (MWO). Durch die Auswahl aus drei Faserdurchmessern, der MWO mit unterschiedlichen Kollimationsbrennweiten und den Brennweiten der Fokussierung, lassen sich verschiedene Fokussdurchmesser (auch Spottedurchmesser genannt) erzeugen. Beim Schweißen mit dieser Laseranlage wurde im Puls- oder Dauerbetrieb (cw) gearbeitet. Im Pulsmodus können Einstellungen wie Pulsdauer, Pulspausendauer und Spitzenleistung des Pulses geregelt werden. In Abhängigkeit der Länge der Pulspause und der Pulsdauer, ergibt sich die Pulsfrequenz. Im Dauerstrichbetrieb beschränken sich die Einstellungen auf die Größe der kontinuierlichen Leistung.

Es wurde bei den Untersuchungen mit einem Zusatzdraht geschweißt, was wiederum hohe Ansprüche an die präzise Zuführung und Nahtausrichtung sowie -vorbereitung stellt. In Abbildung 25 sind die Laseranordnung sowie die Drahtzuführung dargestellt. Der Zusatzwerkstoff wird wie beim Lichtbogenschweißen von einer Drahtvorschubeinheit befördert. Um den Schweißbereich ausreichend zu schützen, musste zusätzlich eine Schutzgasvorrichtung an der MWO angebaut werden.

Die im Vorfeld zu erfüllenden Parameter für reproduzierbare Schweißergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 9 aufgeführt.

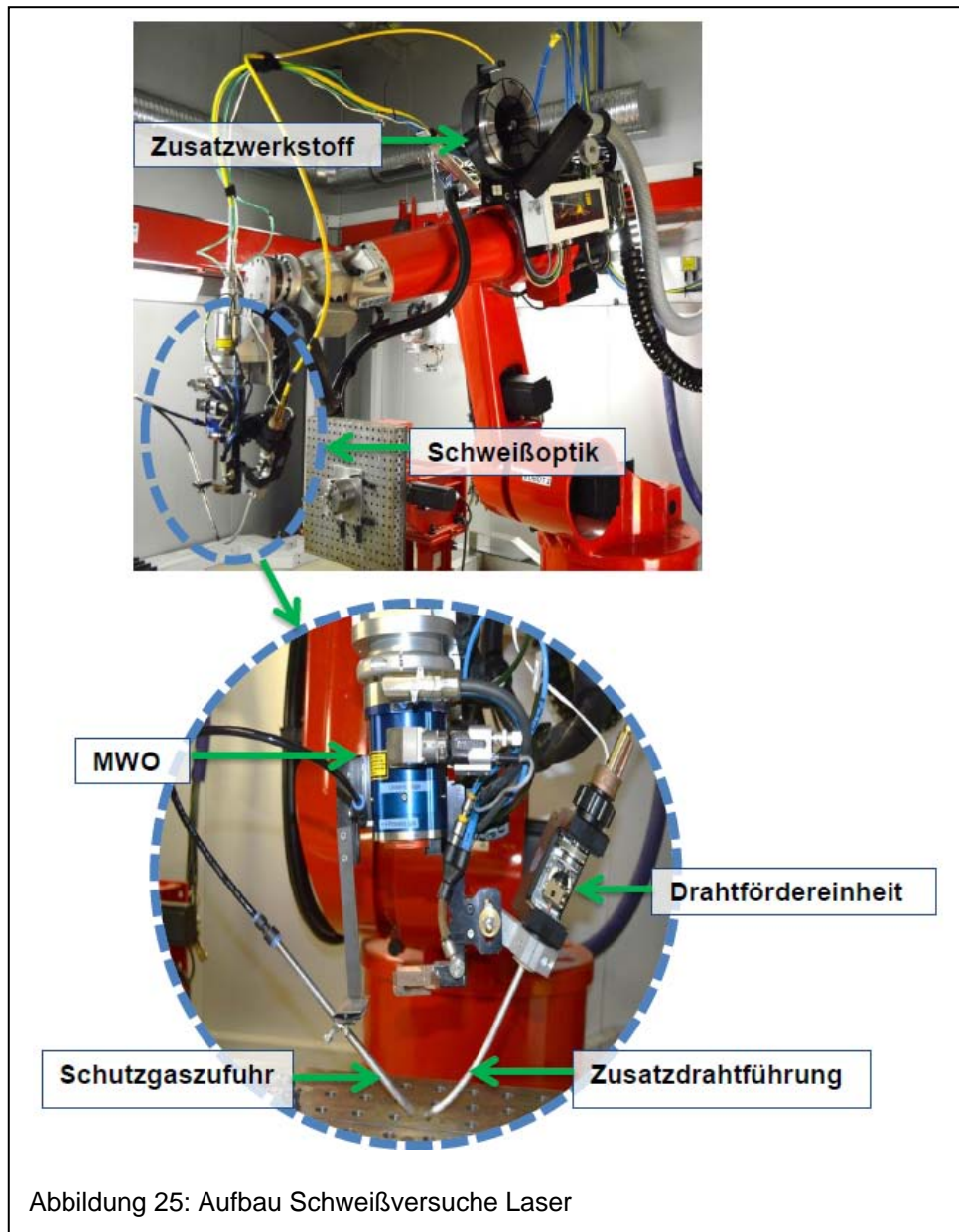


Tabelle 9: Parameter für die Laserstrahlbearbeitung

Nahtvorbereitung	Fräsen der Stoßflächen, mech. Abtragen der Oxidhaut
Anstellwinkel	4°
Zusatzdraht	AlMg4,5Mn und AlSi5; 0,8 mm Durchmesser, schleppend zugeführt
Schutzgas	Argon und Helium, stechend zugeführt
Betriebsart	vorrangig Pulsmodus

Für die I-Stöße wurden die Platten jeweils an den Kanten gefräst, um möglichst einen Nullspalt zu erzielen. Die Proben wurden auf dem Schweißstisch positioniert und gespannt, Abb. 26.

Bei allen folgenden Untersuchungen musste darauf geachtet werden, dass die AFS die gleiche Dicke und ggf. die gleiche Decklagendicke hatten, da es sonst zu Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht kommen konnte. Die Einspannung durfte nicht zu starr erfolgen, da es sonst zu Beschädigung des AFS kommen konnte.

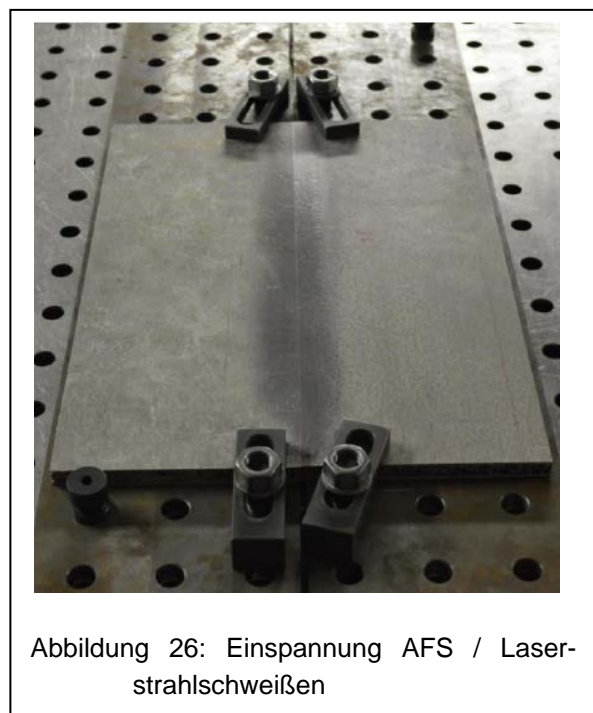


Abbildung 26: Einspannung AFS / Laserstrahlschweißen

5.2.1 I-Stoß AFS / AFS ungeschäumt

Wie in den Schweißuntersuchungen am ungeschäumten AFS mit MSG, sollte ein Durchschweißen der Decklagen vermieden werden, da dass im Pulverkern gebundene Treibmittel (Wasserstoffanteil von ca. 300 ppm) zu erheblicher Porenbildung in der Schweißnaht, Abb. 27 führt. Das Ziel war es, durch Leistungsanpassungen eine maximal tiefe Schweißnaht zu erzeugen, ohne energetisch in das ungeschäumte Kernmaterial einzukoppeln.

Im Vergleich zum geschäumten Sandwich wird mehr Leistung benötigt. Das ungeschäumte AFS leitet mehr Wärme und mehr Energie in die Umgebung als das geschäumte AFS ab. Weiterhin hat sich bei Schweißtiefen nahe am Kernmaterial eine unregelmäßige Raupenkantur, in Form von Schwankungen in Nahtbreite und -höhe, gebildet. Bei späteren Schliffen zeigte sich teilweise eine erhebliche Schwankung in der Decklagendicken der Platinen, was wahrscheinlich eine Ursache für die Unregelmäßigkeiten der Kontur ist, Abb. 28.

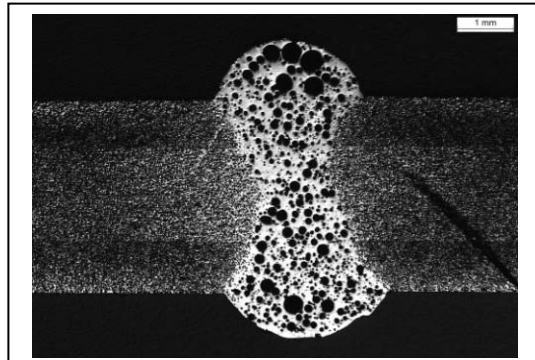


Abbildung 27: Poren Laserschweißnaht, ungeschäumtes AFS

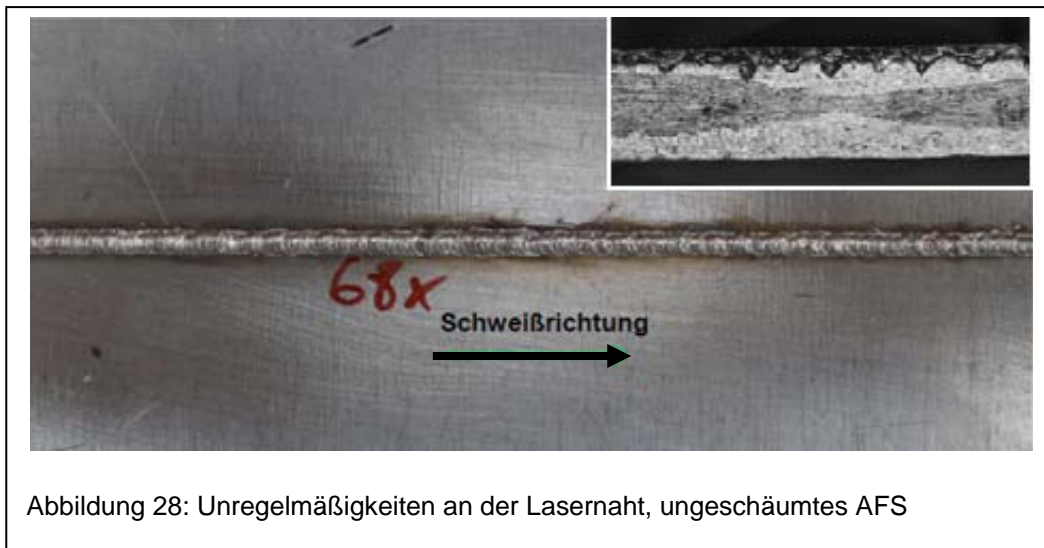


Abbildung 28: Unregelmäßigkeiten an der Lasernaht, ungeschäumtes AFS

Beim Schweißen von ungeschäumtem AFS war auffällig, dass es in einer unregelmäßigen Häufigkeit zur Kugelbildung am Zusatzdraht kam, Abb. 29.

Es ist davon auszugehen, dass es durch Streustrahlung des Lasers infolge der hochglänzenden Oberfläche des ungeschäumten AFS-Werkstoffes zu einer frühzeitigen Energieeinkopplung in den Zusatzdraht kommt.

Gute Ergebnisse, Abb. 30, ließen sich mit dem Zusatz AlSi5 und einem gepulsten Laserstrahl erzielen, Tab. 10.



Abbildung 29: Kugelbildung am Zusatzwerkstoff beim Laserstrahlschweißen

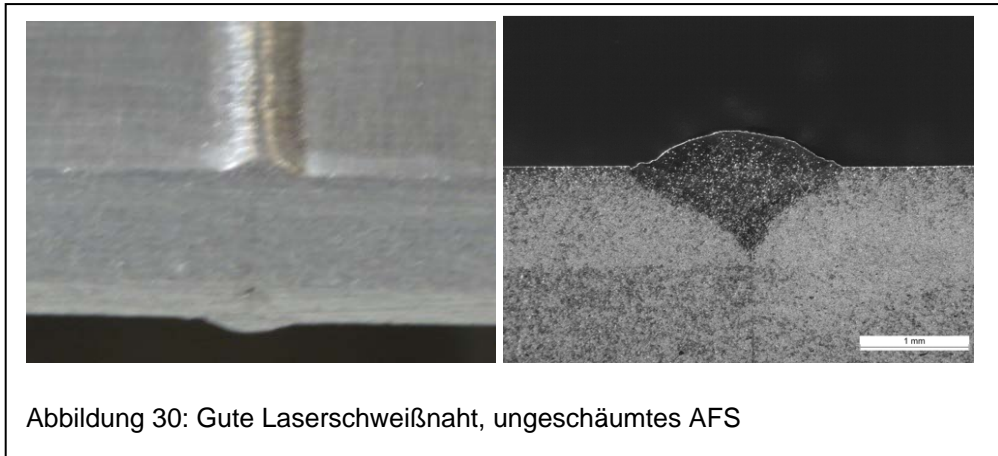
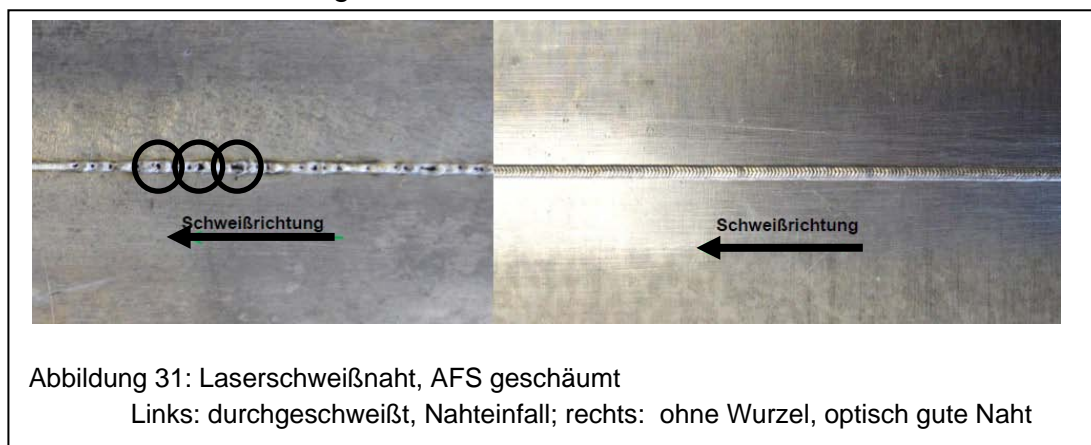


Tabelle 10: Schweißparameter Laserstrahlschweißen, ungeschäumtes AFS

Schweißprozess	Laser, gepulst
Zusatzwerkstoff	AlSi5, 0,8 mm
Schweißleistung [W]	5825
Pulsdauer [ms] / Pulsfrequenz [Hz]	7 / 59
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	1,8

5.2.2 I-Stoß AFS / AFS geschäumt

Im ersten Schritt wurden die AFS Platten an den Rändern gefräst, um einen Nullspalt in der Fügezone zu erzeugen. Für die ersten Versuche wurde der Zusatz AlSi5 eingesetzt. Das Ziel war es, Schweißnähte mit einer Wurzeldurchschweißung zu erzeugen, unter der Voraussetzung, dass sich der Wasserstoff im Schaum vollständig verflüchtigt hat. Allerdings zeigte sich, dass ein Durchschweißen der Decklagen direkt zum Einfallen der Schweißnaht bzw. zu einer starken Porenbildung führte, Abb. 31.



Es konnten Parameter gefunden werden, mit denen eine optisch gute Naht erzeugt werden konnte. Es musste darauf geachtet werden, dass der Laserstrahl nicht die Unterseite des Decklagen durchschweißte, da dies sofort zu Fehlern führte. Der Fokus musste auf die jeweilige Blechdicke eingestellt werden. In Abbildung 32 ist ein Querschnitt einer Naht dargestellt. Die Schweißnähte konnten mit folgenden Parametern geschweißt werden, Tab. 11.

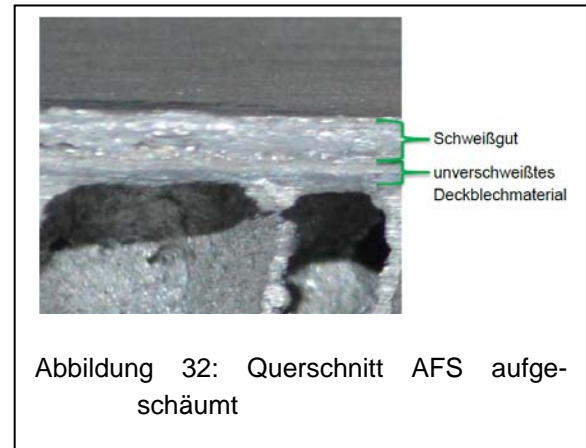


Abbildung 32: Querschnitt AFS aufgeschäumt

Tabelle 11: Schweißparameter Laser gepulst, AISi5

Schweißprozess	Laser, gepulst
Zusatzwerkstoff	AISi5; 0,8 mm
Schweißleistung [W]	5100
Pulsdauer [ms] / Pulspause [ms]	7 / 10
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	1,8

Es zeigte sich bei parallel stattfindenden Biegeuntersuchungen, dass trotz des guten Nahtaussehens die Schweißnähte nur über eine geringe Festigkeit verfügten. Verbindungen, die mit dem Zusatzwerkstoff AlMg4,5Mn geschweißt wurden, wiesen eine wesentlich höhere Festigkeit auf. Auf weitere Schweißungen mit AISi5 wurde verzichtet und die weiteren Untersuchungen mit dem Zusatz AlMg4,5Mn durchgeführt.

Zum Vergleich der Schweißuntersuchungen wurden neben dem Pulsbetrieb des Lasers auch im cw-Betrieb mit konstanter Laserleistung geschweißt. Die AFS-Platten konnten in diesem Fall nicht im Stumpfstoß mit Wurzel geschweißt werden. Ohne Wurzelbildung konnten im cw-Modus, reproduzierbare Schweißnähte mit optisch hoher Qualität erzeugt werden, Abb. 33. Es wurden die Parameter aus Tab. 12 verwendet:



Abbildung 33: Schweißnaht cw-Betrieb

Tabelle 12: Schweißparameter Laser cw-Betrieb

Schweißprozess	Laser, konstant (cw)
Zusatzwerkstoff	AlMg4,5Mn; 0,8 mm
Schweißleistung [W]	3750
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	1,98

Analog zum Pulsmodus wurde im cw-Modus die Leistung auf ein Maximum, für eine möglichst tiefe Schweißnaht ohne Wurzel, erhöht. Es zeigte sich, dass aufgrund der kontinuierlich eingebrachten Energie und der fehlenden Pulspausen, im Vergleich zum Pulsmodus bedeutend weniger Leistung zum Schweißen benötigt wurde. Weiterhin hat das Nahtäußere im Gegensatz zum Pulsbetrieb eine nahezu glatte Oberfläche ohne Schuppung.

Unabhängig von der Parameteranpassung der Laserschweißanlage, der Wahl des Zusatzdrahtes oder der Einstellung der Betriebsart war es nicht möglich AFS reproduzierbar mit einer Wurzel Ausbildung an der Unterseite der Fügezone zu verschweißen.

Die durch Wechselwirkung von Festkörperlaser und AFS bzw. die dadurch verursachten Prozessschwankungen stellten in den Schweißuntersuchungen die größte Herausforderung dar. Trotz der guten Schweißnahtvorbereitung und Parameteranpassungen, wie zum Beispiel einer Erhöhung der Defokussierung, konnten optisch gute Schweißnahtqualitäten teilweise nicht reproduziert werden. In den Untersuchungen zeigte sich deutlich, dass Inhomogenitäten und Fehlerstellen des AFS-Materials mit den engen Parametertoleranzen der Laseranlage schwer zu beherrschen waren. Folgende Probleme konnten benannt werden, die bei der Verarbeitung von AFS mit dem Laser auftraten:

- unterschiedliche AFS-Plattendicke

(Unterschiede von bis zu +/-15 %, bei einer Gesamtdicke von 12 mm)

-> bewirkten eine ungewollte Veränderung der Fokuslage

- unterschiedliche Deckblechdicken

(Unterschiede von bis zu +/-25 %, bei einer Gesamtdicke von 1mm)

-> Nahteinfall bei zu dünnen Blechstärken bzw. zu flache Schweißnaht bei zu dicken Blechstärken; schlechter Ausgleich des Lasers im Vergleich zum MSG-Schweißen

- unterschiedliche Deckblechoberflächen

durch Wärmeeinbringung beim Herstellungsprozess des AFS können teilweise unterschiedliche Deckblechoberflächen auftreten, Abb. 34

-> unterschiedliche Oberflächen -> unterschiedlicher Absorptionsgrad des Laserstrahls, Abb. 34

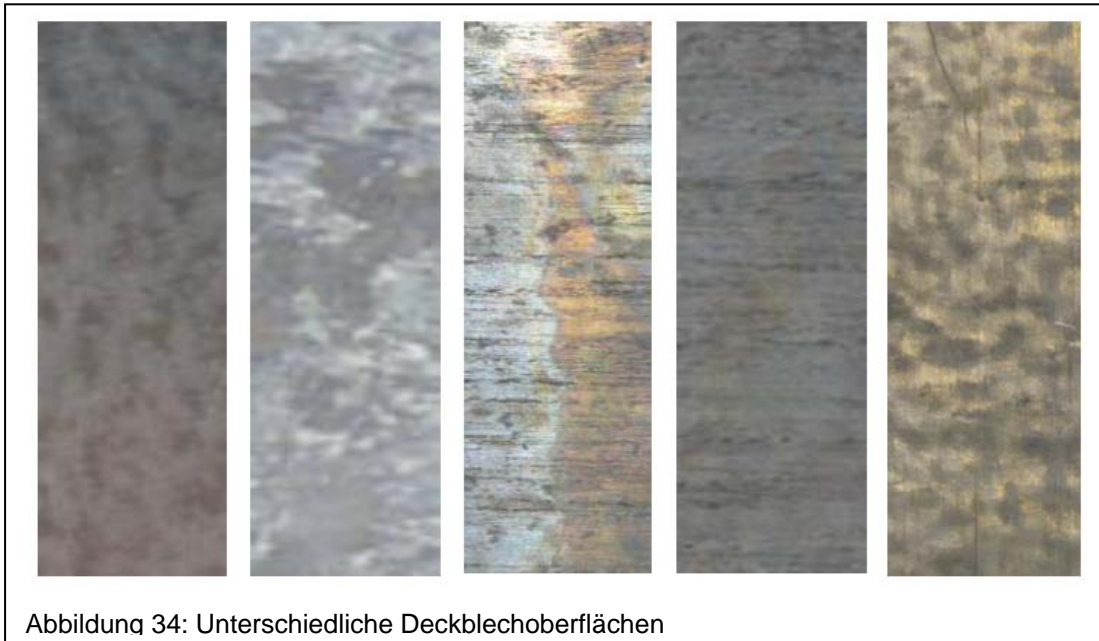


Abbildung 34: Unterschiedliche Deckblechoberflächen

- Versprödung der Deckblechoberfläche

durch zu starke Wärmebelastung beim Aufschäumprozess

-> Veränderung des Absorptionsgrades und Quelle für Wasserstoff und unerwünschte Elemente, Abb. 35.



Abbildung 35: Versprödete Oberfläche

- geometrische Fehlstellen und Einwölbungen in den Decklagen

-> unzureichende Spaltgeometrien, unterschiedliche Deckblechdicken, ungewollte Veränderung der Fokuslage, Abb. 36.



Abbildung 36: Einwölbung in der Oberfläche

- Inhomogenitäten und Fehler im Schaum

-> unterschiedliche Wärmeableitung, verfälschte Festigkeitskennwerte, gelöste Deckplatten, Abb. 37.



Abbildung 37: Abgelöste Decklage

Um den Einfluss des Werkstoffes zu reduzieren, wurden folgende Gegenmaßnahmen ergriffen:

- Plattendicke vor dem Schweißen vermessen und ggf. Fokus anpassen
- Blechdicke vermessen und ggf. Leistung anpassen
- für konstanten Absorptionsgrad Unregelmäßigkeiten abschleifen oder ggf. Probe aussortieren
- bei vorhandenen Unebenheiten des Deckblechs diese mit grobem Schleifpapier entfernen oder ggf. Probe aussortieren
- Material mit Fehlerstellen im Schaum und aussortieren

Da weitere Untersuchungen mit schwingender Belastung zeigten, dass die Schweißnähte immer ein Versagen an der Wurzelkerbe zeigten, wurde eine Änderung der Geometrie vorgenommen. Um die Schweißnähte mit Wurzel schweißen zu können, wurden mit Hilfe einer Fräse der Schaum entlang der Stoßkanten bis in eine Tiefe von ca. 5 mm vollständig entfernt, Abb. 38.

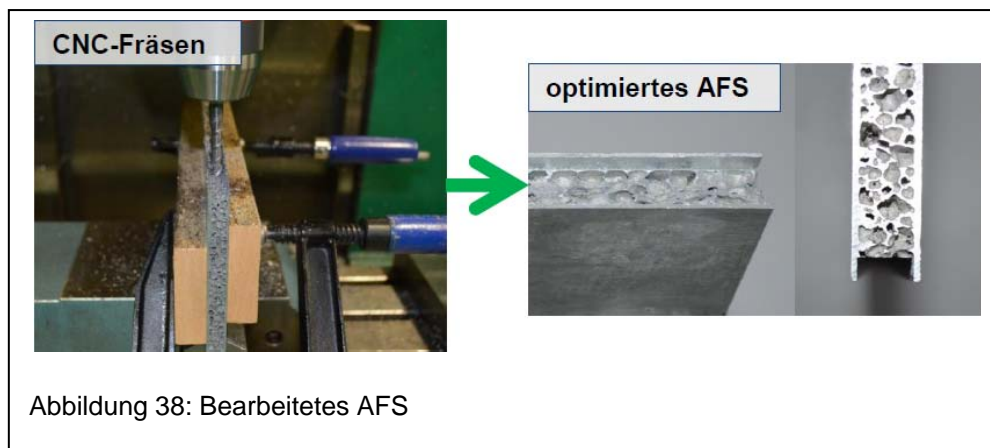


Abbildung 38: Bearbeitetes AFS

Die so vorbereiteten Schweißnähte konnten mit folgenden Parametern geschweißt werden, Tab. 13:

Tabelle 13: Schweißparameter, AFS ausgearbeitet

Schweißprozess	Laser, gepulst
Zusatzwerkstoff	AlMg4,5Mn; 0,8 mm
Schweißleistung [W]	3850
Pulsdauer [ms] / Pulspause [ms]	7 / 10
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	1,98

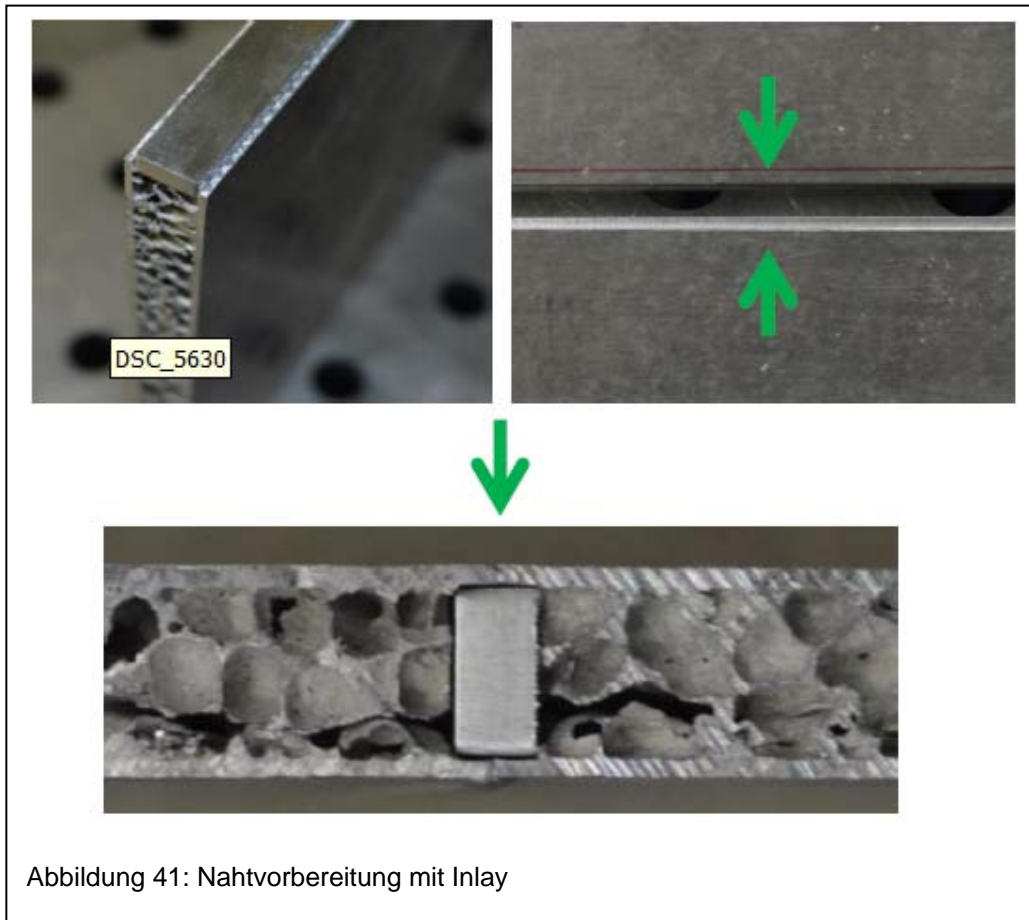
Das so vorbereitete AFS zeigte ein sehr gleichmäßiges und qualitativ gutes Naht-äußeres, Abb. 39.



Die Regulierung der Schweißnahttiefe erfolgte, wie in den vorangegangenen Versuchen über die Anpassung der Laserleistung. Ähnlich wie beim ungefrästen AFS, gibt es beim gefrästen AFS Unstetigkeit in den Deckblechdicken. So war es möglich mit einer Leistung von 4000 W optisch fehlerfreie Schweißnähte zu erzeugen. In einer weiteren Schweißung mit nur 3900 W entstand, trotz geringerer Leistung, jedoch ein Durchbrand in der Schweißnaht. Durch eine weitere Absenkung der Leistung auf 3800 W wurde an der Deckblechunterseite nicht durchgängig mit Wurzel geschweißt, Abb. 40.



Aufgrund der Problematik mit den schwankenden Deckblechdicken wurde weiterführend eine zusätzliche Optimierung vorgenommen. In den gefrästen Freiraum wurde ein Inlay in Form eines Steges aus Aluminiumvollmaterial der Legierung AlMgSi1 (artgleich zu den Decklagen) eingesetzt, Abb. 41.



Das Inlay hatte die Aufgabe ein Durchfallen der Schweißnaht, durch das Auffangen der schmelzflüssigen Wurzel, zu verhindern. Zusätzlich war zu erwarten, dass durch das Einsetzen eines Steges Zug- und Druckbelastungen bei schwingender Belastung im Vergleich zum gefrästen Freiraum, besser kompensiert werden können. Das Schweißen von AFS mit Steg war weitaus besser zu beherrschen als die vorherigen Schweißungen. Das Entstehen von Löchern infolge von zu hoher Leistung trat nur in vereinzelt Fällen auf.

Folgende Parameter wurden zum Schweißen des AFS mit Steg genutzt, Tab. 14:

Tabelle 14: Schweißparameter Laserstrahl, AFS mit Inlay

Schweißprozess	Laser, gepulst
Zusatzwerkstoff	AlMg4,5Mn; 0,8 mm
Schweißleistung [W]	4700
Pulsdauer [ms] / Pulspause [ms]	7 / 10
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	1,98

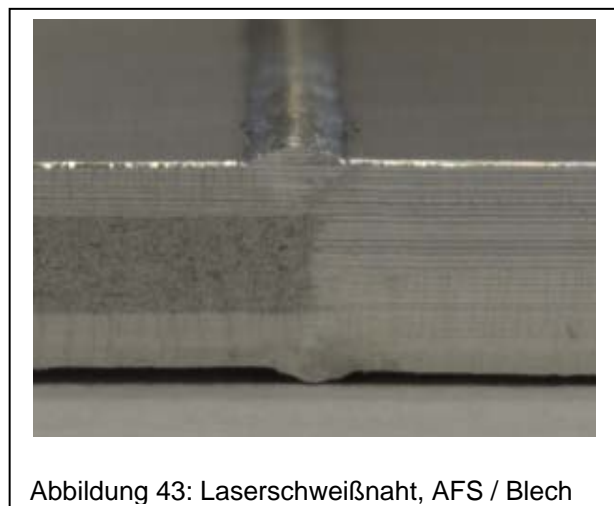
Durch den Einsatz des Stegs war es möglich, im Leistungsbereich von 4000 W bis 5500 W optisch gute und regelmäßige Schweißnähte zu erzeugen, Abb. 42.



Abschließend ist festzustellen, dass es mit diversen technischen Maßnahmen möglich war, AFS mit Hilfe des Lasers zu schweißen. Allerdings stellt diese Füge-technik im Hinblick auf die Dauerfestigkeit hohe Anforderungen an die Nahtvorbereitung mittels Inlays bzw. eine genaue Kenntnis der Technologie.

5.2.3 I-Stoß AFS ungeschäumt / Blech

Bei den Mischverbindungen zwischen AFS-Platinen und AlMgSi1 Blechen konnte mit den gleichen Parametern gearbeitet werden, die für die ungeschäumten AFS ermittelt wurden. Die Blechdicke betrug 4 mm, welche der Dicke der ungeschäumten Platinen entspricht. Aufgrund der geleisteten Vorarbeiten, konnten so die Verbindungen einfach gefügt werden. In Abbildung 43 ist links der Pulverkern deutlich zu erkennen gegenüber dem Blech.



5.3 Rührreibschweißen

Für die Schweißversuche standen der SLV Berlin-Brandenburg (SLV B-B) zwei Maschinenarten zur Verfügung. Zum einen die Rührreibschweißmaschine ESAB LEGIO™ 3UT, Abb. 44, zum anderen eine konventionelle Flachbettfräsmaschine vom Typ Toledo M.R.F. FBF-1750, Abb. 45. Mit der Rührreibschweißmaschine von ESAB sind folgende Arbeiten möglich:

- FSW in X- und Y-Ebene, frei programmierbar
- Weg- und Kraftsteuerung (bis 30 kN Axialkraft)
- Schweißnahtlänge 2000 mm (ohne Start- und Endpunkt)



Die Fräsmaschine ermöglicht diese Arbeiten:

- FSW in X- und Y-Ebene, frei programmierbar
- Wegsteuerung (bis ca. 15 kN Axialkraft)
- Schweißnahtlänge 1400 mm (ohne Start- und Endpunkt)



Damit waren maschinenseitig optimale Voraussetzungen gegeben um alle möglichen Schweißsituationen bzw. Einsatzvarianten, die sich im Verlauf des Projektes ergaben, zufriedenstellend zu bearbeiten.

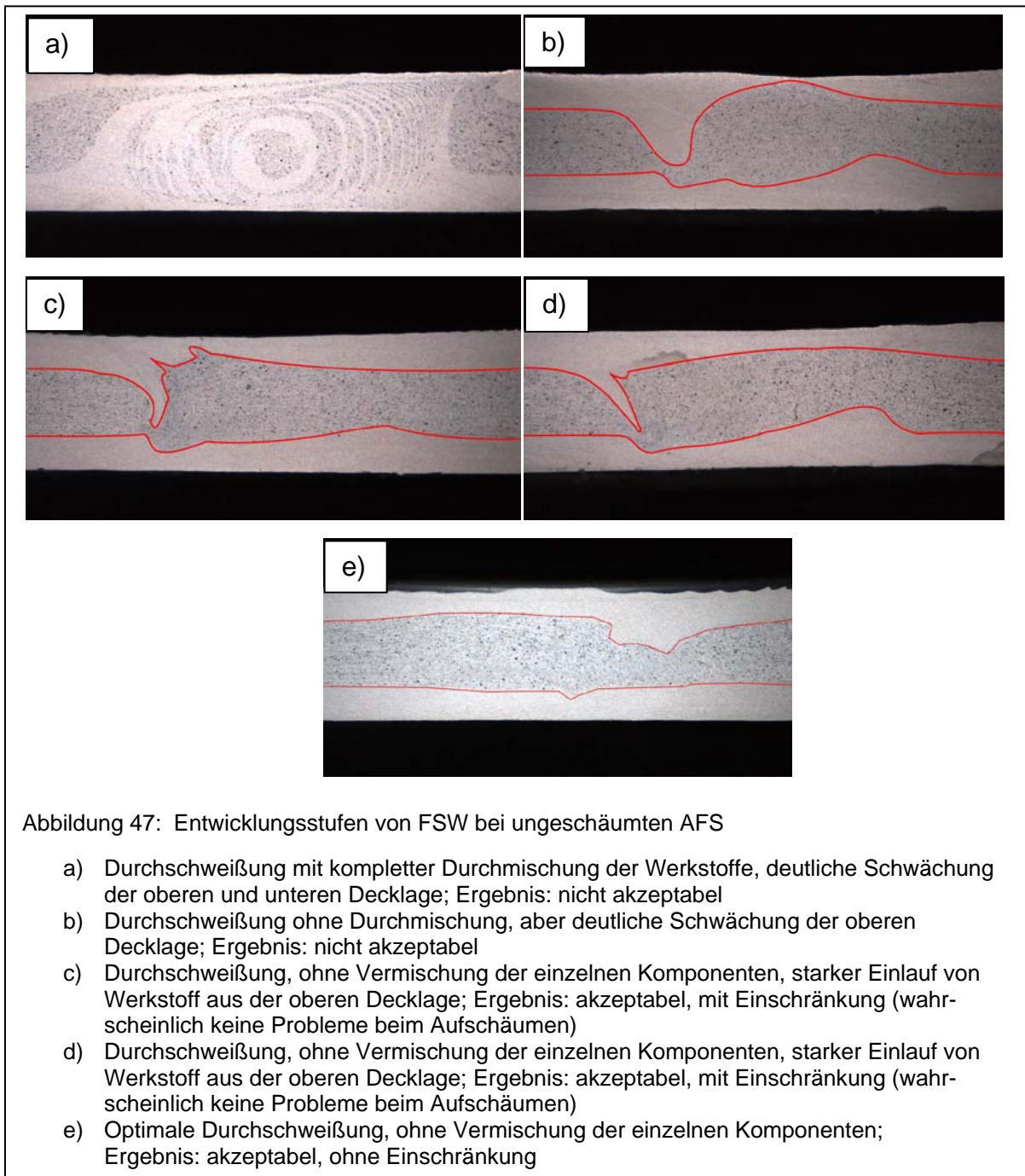
5.3.1 I-Stoß AFS / AFS ungeschäumt

Bei diesen Versuchen wurde zwischen zwei Varianten unterschieden:

1. Einseitiges Schweißen, hierfür wurde mit einer speziellen Form des Schweißstiftes gearbeitet, so dass ein möglichst geringer Materialtransport vom Pulverkern zu den Decklagen erfolgte, Abb. 46.



Wie eingangs beschrieben ist eine möglichst geringe Vermischung der Decklagenbleche mit dem Pulverkern notwendig. Dies ist notwendig, da sonst nach dem Aufschäumen eine Schwächung der Sandwichstruktur an dieser Stelle auftritt (Ausdünnung der Deckbleche und damit keine Kraftaufnahme im Belastungsfall). Standardschweißstifte weisen ab einer Blechdicke von ca. 2 mm eine Profilierung auf, um den Materialtransport in der Dicke sicher zu stellen. Um diesen zu minimieren wurden die Schweißungen mit einem glatten Schweißstift durchgeführt. Dementsprechend mussten auch die Schweißparameter angepasst werden, um eine gute Verbindung herzustellen. Die verschiedenen Ergebnisse der Entwicklungsstufen sind in Abbildung 47 dargestellt.



Parameter:

Als günstige Parameter für das einseitige Schweißen erwiesen sich eine Drehzahl von 1.300 bis 1.500 min^{-1} und eine Schweißgeschwindigkeit von 200 bis 300 mm/min. Teilweise ließen auch Schweißgeschwindigkeiten von 500 mm/min realisieren. Allerdings konnten die Parameter dabei nicht so stabil eingestellt werden, dass immer eine qualitativ gute Naht erzeugt werden konnte. Bei höheren Schweißgeschwindigkeiten (bis 750 mm/min) konnten keine akzeptablen Ergebnisse erzielt werden. Die Schweißnähte waren nach oben hin offen oder die Röntgenauswertung zeigte deutliche Fehler, Abb. 48. Auch höhere bzw. niedrigere Drehzahlen konnten das Ergebnis nicht positiv beeinflussen.

Als Zusammenfassung kann folgendes bemerkt werden. Das einseitige Rührreibschweißen ist zum Fügen von ungeschäumten AFS sehr gut geeignet. Es konnten hochwertige Schweißnahtqualitäten hergestellt werden. Allerdings musste relativ viel Aufwand betrieben werden um die entsprechenden Parameter zu erarbeiten. Auch die Anforderungen an das Rührreib-Werkzeug waren im Gegensatz zum beidseitigen Schweißen sehr hoch. Es wurden dazu mehrere Test-Geometrien erarbeitet, diese in den Schweißungen verglichen und letztlich funktional optimiert. Zusätzlich konnte die Eigenschaft des FSW-Prozesses relativ verzugsarme Verbindungen zu ermöglichen genutzt werden. In der Schlussphase des Projektes wurden größere Bleche zum Aufschäumen hergestellt. In der Abbildung 49 sind solche Schweißungen zu sehen.



Abbildung 48: Nach oben offene Schweißnaht

Abbildung 49 zeigt eine Reihe von vier länglichen, rechteckigen Metallblechen, die nebeneinander auf einer Holzunterlage liegen. Jedes Blech hat eine glatte, silberfarbene Oberfläche mit einer deutlichen Schweißnaht, die sich über die gesamte Länge des Blechs erstreckt. Die Bleche sind durch vertikale Holzstützen voneinander getrennt.



Abbildung 49: Einseitig rührreibgeschweißte ungeschäumte AFS

2. Beidseitiges Schweißen, die Decklagen wurden einzeln geschweißt, dabei musste allerdings das Werkstück gedreht werden, Abb. 50.



Abbildung 50: Beidseitig geschweißtes ungeschäumtes AFS

Beim beidseitigen Rührreibschweißen konnte mit herkömmlichen Werkzeugen gearbeitet werden. Wichtig war hier, um wiederum den Pulverkern nicht zu schädigen, dass mit einem entsprechend kurzen Schweißstift gearbeitet wird. In diesem Fall sollte der Stift nicht länger als 1,0 mm sein (Decklagendicke = 1,0 mm). Zur Abstützung des Prozesses reichte die Festigkeit des „Restwerkstückes“ (Pulverkern und das jeweilige Deckblech) aus. Vermischungen, wie bei einseitigem Schweißen möglich, waren nicht zu erwarten und traten im Verlauf der Versuche auch nicht auf. Zur Nachweisführung wurden trotzdem Tests mit längeren Werkzeugen (Stiftlänge bis 2,0 mm) durchgeführt. Es ergaben sich keine Verbesserungen in Bezug auf die Schweißnaht, allerdings war jetzt wieder eine Vermischung der Decklagen mit dem Pulverkern zu beobachten. Diese Variante wurde im Anschluss dann auch vollständig verworfen. Ebenfalls konnte ein Aufschäumen während des Schweißprozesses ausgeschlossen werden. Die dafür erforderliche Temperatur wird beim Rührreibschweißen nicht erreicht.

Bei sämtlichen Testreihen konnten ähnlich gute Ergebnisse erzielt werden. Im Schliffbild zeigte sich jeweils eine eindeutige Abgrenzung zwischen den einzelnen Werkstoffen, Abb. 51.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich das beidseitige Rührreibschweißen zum Fügen von ungeschäumten AFS hervorragend eignet. Es konnte mit relativ wenig Aufwand entsprechende Parameter erarbeitet werden und auch die Anforderungen an das Rührreib-Werkzeug waren im Gegensatz zum einseitigen Schweißen nicht sonderlich hoch.

Bei dieser Variante wurde mit folgenden Parameterpaarungen gearbeitet, Tabelle 15. Die Rührstiftlänge betrug dabei jeweils 1,0 mm.



Abbildung 51: Optimale Verschweißung der oberen und unteren Decklage, ohne Vermischung der einzelnen Komponenten

Tabelle 15: FSW-Schweißparameter ungeschäumtes AFS, beidseitig geschweißt

Drehzahl in min^{-1}	Vorschub in mm/min	Ergebnis VT	Ergebnis RT	Bemerkungen
1.000	200	i.O.	i.O.	Gratbildung, leicht lösbar
1.200	300	i.O.	i.O.	Gratbildung, leicht lösbar
1.500	500	i.O.	i.O.	Grat festsitzend, lösbar mit Werkzeug
2.000	750	i.O.	i.O.	Grat festsitzend, lösbar mit Werkzeug

Weiterhin konnte die Eigenschaft des FSW-Prozesses relativ verzugsarme Verbindungen zu ermöglichen genutzt werden. In der Schlussphase des Projektes wurden größere Bleche zum Aufschäumen hergestellt. In der Abbildung 52 sind solche Schweißungen zu sehen, hier in Verbindung mit MIG-Schweißungen.

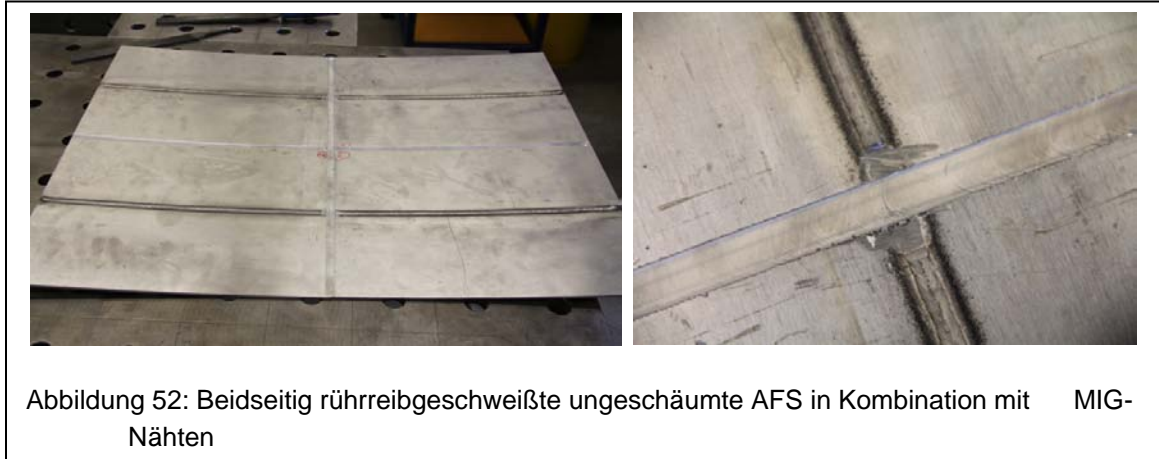


Abbildung 52: Beidseitig rührreibgeschweißte ungeschäumte AFS in Kombination mit MIG-Nähten

5.3.2 I-Stoß AFS / AFS geschäumt

Das Rührreibschweißen von geschäumten AFS wurde von sehr vielen Faktoren begleitet, die diese Verbindungen unterschiedlich stark (positiv und negativ) beeinflussen. Diese waren in erster Linie die Kernlage des AFS an sich (auf geschäumten Werkstoffen lässt sich kein Druck ausüben), Beschädigungen an den Oberflächen des AFS, schwankende Gesamtdicken des AFS und starke Ausdünnung der Deckbleche (> 1 mm) bis hin zu nach oben offenen Strukturen.

1. Wie lässt sich der erforderliche Druck auf geschäumtes AFS ausüben.

Beim FSW ist es üblich die zu fügenden Bauteile stumpf aneinander aufzuspannen. Das Rührreibwerkzeug dringt unter Rotation ein und übt dabei einen Druck auf die Bauteile aus und zwar unabhängig ob mit Positions- oder Kraftsteuerung gearbeitet wird. Nach Aufsetzen der Werkzeugschulter und der Plastifizierungsphase des Werkstoffes kann das Werkzeug unter einer bestimmten Geschwindigkeit entlang des Stoßes verfahren werden und bildet dabei die Schweißnaht. Das geht so an geschäumten AFS nicht ohne Weiteres. Die Bauteile werden entweder zusammengequetscht, das plastifizierte Material wird in die Kernlage gedrückt (keine ausreichende Abstützung) oder die Schweißnähte sind nach oben offen. Durchgeführte Tests haben wie zu erwarten gezeigt, dass alle diese Szenarien auch schon an kurzen Schweißnähten auftraten. Abhilfe wurde wie folgt geschaffen:

- Herausarbeiten des Schaumes im Bereich der Fügezone
- Einlegen eines artgleichen Inlays
- Beidseitiges Schweißen des AFS

In der der Abbildung 53 ist so eine Anordnung dargestellt.



Abbildung 53: Rührreibschweißnaht mit Inlay an geschäumten AFS

Der FSW-Prozess stützt nun auf das Inlay ab, ein „Versacken“ in der Naht ist nicht mehr gegeben. Das Wirkprinzip ist ähnlich wie bei einem Kammerprofil, bei dem ein entsprechend gepresster Steg die Kräfte aufnimmt. Wichtig war es, die Breite des Inlays so zu wählen, dass genügend Stützwirkung (Durchmesser der Schulter) gegenüber dem Werkzeug vorhanden war. Letztlich stellt diese Ausführung der Schweißverbindung einen T-Stoß gemäß DIN EN ISO 25239-2 dar, Abb. 54.

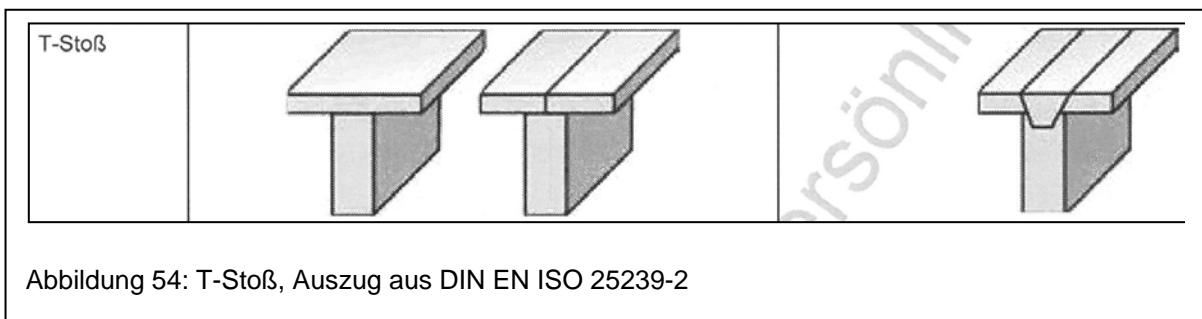


Abbildung 54: T-Stoß, Auszug aus DIN EN ISO 25239-2

Die Schweißungen verliefen bei gutem Vormaterial (geschäumtes AFS) ohne nennenswerte Probleme. Bei den nachfolgenden Festigkeitsuntersuchungen zeigte sich jedoch insofern ein Mangel, dass aufgrund der „scharfen“ Ecken des Inlays, von dieser Stelle ein Bruch angehen könnte. Durch die Krafteinwirkung (Druck der Werkzeugschulter) wurden die Deckbleche dort geschwächt (eingeschnürt), so dass entlang der Schweißnaht Schwachstellen entstanden, Abb. 55.



Abbildung 55: Riss am Übergang Deckblech zum Inlay

Um dem entgegenzuwirken wurde bei späteren Versuchen ein Inlay mit abgerundeten Ecken verwendet, Abb. 56. Die folgenden Untersuchungen konnten einen positiven Trend bestätigen, die Proben versagten erst mit einem zunehmenden

Lastwechselniveau. Eventuell müssten beifolgenden künftigen Untersuchungen diese Ecken noch weiter abgerundet bzw. konstruktiv anders gestaltet werden.



Parameter:

Als geeignete

Abbildung 56: Inlay in der Schweißnaht mit abgerundeten Ecken

Parameter für

das Schweißen an geschäumten AFS mit Inlay erwiesen sich eine Drehzahl von 1.000 bis 1.500 min^{-1} und Schweißgeschwindigkeiten von 200 bis 500 mm/min. Innerhalb dieses Parameterfensters konnten bei entsprechend fehlerfreien Vormaterial Schweißnähte in gleichbleibender Qualität hergestellt werden. Die Länge des Rührstiftes (Eintauchtiefe) betrug 2 mm.

2. Umgang mit Beschädigungen an den Oberflächen, schwankende Gesamtdicken des AFS und starke Ausdünnung der Deckbleche (< 1 mm), nach oben offenen Strukturen

Der Umgang mit diesen Erscheinungen gestaltete sich als äußerst schwierig. Bei einer reinen Schwankung in der Gesamtdicke des AFS konnte man während des Schweißprozesses durch manuelle Regelung einen gewissen Ausgleich schaffen, so dass diese Fehlerform zumindest unter Laborbedingungen händelbar war. In der Praxis könnte dies aber zu erheblichen Schwierigkeiten (Fehlerbildung usw.) führen, hier muss der Hersteller des AFS gleichmäßige Qualität liefern.

Eine nächste Form der Beschädigung war durch eine „Faltenbildung“ bzw. „Delen“ an den Oberflächen gekennzeichnet, siehe Abbildung 57.



Abbildung 57: Links – Faltenbildung, rechts – Dellen in der Oberfläche

Die weiteren Formen solcher Beschädigungen waren noch markanter und damit das AFS für eine schweißtechnische Verarbeitung unbrauchbar. Die Deckbleche wiesen in den Fällen nach oben offene rissförmige Stellen auf bzw. löchrige Oberflächen, Abb. 58.



Abbildung 58: rissförmige Strukturen, links; löchrige Oberfläche, rechts

Zusammenfassung:

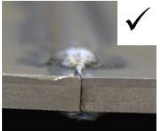
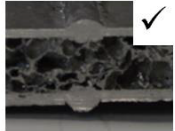

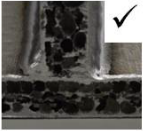
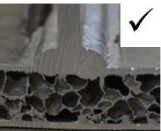
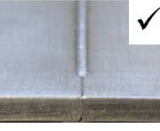
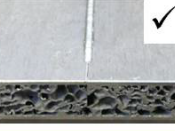
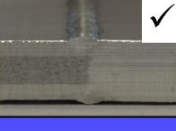
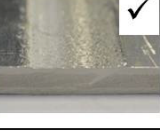
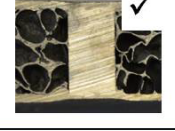
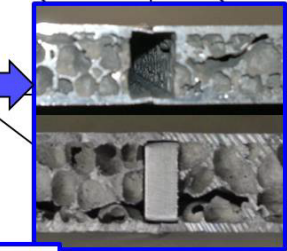
Es ist grundsätzlich möglich sehr gute Verbindungen an geschäumten AFS herzustellen. Entsprechende Parameter wurden ermittelt. Eine wichtige Voraussetzung ist erstens die Schweißungen mittels eines Inlays durchzuführen (Abstützung für das Rührreibwerkzeug in der Fügezone) und zweitens eine gleichbleibende Qualität des geschäumten Werkstoffes. Bei diversen Testschweißungen konnte dieser zweite Umstand immer wieder bestätigt werden, je besser bzw. gleichbleibender die Qualität des Ausgangswerkstoffes war, desto besser sind auch letztlich die Ergebnisse der Schweißungen gewesen. Bei Anwendungen in der Praxis muss bei dem jeweiligen Anbieter von AFS unbedingt auf diesen Umstand verwiesen werden. Die Werkstoffe sollten in gleichbleibenden skalierten Qualitäten zur Verfügung gestellt werden.

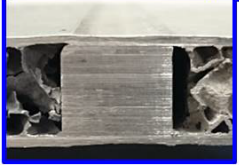
5.3.3 I-Stoß AFS ungeschäumt / Blech

Die Versuche hierzu wurden analog zu den Versuchen 5.3.1 und 5.3.2 (siehe oben) durchgeführt. Als Blechwerkstoff kam die gleiche Legierung (AL 6082, T651) wie bei den Decklagen zum Einsatz. Die Fügekanten der Proben wurden gefräst, zusätzlich wurde auf die gleiche Dicke, AFS zum Blech, geachtet um eine größere Gratbildung von vornherein auszuschließen. Sowohl beim einseitigen als auch beim beidseitigen FSW konnten gute Qualitäten erzeugt werden. Als Parameter dienten die Werte aus 5.3.1 und 5.3.2, die problemlos übertragen werden konnten. Beim einseitigen FSW wurde im Schweißnahtbereich etwas Aluminium aus dem Blech in die Kernlage des ungeschäumten FSW gedrückt. Das war aber zu erwarten und sollte beim Aufschäumen kein Problem darstellen. Die Decklagen wurden dabei nicht geschädigt. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Rührreibschweißen hier sehr gut umsetzbar ist. Es wurde ausschließlich mit der Flachbettfräsmaschine geschweißt. Damit sollte eine Umsetzbarkeit bei KMUs auch ohne weiteres möglich sein.

Zusammenfassung:

Es konnte mit allen eingesetzten Verfahren die geplanten Fügeknotten hergestellt werden, Abb. 59.

Verfahren	I-Stöße			T-Stöße	
	AFS/AFS ungeschäumt	AFS/AFS geschäumt	AFS/Blech ungeschäumt	AFS/AFS geschäumt	AFS/Blech geschäumt
Wärmearmes MIG-Schweißen					
Laserstrahlschweißen					
Rührreibschweißen			Erweitert mit Inlayvariante		



 Inlay Kanten abgerundet

Abbildung 59: Verbindungsmatrix, vollständig

Es zeigte sich, dass das wärmearme MIG-Schweißen sich sehr gut eignet für die eingesetzten AFS. Für ungeschäumte Platinen musste allerdings ein Pulsprozess eingesetzt werden, da mit dem geplanten CMT[®]-Prozess keine guten Schweißnähte erzeugt werden konnten. Weiterhin wurde bei den späteren mechanischen Prüfungen festgestellt, dass der AFS / AFS T-Stoß für schwingende Belastungen in dieser Gestaltungsform nicht geeignet ist. Hier sollte bei künftigen Untersuchungen eine konstruktive Neugestaltung geprüft werden.

Durch eine Vielzahl von Versuchen konnten Parameter für das Laserstrahlschweißen von AFS ermittelt werden. Allerdings reagiert dieser Schweißprozess sehr empfindlich auf Schwankungen in der Qualität des AFS. Da diese nicht präzise vorhergesagt werden können und eine umfangreiche Nahtvorbereitung notwendig ist, ist dieses Verfahren für den Einsatz von AFS wirtschaftlich nicht weiter zu empfehlen.

Das FSW eignet sich hervorragend für das Verschweißen von AFS im ungeschäumten Zustand. Wobei hier auch ein Werkzeug konstruiert wurde, mit dem die Platinen einseitig geschweißt werden konnten. Somit entfällt das Umdrehen der Bauteile. Bei den geschäumten AFS musste mit einem Inlay gearbeitet werden, was vergleichbar zum Laserstrahlschweißen mit Mehraufwand für die Nahtvorbereitung verbunden ist.

6 Prüfung

6.1 Quasistatische Untersuchung

Für die geplanten schwingenden Untersuchungen war es notwendig die quasistatischen Eigenschaften des AFS als Grundwerkstoff in diesem Fall dem Schaum und den Decklage, bzw. auch den einzelnen gefügten Verbindungen zu kennen. Dabei konnten auch erste qualitative Aussagen zu den Fügeigenschaften getroffen werden. Von allen ungeschäumt gefügten Verbindungen wurden größere Blechtafeln angefertigt (wie z.B. in Abb. 49 od. 52).

6.1.1 Eigenschaftsermittlung AFS

Bei den quasistatischen Untersuchungen wurden Zugversuche an dem AFS im Kernverbund, den Decklagen und dem Schaum durchgeführt. Um eine separate Prüfung von Decklagen und Schaumkern durchführen zu können, mussten die Sandwiche in ihre einzelnen Komponenten zerlegt werden. Teilweise wurde dies durch ausfräsen des Schaumkerns bzw. abräsen der Deckbleche erreicht. Ebenfalls musste eine geeignete Einspannung für Sandwichproben entwickelt werden. Es wurde dazu im Einspannungsbereich der Probe der Schaum ausgefräst und anschließend durch eine passende Einlage aus Aluminium ersetzt. Danach konnten die Proben, ohne dass der Schaumkern gequetscht wurde, problemlos in die Zugprüfmaschine eingesetzt werden. Anhand der erreichten Festigkeiten im Zugversuch konnte festgestellt werden, dass die Zugfestigkeit des AFS überwiegend durch die Deckbleche gegeben wird. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass sich die Knetlegierung der Decklagen in einem undefinierten Gefügestand befindet und im Verhältnis zu vergleichbaren handelsüblichen Al-Blechen gleicher Legierung nur etwa 2/3 der Gesamtfestigkeit erreichten. Einen ersten Überblick dazu gibt die Tabelle 16.

Tabelle 16: Ergebnisse der Zugversuche; GW = Sandwich; S = Schaumkern; DB = Deckblech

Probe	Dicke	Breite	F _{max}	R _m	R _{p0,2}
	mm	mm	kN	MPa	MPa
GW1	12,41	30,00	9,70	26	16,83
GW2	12,44	30,15	12,24	33	21,29
GW3	12,39	29,94	10,71	29	18,77
S1	10,47	29,97	1,18	4	n.a.
S2	10,31	30,01	0,70	2	n.a.
S3	10,54	30,03	1,60	5	n.a.
DB1	0,9	29,94	4,97	184	86
DB2	1,04	29,96	5,04	173	81

Die geringe Zugfestigkeit des Sandwiches ergibt sich aus dem Verhältnis der erfassten Kraft zu dem Gesamtquerschnitt, im Vergleich zu den einzelnen Deckblechen ist die Gesamtkraft am Sandwich etwa doppelt so hoch.

Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von AFS, Schaum und Decklagen:

Um die mechanischen Eigenschaften möglichst genau zu ermitteln, auch im Hinblick als Datenbasis für die Simulation, wurden mehrere verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Zunächst, wie bereits kurz beschrieben, Zugversuche am Sandwich, an den Deckblechen sowie an dem Schaum an sich. Für die Zugversuche senkrecht zu den Decklagen wurden zusätzlich Stahlbleche (50x50x10 mm, mittig geschweißter Bolzen) beidseitig mit einer AFS-Probe (50x50 mm) verklebt, um so eine Einspannmöglichkeit für die Zugprüfung zu bekommen. Bei den Zugprüfungen stellte sich heraus, dass durch die Temperaturbelastung vom Herstellungsprozess (Aufschäumen), die Festigkeiten der Deckbleche gegenüber identischen Blechen aus Knetlegierungen stark reduziert waren. Für die Druckprüfungen wurden ebenfalls 50x50 mm große AFS-Proben verwendet, die aber ohne zusätzliche Bleche geprüft wurden. Im Folgenden sind Ergebnisse von Zug- und Druckversuchen aufgelistet:

Schaumeigenschaften durch Zug- und Druckversuche

- Zugfestigkeit parallel zur Decklage (Abb. 60): $R_m = 2,1 - 5,0$ MPa
- Zugfestigkeit senkrecht zur Decklage (Abb. 61): $R_m = 0,5 - 0,6$ MPa (nicht isotrop), Zugversuche Weggeregelt, Dehngeschwindigkeit 6 mm/min, Extensometerlänge 70 mm (Abb. 62)
- Druckfestigkeitsprüfung des Sandwichs bis zum Versagen des Schaums: $S_{dB} = 0,75 - 0,9$ MPa, senkrecht zur Decklage, weggeregelt, Stauchgeschwindigkeit 2,5 mm/min (Abb. 63)
- Decklageneigenschaften durch Zugversuche (Abb. 64)
- Grundwerkstoff: $R_m = 180$ MPa; Dehngrenze: $R_{p0.2} = 83$ MPa
- I-Stoß MSG geschweißt: $R_m = 213$ MPa
- I-Stoß LB geschweißt: $R_m = 55$ MPa
- I-Stoß FSW geschweißt: $R_m = 193$ MPa

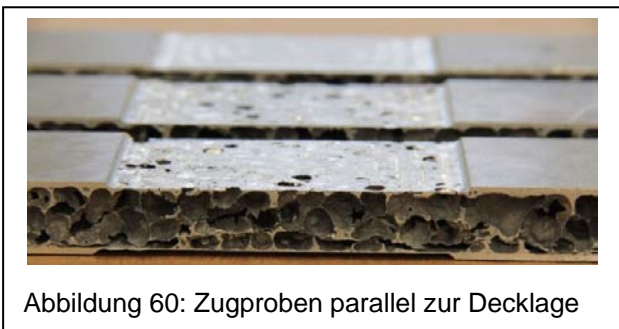


Abbildung 60: Zugproben parallel zur Decklage



Abbildung 61: Zugproben senkrecht zur Decklage

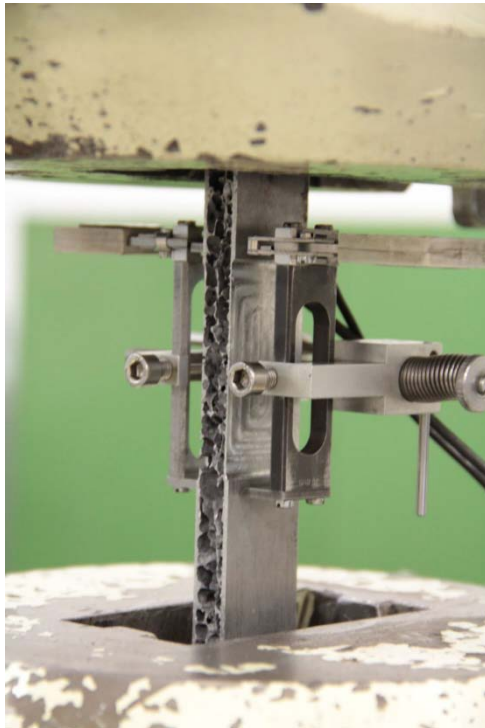


Abbildung 62: Einspannung der Zugproben AFS mit Extensometer

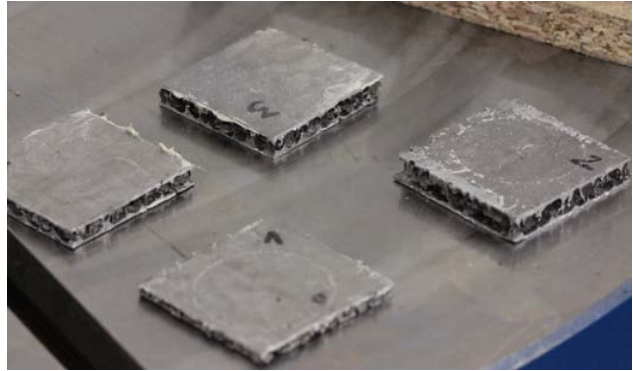


Abbildung 63: Proben für die Druckfestigkeitsprüfung

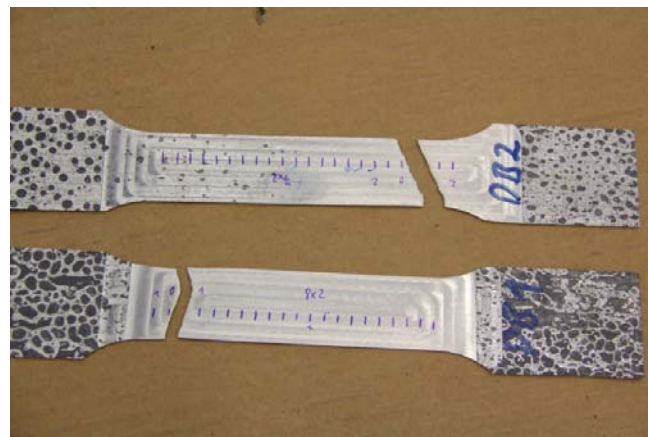


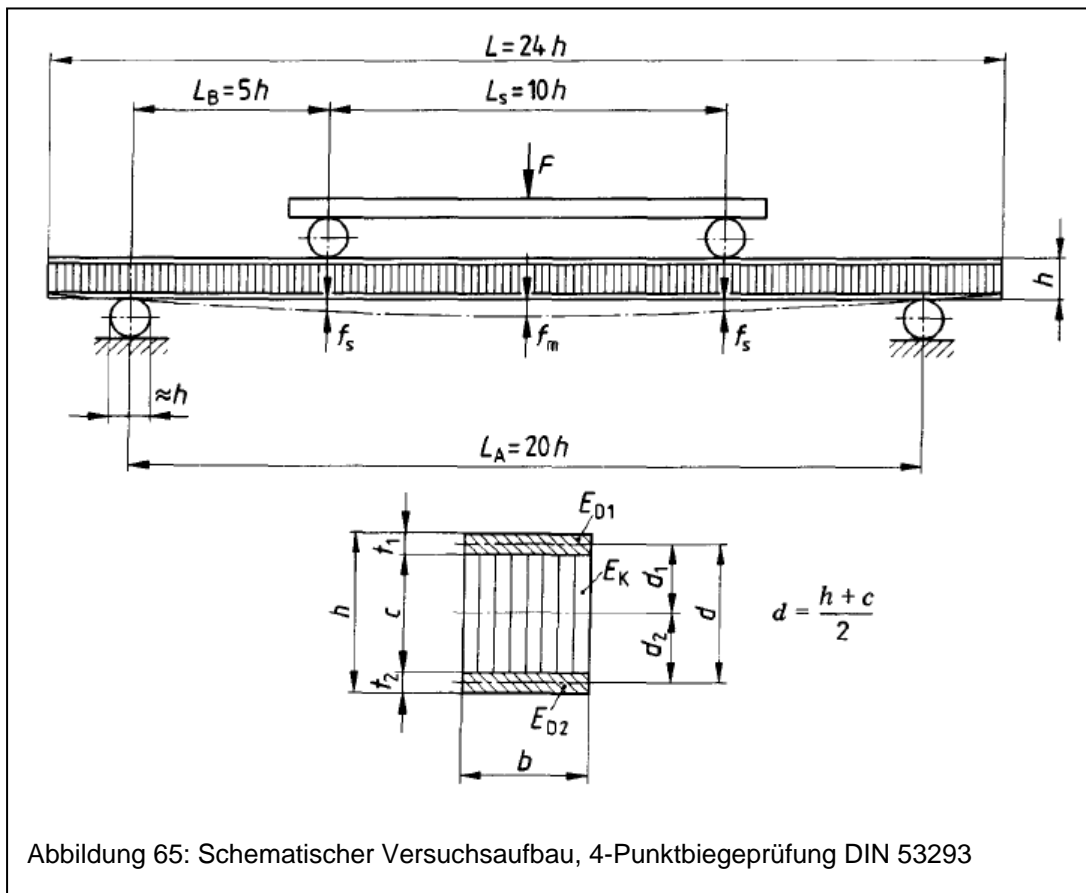
Abbildung 64: Zugproben (Decklage) nach dem Ziehen

Zusammenfassung:

Die Festigkeit des Schaumkerns fällt in Dickenrichtung wesentlich geringer aus und wird stark von dem Aufschäumprozess beeinflusst. Durch die hohen Temperaturen von ca. 600 °C und die Dauer des Aufschäumprozesses werden die Zellwände zum Teil geschädigt und es kann zu Schwankungen der Eigenschaften kommen. Dementsprechend zeigte der Schaumkern ein inhomogenes Werkstoffverhalten. Die Decklagen weisen eine wesentlich verringerte Festigkeit auf gegenüber handelsüblichen Blechen gleicher Legierung. Dies spricht für einen undefinierten Werkstoffzustand der sich aus der langen Temperaturführung in der Herstellung ergibt

6.1.2 4-Punkt Biegeprüfung I-Stoß

Um die späteren Lastniveaus für die schwingenden Untersuchungen fest zu legen wurden mit allen aus AFS gefertigten I-Stößen 4-Punktbiegeprüfungen durchgeführt. Es wurde nach der DIN 53293 „Prüfung von Kernverbänden – Biegeversuch“ geprüft. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abbildung 65 dargestellt.



Nach Norm ergeben sich folgende Maße durch die Sandwichdicke $D = h = 12 \text{ mm}$ für die Abstände und Abmessungen:

- Mindestbreite $b > 2,5 \times h$, gewählt $b = 120 \text{ mm}$
- Auflagerabstand von $L_A = 240 \text{ mm}$
- Stempelabstand von $L_S = 120 \text{ mm}$
- Durchmesser der „Rollen“ zwischen $d = 0,5 - 1,5 \times h$, gewählt 12 mm

Durch Vorversuche konnte erwiesen werden, dass der gewählte Durchmesser der Rollen keine Druckstellen der Stempel an den relativ weichen Decklagen entstehen ließ. Diese Untersuchungen wurden an einer servo-hydraulischen Prüfmaschine durchgeführt. Es wurden der Zylinderweg sowie die auftretende Kraft erfasst, Abb. 66.



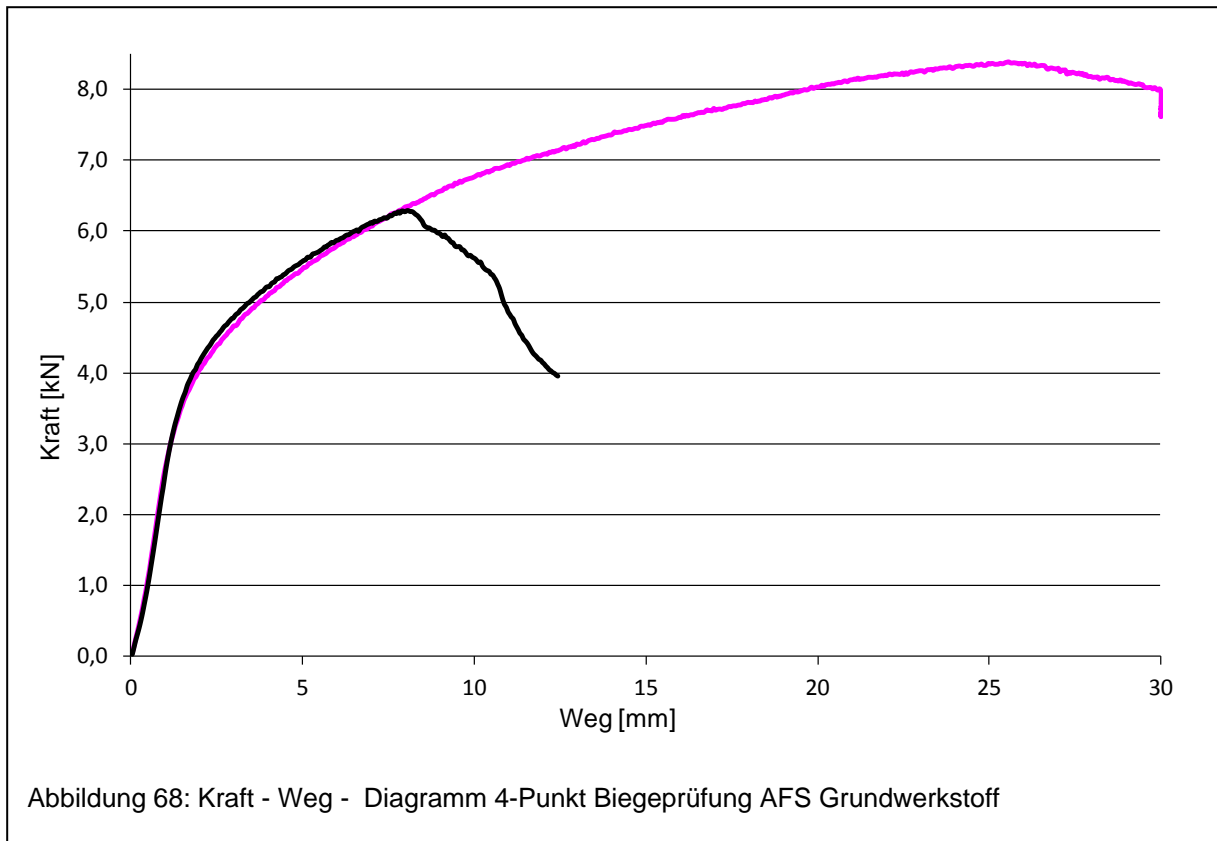
Abbildung 66: Versuchsaufbau 4-Punktbiegeprüfung

Als Referenz dienten hier Proben aus dem Grundwerkstoff. Wie zu erwarten zeigten die Proben ein Versagen in dem Bereich zwischen den Stempeln und den Auflagern in Form einer Schaum Ablösung sowie eines Knickens der Decklagen. Abb. 67. Je nach Ausprägung des Schaumes trat das Einknicken der Decklage nach Erreichen der Maxi-

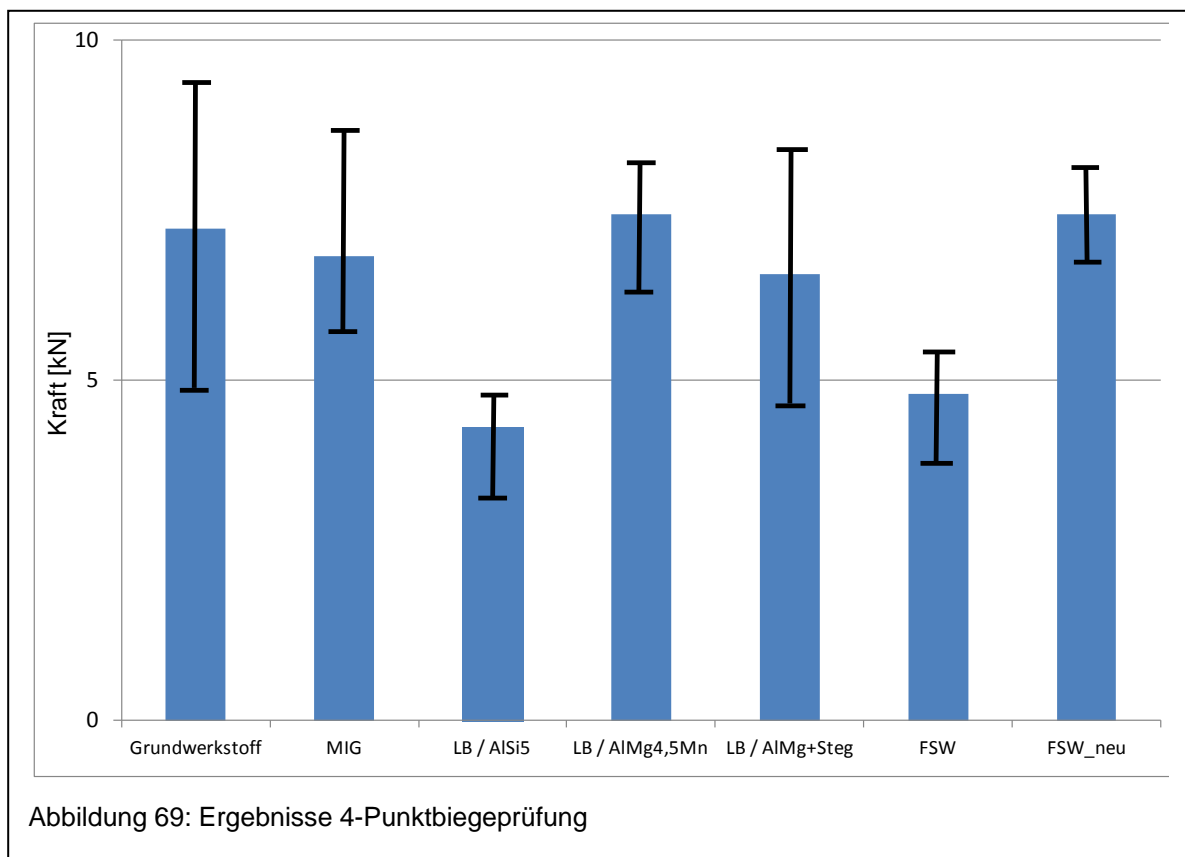


Abbildung 67: Versagen am Schaum; 4-Punktbiegeprüfung

malkraft ein oder bei einer großflächigen Fehlstelle gleichzeitig und zeigte sich durch deutliche Druckspuren an der oberen Decklage. Exemplarisch sind Ergebnisse von Grundwerkstoffproben in Abbildung 68 dargestellt, der Einfluss von Fehlstellen im Schaum wird durch das frühzeitige Versagen deutlich.



Einen Überblick über die maximal erreichten Kräfte zeigt Abb. 69.



Der Grundwerkstoff zeigte bei diesen Untersuchungen eine sehr große Schwankung in den Ergebnissen, was wiederum den unterschiedlichen Qualitäten des Schaums geschuldet ist. Die MIG Schweißnähte zeigten das gleiche Versagensverhalten wie der Grundwerkstoff, abhängig von dem Schaum. Es trat kein Versagen in den Schweißnähten auf.

Bei den Laserstrahlschweißnähten zeigten die Proben mit AISi5 geschweißt ein Versagen in der Schweißnaht, (Abb. 70 oben). Die Proben mit dem Zusatz AlMg4,5Mn zeigten das gleiche Verhalten wie der Grundwerkstoff. Allerdings versagten diese Proben frühzeitig bei den folgenden schwingenden Untersuchungen. Um wie in Kap. 5 angesprochen, die Problematik mit dem Wurzelanriss zu umgehen, wurde der Steg eingesetzt. Diese mit dem Steg geschweißten Proben zeigten wiederum das gleiche Verhalten wie der Grundwerkstoff. Allerdings war in diesem Fall die Streuungen aufgrund der Sandwichqualität größer, (Abb. 70 unten).

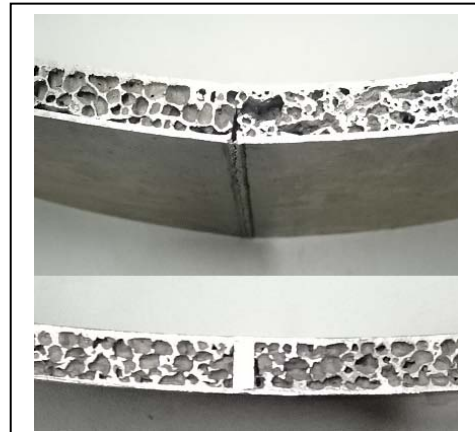


Abbildung 70: 4-Punkt Prüfung von AFS Laserstahl geschweißt.; Zusatz AISi5, oben; mit Steg, unten

Bei den FSW-geschweißten Verbindungen zeigte sich bei den ersten Untersuchungen ein frühzeitiges Versagen direkt neben dem Inlay (vgl. Abb. 59). Abbildung 71 zeigt eine FSW-Schweißnaht, die ein Versagen in der Schweißnaht zeigt. Dies konnte durch die Schwächung der Decklage beim Schweißen entstehen. Durch die Anpassung der Parameter auf die jeweilige Dicke des AFS sowie den Einsatz eines abgerundeten Inlays konnte diese Versagensart ausgeschlossen werden und die Kraftwerte verbesserten sich erheblich.



Abbildung 71: Versagen FSW-Naht statisch

6.1.3 T-Stoßprüfung

Die Prüfung der T-Stoßverbindungen erfolgte an der gleichen Prüfmaschine. Es musste dafür eine Prüfvorrichtung angepasst werden. In Abb. 72 ist der Prüfaufbau dargestellt. Dabei kamen Teile der Prüfvorrichtung zum Einsatz, welche für die schwingende Prüfung konstruiert werden musste und im nächsten Kapitel ausführlich beschrieben ist.

Der Stempel war drehbar gelagert sowie auch die die beiden Auflager des Grundbleches. Es wurden zwei unterschiedliche Einspannweiten untersucht. In Abbildung 72 ist die Einspannung mit einem Auflagerabstand von 360 mm zu sehen,

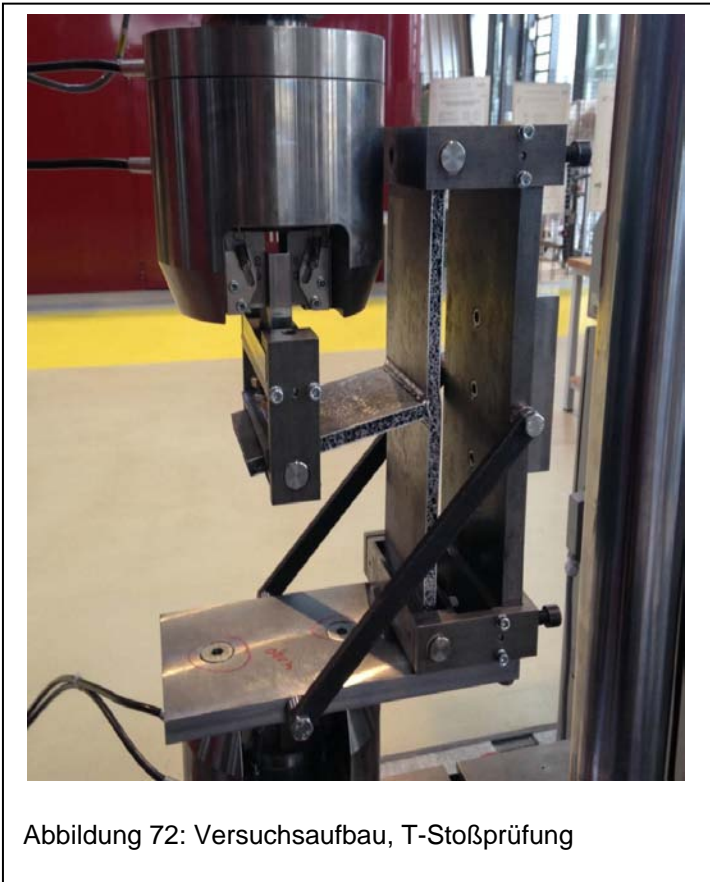
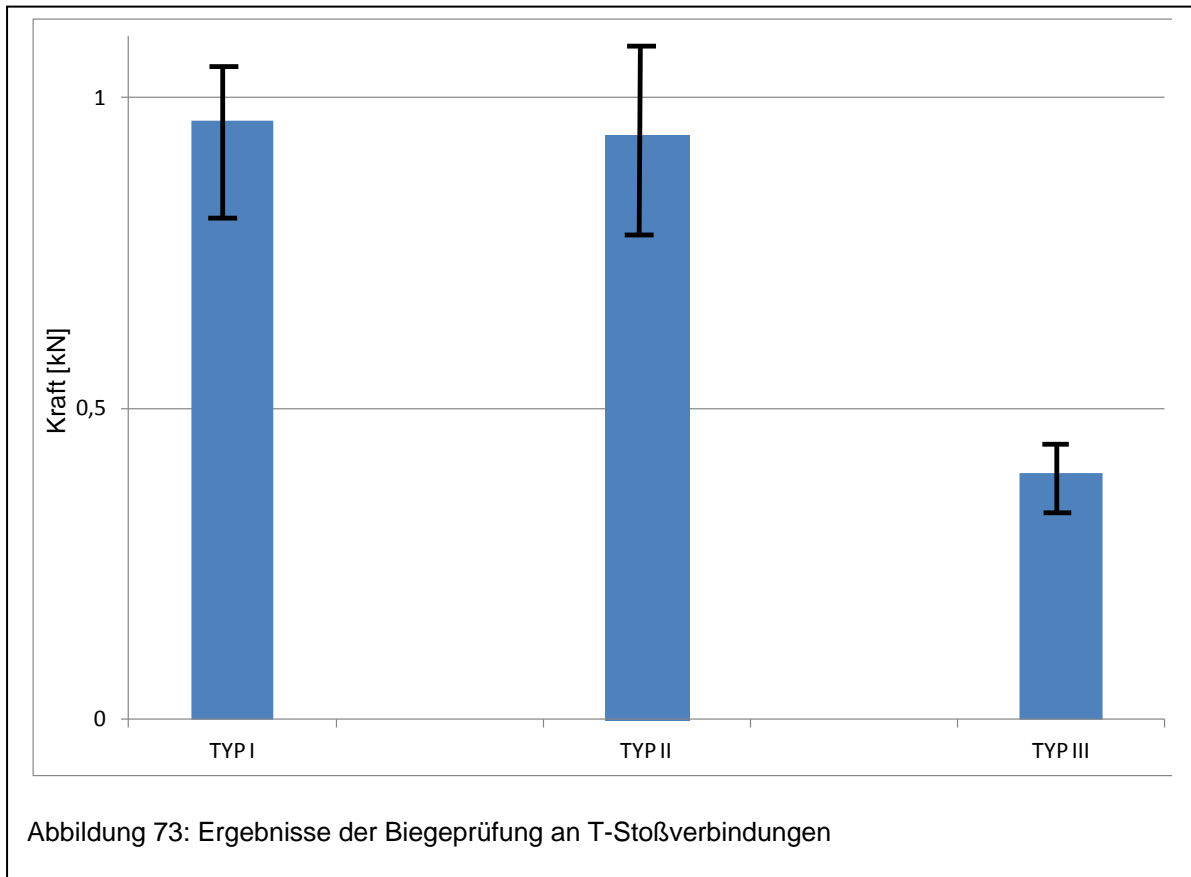
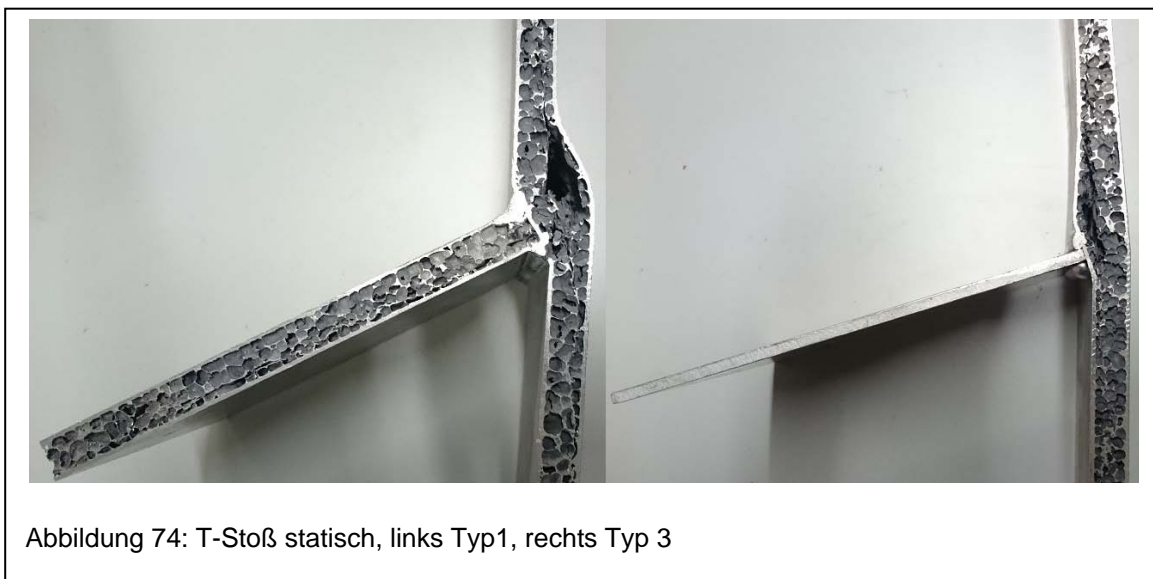


Abbildung 72: Versuchsaufbau, T-Stoßprüfung

es wurde auch eine Einspannweite von 80 mm untersucht. Zur Prüfung wurden 3 Probentypen eingesetzt. Probentyp 1 und 2 hatten einen Steg aus AFS (s. Kap 5.1.4), Probentyp 1 wurde mit einer Einspannung von 360 mm, Probentyp 2 mit einer Einspannung von 80 mm untersucht. Probentyp 3 hatte als Steg ein 4 mm Aluminiumblech (s. Kap 5.1.5). Die Einspannung betrug hierbei 360 mm. Der Abstand des Stempels, Drehpunkt zur Sandwichoberfläche, wurde bei allen Versuchen bei 120 mm belassen. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung 73 dargestellt.



Es ließ sich eine deutliche Schwankung zwischen den einzelnen Ergebnissen feststellen. Da bei dieser Art der Konstruktion nur die obere Decklage tragend ist, auf welcher der Steg befestigt ist, kommt hier nur die Steifigkeit des Schaumes zum Tragen. In Abbildung 74 sind zwei charakteristische Proben nach den Untersuchungen abgebildet.



Es ist deutlich zu erkennen, wie der Schaum bei dieser Art der Belastung nachgegeben hat. Die Proben des Typ 3 zeigten generell eine geringere Festigkeit, da hier der Bereich der eingebundenen Decklage wesentlich schmaler war gegen-

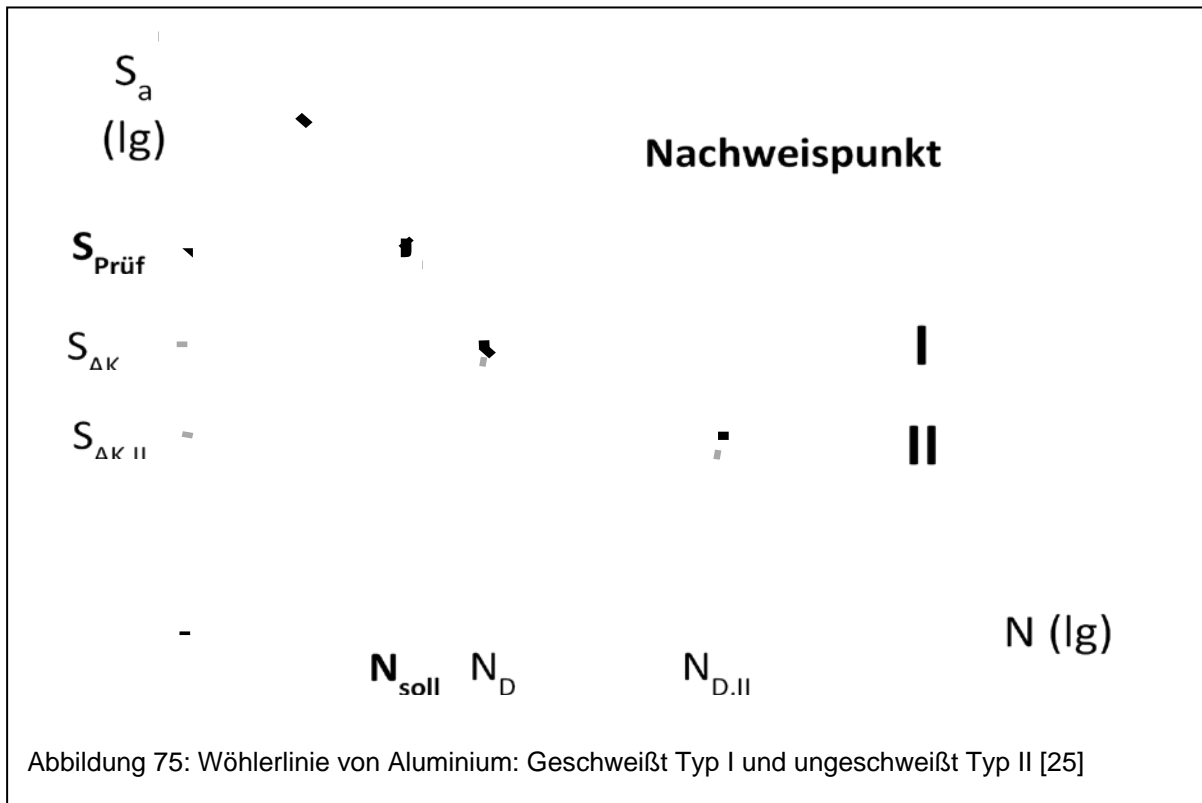
über den Stegen aus AFS. Auch die Verformung der Gegen Decklage war hierbei wesentlich geringer ausgeprägt. Um eine höhere Steifigkeit zu erreichen muss die Gegendecklage angebunden werden.

Zusammenfassung:

Die MSG-geschweißten Verbindungen versagten im Übergang von der Schweißnaht in den Grundwerkstoff. Die höhere Festigkeit gegenüber dem Grundwerkstoff ergibt sich aus der durchgehend hohen Qualität der verwendeten Schweißprobekörper. Die LB-geschweißten Proben versagten alle in der Schweißnaht. Bei den FSW-geschweißten Proben kam es zu einem Versagen entlang der Rührreibschweißnaht, direkt neben der Schulterlaufbahn. Das ist wie oben bereits erwähnt mit Einsatz eines Inlays (Notwendigkeit der Abstützung der Schweißnaht gegenüber dem Rührreib-Werkzeug) zu erklären. Bei der späteren Verwendung von abgerundeten Inlays fielen die erreichten Werte wesentlich besser aus. Die höhere Festigkeit gegenüber dem Grundwerkstoff ergibt sich hier ebenfalls aus der durchgehend hohen Qualität der verwendeten Probekörper. Zudem konnten mit Hilfe der statischen Untersuchungen zum einen schon Verbesserungen für die Gestaltung der Fügeknöten entwickelt werden, speziell bei den Laserstrahlschweißnähten, zum anderen auch die Kraftbereiche festgelegt werden in denen eine schwingende Prüfung stattfinden sollte. Es konnten die Schwächen des AFS ermittelt werden sowie die Grundwerkstoffdaten, wie Festigkeit der Decklagen, und des Schaumes ermittelt werden, welche später für die Simulation des Sandwiches genutzt werden konnten, s. Kap. 7.

6.2 Dauerfestigkeitsuntersuchungen

Der Nachweis der Schwingfestigkeit sollte mittels eines Punktes auf der Wöhlerlinie erfolgen. Die vorgesehenen Proben sollten bis zum Versagen einer Kraft ausgesetzt werden, welche laut der Berechnungen durchschnittlich 10^5 Lastspielen entspricht. Mit dieser Untersuchung sollte überprüft werden, ob die Wöhlerlinie (Abb. 75) für Aluminiumschaumsandwich angewendet werden kann.



Die Belastungsart war wechselnde 4-Punkt-Biegung in Anlehnung an die DIN 53293. Dafür musste eine geeignete Vorrichtung konstruiert und angefertigt werden (s. Abb. 65)

Für die rechnerische Abschätzung der Prüflast zum Erreichen der geplanten Zielschwingenspielzahl von $N = 10^5$ werden folgende Festlegungen getroffen:

Breite der Probe:	$b = 120 \text{ mm};$
Decklagendicke:	$t_1 = t_2 = t = 1 \text{ mm};$
Mittlere Dicke des Sandwich:	$d_1 = d_2; d = 11 \text{ mm};$
Gesamthöhe:	$h = 12 \text{ mm};$
Abstand zwischen Stempel und Auflager:	$L_B = 120 \text{ mm};$
Abstand zwischen den Auflagern:	$L_A = 360 \text{ mm}$
Abstand zwischen den Stempeln:	$L_S = 120 \text{ mm}$
Angenommene FAT-Klasse:	36

Die Geplante FAT Klasse von 36 ergab sich aus Anlehnung an das Details 212 aus der FKM Richtlinie, Abb. 76.

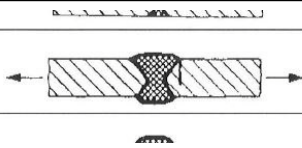
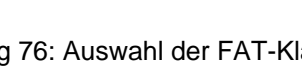
212		bearbeitet, 100 % zfP (zfP = zerstörungsfreie Prüfung) **	90	36
212		Querbelastete Stumpfnah	90	

Abbildung 76: Auswahl der FAT-Klasse [25]

Im Vorfeld mussten folgende rechnerische Aufgaben bestimmt werden:

- 1) Wie hoch muss die Spannungsamplitude sein, damit die Probe voraussichtlich nach 100000 Spielen versagt?
- 2) Wie hoch müssen die entsprechende Kräfte sein?

6.2.1 Ermittlung der Spannungsamplituden I-Stoß

6.2.1.1 Spannungsamplitude für AFS ungeschweißt

Die Zugfestigkeit der Deckbleche des Aluminiumschaumsandwich beträgt $\sigma_{zd}=180$ MPa, Kap 6.1. Der Wechselfestigkeitsfaktor von Aluminium (bei normalen Spannungen) ist $f_W = 0,3$. Damit ergibt sich Wechselfestigkeit von Aluminium:

$$\sigma_W = \sigma_{zd} \cdot f_W = 180 \cdot 0,3 = 54 \text{ MPa} \quad (1)$$

Der Konstruktionsfaktor (keine Kerbwirkung, keine Rauheitswirkung, keine Rand-schichtverfestigung) ist $K_{WK} = 1$. Die Wechselfestigkeit vom Bauteil ergibt sich durch:

$$S_W = \sigma_W / K_{WK} = 54 / 1 = 54 \text{ MPa} \quad (2)$$

Entsprechend der Aufgabe ist die Belastungsart wechselnd, das heißt, dass die Mittelspannung gleich 0 ist. Deswegen ist das Mittelspannungsfaktor $K_{AK} = 1$. Das Bauteil hat keine Schweißnaht, das heißt, dass der Eigenspannungsfaktor $K_E = 1$. Die Dauerfestigkeit ist in diesem Fall:

$$S_{AK} = S_W \cdot K_{AK} \cdot K_E = 54 \cdot 1 \cdot 1 = 54 \text{ MPa} \quad (3)$$

Die Lastspielzahl muss in diesem Experiment voraussichtlich $N = 10^5$ sein. Diese Zahl befindet sich vor dem Abknickpunkt der Wöhlerlinie ($N_{D1} = 10^6$). Deshalb, weil die Neigung der Wöhlerlinie $k=5$ ist (Bild 3.1), wird der Betriebsfestigkeitsfaktor so ermittelt:

$$K_{BK} = \left(\frac{N_d}{N} \right)^{1/k} = \left(\frac{10^6}{10^5} \right)^{1/5} = 1,6 \quad (4)$$

und die Betriebsfestigkeit:

$$S_{BK} = S_{AK} \cdot K_{BK} = 54 \cdot 1,6 = 86 \text{ MPa} \quad (5)$$

Das heißt, dass die Spannungsamplitude für Aluminiumschaumsandwich ohne Schweißnaht in diesem Fall 86 MPa betragen musste.

6.2.1.2 Spannungsamplitude für AFS geschweißt

Die Bauteilwechselfestigkeit (bei normalen Spannungen) S_{WK} ergibt sich aus Formel (6). Der Randschichtfaktor (bei der Abwesenheit der Randschichtverfestigung) ist $K_V = 1$. Der Dickenfaktor ist auch $f_t = 1$ (für ein plattenförmiges Bauteil), der Umrechnungsfaktor ergibt sich zu $f_{FAT} = 0,3684$. Die FAT-Klasse der Naht ist 36 (Abb. 70).

$$S_{WK,\perp} = FAT_{\perp} \cdot f_{FAT,\sigma} \cdot f_t \cdot K_V \quad (6)$$

$$S_{WK,\perp} = 36 \cdot 0,3684 \cdot 1 \cdot 1 = 13,3 \text{ MPa}$$

Bei einem mittleren Niveau der Eigenspannungen (ohne Nachbearbeitung der Schweißnaht) ist $K_E = 1,26$. Damit ergibt sich Dauerfestigkeit S_{AK} durch:

$$S_{AK} = S_{KW} \cdot K_{AK} \cdot K_E = 13,3 \cdot 1 \cdot 1,26 = 16,7 \text{ MPa} \quad (7)$$

Analog zu ungeschweißten Aluminiumschaumsandwiches (Neigung – 3, Abknickpunkt – $5 \cdot 10^6$) ergibt sich Betriebsfestigkeit durch:

$$K_{BK} = \left(\frac{N_d}{N}\right)^{1/k} = \left(\frac{5 \cdot 10^6}{10^5}\right)^{1/3} = 3,68 \quad (8)$$

$$S_{BK} = S_{AK} \cdot K_{BK} = 16,7 \cdot 3,68 = 61,5 \text{ MPa} \quad (9)$$

Das Ergebnis: Die Spannungsamplitude muss für Aluminiumschaumsandwich mit Schweißnaht 61,5 MPa betragen.

6.2.2 Ermittlung der Kräfte

Nach DIN 53293 „Biegeversuch: Prüfung von Kernverbunden“ hängen die verwendete Kraft und die maximale Spannung der Deckschicht folgendermaßen zusammen:

$$\sigma = \frac{M \cdot h}{2J} \quad (10)$$

Die Biegevorrichtung und die verwendeten geometrischen Parameter sind auf dem Abb. 60 dargestellt (in unserem Fall: $t_1=t_2=t$; $d_1=d_2=d/2$).

Dabei ist das Biegemoment:

$$M = \frac{F \cdot L_b}{2} \quad (11)$$

und das Trägheitsmoment:

$$J = \frac{b \cdot t \cdot d^2}{2} \quad (12)$$

Werden die Formeln 12-14 zusammengefasst, ergibt sich die Belastung F durch:

$$F = \frac{2\sigma \cdot b \cdot t \cdot d^2}{L_b \cdot h} \quad (13)$$

Danach ergeben sich mit Hilfe der Formel 15 die Kräfte, die den ermittelten Spannungsamplituden entsprechen, durch:

Mit Schweißnaht: $F_s = 1,24$ kN.

Ohne Schweißnaht: $F_u = 1,73$ kN.

Die Berechnete Kraftamplitude entspricht einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5%. Wenn die entsprechende Zyklenzahl 10^5 durchschnittlich erreicht werden soll, muss diese auf 50% umgerechnet werden [25].

$$S = \frac{S_{50\%}}{j_{n,S}}; \Rightarrow S_{50\%} = S \cdot j_{n,S} \quad (14)$$

wobei

$$j_{n,S} = 10^{\left(2 + \frac{1}{\sqrt{n}}\right) \cdot LSD}; \quad (15)$$

$S_{50\%}$ – Geometrischer Mittelwert der Experimentell bestimmten Spannungswerte S_i ;

$j_{n,S}$ – Statistischer Umrechnungsfaktor;

n – Anzahl der Einzelversuche;

LSD – Logarithmische Standardabweichung (0,04 für nichtgeschweißte Bauteile, 0,06 für geschweißte Bauteile) [25].

Der Umrechnungsfaktor für geschweißte Bauteile ist

$$j_{n,S,g} = 1,253;$$

und für ungeschweißte Bauteile

$$j_{n,S,u} = 1,402.$$

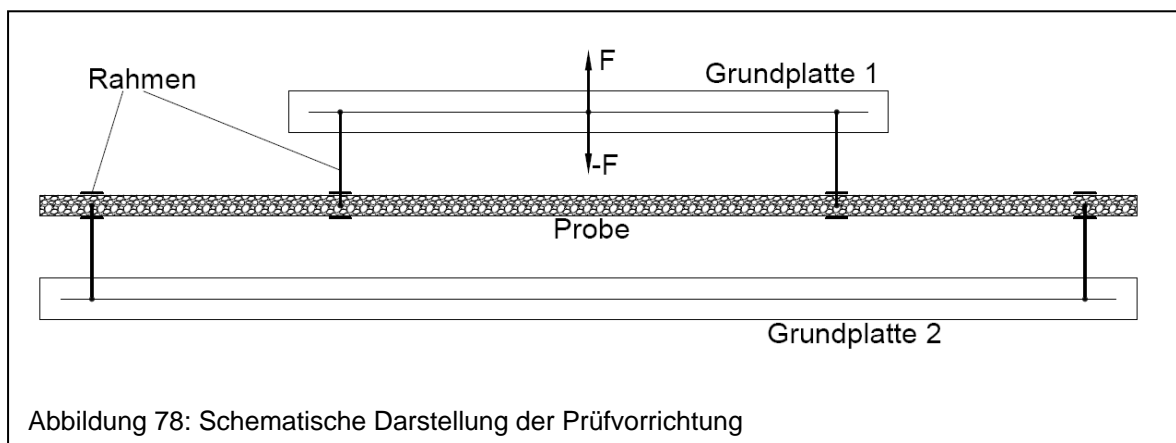
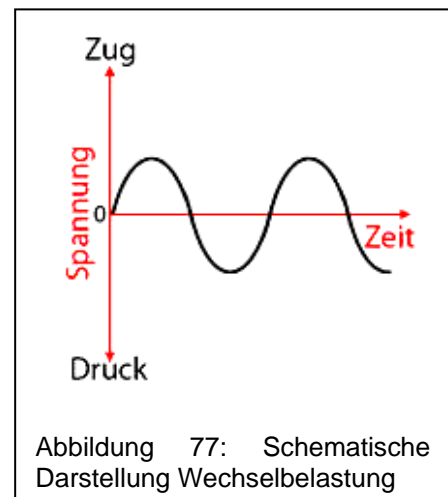
Da die Kraft proportional der Spannung ist, kann man den Umrechnungsfaktor auch für die Kraftumrechnung einsetzen. Somit ergeben sich die umgerechneten Kraftwerte zu:

$$\text{Mit Schweißnaht: } F_{s, 50\%} = 1,9 \text{ kN.}$$

$$\text{Ohne Schweißnaht: } F_{u, 50\%} = 2,2 \text{ kN.}$$

6.2.3 Konstruktion der Prüfvorrichtung

Zur Prüfung der Bauteile war eine wechselnde Beanspruchung $R = -1$ geplant Abb. 77. Da die Richtung der Kräfte sich wechseln, muss die in DIN 53293 vorgeschlagene Vorrichtung (s. Abb. 65) erweitert werden. Die Belastung kann in diesem Fall nur einseitig wirken. Dementsprechend musste die Konstruktion so geändert werden, dass die Probe beidseitig gespannt ist. Eine schematische Zeichnung der Konstruktion wird in Abb. 78 dargestellt. Um die Kräfte in beide Richtungen einwirken zu lassen, wurde die Probe in drehbaren Rahmen gespannt, welches zudem auch verschiebbar für andere Prüfweiten sein sollten.



Der Rahmen war so ausgelegt, dass die Probe mittels Blechen fixiert werden konnte. Dementsprechend war auch so eine Höhenkorrektur möglich. In Abb. 79 oben ist die Zeichnung der Prüfvorrichtung dargestellt unten im eingebauten Zustand.

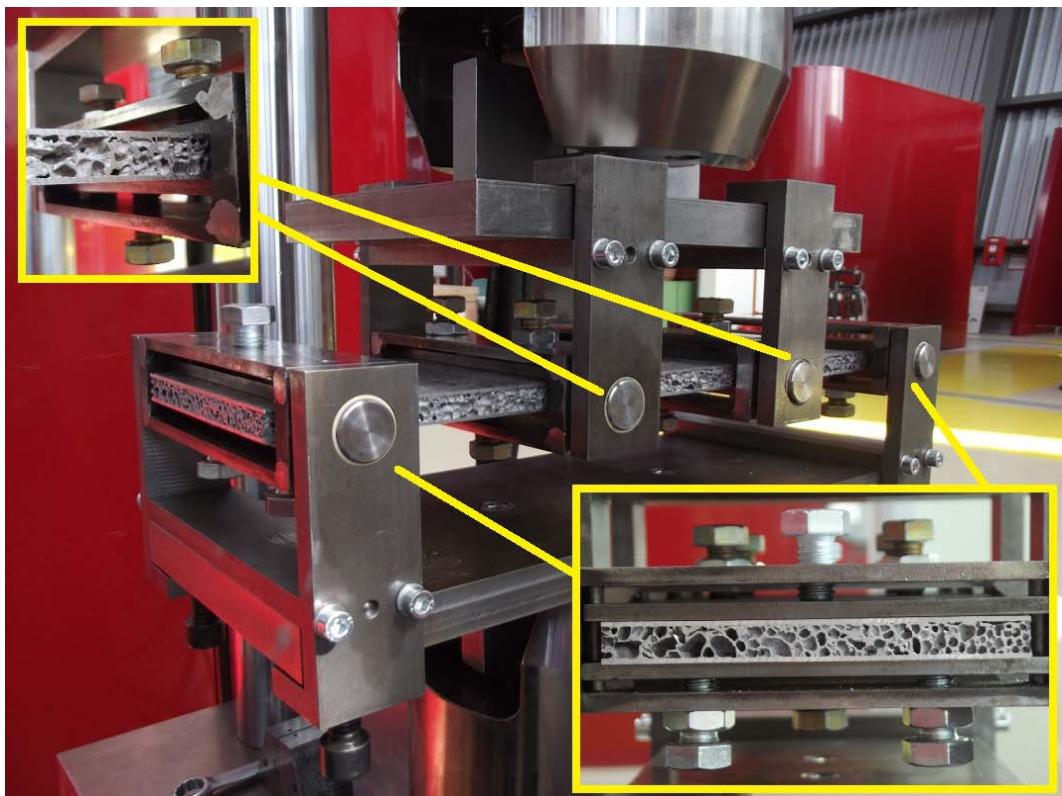
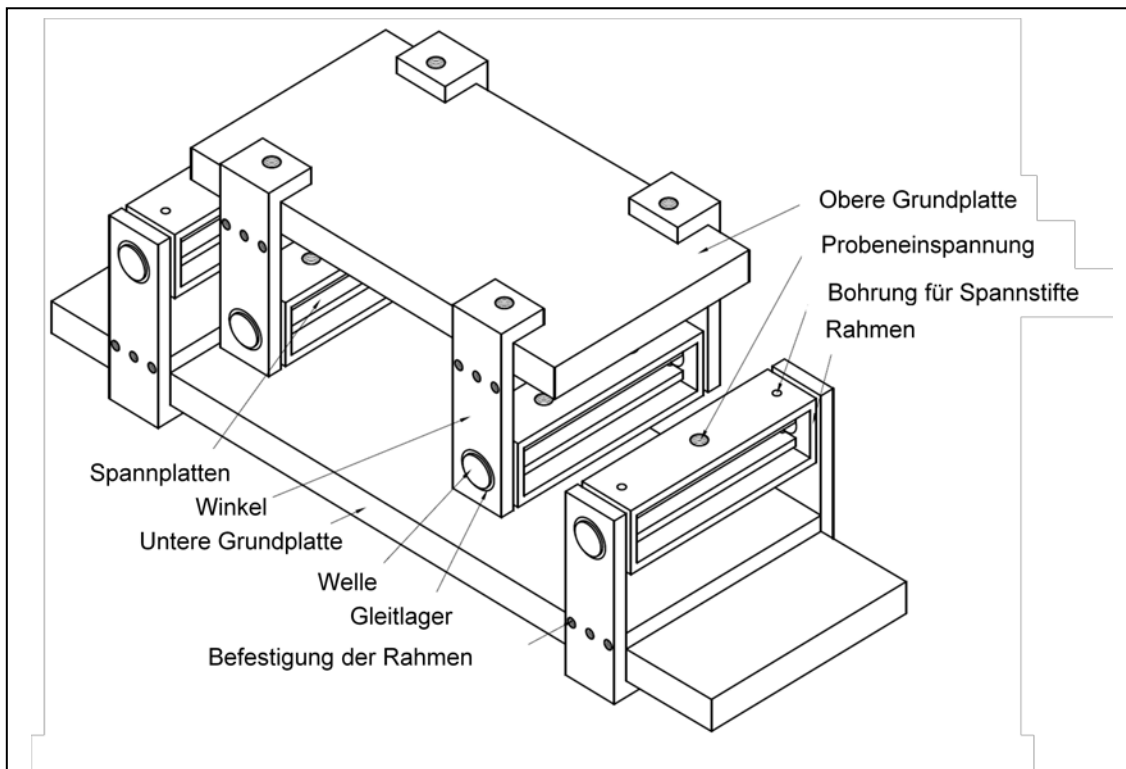


Abbildung 79: Aufbau der Prüfvorrichtung

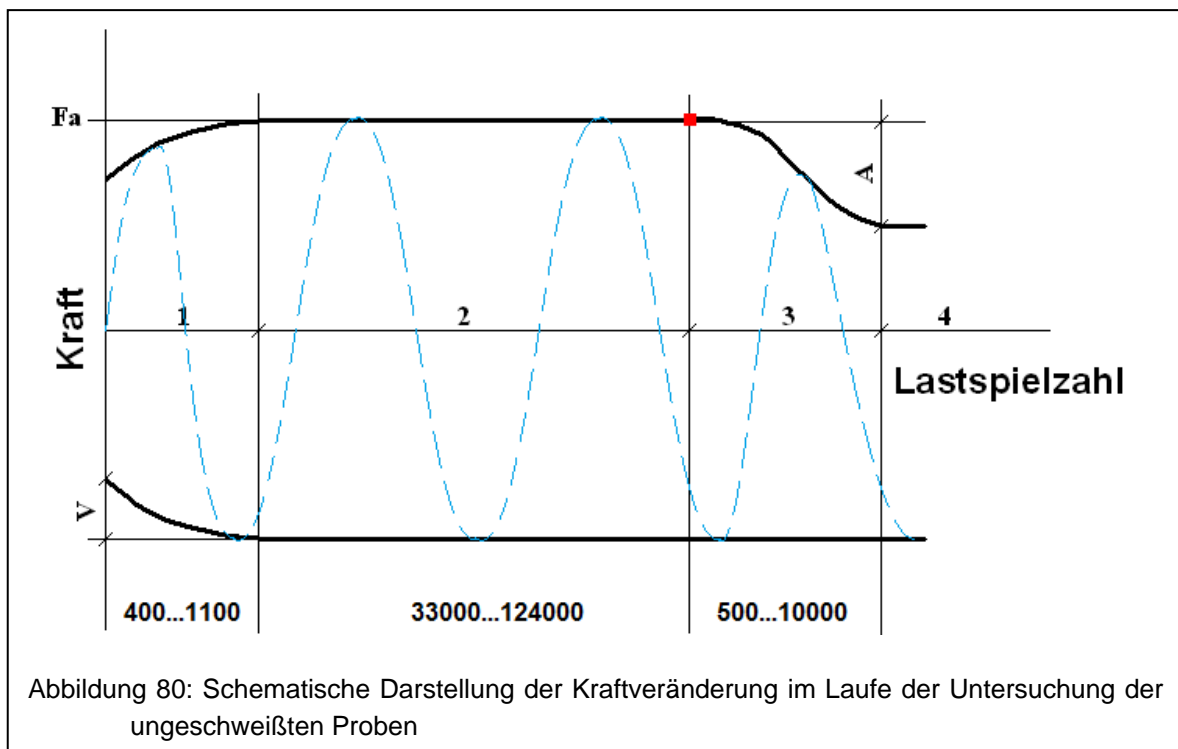
Der Rahmen zur Einspannung wurde als Schweißkonstruktion gefertigt und die Drehbewegung wurde mittels Gleitlager ermöglicht. Um in die Prüfmaschine eingebaut werden zu können, wurden die Grundplatten jeweils um einen geschraubten Steg erweitert. Sämtliche Schraubverbindungen mussten mit Schraubensicherung fixiert werden, da sich diese im Zuge der Prüfung lösen konnten.

Die Versuche wurden mit einer Prüffrequenz von 5 Hz weggeregelt durchgeführt. Um den notwendigen Amplitudenweg zu ermitteln, wurde auf die Ergebnisse der 4-Punkt Biegeprüfung zurückgegriffen.

6.2.4 Werkstoffverhalten

6.2.4.1 Verhalten des Grundwerkstoffes

Vor der der Prüfung der geschweißten Verbindungen wurden 5 Grundwerkstoffproben aus AFS mit der Kraftamplitude 2,2 kN untersucht. Es zeigte sich, dass die Kraftveränderung im Laufe des Versuches folgendes Schema mit unterschiedlichen Verhaltensweisen aufwies. Abb. 80:



Die unterschiedlichen Bereiche 1-4 aus Abb. 82 werden nachfolgend beschrieben:

1) Verfestigungszone

Die Verfestigung der Probe erfolgte dadurch, dass die während des Versuches entstehenden Spannungen nah der Streckgrenze des Werkstoffes waren. Dadurch könnte ein geringer Anteil plastischer Verformung entstanden sein, der zu Verfestigung der Probe führte. Die Verfestigungszone erstreckte sich von 400 bis 1100 Zyklen und die resultierende Verfestigung V machte von 10 bis 20% der maximalen Prüfkraft aus.

2) Zone der konstanten Kraftamplitude

Die Zone der konstanten Kraftamplitude blieb von etwa 60000 bis 125000 Zyklen je nach Probe auf dem Niveau $\pm 2,2$ kN. In dieser Zone erfolgte die Schadensak-

kumulation bis zum Moment der Rissentstehung. Das Ende dieser Zone zeigte als Ergebnis des Versuches, wie viele Lastspiele die Probe ertragen hatte.

3) Kraftabfallszone

In der Kraftabfallszone geht der Rissfortschritt von der Entstehung weiter. Der Riss entwickelt sich, wenn die eingestellte Durchbiegung ausreicht, die Risse auszuweiten. Diese Zone kann sowohl wenige Lastwechsel kurz sein, als auch bis zu 10000 Lastspiele lang sein - falls sich der Riss unter einer Einspannung befand, welche den Rissfortschritt behinderte. Die Höhe des Abfalls A kann auch unterschiedlich sein - von 40 bis 100% des Anfangswerts. Der Kraftabfall ist normalerweise einseitig, da sich die Probe in die Richtung leichter biegen lässt, welche den Riss aufweist.

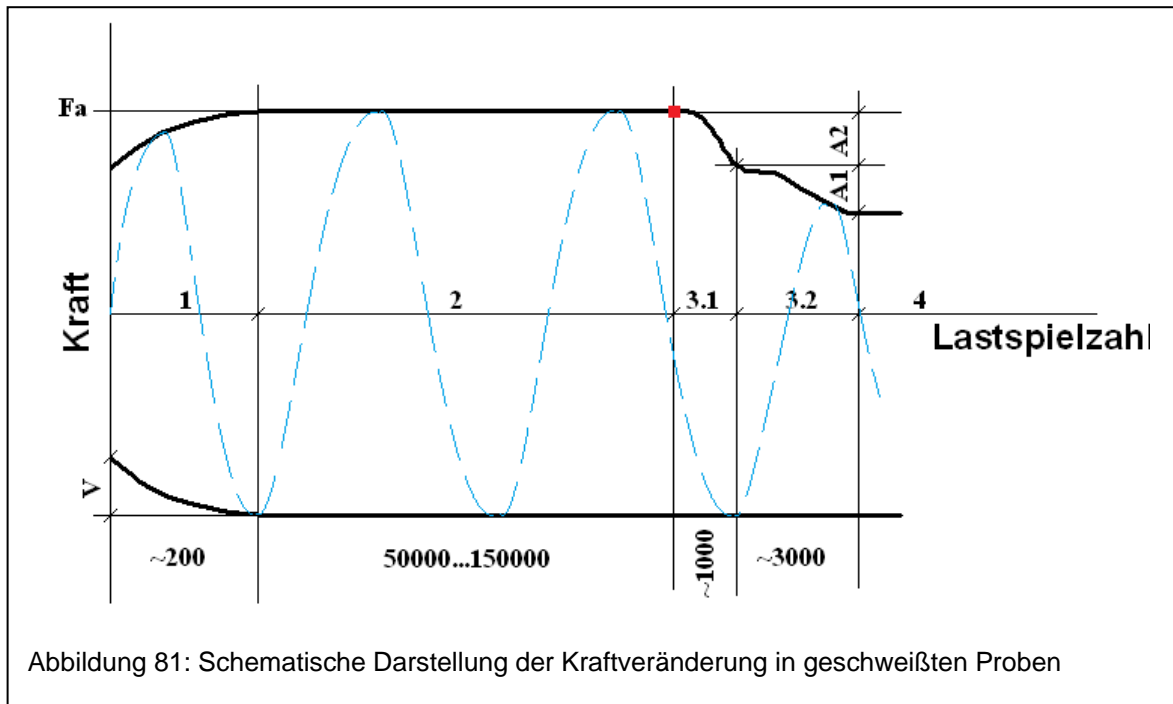
4) Die Zone des stabilen Risses

Der Rissfortschritt wird dann stabil, wenn die Länge so hoch ist, dass sich das Aluminiumschaumsandwich bei der entsprechenden Durchbiegung ohne die weitere Zerstörung des Werkstoffes verformen kann.

6.2.4.2 Verhalten der geschweißten Proben

Um das Verhalten der I-Stoß-Schweißverbindungen unter schwingender Belastung zu untersuchen, wurden mehrere Proben, die mit MSG, FSW und Laserstrahl geschweißt waren, mit einer Kraftamplitude von 1,9 kN geprüft.

Die Kraftveränderung während der Dauerfestigkeitsuntersuchung von geschweißten Aluminiumschaumsandwiches ist den ungeschweißten Proben ähnlich, Abb. 81.



Allerdings gibt es die folgenden Unterschiede in den einzelnen Bereichen:

1) Die Verfestigungszone

Da die eingestellte Spannungsamplitude resultierend aus dem geregelten Weg bei den geschweißten Proben bedeutend niedriger ist, ist der plastische Anteil der Werkstoffverformung auch geringer. Es zeigte sich eine kürzere und schwächere Phase der Werkstoffverfestigung zum Beginn der Prüfung. Der Kraftanstieg V betrug nicht mehr als 8% und erstreckte sich im Mittel auf 200 Lastspiele.

2) Zone der konstanten Kraftamplitude

In der Zone der konstanten Kraftamplitude gab es eine größere Streuung der maximalen Lastspiele zwischen den Proben z.B. von 30000 bis 150000 im Falle der MSG-Schweißnähte. In diesem Fall wurde die Streuung von der Nahtform beeinflusst, die insbesondere bei den MSG-Nähten nicht gleichmäßig ausgeprägt war.

3-4) Kraftabfallszone und die Zone des stabilen Risses

Das Verhalten einer geschweißten Probe nach der Rissentstehung hat eine Besonderheit, dass die dritte Zone zweistufig sein konnte, Abb. 87. Die Ursache kann damit verbunden sein, dass die Rissentwicklung im Deckblech einer geschweißten Probe viel schneller ist, gegenüber im Schaumkern, weil die von der Schweißnaht verursachte technische Kerbe günstigere Bedingungen zum Rissfortschritt darstellt. Diesen rasanten Kraftabfall (bis 1000 Zyklen) sieht man als erste Stufe und das langsame Zerreißen des Schaumkerns als zweite. Bei den ungeschweißten Proben waren diese Stufen nicht zu erkennen, da die Rissgeschwindigkeiten im Deckblech und Schaum ähnlich hoch zueinander waren.

6.2.5 Ergebnisse Grundwerkstoff

Die Ergebnisse der einzelnen Proben aus AFS sind in der Tabelle 17 zusammengefasst:

Tabelle 17: Ergebnisse AFS-Grundwerkstoff

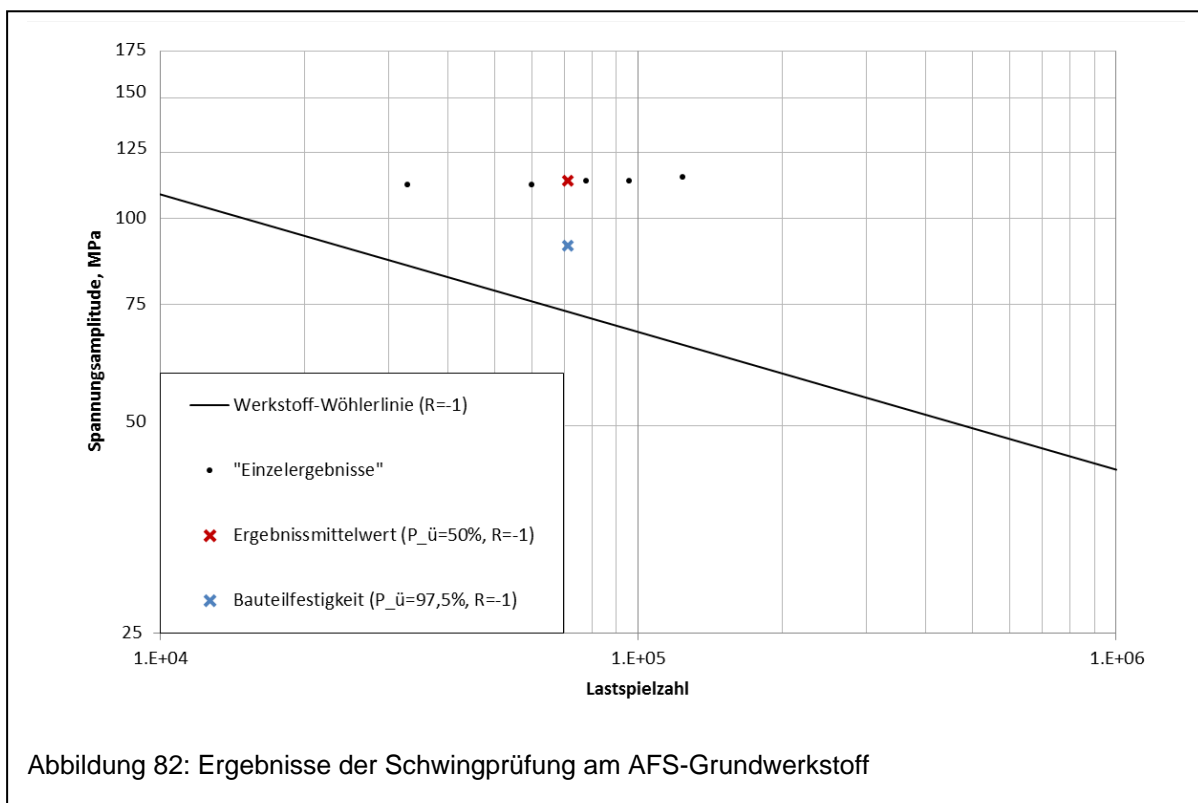
Probe №	Kraftamplitude in kN	Mittlere Dicke in mm	Spannungsamplitude in MPa	Lastspielzahl bis zum Versa- gen
6	2,4	12,5	113	78000
7	2,3	12,2	112	60000
8	2,2	11,5	115	124000
9	2,2	11,6	114	96000
10	2,3	12,2	112	33000
Mittelwert			113,1	71267

Alle Proben wurden mit der gleichen Wegamplitude geprüft. Die Ungleichmäßigkeit der Kraftamplitude wird dadurch erklärt, dass die Proben aufgrund der Herstellung unterschiedlich steif sein können, s. z.B. auch Kap 5.2.2.

Die Spannungsamplituden wurden mit folgende Formel 14 berechnet:

$$F = \frac{2\sigma \cdot b \cdot t \cdot d^2}{L_b \cdot h}; \Rightarrow \sigma = \frac{F \cdot L_b \cdot h}{2 \cdot b \cdot t \cdot d^2}$$

Die Ergebnisse wurden in dem folgenden Diagramm zusammengefasst und zum Vergleich die zugrundeliegende Wöhlerlinie dargestellt, Abb. 82.



Der ermittelte Mittelwert zeigt, dass 50% der Proben bei der Spannungsamplitude 113,1 MPa mehr als 71267 Zyklen ertragen hatten.

Damit die Lage des experimentell nachgewiesenen Punktes der Wöhlerlinie bestimmt werden kann wurde die Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 % auf 97,5 % umgerechnet (Formeln 14, 15) [25].

$$S = \frac{S_{50\%}}{j_{n,S}};$$

wobei

$$j_{n,S} = 10^{\left(2 + \frac{1}{\sqrt{n}}\right) \cdot LSD};$$

$S_{50\%}$ – Geometrischer Mittelwert der Experimentell bestimmten Spannungswerte S_i ;

$j_{n,S}$ – Statistischer Umrechnungsfaktor;

n – Anzahl der Einzelversuche;

LSD – Logarithmische Standardabweichung (0,04 für nichtgeschweißte Bauteile, 0,06 für geschweißte Bauteile) [25].

In diesem Fall ist der Umrechnungsfaktor

$$j_{n,S} = 1,253;$$

und die umgerechnete Spannungsamplitude

$$S = 113,1/1,253 = 90,3 \text{ MPa}$$

Das heißt, dass die experimentell bestimmte Wöhlerlinie über den Punkt (90 MPa; 71267 Zyklen) läuft.

Um diesen Wert mit dem vorläufig angenommenen Konzept (s. Kap. 6.2.1) zu vergleichen, soll die der Lastspielzahl 71267 entsprechende Spannungsamplitude nach o. g. Konzept analog berechnet werden (Formeln 5, 6):

$$K_{BK} = \left(\frac{N_d}{N}\right)^{1/k} = \left(\frac{10^6}{71267}\right)^{1/5} = 1,69;$$

$$S_{BK} = S_{AK} \cdot K_{BK} = 54 \cdot 1,66 = 91,6 \text{ MPa.}$$

Damit steht der Nachweis, dass der experimentelle Wert mit dem rechnerisch ermittelten Wert nahezu übereinstimmt (innerhalb der Genauigkeit der Berechnungen).

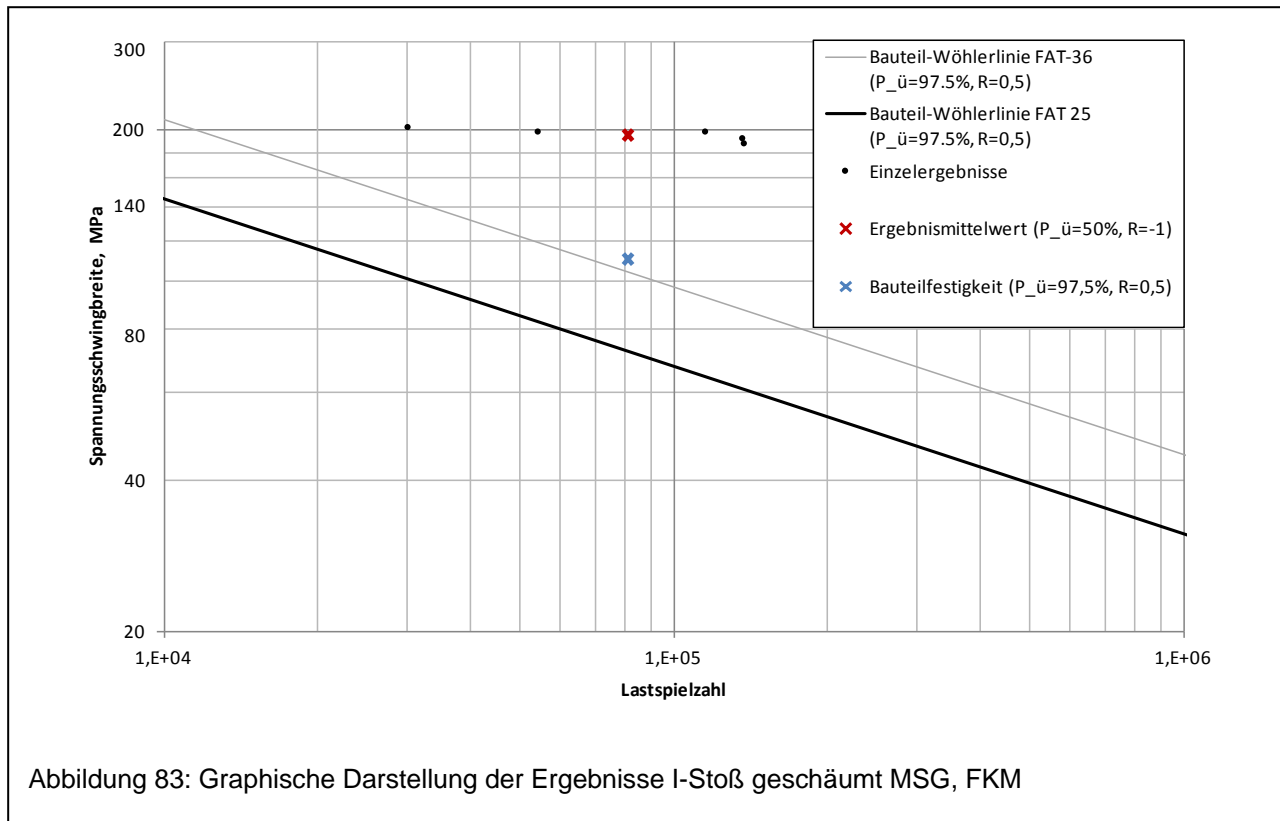
6.2.6 Ergebnisse für geschweißte Proben

Beispielhaft soll das Vorgehen an den MSG-geschweißten Proben dargestellt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 und Abb. 83 zusammengefasst. Weitere Ergebnisse sind dem Anhang B zu entnehmen.

Tabelle 18: Ergebnisse der Untersuchung von MSG-geschweißten Proben

Probe №	Kraftamplitude in kN	Mittlere Dicke in mm	Spannungsamplitude in MPa	Lastspielzahl bis zum Versa- gen
2	1,9	11,8	96	136000
3	1,9	11,5	99	54000
4	1,9	11,5	99	115000
5	2,1	12,3	101	30000
6	1,8	11,5	94	137000
Mittelwert			98	80927

Die Spannungsamplituden wurden wiederum nach der Formel 14 berechnet:



In der Abbildung sind die Ergebnisse ins Verhältnis zu der vermuteten Wöhlerlinie der FAT-Klasse 36 gesetzt und gemäß FKM [25] auf ein Spannungsverhältnis von $R = 0,5$ umgerechnet. Die erreichte Nahtqualität stimmte aufgrund der Nahtüberhöhung $> 0,1 \cdot \text{Dicke}$ und dem Nahtwinkel $> 50^\circ$, nicht mit der geforderten Nahtqualität aus FAT 36 überein, daher erfolgte hier eine abgesicherte Einstufung nach FAT 25.

Das Versagen fand direkt am Schweißnahtübergang zum Grundwerkstoff statt, Abb. 84.

Im Nachfolgenden sind die Ergebnisse der weiteren untersuchten I-Stoßverbindungen dargestellt



- I-Stoß Laserstrahlschweißung. Die Berechnung der Spannung über den Schweißnahtquerschnitt erfolgte mit einer effektiv wirkenden Schweißnahthöhe von 0,84 mm. Die Rissinitiierung trat an der Nahtwurzel der Laserstrahlschweißnaht auf, Abb. 85 und die Einordnung erfolgte in die Bauteilklasse FAT 12, Abb. 86.

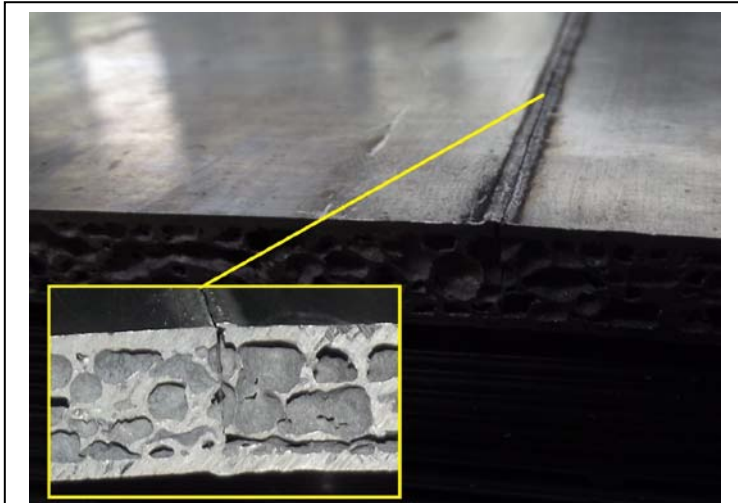


Abbildung 85: Riss an der Laserstrahlschweißnaht

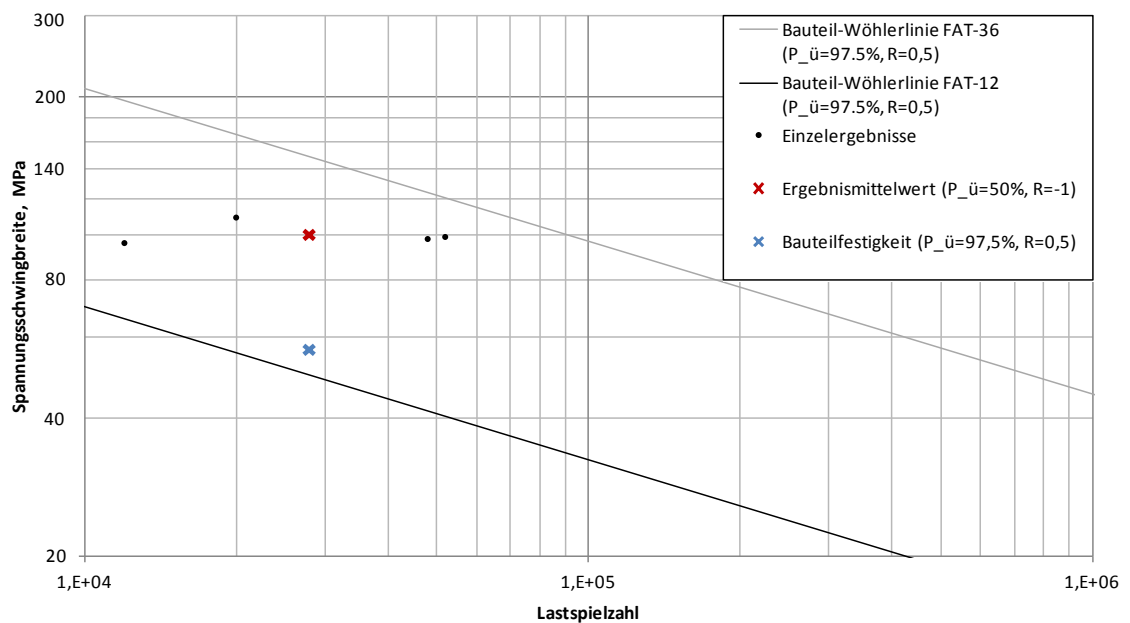


Abbildung 86: Ergebnisse I-Stoß Laser, FKM

- I-Stoß Laserstrahlschweißung mit Steg. Es wurde die Bauteilklasse FAT 25 bestätigt, Abb. 87. Die Rissentstehung erfolgte an der Übergangskerbe der Schweißnaht, Abb. 88. Für den Fügeknoten wurde Detailnummer 215 aus der FKM –Richtlinie gewählt (Querbelastete Dreiblechverbindung).

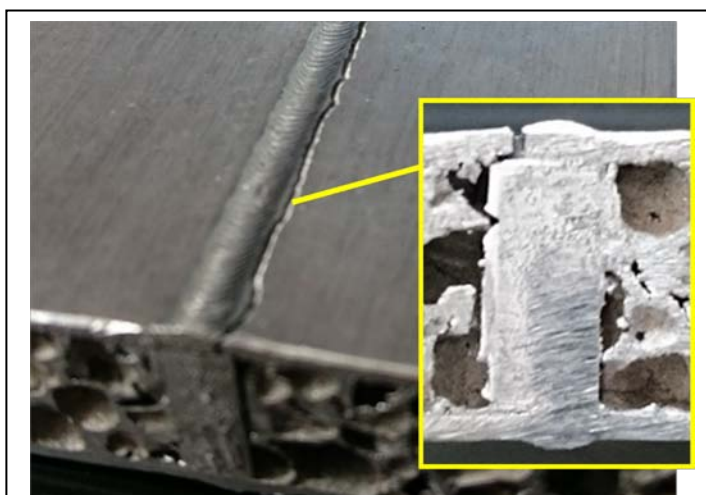
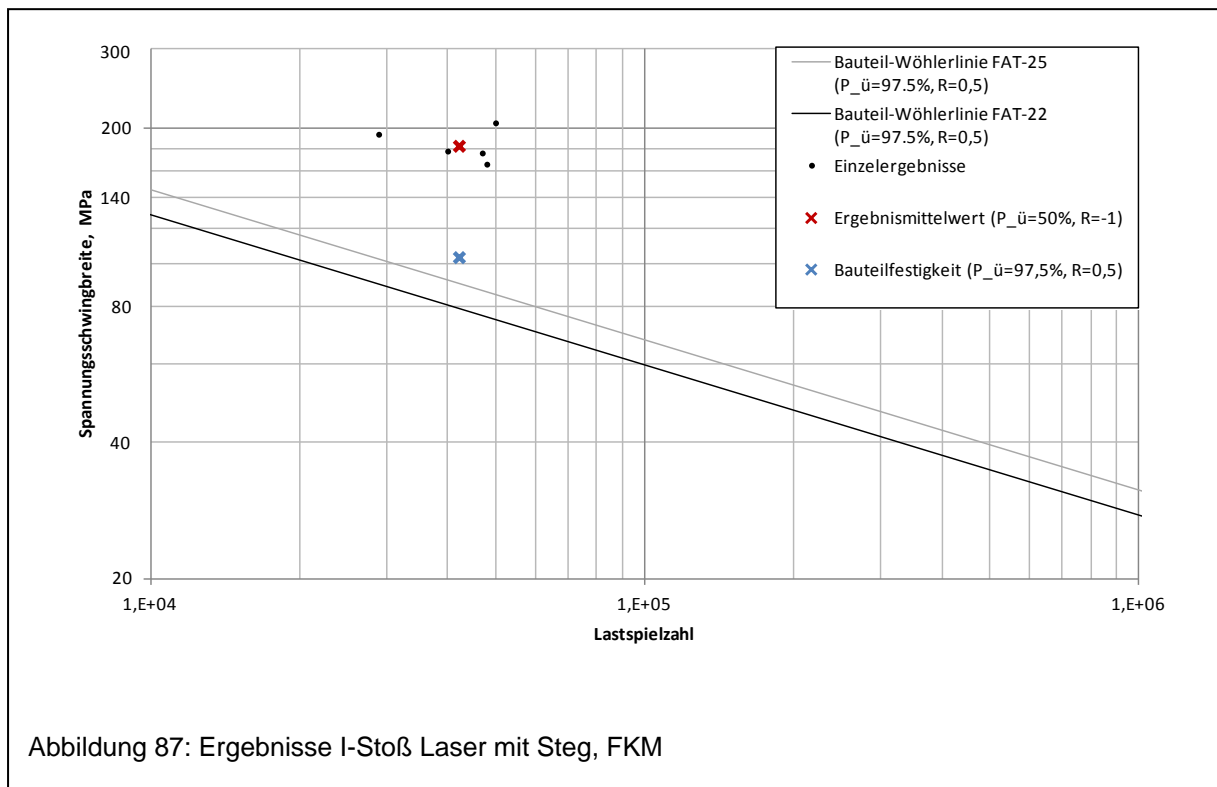
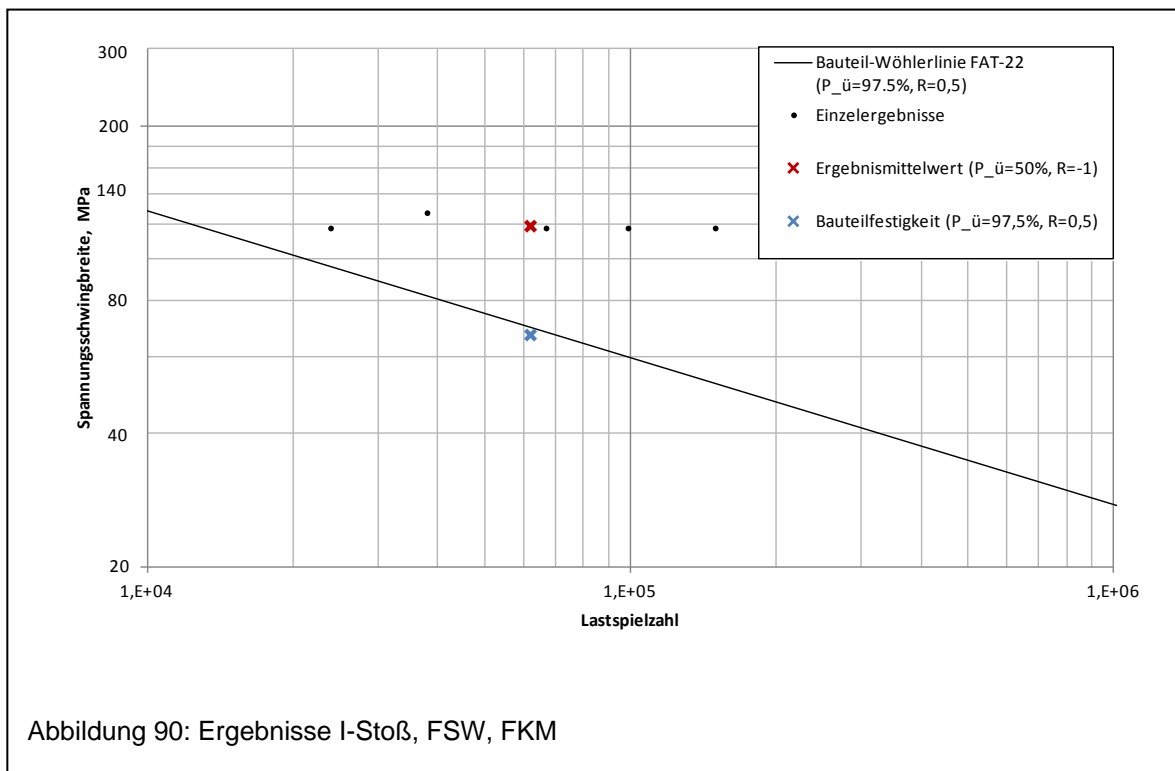
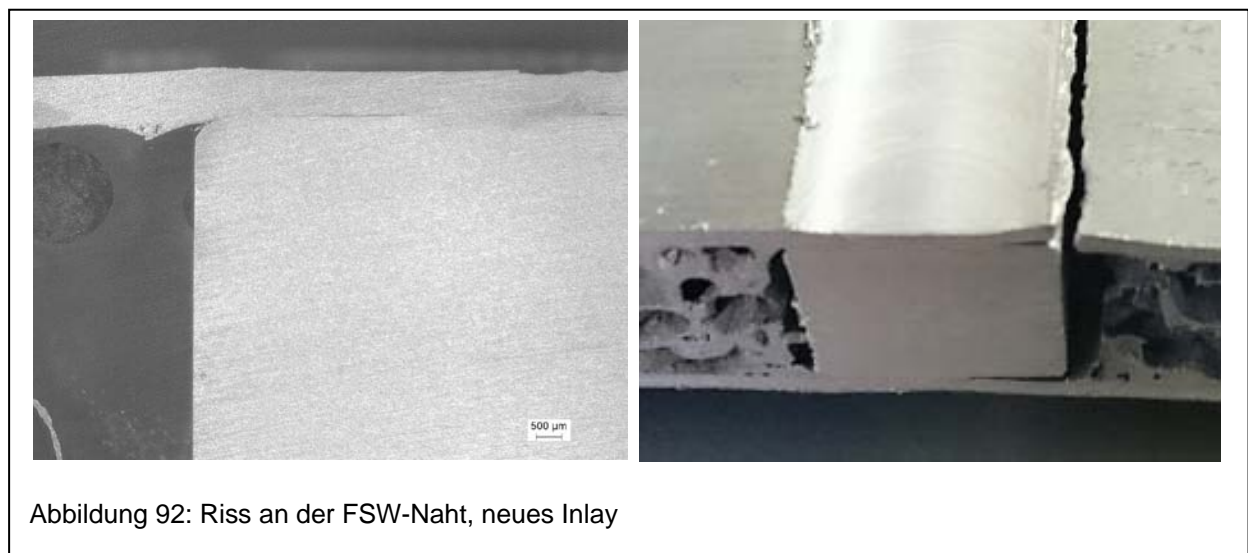
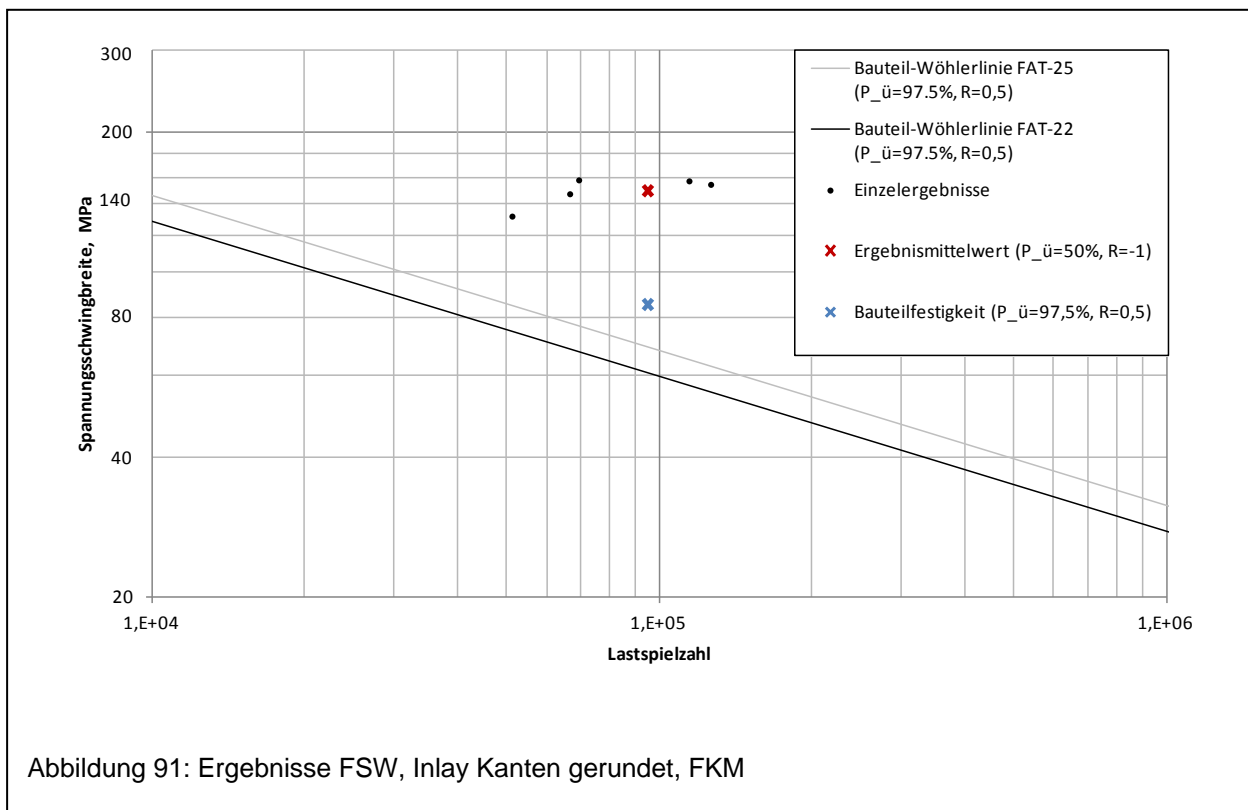


Abbildung 88: Riss an der Laserstrahlschweißnaht mit Steg

- I-Stoß, FSW-geschweißt. Die Rissinitiierung erfolgte im Blech am Übergang zum Einleger, Abb. 89 und die Einordnung in Bauteilklasse FAT 22, unsicher, Abb. 90



- I-Stoß, FSW-geschweißt, Abb. 91, Kanten gerundet am Inlay, Abb. 92. Durch die verbesserte Einlegergeometrie mit gerundeten Kanten am Inlay ist eine Einordnung in Bauteilklasse FAT 25 möglich.



6.2.7 T-Stoßprüfung

Wie in Kapitel 6.1.3 wurden 3 verschiedene Varianten untersucht:

- Typ 1 – AFS – AFS (300 mm) Einspannung am Gurt 80 mm,
- Typ 2 – AFS – AFS (400 mm), Einspannung am Gurt 360 mm,
- Typ 3 – AFS – Blech (400 mm), Einspannung am Gurt 360 mm

Die Prüfvorrichtung entsprach der in Abb. 72 dargestellten für die statischen Untersuchungen. Die anvisierte Einordnung des Fügeknosens war in Bauteilklasse FAT 25, Detailnummer 413 FKM (Blechriss), bzw. FAT 12 Detailnummer 414, FKM (Wurzelsriss). Das Versagen der Verbindung fand im Kernwerkstoff statt, Abb. 93. Eine Einordnung in die bestehende Bauteilklasse ist derzeit nicht möglich. Durch die lange Einspannung (Proben Typ 2 und 3) war die Querkraft im Gurt geringer, Abb. 94 und es wurden somit höhere Lastspielzahlen erreicht.

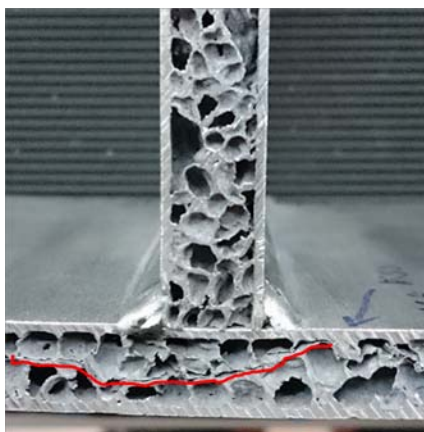


Abbildung 93: Riss im Schaum T-Stoß

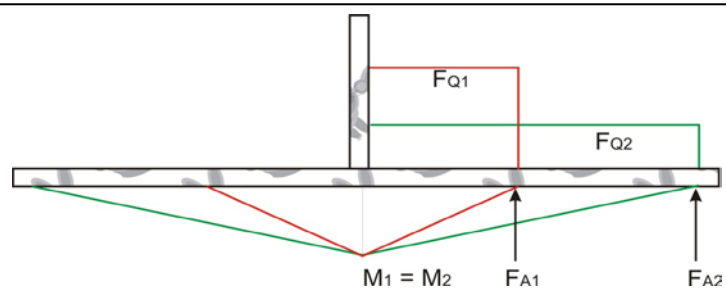
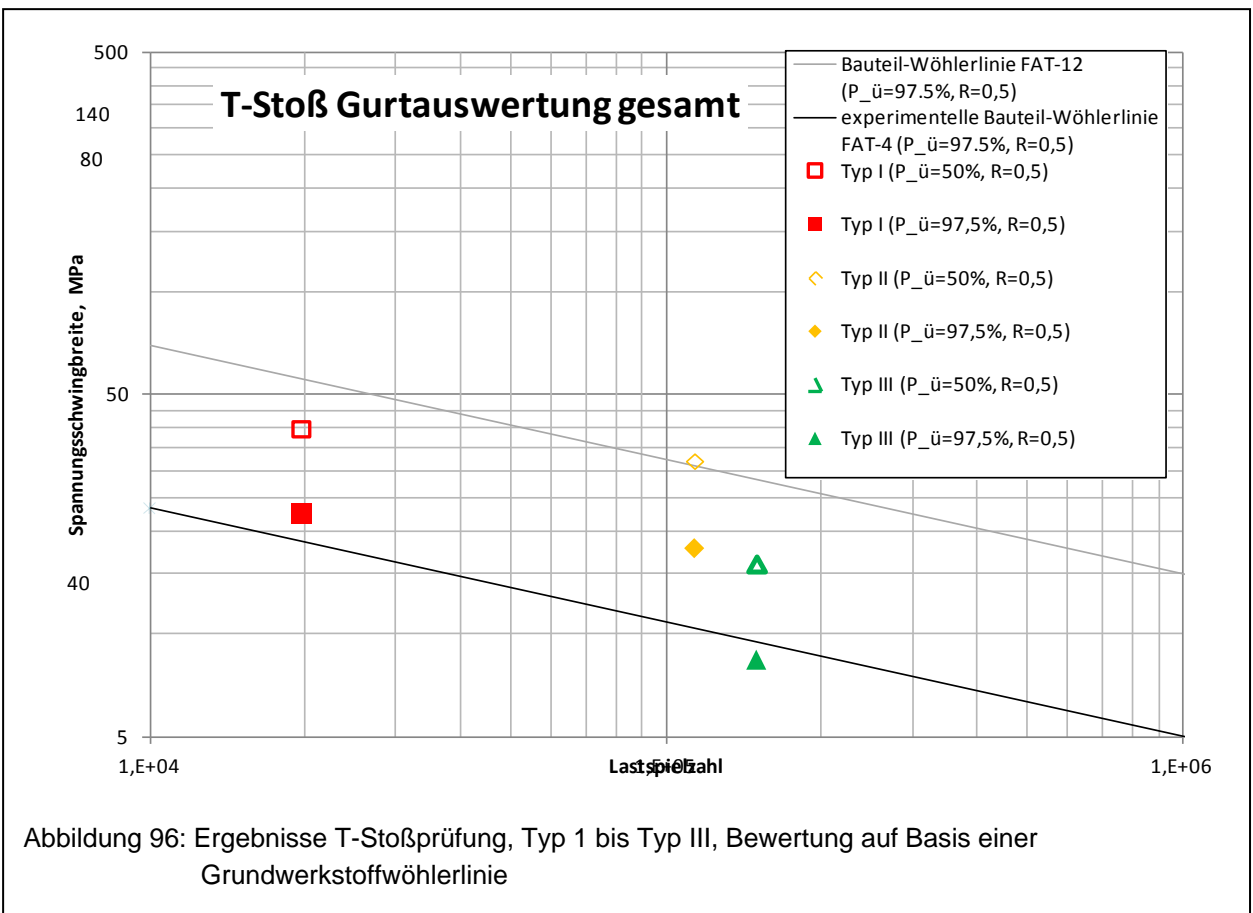
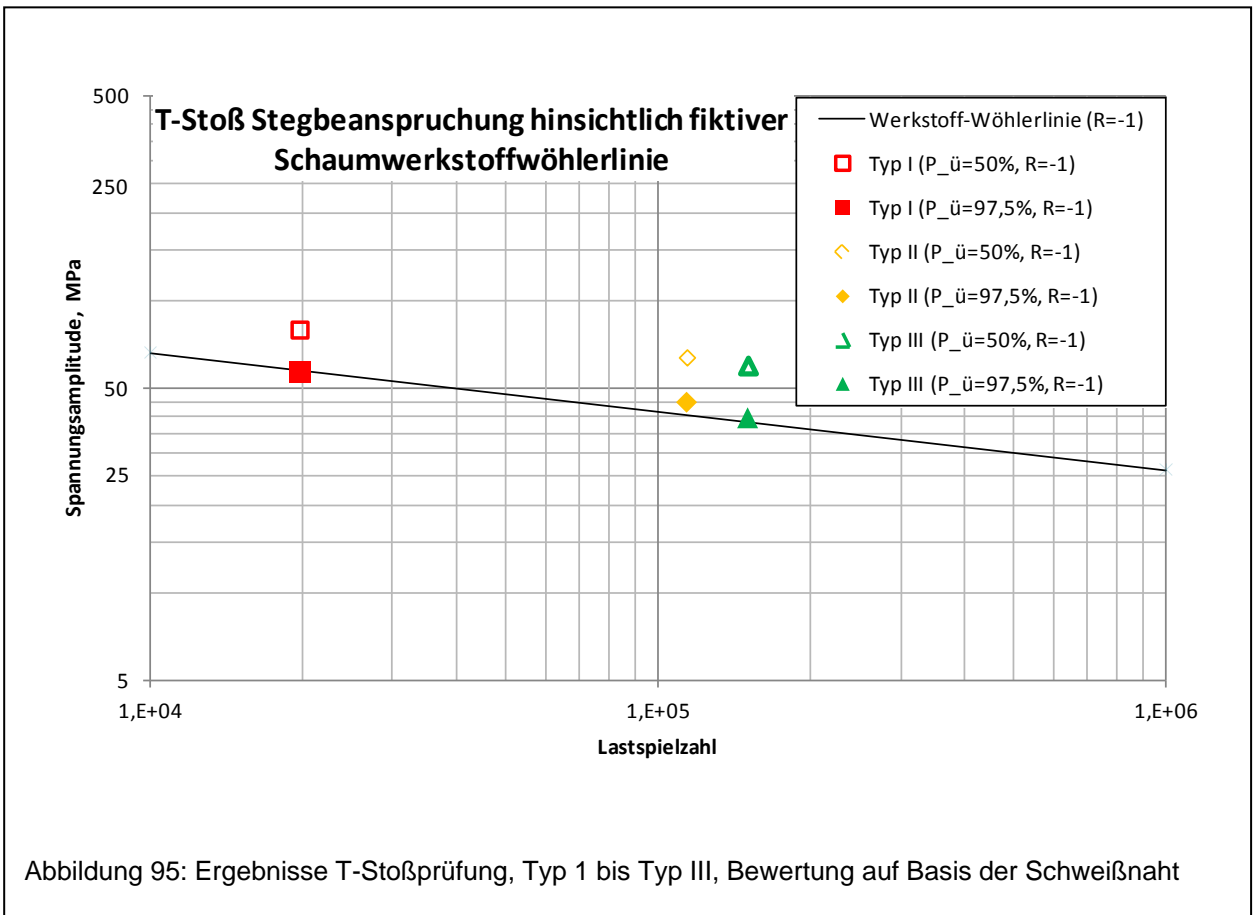


Abbildung 94: Kräfteverhältnis an dem T-Stoß

Abb. 95 zeigt die Auswertung bezogen auf eine fiktive Werkstoffwöhlerlinie welche die Beanspruchung des Schaumes im Knotenbereich abbildet.

Diese Wöhlerlinie muss in folgenden Untersuchungen nachgewiesen werden und ist hier nur als eine erste Annahme zu sehen.

In Abb. 96 erfolgte die Auswertung über die Spannung am Steg für AFS/AFS AFS/Bleche im Vergleich zur Bauteilwöhlerlinie FAT 12.



6.2.8 Auswertung nach Eurocode 9

Für die Bewertung der Schwingfestigkeitsuntersuchungen nach dem Eurocode 9 ergaben sich nachfolgende Übersichten zur Festigkeitseinordnung in die jeweiligen Nachweistypen, Abb. 97-100. Es wurden nur die relevanten Diagramme bestimmt.

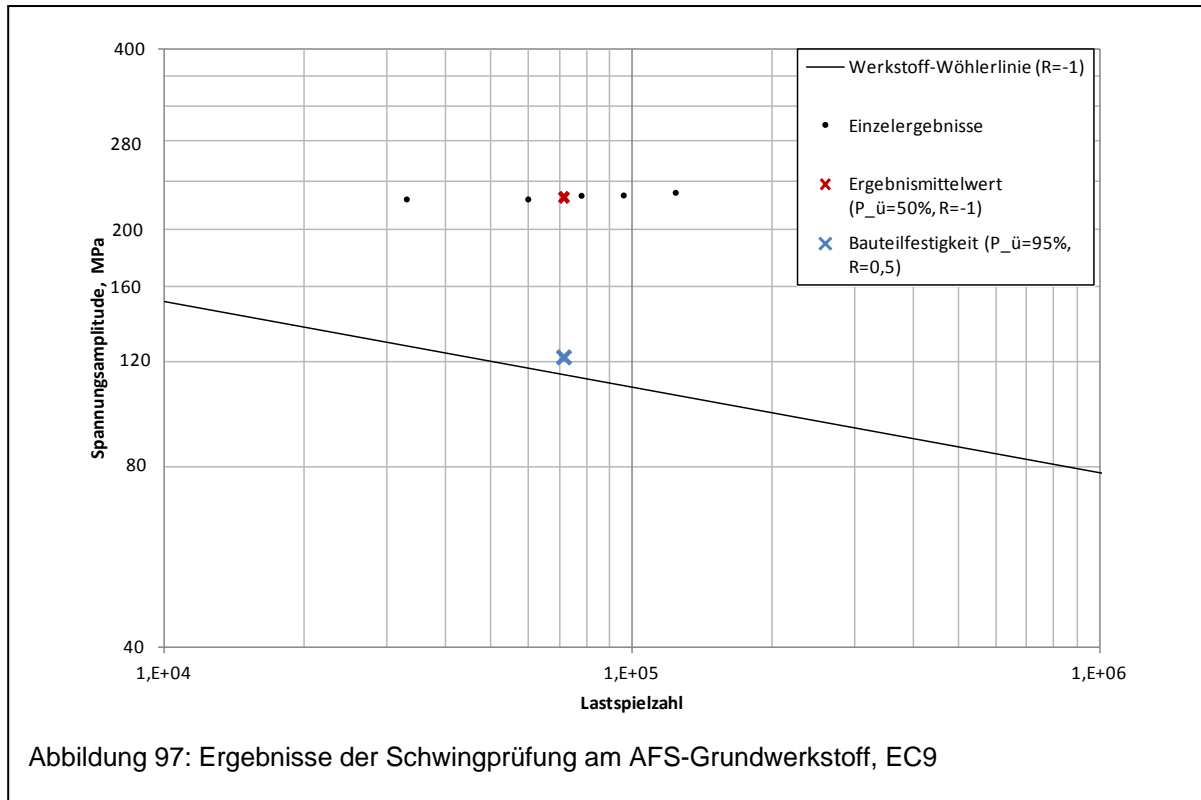
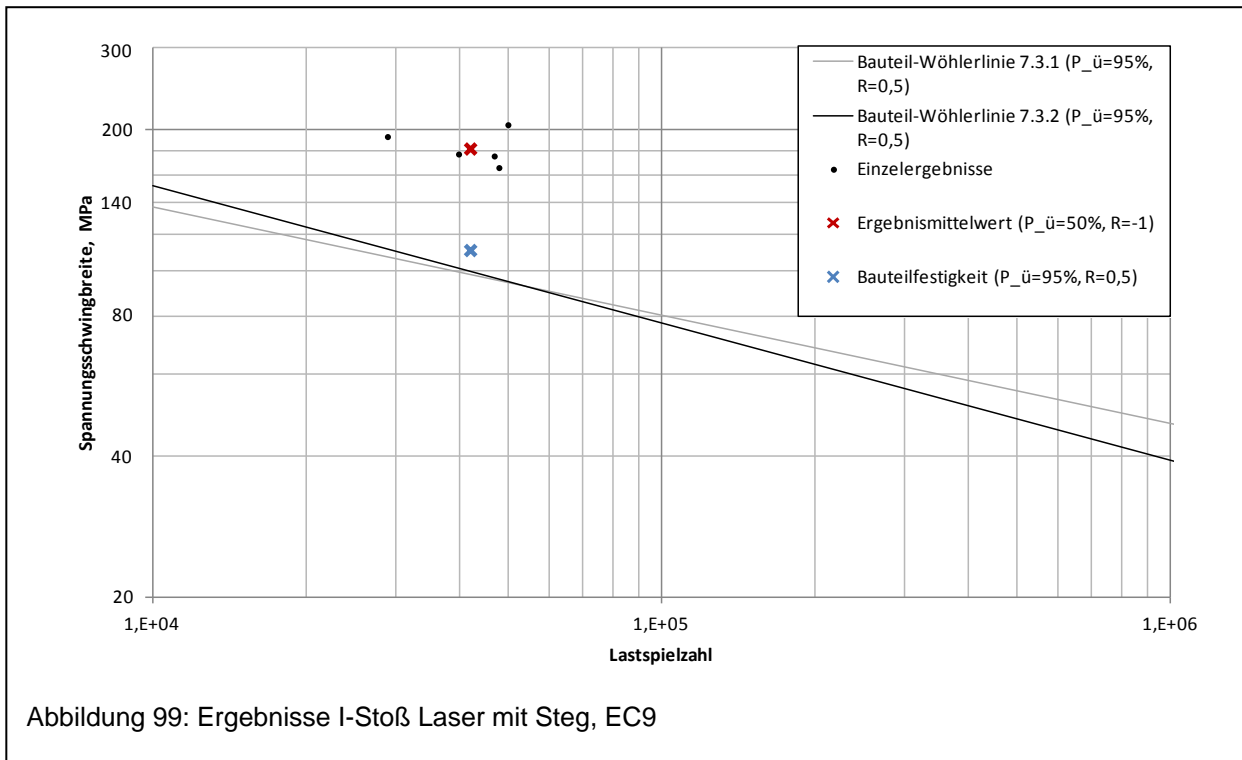
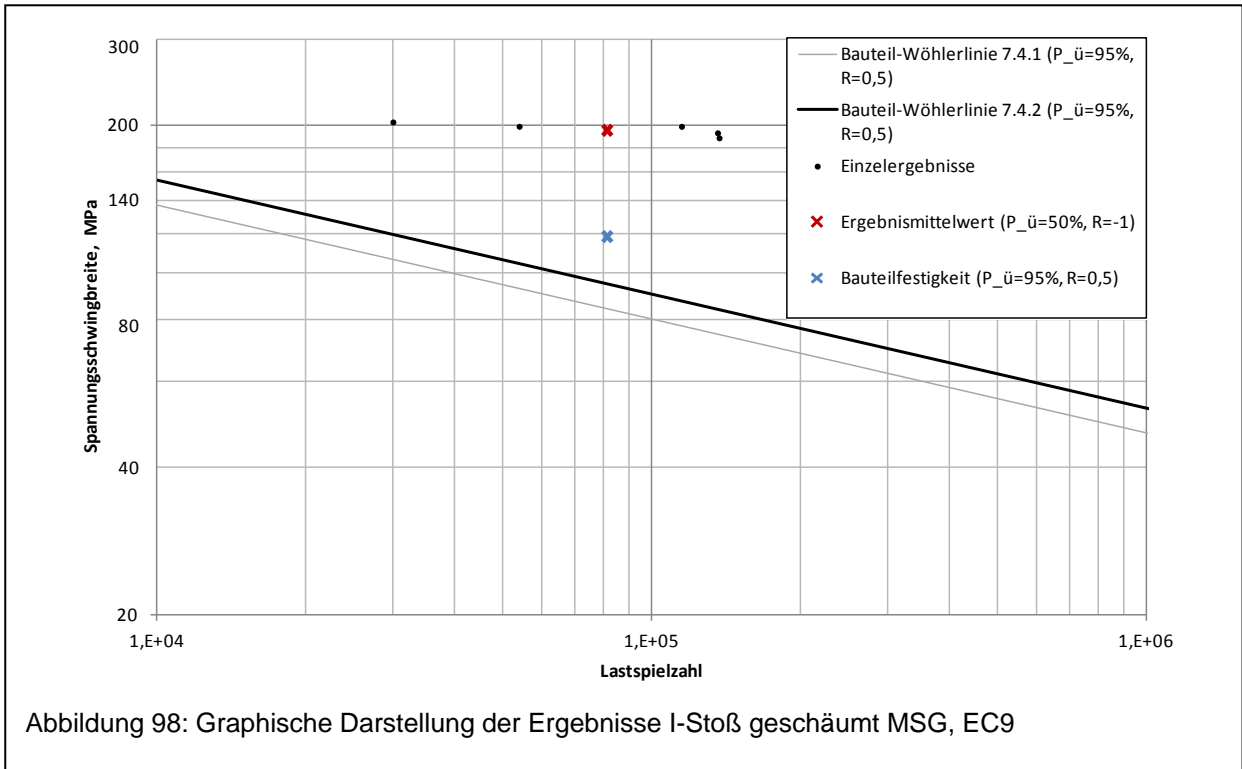
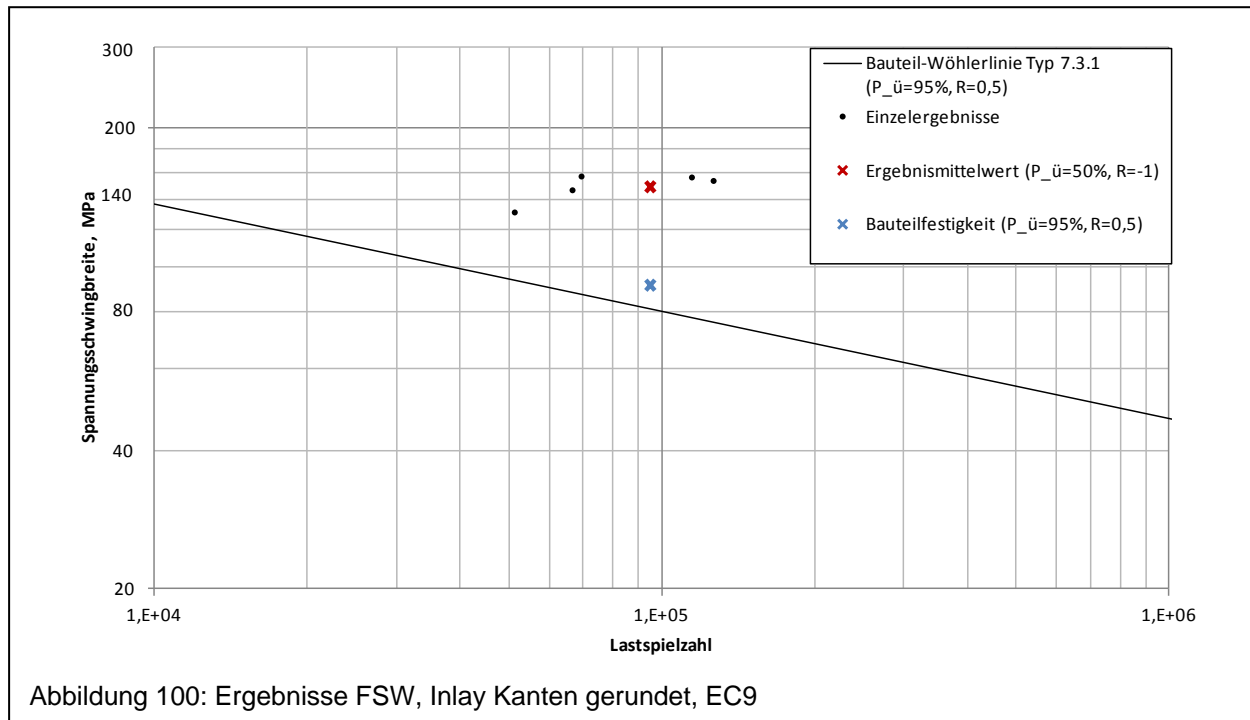


Abbildung 97: Ergebnisse der Schwingprüfung am AFS-Grundwerkstoff, EC9





7 FE-Analyse

Für die Bewertung der durchgeführten Versuche wurde neben den analytischen Berechnungsverfahren auch die numerische FE-Simulation eingesetzt. Dies hat den Vorteil, dass neben der Anwendung des Nennspannungskonzeptes auch die Anwendbarkeit der Empfehlungen der FKM-Richtlinie mit den lokalen Bemessungskonzepten geprüft werden kann. Es gilt die Einschränkung, dass für das Strukturspannungskonzept kein Versagen an der Schweißnahtwurzel ermittelt werden kann. Die lokalen Bemessungskonzepte erfordern einen höheren Grad der Modellierung der Verbindungsknoten.

7.1 Simulation des Sandwiches

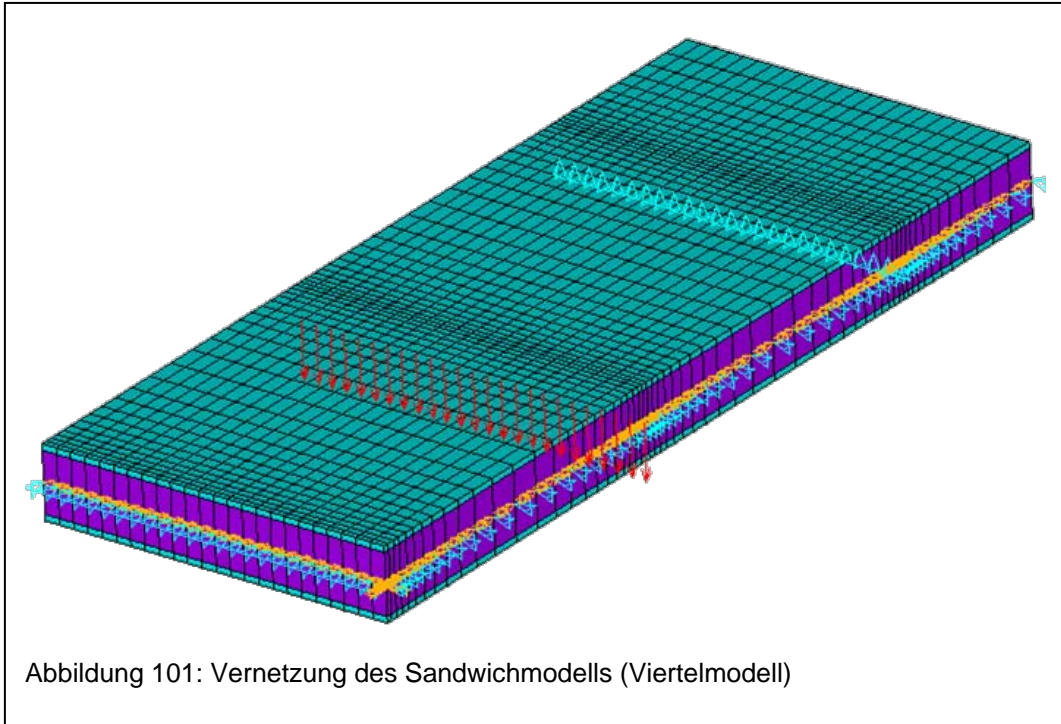
Aufgrund der Voraussetzung der oben aufgeführten Bemessungskonzepte, dass ein linear-elastisches Werkstoffverhalten der Berechnung zu Grunde liegt, wurde dies auch hier für den zu prüfenden Sandwichtaufbau übernommen. D. h. sowohl für die massiven Decklagen als auch für den Schaumkern werden E-Modul und Querkontraktionszahl bzw. Schubmodul des entsprechenden Werkstoffs als Ausgangsdaten benötigt. Der Schaum wurde in diesem Fall als homogener Werkstoff behandelt, der über den gesamten Querschnitt die gleichen Eigenschaften in Abhängigkeit der Dichte aufweist. Dies entspricht den gängigen Berechnungsverfahren bei Kernverbänden, da die Größe der Poren im Vergleich zur berechnenden Fläche als klein angesehen werden kann. Sollte sich über die Dicke der Probe eine ungleichmäßige Porendichte einstellen, muss der Einfluss auf die Berechnung der Spannungen geprüft und ggf. die Werkstoffeigenschaften des Kerns über die Dicke geändert werden. Dies kann z. B. durch Diskretisierung des Kerns in unterschiedliche Dichtebereiche mit dazugehörigen Werkstoffkennwerten geschehen.

Folgende Vorgehensweise wurde angewendet:

1. *Erstellung eines detaillierten elastischen Referenzmodells für zwei Werkstoffe (Decklagen und Schaumkern) unter Annahme des ebenen Verzehrzustandes (EVZ)*
2. *Bestimmung des E-Moduls und der Querkontraktionszahl für den Schaumkern durch Variationsrechnungen und Vergleich mit den experimentellen Daten, Abb. 107.*
3. *Bewertung unterschiedlicher Modellierungsansätze – durch Vergleich der Spannungs- und Verformungsfelder mit dem Referenzmodell*

Ausgangspunkt der FE-Analysen bilden die durchgeführten 4-Punkt-Biegeversuche an den AFS-Proben. Hieraus wurden die geometrischen Randbedingungen wie Probenabmaße oder Auflagerabstände übernommen. Für den Aufbau der FE-Modelle wurde die Längs- und Quersymmetrie des Versuchsaufbaus ausgenutzt und nur ein Viertel-Modell des 4-Punkt-Biegeversuches erstellt. Die unteren Auflager wurden als vereinfachte Randbedingung mit Sperrung der Trans-

lation in Z-Richtung auf die untere Modellseite eingebracht, die Krafteinleitung über die oberen Druckfinnen als linienverteilte Kraft auf die obere Modellseite. Abb. 101 zeigt die Modellierung am Beispiel des 2D-Flächenmodells mit Darstellung der Schichtdicken. Der Modellaufbau wurde mit quadratischen Shell-Elementen, definiert mit 3 Layern sowie 3 Integrationspunkte pro Layer, durchgeführt.



Die Werkstoffkennwerte der Aluminiumdeckschichten wurden als Standarddaten aus der Datenbank des verwendeten FE-Programms Ansys übernommen. Die Werkstoffkennwerte des Aluminiumschaums waren unbekannt. Die Ermittlung dieser fehlenden Werkstoffkennwerte fand über eine Modellkalibration des FE-Referenzmodells (EVZ) statt. Hierbei wurden anhand des Kraft-Weg-Verlaufes der durchgeführten Versuche die Probensteifigkeiten und deren Streuung bestimmt. Auf dieser Basis fand, über eine Parametervariation und -optimierung des E-Moduls und der Querkontraktionszahl der Schaumkomponente, die Anpassung der Steifigkeit des Referenzmodells an die ermittelte mittlere Steifigkeit der Versuchsreihen statt (Abb. 102).

Daraus ergab sich ein E-Modul von 280 MPa und eine Querkontraktionszahl von 0,31 für den Aluminiumschaumkern. Eine Zusammenfassung der verwendeten AFS-Kennwerte findet sich in Tabelle 19. Mit diesen Werten wurden verschiedene Varianten von Modellierungsansätzen für das AFS- Sandwich durch den Vergleich mit dem Referenzmodell (EVZ) bewertet.

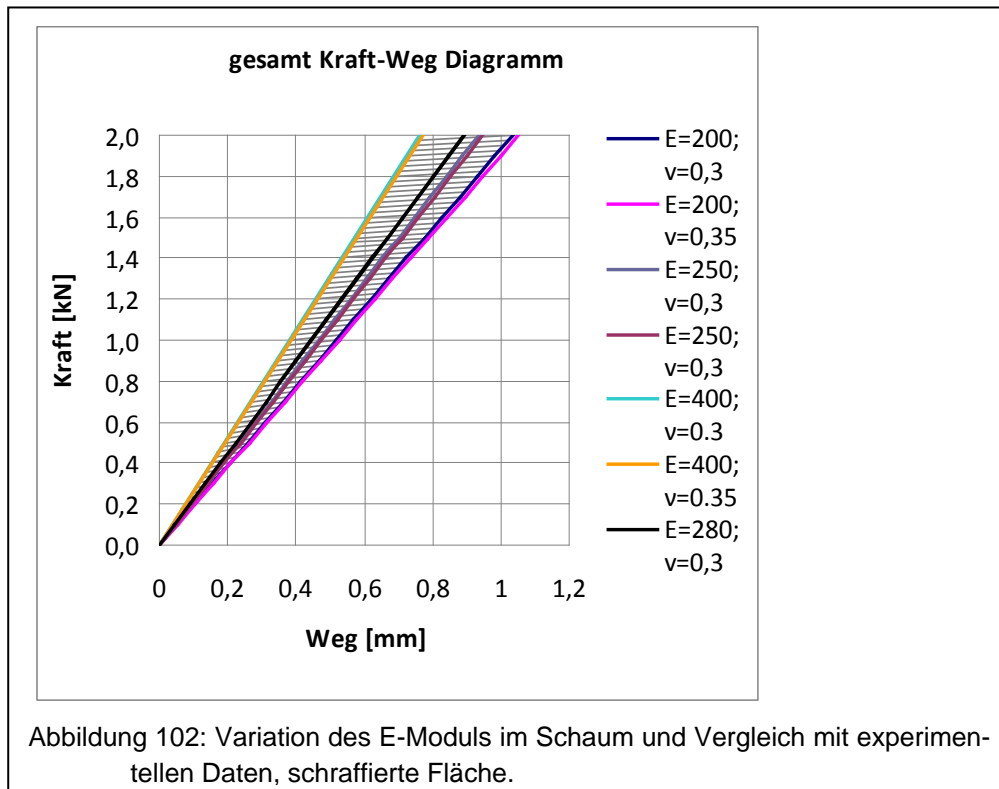


Tabelle 19: Kennwerte der AFS-Einzelkomponenten

Komponente	Werkstoff	Dicke in mm	E-Modul in MPa	Querkontraktionszahl ν
Decklage	Aluminium-Massiv	1	71000	0,33
Kern	Aluminium-Schaum	10	280	0,31

Bei der Modellierung wurde folgende steigende Vereinfachung angewendet:

- Variante 1: 3D-Strukturelement; jede Sandwichschicht wird über die Dicke mit mindestens einem Solid Element modelliert
- Variante 2: geschichtetes 3D-Strukturelement; die Platte wird über die Dicke mit einem Element modelliert, der Sandwichtaufbau wird im Element selbst definiert
- Variante 3: lineares geschichtetes 2D-Schalenelement

Die durchgeführten Simulationen wurden der detaillierten Referenzmodellierung gegenübergestellt und in Bezug auf die Biegelinien (Abb. 103), der Normalspannungsverteilung (Abb. 104) und der Schubspannung (Abb. 105) verglichen. Für alle Modellierungsvarianten konnte, unabhängig vom Vereinfachungsgrad, eine gute Übereinstimmung in der Normalspannungsverteilung festgestellt werden. Modellierungsvariante 2 ist für die Abbildung der Biegelinie und der Schubspannungsverteilung ungeeignet, da sich hierbei Abweichungen von mehr als 25% einstellen.

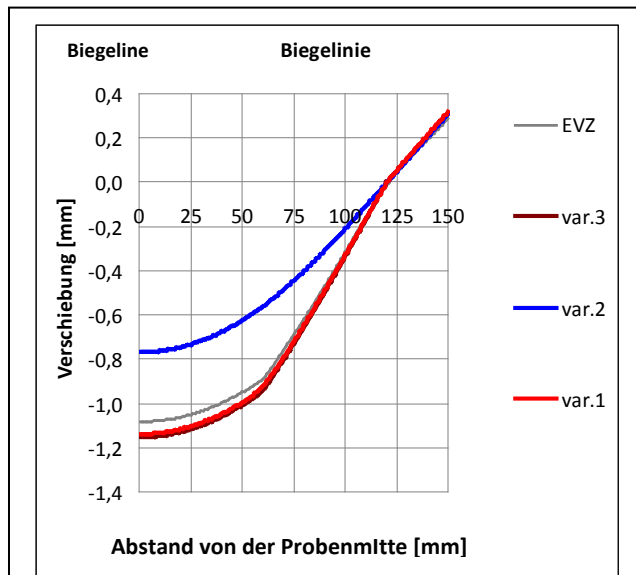


Abbildung 103: Vergleich der Verteilung der Biegelinie

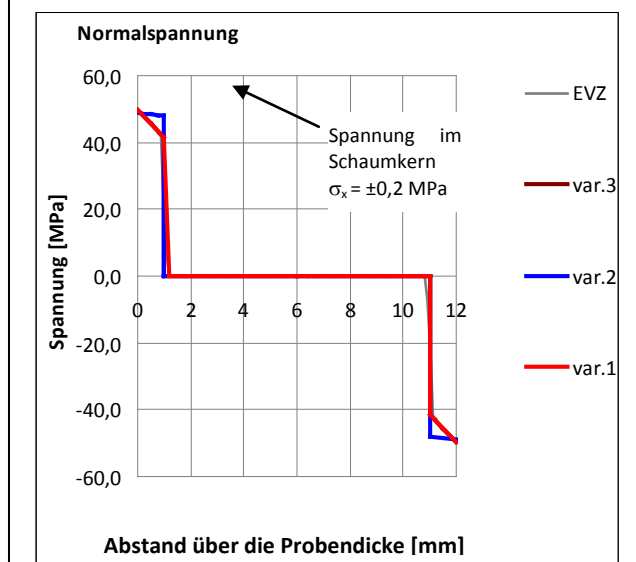


Abbildung 104: Vergleich der Verteilung der Normalspannung über das Sandwich in der Mitte der Probe

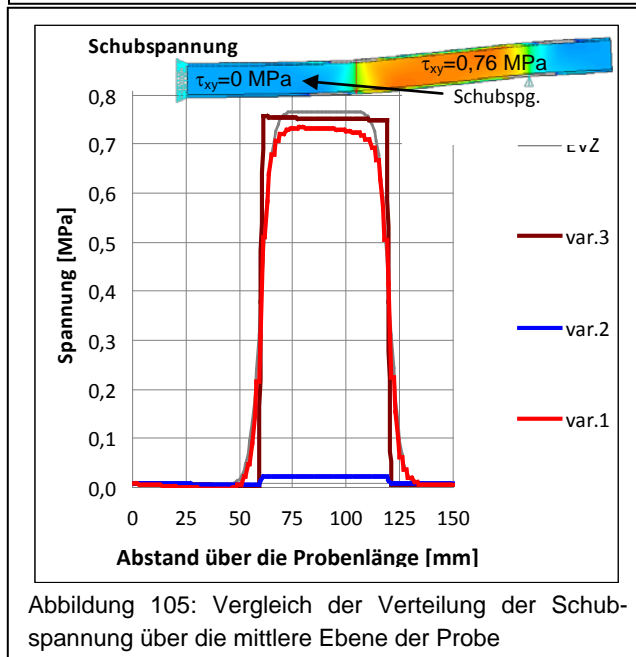
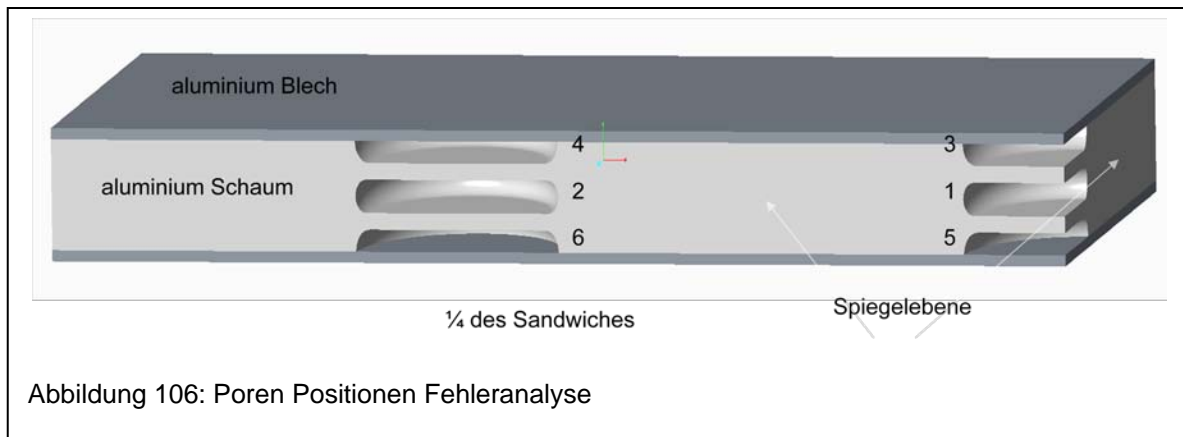


Abbildung 105: Vergleich der Verteilung der Schubspannung über die mittlere Ebene der Probe

Die festgestellten Unterschiede in den Varianten 1 und 3 sind hinsichtlich der maximalen Normal- und Schubspannungen sowie in der Durchbiegung kleiner als 4% im Vergleich zum Referenzmodell und haben keine praktische Relevanz. Eine gute Übereinstimmung zeigen auch die Ergebnisse aus den Berechnungen mit unterschiedlicher Anzahl von Layern und Integrationspunkten sowie mit Layered-Solid Elementen.

7.2 Fehleranalyse

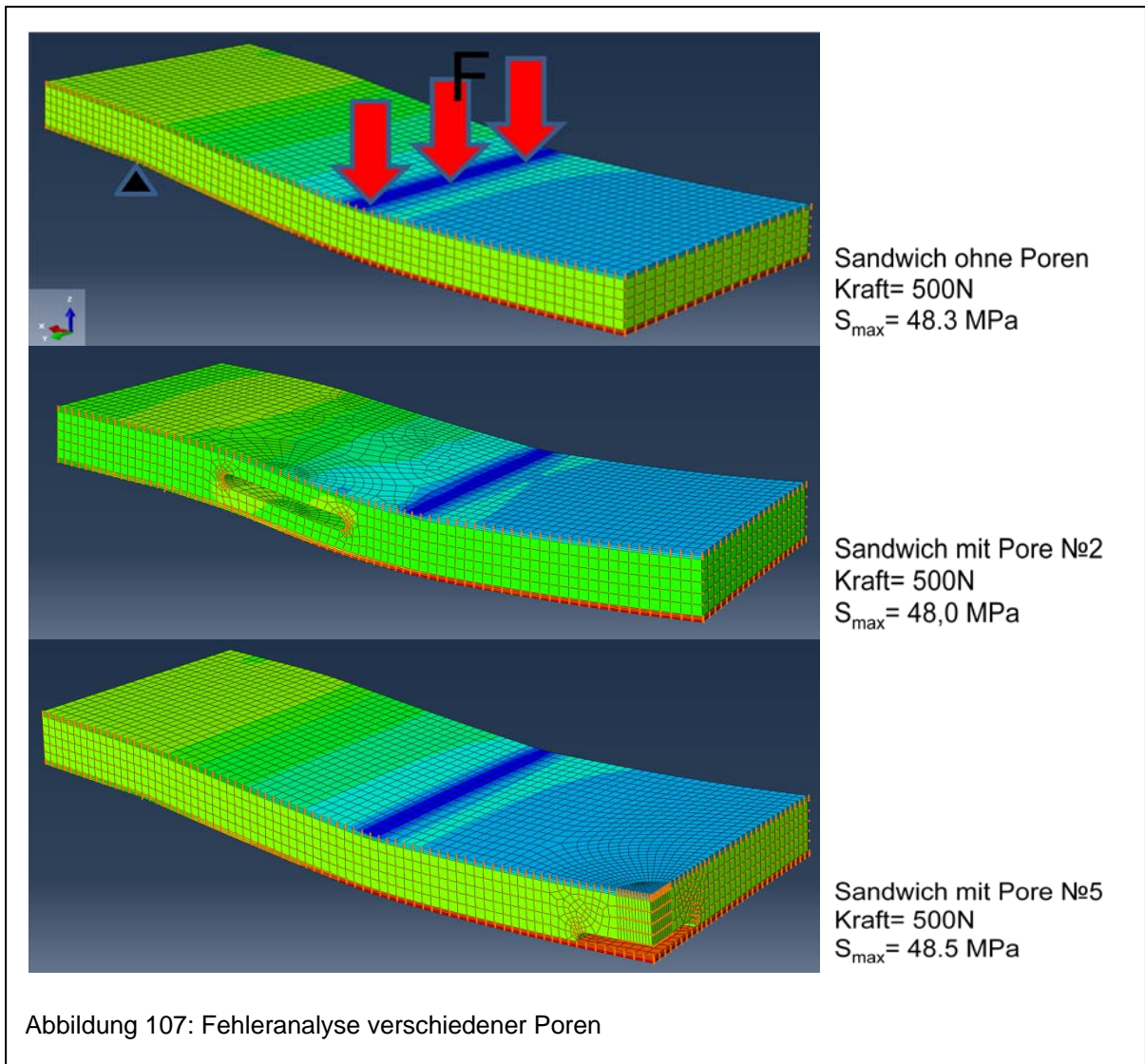
In einem weiteren Schritt wurden mit dem verifizierten 3D-Volumenmodell die Auswirkungen von Inhomogenitäten im Schaumkern auf die Decklagenbeanspruchung hin untersucht. Hierzu wurde im FE-Modell gezielt Fehlstellen in Form von übergroßen Poren im Schaumkern modelliert und in verschiedenen Belastungsregionen platziert und analysiert, dargestellt in Abb. 106 Positionsnummern 1-6.



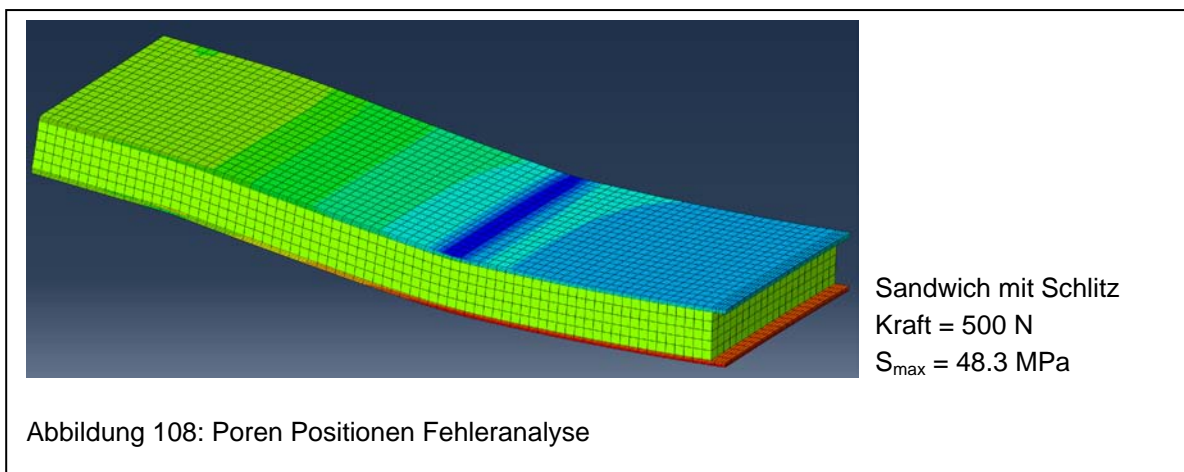
Die Größe der Poren beträgt im Durchmesser 30 mm bei der Dicke von 3 mm für die Position 1 und 2 bzw. 2 mm für die Porenposition 3-6. Dabei befinden sich die Poren 2, 4 und 6 im schubbelasteten Bereich zwischen den Auflagern und dem Stempel und die Poren 1, 3 und 5 in der Mitte des Sandwiches.

Bei einer aufgebrachten Linienlast von 500 N im Viertelmodell wurden die maximalen Hauptspannungen in den Decklagen verglichen. Als Beispiel sind in Abb. 107 die Poren 2 und 5 im Vergleich zum Porenfreien Sandwich dargestellt.

Die Analyse hat gezeigt, dass die modellierten Fehlstellen, nur einen sehr geringen Einfluss von unter 1% auf die entstehenden Spannungen der Decklagen haben. Dieses Ergebnis wurde auch durch die quasistatischen Versuche bestätigt.



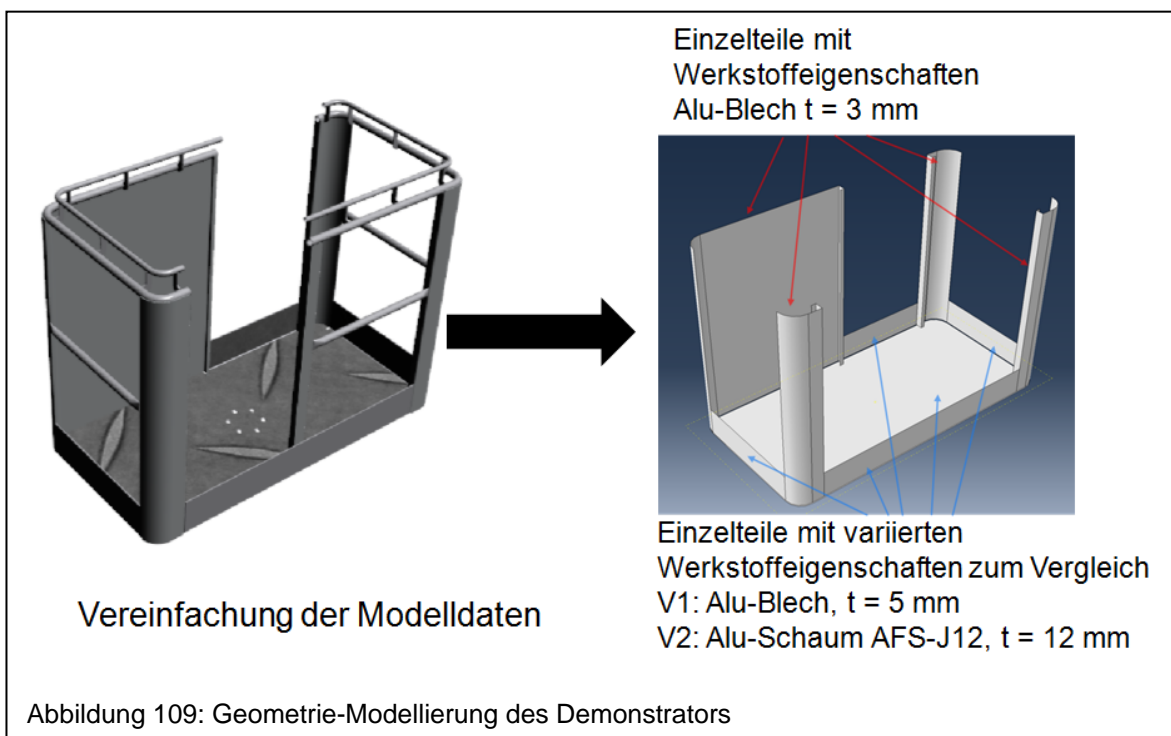
In einer weiteren Variante wurde der Einfluss einer möglichen Schweißnahtvorbe-
 reitung durch Ausfräsung des Schaumkerns an der Fügekannte untersucht. Einge-
 setzt wird dies z.B. bei für I-Stoßverbindungen. Hierbei wurde im Viertelmodell der
 Kern um 4 mm über die gesamte Probenbreite eingekürzt, Abb. 108.



Auch in dieser Variante zeigte sich keine Beeinflussung der Decklagenspannung aufgrund von lokal begrenzten, länglichen Freistellungen des Schaumkerns. Somit konnte nachgewiesen werden, dass das Vorhandensein von Fehlstellen und deren Position keinen Einfluss auf die Beanspruchung der Decklagen haben.

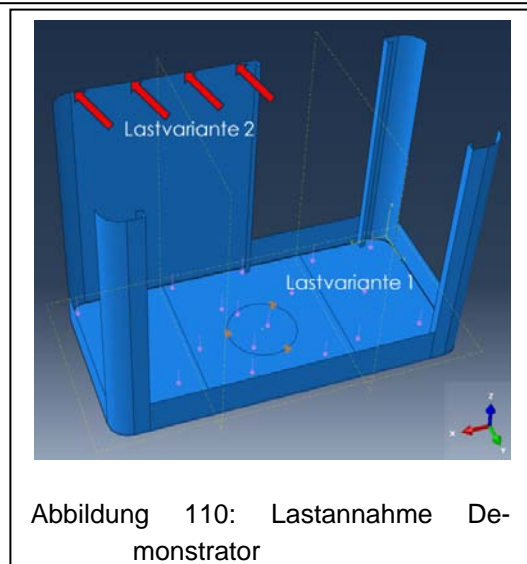
7.3 Bauteilsimulation

Als Demonstrator wurde in diesem Projekt vom PbA ein Arbeitskorb für eine Hubarbeitsbühne gewählt. Diese wurde bisher in einer aufwändigen Aluminiumkonstruktion mit Untergestell gefertigt. Auf Basis der verifizierten Simulationsmodelle für AFS-Schaum wurde zunächst die Konstruktion in ein CAD-Modell übertragen. Mit Hilfe der FE-Simulation wurde der Einsatz von AFS für ausgewählte Komponenten in der Konstruktion überprüft. Zunächst erfolgte eine Vereinfachung der Modelldaten Abb. 109 und die Reduzierung auf ein Flächenmodell.

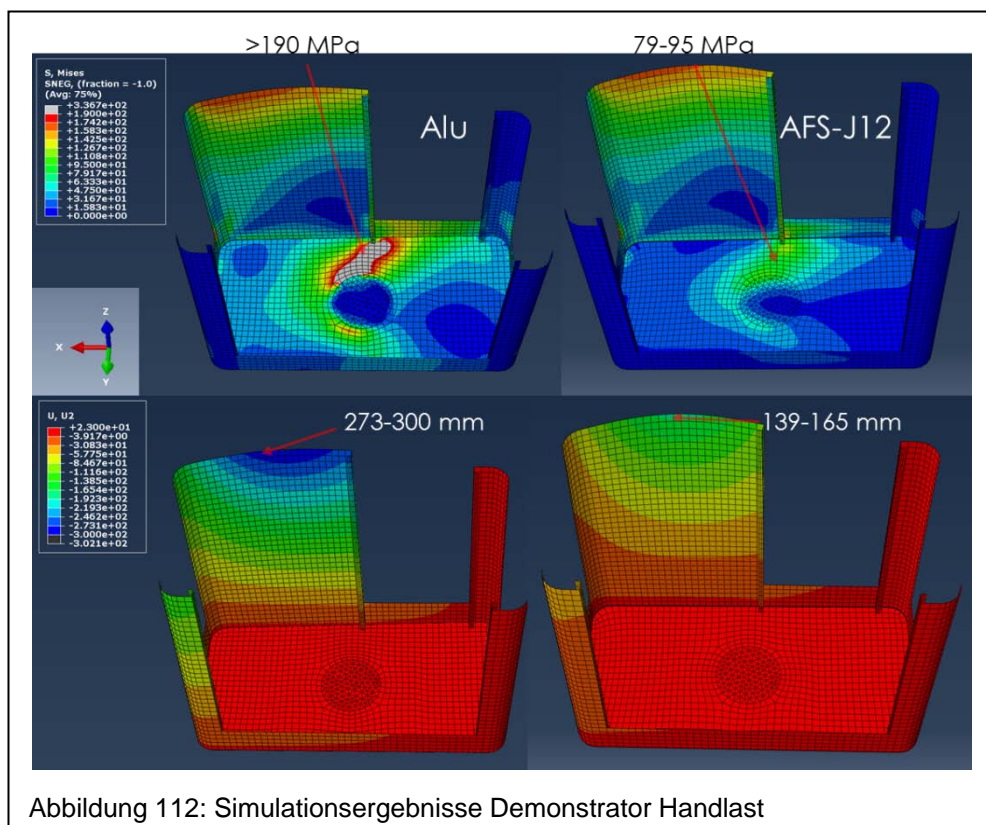
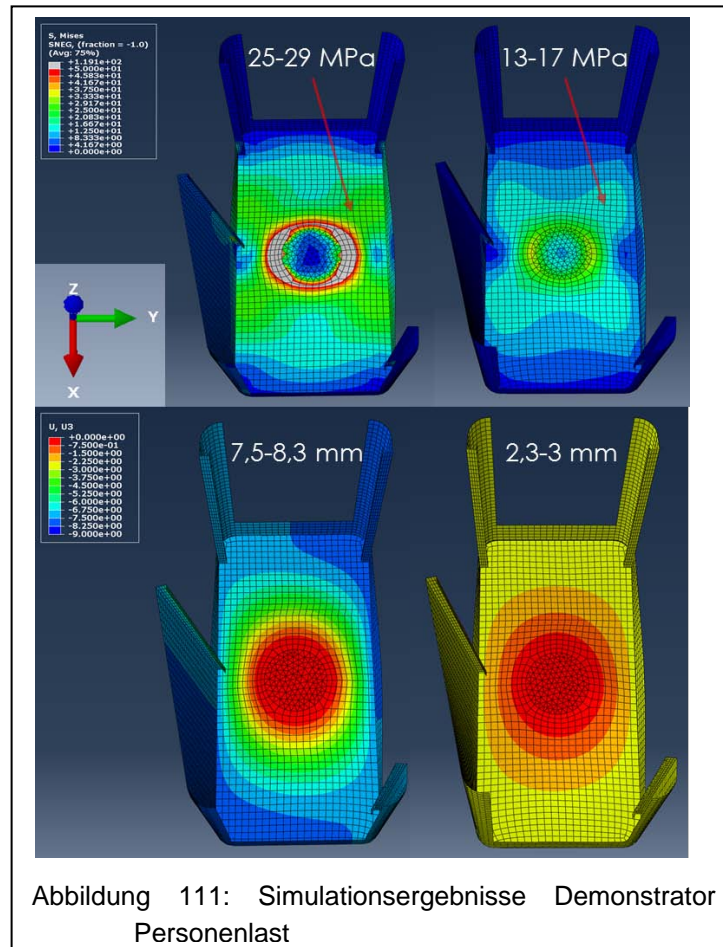


Es wurden eine Bodenplatte aus 5 mm Aluminium mit einer Bodenplatte aus AFS mit den Maßen 1/10/1 für Deckblech/Schaum/Deckblech verglichen. Als Lastannahme wurden 2 Belastungen vorgesehen, Abb. 110:

- Lastvariante 1: Personenbelastung (200 kg)
- Lastvariante 2: Handlast 900 N



In den nachfolgenden Simulationen konnte nachgewiesen werden, dass die zulässigen Spannungen im AFS eingehalten werden. Die Ergebnisse sind in Abb. 111 für die Personenlast und Abb. 112 für die Handlast dargestellt.



In den Abbildungen sind jeweils die Ergebnisse mit Aluminium als Bodenplatte links dargestellt, mit AFS rechts. Es zeigt sich, dass eine Neuauslegung mit AFS in der Bodenplatte das Gewicht der Konstruktion verringern und die Steifigkeit um ca. das 2,7-fache gleichzeitig erhöhen konnte, bei Berücksichtigung der ermittelten zulässigen Werkstoffkennwerte für AFS.

Zusammenfassung:

Zunächst konnten mit Hilfe der Simulation die Werkstoffparameter für den Schaum des Sandwiches wie das E-Modul und die Querkontraktionszahl bestimmt werden. Im Nächsten Schritt wurde ein detailliertes Modell mit 3 vereinfachten Modellierungsvarianten verglichen. Diese zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit dem detaillierten Modell. Damit konnten nun im Verlauf des Projektes auch komplexere Zusammenhänge berechnet werden. Zum einen wurde eine Fehleranalyse durchgeführt, deren Ergebnisse von den Versuchen in Kap 6 bestätigt wurden, zum anderen konnte auch die komplexe Struktur des Demonstrators simuliert und verbessert werden. Somit bietet sich zukünftig durch die Simulation die Möglichkeit der vereinfachten Optimierung und Anpassung von Schweißkonstruktionen aus AFS.

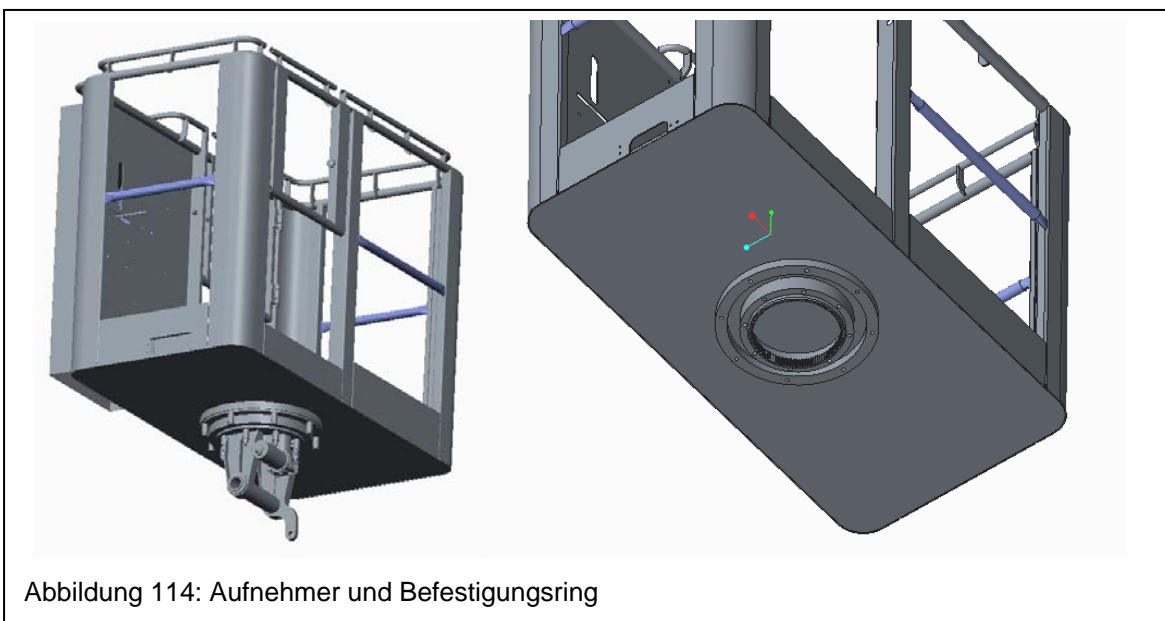
8 Demonstrator

8.1 Aufbau

Mit den erlangten Erkenntnissen zum statischen und schwingenden Verhalten von AFS und den daraus abgeleiteten Fügeknotten, sowie den verifizierten FE-Modellaufbauten für AFS und der Vorauslegung des Arbeitskorbes wurde ein Demonstrator gefertigt. Für diesen wurde der Aufbau mit einer AFS-Bodenplatte in der Stärke von 12 mm entsprechend der durchgeführten Bauteilberechnung vorgesehen. Die Fertigung übernahm die Fa. Klaas Alu - Kran als ein Mitglied des PbA. Zum Einsatz kommt dieser Arbeitskorb in mobilen Hubarbeitsbühnen, siehe Abb. 113.



Zur Anbindung des Korbes an den Ausleger wurde ein spezieller Aufnehmer konstruiert, welcher über einen Drehring an der Bodenplatte angeschweißt ist (Abb. 114).



Zum Nachweis der Verbindungsfestigkeit dieses Anbindungsknotens unter schwingender Beanspruchung wurde ein entsprechender bauteilähnlicher Prüfkörper als Musterbauteil abgeleitet und von der F. Klaas mittels MIG – Schweißen entsprechend der Fertigungsbedingungen des Realbauteils angefertigt. Das Musterbauteil besteht aus der Bodenplatte mit aufgeschweißtem Aluminiumring, Abb. 115.

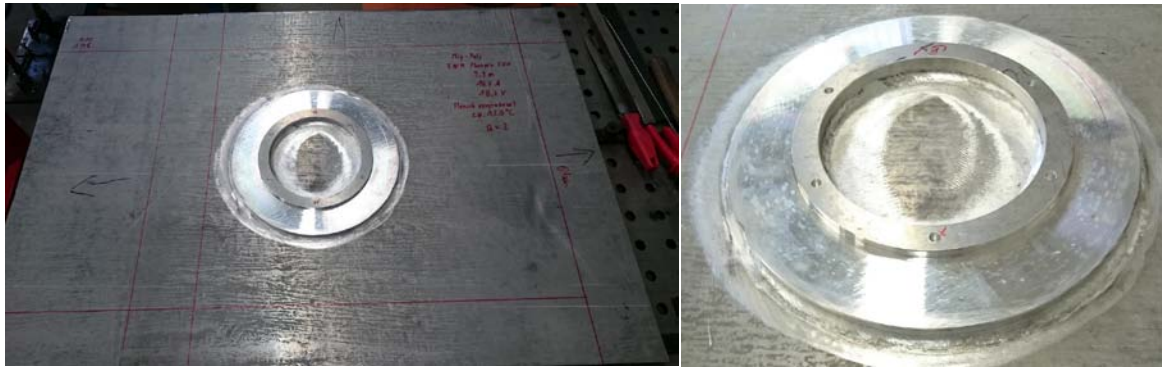


Abbildung 115: Demonstrator, Grundplatte Arbeitskorb mit befestigtem Ring

Die Maße der Bodenplatte betragen 980 x 680 mm² und wurden so gewählt, dass der Prüfkörper in die Prüfmaschine eingebaut und untersucht werden kann.

8.2 Versuchsaufbau - Festigkeitsprüfung

Das Musterbauteil wird genutzt, um die Schweißnaht der Verbindung AFS-Bodenplatte – Befestigungsring hinsichtlich ihrer Schwingfestigkeit zu prüfen.

Für die Integration in die Prüfmaschine wurde dazu eine geeignete Prüfvorrichtung konstruiert und gebaut. Diese sollte die Platte umlaufend fest einrahmen und so die Anbindung des umlaufenden Geländers der Arbeitsbühne, über das u.a. die kritischen Windlasten oder Arbeitslasten eingeleitet werden, widerspiegeln.

Die Beaufschlagung des Korbes mit Windlasten im Betrieb und im mobilen Einsatz geben auch die Krafrichtung vor, in die das Musterbauteil beansprucht wird und zwar senkrecht zur Drehachse des Befestigungsringes, Abb. 116. Um dieses Lastszenario umsetzen zu können, musste das Musterbauteil in der Prüfmaschine senkrecht positioniert werden. Zur Lasteinleitung wurde ein Adapter gefertigt, welcher über Gewindebohrungen im Befestigungsring angebracht wurde. Somit wurde vergleichbar mit dem Komponententest der T-Stoßprüfung der untersuchten Verbindungsknoten geprüft. Die Hebelarmlänge betrug 200 mm zwischen der

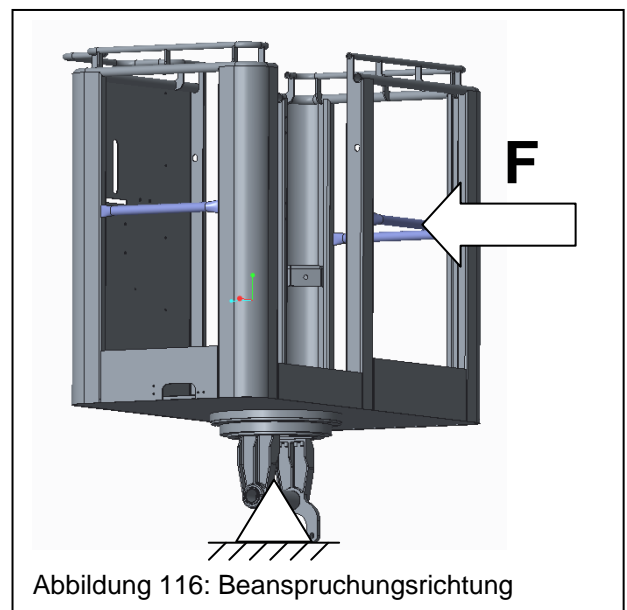


Abbildung 116: Beanspruchungsrichtung

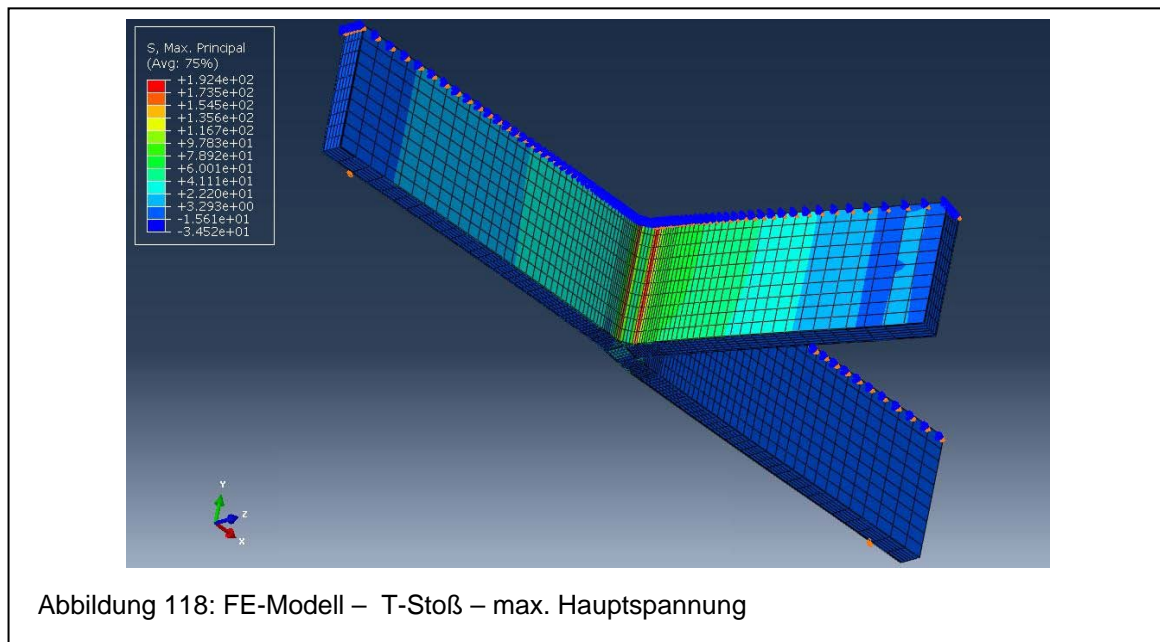
Sandwichoberfläche und dem Drehpunkt der Halterung am Prüfzylinder. Abbildung 117 zeigt die Einbausituation in der Prüfmaschine, sowie die entwickelte Prüfvorrichtung.



Die Prüfung erfolgte entsprechend den Komponententests weggesteuert unter Wechsellast im Spannungsverhältnis von $R = -1$. Zur Abschätzung des Prüflastniveaus wurde die Vorgehensweise über den Nachweis der FKM-Richtlinie beibehalten und ein Lasthorizont von 10^5 Schwingspielen angestrebt. Basis der Berechnung der Prüflast bildeten die Ergebnisse und FE-Berechnungen der T-Stoßverbindung. Diese geben ein vergleichbares Beanspruchungsbild wieder. Die Prüf- und Simulationsergebnisse der T-Stoßverbindung wurden genutzt, um zulässige Festigkeitskennwerte für die angestrebte Schwingspielzahl auch für lokale Bemessungskonzepte abzuleiten und mit diesen die Abschätzung des Prüflastniveaus des Musterbauteils vorzunehmen.

8.3 FE-Simulation

Als Basis für eine Auslegung der Schweißanbindung des Drehringanschlusses an die Bodenplatte des Arbeitskorbes diente im Ersten Schritt die Verifizierung der FE-Simulation der Verbindungsknoten. Dazu wurde ein 3D-FE-Volumenmodell vom Typ II T-Stoß mit langer Einspannung erstellt, da dieser Verbindungstyp der Belastungssituation am Anschluss der Bodenplatte am ehesten entspricht. Abbildung 118 zeigt den Modellaufbau mit Darstellung der Hauptspannungsverteilung.



Als Beanspruchung wurde eine Kraft von 350 N gewählt, entsprechend der Prüflast der experimentellen Versuche. Damit wurden im Versuch ca. $1 \cdot 10^5$ Schwingspiele erreicht. Die Auswertung des FE-Modells erfolgte nach dem Strukturspannungskonzept, wozu die maximal auftretende Hauptspannung zum Hot-Spot, dem Schweißnahtübergang im Gurtbereich, ermittelt wurde, Abb. 119. Die Berechnung der Stützpunktabstände basiert dabei auf der Gesamtsandwichdicke. Als Zusatzinformation ist in Abbildung 125 die Schubspannung längs zur Gurtplatte. In diesem Diagramm ist sehr gut die erhöhte Kernbeanspruchung im Bereich des Knotens zu erkennen. Als max. Strukturspannung am Hot-Spot konnte ein Referenzwert von $\sigma_{HS,max} = 28,4 \text{ MPa}$ ermittelt werden. Dieser soll den Vergleichswert für den Nachweis des Musterbauteils dienen.

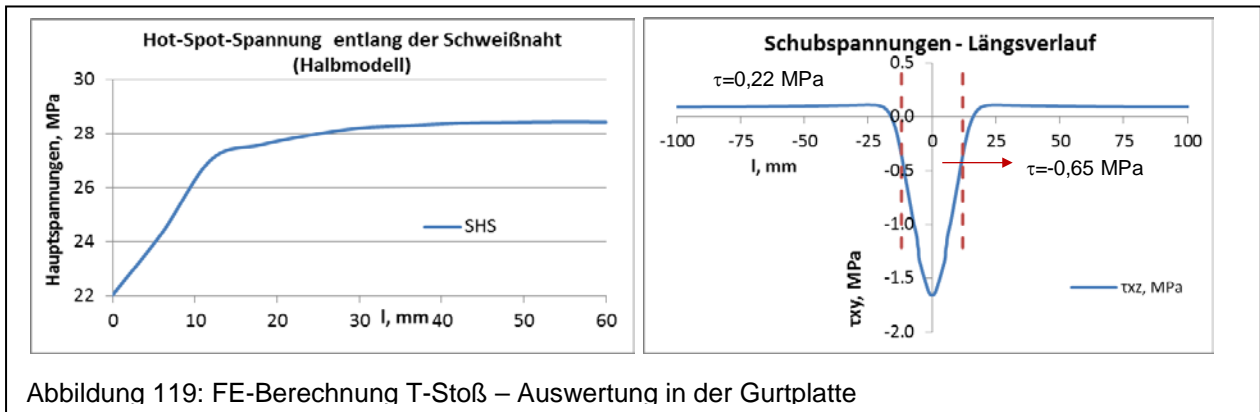


Abbildung 119: FE-Berechnung T-Stoß – Auswertung in der Gurtplatte

Im nächsten Schritt erfolgte die Nachbildung des Musterbauteils als FE-Modell. Die Randbedingungen wurden entsprechend den Einspannungen und der Lasteinleitung des Versuchsaufbaus definiert. Da die Prüflast des Musterbauteils noch unbekannt war und mit dieser Berechnung ermittelt werden sollte, wurde eine Einheitsbelastung von 1000 N als Berechnungsgrundlage gewählt, Abb. 120.

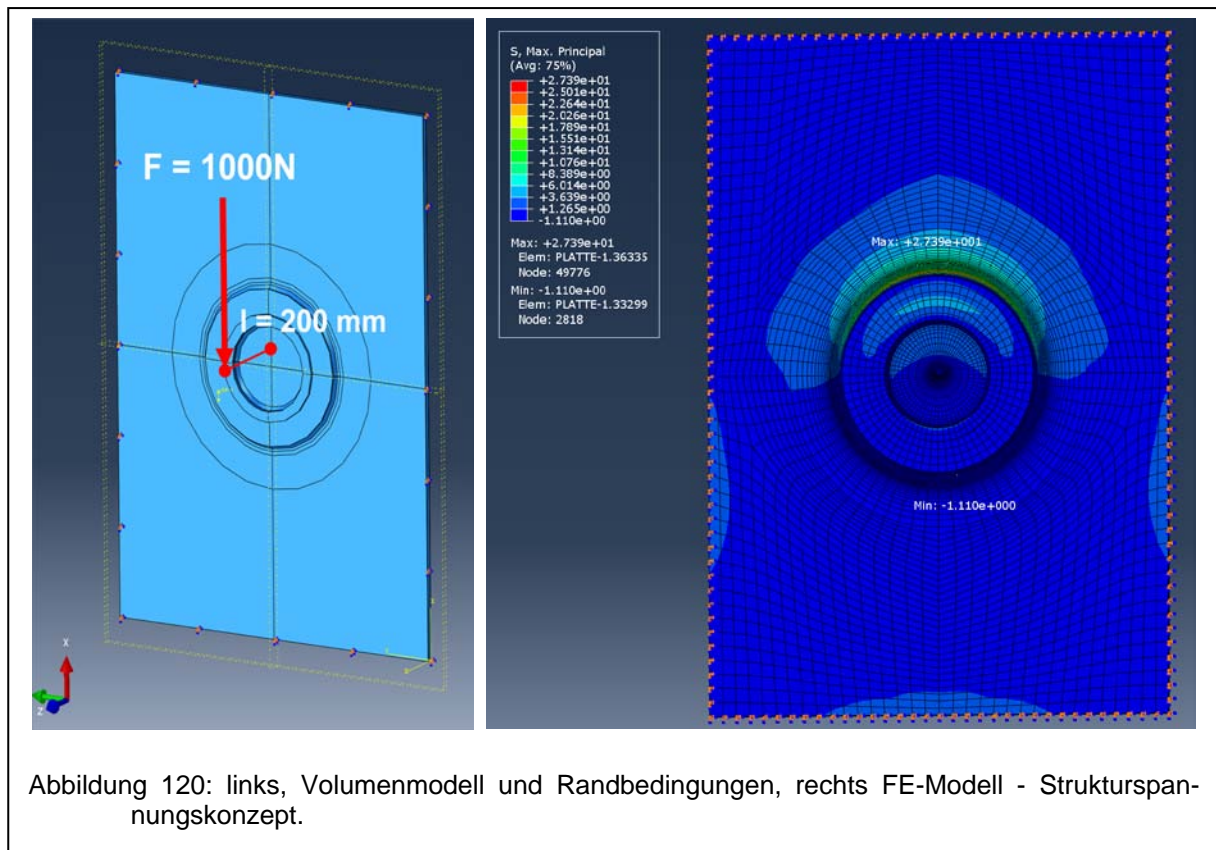
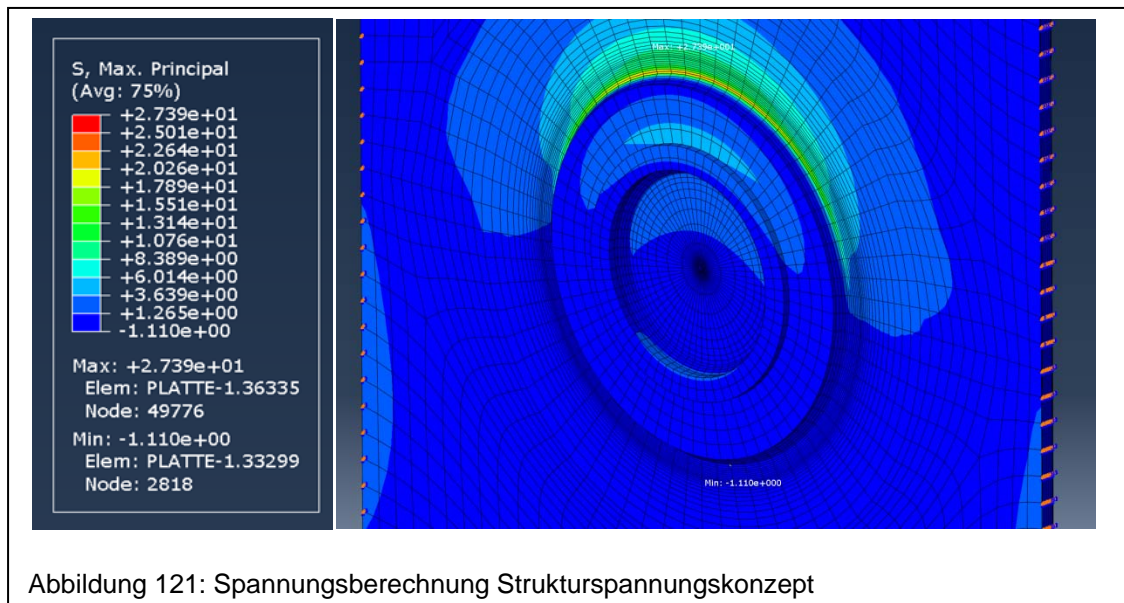


Abbildung 120: links, Volumenmodell und Randbedingungen, rechts FE-Modell - Strukturspannungskonzept.

Durch die Verwendung von linearelastischen Werkstoffmodellen kann in einem nachfolgenden Umrechnungsschritt auf die Prüflast umgewertet werden. Dazu wurde die Strukturspannung, welche die Beanspruchung mit der Einheitslast von 1000 N wiedergibt, entsprechend dem verifizierten T-Stoß-Modell berechnet. Dieser Wert wird mit dem berechneten Strukturspannungswert des Referenzknotens des T-Stoßes ins Verhältnis gesetzt und damit die Einheitslast zur Prüflast umgewertet.

Nachfolgend ist die Verteilung der maximalen Hauptspannung des Musterbauteils bei Einheitslast dargestellt für die Modellierung nach dem Strukturspannungskonzept dargestellt, Abb.121.



Demnach ergibt sich die maximale Hot-Spot-Spannung an der Schweißnaht zu:

Strukturspannung: $\sigma_{\text{HSmax}} = 17 \text{ MPa}$; $\tau_{\text{max}} = 0,16 \text{ MPa}$

Um gerechnet auf den Versuchsdemonstrator, des Musterbauteils, wurde aus diesen Ergebnissen die Prüflast ermittelt. Aus dem Ergebnis des Einheitslastfalls 1000 N und dem den Referenzwert der Hot-Spot-Spannung des T-Stoßes von 28 MPa extrapoliert für folgender Wert für die Prüflast im Experiment:

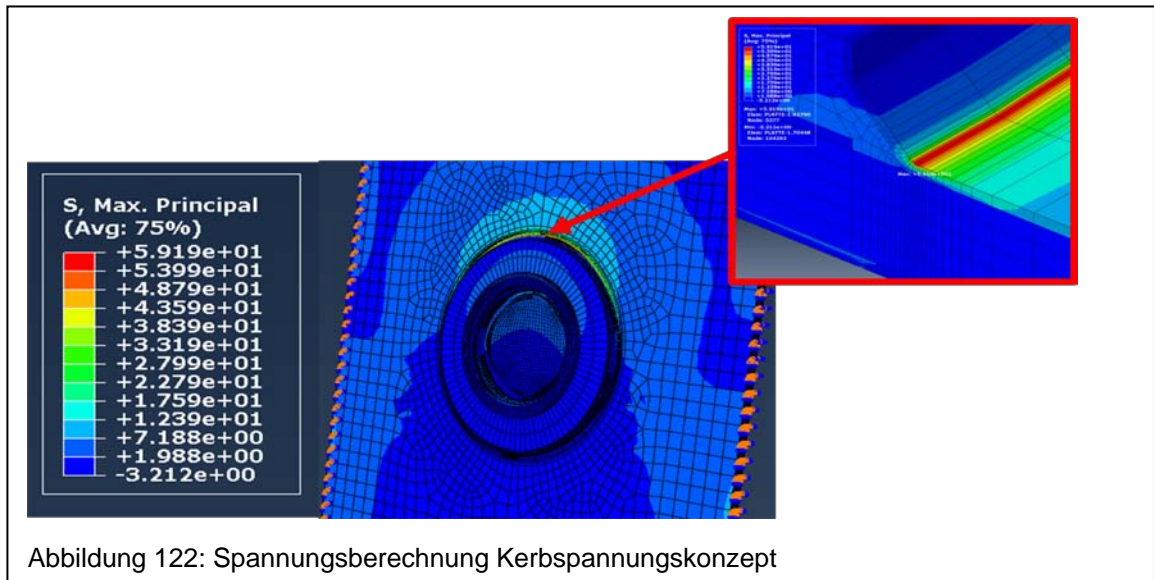
$$\sigma_{\text{HSmax,ref}} = 28 \text{ MPa} \Rightarrow \text{Prüflast } 1,7\text{kN}$$

Mit dieser Last soll im ein erwartetes Versagen bei 10^5 Lastwechsel erreicht werden.

In einer weiteren Variante wurde das Musterbauteil nach dem Kerbspannungskonzept aufgebaut. Hierbei wurde ein Übergangsradius von $R = 1 \text{ mm}$ im Schweißnahtübergang modelliert und an dieser Stelle die Kerbspannung als max. Hauptspannung ermittelt. Das FE-Modell und der Nahtübergang sind in Abb. 122 dargestellt.

Demnach ergibt sich die maximale Kerbspannung an der Schweißnaht zu:

Kerbspannung: $\sigma_{\text{Kmax}} = 59 \text{ MPa}$; $\tau_{\text{max}} = 0,16 \text{ MPa}$



8.4 Festigkeitsprüfung

Die ermittelte Prüflast ergibt sich aus der FE-Berechnung mit $F = 1,7 \text{ kN}$. Die Prüfung erfolgte entsprechend den Komponententests weggesteuert unter Wechselbelastung im Spannungsverhältnis von $R = -1$. Zur Ermittlung der Wegamplitude wurde die Prüflast als statische Last auf das Musterbauteil aufgebracht und der dazugehörige Maschinenweg bestimmt. Dies wurde mit 3 Wiederholungen durchgeführt und daraus die Wegamplitude für die Ermüdungsfestigkeitsprüfung als Mittelwert mit $\pm 2,2 \text{ mm}$ bestimmt. Für die definierte Prüflast wird ein Versagen des Musterbauteils bei ca. 10^5 Belastungszyklen erwartet. Dieser Wert spiegelt die mittlere Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{u}} = 50\%$ wieder. Daraus ergibt sich ein erwarteter Überlebensbereich zwischen $P_{\bar{u}} = 97,5\%$ und $P_{\bar{u}} = 5\%$ von ca. $7,5 \cdot 10^4$ und $1,7 \cdot 10^5$ Schwingspielen.

In der Ermüdungsfestigkeitsprüfung trat das erste Versagen nach ca. 4×10^5 Schwingspielen auf. Dieses zeigte sich als Anriss in der Decklage im vorhergesagten Bereich oberhalb des Ringes, Abb. 129. Um zu überprüfen, wie das Versagensverhalten im weiteren Verlauf der Belastung sich entwickelt, wurde der Versuch um weitere 4×10^4 Lastwechsel fortgesetzt. Dabei konnte keine Abnahme der gemessenen maximalen Prüfkraft festgestellt werden, auch als sich der Riss um den Ring erweiterte.



Abbildung 123: Riss am Demonstrator

Der Riss verlief nicht konstant am Nahtübergang, sondern wanderte teilweise auch durch die Decklage im näheren Umfeld des Ringes. An der linken Seite wies der Riss 2 größere Unterbrechungen auf, an der rechten Seite konnte nur eine Unterbrechung festgestellt werden, Abb. 124. Allerdings zeigte sich in einer abschließenden Untersuchung, dass auf der rechten Seite ein großer Anbindungsfehler der Decklage vorlag, roter Kreis Abb.124 rechts. Es konnte aber kein Einfluss der Fehlstelle auf die Messergebnisse wie den Kraftverlauf festgestellt werden. Der Unterbrochene Rissverlauf kann zum einen auf die Oberflächenfehler zurückgeführt werden, zu anderen auf die sich ändernde Belastung durch die aufgebrachte Biegung.



Abbildung 124: Rissverlauf im Demonstrator

Für die Untersuchungen zur näheren Betrachtung der Rissinitiierung und des Schädigungsverlaufes wurde der Bereich um den Drehring segmentweise zerlegt. In der Schädigungsanalyse konnte im Bereich der Verbindungsstelle lediglich das beobachtete Decklagenversagen bestätigt werden, ein Versagen im Bereich des Schaumkerns, vergleichend zu den Referenzversuchen am T-Stoß, konnte nicht festgestellt werden. Dies ist ein Grund wodurch höhere Lastspielzahlen als erwar-

tet erreicht wurden. Zudem wurde die Schweißnaht durch Schleifen durch den Hersteller leicht nachgearbeitet.

Zusammenfassung:

In Zusammenarbeit mit dem PbA wurde ein Leichtbau-Arbeitskorb für eine mobile Hubarbeitsbühne entwickelt und als Demonstrator für die Anwendung von AFS gefertigt. Dieser wurde zunächst mittels der FE-Simulation hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit ausgelegt. Zum Nachweis der Schweißnahtfestigkeit an der Verbindungsstelle von der Bodenplatte zum Drehring, als Aufnahmepunkt zum Hubarm, wurde ein entsprechender bauteilähnlicher Prüfkörper als Musterbauteil abgeleitet und eine geeignete Prüfvorrichtung entwickelt. Durch FE-Analysen des Musterbauteils und verifizierter Komponententest der Verbindungsknoten wie dem T-Stoß wurde die Prüflast für die Ermüdungsfestigkeitsversuche ermittelt. Basis für die Nachweisrechnungen bildete dabei das Strukturspannungskonzept.

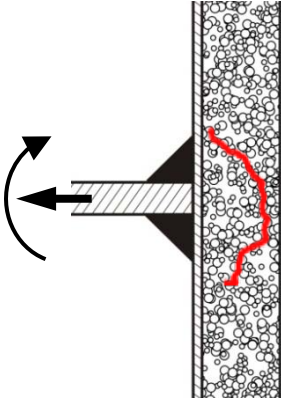
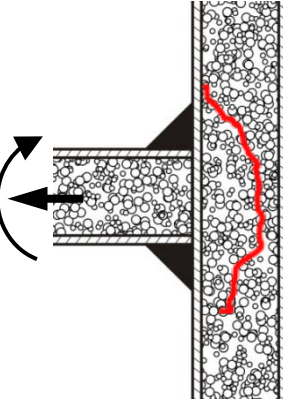
In der Ermüdungsfestigkeitsprüfung trat das erste Versagen nach ca. 4×10^5 Schwingspielen auf und zeigte damit eine Lebensdauer, die um das Vierfache höher war als die vorhergesagt. Zum einem trat das Erstversagen nicht im Schaumkern auf, wie in der Referenzverbindung des T-Stoßversuches zum anderen wurde die Schweißnaht durch Schleifen durch den Hersteller leicht nachgearbeitet wodurch wiederum die Kerbwirkung der Schweißnaht reduziert und die Lebensdauer erhöht wird. Weiterhin zeigt es, dass die Vorhersagemodelle weiter optimiert werden müssen, dies ist im beantragten Nachfolgeprojekt vorgesehen.

9 Gestaltungskatalog

Nachfolgend wurden alle Daten, die zur Anfertigung von Knotenverbindungen aus AFS benötigt werden in Tabellenform zusammengestellt. Es wurden Angaben zu Steifigkeiten und ertragbaren Spannungsamplituden, den geeigneten Verfahren, Zusatzwerkstoffen, sowie den Maßnahmen zu Nahtvorbereitung zusammengestellt. Zusätzlich sind Skizzen für die Herstellungsmaße hinterlegt.

Mit diesem Gestaltungskatalog können zukünftige Anwender die Fertigung der Bauteile vornehmen und bereits bei der Konstruktion die Struktur und Technologie berücksichtigen. Der Gestaltungskatalog orientiert sich an den Vorgaben des FKM Richtlinie und wurde dementsprechend um die o.g. Punkte erweitert.

Nr.	Konstruktives Detail	Beschreibung	FAT	Ausführung	Verfahren / Schweißparameter
213 (212)		Querbelastete Stumpfnah; In Wannennlage geschweißt; Riss am Schweißnahtübergang Nahtwinkel > 50°	25 (36)	Kanten gefräst	MIG - CMT; Zusatz AlMg4,5 Mn; Schweißstrom = 74 A; Spannung = 8,2V; Schweißgeschwindigkeit = 0,565 m/min
217		Querbelastete teildurchgeschweißte Stumpfnah; Spannung im Schweißnahtquerschnitt	12	Kanten gefräst, Auf Nullspalt und gleiche Sandwichhöhe achten	Laser gepulst; Zusatz = AlMg4,5Mn; Schweißleistung = 3850 W; Pulsdauer = 7ms; Pulspause = 10 ms; Schweißgeschwindigkeit = 1,98 m/min
225 (215)		Querbelastete Stumpfnah (Dreiblechverbindung); In Wannennlage geschweißt; Riss am Schweißnahtübergang	22 (25)	Kanten gefräst, Schaum ausgefäst, artgleiches Inlay, Breite 4 mm	Laser gepulst; Zusatz = AlMg4,5Mn; Schweißleistung = 4700 W; Pulsdauer = 7ms; Pulspause = 10 ms, Schweißgeschwindigkeit = 1,98 m/min
225		Querbelastete Stumpfnah (Dreiblechverbindung); In Wannennlage geschweißt; Riss ausgehend von unten an der Inlayoberkante	22	Kanten gefräst, Schaum ausgefäst, artgleiches Inlay, Breite 12 mm	Schulterdurchmesser = 12 mm; Pinlänge = 1 mm; Drehzahl 1000-1500 /min; Schweißgeschw. 200-500 m/min;
225 (215)		Querbelastete Stumpfnah (Dreiblechverbindung); In Wannennlage geschweißt; Riss am Schweißnahtübergang	22 (25)	Kanten gefräst, Schaum ausgefäst, artgleiches Inlay, Kanten gerundet, Radius 1 mm; Br. 12 mm	Schulterdurchmesser = 12 mm; Pinlänge = 1 mm; Drehzahl 1000-1500 /min; Schweißgeschw. 200-500 m/min;
					() Klammerwerte, alternative Einordnungsmöglichkeit

Nr.	Konstruktives Detail	Beschreibung	FAT	Ausführung	Verfahren / Schweißparameter
n.e.		Riss im Schaumkern		AFS / Blech 4 mm, Kanten gefräst	Schweißprozess CMT; Zusatz AlMg4,5 Mn; Schweißstrom = 140 A; Spannung = 13V; Schweißgeschwindigkeit = 0,5 m/min
n.e.		Riss im Schaumkern		AFS / AFS, Kanten gefräst	Schweißprozess CMT; Zusatz AlMg4,5 Mn; Schweißstrom = 108 A; Spannung = 10,1V; Schweißgeschwindigkeit = 0,5 m/min
n.e. - derzeit nicht einzuordnen					

10 Zusammenfassung

In diesem Projekt sollten erste Untersuchungen für die Anwendung von AFS in Schweißkonstruktionen erarbeitet werden, um so dem Konstrukteur ein Hilfsmittel bereitzustellen.

Es konnten Möglichkeiten für das Aufschäumen von AFS erarbeitet werden, die es ermöglichen, kleinere Bauteile mittels einfacher meist vorhandener Anlagen wie Öfen aufzuschäumen. Für größere Bauteile ist allerdings eine spezielle Anlagentechnik vorzusetzen. Sie wäre für die meisten KMU wahrscheinlich wirtschaftlich nicht begründet. Mittels einer geeigneten Analyseverfahren konnten die Eigenschaften des Schaumes sowie die Porenstruktur von selbst erzeugtem AFS und von gekauftem AFS verglichen werden.

Es konnten für verschiedene Fügeknotten unterschiedliche Schweißmöglichkeiten erarbeitet werden. Zum Einsatz kamen hier das MSG-Schweißen, das Laserstrahlschweißen sowie das Rührreißschweißen. Es wurden I-Stoßverbindungen im ungeschäumten und im geschäumten Zustand hergestellt sowie auch T-Stoßverbindungen mit MSG Schweißen gefügt. Es traten, je nach Herstellungszustand, unterschiedliche Schwierigkeiten auf wie zum Beispiel beim Laserstrahlschweißen die Herstellungstoleranzen und das unterschiedliche Reflexionsverhalten der Oberfläche. Alle diese Probleme ließen sich lösen und es wurden Parametersätze entwickelt, mit denen sich die verschiedenen Knotenformen herstellen lassen.

Mit quasistatischen Untersuchungen wurden zunächst die Eigenschaften wie Zugfestigkeit des Schaumes und der Decklagen sowie die Biegesteifigkeit des Sandwiches ermittelt. Diese Daten waren der Ausgangspunkt für die weiteren statischen und schwingenden Untersuchungen sowie auch relevant für die FE-Simulationen. In einer 4-Punkt-Biege-Prüfung wurden die statischen Eigenschaften des jeweiligen Fügeknottes ermittelt. Bei diesen Tests konnten auch erste Optimierungen für die Herstellung der Knoten erarbeitet werden. Mit Hilfe dieser Daten wurden die schwingenden Prüfungen vorbereitet. Um diese durchführen zu können musste eine geeignete Vorrichtung konstruiert und gebaut werden. Mit dieser Vorrichtung war es möglich, die I-Stoßverbindungen aus geschäumten AFS in einem wechselnden 4-Punkt-Biege-Versuch zu prüfen. Für die T-Stoß Verbindungen sollte diese Konstruktion weiterentwickelt werden.

Das Ziel der Schwingungsuntersuchungen war es, die Belastung so zu wählen, dass das Versagen der Verbindungen bei ca. 10^5 Lastwechseln eintritt. Damit sollte dann ein erster Versuch des Nachweises mit den vorhandenen Regelwerken wie Eurocode 9 und der FKM-Richtlinie vorgenommen werden. Dies konnte allerdings nur für die I-Stoß Verbindungen erbracht werden. Die T-Stoßverbindungen wiesen eine geringe Schwingfestigkeit auf, was weitere

Untersuchungen verlangt. Aus diesen Ergebnissen wurde ein Gestaltungskatalog der AFS Verbindungen erstellt.

Ein weiteres großes Gebiet dieses Forschungsvorhabens waren auch die Simulationsgrundlagen des AFS bereitzustellen. Zu Beginn wurden mit den experimentell ermittelten Daten die mechanischen Eigenschaften für den Schaum und die Decklagen festgelegt und in den Finiten Elementen hinterlegt. Durch diese Vorgehensweise war im Anschluss möglich verschiedene Fehler im Schaum und unterschiedliche Lastverteilungen in dem Sandwich zu modellieren und zu simulieren. Anschließend wurden mit FEM Gestaltungsvarianten des Demonstrators analysiert und der Nachweis für eine schwingende Belastung im Vorfeld erbracht. Mit diesen innerhalb dieses Forschungsvorhabens erarbeiteten Methoden hat ein Konstrukteur den Vorteil, geschweißte Bauteile aus AFS ohne aufwendige Tests zu gestalten.

In einer abschließenden Untersuchung wurde ein Demonstrator von einem KMU gefertigt, und mit einer schwingenden Belastung geprüft. Das vorausgesagte Versagen bei 10^5 Lastwechseln wurde um das 4-fache übertroffen, was die Wirksamkeit der Methode bestätigt.

Das Forschungsvorhaben zeigte die grundsätzliche Eignung von AFS für schwingend belasteten Schweißkonstruktionen. Mit dem Gestaltungskatalog wurde ein einfaches Hilfsmittel für ihre Anwendung bereitgestellt.

Das Forschungsziel wurde somit erreicht.

Das IGF-Vorhaben 17620 BG der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

11 Quellenverzeichnis

11.1 Literaturverzeichnis

- 1 Hipke, T., Lange, G., Poss, R.: „Taschenbuch für Aluminiumschäume“, Aluminium-Verlag Düsseldorf, Düsseldorf 2007
- 2 Seeliger, H.-J.: „Herstellung und Einsatz von Aluminiumschaumsandwich AFS“, Vortrag Cottbuser Leichtbauworkshop 2009
- 3 Burzer, J.: „Beitrag von Einsetzbarkeit von Metallschäumen in der Verkehrstechnik“, Universität Bayreuth, Dissertation 2000
- 4 Horn, H.: “Friction Stir Welding of Aluminium Foam Materials”, Proc. Intern. Conf. "Joining Techn. of Dissimilar Materials and Structural Integrity Problems of so Jointed Structures" Ljubljana 12.07.2001 p107-112
- 5 Sitte, G.: „Untersuchungen zur schweißtechnischen Verarbeitung von Al-Sandwich-Verbunden“; IGF-Nr.: 13.142 B / DVS-Nr.: 04.030
Schlußbericht für den Zeitraum: 01.03.02 bis 29.02.04
- 6 Bernhard, T.: „Verstärkung von Blechstrukturen mit Aluminiumschaum unter besonderer Berücksichtigung der Fügetechnik“, Universität Bayreuth, Dissertation 2003
- 7 Otto, A.: „Fügen von Schaum“, DGM-Fortbildungsseminar Zellulare Metalle 19./20.04.2007, Erlangen
- 8 Hollunder, S., Esderts, A., Blaschke, T.: „Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben: Wirtschaftlicher Leichtbau durch Rührreißschweißen“, 2005
- 9 Horn, H.: „Neue Entwicklungen beim Reißschweißverfahren“, DVS Jahrbuch 2002, DVS-Verlag
- 10 Sviridov, A.: „Leichtbau mit Aluminiumschaumsandwich – Prozessketten zur Herstellung von Bauteilen“, BTU Cottbus, 2011
- 11 Ströhla, Winter, Kuhn: „Numerische Ermittlung elastischer Eigenschaften von Metallschäumen mit Polyeder-Einheitszellen“, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 31, S.444-446, 2000
- 12 Haders, H.:“Ermüdung von Aluschaum“, Dissertation, Der Andere Verlag, Tönning, 2005
- 13 Luxner, Stempel, Pettermann: “Finite element modeling concepts and linear analyses of 3D regular open cell structures”, Journal of materials science 40, S.5859-5866, 2005

- 14 Foroughi, Degischer, Kottar: "Simulation of deformation and damage of non-uniform cellular aluminium. Metalfoam", 1.-4.Sept., Bratislava, 2009
- 15 Foroghi, Kriszt, Degischer: „Simulation des Verformungsverhaltens von porösen Metallen“, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 31, S. 451-454, 2000
- 16 Degischer, Kottar, Foroughi: "Testing and Simulation of Tensile Deformation of foamed AlSi10 with Skin", Vortrag: International Conference on Aluminium Alloys (ICAA11), Aachen, Germany; 22.09.2008 - 28.09.2008; in: "*Aluminium Alloys*", Wiley-VCH GmbH, Volume 2, ISBN: 978-3-527-32367-8; S. 2207 - 2214, 2008
- 17 Degischer, Maire, Simanick: "Tensile Deformation and Cracking Sequence of Foamed AlSi10 with Skin", in "*MetFoam 2007 - Porous Metals and Metallic Foams*", DEStech Publications, Inc., ISBN: 978-1-932078-28-2, S. 39 - 42, 2008
- 18 Neugebauer, Wagner: „Strukturanalyse von Metallschäumen“, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 31, S. 462-464, 2000
- 19 N.N.: „Entwicklung und Anwendung von Werkstoffmodellen zur Beschreibung des Verformungs- und Versagensverhaltens von Aluminiumschäumen“, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 31, S. 531-534, 2000
- 20 Sirichai Torsakul: „Modellierung und Simulation eines Verbunds von Sandwichplatten zur Entwicklung einer mechanischen Verbindungstechnik“, Dissertation, 26.03.2007 Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- 21 Rausch, G.: „Fominal Eigenschaftsübersicht Konstruktionsrichtlinien“, Version 1.4, Fraunhofer Institut Fertigungstechnik Materialforschung, IFAM
- 22 Hobbacher, A.: „Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile“, IIW-Dokument XIII-1539-96/XV-845-96, DVS-Verlag 1997
- 23 Hänel, B.: „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl“, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen; VDMA-Verlag 2003
- 24 Viehweger, B., Sviridov, A.: „Aluminiumschaum für Schienenfahrzeuge, Leicht, crashsicher und gut recycelbar“, Automotive Materials 03, Seite 30-33, 2007

- 25 FKM-Richtlinien; 6. Auflage 2012; VDMA Verlag (Forschungskuratorium Maschinenbau e. V.)

11.2 Normen

DIN 1912-4 Zeichnerische Darstellung; Schweißen, Löten; Begriffe und Benennungen für Lötstöße und Löt Nähte 1981-05

DIN 53293 Prüfung von Kernverbänden 1982-02

DIN EN 1999-1 Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken 2007

DIN EN ISO 9692-1 Schweißen und verwandte Prozesse – Arten der Schweißnahtvorbereitung – Teil 1: Lichtbogenhandschweißen, Schutzgasschweißen, Gas-schweißen, WIG-Schweißen und Strahlschweißen von Stählen Deutschfassung 2013-12

DIN EN ISO 10042 Schweißen – Lichtbogenschweißverbindungen an Aluminium und seinen Legierungen- Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten; 2006-02

DIN EN ISO 25239-2Rührreißschweißen – Aluminium Teil 2: Ausführungen der Schweißverbindungen 2012-03

11.3 Software

[ADIV14] Autodesk Inventor Professional, Version 2014, San Rafael, Kalifornien: Autodesk, Inc. 2013.

[ADME14] AutoCAD Mechanical, Version 2014, San Rafael, Kalifornien: Autodesk, Inc. 2013.

[ANSY13] ANSYS Workbench 2.0 Framework, Version 14.5.7, Canonsburg, Pennsylvania: ANSYS, Inc. 2013.

Veröffentlichungen

Grosse Schweißtechnische Tagung 2014, 15. Und 16. September Berli; DVS-Berichte Band 306, ISBN 978-3-945023-03-7; Beitrag: „Einsatz von Aluminiumsandwiche in Schweißkonstruktion“; S 112 - 118

Schweißen und Schneiden, 68 Jahrgang 3/2016, „Einsatz von Aluminiumschaum-Sandwich-Bauteilen in Schweißkonstruktionen“ S.106-115

A Anhang Kapitel 5

A.1 Schweißvariationen MSG Schweißen

A.1.1 Ungeschäumtes AFS

Variation - Erstversuche-ungeschäumt, abgelesene Werte	0-U-1	0-U-2	0-U-3	0-U-4	0-U-5	0-U-9	0-U-10	0-U-11	0-U-12
DRAHTVORSCHUB [m/min]	14,7	13,9	12,6	12,7	13,0	12,2	12,5	12,9	13,1
SN-LÄNGE [mm]	60	60	55	80	80	80	80	80	80
STROMSTÄRKE [A]	95	94	95	92	89	87	88	90	133
SPANNUNG [V]	16,8	17,1	16,4	16,4	15,9	17,1	16,9	16,9	41381,0
Abstand-Stromkontaktröh- Werkstückoberfläche [mm]	12	12	12	12	12	12	12	12	12
LICHTBOGENKORREKTUR [%]	0	0	0	0	0	30	30	25	30
Dynamikkorrektur	1	2	3	4	5	0	0	0	0
BRENNERVORSCHUB [mm/min]	565	565	565	565	565	500	500	550	550

Variation - Erstversuche- ungeschäumt, eingestellte Werte	0-U-1	0-U-2	0-U-3	0-U-4	0-U-5	0-U-9	0-U-10	0-U-11	0-U-12
DRAHTVORSCHUB [m/min]	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,5	6,5	8,1
SN-LÄNGE [mm]	80	80	80	80	80	80	80	80	80
STROMSTÄRKE [A]	111	111	111	111	111	111	113	113	98
SPANNUNG [V]	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,2	10,2	12,4
Abstand-Stromkontaktröh- Werkstückoberfläche [mm]	12	12	12	12	12	12	12	12	12
LICHTBOGENKORREKTUR [%]	0	0	0	0	0	30	30	25	30
Dynamikkorrektur	1	2	3	4	5	0	0	0	0
BRENNERVORSCHUB [mm/min]	565	565	565	565	565	500	500	550	550

A.1.2 geschäumts Sandwich

Variation - Taktart+ZusatzWS, eingestellte Werte	1-S-1 2-Takt AlMg5Mn	1-S-2 4-Takt AlMg5Mn	1-S-3 2-Takt AlSi5
DRAHTVORSCHUB [m/min]	3,3	3,2	4,1
SN-LÄNGE [mm]			
STROMSTÄRKE [A]	74	74	73
SPANNUNG [V]	8,2	8,2	12,1
Abstand-Stromkontaktröh- Werkstückoberfläche [mm]	12	12	12
LICHTBOGENKORREKTUR [%]	0	0	0
Dynamikkorrektur	1	1	1
BRENNERVORSCHUB [mm/min]	565	565	565
EINBRAND-BREITE [mm]			
EINBRAND-TIEFE [mm]			
SN-FLÄCHE [mm ²]			
Decklagenverhältnis: b/h []			

Variation - Taktart+ZusatzWS, abgelesene Werte	1-S-1(D)	1-S-1(W)	1-S-2(D)	1-S-2(W)	1-S-3(D)	1-S-3(W)
DRAHTVORSCHUB [m/min]	9,3	9,7	9,5	9,6	9,6	9,1
SN-LÄNGE [mm]						
STROMSTÄRKE [A]	69	69	70	70	75	77
SPANNUNG [V]	14,5	14,1	14,5	14,1	14,6	14,5
Abstand-Stromkontaktrrohr- Werkstückoberfläche [mm]	12	12	12	12	12	12
LICHTBOGENKORREKTUR [%]	0	0	0	0	0	0
Dynamikkorrektur	1	1	1	1	1	1
BRENNERVORSCHUB [mm/min]	565	565	565	565	565	565
EINBRAND-BREITE [mm ²]						
EINBRAND-TIEFE [mm ²]						
SN-FLÄCHE [mm ²]						
Decklagenverhältnis: b/h []						

Versuch:	0-S-P		0-S-1		0-S-2		0-S-3		0-S-4		0-S-5		0-S-6		0-S-7	
FRONIUS VR7000CMT	eingest.	abgel.	eingest.	abgel.	eingest.	abgel.	eingest.	abgel.	eingest.	abgel.	eingest.	abgel.	eingest.	abgel.	eingest.	abgel.
DRAHTVORSCHUB [m/min]	2,2	6,6	3,2	9,5	3,2	10,2	3,2	9,6	3,2	9,7	3,2	9,3	3,2	7,8	3,2	7,9
SN-LÄNGE [mm]	60		60		60		190		60		60		60		190	
FRONIUS TRANSPULS SYNERGIC 3200 CMT																
STROMSTÄRKE [A]	52	50	74	71	74	71	74	71	74	70	74	70	74	70	74	70
SPANNUNG [V]	27,6	10,8	8,2	14,2	8,2	13,8	8,2	13,8	7,6	14,2	7,6	13,8	7,6	13,8	7,6	14,4
LICHTBOGENKORREKTUR [%]	0		0		0		0		0		0		0		0	
DYNAMIKKORREKTUR	0		0		0		0		0,5		0,5		0,5		0,7	
STARTSTROM is [%]	120		120		120		120		120		120		120		120	
ENDSTROM [%]	130		130		130		130		130		130		130		130	
FRONIUS FTV 50 MIT FRC-40																
SCHWEISSRICHTUNG	stechend, 10°		stechend, 10°		stechend, 10°		stechend, 10°		stechend, 10°		stechend, 10°		stechend, 10°		stechend, 10°	
ANFAHRTVERZÖGERUNG [s]	1		1		1		1		1		1		1		1	
ANFANGSSTROM [s]	1		1		1		1		1		1		1		1	
ENDSTROM [s]	1		1		1		1		1		1		1		1	
BRENNERVORSCHUB [mm/min]	580	580	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565
ENDKRATERFÜLLUNG [s]	0		0		0		0		0		0		0		0	
BRENNEREINSTELLUNGEN / BAUTEILE																
ABSTAND SKR - BAUTEIL [mm]	12		12		12		12		12		12		12		12	
SPALTBREITE	<< 1mm		<< 1mm		<< 1mm		<< 1mm		<< 1mm		<< 1mm		<< 1mm		<< 1mm	
SCHWEISSNAHTFLÄCHE [mm ²]	5,106		15,024		13,653		14,361		15,882		12,672		13,340		12,439	
							14,443						14,919			
							13,109						12,618			

A.2 Schweißvariationen Laserstrahlschweissen

A.2.1 Ungeschäumt

Versuch	W Leistung	mm/s Vorschub	ms Pulszeit	ms Pulspause	Hz Pulsfrequenz	m/min Drahtvorschub	mm Defocusierung	Ungeschäumt	Schutzgas	Zusatzwerkstoff
1x	6000				45			Deckschicht nicht durchgeschweißt		
2x	8000							Aufgeschäumte Schweißnaht		
3x	6000							Schweißnaht nur aufgesetzt		
4x	6500							Deckschicht nicht durchgeschweißt		
5x	6600							falsche Roboterprogrammierung -> Kein ZW-> Heißriss		
6x	6600							Aufgeschäumte Schweißnaht		
7x	6200									
8x	6300									
9x	6400							Schweißnaht sieht gut aus, aber nicht durchgeschweißt	Ar 15l/min	
10x	6500									
11x	6600									
12x	6650									
13x	6650							Aufgeschäumte Schweißnaht		
14x	6600									
15x	6600									
16x	6500							gut		
17x	6500					2,2		Aufgeschäumte Schweißnaht	Ar 20l/min	
18x	6500							Aufgeschäumte Schweißnaht	Ar 20l/min	
19x	6300							Aufgeschäumte Schweißnaht	Ar 15l/min	
20x	6200							Aussetzer des Zusatzdrahtes -> Draht hat geeiert	Ar 15l/min	
21x	6200							unregelmäßige Raupengeometrie		
22x	6200							unregelmäßige Raupengeometrie (Zusatzdrahtprobleme)		
23x	6200							Zusatzdraht hat geeiert oder kam garnicht -> Heißriss		
24x	6200							Blindnaht -> unregelmäßige Naht (Zusatzdraht)		
25x	6200							Blindnaht-> besser! Nur kleine unregelmäßigkeiten der Raupen		
26x	6200							Blindnaht -> wieder Probleme mit Zusatzdraht (Kugelbildung vom ZWS)		
27x	6200									
28x	6200							Blindnaht -> gutes Schweißnahtergebnis		
29x	6200									
30x	6200									
31x	6200							wieder Stoß -> Kugelbildung und unregelmäßige Schweißnaht		
32x	6200							wie bei 31 -> Vermutung: zuviel Zusatzdraht		
33x	6200					1,6		unregelmäßige Schweißnaht		
34x	6200					1,2		Blindnaht -> unregelmäßige Schweißnaht		
35x	6200					1,2		Blindnaht -> Drahtstellung wurde verändert -> bessere Schweißnaht		
36x	6200					2,2		Blindnaht -> gut, aber Raupen sind leicht versetzt		
37x	6200							Blindnaht -> gutes Schweißnahtergebnis		
38x	6200							wieder Stoß -> gutes Schweißnahtergebnis		
39x	6300							wieder gutes Ergebnis mit geringer Spritzerbildung		
40x	6400					1,8		Anfang gut, später aufgeschäumt		
41x	6350							sehr gut		
42x	6400							Anfang gut, später aufgeschäumt		
43x	6350							Anfang gut, später aufgeschäumt		
44x	6300					2,2		Anfang gut, später aufgeschäumt		
45x	6250							Anfang gut, später aufgeschäumt		
46x	6350					1,8		Anfang gut, später aufgeschäumt		
47x	6250	30	7	10	60	2,2	13	nicht aufgeschäumt, aber unregelmäßige Nahtgeometrie		AlSi5
48x	6200					2,2		nicht aufgeschäumt, aber unregelmäßige Nahtgeometrie		
49x	6200							Aufgeschäumte Schweißnaht		
50x	6150							gute Schweißnahtgeometrie		
51x	6200							gut, aber mit Spritzern		
P1x	6150							eine Seite okay, aber mit Kugelbildung/ ander Seite aufgeschäumt		
52x	6000							gut, würde aufgebrochen -> Schweißnaht kann tiefer		
53x	6050							gut		
54x	6100							nicht aufgeschäumt, aber unregelmäßige Nahtgeometrie		
P2x	6050							beide Seiten am Anfang gut, später aufgeschäumt		
55x	6050							gute Schweißnaht, aufgebrochen -> kann tiefer	Ar 20l/min	
56x	6100					1,6		Anfang und Ende gut, in der Mitte aufgeschäumt -> vielleicht wegen Spaltungenaugkeiten		
57x	6100							okay, aber mit Auswürfen		
58x	6150							okay, aber keine schöne Schweißnahtgeometrie, vielleicht zuviel Zusatzdraht		
59x	6100							besser als 58x		
60x	6150							ab der Hälfte kam kein Draht, Kugel am Zusatzdraht		
61x	6150							ab der Hälfte kam kein Draht, Kugel am Zusatzdraht		
62x	6150							Blindnaht, ab der Hälfte kam kein Draht, Kugel am Zusatzdraht		
63x	6150							Blindnaht, ab der Hälfte kam kein Draht, Kugel am Zusatzdraht		
64x	6150							Blindnaht, ab der Hälfte kam kein Draht, Kugel am Zusatzdraht		
65x	6150							Blindnaht, ab der Hälfte kam kein Draht, Kugel am Zusatzdraht		
66x	6150							Blindnaht, ab der Hälfte kam kein Draht, Kugel am Zusatzdraht		
67x	6150							Draht kommt eher, keine Kugel mehr am Zusatzdraht		
68x	6150							gut, Aufgebrochen, Hohlräume in der Mitte		
69x	6200							gut, Aufgebrochen, noch mehr Hohlräume in der Mitte		
70x	6150							Blindnaht 400mm, gut		
71x	6200							Blindnaht 400mm, es kam kein Zusatzdraht		
72x	6200							gut		
73x	6250							gut		
74x	6300							gut		
75x	6400							gut		
76x	6450							gut (Neustart Laser)		
77x	6450							gut		
78x	6500					1,8		komplett aufgeschäumt		
79x	6475							Anfang gut, später aufgeschäumt		
80x	6450							Draht kam nicht		
81x	6450							gute Schweißnaht		
82x	6475							Anfang gut, später aufgeschäumt		
P3xa	6050							Anfang gut, später aufgeschäumt		
P3xb	6000							Anfang gut, später aufgeschäumt		
P4xa	5950							Anfang gut, später aufgeschäumt		
P4xb	5900							nicht aufgeschäumt, aber Auswürfe		
P5xa	5875							nicht aufgeschäumt, aber Auswürfe		
P5xb	5875							Anfang gut mit Auswürfen, später aufgeschäumt		
P6xa	5825							gut		
P6xb	5825							gut		

Fortsetzung

Versuch	W Leistung	mm/s Vorschub	ms Pulszeit	ms Pulsepause	Hz Pulsfrequenz	m/min Drahtvorschub	mm Defocuserstellung	Ungeschäumt	Schutzgas	Zusatzwerkstoff
83x(52x)	6400							komplett aufgeschäumt		
84x(53x)	5500							komplett aufgeschäumt		
85x(54x)	5000							gut		
86x(55x)	5100							gut		
87x(56x)	5200							gut		
88x(57x)	5300							gut		
89x(58x)	5400							komplett aufgeschäumt		
90x(59x)	5350							gut		
91x(60x)	5375					1,8		gut am Anfang, dann aufgeschäumt		
92x(61x)	5350							gut am Anfang, dann aufgeschäumt		
93x(62x)	5325							gut am Anfang, dann aufgeschäumt		
94x(63x)	5300							gut		
95x(64x)	5300							teilweise aufgeschäumt!? -> Deckblechdicke variiert, dünner als sonst		
96x(65x)	5300							gut		
97x(66x)	5300							gut		
98x(67x)	5300							gut		
99x(68x)	7000	33	10	7	60		13	Durchschweißen: nicht durch, mehr Leistung	Ar 20l/min	AlMg4,5Mn
100x(69x)	7200							Durchschweißen: an wenigen Stellen durch, mehr Leistung		0,8mm
101x(70x)	7400							Durchschweißen: an wenigen Stellen durch, mehr Leistung		Durchmesser
102x(71x)	7700						3,2	Durchschweißen: an wenigen Stellen durch, mehr Leistung		
103x(72x)	8000							Durchschweißen: "gut"-> aufgeschäumte und Durchgeschweißte Schweißnaht		
104x	5300							gut, Raupen etwas versetzt		
105x	5300							gut und später aufgeschäumt		
106x	5300							gut, eine Probe		
107x	5300							gut, eine Probe		
108x	5300							gut, eine Probe		
109x	5300					1,8		gut, eine Probe		
110x	5300							gut, eine Probe		
111x	5300							gut		
112x	5300							Aufgeschäumte Schweißnaht		
114x	5300							gut		
115x	5300							gut, eine Probe		
116x	5300							gut, eine Probe		

A.2.2 Geschäumt

Versuch	W Leistung	mm/s Vorschub	ms Pulszeit	ms Pulspause	Hz Pulsfrequenz	m/min Drahtvorschub	mm Defokussierung	Geschäumt	Schutzgas	Zusatzwerkstoff
1	8000							zuviel Leistung -> Löcher		
2	6000					3,2		besser, aber immer noch zuviel Leistung		
3	5500					2,8		gut aber mit unregelmäßigen Stellen (Schliff)		
4	5500						3			
5	5500							sehr unregelmäßig		
6	5500				45					
7	5700							kein gleichmäßiges Schuppenbild		
8	5700							gutes Ergebnis -> Schliff	Ar 15l/min	
9	6000									
10	6300									
11	6500							starker Einbrand, zuviel Leistung		
12	6200			10	60			starker Einbrand, zuviel Leistung		
13	5900							starker Einbrand, zuviel Leistung		
14	6100				45			zu wenig Überlappung wegen Pulsfrequenz		
15	5500							gute Schweißnaht, jedoch zuviele Poren		
16	5700							zuviel Leistung -> Löcher		
17	5600							reinigung mit Alc, gute Schweißnaht -> Schliff machen	Ar 20l/min	
18	5600							ohne Alc, kleine unregelmäßigkeiten und Poren, sonst gut		
19	5550							sehr gute Schweißnaht -> Schliff machen		
20	5550							gute Schweißnaht, jedoch zuviele Poren	He 20l/min	AISI5 mit 0,8 mm Durchmesser
21	5550							gute Schweißnaht		
22	5600							gute Schweißnaht		
23	5600							Werte wie bei 17, gutes Ergebnis		
24	5450							Werte wie bei 17, jedoch wegen schlechter Werstoffoberfläche (durch Temp. Vom Aufschäumen) Durchbrand		
25	5450							sehr gute Schweißnaht, zum Schluss unregelmäßig	Ar 20l/min	
26	5450							gute Schweißnaht		
27	5500							unregelmäßige Schweißnaht, Grund unklar		
28	5550							sehr gute Schweißnaht		
29	5700							sehr gute Schweißnaht		
30	5800									
31	5900						13	Schweißnaht nicht tief genug		
32	6000									
33	6200					2,2		zuviel Leistung, Durchbrand		
34	6100							gute Schweißnahtgeometrie		
35	6200							gut, aber teilweise Durchbrand		
36	6100							es kam kein Zusatzdraht, Durchbrand		
37	6100							Durchbrand	He 20l/min	
38	6000							Durchbrand, Vermutung Draht manchmal nicht im Fokus, da zu weich		
39	6000							zuviel Leistung -> Durchbrand		
40	5450							zuviel Leistung -> Durchbrand		
41	5450							Blindnaht: gute Schweißnahtgeometrie, Schwarze Schicht auf Naht		
42	5200							immernoch Durchbrand, aber weniger		
43	5100							gute Nahtform, schwarze Schicht		
44	5450							Blindnaht: mit 10 l/min, gute Naht, Schwarze Schicht	He 10l/min	
45	5450							Blindnaht: kein Unterschied zu Versuch 44	Argon 20 l/min	
46	5450	30	7					Blindnaht: kein Unterschied zu Versuch 44	Argon 10 l/min	
47	5450							Blindnaht: keine schwarze schicht, schlechte Nahtform	ohne	
48	5150							teilweise Durchbrand		
49	5100							Ergebnis wie bei 43		
50	5100							nur Blech: gute Nahtform, aber zu sehr durchgeschweißt		
51	5000							nur Blech: gute Nahtform und Wurzel		
52	5100							Schweinaht okay, aber unregelmäßig		
53	4600			10	60			Blindnaht, Durchbrand -> zuviel Leistung		
54	4400							Blindnaht, sehr unregelmäßige Schweißnaht		
55	4200						0	Blindnaht, wieder unregelmäßig, Vermutung zu kleiner Fokus		AlMg4,5Mn
56	4200							Blindnaht, wieder unregelmäßig		0,8 mm Durchmesser
57	4400						5	Blindnaht, wieder unregelmäßig + Durchbrand		
58	4400							Blindnaht, immernoch etwas unregelmäßig		
59	4600						7,5	Blindnaht, etwas unregelmäßig + kleine Einbrände		
60	4600									
61	4600					1,9				
62	4400									
63	4600							unregelmäßige Raupenform der Schweißnaht		
64	4400									
65	4500									
66	4500									
67	4500									
68	4500						10	Blindnaht, gute Durchschweißung, unregelmäßige Raupen		
69	5000							Blindnaht, Durchbrand -> zuviel Leistung		
70	4700							Blindnaht, wieder sehr unregelmäßige Schweißraupen	Argon	
71	4700							Blindnaht, Zusatzdraht hat geeiert -> unregelmäßige Schweißnaht	20 l/min	
72	4700							Blindnaht, wieder unregelmäßig -> Vermutung, Zusatzwerkstoff ungeeignet		
73	4700							Blindnaht, optisch sehr gute Schweißnaht		
74	5500							wieder Stoß, Durchband		
75	5300							Durchband		
76	5100					1,2		erste Hälfte gut, später kleine Durchbrände		
77	5400							gut, Schweißnaht etwas unregelmäßig		
78	5500							kleine Vertiefungen in der Schweißnaht -> vielleicht zuviel Leistung,		
79	5550						13	sonst gut		
80	6000							Anfang gut, später kleine Vertiefungen und etwas Einbrand		
81	5450							starke Durchbrände -> zuviel Leistung		AISI5 mit 0,8 mm Durchmesser
82	5450							Durchbrände, vielleicht wegen der fehlerhaften WS-oberfläche (durch Temp beim Aufschäumen)		
83	5400							gut, aber etwas unregelmäßig, vielleicht wegen Drahtzufuhr		
84	5500							gut, aber Schweißnaht nicht tief genug -> mehr Leistung		
85	5450							Druchbrände-> zuviel Leistung		
P1	5450							gutes Ergebnis		
P2	5450							beide Seiten gut		
P3a	5450							beide Seiten gut		
P3b	5500							gut		
P4	5450							Anfang gut, später Einbrände		
								beide Seiten gut		

Fortsetzung

Versuch	W Leistung	mm/s Vorschub	ms Pulszeit	ms Pulspause	Hz Pulsfrequenz	m/min Drahtvorschub	mm Defokusierung	Geschäumt	Schutzgas	Zusatzwerkstoff
Vier-Punkt-Biege-Versuch versagt. Grund, geometrische Kerben, wegen nicht Durchschweißung und metallurgische Kerben, wegen Härteunterschiede. Zusatzdraht würde gewechselt und Antrieb der Drahtführung wurde										
86	5100					1,3		Blindnaht, Schuppung gut, aber Schweißnaht zu flach -> mehr Draht und mehr Leistung		
87	5300							Blindnaht, Anfang gut zum Schluss Durchbrand		
88	5200					1,5		Blindnaht, ungleichmäßige Raupenform -> wiederholen		
89	5200							Blindnaht, ungleichmäßige Raupenform und Durchbrände		
90	5200							Blindnaht, teilweise ungleichmäßige Raupen und kein Durchbrände, Naht etwas zu flach		
	5200		7	10		1,7		Blindnaht, wie 90, Deckschicht wurde abgetrennt -> Raupen unregelmäßig, wenn Schweißnaht durch das Blech ging bzw. zuviel Leistung		
91										
94	5200							Blindnaht, starke Einbrände, obwohl mehr Draht bei gleicher Leistung		
	5200							Blindnaht, keine Einbrände -> andere Probe -> Vermutung: andere Materialoberfläche durch Ofenprozess -> andere Energieeinbindung		
95								Blindnaht, keine Raupen, starke Einbrände -> zuviel Leistung		
98	8000									
99	7000		4	13				Blindnaht, teilweise Raupen, aber immernoch starker Lochbrand		
100	6500							Blindnaht, gute Schweißnaht, aber mit vielen Auswürfen (Vermutung: zu kurzer Puls für diese Leistung)		
101	4000		10	7				Blindnaht, optisch sehr gut		
102	4500		10	7				Blindnaht, sehr gut mit Durchbränden	Argon	
103	3800	33	13	4				Blindnaht, gut mit sehr unscharfe Raupenkontur	20 l/min	
104	4400							Blindnaht, gut		
105	4000							sehr gut!		
106	4100						13	sehr gut!		
107	4200							sehr gut!		
108	4300							sehr gut!		
109	4400							sehr gut!		
110	4600							gut, aber mit Durchbrand		
111	4550							gut, aber mit Durchbrand		
112	4500							gut		
113	4500							gut, teilweise verformte und unscharfe Raupenkontur (Schweißnahttiefe nahe am Schaum)		
114	4500							gut, teilweise verformte und unscharfe Raupenkontur (Schweißnahttiefe nahe am Schaum)		
115	4475									
116	4475									
117	4475									
118	4475							gut! Leistung so hoch, dass Schweißnaht möglichst tief ist, aber Parameter stabil laufen. Für 4PunktBiegeVersuch und Härtemessung		
119	4475									
120	4475									
121	4475									
122	4475							neuer Versuchstag. Ergebnis wieder gut!		
123	4475				60			Verhalten bei anderem Schutzgas, gleiches Ergebnis wie mit Argon	Helium 20 l/min	AlMg4,5Mn 0,8 mm Durchmesser
124	5400	41						Verhalten, wenn Vorschub erhöht wird. Zuviel L für diesen Vorschub		
125	5000							Verhalten, wenn Vorschub erhöht wird. Zuviel L für diesen Vorschub		
126	4700							Verhalten, wenn Vorschub erhöht wird. Gut! Schliff!		
127	4100	25				1,8		Verhalten, wenn Vorschub reduziert wird. Gut Schliff!		
128	4400							13 sehr gut		
129	4475							13 sehr gut		
130	4700							16 stellenweise kleine Unregelmäßigkeiten der Raupen, sonst gut		
131	4800							16 Draht kam am Anfang nicht, sonst gut		
132	5000							16 teilweise Durchbrand, sonst gut		
133	4900		10	7				16 sehr gut		
134	3500							5 Fokus zu klein für Draht (siehe Bild)		
135	4000							gut, Schweißnaht etwas schmaler als bei 13mm		
136	4200							gut		
137	4300							gut, aber stellenweise unregelmäßiges Aufschmelzen des Drahtes		
138	4400						10	Durchbrände		
139	4475							13 gut		
140	3000							in cw; gut, kann tiefer		
141	3400(3170)							in cw; gut, aber mit Auswürfen		
142	3650(3420)							in cw; gut		
143	3800(3570)							in cw; gut, aber mit Durchbrand	Argon	
144	3900(3670)							in cw; Durchbrände	20 l/min	
145	3750(3520)							in cw; gut (Schliff)		
146	4475	33						gut (Schliff)		
P4a	4475							Durchbrände, k,A warum		
P4b	4475							Durchbrände, k,A warum		
P5a	4475							Durchbrände, k,A warum		
P5b	4475							Durchbrände, k,A warum		
147	4400							teilweise Durchbrände		
148	4400							gut, Durchbrand bei Delle von Deckplatte		
149	4450							Durchbrand, sonst gut		
150	4400							gut		
P5a	4400						13	gut		
P5b	4400							gut		
P6a	4400							Anfang Durchbrand, Deckplatte dünner am Anfang als am Ende		
P6b	4400							gut, Nahtfall in Mitte		
P7a	4400							gut		
P7b	4400							gut		
P9a	4400							gut		
P9b	4400							gut		
P10a	4400							gut		
P10b	4400							gut		
P11a	3750(3510)							cw;gut		
P11b	3750(3510)							cw;gut		

B Anhang Kapitel 6

B.1 Ergebnisse der Dauerfestigkeitsuntersuchungen

B.1.1 Grundwerkstoff

Ergebnisse Grundwerkstoff

Nr	b [mm]	L [120]	t [mm]	h [mm]	d [mm]	F [kN]	sigma [Mpa]	Schwingbreite [Mpa]	Schwinspiele N	
1	120	120	1	12,5	11,5	2,4	113	227	78000	
2	120	120	1	12,2	11,2	2,3	112	224	60000	
3	120	120	1	11,5	10,5	2,2	115	229	124000	
4	120	120	1	11,6	10,6	2,2	114	227	96000	
5	120	120	1	12,2	11,2	2,3	112	224	33000	
							50%	113,1	226	71267

B.1.2 I-Stoß

Ergebnisse I-Stoß, MSG-geschweißt

Nr	b [mm]	L [120]	t [mm]	h [mm]	d [mm]	F [kN]	sigma [Mpa]	Schwingbreite [Mpa]	Schwinspiele N	
1	120	120	1	11,8	10,8	1,9	96	192	136000	
2	120	120	1	11,5	10,5	1,9	99	198	54000	
3	120	120	1	11,5	10,5	1,9	99	198	115000	
4	120	120	1	12,3	11,3	2,1	101	202	30000	
5	120	120	1	11,5	10,5	1,8	94	188	137000	
							50%	97,8	196	80927

Ergebnisse I-Stoß, Laser geschweißt

Nr	b [mm]	L [120]	t [mm]	h [mm]	d [mm]	F [kN]	sigma [Mpa]	Schwingbreite [Mpa]	Schwinspiele N	
1	120	120	1	11,3	10,3	0,8	43	85	48000	
2	120	120	1	11,2	10,2	0,8	43	86	52000	
3	120	120	1	11,5	10,5	0,8	42	83	12000	
4	120	120	1	11,4	10,4	0,9	47	95	20000	
							50%	43,7	87	27820

Ergebnisse I-Stoß, Steg + Laser geschweißt

Nr	b [mm]	L [120]	t [mm]	h [mm]	d [mm]	F [kN]	sigma [Mpa]	Schwingbreite [Mpa]	Schwinspiele N	
3	120	120	1	12,2	11,2	2,1	102	204	50000	
4	120	120	1	12,3	11,3	2	96	193	29000	
5	120	120	1	12,2	11,2	1,7	83	165	48000	
6	120	120	1	12,2	11,2	1,8	88	175	47000	
7	120	120	1	12,1	11,1	1,8	88	177	40000	
							50%	91,1	182	42010

Ergebnisse I-Stoß, FSW-geschweißt

Nr	b [mm]	L [120]	t [mm]	h [mm]	d [mm]	F [kN]	sigma [Mpa]	Schwingbreite [Mpa]	Schwingspiele N	
1	120	120	1	12,2	11,2	1,2	58	117	150000	
2	120	120	1	12,2	11,2	1,3	63	126	38000	
3	120	120	1	12,2	11,2	1,2	58	117	99000	
4	120	120	1	12,2	11,2	1,2	58	117	67000	
5	120	120	1	12,2	11,2	1,2	58	117	24000	
							50%	59,3	119	61881

Ergebnisse I-Stoß, FSW-geschweißt, neu

Nr	b [mm]	L [120]	t [mm]	h [mm]	d [mm]	F [kN]	sigma [Mpa]	Schwingbreite [Mpa]	Schwingspiele N	
1	120	120	1	12,0	11,0	1,57	78	156	114403	
2	120	120	1	11,8	10,8	1,55	78	157	69326	
3	120	120	1	11,8	10,8	1,45	73	146	66552	
4	120	120	1	11,8	10,8	1,52	77	153	126231	
5	120	120	1	11,8	10,8	1,54	78	155	207479	
6	120	120	1	11,8	10,8	1,3	66	131	51206	
							50%	74,8	150	94404

B.1.3 T-Stoß

Ergebnisse T-Stoßverbindungen Typ I

Nr	b [mm]	L [mm]	t [mm]	h [mm]	d [mm]	F,Steg [kN]	sigma [Mpa]	Schwingbreite [MPa]	Schwingspiele N	
2	120	120	1	12,4	11,4	0,45	42,9	85,9	20000	
3	120	120	1	12,6	11,6	0,37	34,6	69,3	15000	
4	120	120	1	12,6	11,6	0,45	42,1	84,3	16000	
5	120	120	1	12,5	11,5	0,42	39,7	79,4	23000	
6	120	120	1	13,5	12,5	0,45	38,9	77,8	27000	
							50%	39,5	79,1	19718

Ergebnisse T-Stoßverbindungen Typ II

Nr	b [mm]	L [mm]	t [mm]	h [mm]	d [mm]	F,Steg [kN]	sigma [Mpa]	Schwingbreite [MPa]	Schwingspiele N	
2	120	180	1	11,9	10,9	0,35	17,53	35	121000	
3	120	180	1	13,3	12,3	0,3	13,19	26	128000	
4	120	180	1	11,8	10,8	0,35	17,70	35	95000	
5	120	180	1	11,9	10,9	0,38	19,03		10000	
							50%	16,0	32,0	113738

Ergebnisse T-Stoßverbindungen Typ III

Nr	b [mm]	L [mm]	t [mm]	h [mm]	d [mm]	F,Steg [kN]	sigma [Mpa]	Schwingbreite [MPa]	Schwingspiele N	
1	120	120		4		0,16	30,00	60	150000	
							50%	30,0	60,0	150000