

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18409 BG

Thema

Verfahrensentwicklung zur Herstellung von hybriden FVK/Stahl Strukturen mittels eines neuartigen Blechverbindungselementes - HyBVE

Berichtszeitraum

01.05.2015 bis 31.08.2017

Forschungsvereinigung

Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.

Forschungsstelle(n)

Nr. 1: Technische Universität Braunschweig
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

Nr. 2: Otto von Guericke Universität Magdeburg
Institut für Werkstoff- und Fügetechnik

Braunschweig, 01.12.2017

Magdeburg, 01.12.2017

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder

Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Inhaltsverzeichnis

Summary	4
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	9
1 Einleitung.....	10
1.1 Ausgangssituation	10
1.2 Anlass für das Forschungsvorhaben.....	11
2 Stand der Technik	12
2.1 Herstellung hybrider Bauteile	12
2.2 Pin-Strukturen auf metallischen Halbzeugen zur formschlüssigen Lasteinleitung in Faserverbundwerkstoffe.....	12
2.2.1 RHEA-Verstärkung.....	12
2.2.2 IGEL-Technologie	13
2.2.3 Additives Laser Sintern.....	14
2.2.4 Laserstrukturierung.....	14
2.2.5 Pin-Technologie durch Setzprozesse und Fließformen	15
2.2.6 Strukturierung durch mechanische Verfahren	15
2.3 Lochformung in Faserverbundwerkstoffen	16
2.3.1 Thermoclinchen.....	18
2.3.2 Thermomechanisches Ausformfügen	18
2.3.3 Z-Pinned – Hybride Strukturen.....	19
2.4 Mechanische Fügeverfahren zum Fügen von FVK.....	20
2.5 Verbindungselemente	21
2.5.1 Koppelungsinserts	21
2.5.2 Stanznieten	21
2.5.3 Flow Drill Schrauben	22
2.5.4 Nieten – Blindnieten	22
2.5.5 Widerstandselementschweißen	23
2.5.6 Thermisches Fügeverfahren Widerstandselementschweißen	24
2.6 Sonstige Hybridisierungstechnologien	25
2.6.1 Direkte Faseranbindungstechnologien mittels Gießtechnik.....	25
2.7 Fazit zum Stand der Technik.....	26
3 Forschungsziel und Lösungsweg	27
3.1 Forschungsziel	27
3.1.1 Anforderungsprofil an Verbindungselement und Fügeprozess.....	27

3.1.2	Forschungsergebnisse	27
3.1.3	Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse	29
3.1.4	Methodischer Ansatz zur Erreichung des Forschungsziels.....	30
4	Verwendete Werkstoffe und Probenvorbereitung.....	33
4.1	Verwendete Werkstoffe	33
4.1.1	22MnB5+AS150.....	33
4.1.2	HX340LAD+Z100.....	35
4.1.3	BETAMATE™ 1480	35
4.2	Probengeometrie und Probenvorbereitung	36
4.2.1	Probenvorbereitung – Metallproben	36
4.2.2	Probenvorbereitung – Kunststoffproben	37
5	Ergebnisse der Arbeitspakete.....	39
5.1	Arbeitspaket 1 Schädigungsarme Einbringung eines Verbindungselementes in einen Faserwerkstoff (IWF TU-BS).....	39
5.1.1	AP 1.1: Simulative Untersuchungen zum Durchdringungsverhalten und der resultierenden Faserschädigung.....	39
5.1.2	AP 1.2: Aufbau eines Versuchsstandes für die experimentellen Untersuchungen zum Durchdringungsverhalten und der resultierenden Faserschädigung.....	45
5.1.3	AP 1.3: Experimentelle Untersuchungen zum Durchdringungsversuch.....	49
5.1.4	Fazit aus AP1	54
5.2	Arbeitspaket 2 Schweißtechnische Anbindung von FVK-Werkstoffen an eine metallische Struktur (IWF OvGU).....	55
5.2.1	Anwendungsspezifische Entwicklung des Verbindungselements.....	55
5.2.2	Elementherstellung	60
5.2.3	Qualitätskriterien zur Ermittlung eines Prozessfensters.....	61
5.2.4	Schweißtechnische Herstellung eines Hybridverbundes durch Verwendung des neuartigen Verbindungselements.....	65
5.3	Arbeitspaket 3 Optimierung und Bewertung der Verbindungseigenschaften (IWF TU-BS & IWF OvGU)	72
5.3.1	AP 3.1 Gestaltoptimierung zur lastgerechten Kraftverteilung sowie zur Verbesserung des Schweißprozesses	72
5.3.2	AP 3.2 Charakterisierung der Verbindungstechnologie hinsichtlich unterschiedlicher Werkstoffkombinationen	76
5.3.3	AP 3.3 - Vergleich zum Referenzprozess Blindnieten	83
5.4	Arbeitspaket 4 Entwicklung und Bewertung von Konzepten für den automatisierten Einsatz.....	85
5.4.1	AP 4.1 Erstellung und Bewertung von Technologien zur automatisierten Elementapplikation und schweißtechnische Anbindung	85
5.4.2	AP 4.2 Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des neuen Verfahrens	90

6	Anwendung an einem bauteilähnlichen Prüfkörper	92
7	Zusammenfassung	93
8	Verwendung der Zuwendungen	94
9	Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der erzielten Forschungsergebnisse.....	96
9.1	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen	96
9.2	Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	96
9.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	97
10	Fortgeschriebener Plan zum Ergebnistransfer	98
11	Literatur.....	101

Summary

The research project „Process Development for Manufacturing of Hybrid FRP-Steel Structures by Means of a Novel Sheet Joining Element“ addressed the investigation of applying the widespread technology of resistor element welding to joining two dissimilar materials (steel and fiber-reinforced thermoplastic).

A base plate equipped with three or more joining pins worked as basic concept. The pins are meant to penetrate the locally molten thermoplastic thus working through the FRP material while leaving as majority of fibres intact. Sticking out of the back side of the FRP material, the pins were then welded to a steel component upon contact through conventional spot welding. Thereby, electric energy is induced through the head plate and the pins. The proposed joining elements can be manufactured in an industrial die-cutting and forming operation.

However, the three required process steps (element manufacturing, FRP penetration and welding) constitute contrary target goals in terms of geometrical pin design and material selection. During the research project, each individual process was developed and eventually optimized in such a way that ensured a hybrid joint with sufficient strength. Therefore, element geometries were adapted continuously.

In conclusion, the goals of the research project were so achieved.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Leichtbau und Funktionsintegration durch Hybridisierung / werkstoffliche Leichtbau-Konzepte für die Zukunft, Quelle: Volkswagen AG	10
Abbildung 2: Schematische Darstellung einer RHEA-Verstärkung [Lan13]	13
Abbildung 3: IGEL-Technologie [Chi12].....	13
Abbildung 4: Untersuchungen zur Pin-Geometrie im Rahmen der IGEL-Technologie [Chi12]	14
Abbildung 5: Schliffbilder durch Additives Laser Sintern erzeugter Titan-Pins unterschiedlicher Längen in einer CFK-Struktur [Hue15].....	14
Abbildung 6: Surfi-Sculpt [Ear12, Bla11].....	15
Abbildung 7: geprägte Pin-Elemente (links), selbstlochende Pin-Elemente (rechts) [Kro16].....	15
Abbildung 8: NRX™-Materialien links und Verzahnung im Verbund (rechts) [Nuc13]	16
Abbildung 9: Strukturierte Oberfläche (links), Schliffbild Hybridprobe (links rechts) [Drö15]	16
Abbildung 10: Faserstruktur: (a) geformtes Loch, (b) gebohrtes Loch [Lin94].....	17
Abbildung 11: Lochgeformte Probe aus textilem FWW-Laminat - ohne Erwärmung der Fügezone [Cha87].....	17
Abbildung 12: Verfahrensablauf beim Thermoclichen [Gud15]	18
Abbildung 13: Anlagenprinzip des thermomechanischen Ausformfügen [Kro09]	19
Abbildung 14: Faserablenkung beim thermomechanischen Ausformfügen [Kro09]	19
Abbildung 15: Prozesskette - Eintreibung von Z-Pin Strukturen [Mou10]	19
Abbildung 16: Insert-Technologie [Hop13].....	21
Abbildung 17: Stanznieten eines hybriden FVK-Metall-Verbundes [Fra12].....	21
Abbildung 18: Strukturversagen beim Stanznieten durch Faserschädigung [Fra12]	22
Abbildung 19: Prozessskizze - Fügeprozess Flow Drill Schrauben (EJOT).....	22
Abbildung 20: Widerstandselementschweißen durch modifizierten Schweißniet [Mes13b]	23
Abbildung 21: links - Gefügte hybride Verbunde unter Verwendung von Widerstandsschweißtechnik [Mes13b], rechts - mittels Stahlband gefügter Verbund [Fuc10]	23
Abbildung 22: Schematische Darstellung des Widerstandselementschweißen von Aluminium mit einem Zusatzelement [Ham17].....	24
Abbildung 23 Schliffbilder von 22MnB5 mit LITECOR® (links) sowie FVK mit HC340LA (rechts).....	25
Abbildung 24: Anbindungskonzept der DFG Forschergruppe 1224 „Schwarz – Silber“ [Lan11]	26
Abbildung 25: Probekörper aus dem Projekt HyDru [Auw15].....	26
Abbildung 26: Konzept für Hilfsfügeteil im Größenvergleich (1. Prototyp).....	30
Abbildung 27: Zweistufiger Verfahrensablauf des Widerstandselementschweißens mit neuartigem Verbindungselement (Blechumform-Prototyp)	31
Abbildung 28: Darstellung des Wärmebehandlungszyklus beim industriellen Presshärten (Datenquelle: ThyssenKrupp AG in [Fri13])	34
Abbildung 29: AlSi-Schicht nach dem Presshärten bei 930°C und 6 min. Ofenhaltezeit	34
Abbildung 30: Verwendete metallische Proben für die Parameterstudie und Prozessoptimierung.....	36
Abbildung 31: Scherzugprobe nach DIN EN ISO 14273.....	37
Abbildung 32: Schematische Aufteilung genutzter Deckblechen und Art der Elementapplikation.....	37
Abbildung 33: Gebohrtes PA 6-Plättchen für das Dreifuß-Element links und eine Scherzugprobe aus GFK mit einem schädigungsarm durchdrungenen Element rechts	38
Abbildung 34: Parameterdefinition Durchdringungsprozess (schematische Darstellung)	39
Abbildung 35: Schematische Darstellung eines Pin-Querschnitts, der Faserablenkung innerhalb einer Ebene in einem kreisförmig aufgeschmolzenen Bereich bewirkt.....	40

Abbildung 36: Geometrisches Modell zur Berechnung der ebenen Ablenkung einer Einzelfaser durch einen zylindrischen Pin (Viertelmodell)	40
Abbildung 37: Faserschädigung für verschiedene Fasertypen nach Eindringen eines Pins mit 3 mm Durchmesser in Abhängigkeit der Größe des aufgeschmolzenen Bereiches	43
Abbildung 38: Erster Durchdringungssimulationsansatz mit ANSYS (Viertelmodell).....	44
Abbildung 39: Durchdringungssimulation mit MATLAB	44
Abbildung 40: Versuchsstandaufbauten für induktionsunterstützte (links) und schwingungsunterstützte Einbringung (rechts)	45
Abbildung 41: Versuchsstand erste Varianten und Thermographie-Aufnahme.....	46
Abbildung 42: Ergebnis Vorversuch Schwingungsunterstützte Durchdringung.....	46
Abbildung 43: Faserschädigung für verschiedene Spitzenwinkel nach Eindringen eines Pins mit 3 mm Durchmesser im Vergleich mit einer 3 mm Bohrung	46
Abbildung 44: Aufbau Erwärmungseinheit mit Omega-förmigen Infrarotstrahlern zur beidseitigen Bestrahlung	47
Abbildung 45: Im Projekt gebaute programmierbare Steuereinheit mit angeschlossener Linearachse	48
Abbildung 46: Durchdringungsversuchsstand (links), Maximale Durchdringungskraft in Abhängigkeit vom Pin-Spitzenwinkel – Exemplarischer Vergleich Simulation und Experiment (rechts).....	48
Abbildung 47: Durchdringungsversuchsstand mit einstellbarem Probenhalter, Austauschbarem Gegenhalter und pneumatischem Greifer für Verbindungselemente	49
Abbildung 48: CNC-Universal-Rundschleifmaschine Studer S40cnc	50
Abbildung 49: Hergestellte Pins mit variiertem Spitzenwinkel α ($d_p = 3$ mm, $r_{sp} = 0,1$ mm) .	50
Abbildung 50: Hergestellte Pins mit variiertem Spitzenradius r_{sp} ($\alpha = 50^\circ$, $d_p = 3$ mm).....	51
Abbildung 51: 5-Achs-Fräsmaschine DMU 100 monoBLOCK	51
Abbildung 52: Gefräste Prototypen mit unterschiedlichen Spitzenwinkeln (Kopfdurchmesser 20 mm).....	51
Abbildung 53: Fertigungsschritte für Prototypen in Differentialbauweise – a) Zylinderstift, b) geschliffene Spitze, c) auf definierte Länge gekürzter Pin, Kopfplatte d) ohne und e) mit eingepressten Pins	52
Abbildung 54: Durchdringungsproben mit Maskierungsfolien für unterschiedliche Aufschmelzdurchmesser	52
Abbildung 55: Durchdringungskraft und Faserschädigung in Abhängigkeit des Aufschmelzdurchmessers	53
Abbildung 56: Durchdringungskraft in Abhängigkeit des Spitzenwinkels.....	53
Abbildung 57: Durchdringungskraft in Abhängigkeit des Pindurchmessers	54
Abbildung 58: Durchdringungskraft in Abhängigkeit des Spitzenradius.....	54
Abbildung 59: Hergestellte Stiftelemente für die Schweißuntersuchungen.....	56
Abbildung 60: geschweißtes Stiftelement nach zerstörender Scherzugprüfung (links) und die Schliffbilder des Elements bei 21 kA (mittig) und 25 kA (rechts) bei 10 ms und 2kN.....	56
Abbildung 61: Versuchsmatrix	57
Abbildung 62: Variationen des Spitzenwinkels	57
Abbildung 63: Verschweißtes gebautes Dreifußelement –Sicht von oben (a); Stifte nach Entfernung des Kunststoffblechs – starke Stauchung von Stiften (b) und durch Flachmeißel abgescherte Stifte	57
Abbildung 64: Geschweißte gebaute Elemente mit unterschiedlichen Spitzenwinkeln.....	58
Abbildung 65: Einfluss einer Spitze auf Wärmentwicklung im Verbindungsfuß beim Schweißen	58
Abbildung 66: Hergestellte Elemente zur Untersuchung des Herstellungs Konzeptes	59
Abbildung 67: Schematischer Ablauf der Elementherstellung aus dem Blech	60
Abbildung 68: Zeichnung von Stempel (a) und Matrize (b); Werkzeug mit einem Element (c)	60
Abbildung 69: Pneumatische Presse für Umformvorgänge die der Elementherstellung	61

Abbildung 70: Ermittlung des Schweißbereichsdiagramms in Anlehnung an SEP 1220-Teil 2	62
Abbildung 71: Versagensart der Fügeverbindungen in der Scherzugprüfung	62
Abbildung 72: Spritzerbildung beim Widerstandsschweißen mit dem neuartigem Verbindungselement	63
Abbildung 73: Darstellung des Schweißprozesses mit Auflegierung links und Parametervläufe mit rechts Prozessstörungen bei der Auflegierung	64
Abbildung 74: Kontaktoberfläche der Schweißelektrode mit Auflegierung (links). Ein geschweißtes Element (rechts)	64
Abbildung 75: Vollständiges Abschmelzen von Kontaktfüßen (links) und lokales Aufschmelzen mit Klebstoffeinschwemmung im Fuß (rechts)	65
Abbildung 76: Plan der praktischen Schweißversuchen in AP 2	65
Abbildung 77: Gemessene Prozessgrößen beim Widerstandselementschweißen mit neuartigem Verbindungselement	66
Abbildung 78: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Schweißprozesses vom Sternelement	67
Abbildung 79: Ermittelte Schweißbereiche mit und ohne Klebstoff mit einem Sternelement	67
Abbildung 80: Metallographische Analyse hergestellter Fügeverbindung ohne Klebstoff	68
Abbildung 81: Detaillierte metallographische Analyse der Fügeverbindung	68
Abbildung 82: Metallographische Analyse hergestellter Fügeverbindung mit Klebstoff	69
Abbildung 83: Ermittelte maximale Scherzug- und Kopfzugkräfte mit und ohne Klebstoff der Materialkombination 22MnB5+AS150 und PA6-GF47	70
Abbildung 84: Versagensart der hybrid gefügten Scherzugproben ohne Klebstoff (links) und mit Klebstoff (rechts)	70
Abbildung 85: Kraft-Dehnungsverlauf einer hybrid gefügten Scherzugprobe mit dem Klebstoff	70
Abbildung 86: Ausgangsgeometrien für die Optimierung in AP3	72
Abbildung 87: Model eines in AP 3 optimierten Elements	72
Abbildung 88: Elemententwicklungsstufen des Blechverbindungselements	73
Abbildung 89: Blechelement für die Durchdringung und Schweißung	73
Abbildung 90: Durchdringungsergebnis mit gebohrtem Einsatz	74
Abbildung 91: Durchdringungsergebnis mit Silikoneinsatz	74
Abbildung 92: Gegenhalteroptimierung, links: Gebohrter Gegenhalter, rechts: Silikongegenhalter; Mitte: optimierter Gegenhalter (Kombinationsansatz)	75
Abbildung 93: Durchdringungsergebnis mit Kombinationseinsatz (Silikoneinsatz mit Stift in der Mitte)	75
Abbildung 94: Scherzugkräfte der Schweißbereichsgrenzen ohne Klebstoff mit optimiertem Verbindungselement	75
Abbildung 95: Schematische Darstellung der Wärmeverteilung in der Fügezone – links; Schliff der Materialkombination 22MnB5+AS105 / 1.4031 – mittig und 22MnB5+AS150 / ZE800 - rechts	77
Abbildung 96: Gemessener dynamischer elektrischer Widerstand beim Schweißen mit Blechelementen aus 1.4301 und ZE800 mit 22MnB5+AS150	78
Abbildung 97: Schliffbilder der Materialkombinationen von 22MnB5+AS150 mit Blechelementen aus 1.4301 und ZE800	78
Abbildung 98: REM-Aufnahme der Überganszone Element-Grundwerkstoff mit der EDX-Analyse bei der Kombination 22MnB5+AS150 und 1.4301	79
Abbildung 99: REM-Aufnahme der Überganszone Element-Grundwerkstoff mit der EDX-Analyse bei der Kombination 22MnB5+AS150 und ZE800	79
Abbildung 100: Schliffbilder der Materialkombinationen von HX340LAD+Z mit Blechelementen aus 1.4301 und ZE800	80
Abbildung 101: Härtemapping an geschweißten Verbindungen mit Blechelementen aus 1.4301 und ZE800 mit 22MnB5+AS150 und HX340LAD+Z100	80

Abbildung 102: Probenversagen nach dem Scherzugversuch.....	81
Abbildung 103: Einfluss vom Elementwerkstoff auf die Festigkeit der Fügverbindung	81
Abbildung 104: Bruchflächen nach der Scherzuguntersuch der Materialkombination 22MnB5+AS150 mit dem Blechelement aus 1.4031	82
<i>Abbildung 105: Bruchflächen nach der Scherzuguntersuch der Materialkombination 22MnB5+AS150 mit dem Blechelement aus 1.4031</i>	<i>82</i>
Abbildung 106: Lochleibungsprüfung in Anlehnung an DIN 65562	83
Abbildung 107: Einfluss der Faserorientierung auf die Lochleibungsfestigkeit bei Beginn der Lochaufweitung σ_{LVt} bei geformten und gebohrten Proben (in Anlehnung an DIN 65562).	84
Abbildung 108: Darstellung der Faseranordnung im lochnahen Bereich bei a) Lochbohrung und b) Lochformung in Anlehnung an [Sei13].....	84
Abbildung 109: Funktionsflüsse der Durchdringungseinheit	85
Abbildung 110: Automatisierungskonzept 1.....	87
Abbildung 111: Automatisierungskonzept 2.....	88
Abbildung 112: Automatisierungskonzept 3.....	88
Abbildung 113: Auskonstruktion Konzept 2	89
Abbildung 114: Mittels Laser ausgeschnittenes und selbst umgeformtes Blechelement (am IWF Magdeburg)-links, industriell im Stanzprozess gefertigtes Blechelement (Fa. Hubert Stüken)-rechts	90
Abbildung 115: Demonstrator zum Verbinden von FVK höchstfestem Stahl mittels hybriden Blechverbindungselementen	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mechanische Fügeverfahren zum Fügen FVK-Strukturen [Ber14, Mes15a, Mes15b, Mes15c].....	20
Tabelle 2: Anforderungsprofil.....	28
Tabelle 3: Arbeitspakete.....	32
Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung von 22MnB5 (Gew.-%) [Sal14].....	33
Tabelle 5: Mechanische Eigenschaften von 22MnB5 vor und nach dem Formhärten [Sch13].....	33
Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung von HX340LAD (Gew.-%) [Sal12].....	35
Tabelle 7: Mechanische Eigenschaften von HX340LAD [Sal12].....	35
Tabelle 8: Mechanisch-physikalische Eigenschaften des BETAMATE™ 1480V203 [Bet17].....	36
Tabelle 9: Elemente für grundlegende und Untersuchungen und Herstellungskonzepte.....	55
Tabelle 10: Ergebnistabelle: Schweißprozess, Fußgeometrie und Herstellungskonzept ...	59
Tabelle 11: In AP 1 und AP 2 erarbeitete Restriktionen für die Geometrieparameter.....	73
Tabelle 12: Verwendete Werkstoffe in Arbeitspaket 3.....	76
Tabelle 13: Elektrische Eigenschaften der untersuchten Stähle.....	76
Tabelle 14: Morphologischer Kasten für die Automatisierung der Durchdringung.....	85
Tabelle 15: Technische Bewertung der Automatisierungskonzepte.....	89
Tabelle 16: Wirtschaftliche Bewertung der Automatisierungskonzepte.....	90
Tabelle 17: Verwendung der Zuwendung.....	94
Tabelle 18: Erreichen der Ziele in den Arbeitspaketen.....	97
Tabelle 19: Während der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen (chronologisch).....	98
Tabelle 20: Tabellarische Übersicht der geplanten Transfermaßnahmen (chronologisch).....	100

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

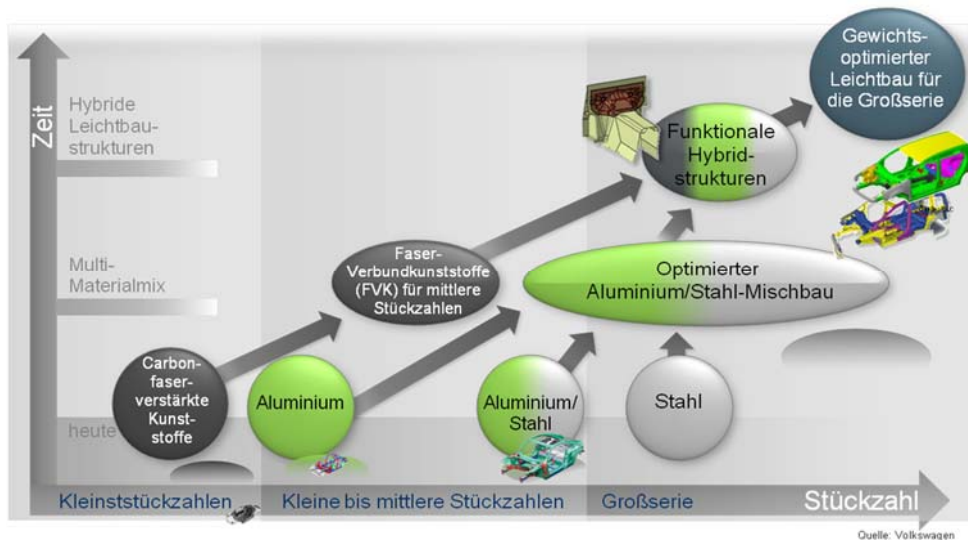


Abbildung 1: Leichtbau und Funktionsintegration durch Hybridisierung / werkstoffliche Leichtbau-Konzepte für die Zukunft. Quelle: Volkswagen AG

Moderne Leichtbaukonzepte werden in verschiedenen Anwendungssegmenten vermehrt durch den Ansatz der Mischbauweise bzw. des Multi-Material-Designs unter Nutzung der spezifischen Werkstoffeigenschaften umgesetzt. Durch eine intelligente Materialkombination besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Werkstoffe entsprechend ihrer physikalischen und technischen Eigenschaften gezielt und anwendungsgerecht einzusetzen, wodurch ein wirtschaftliches Verhältnis zwischen Herstellungsaufwand, Performancesteigerung und Gewichtsreduzierung eingestellt werden kann. Neben den rein metallischen Mischbauweisen aus Aluminium und Stahl gewinnen zunehmend faserverstärkte Kunststoffe (FVK) mit Kohlenstoff- (CFK) oder Glasfasern (GFK) an Bedeutung. Dies resultiert vor allem aus den hervorragenden mechanischen Eigenschaften dieser Werkstoffe bei einem gleichzeitig niedrigen spezifischen Gewicht im Vergleich zu Metallen. Mischbauweisen mit FVK werden in der Regel zur Umsetzung von modernen Leichtbaulösungen in der Luftfahrt, der Windenergieerzeugung, dem Bauwesen und im Motorsport eingesetzt. Sie ermöglichen im Gegensatz zu klassischen reinen Metallkonstruktionen neue Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich der Bauteil-auslegung und -komplexität. Des Weiteren bietet diese Bauweise ein hohes Potenzial zur Funktionsintegration und trägt somit zu der Umsetzung von neuen und innovativen Konstruktionslösungen bei. Die Entwicklung und Umsetzung von Multi-Material-Bauweisen aus Metall- und FVK-Werkstoffen gilt als Schlüsseltechnologie im modernen Leichtbau. Die unterschiedlichen Werkstoffe werden dabei so verbaut, dass sie ihre spezifischen Eigenschaften optimal entfalten können. Die Auslegung, Konstruktion, Herstellung sowie das Recycling dieser Leichtbaulösungen sind in vielen Industriezweigen von Großunternehmen bis hin zu kleinen und mittelständischen Betrieben zu einem hoch innovativen und wirtschaftlich sehr bedeutenden Betätigungsfeld geworden. Zu der innovationstreibenden Industriebranche im Bereich des intelligenten Leichtbaus zählt in Deutschland vordergründig der Sektor Mobilität. Der Trend hin zu Mischbauweisen unter der Verwendung von Bauteilen aus FVK ist deutlich anhand von Marktdaten und Prognosen zu erkennen. Exemplarisch ist hierzu in Abbildung 1 der

werkstoffliche Trend in der Automobilindustrie dargestellt. Der moderne Leichtbau gilt in diesem Sektor als Schlüsseltechnologie zur Reduzierung von Verbrauch und Emissionen – unabhängig von der eingesetzten Antriebstechnologie. Auch anhand weiterer Studien wird der Bedarf an FVK wie beispielsweise CFK ersichtlich, so prognostiziert z.B. die Unternehmensberatung McKinsey, dass die Nachfrage an Kohlefasern von 20.000 Tonnen im Jahr 2011 auf 500.000 Tonnen im Jahr 2030 wachen wird [Heu12]. Die erfolgreiche Umsetzung zukünftiger Leichtbauanforderungen hinsichtlich der Gewichtseinsparung bei gleichzeitiger Performancesteigerung der Bauteile in ihrer jeweiligen Funktionseigenschaft wird ausschlaggebend für die Technologieführerschaft in vielen Wirtschaftsbereichen sein. Daher ist die Relevanz der Gesamthematik von besonderer Bedeutung für den Erhalt und den Ausbau des Industriestandortes Deutschland.

1.2 Anlass für das Forschungsvorhaben

Im Hinblick auf das Potenzial zur Gewichtsreduktion und Funktionsintegration stoßen klassische monolithische Konstruktionen und Materialkombinationen, die ausschließlich metallische Werkstoffe einsetzen, immer häufiger an ihre Grenzen. Für die Umsetzung neuer innovativer Leichtbaukonzepte wird deshalb verstärkt ein Materialmix aus Metall und faserverstärkten Kunststoffen eingesetzt. Diese Mischbauweise zieht jedoch Herausforderungen für die kraftflussgerechte Verbindung der unterschiedlichen Materialien nach sich. Bisher eingesetzte Verfahren wie das Punktschweißen (z.B. in der Automobilindustrie) können aufgrund der unterschiedlichen Schmelzpunkte nicht mehr flächendeckend eingesetzt werden. Im Fall der FVK-Anbindung haben sich daher Verfahren etabliert, die vordergründig auf einer rein adhäsiven Verbindung durch Klebung beruhen. Häufig müssen jedoch unterstützend weitere Verbindungselemente wie Schrauben, Bolzen oder Niete eingesetzt werden, um den Verbund zwischen Metall und FVK zu erzeugen. Die Verwendung dieser Elemente zieht allerdings stets eine massive lokale Zerstörung der Faserstruktur durch Lochung oder Vorbohrung mit sich. Um diese Festigkeitsreduzierung zu verhindern, besteht der Bedarf an einer neuen Verbindungstechnologie, mit der z.B. ein Organoblech an ein Stahlblech angebunden werden kann, ohne dass die Faserstruktur maßgeblich beeinträchtigt bzw. geschwächt wird.

Die Motivation des Forschungsvorhabens besteht in der Entwicklung einer solchen neuen vorwettbewerblichen Technologie zur kraftflussgerechten und schädigungsarmen Verbindung von Bauteilen aus Stahl und FVK. Hierzu wird ein neuartiges Blechverbindungselement entwickelt, welches den FVK schädigungsarm durchdringt und sich durch Widerstandsschweißen an ein Metall anbinden lässt. Das innovative Verfahren wird dadurch die konventionelle Klebung unterstützen, ohne dass die Faserstruktur lokal durch eine Lochung (Bohren oder Stanzen) zerstört wird. Das Ergebnis ist ein Anbindungskonzept, bei dem ein Bauteilverbund zwischen Stahl und FVK stoffschlüssig über einen entsprechenden Klebstoff, sowie form- als auch kraftschlüssig durch die Form des neuartigen Verbindungselementes entsteht. Die besondere Herausforderung liegt hierbei in der Gestaltung und Fertigung des neuartigen Verbindungselementes, welches hinsichtlich der faserschädigungsarmen FVK-Durchdringung und dem darauffolgenden stoffschlüssigen Schweißprozess optimiert werden muss. Insbesondere wird bei dem Forschungsvorhaben darauf geachtet, dass das entsprechende Element kostengünstig in großer Stückzahl durch einen Stanz-/Umformprozess hergestellt werden kann. Aufgrund der interdisziplinären Anforderungen hinsichtlich der Elementherstellung durch einen Blechverarbeitungsprozess und der Fügeoperation durch Widerstandselementschweißen wird das Vorhaben von der **Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung (EFB)** und dem **Deutschen Verband für Schweißen und verwandte Verfahren (DVS)** in Kooperation unterstützt.

2 Stand der Technik

2.1 Herstellung hybrider Bauteile

Für die Umsetzung innovativer Leichtbaulösungen auf Grundlage von hybriden Strukturen aus Metall und FVK ist die Verbindungstechnik artfremder Werkstoffe eine zentrale Fragestellung. Grundsätzlich kann der Verbund auf drei Arten hergestellt werden, die teilweise auch kombiniert werden:

- stoffschlüssig z.B. durch Kleben
- formschlüssig z.B. durch Umspritzen
- kraftschlüssig z.B. durch Klemmung

Die Gesamthematik der Verbindungstechnik ist Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten, die sich unter anderem intensiv mit der adhäsiven Strukturanbindung über Klebstoffe beschäftigen. Da das vorliegende Forschungsvorhaben keinen Fokus auf die Weiterentwicklung der Klebtechnologie legt, sondern auf eine mechanische Verbindung abzielt, erfolgt hier keine umfassende Darstellung der Forschung zur Klebtechnologie. Des Weiteren gibt es zahlreiche Patente, die sich inhaltlich mit der Thematik zum Fügen eines Metallbleches und einer FVK-Struktur beschäftigen. Hierbei werden unter anderem auch Hilfsfügeelemente eingesetzt, wie es z.B. in DE102010026040A1, DE102005006253B4 oder in EP000002127797A1 der Fall ist. Die Elemente bestehend häufig aus Nieten oder Bolzen bei denen Durchgangsbohrungen durch den FVK benötigt werden, um die Elemente applizieren zu können. Durch die Vorbohrung wird jedoch das Fasermaterial in diesen Bereich gänzlich zerstört. Dieser Nachteil soll durch das neuartige Blechverbindungselement und der speziellen Technik zur FVK-Durchdringung kompensiert werden und stellt somit einen neuen Ansatz dar. Andere Patente wie z.B. DE102008027164A1 befassen sich mit dem Laserschweißen von Materialkombination und grenzen sich bereits durch das angewandte Verfahren von diesem Vorhaben ab.

2.2 Pin-Strukturen auf metallischen Halbzeugen zur formschlüssigen Lasteinleitung in Faserverbundwerkstoffe

Bei einem formschlüssigen hybriden Werkstoffverbund erfolgt die Lastübertragung nicht ausschließlich über die Grenzfläche (wie bei der rein stoffschlüssigen hybriden Verbindung), sondern es wird eine interlaminaire Lasteinleitung in mehrere Faserlagen erzielt. Zu diesem Zweck muss die metallische Komponente zunächst mit geeigneten Verfahren strukturiert werden. Dies wird in verschiedenen Forschungsansätzen vorwiegend durch additive Fertigungsverfahren, Stanzumformverfahren oder durch spanabhebende Verfahren realisiert. Bei diesen Bearbeitungsverfahren entstehen für die Verklammerung im FVK vorgesehene Strukturgruppen, die im Folgenden unter dem Begriff „Pins“ verallgemeinernd bezeichnet werden.

2.2.1 RHEA-Verstärkung

Im Forschungsvorhaben TransHybrid [Lan13] wurde ein Fügekonzept für CFK-CFK-Verbindungen entwickelt. Hierbei werden flächige Verbindungselemente aus umgeformten Titanblechzuschnitten verwendet. Diese werden als Inserts zwischen zwei faserverstärkte Matten gelegt und erhöhen so den strukturellen Verbund. In Abbildung 2 ist der schematische Aufbau der Verbindungstechnik dargestellt. Der Einsatz der sog. RHEA-Verstärkung (Redundant High-Efficiency Assembly) stellt eine Kombination aus Formschluss und Klebung dar. Bei dieser Technologie wird gänzlich auf Bohr- oder Nietvorgänge verzichtet, bei denen eine Faserschädigung in der Fügestelle auftreten würde. [Lan12]

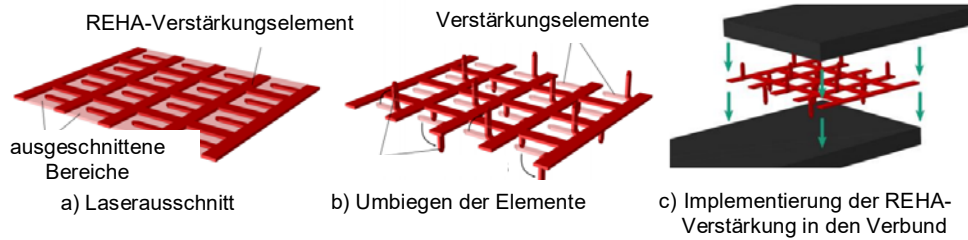


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer RHEA-Verstärkung [Lan13]

Diese Technologie wird ausschließlich zum Verbinden und zur Z-Verstärkung zweier Faser-verbund-Fügepartner angewandt und ist nicht für den Mischbau geeignet.

2.2.2 IGEL-Technologie

In mehreren Forschungsvorhaben wurde eine Technologie zur Steigerung der Verbindungs-festigkeit zwischen einer metallischen und einer Faserverbundstruktur entwickelt. Dabei wird im Rahmen eines dreistufigen Prozesses zunächst eine Pin-Struktur auf die Metallische Komponente aufgebracht. Bei der „IGEL-Technologie“ wird dazu ein spezielles Schweißverfahren, die Cold Metal Transfer Technologie (CMT), verwendet. Dieses Verfahren ist eine Weiterentwicklung des MIG-/MAG-Schweißens mit geregelter Schweißdrahtvorschub. Die bei konventionellen Schweißverfahren auftretende Spritzerbildung wird dadurch verhindert und der Temperatureintrag in das Werkstück verringert. In Abbildung 3 ist die Strukturierung einer Welle mit diesem Schweißverfahren dargestellt. Die Form der aufgetragenen Pins kann dabei über die Prozessparameter unterschiedlich eingestellt werden.

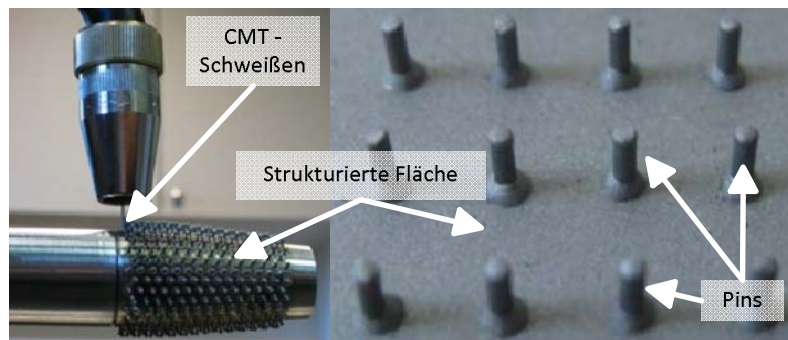


Abbildung 3: IGEL-Technologie [Chi12]

In einem zweiten Schritt werden vorgefertigte Faser-Matten oder Gewebe (trocken oder als Prepreg) auf die Pins gelegt und an die strukturierte Oberfläche angedrückt, sodass die Pins in die verwendeten Faser-Halbzeuge eindringen [Rau09]. Im letzten Fertigungsschritt wird der so vorbereitete Schichtverbund mit konventioneller Faserverbundfertigungstechnologie, wie z. B. dem Harzinfusionsverfahren, zu einem fertigen Hybridbauteil weiterverarbeitet. In dem Forschungsvorhaben wurden unter anderem unterschiedliche Pin-Formen getestet, die je nach Belastung verschiedene Versagensformen aufweisen [Gri15]. Abbildung 4 zeigt zwei hergestellte hybride Strukturen, die im Rahmen der Forschungsarbeiten untersucht wurden.

Das Verfahren ermöglicht einen vollständigen Formschluss zwischen Metall und Faserverbund, ohne dass die Fasern geschädigt werden. Durch den Formschluss können höhere Zug- und Torsionsfestigkeiten gegenüber einer konventionellen Klebung erreicht werden. Jedoch

ist der Prozess, bei dem die Pins einzeln gesetzt werden, aufgrund der Prozesszeit nur bedingt für die Produktion großer Stückzahlen geeignet.

Kugelpins:



Zylinderpins:

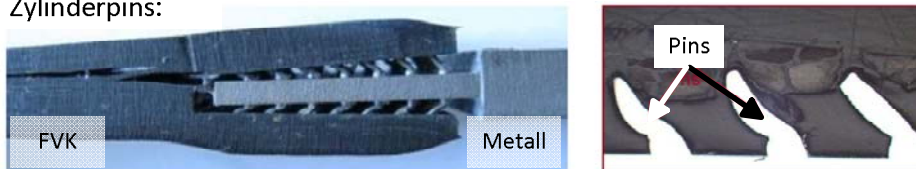


Abbildung 4: Untersuchungen zur Pin-Geometrie im Rahmen der IGEL-Technologie [Chi12]

2.2.3 Additives Laser Sintern

Beim additiven Laser Sintern werden Metallpins unter Anwendung der 3D-Druck Technologie gefertigt. Damit lassen sich sehr dünne Pin-Strukturen aus Titan in unterschiedlichen Längen erzeugen (Abbildung 5). Die Scherfestigkeit einer Titan-CFK-Verbindung kann durch diese Pins um 503 % gegenüber einer rein adhäsiven Oberflächenverbindung gesteigert werden. [Hue15]

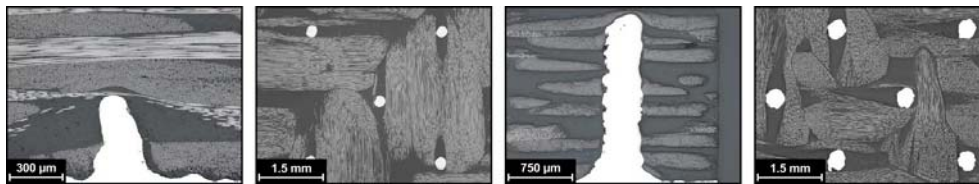


Abbildung 5: Schliffbilder durch Additives Laser Sintern erzeugter Titan-Pins unterschiedlicher Längen in einer CFK-Struktur [Hue15]

2.2.4 Laserstrukturierung

Mithilfe der Laserstrukturierung wird die Oberfläche eines Werkstücks vergrößert, um damit aktiv die adhäsiven Effekte zu unterstützen. Hierbei werden z. B. Pins mit Materialhinterschnitten durch Laser Bearbeitung im Metall erzeugt. Es entsteht eine kraftübertragende Mikroverklammerung mit einem Kunststoff Gegenstück. Der Einsatz des Lasers ermöglicht die Strukturierung in sehr kurzer Zeit, wobei ein Teil des Materials verdampft und der restliche Anteil in Form von Schmelze auf die Oberfläche aufgeworfen wird. Strukturiefen von 50 µm und Strukturbreiten von 40 µm sind realisierbar. [Str03]

Die Surfi-Sculpt-Technologie ist ein weiteres Verfahren zur Laser-Mikrostrukturierung. Die Strukturiefen liegen hierbei zwischen 200 µm und 300 µm. In diesem Verfahren wird das aufgeschmolzene Material zu definierten Strukturen aufgehäuft (Abbildung 6). [Ear12, Bla11]

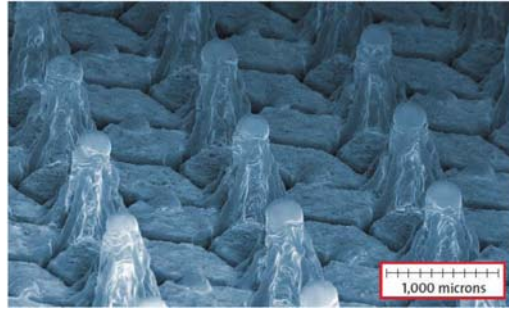


Abbildung 6: Surf-Sculpt [Ear12, Bla11]

2.2.5 Pin-Technologie durch Setzprozesse und Fließformen

Im AIF-Cluster „Großserientaugliche Prozessketten für hochintegrierte Bauteile aus hybriden Faser-Kunststoff/Metall-Verbunden“ (Abbildung 7) werden in einem Setzprozess Pins unterschiedlicher Breite und Höhe hergestellt. Der Setzprozess sieht vor, dass vorgefertigte selbstlochende Pins verwendet werden, die ein zusätzliches Hilfsfügeteil darstellen. Durch ein spezielles Werkzeug wird der Pin direkt in die Blechoberfläche eingebracht und der austretende Butzen durch die Matrice abgeführt. Dabei entstehen hohe Kontaktnormalspannungen zwischen Metall und Pin-Element sowie ein Schneidgrad am Austritt des Butzen. In diesem Cluster wurde weiterhin eine Prägetechnik untersucht, mit der Pin-Strukturen in die metallische Oberfläche eingebracht werden können. Das Verfahren benötigt kein zusätzliches Material oder Hilfsfügeelemente, sondern generiert den Pin aus dem Material des Halbzeugs heraus. Unterschiedliche Pin-Geometrien sind durch verschiedene Stempel- und Matrizenwerkzeuge einstellbar. Das metallische Halbzeug muss für die selbstlochenden Pins eine entsprechende Festigkeit aufweisen und für den Prägevorgang fließfähig sein.

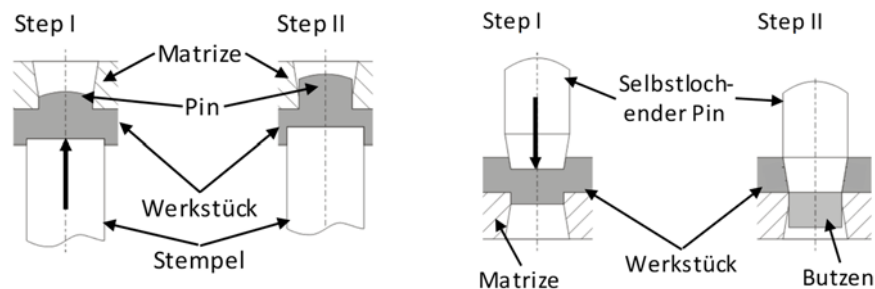


Abbildung 7: geprägte Pin-Elemente (links), selbstlochende Pin-Elemente (rechts) [Kro16]

2.2.6 Strukturierung durch mechanische Verfahren

Die kanadische Firma NUCAP entwickelte eine Technologie um ebene Blechhalbzeuge mit einer gezielt hinterschnittigen Oberflächenstruktur zu versehen (Abbildung 8). Die Strukturen sind in ihrer Ausprägung und Dichteverteilung auf dem Blech variabel. [Nuc13]

Die spezielle Strukturausprägung erzielt einen zusätzlichen Verklammerungseffekt zwischen zwei unterschiedlichen Materialpaarungen wie Metall/FVK, der sich positiv auf die Strukturintegrität des Verbundes auswirkt. Allerdings sind die auf diese Weise hergestellten Blechhalbzeuge nicht mehr für eine Bauteilherstellung durch Umformen geeignet, da hierdurch die erzeugte Struktur zerstört würde.

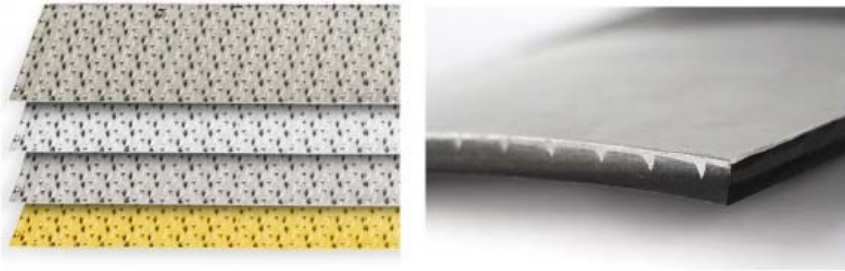


Abbildung 8: NRX™-Materialien links und Verzahnung im Verbund (rechts) [Nuc13]

Im Rahmen des Forschungsprojektes „HyTensile“ (EFB - AiF 18112 N) wird am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig ein spezieller Verklammerungseffekt zwischen Metall und faserverstärktem Kunststoff untersucht (Abbildung 9). Ziel ist die strukturelle Integrität im Bereich der Grenzflächen hybrider Materialpaarung zu steigern.

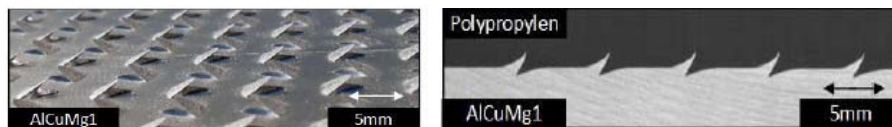


Abbildung 9: Strukturierte Oberfläche (links), Schlibbild Hybridprobe (links rechts) [Drö15]

In dem Vorhaben werden dazu in einem Stoß-/Umformprozess Einzelstrukturen auf einer metallischen Oberfläche erzeugt, welche einen Formschluss mit der Kunststoffkomponente ermöglichen. Die Ergebnisse aus dem Projekt zeigen, dass durch Verklammerungsstrukturierung die Verbundfestigkeit deutlich gesteigert werden kann (Erhöhung der maximal übertragbaren Kräfte, Vergrößerung des Lastaufnahmeweges) [Drö15]. Hierbei lag der Fokus des Projektes auf der Erzeugung bzw. der Wirkung einzelner Strukturausprägungen auf die Verbundfestigkeit von Metall-FVK.

2.3 Lochformung in Faserverbundwerkstoffen

Die in Abschnitt 2.2 vorgestellten Verbindungstechnologien sind für (zum Teil) formschlüssige Verbindungen zwischen den Pins und Kunststoffen ausgelegt. Bei der Verwendung von Faserverbundwerkstoffen ist neben dem Lastaufnahmevermögen der Pin-Strukturen vor allem die Lasteinleitung von den Pins in die Fasern kritisch.

Bei klassischen Fügeverfahren unter Verwendung von Bolzen oder Nieten ist es erforderlich Durchgangslöcher in den Faserverbundwerkstoff einzubringen. Bei der üblichen Erzeugung der Löcher durch Bohren oder Stanzen werden im Lochbereich die lasttragenden Fasern durchtrennt. Die Trennung der Fasern wird bei Lochformung vermieden.

Schon im Jahr 1973 wurden bei der Erforschung der Faserverbundwerkstoffe die Vorteile von geformten gegenüber gebohrten Durchgangslöchern aufgezeigt [Wie73]. In den folgenden Jahrzehnten wurden eine Reihe von weiteren Forschungsarbeiten durchgeführt, die diese Ergebnisse für verschiedene Faser-Matrix-Kombinationen bestätigten. Im Jahr 1987 zeigten beispielsweise [Cha87] experimentell, dass Lochformung durch graduelles Aufweiten der Fasern mittels eines spitzen Stahldorns die Bruchfestigkeit um bis zu 38,3% steigern kann. Der Grund hierfür ist, dass neben dem erhöhten Faservolumengehalt im Grenzbereich um das geformte Loch die lasttragende Faserkontinuität weiterhin erhalten wird, während bei den gebohrten Proben diese offensichtlich zerstört wird. Dieser zentrale Unterschied wird in Abbildung 10 schematisch dargestellt.

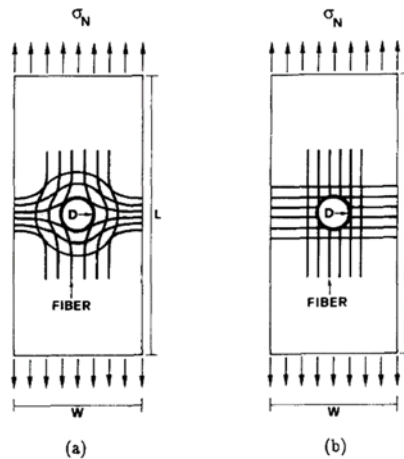


Abbildung 10: Faserstruktur: (a) geformtes Loch, (b) gebohrtes Loch [Lin94]

Das betrachtete Probengewebe bestand aus einer duroplastischen Epoxidharzmatrix, die mit Kohlenstoff- bzw. Kevlarfasern verstärkt wurde. Auch wenn auf diese Weise prinzipiell der Grundstein für weiterführende Forschung gelegt wurde, ist festzuhalten, dass dieses Material nur bedingt mit Organoblechen vergleichbar ist.

Stellvertretend für eine Reihe an weiteren Publikationen lässt sich resümieren, dass in den Folgejahren vertieft textile FVK-Prepregs bzw. -Lamine auf verschiedene Versagenskriterien, wie dem Dauerfestigkeitsverhalten bei Lochformung hin untersucht wurden [Lin94]. Zudem wurden zahlreiche numerische Modellierungsansätze, fast ausnahmslos auf Basis der Finite-Elemente-Methode, aufgestellt [Lin95, Ng01a]. Diese textilen FVK unterscheiden sich von den betrachteten Organoblechen neben den offenkundig anderen Matrix- und Fasermaterialien vor allem durch die höhere Dehnbarkeit. Geformte Proben konnten daher, wie in Abbildung 11 dargestellt, erzeugt werden, ohne dass eine Erwärmung des Materials vor dem Durchdringen des Pins vonnöten war.

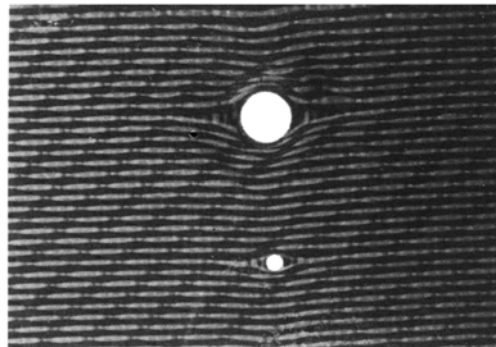


Abbildung 11: Lochgeformte Probe aus textilem FVK-Laminat - ohne Erwärmung der Fügezone [Cha87]

In der jüngeren Vergangenheit hat sich die Forschung vermehrt in Richtung von Composite-Laminaten verlagert. Composite-Lamine sind FVK, die im Gegensatz zu den textilen FVK-Geweben in steifen Platten angefertigt werden. Die Struktur dieser Platten unterscheidet sich

stark von den Geweben, da mehrere unidirektionale Schichten von Faserverbunden zusammengefügt werden, ohne die Fasern schichtübergreifend zu verschlechtern [Sch05]. Bedingt durch die Steifigkeit dieser Platten ist eine Lochformung nicht ohne weiteres möglich, da so ein Großteil der betroffenen Fasern bräche. Eine Möglichkeit, dies zu verhindern, besteht beispielsweise darin, die Lochformung bereits während der viskosen Phase des Matrixharzes im Herstellungsprozess durchzuführen. Auf diese Weise können Fasern dem eindringenden Stahldorn ausweichen [Zit11]. Während dieser Prozess für eine optimierte Großserienproduktion gut geeignet ist, bietet sich für kleinere Stückzahlen an, die Fügezone der Probe im Nachhinein lokal zu erwärmen. Verschiedene Prozesse mit dieser Erwärmungsmethode wurden bereits patentiert [Huf06, Kra14] und im Jahr 2006 befasste sich eine Forschungsarbeit mit der Suche nach einem geeigneten Referenzverfahren für lochgeformte Verbindungen von Organoblechen als Stellvertreter für Hochleistungsverbundwerkstoffe [Lei06]. Üblicherweise wird in den gezeigten Verfahren der Fügebereich der Probe mit einem elektrischen Heizelement, Leistungultraschall, Heißluftgebläse oder Infrarot(IR)-Bestrahlung aufgeschmolzen. Die Lochformung wird in verschiedenen Fertigungsprozessen zur Herstellung von hybriden Verbunden genutzt.

2.3.1 Thermoclinchen

Beim Thermoclinchen wird zunächst ein thermoplastischer Faserverbundwerkstoff an der zu fügenden Stelle kreuzförmig vorgeschritten. Dieser Bereich wird auf ein vorgebohrtes Loch eines Metallblechs gelegt. Anschließend wird die Fügezone erwärmt und mit einem Dorn durchstoßen (Abbildung 12 a und b). Zuletzt wird der ins Loch gezogene Kragen mit einem Stempel an das Loch angeformt (Abbildung 12 c). Durch den Vorschnitt wird hierbei die Fasertrennung im Lochbereich bewusst erzeugt. [Gud15]

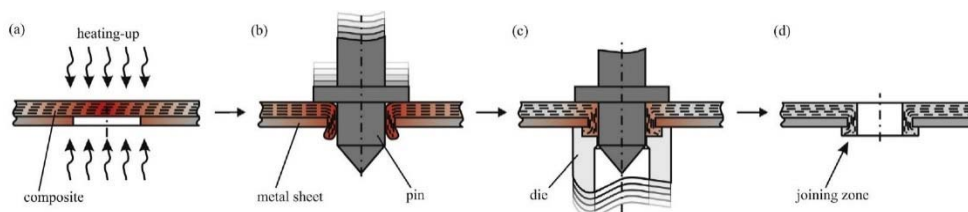


Abbildung 12: Verfahrensablauf beim Thermoclinchen [Gud15]

2.3.2 Thermomechanisches Ausformfügen

In [Kro09] wird das thermomechanische Ausformfügen (TAF) beschrieben. Mit dieser Verbindungstechnik können thermoplastische FVK und Metallbleche durch Ausnutzung der lokal plastischen Fließeigenschaften des Metalls und dem lokalen Aufschmelzen des FVK miteinander verbunden werden. Das Verfahren verwendet hierzu einen rotierenden Dorn, der thermomechanisch eine Hülse aus dem Metall ausformt. Diese Hülse durchdringt den darunterliegenden FVK und wird anschließend beim Zurückfahren des Dorns durch einen weiteren Prozessschritt zu einer formschlüssigen Verbindung umgeformt.

Das Prinzip ist in Abbildung 13 dargestellt. Durch den thermomechanischen Prozess bzw. durch die Reibungswärme, welche durch den rotierenden Dorn lokal im Bereich der Fügestelle in den FVK eingeleitet wird, plastifiziert der thermoplastische FVK. Die im Polymer verankerten Fasern (Endlosfaser) werden dadurch beweglich und können dem Verbindungselement (der eingetriebenen Hülse) ausweichen, wodurch die Faserschädigung minimiert wird (Abbildung 14). [Sei11]

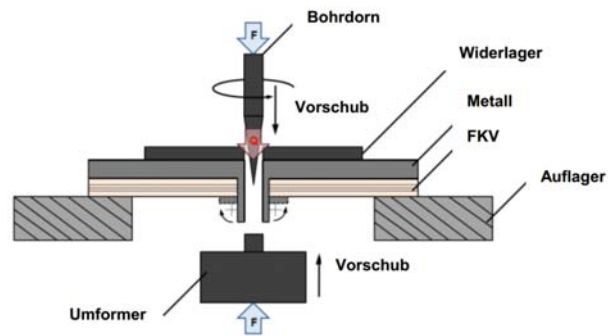


Abbildung 13: Anlagenprinzip des thermomechanischen Ausformfügen [Kro09]

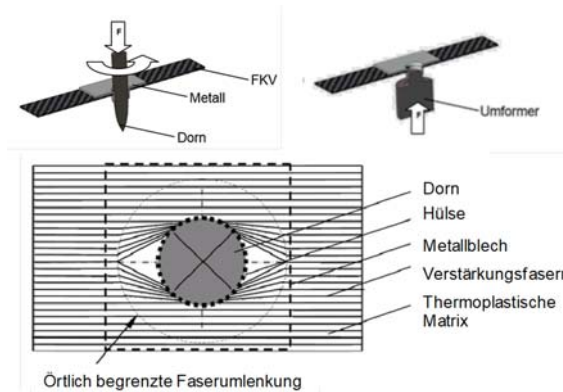


Abbildung 14: Faserablenkung beim thermomechanischen Ausformfügen [Kro09]

2.3.3 Z-Pinned – Hybride Strukturen

In [Mou10, Par03] wird eine „Z-Pinned Composite Struktur“ beschrieben, die unter anderem im Flugzeugbau eingesetzt wird, um die Strukturintegrität eines CFK-Bauteils vor allem in Z-Richtung zu erhöhen. Hierzu wird das CFK-Bauteil mit Titan- oder Stahlpins verstärkt, die wiederum Delaminationsvorgänge verhindern und die Bauteilperformance gegenüber Stoßbelastungen steigern. Die Pin-Strukturen haben einen Durchmesser von < 1 mm und sind in der Regel durch ein Trägermedium in ihrer Position fixiert. Dieses Medium wird benötigt, um die Strukturen möglichst senkrecht in einer angemessenen Prozesszeit einbringen zu können.

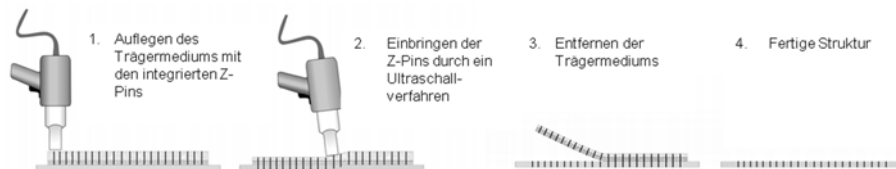


Abbildung 15: Prozesskette - Eintreibung von Z-Pin Strukturen [Mou10]

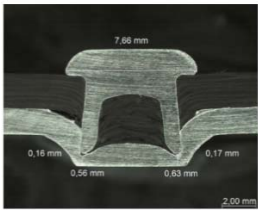
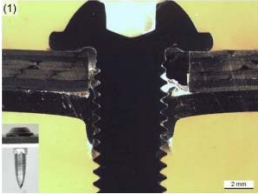
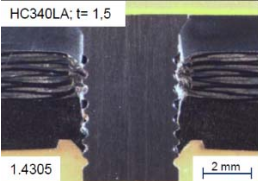

Die so präparierten Pin-Strukturen werden im Folgenden auf den zu verstärkenden Bereich der FVK Struktur gelegt und durch Ultraschalltechnik in die Verbundwerkstoffe eingetrieben.

Durch die kleinen Abmessungen und die Geometrie der Pins sowie der hohen Schwingungsfrequenz werden die Fasern im Bereich der Eindringstelle nur minimal beeinflusst und kaum beschädigt. Abbildung 15 stellt die Prozesskette zur Eintreibung von Z-Pin Strukturen dar.

2.4 Mechanische Fügeverfahren zum Fügen von FVK

Die mechanischen Fügeverfahren wie Voll-, Halbholstanznieten und fließlochformendes Schrauben wurden ursprünglich zum Fügen von metallischen Blechen entwickelt. Der Vorteil dieser Fügeverfahren gegenüber stoffschlüssigen Schweißverfahren wie Widerstandselementschweißen liegt in der Möglichkeit inkompatible Materialkombinationen ohne Wärmeeintrag zu fügen, was bei Kombinationen mit faserverstärkten Kunststoffen von großer Bedeutung ist. In [Ber14, Mes15a, Mes15b, Mes15c] werden die mechanische Fügeverfahren beim Fügen von Faserverbundwerkstoffen mit Stahlwerkstoffen untersucht. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse dieser Untersuchung zusammengefasst.

Tabelle 1: Mechanische Fügeverfahren zum Fügen FVK-Strukturen [Ber14, Mes15a, Mes15b, Mes15c]

Fügeverfahren	Vor- und Nachteile des Verfahrens	Schliffbild einer Fügeverbindung
Halbholstanznieten	<p><u>Vorteile des Verfahrens:</u> Verbinden unterschiedlicher Materialkombinationen wie Stahl/Aluminium, Stahl/FVK; kein Vorbohren erforderlich; wärmefreies und damit verzugsarmes Verbinden.</p> <p><u>Nachteile des Verfahrens:</u> beim FVK-Mischbau muss ein duktiler metallischer Fügepartner vorhanden (höchsthafte Werkstoffe sind nicht ffügbar); Zerstörung der lasttragenden Fasern durch den Durchstanzprozess.</p>	
Fließlochformendes Schrauben	<p><u>Vorteile des Verfahrens:</u> Verbinden unterschiedlicher Materialkombinationen; einseitige Zugänglichkeit; kein Vorlochen erforderlich; hohe Verbindungsfestigkeit; kein Verzug der Bauteile.</p> <p><u>Nachteile des Verfahrens:</u> Bei hochfesten Stählen verringert sich das Prozessfenster; Bei Fügen von FVK-Strukturen kommt es ohne Vorlochen zu einer Delamination; Zerstörung der lasttragenden Fasern.</p>	
Schließelementstanznieten	<p><u>Vorteile des Verfahrens:</u> Verbinden unterschiedlicher Materialkombinationen; FVK wird durch das Anpressen des scheibenförmigen Gegenhalter kraft und formschlüssig gehalten;</p> <p><u>Nachteile des Verfahrens:</u> Vorlochen erforderlich; Zerstörung der lasttragenden Fasern;</p>	
Stanzmuttersetzen	<p><u>Vorteile des Verfahrens:</u> Verbinden unterschiedlicher Materialkombinationen; lösbare Verbindung mit FVK-Struktur ist möglich;</p> <p><u>Nachteile des Verfahrens:</u> beschleunigtes Kriechen im Klemmbereich; Vorlochen ist erforderlich; Zerstörung der lasttragenden Fasern durch den Durchdringungsprozess.</p>	

2.5 Verbindungselemente

Für die Verbindung artfremder Werkstoffe werden üblicherweise Verbindungselemente eingesetzt, welche die Fügepartner vorwiegend formschlüssig und zum Teil kraftschlüssig verbinden. Bei einigen Verbindungsarten wird das Verbindungselement auch stoffschlüssig mit einem der Fügepartner verbunden und bindet so den anderen Fügepartner form- bzw. kraftschlüssig an.

2.5.1 Koppelungsinserts

Die DFG-Forschergruppe 860 untersucht neue Prozessketten für endlosfaserverstärkte Kunststoffbauteile. Der Schwerpunkt liegt in der Integration von Preforms, Imprägnieren, Formen und Vernetzen. In [Hop13] wird hierzu die Bauteilfertigung durch unterschiedliche Prozessketten zur Bauteilherstellung beschrieben. Ziel ist es hierbei bereits im Herstellprozess ein entsprechendes Krafteinleitungselement im Bauteil zu integrieren. Hierzu wurde ein Insert gefertigt, welches durch ein Innengewinde auch die spätere Demontage eines Verbundes aus FVK und Metall ermöglicht.

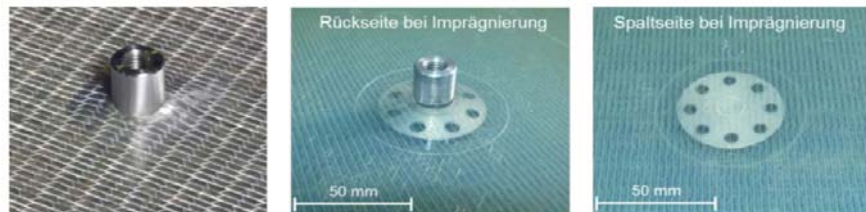


Abbildung 16: Insert-Technologie [Hop13]

Die Insert-Technologie (Abbildung 16) bietet den Vorteil, dass nachgelagerte Prozessschritte, die für die Einbringung ähnlicher Krafteinleitungselemente nötig wären, entfallen. Voraussetzung für eine hohe Tragfähigkeit ist jedoch die fehlerfreie Imprägnierung des Preforms im Bereich des Inserts, sowie die vorherige Kenntnis der genauen Anbindungsposition. [Hop13]

2.5.2 Stanznieten

In [Fra11, Fra12] wird das Stanznieten für eine Fügeverbindung zwischen CFK- und Aluminiumbauteile untersucht. Hierfür wurden hybride Strukturen aus einem Klebverbund von Aluminium und CFK aufgebaut, wobei der Schichtaufbau des FVK variiert wurde. In diese Proben wurde dann gezielt der Halbhohlstanzniet in den bereits bestehenden Verbund eingebracht. Der prinzipielle Ablauf ist in Abbildung 17 dargestellt.

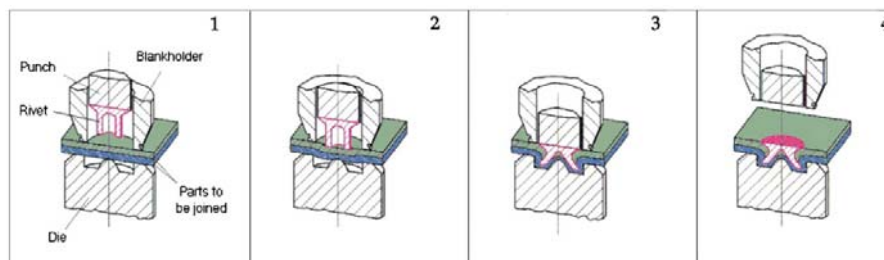


Abbildung 17: Stanznieten eines hybriden FVK-Metall-Verbundes [Fra12]

Die Proben wurden im Zug- und Scherversuch beansprucht und mit einfach genieteten und einfach verklebten Proben verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Kombination

der beiden Fügeverfahren die maximal übertragbare Last gesteigert, sowie die Energieabsorption und die Steifigkeit verbessert werden konnten. Es zeigte sich jedoch auch, dass die Probenkörper jeweils an der Nietstelle versagten, da hier der Verbund besonders durch das Durchtrennen der Fasern geschädigt wurde (Abbildung 18).



Abbildung 18: Strukturversagen beim Stanznieten durch Faserschädigung [Fra12]

2.5.3 Flow Drill Schrauben

Die Flow Drill Screw Technologie (Abbildung 19) ist eine geeignete Verbindungstechnik, um Werkstoffpaarungen unterschiedlicher Materialien zu fügen. Die Basis dieses Fügeprozesses ist ein Patent der Firma EJOT, die eine Zink/Nickel beschichtete Schraube mit einer fließlochbildenden Spitze beschreibt.

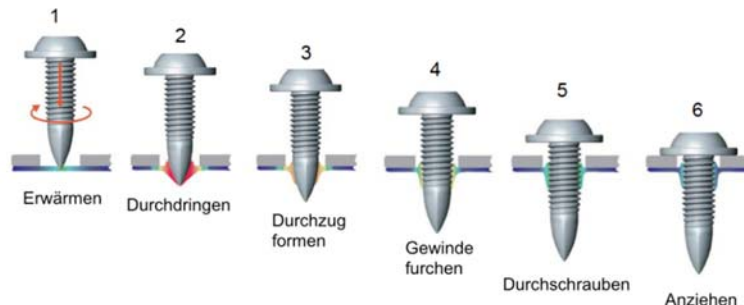


Abbildung 19: Prozessskizze - Fügeprozess Flow Drill Schrauben (EJOT)

Mit dieser Schraube können in einem vollautomatisierten Prozess auch einseitig zugängliche Verbindungen ohne Vorloch erzeugt werden. Das klemmseitige Bauteil ist frei in der Materialwahl. Als Einschraubmaterial ist Stahl, Aluminium oder auch Magnesium möglich. Eine so hergestellte Verbindung zeichnet sich durch sehr hohe Festigkeiten aus und weist keinen Verzug der Bauteile auf. Die selbstfurchenden Schrauben finden aktuell bei der Aluminium Space Frame (ASF)-Karosserie der Audi AG Anwendung. Dieses Verfahren ist jedoch hinsichtlich der verwendbaren Werkstoffe begrenzt. Mit zunehmender Werkstofffestigkeit, wie z.B. bei hochfesten Stählen, verringert sich das Prozessfenster. Bei FVK kommt es ohne Vorlochen zu einer Delamination des Werkstoffs.

2.5.4 Nieten – Blindnieten

In [Avk10] werden Bolzenverbindungen als nicht fasergerecht beschrieben, da durch das Einbringen von Bohrungen die Faserstruktur unterbrochen wird. Sie bieten aber gegenüber geschweißter bzw. geklebter Verbindungen den Vorteil, dass sich die Verbindung wieder lösen lässt. Außerdem lassen sich so unterschiedliche Materialien fügen. [Wil13] zeigt, dass beim Fügen mittels Blindnieten häufig mit Imperfektionen in der Laminatschicht zu rechnen ist. Dabei handelt es sich vor allem um Delaminationen und Zwischenfaserbrüche. Ein Nachteil von

Blindnietverbindungen ist die geringe tragende Querschnittsfläche im Vergleich zu einem Vollniet. Für Abhilfe sorgt in diesem Fall ein mittragender Nietdorn. Großen Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit bei Faserverbundwerkstoffen hat die Kopfauflagefläche. Insbesondere bei CFK-Verbindungen ist auf Korrosionsschutzmaßnahmen zu achten, da die Bauteile im Verbund ein unterschiedliches elektrochemisches Potenzial aufweisen. [Nie12]

2.5.5 Widerstandselementschweißen

Widerstandspunktschweißen ist ein Verfahren, welches unter anderem im Automobilbereich weit verbreitet ist. Es beruht darauf, dass die Materialpartner ähnliche Schmelztemperaturen besitzen und sich bei Einleitung eines Schweißstromes und der damit verbundenen Erwärmung die Materialien lokal verflüssigen und stoffschlüssig miteinander verbinden. Eine Weiterentwicklung des Widerstandspunktschweißens ist das Widerstandselementschweißen, das dem Buckelschweißen von Schweißmuttern ähnlich ist [DIN 928]. Um dieses Verfahren auch bei der Materialkombination Aluminium und Stahl einsetzen zu können, deren Schmelztemperaturen sich stark unterscheiden, wird ein Schweißniet benötigt. Das Verfahren wurde von der Volkswagen AG entwickelt und in einer Offenlegungsschrift ausgiebig beschrieben. [DE 10 2010 026 040 A1-Offenlegungsschrift]



Abbildung 20: Widerstandselementschweißen durch modifizierten Schweißniet [Mes13b]

Das Widerstandselementschweißen lässt sich auch zur Verbindung von FVK und Stahl einsetzen (Abbildung 20). Hierzu wird der Schweißniet durch einen Lochstanzprozess bzw. Einlegen in ein vorgebohrtes Loch in den metallischen Fügepartner appliziert. Hierauf folgt in einem zweiten Prozessschritt eine klassische Widerstandsschweißung, welche den Schweißniet stoffschlüssig an die metallische Struktur anbindet. Durch die axiale Stauchung des Nietes und der Schrumpfung beim Abkühlen nach dem Prozessschritt entsteht eine form- und kraftschlüssige Anbindung des oberen Fügepartners an die metallische Struktur [Mes13a, Hah12]. Ein Nachteil dieses Verfahrens besteht in der lokalen Zerstörung des Fasermaterials durch das Einstanzen bzw. Vorbohren.

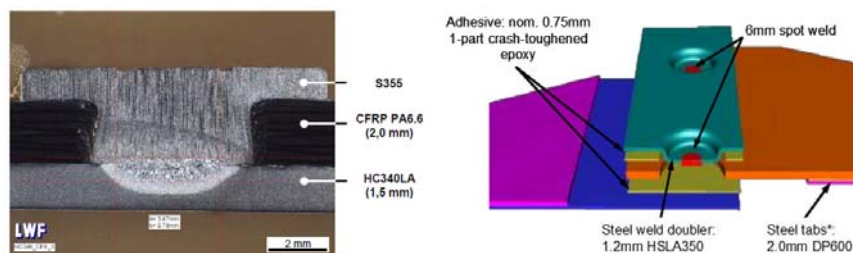
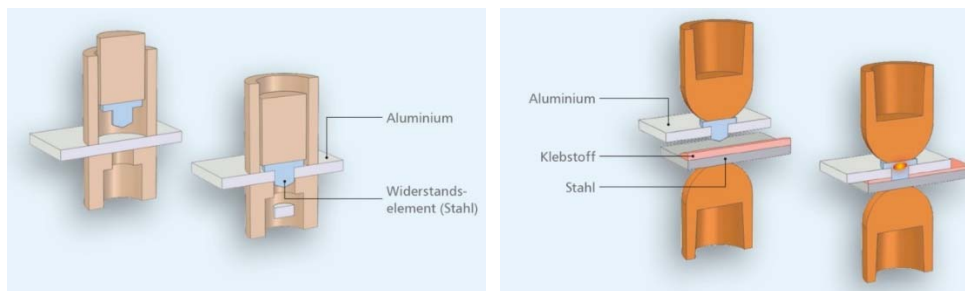


Abbildung 21: links - Gefügte hybride Verbunde unter Verwendung von Widerstandsschweißtechnik [Mes13b], rechts - mittels Stahlband gefügter Verbund [Fuc10]

Eine weitere Vorgehensweise, bei dem die Widerstandsschweißtechnik zur stoffschlüssigen Verbindung von Stahl und FVK eingesetzt wird, ist in einer Zusammenarbeit des Automotive Composites Consortium (ACC) entstanden und in [Sha10] und [Fuc10] beschrieben. Demnach werden umgeformte Stahlbänder in das vorgelochte FVK eingesetzt, die Fügestellen entstehen zwischen den Buckeln des Stahlbandes und dem Stahlunterblech (Abbildung 21).

2.5.6 Thermisches Fügeverfahren Widerstandselementschweißen

Zum Fügen artfremder Werkstoffe mit metallurgischer und thermischer Unverträglichkeit sind geeignete Fügeverfahren notwendig. Eine Möglichkeit zum Verbinden solcher Materialkombinationen stellt das Widerstandselementschweißen dar, welches ursprünglich zum Fügen von Aluminium mit Stahl von der Volkswagen AG entwickelt wurde und in einer Offenlegungsschrift [DE 10 2010 026 040 A1-Offenlegungsschrift] ausgiebig beschrieben ist. Das Widerstandselementschweißen ist ein zweistufiger Fügeprozess, der das konventionelle Widerstandsschweißen mit einem Stanzen kombiniert (Abbildung 22).



a) Einstanzen und Verprägen des Elementes

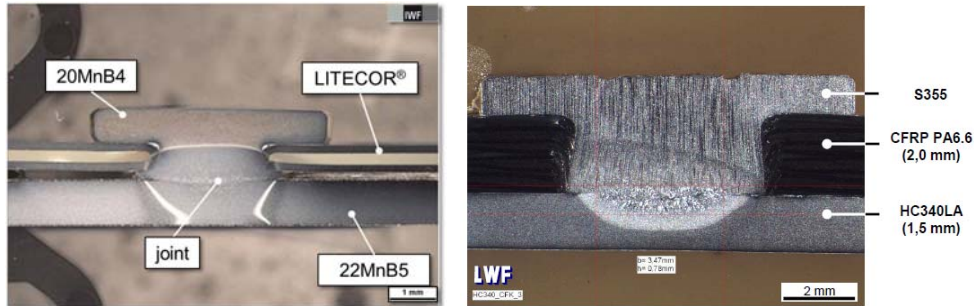
b) das Widerstandsschweißen

Abbildung 22: Schematische Darstellung des Widerstandselementschweißens von Aluminium mit einem Zusatzelement [Ham17]

Zunächst wird das Fügeelement in das Deckblech eingestanzelt. Bedingt durch die Form der Matrize entstehen Vorprägungen zwischen Elementschafte und Deckblech, die ein Herausfallen des Elements verhindern (Abbildung 22a). Im zweiten Prozessschritt erfolgt ein Klebstoffauftrag auf das Basisblech. Die hinausragende Schaftspitze des Fügeelements verdrängt unter Wirkung der Elektrodenkraft den Klebstoff und schließt den Stromkreis. Anschließend folgt eine klassische Widerstandsschweißung, die den Schweißniet stoffschlüssig an die metallische Struktur anbindet. Durch die axiale Stauchung des Nietschaftes und der Schrumpfung beim Abkühlen nach dem Prozessschritt entsteht eine form- und kraftschlüssige Anbindung des oberen Fügepartners an die metallische Struktur (Abbildung 22b). [Hah12, Mes13a]

Die schweißtechnische Entkopplung des Deckblechs und Grundmaterials ermöglicht die Schweißverbindungen zwischen herkömmlich nicht schweißgeeigneten Werkstoffen. Das Widerstandselementschweißen wird bereits in der Serienfertigung der Automobilindustrie zum Fügen von Aluminium mit Stahl eingesetzt. In [Mes13a, Hol17] sind weitere Materialkombinationen dargestellt, die mittels Widerstandselementschweißen gefügt sind. Es wird ein Leichtbauwerkstoff LITECOR® mit pressgehartetem Stahlblech 22MnB5+AS150 (Abbildung 23a) und ein faserverstärkter Kunststoff mit einem mikrolegierten Stahl HC340LA gefügt (Abbildung 23b). Die Besonderheiten dieser Verbundwerkstoffe liegen im wärmeempfindlichen Kunststoffkern des Sandwichblechs (Delaminationsvorgang) sowie der Matrix des faserverstärkten Kunststoffes. Die Zersetzungstemperatur der Kunststoffmatrix und des Polymerkerns liegt bei ca. 250 °C und die Gebrauchstemperatur der Kohlenstofffaser bei ca. 500 °C, sodass eine Optimierung des Schweißprozesses erforderlich ist [Thy13]. In [Obr15] wurde bereits eine energieoptimierte Kurzzeitschweißtechnik beim Widerstandselementschweißen realisiert. Der Schwerpunkt dieser Technologie liegt einerseits in einer Verkürzung der Schweißzeit auf

ca. 10 ms sowie andererseits einer Erhöhung der Stromstärke, sodass die thermische Belastung auf die wärmeempfindlichen Materialien beim Widerstandselementschweißen gering bleibt.



a) Schlichtbild von 22MnB5 mit LITECOR®

b) Schlichtbild von FVK mit HC340LA

Abbildung 23 Schlichtbilder von 22MnB5 mit LITECOR® (links) sowie FVK mit HC340LA (rechts)

Eine weitere Besonderheit liegt in der Struktur des Faserverbundwerkstoffes. Um diese Technologie zum Fügen von FVK-Strukturen einzusetzen, ist es erforderlich eine geeignete Applikationstechnik für die Elemente zu entwickeln, da das Einstanzen bzw. Vorlochen eine lokale Durchtrennung des Fasermaterials verursacht. Dies hat einen negativen Einfluss und führt zur Reduzierung der Festigkeit des Verbundwerkstoffes. [Ng01b]

2.6 Sonstige Hybridisierungstechnologien

2.6.1 Direkte Faseranbindungstechnologien mittels Gießtechnik

Hochbeanspruchte und im Wesentlichen flächige Strukturen im Luftfahrtbereich sowie im allg. Maschinenbau und der Energiebranche werden in Endlosfaserverbundsystemen hergestellt. Im Lasteinleitungsbereich derartiger Strukturen treten häufig konzentrierte, dreidimensional wirksame Lastkollektive auf, die vorzugsweise mit metallischen Komponenten bewerkstelligt werden. Kritisch ist dabei der Übergangsbereich von der metallischen zur Faserverbundstruktur, in dem die Kraftübertragung stattfindet. Die Forschergruppe 1224 der DFG untersucht hierzu die Herstellung von Übergangsstrukturen zwischen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) und Aluminium. Hierbei werden drei Konzepte verfolgt, die die Anbindung über Schlaufen oder Lamine aus Titan oder Glasfasern realisieren. Ziel ist unter anderem den direkten Kontakt CFK/Aluminium aufgrund der Kontaktkorrosionsproblematik zu verhindern. Das Drahtkonzept (Abbildung 24 links) beruht auf einer formschlüssigen Lösung bei dem Tigtandrahmschlaufen im Aluminium durch gieß- oder schweißtechnische Verfahren angebunden werden. Diese Schlaufentopologie ermöglicht in einem darauffolgenden Prozessschritt die textiltechnische Anbindung des CFK. [For1224, Sch11]

In der konstruktiven Ausgestaltung konzentrieren sich derartige Lösungsansätze vornehmlich auf punkt-, flächen- oder schlaufenförmige Krafteinleitungen und haben nur begrenzt die flächige Kopplung von zwei Werkstoffgruppen im gesamten Bauteil zum Ziel. Ein ähnlicher Ansatz wird in dem Projekt „HyDru“ (Abbildung 25) verfolgt, bei dem die Entwicklung des Gießprozesses zur integralen Verbindung von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff und Aluminiumgussbauteilen im Vordergrund steht. Hierbei soll das Leichtbaupotenzial hybrider Bauteile durch eine werkstoff- und lastpfadgerechte Gestaltung des Materialübergangs gesteigert werden. Untersucht wird in diesem Zusammenhang die partielle Infiltration textiler Verstärkungselemente mittels Aluminium-Niederdruckguss zur Anbindung an die Kohlenstofffasern. [Auw15]

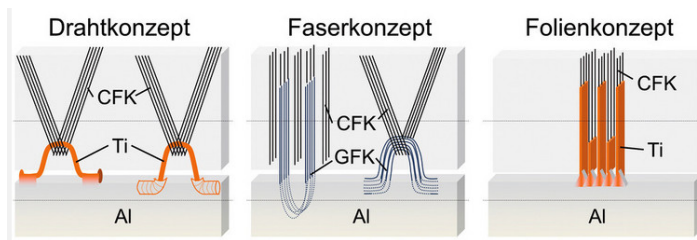


Abbildung 24: Anbindungskonzept der DFG Forschergruppe 1224 „Schwarz – Silber“ [Lan11]

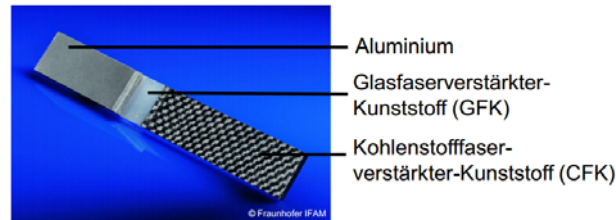


Abbildung 25: Probekörper aus dem Projekt HyDru [Auw15]

2.7 Fazit zum Stand der Technik

Bisherige Konzepte zur formschlüssigen Verbindung von Faserverbundwerkstoffen mit metallischen Werkstoffen setzten vorwiegend auf eine große Zahl an sehr schlanken, meist spitzen Pins. Alle diese Konzepte haben den Nachteil, dass durch den hierbei ermöglichten Versagensfall des Pin-Auszugs bzw. Ausknöpfens die Tragfähigkeiten der Fügepartner nicht umfassend genutzt werden. Die bestehenden Verfahren zum Fügen von FVK-Metall-Verbindungen mittels Verbindungselementen sind meist für andere Anwendungen entwickelt worden und berücksichtigen nicht die spezifischen Besonderheiten, die sich durch die Faserstruktur ergeben. Das Forschungsvorhaben grenzt sich durch die Entwicklung des neuartigen Blechverbindungs-elementes zur Herstellung einer hybriden Struktur aus FVK und einem Stahlblech von anderen Forschungsvorhaben ab. Durch die spezielle Kombination aus Durchdringungstechnologie und Verbindungstechnik wird mit dem neuen Verfahren eine lokale Schädigung des FVK-Materials, wie es bei Schraub-, Stanz- oder Nietverbindungen der Fall ist, vermieden oder zumindest vermindert. Die Geometrie wird dazu speziell an die Erfordernisse der FVK-Werkstoffe angepasst. Das Verfahren eignet sich somit dazu, die Performance von Multi-Material-Bauweisen bzw. hybriden Strukturen aus Metall und FVK weiter zu steigern und erschließt neue Anwendungsbereiche für Multi-Material-Konzepte.

3 Forschungsziel und Lösungsweg

3.1 Forschungsziel

Ziel des Forschungsantrages ist die Entwicklung einer form- und kraftschlüssigen Verbindungstechnik für die Materialkombination von FVK mit thermoplastischer Matrix und Stahl durch die Erweiterung des Widerstandsschweißens. Hierzu werden neuartige Blechverbindungselemente entwickelt, die später industriell mittels eines wirtschaftlichen Stanz-/Umformprozesses hergestellt werden können. Diese sollen im Gegensatz zu üblichen Schraub- oder Nietverbindungen ein ausgehärtetes FVK-Bauteil faserschädigungsarm im Bereich der Fügezone durchdringen und mittels entsprechender Schweißtechnik an ein darunterliegendes Stahlblech anbinden.

Die besondere Herausforderung liegt hierbei in der Gestaltoptimierung des Blechverbindungselementes, an die verfahrensspezifischen Besonderheiten hinsichtlich Durchdringung und Schweißanbindung. Des Weiteren sollen die technologischen Grenzen des neuen Verfahrens ermittelt werden, die z.B. vom Lagenaufbau, Faservolumengehalt oder aber von der Materialstärke abhängig sein können.

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens lässt sich in die folgenden Teilziele gliedern:

- Entwicklung einer Technologie zur schädigungsarmen Durchdringung von FVK-Bauteilen (mit thermoplastischer Matrix) durch das Verbindungselement.
- Technologieentwicklung zur schweißtechnischen Anbindung des Elementes an ein Stahlblech zu einem hybriden Verbund.
- Gestaltoptimierung des Verbindungselementes durch eine iterative Vorgehensweise der beiden Forschungsstellen mit dem Fokus auf die Verbindungsfestigkeit, wobei durch das Feedback des projektbegleitenden Ausschusses sichergestellt wird, dass das Verbindungselement als Stanz-/Umformteil realisierbar ist.
- Bewertung der technologischen Grenzen des Verfahrens im Vergleich zu Referenztechnologien.
- Entwicklung von Konzepten zur Prozessautomatisierung und Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der gesamten Prozesskette.

3.1.1 Anforderungsprofil an Verbindungselement und Fügeprozess


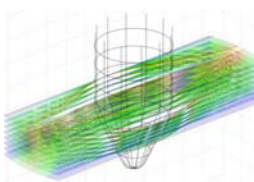

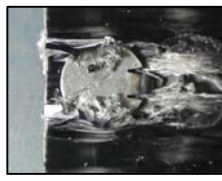
Das Widerstandselementschweißen ist ein neuartiges Verfahren zum Fügen artfremder Werkstoffe mit metallurgischer und thermischer Unverträglichkeit. In der Praxis werden bereits schweißgeeignete rotationssymmetrische Stahlniete bzw. Widerstandselemente verwendet, die im ersten Schritt in ein Deckblech eingestanzte werden und im zweiten Prozessschritt mit einem Stahlblech geschweißt. Die konventionellen Widerstandselemente haben allerdings beim Fügen von FVK mit Stahl gewisse Nachteile, unter anderem wird der Faserverbundwerkstoff im Stanzprozess durch die Lochung geschädigt. Um die Aufgaben für ein neues Fügeverfahren zu konkretisieren, ist in Tabelle 2 das Anforderungsprofil bezogen auf die Kategorien neuartiges Verbindungselement, Durchdringungsprozess, Schweißprozess und Fügeverbindung dargestellt.

3.1.2 Forschungsergebnisse

Verschiedenste Varianten des Verbindungselements wurden untersucht, die sich neben dem Werkstoff vor allem durch die Fußgeometrien unterscheiden. Nach dem Abschluss der Forschungsarbeiten und zum Ende des Vorhabens ist bekannt, welche geometrischen Restriktionen des Verbindungselements sich aus den Fertigungsprozessen stanzumformtechnische Herstellung von Verbindungselementen, Durchdringungs- und Schweißprozess ergeben. Es wurde eine geeignete Verbindungselementgeometrie entwickelt, die alle Anforderungen erfüllt

und darüber hinaus sowohl kostengünstig herstellbar ist, als auch eine gute Verbindungsfestigkeit gewährleistet.

Tabelle 2: Anforderungsprofil

Anforderungen	<p>Verbindungselement</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Das Verbindungselement soll in einem Umformprozess aus einem Blech herstellbar sein. 2. Das Verbindungselement soll sowohl für schädigungsarme Durchdringung als auch für die schweißtechnische Anbindung geeignet sein.
	<p>Durchdringungsprozess</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Beim Durchdringungsprozess sollen möglichst wenig Fasern geschädigt werden. 2. Der Prozess soll möglichst schnell bei geringer thermischer Schädigung ablaufen 3. Nach der Durchdringung müssen die Fußspitzen freiliegen.
	<p>Schweißprozess</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Es soll ein geringer Wärmeeintrag durch den Schweißprozess (Zerstörung von Verbundwerkstoff ist zu vermeiden) eingebracht werden. 2. Ein stabiler Schweißprozess (Prozessfenster bzw. Schweißbereich $> 1,2 \text{ kA}$) ist zu erreichen. 3. Der Schweißprozess soll mit einem Strukturklebstoff kombinierbar sein.
	<p>Fügeverbindung</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eine ausreichende Verbindungsfestigkeit ist zu gewährleisten (Versagen des Verbundwerkstoffes bei zerstörender Prüfung). 2. Korrosionsbeständigkeit eines Verbindungselementes in Materialkombination mit CFK 3. Möglichkeit zur Qualitätsbewertung

Wissenschaftlich/technische Ergebnisse

Aus wissenschaftlich/technischer Sicht liegen folgende Ergebnisse vor:

- Ein Verfahren zur Durchdringung von faserverstärkten Kunststoffen durch die Verbindungsglieder eines Blechverbindungselements. Das Ergebnis besteht in der wissenschaftlichen Untersuchung von unterschiedlichen Verfahren und Parametervariationen zur schädigungsarmen Durchdringung eines thermoplastischen FVK durch das Blechverbindungsglied. Hierzu wird die Matrix thermisch lokal plastifiziert,

wodurch die Fasern beweglich werden und dem Durchdringungskörper (Verbindungsglied) teilweise ausweichen können.

- Ein Verfahren zur wärmearmen schweißtechnischen Anbindung der Verbindungsglieder an einen Stahlwerkstoff. Ergebnis sind Erkenntnisse zum Widerstandselementschweißprozess, der durch die Elementgeometrie, die FVK-Kombinationen und den Einsatz von möglichen Klebstoffen beeinflusst wird.
- Ein Blechverbindungselement, welches einen FVK mit einem Stahlbauteil verbindet. Ergebnis ist ein geometrisch optimiertes Blechverbindungselement, welches einen FVK durchdringt, schweißtechnisch an einen Stahl angebunden werden kann und eine höhere Verbindungsfestigkeit als ausschließlich geklebte Strukturen aus FVK und Stahl erzielt. Des Weiteren zeichnet sich das Element dadurch aus, dass es kostengünstig durch einen Stanz-/Umformprozess hergestellt werden kann.
- Technologische Einsatzgrenzen des Blechverbindungselementes. Ergebnis sind Aussagen zur Verbindungsfestigkeit des neuartigen Verbindungselementes sowie eine Beurteilung der Einsatzgrenzen hinsichtlich der Materialeigenschaften, Kompatibilität und äußerer Einflüsse.
- Erste Konzepte, die zur Umsetzung in einer industriellen Anwendung im Hinblick auf Automatisierung, Wärme- und Krafterbringung zur FVK-Durchdringung und Schweißung beitragen.

Wirtschaftliche Ergebnisse

Das Forschungsvorhaben liefert folgende wirtschaftlich nutzbare Ergebnisse für die verfahrenssichere Herstellung von Mischverbindungen aus FVK und Stahlfeinblechen unter Zuhilfenahme eines Verbindungselementes:

- Vollmechanisierter Durchdringungsvorgang des Verbindungselementes durch die FVK-Matrix.
- Günstige werkstofftechnische und technologische Randbedingungen für die schweißtechnische Anbindung des Verbindungselementes.
- Entwickeltes Blechverbindungselement, welches durch einen wirtschaftlichen Stanz-/Umformprozess kostengünstig hergestellt werden kann.
- Beitrag zur Entwicklung und Umsetzung neuer Leichtbaulösungen, die zuvor nicht schweißtechnisch realisiert werden konnten.

Die Ergebnisse sind insbesondere für kleine und mittelständige Industriezweige relevant, die sich thematisch mit Verbindungskonzepten für Multi-Material-Lösungen im Bereich der Metall-Kunststoff-Anbindung auseinandersetzen. Ihr Aufgabenspektrum wird sich durch die Weiterentwicklung einer bekannten Widerstandsschweißtechnik deutlich erweitern. Außerdem ermöglicht es Unternehmen, die bisher ausschließlich im Bereich der Widerstandsschweißtechnik von metallischen Materialpaarungen aktiv gewesen sind, den Einstieg in den hybriden Leichtbau, der in Zukunft, aufgrund der technologischen und politischen Entwicklungen, stets an Bedeutung gewinnt.

3.1.3 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

Mit den gewonnenen Ergebnissen aus diesem Forschungsprojekt können Bauteile aus thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen mittels konventioneller Widerstandsschweißtechnik an verschiedenste Stahllegierungen angebunden werden.

Die Widerstandsschweißtechnik ist ein weit verbreitetes Verfahren, das heute standardmäßig für die Verbindung von metallischen Strukturen eingesetzt wird. Durch die Verwendung eines innovativen Blechverbindungselementes, welches in diesem Forschungsvorhaben entwickelt wurde, lässt sich die Widerstandsschweißtechnik auch für die Materialkombination Metall-

FVK anwenden. Hierdurch lassen sich die vorhandenen Techniken und deren Knowhow zum Widerstandsschweißen für neue Einsatzgebiete nutzen. Vor allem im Hinblick auf den „Multi-Material-Design Gedanken“, der aufgrund von technischen, wirtschaftlichen und gesetzlichen Rahmenbedingungen immer mehr in den industriellen Fokus von großen, mittelständigen und kleinen Unternehmen rückt, ergibt sich ein erhebliches Anwendungspotenzial für diese innovative Technik.

Der besondere Vorteil im Vergleich zu anderen Verbindungstechniken, die heute bereits bei einem Verbund von Metall und FVK eingesetzt werden, ist die Verwendung eines Verbindungselementes, bei dem die Fasern nicht durchtrennt bzw. bei der Applizierung nur minimal geschädigt werden. Die Schweißung wurde durch die optimierte Geometrie der Verbindungsglieder temperaturminimiert und die Verbindungsfestigkeit durch die Gesamtelementgeometrie maximiert.

3.1.4 Methodischer Ansatz zur Erreichung des Forschungsziels

Das Forschungsziel wird durch eine erfolgreiche Verbindung bei minimaler Faserschädigung und maximierter geschweißter Anbindungsfläche erreicht. Die Herstellbarkeit der Verbindungselemente im Stanzumformprozess konnte nachgewiesen werden.



Abbildung 26: Konzept für Hilfsfügeteil im Größenvergleich (1. Prototyp)

Die Widerstandsschweißtechnik ist ein etabliertes Verfahren, welches zurzeit industriell nur für rein metallische Verbindungen eingesetzt wird. Dieses Verfahren soll durch die Entwicklung eines speziellen Blechverbindungselementes für die Anwendung Metall-FVK-Verbindung erweitert werden. Neben der schweißtechnischen Anbindung der Endstücke bzw. der Spitzen der Verbindungsglieder (Abbildung 26) ist die vorherige faserschädigungsarme Durchdringung des FVK eine besondere Herausforderung.

Zur Entwicklung des Blechverbindungselementes waren daher detaillierte Kenntnisse zur Prozessgestaltung und zur Gestaltausprägung der Verbindungsglieder notwendig. So wird eine Faserschädigung mit zunehmendem Faservolumengehalt und erhöhter Lagenanzahl aufgrund der verminderten Platzverhältnisse für die Faserablenkung verstärkt auftreten. Auch die Wahl des Matrixwerkstoffes hat vermutlich einen großen Einfluss auf die Anwendung, so muss zum einen der Matrixwerkstoff lokal plastifizierbar sein und zum anderen den kurzzeitigen aber massiven Temperaturanstieg bei der schweißtechnischen Anbindung überstehen.

Hierzu wurde auf Grundlage der Vorarbeiten damit begonnen, die schwingungs- und wärmeinduzierte FVK-Durchdringung, unter der Variation der Verbindungsglied-geometrie, der Prozesseinstellgrößen, des FVK-Lagenaufbaus und Matrixmaterials zu untersuchen (AP 1). Zur Reduzierung des experimentellen Versuchsumfangs wurden begleitend Simulationsmodelle zum Durchdringungsverhalten aufgebaut.

Nachdem die ersten Untersuchungen zur Durchdringung durchgeführt wurden (IWF TU-BS), wurden Prototypen vorbereitet, an denen die schweißtechnischen Untersuchungen erfolgen

(IWF OvGU). Neben der Variation der Schweißparameter wurde unter anderem auch die Kondensatorschweißtechnik betrachtet, mit der eine äußerst kurze Schweißzeit erreicht werden kann (AP 2). Die beiden Prozessschritte Durchdringung und Schweißung stellen konkurrierende Anforderungen an die Spitzengeometrie der Blechverbindungselemente. Deshalb war eine enge Zusammenarbeit unter den Forschungseinrichtungen erforderlich, um in einem iterativen Prozess die Gestaltoptimierung für beide Prozesse vorzunehmen (AP 1 & AP 2, Abbildung 27). Dabei wurden ebenfalls der Randbedingungen bezüglich der Herstellbarkeit der Verbindungselemente durch einen Stanz-/Umformprozess betrachtet, die zusammen mit dem projektbegleitenden Ausschuss erarbeitet wurden.

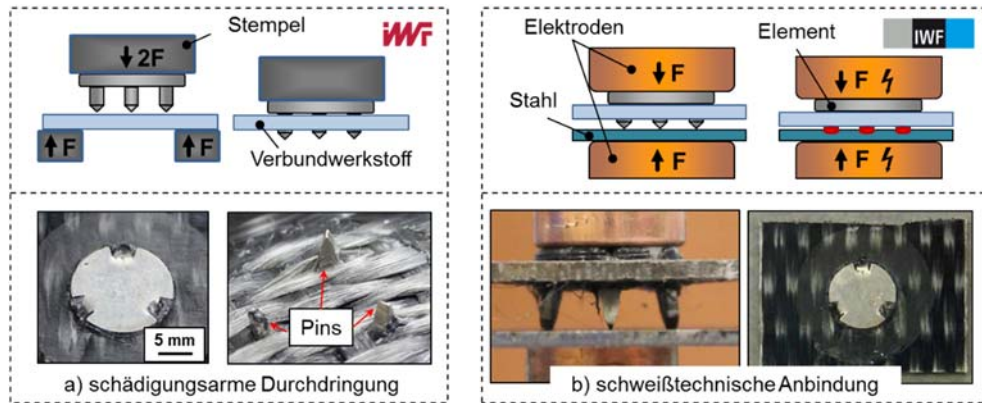


Abbildung 27: Zweistufiger Verfahrensablauf des Widerstandselementschweißens mit neuartigem Verbindungselement (Blechumform-Prototyp)

Im Anschluss der Optimierung bezüglich der FVK-Durchdringung und schweißtechnischen Anbindung, erfolgte die Weiterentwicklung des Verbindungselementes hinsichtlich der mechanischen Festigkeit bzw. der optimierten Kraftübertragung. Hierbei werden die Abmessungen der Kopfplatte und die örtliche Anordnung der Verbindungsglieder angepasst. Die technologische Beurteilung dieser Maßnahmen wurde durch Scher- und Kopfzugversuche vorgenommen (AP 3). Des Weiteren wurde dem Blechverbindungselement zum Vergleich ein konventionelles Blindnietverfahren als Referenz gegenübergestellt. Zur Bewertung der Prozesssicherheit und der technologischen Grenzen werden die Auswirkungen äußerer Prozesseinflüsse, wie z.B. Dickenschwankungen im Grundblech oder Positioniergenauigkeiten auf die Faserdurchdringung und Verbindungsfestigkeit, ebenfalls untersucht. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit werden Automatisierungskonzepte erarbeitet, die die einzelnen Prozessschritte Elementzufuhr, Kraft- und Wärmeeintrag zur FVK-Durchdringung und die schweißtechnische Anbindung betrachten und monetär mit „konventionellen“ Verfahrensvarianten zur Herstellung von Mischverbindungen FVK-Stahl verglichen (AP 4).

4 Verwendete Werkstoffe und Probenvorbereitung

4.1 Verwendete Werkstoffe

Dieser Abschnitt stellt die wichtigsten Werkstoffe vor, die in diesem Forschungsprojekt Verwendung finden. Er beinhaltet Informationen zu den verwendeten metallischen und nichtmetallischen Blechen, dem verwendeten Klebstoff und dem Blechhalbzeug für die Fügeelementherstellung.

4.1.1 22MnB5+AS150

Die Stahlsorte 22MnB5 in Anlehnung an DIN EN 10083 gehört zu den borlegierten Vergütungsstählen (Werkstoff-Nr. 1.2855). Die chemische Zusammensetzung, charakteristisch sind 0,22 % Kohlenstoff, etwa 1,1 % Mangan und ein mikrolegierter Anteil von Bor, ist in der Tabelle 4 wiedergegeben. [Sal14]

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung von 22MnB5 (Gew.-%) [Sal14]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Ti [%]	Cr [%]	B [%]	Mo [%]	Cu [%]	Ni [%]
0,22	1,20	0,20	≤	≤	0,020	0,020	0,11	0,002	≤	≤	≤
–	–	–	0,020	0,005	–	–	–	–	0,10	0,10	0,10
0,25	1,40	0,30			0,050	0,050	0,20	0,0035			

Im Ausgangszustand besitzt 22MnB5 ein ferritisch-perlitisches Gefüge und verfügt über Zugfestigkeit zwischen 500 bis 700 MPa bei einer Bruchdehnung von 24-30%. Nach dem Formhärten besitzt dieser Stahl Zugfestigkeit von bis 1600 MPa. Allerdings sind diese hohen Festigkeiten mit Einschränkungen in der Bruchdehnung verbunden, die nach dem Formhärten noch 5-7% beträgt [Buc07]. Die mechanischen Eigenschaften vor und nach dem Härten sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Aufgrund des sehr guten Verhältnisses zwischen Festigkeit und Gewicht wird 22MnB5 vorrangig für sicherheitsrelevante Bauteile, beispielsweise im Karosseriebau eingesetzt. So entstehen mittels Form- bzw. Presshärten A- und B-Säulenverstärkungen, Querträger, Stoßfänger und weitere höchstfeste Bauteile. [Sch13]

Tabelle 5: Mechanische Eigenschaften von 22MnB5 vor und nach dem Formhärten [Sch13]

Werkstoffzustand	Bruchdehnung A50 [%]	Dehngrenze Rp0,2 [MPa]	Zugfestigkeit Rm [MPa]	Härte HV 30
Ausgangszustand	≈ 15	≈ 470	≈ 600	≈ 190
Pressgehärtet	≈ 6	≈ 1000	≈ 1500	≈ 450

Der Form- bzw. Presshärteprozess ist eine temperatur- und zeitabhängige Abfolge von Prozessstufen, die nach direktem und indirektem Verfahren erfolgen können [Kar10]. Beim direkten Presshärten wird das Material in einen Ofen transportiert und auf Temperaturen oberhalb AC3 (ca. 830 °C) erwärmt. Das Material wird so lange gehalten bis eine vollständige Austenitisierung und eine definierte Schicht erreicht ist. Um die Temperaturverluste während Transport vom Ofen zum Umformwerkzeug zu kompensieren, wird die Ofentemperatur auf 910 °C bis 950 °C eingestellt und liegt somit bis zu 120 °C höher als die AC3 Temperatur des 22MnB5 [Tur06]. Anschließend erfolgt der Transport des erwärmten Materials in das Umformwerkzeug, in welchem es im austenitischen Zustand warmumgeformt wird. Nach dem Umformen findet im selben Schließwerkzeug der Abkühlprozess statt. Um das Werkstoffgefüge von

Austenit in Martensit im Werkzeug vollständig umzuwandeln, ist eine minimale Abkühlgeschwindigkeit von 27 K/s erforderlich. Dabei bleibt das Umformwerkzeug geschlossen und das Bauteil wird auf ca. 150 °C abgekühlt [Kol07]. Eine Übersicht über den Zeit-Temperatur-Verlauf des Presshärteprozesses ist in Abbildung 28 dargestellt. Beim indirekten Presshärten wird im Gegensatz das Material vor dem Härten im kalten Zustand umgeformt. Im Anschluss wird das bereits vollständig umgeformte Bauteil austenisiert und gehärtet. Die im diesen Forschungsprojekt verwendeten Proben aus 22MnB5 wurden im direkten Presshärteprozess bei 930 °C und 6 min. Ofenhaltezeit pressgehärtet.

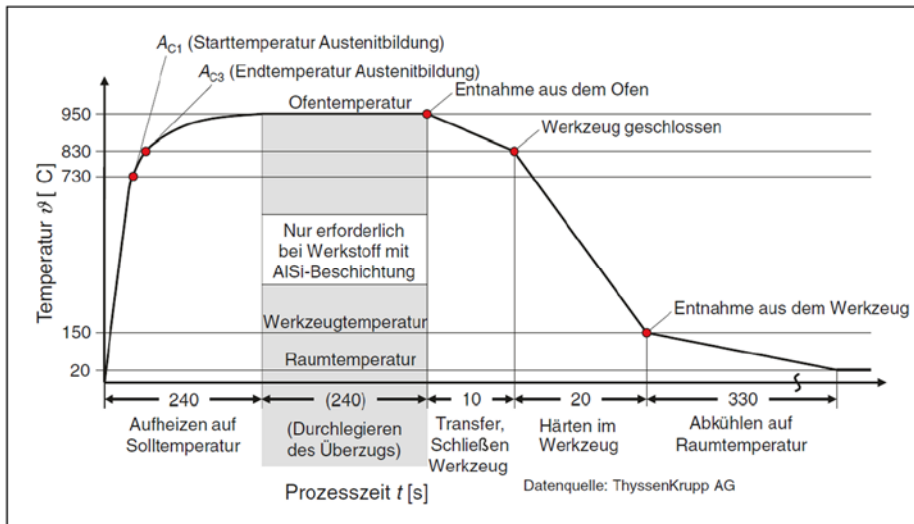


Abbildung 28: Darstellung des Wärmebehandlungszyklus beim industriellen Presshärten (Datenquelle: ThyssenKrupp AG in [Fri13])

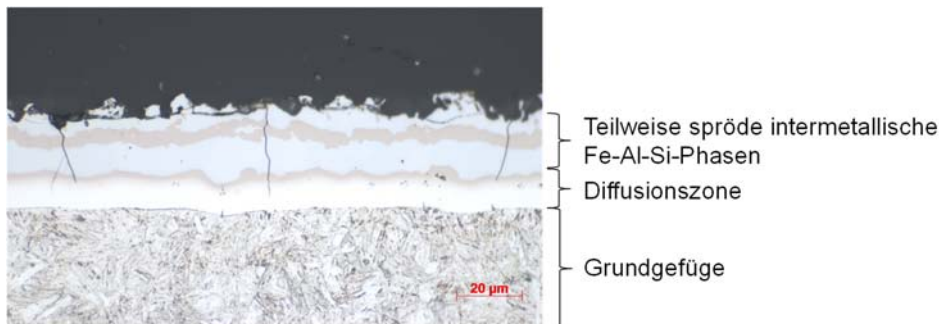


Abbildung 29: Aisi-Schicht nach dem Presshärten bei 930°C und 6 min. Ofenhaltezeit

Zur Vermeidung einer Verzunderung und Entkohlungerscheinungen bei hohen Temperaturen im Ofendurchlauf wird der Grundwerkstoff 22MnB5 mit einem temperaturbeständigen Aluminium-Silizium Überzug versehen. Das Kürzel AS150 deutet auf eine beidseitig kombinierte Auflagenmenge von 150 g/m² hin. Im Ausgangszustand ist diese Randschicht sehr weich und dient der Korrosionsbeständigkeit des Blechs. Wird der Stahl pressgehärtet, bilden sich infolge von Diffusionsprozessen intermetallische Phasen von Aluminium-, Silizium- und Eisenanteilen, die den Stahl während des Erhitzens vor Verzunderung und Hochtemperaturkorrosion schützt. Aufgrund der starken Versprödung der Oberflächenbeschichtung ist ein, dem

Presshärten folgender, Verformungsschritt unzulässig. Diese Schicht nimmt, bei einer 5-minütigen Ofenzeit eine Dicke von ca. 30 – 40 µm an [Arc17b]. In Abhängigkeit der Ofenverweilzeit und Aufheizrate entsteht am Ende eine Deckschicht aus intermetallischen Phasen, die in Dickenrichtung unterschiedliche chemischen Zusammensetzungen besitzen. In Abbildung 29 ist eine Ausprägung der Al-Si-Schicht nach dem Presshärten dargestellt. Der hier abgebildete Probenzustand entspricht allen in diesem Projekt zum Schweißen verwendeten Proben.

4.1.2 HX340LAD+Z100

Der Werkstoff HX340LAD (Werkstoff-Nr. 1.0933) ist ein höherfester Stahl, der mit Elementen wie Aluminium, Titan, Vanadium und Niob mikrolegiert ist. Die chemische Zusammensetzung dieses Werkstoffs ist in Tabelle 6 dargestellt. Die Legierungselemente besitzen fein verteilte Ausscheidungen, wozu primär Nitride, Carbide bzw. Carbonitride gehören. Das feine Korn dieses Feinkornbaustahls resultiert dabei aus dem sehr effizienten und ausscheidungsbedingten Blockieren des Wachstums der Austenitkörner und ermöglicht parallel zur Festigkeitssteigerung eine hohe Sprödbrechtsicherheit. Der Effekt der Festigkeitssteigerung beruht neben der Ausscheidungshärtung auch auf das Prinzip der Kornfeinung, bei dem die zahlreichen kleinen Körner eine erhöhte Anzahl an Korngrenzschaffen und dadurch eine bewegungshemmende Wirkung gegenüber Versetzungen aufweisen. Ergänzt werden die Prozesse der Kornfeinung und Ausscheidungshärtung durch das Zulegieren weiterer Elemente wie Mangan. [Sal12]

Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung von HX340LAD (Gew.-%) [Sal12]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Ti [%]	Nb [%]	Al [%]
≤ 0,11	≤ 0,5	≤ 0,10	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,15	≤ 0,09	≤ 0,015

Neben der hohen Festigkeit besitzt der vorliegende Versuchswerkstoff gute Umformeneigenschaften. Mit dieser Kombination an mechanischen Kennwerten ist auch der HX340LAD für den automobilen Leichtbau von Interesse und ermöglicht potentielle Einsatzgebiete im Bereich der Strukturteile. Demnach wird er beispielsweise für sicherheitsrelevante Elemente und Verstärkungen der Fahrgastzelle, für Längsträger, Querträger und Stoßfängerelemente verwendet [Arc17b]. Tabelle 7 beinhaltet die mechanischen Eigenschaften des HX340LAD. Für den Korrosionsschutz ist der Werkstoff durch die Feuerverzinkung mit einer Zinkschicht von 100 g/m² beidseitig verzinkt.

Tabelle 7: Mechanische Eigenschaften von HX340LAD [Sal12]

Zustand	Dehngrenze R _{p0,2} [MPa]	Zugfestigkeit R _m [MPa]	Bruchdehnung A ₈₀ [%]
Im Anlieferungszustand	340 bis 420	410 bis 510	≥21

4.1.3 BETAMATE™ 1480

Bei dem für das Hybridfügen genutzten Klebstoff BETAMATE™ 1480V203 handelt es sich um einen 1K-Epoxidharzklebstoff, sodass Harz und Härter bereits im optimalen Mischungsverhältnis vorliegen. Bei Raumtemperatur sind diese zueinander unlöslich und müssen thermisch aktiviert werden. Dieser Klebstoff eignet sich zum Verbinden von Materialien im Karosseriebau und substituiert bzw. ergänzt andere Fügetechnologien. Weitere nennenswerte Vor-

teile des Klebstoffeinsatzes liegen in der Schwindungsdämpfung, welches zu einer Reduzierung der Fahrzeugakustik führt sowie in der Steigerung der Korrosionsbeständigkeit durch Abdichten von Fügespalten. Den Herstellerangaben entsprechend eignet sich dieser Strukturklebstoff für die Verwendung mit beschichtetem und unbeschichtetem Stahl, oberflächenbehandeltem Aluminium, oberflächenbehandeltem Magnesium und Kunststoff. Der Klebstoff ist flüssig genug um bei RT verarbeitet werden zu können. Die Verwendung von beheizten Gerätschaften wird allerdings empfohlen. Tabelle 8 enthält die Herstellerangaben zum vorgestellten Epoxidharzklebstoff. [Bet17]

Tabelle 8: Mechanisch-physikalische Eigenschaften des BETAMATE™ 1480V203 [Bet17]

Viskosität bei 45 °C [Pa·s]	Fließspannung bei 45 °C [Pa]	Elastizitätsmodul [MPa]	Scherzugfestigkeit [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]
50	50	1600	27	36

Mit einer Anwendungstemperatur von ca. 185 °C können auch faserverstärkte Kunststoffe mit einer thermoplastischen Matrix diesem elektrochemischen Lackierverfahren unterzogen werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgt die Aushärtung in einem Ofen bei 180 °C und einer Ofenzeit von 30 Minuten.

4.2 Probengeometrie und Probenvorbereitung

4.2.1 Probenvorbereitung – Metallproben

Neben der Herstellung der Fügeelemente sind weitere Komponenten der Widerstandsschweißanordnung vorzubereiten. Im Folgenden wurden die metallischen Proben sowie nicht-metallischen Proben aus Kunststoff und Verbundwerkstoff verwendet.

Bei den grundlegenden schweißtechnischen Untersuchungen wurden zwei Typen der metallischen Probenkörper verwendet. Der erste Probentyp ist eine quadratische Probe 45x45 mm, die primärseitig für die Parameterstudie und Prozessoptimierung genutzt wurde. Das Maß und die Probengeometrie ist am Beispiel einer geschweißten Probe mit Verbindungselement in Abbildung 30 dargestellt.

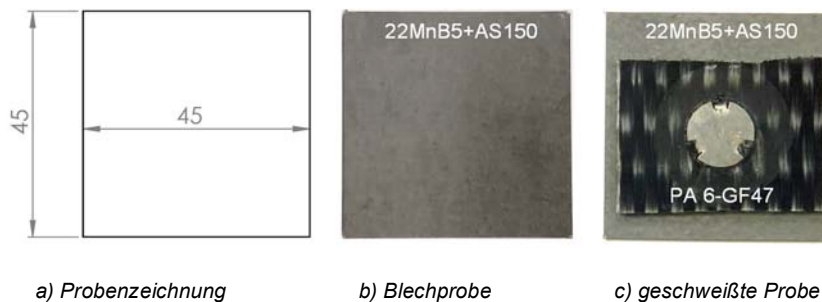


Abbildung 30: Verwendete metallische Proben für die Parameterstudie und Prozessoptimierung

Als weiterer Probentyp finden Proben für den Scherzugversuch Anwendung. Bei der Scherzugprüfung handelt es sich um ein zerstörendes, quasistatisches Prüfverfahren zur Bestimmung der Scherzugkraft, die eine Probe maximal ertragen kann. Die Proben wurden entsprechend der Norm DIN EN ISO 14273 vorbereitet und sind in Abbildung 31 dargestellt. Die Norm

reguliert den Verfahrensablauf und definiert die entsprechenden Probenmaße für Scherzugversuche von Widerstandspunkt- und Buckelschweißungen mit einer Einzelblechdicke von bis zu 4,5 mm.

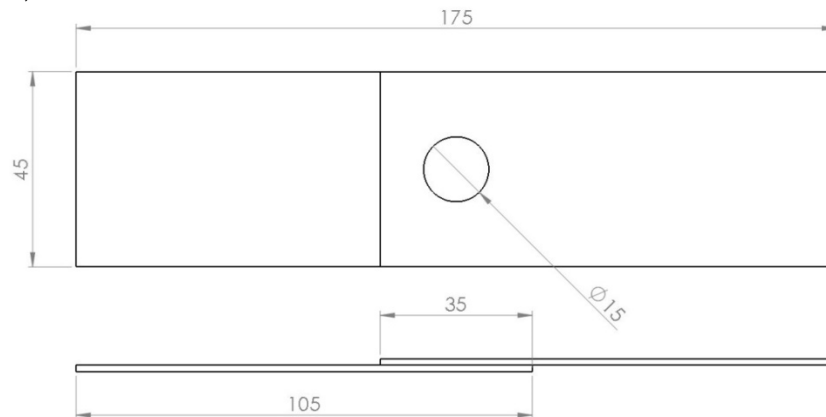


Abbildung 31: Scherzugprobe nach DIN EN ISO 14273

Die hier dargestellten metallischen Proben wurden flach mittels einer Laserstrahlanlage aus einem größeren Blech gemäß Zeichnung getrennt.

4.2.2 Probenvorbereitung – Kunststoffproben

Aufgrund der begrenzten Anzahl von Proben mit schädigungsarm applizierten Verbindungselementen kamen als Deckbleche zwei unterschiedliche Werkstoffe beim Schweißen zum Einsatz. Zum einen der unverstärkte und vorgebohrte Thermoplast PA-6 ($t = 2,0$ mm), der die Matrix der Faserverbundwerkstoffe nachbildet.



Abbildung 32: Schematische Aufteilung genutzter Deckblechen und Art der Elementapplikation

Er wurde genutzt, um die Parameterstudie- bzw. Optimierung durchzuführen und Schweißbereiche zu ermitteln. Zum anderen wurde der glasfaserverstärkte Kunststoff PA6-GF47 ($t = 2,0$ mm) mit bereits durchdrungen Elementen für die Festigkeits- sowie metallografischen

Untersuchungen genutzt. Die Aufteilung ist in Abbildung 32 schematisch dargestellt. Das für die Schweißuntersuchungen verwendete Deckblech aus Polyamid 6 wird zumeist als quadratisches 40 mm x 40 mm Plättchen verwendet. Es wurde elementspezifisch vorgebohrt, um den Kontakt zwischen Basisblech und Element zu erlauben. Für die reproduzierbare Probenvorbereitung wurden hierfür Schablonen aus Baustahl gefertigt, durch welche in die darunter befindlichen Deckbleche hindurch gebohrt wird. Eine vorgebohrte PA-6 Probe mit einem Element ist in der Abbildung 33 links dargestellt. Auf der rechten Seite ist eine Scherzugprobe mit einem schädigungsarm durchdrungenen Element im Glasfaserverbundwerkstoff abgebildet.

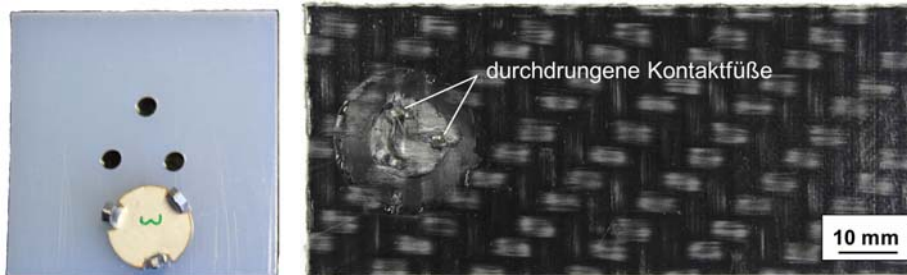


Abbildung 33: Gebohrtes PA 6-Plättchen für das Dreifuß-Element links und eine Scherzugprobe aus GFK mit einem schädigungsarm durchdrungenen Element rechts

5 Ergebnisse der Arbeitspakete

Die folgende Dokumentation ist in einzelne Arbeitspakete gegliedert. Da die jeweiligen Arbeitsinhalte in den Unterpaketen gemäß des geplanten Forschungsprogramms parallel erfolgen, orientiert sich die Beschreibung der Inhalte nach dem chronologischen Vorgehen und ist nicht immer in die jeweiligen Unterpakete gegliedert.

5.1 Arbeitspaket 1 | Schädigungsarme Einbringung eines Verbindungselementes in einen Faserwerkstoff (IWF TU-BS)

Im ersten Arbeitspaket wurden Untersuchungen zum Durchdringungsverhalten durchgeführt. Hierbei wurden sogenannte Testspitzen bzw. Pins eingesetzt, die in ihrer Geometrie den späteren Verbindungsgliedern bzw. den Endstücken des späteren Blechverbindungselements gleichen. Zunächst wurden Untersuchungen mit rotationssymmetrischen Pins durchgeführt, da sich in diesem Fall der Einfluss der signifikanten Geometrieparameter gegen Störeinflüsse abgrenzen ließ.

5.1.1 AP 1.1: Simulative Untersuchungen zum Durchdringungsverhalten und der resultierenden Faserschädigung

In diesem Unterarbeitspaket wurden Simulationsmodelle zur Vorhersage des Durchdringungsverhaltens von Pins in Faserverbundwerkstoffe entwickelt. Dazu wurden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Die unterschiedliche Modellkomplexitäten hervorbrachten.

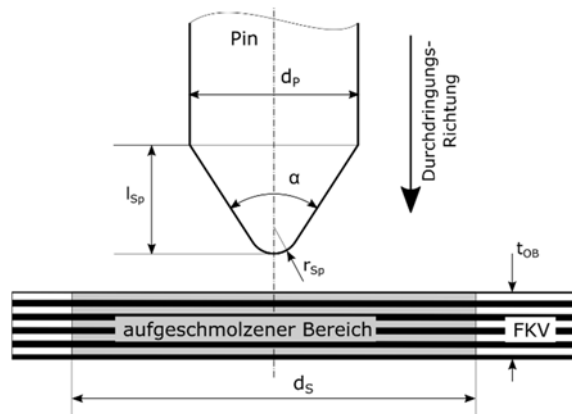


Abbildung 34: Parameterdefinition Durchdringungsprozess (schematische Darstellung)

In den erarbeiteten Berechnungsmodellen wurde von einem rotationssymmetrischen Pin ausgegangen, der in einen unidirektionalen Faserverbundwerkstoff eindringt, bei der die Fasern in einem kreisförmigen Bereich um den Pin durch Aufschmelzen der Matrix beweglich sind (vgl. Abbildung 35). In Abbildung 34 sind folgende geometrische Parameter definiert:

- Der Pin-Durchmesser d_p (in mm) beschreibt die Abmessung des Pin-Schaftes.
- Der Spitzenwinkel α (in $^\circ$) ist der Öffnungswinkel des Kegelförmigen Teils.
- Der Spitzenradius r_{sp} (in mm) beschreibt die Stumpfheit des Pins.
- Der Aufschmelzdurchmesser d_s (in mm) beschreibt einen Bereich im Organoblech, in dem die thermoplastische Matrix vollständig verflüssigt ist. Diesen Bereich Aufzuschmelzen ist notwendig, um die ebene Faserablenkung zu ermöglichen, welche vom eindringenden Pin verursacht wird.

- Die Dicke des Organoblechs t_{OB} ist von der Anzahl der Lagen und der Dicke der einzelnen Lagen abhängig.

Die Spitzenlänge l_{sp} (in mm) kann entsprechend folgender geometrischer Zusammenhänge berechnet werden:

$$l_{sp} = \frac{d_p}{2 \tan \frac{\alpha}{2}} + r_{sp} \left(1 - \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right)$$

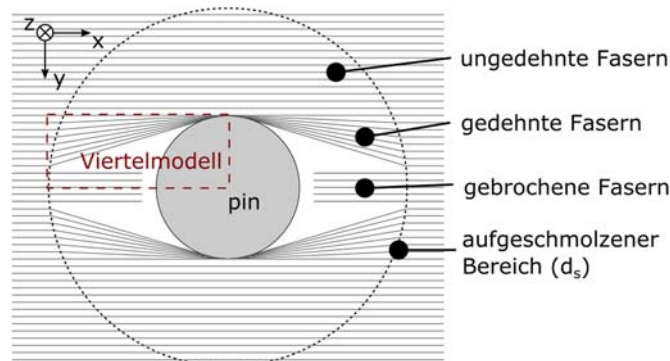


Abbildung 35: Schematische Darstellung eines Pin-Querschnitts, der Faserablenkung innerhalb einer Ebene in einem kreisförmig aufgeschmolzenen Bereich bewirkt

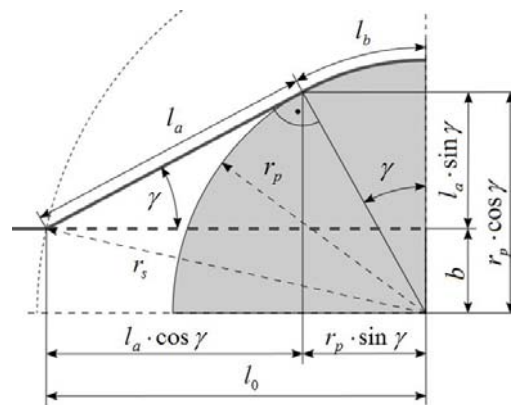


Abbildung 36: Geometrisches Modell zur Berechnung der ebenen Ablenkung einer Einzelfaser durch einen zylindrischen Pin (Viertelmodell)

Neben den Geometrischen Parametern haben die eingesetzten Werkstoffe Einfluss auf den Prozess. Für den Pin können verschiedene Stahlegierungen eingesetzt werden. Alle Stahlwerkstoffe weisen deutlich höhere Festigkeiten als die eingesetzten Faserverbundwerkstoffe auf. Daher kann der Pin vereinfachend als idealer Starrkörper modelliert werden. Die untersuchten Organobleche bestehen aus E-Glas-Fasern oder Kohlenstofffasern, die in einer Matrix aus Polypropylen (PP) oder Polyamid 6 (PA6) eingebettet sind. Die Steifigkeit E des Faserwerkstoffes und dessen Bruchdehnung A sind entscheidende Parameter für den Durchdringungsprozess. Die Steifigkeit E wirkt sich auf die für die Durchdringung benötigten Kräfte

aus. Die Bruchdehnung A ist ein Werkstoffkennwert, der angibt, bis zum Wievielfachen der Ursprungslänge der Werkstoff (in diesem Fall die Faser) gedehnt werden kann, bis dieser bricht.

Ziel des ersten Modellierungsansatzes war die Entwicklung eines Berechnungsmodells, das die Umlenkung der Fasern in einer Einzelschicht infolge des Eindringens eines Pins mit Kreisquerschnitt abbildet (Abbildung 36). Hierfür wurde ein Modell entwickelt, das von einem kreisförmigen Aufschmelzbereich um den Pin ausgeht und die Umschlingung der Fasern um den Pin berücksichtigt. Mit diesem Modell lässt sich die Faserschädigung in Abhängigkeit des Fasertyps (Bruchdehnung A des Faserwerkstoffs), des Pin-Durchmessers d_p und des Aufschmelzdurchmessers d_s quantifizieren und darstellen. Es dient zur Auslegung eines Mindestaufschmelz-Durchmessers für reale Durchdringungsprozesse.

Dazu wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Fasern sind homogen verteilt und in x -Richtung orientiert, bevor sie mit dem Pin Kontakt haben.
- In einem definierten Bereich (mit dem Durchmesser d_s) um den Pin ist die Matrix vollständig aufgeschmolzen. Innerhalb dieses Bereichs lassen sich die Fasern seitlich (in y -Richtung) bewegen. Außerhalb sind die Fasern fest eingespannt und können nicht aus der Matrix gezogen werden.
- Aufgrund ihres sehr geringen Durchmessers weisen die Fasern ein ebenfalls sehr geringes Flächenträgheitsmoment auf und werden daher als ideal Biegeschlaff angenommen.
- Die Kontakte zwischen den Fasern werden vernachlässigt, sodass diese sich im Modell ineinander befinden können

Aufgrund der Doppelsymmetrie konnte für die Berechnungen ein Viertelmodell verwendet werden (vgl. Abbildung 35). Aufgrund der geometrischen Zusammenhänge erfahren die Fasern aus der Mitte des Lochbereichs eine stärkere Auslenkung durch den Pin und werden demzufolge stärker gedehnt. Dieses Phänomen erlaubt eine Grenzfallbetrachtung, wie sie in Abbildung 36 dargestellt ist. Hierbei wird der Abstand b zwischen Symmetrielinie und der Faser ermittelt, die genau bis zu ihrer Bruchdehnung A gedehnt wird. Alle weiter innen liegenden Fasern werden stärker gedehnt und können als gebrochen angenommen werden. Aus dem Abstand b wird anschließend der Anteil der gebrochenen Fasern p_b berechnet. Dieser bezieht sich auf die Fasern, die sich vor der Durchdringung im späteren Lochbereich befinden. Weiter außen liegende Fasern werden im Modell nicht vom Pin beeinflusst. Der Anteil der gebrochenen Fasern bzw. relative Schaden wird folgendermaßen berechnet

$$p_b = \frac{2b}{d_p} = \frac{b}{r_p} \quad (1)$$

Entsprechend Abbildung 36 berechnet sich b folgendermaßen:

$$b = \sqrt{r_s^2 - l_0^2} \quad (2)$$

oder

$$b = r_p \cos \gamma - l_a \sin \gamma \quad (3)$$

Die Dehnung ε der Fasern wird durch

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{|l_D - l_0|}{l_0} \quad (4)$$

Definiert. Die Ablenkung der Fasern bewirkt ausschließlich Zugspannungen bzw. positive Dehnungen, sodass gilt $|l_D - l_0| = l_D - l_0$.

$$\varepsilon = \frac{l_D}{l_0} - 1 \quad (5)$$

$$l_0 = \frac{l_D}{\varepsilon + 1} \quad (6)$$

Die Länge der gedehnten Faser l_D besteht aus einem Teil l_a , der vom Rand des aufgeschmolzenen Bereichs tangential zum Pin verläuft, und aus einem anderen Teil l_b , der sich bogenförmig an den Pin anlegt. Da l_a tangential zum Pin verläuft, wird diese Größe folgendermaßen berechnet:

$$l_a = \sqrt{r_s^2 - r_p^2} \quad (7)$$

Die Bogenlänge von l_b berechnet sich mit

$$l_b = r_p \gamma \quad (8)$$

Mit den Formeln (7) und (8) eingesetzt in Formel (6) ergibt sich l_0 zu

$$l_0 = \frac{\sqrt{r_s^2 - r_p^2} + r_p \gamma}{\varepsilon + 1} \quad (9)$$

wieder eingesetzt in die Formeln (1) und (3) ergibt sich der relative Schaden p_b zu

$$p_b = \frac{\sqrt{r_s^2 - \left(\frac{\sqrt{r_s^2 - r_p^2} + r_p \gamma}{\varepsilon + 1} \right)^2}}{r_p} \quad (10)$$

Weil alle Variablen positiv sein müssen, lässt sich die Formel nach γ umstellen:

$$\frac{\sqrt{r_s^2 - r_p^2} + r_p \gamma}{\varepsilon + 1} = \sqrt{r_s^2 - r_p^2 p_b^2} \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{1}{r_p} \left((\varepsilon + 1) \sqrt{r_s^2 - r_p^2 p_b^2} - \sqrt{r_s^2 - r_p^2} \right) \quad (12)$$

Die ursprüngliche Faserlänge l_0 kann ebenfalls wie in Abbildung 36 dargestellt berechnet werden mit

$$l_0 = l_a \cos \gamma + r_p \sin \gamma \quad (13)$$

Das Einsetzen von Formel (7) ergibt

$$l_0 = \sqrt{r_s^2 - r_p^2} \cos \gamma + r_p \sin \gamma \quad (14)$$

Aufgrund der in den Formeln auftretenden Nichtlinearitäten mit $\sin \gamma$ und $\cos \gamma$ existiert keine geschlossene analytische Lösung für das Gleichungssystem. Es können lediglich Näherungslösungen gefunden werden unter Nutzung eines Programmcodes mit Schleifen.

Zu diesem Zweck wurde ein MATLAB-Skript erstellt, das Schädigungswerte über ein iteratives Näherungsverfahren berechnet. Je größer A und d_s sind und je kleiner d_p ist, desto geringer ist der Anteil der gebrochenen Fasern im Bereich, der durch den Pin beeinflusst wird. Anhand dieses Modells kann abgeleitet werden (bei 0%), wie groß der Aufschmelzbereich sein muss, um eine Faserschädigung zu vermeiden (Abbildung 37).

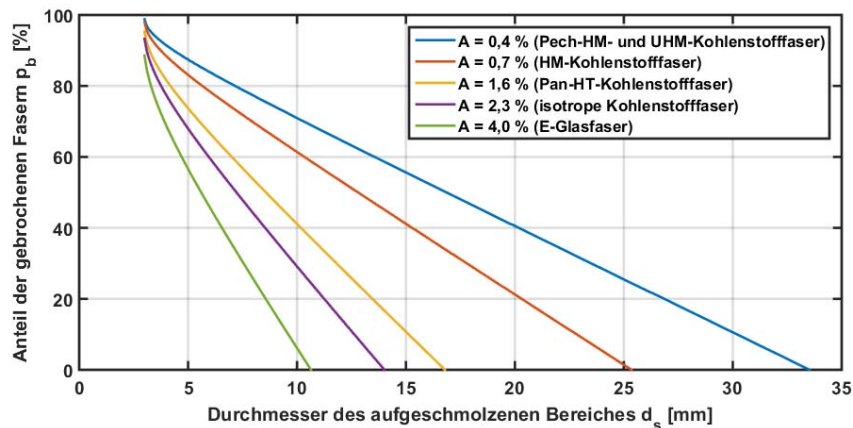


Abbildung 37: Faserschädigung für verschiedene Fasertypen nach Eindringen eines Pins mit 3 mm Durchmesser in Abhängigkeit der Größe des aufgeschmolzenen Bereiches

Um den Prozess der Durchdringung näher zu analysieren und eine mögliche Vorauswahl für die Fußspitzengeometrie zu treffen, wurde ein numerisches Simulationsmodell in der FEM-Softwareumgebung ANSYS aufgebaut. Ziel der Simulation war es, den Durchdringungsprozess abzubilden und dabei die wirkenden Kräfte und entstehenden Faserschädigungen realitätsnah darzustellen. Dazu war es erforderlich auch die dreidimensionalen Faserablenkungen. Hierdurch konnte eine Vorbewertung der Geometrien und der Prozessparameter ohne die Durchführung zeitintensiver experimenteller Untersuchungen vorgenommen werden. Für das Modell mussten die folgenden Einflussfaktoren berücksichtigt werden:

- Modellaufbau, Pingeometrie und Prozessparameter
- Kontaktbedingungen, Lagerungen, Freiheitsgrad und Reibung
- Elementtyp und Abmessung
- Simulationsmethodik (implizite oder explizite Integrationsverfahren)
- Materialmodell der jeweiligen eingesetzten Werkstoffe
 - elastisch (Elastizitätsmodul und Querkontraktion)
 - plastisch (Fließkriterium, Fließregel, Verfestigung)
 - Versagen (Formänderungsvermögen)

Es wurden verschiedene Ansätze für die Modellierung der Matrix (Fluid / Festkörper) und der Fasern getestet. Unter anderem wurde eine Fluid Struktur-Interaktion modelliert. Aufgrund der

Modellierung des elastisch-plastischen Verhaltens des Kunststoffes, komplexer Kontaktbedingungen und der Vernetzung des Modells werden lange Rechenzeiten benötigt (Abbildung 38).

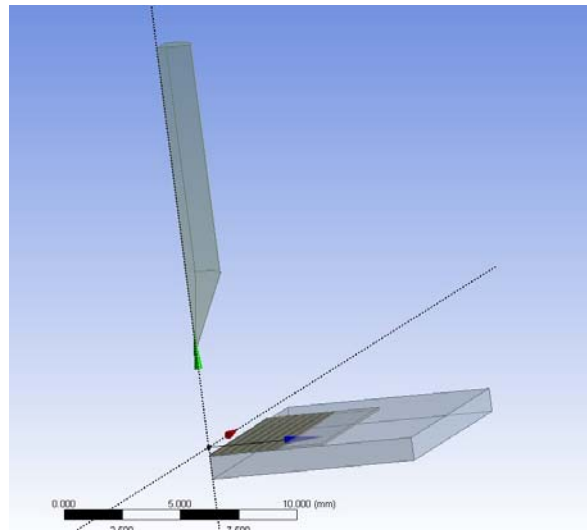


Abbildung 38: Erster Durchdringungssimulationsansatz mit ANSYS (Viertelmodell)

Aufgrund der sehr hohen Modellkomplexitäten und langen Rechenzeiten wurden neue Ansätze verfolgt, die die Einflüsse von Fasern und Matrix auf die Durchdringung getrennt voneinander berechnen. Um eine durchführbare Durchdringungssimulation berechnen zu können, wurde die grundlegende Annahme getroffen, dass die Wirkung der Matrix auf die Fasern und den Pin nach Aufschmelzen vernachlässigbar gering ist.

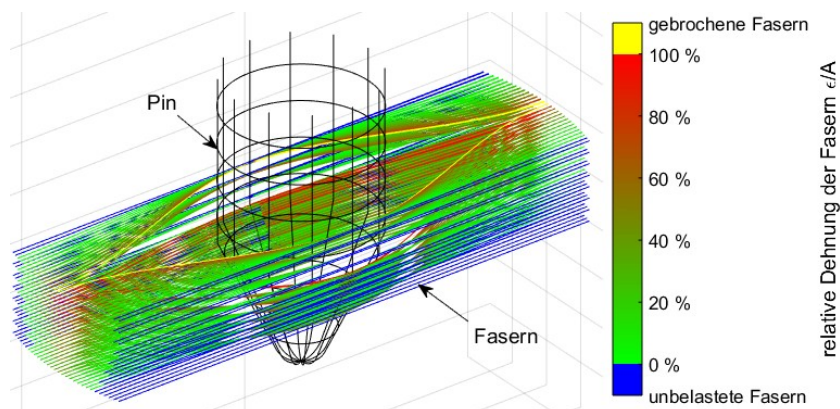


Abbildung 39: Durchdringungssimulation mit MATLAB

Für die Wirkung der Fasern auf den Pin wurde ein erweitertes Berechnungsmodell mit MATLAB erstellt, welches es ermöglicht für verschiedene Parametereinstellungen (Pin-Durchmesser, -Spitzenwinkel, -Spitzenradius, Aufschmelzdurchmesser, etc.) Durchdringungsvorgänge zu simulieren (Abbildung 39). Damit sind simulative Parameterstudien möglich, welche die Geometrie- und Prozessoptimierung in AP 3 ermöglichen. Im Modell werden der Verlauf der dreidimensional (seitlich und in Richtung Unterseite) abgelenkten Fasern in Folge der Verdrängung während des Durchdringungsvorganges durch den eindringenden Pin berechnet.

Aus den Faserverläufen werden über die Kurvenlängen die Faserdehnungen und daraus die in der einzelnen Faser wirkenden Spannungen ermittelt. Die Spannungen in den Fasern bewirken Kräfte auf den Pin in Z-Richtung (Pin-Achse), die aus der Summe aller Z-Kraftkomponenten der Einzelfasern berechnet werden können. Werden Fasern über ihre Bruchdehnung hinaus gedehnt, brechen diese und üben keine Kräfte mehr auf den Pin aus. Über den Prozessablauf können somit der Kraft- und Schädigungsverlauf berechnet und dargestellt werden. Die Ergebnisse der simulierten Parameterstudien sind im Vergleich mit den Messdaten der Durchdringungsversuche in Abschnitt 5.1.3 dargestellt.

5.1.2 AP 1.2: Aufbau eines Versuchsstandes für die experimentellen Untersuchungen zum Durchdringungsverhalten und der resultierenden Faserschädigung

Es wurden zunächst zwei Versuchsstandvarianten aufgebaut, mit denen die schwingungsunterstützte sowie die induktionswärmeunterstützte Durchdringung untersucht wurden (Abbildung 40).

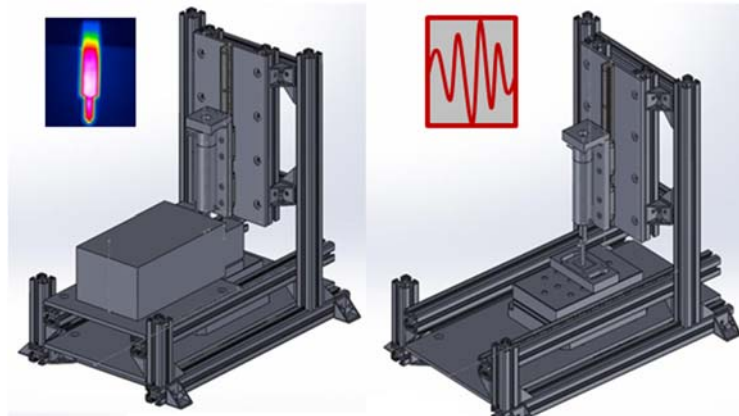


Abbildung 40: Versuchsaufbauten für induktionsunterstützte (links) und schwingungsunterstützte Einbringung (rechts)

Hierbei stellte sich heraus, dass die ausschließlich schwingungsunterstützte Methode nicht zielführend ist. Aufgrund des viskoelastischen Verhaltens des Matrixwerkstoffes und dessen schlechter Wärmeleitfähigkeit ist keine ausreichende Reibungswärme an der Durchdringungsstelle erzeugbar und somit keine vollständige Durchdringung des Faserverbundwerkstoffes erreichbar. Deshalb wurde diese Methode im Vorhaben in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss nicht weiterverfolgt.

Mittels induktiver Erwärmung des Pins kann eine vollständige Durchdringung des FVK erreicht werden. Aufgrund der Notwendigkeit einer dünnen Spitze an der Vorderseite des Pins wird der Pin-Schaft jedoch über die Zersetzungstemperatur des Kunststoffes erwärmt, wenn die Pin-Spitze über die Schmelztemperatur des Kunststoffes erwärmt wird (Abbildung 41 unten rechts). Somit zersetzt sich die Matrix an der Durchdringungsstelle. Dies führt zu Spiel an der Fugestelle. Außerdem wird in der Umgebung der Durchdringungsstelle der Kunststoff aufgrund geringer Wärmeleitung des FVK nicht aufgeschmolzen. Dadurch ergeben sich Faserschädigungen von 50 % bis 90 %.

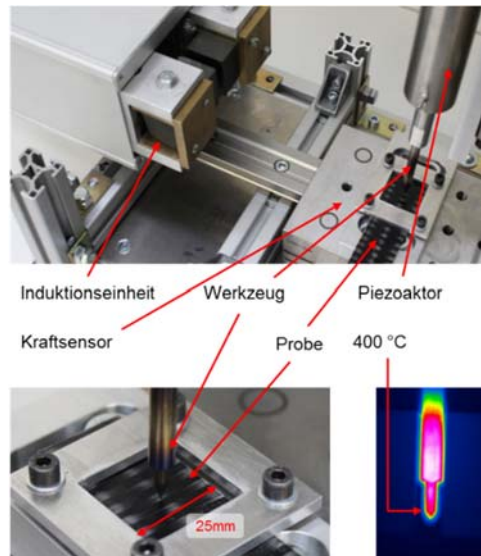


Abbildung 41: Versuchsstand erste Varianten und Thermographie-Aufnahme

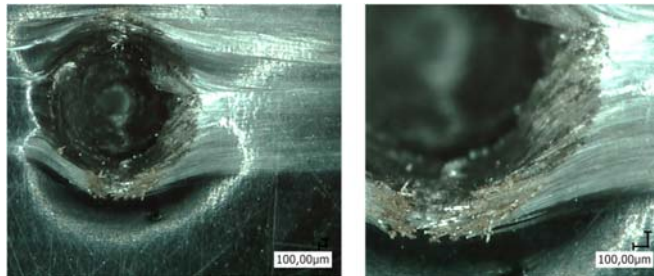


Abbildung 42: Ergebnis Vorversuch Schwingungsunterstützte Durchdringung

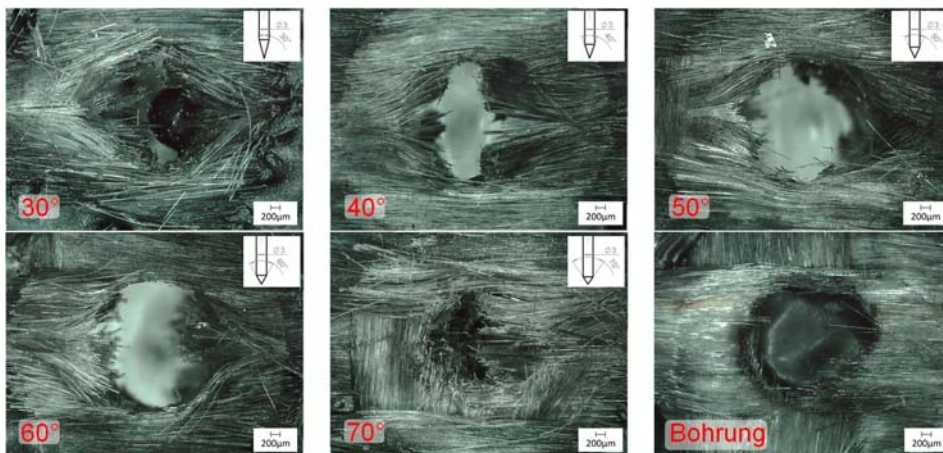


Abbildung 43: Faserschädigung für verschiedene Spitzenwinkel nach Eindringen eines Pins mit 3 mm Durchmesser im Vergleich mit einer 3 mm Bohrung

Eine Parameterstudie des Pin-Spitzenwinkels α von 30° bis 70° an Pins mit einem Durchmesser von 3 mm ergibt (Abbildung 43):

- Vor allem bei kleineren Spitzenwinkeln von 30° bis 50° weichen die Fasern besser aus.
- Mit zunehmendem Spitzenwinkel tritt vermehrt Faserbruch auf. Das Schädigungsbild nach einer Durchdringung mit einem Spitzenwinkel von 70° ist mit einer Bohrung vergleichbar.
- Bei größeren Spitzenwinkeln sind größere Kräfte für eine Durchdringung notwendig (ca. dreifache Kraft bei $\alpha = 70^\circ$ im Vergleich zu $\alpha = 30^\circ$)

Da die beiden erstgenannten Methoden für eine faserschädigungsarme Durchdringung nicht anwendbar waren, wurde ein weiterer Ansatz mit Infraroterwärmung verfolgt (Abbildung 44). Mit dieser Methode wurde eine vollständige Durchdringung erreicht. Ein weiträumiges Ausweichen der Fasern ist zu beobachten – es tritt weniger Bruch als bei den Vergleichsmethoden auf. Nach dem Aufschmelzen des Kunststoffes fließt dieser aufgrund der Gewebestruktur des Organoblechs teilweise in Richtung der Blech-Unterseite ab. Deshalb wurden in folgenden Untersuchungen Möglichkeiten zum Verpressen des Organoblechs nach dem Durchdringungsvorgang untersucht. Die Unterseiten der bisher durchdrungenen Organobleche wiesen Aufwellungen infolge des Mitziehens durch die Pin-Spitzen auf. Demzufolge war eine Optimierung des Gegenhalters erforderlich (vgl. Abschnitt 5.3.1).

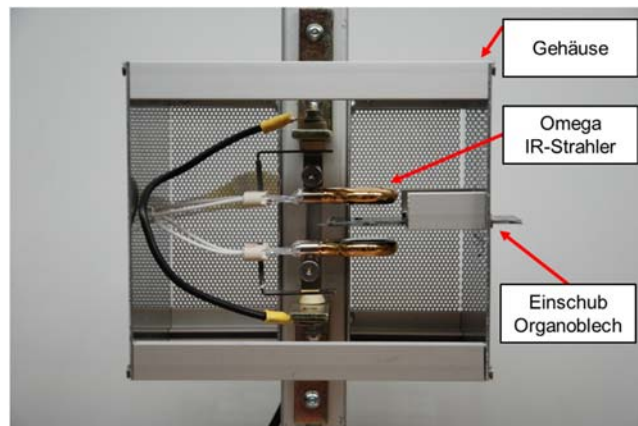


Abbildung 44: Aufbau Erwärmungseinheit mit Omega-förmigen Infrarotstrahlern zur beidseitigen Bestrahlung

Um im Durchdringungsprozess definierte Vorschubgeschwindigkeiten des Pins einstellen zu können, wurde ein neues Versuchsstandkonzept verfolgt. Dazu wird eine Spindelachse verwendet, die von einem Schrittmotor angetrieben wird. Es wurde eine frei programmierbare Schrittmotorsteuerung geplant und aufgebaut (Abbildung 45). Damit lässt sich die Achse programmgesteuert mit definierten Vorschubgeschwindigkeiten und Bewegungstrajektorien verfahren. Diese Achse ist senkrecht an eine Halterung montiert. Am Verfahrtschiff der Achse ist eine Pin-Aufhängung angebracht. Im Prüfstand wird das Organoblech mit Probenträgern zunächst in die Aufheizstation transportiert, dort kontrolliert lokal erwärmt und anschließend über eine Linearführung einer auf einem Kraftmesstisch befindlichen Aufspannung zugeführt. So kann eine Organoblechprobe gezielt mit definierten Geschwindigkeiten in einer definierten Position bei einer definierten Temperatur wiederholbar genau durchdrungen werden.

Der Aufbau eines Durchdringungsprüfstandes wurde abgeschlossen (Abbildung 46). Dafür wurde zunächst ein Erwärmungsprozess auf Basis von Infrarotstrahlern entwickelt, bei dem

der Faserverbundwerkstoff (FVK) schnell und effizient an der Durchdringungsstelle aufgeschmolzen wird. Dies erfolgt in einem abgeschirmten Teil des Prüfstandes (Erwärmungseinheit). Anschließend werden die FVK-Proben entnommen und in einen Probenträger eingelegt. Dieser befindet sich in der Durchdringungseinheit. Die Durchdringungseinheit besteht aus einer Linearachse mit einer daran befestigten austauschbaren Aufhängung wahlweise für Pins oder Verbindungselemente, die von einem programmgesteuerten Schrittmotor angetrieben wird, und einem Kraftmesstisch, an dem der Probenträger befestigt ist. Sowohl die Schrittmotorsteuerung als auch der Kraftmesstisch sind mit einem Steuerungs- und Messrechner verbunden.



Abbildung 45: Im Projekt gebaute programmierbare Steuereinheit mit angeschlossener Linearachse

Dieser Rechner steuert den Durchdringungsprozess, nimmt Kraftmesskurven auf und dient gleichzeitig zur Auswertung der Versuchsreihen. Das Greifen der Pins wurde zunächst mittels Klemmschraube realisiert, im Zuge der Prüfstandoptimierung wurde eine eigens entwickelte Vakuumgreifer angefertigt und nachgerüstet. Mit dem Versuchsstand wurden in AP 1.3 Durchdringungsversuche durchgeführt.



Abbildung 46: Durchdringungsversuchsstand (links), Maximale Durchdringungskraft in Abhängigkeit vom Pin-Spitzenwinkel – Exemplarischer Vergleich Simulation und Experiment (rechts)

Zur Flexibilisierung der Durchdringungsversuche wurde der Versuchsstand weiter optimiert (Abbildung 47). Es wurde eine pneumatische Greifereinheit entwickelt und gefertigt, die es durch unterschiedliche Schraubeinsätze ermöglicht, sowohl Pins mit unterschiedlichen Durchmessern als auch Verbindungselemente mit unterschiedlichen Kopfformen und Größen aufzunehmen. Während der Projektbearbeitung stellte sich heraus, dass die ursprünglich gewählte Probengeometrie von 105 x 45 mm, für die zunächst ein angepasster Probenträger gefertigt worden war (Abbildung 46), sich nicht für alle Prüfverfahren eignet. Um dem Anforderungsprofil gerecht zu werden ist der Probenträger hinsichtlich einer einstellbaren Probengröße optimiert worden. Verschiebbare Anschläge ermöglichen die Bearbeitung unterschiedlicher Probenabmessungen, dass auf diese Weise Proben entsprechend der untersuchten Prüfnormen hergestellt werden können. Weiterhin ermöglicht dies eine Änderung der Durchdringungsposition.

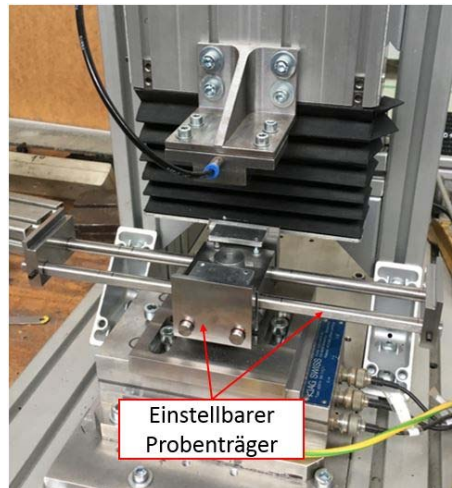


Abbildung 47: Durchdringungsversuchsstand mit einstellbarem Probenträger, austauschbarem Gegenhalter und pneumatischem Greifer für Verbindungselemente

5.1.3 AP 1.3: Experimentelle Untersuchungen zum Durchdringungsversuch

Zur experimentellen Validierung des Simulationsmodells wurden Durchdringungsversuche durchgeführt. Dazu mussten zunächst Durchdringungsprüfkörper (Pins) und Funktionsprototypen des Verbindungselements hergestellt werden.

Herstellung von Pins für Durchdringungsversuche

Für die Durchdringungsversuche wurden Pins mit definierten geometrischen Parametern benötigt (vgl. Abbildung 34). Dazu wurden handelsübliche Zylinderstifte nach DIN EN ISO 2338 der Werkstoffspezifikation A1 (Wn. 1.4301) in unterschiedlichen Durchmessern d_p (1,5 mm; 2 mm; 2,5 mm und 3 mm) beschafft. Zur Erzeugung der definierten Spitzengeometrie wurden diese Zylinderstifte mit der CNC-Universal-Rundschleifmaschine Studer S40cnc (Abbildung 48) bearbeitet.

Herstellung von Funktionsprototypen des Verbindungselements für Durchdringungs- und Schweißversuche

Eingangsparameter für die Untersuchungen sind die Werkstoffe des Pins (1.4301) und des Organoblechs (GF-PA6, GF-PP und CF-PU), die Pin-Geometrie und die Blechdicke bzw. Lagenanzahl des Organoblechs. Im Prozess lassen sich Temperatur und Vorschubtrajektorie

einstellen. Bei den Untersuchungen werden die Durchdringungskräfte gemessen. Anschließend wird der Faserschädigungsanteil mittels Mikroskopie und Bildanalyseverfahren ermittelt. In Zugprüfungen wird die Lochleibungsfestigkeit untersucht.

Da beim Verschweißen der Verbindungselemente abhängig von Pin-Durchmesser und Spitzenwinkel die Pin-Spitzen auf definierten Längen wegschmelzen und sich die Stahl-Schmelze mit dem Grundblech verbindet, muss die Länge des Pin-Schaftes an die Bedingungen aus dem Schweißprozess angepasst werden.



Abbildung 48: CNC-Universal-Rundscheifmaschine Studer S40cnc

Die hergestellten Pins mit geschliffenen Spitzen sind exemplarisch in Abbildung 49 und Abbildung 50 dargestellt.

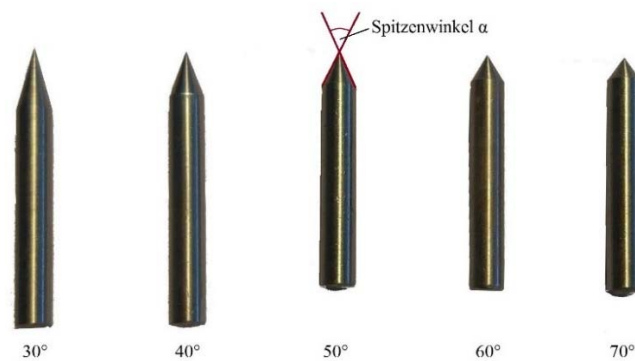


Abbildung 49: Hergestellte Pins mit variiertem Spitzenwinkel α ($d_p = 3 \text{ mm}$, $r_{sp} = 0,1 \text{ mm}$)

Aufgrund der Auswahl von 1.4301 als Versuchsmaterial kam es zu Verzögerungen bei der Prototypherstellung. Der Werkstoff verhält sich sehr zäh und ist somit nicht für die spanende Bearbeitung geeignet. Dabei führt die häufige Bildung von Aufbauschneiden am Werkzeug zu einem hohen Werkzeugverschleiß.



Abbildung 50: Hergestellte Pins mit variiertem Spitzenradius r_{sp} ($\alpha = 50^\circ$, $d_p = 3 \text{ mm}$)

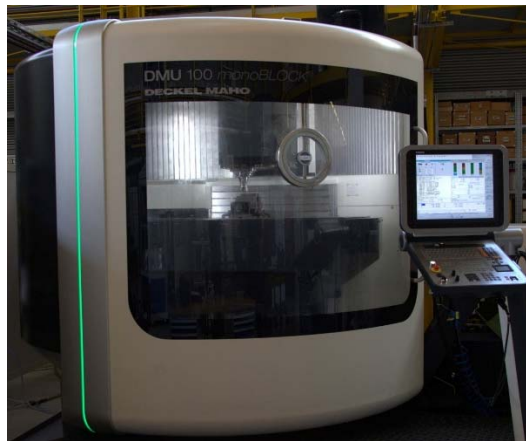


Abbildung 51: 5-Achs-Fräsmaschine DMU 100 monoBLOCK



Abbildung 52: Gefräste Prototypen mit unterschiedlichen Spitzenwinkeln
(Kopfdurchmesser 20 mm)

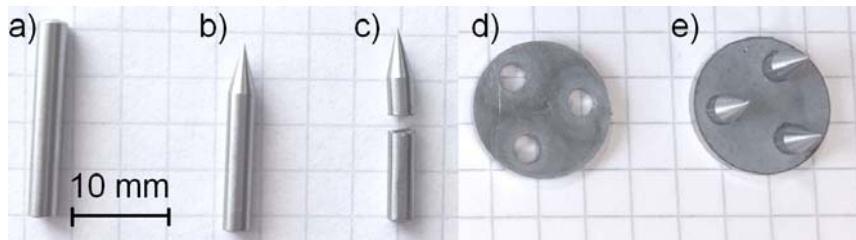


Abbildung 53: Fertigungsschritte für Prototypen in Differentialbauweise – a) Zylinderstift, b) geschliffene Spitze, c) auf definierte Länge gekürzter Pin, Kopfplatte d) ohne und e) mit eingepressten Pins

Der erste Ansatz zur Herstellung von Prototypen war die Verwendung einer 5-achsigen Fräswerkzeugmaschine (Abbildung 51) zur Erstellung der Fuß-Geometrie aus 20 mm Rundstahl und das anschließende Abstechen auf einer Drehmaschine am IWF Braunschweig (Abbildung 52). Dabei war beim Abstechvorgang keine ebene Oberfläche erzeugbar, sodass die Prototypen einzeln an einem Schleifbock manuell nachbearbeitet werden mussten. Aufgrund der vielen Prozessschritte, des dabei auftretenden hohen Werkzeugverschleißes und der hohen geforderten Prototypen-Anzahl von 50 bis 100 Stück pro Geometrievariante für die Schweißversuche wurde die Herstellungsmethode verworfen. Für die weitere Prototypenfertigung wurde ein neuer Ansatz mit Differentialbauweise verfolgt (Abbildung 53). In am IWF-Magdeburg per Laserschnitt gelochten Kopfplatten wurden am IWF-Braunschweig Zylinderstifte eingepresst, die mittels Außenrundscheifeln angefertigt wurden. Um die Pins in der erforderlichen Länge in hohen Stückzahlen zu realisieren, wurde eine Vorrichtung hergestellt, die das Trennen und Flachscheifen in größeren Pin-Gruppen ermöglicht.

Durchdringungsversuche

Zu Gewährleistung definierter Aufschmelzbereiche wurden Maskierungsfolien aus reflektierenden Folien hergestellt, die einen kreisförmigen Bereich zur Bestrahlung freilassen (Abbildung 54).



Abbildung 54: Durchdringungsproben mit Maskierungsfolien für unterschiedliche Aufschmelzdurchmesser

Bereiche außerhalb dieses Bereiches sind von der Folie abgedeckt, sodass die auftreffende Infrarotstrahlung reflektiert wird. Dadurch wird ein kontrolliertes Aufschmelzen innerhalb dieses Bereiches sichergestellt. Zur Validierung des in AP 1.1 erstellten Simulationsmodells und zur Untersuchung der Auswirkung der Eingangsgrößen auf Durchdringungskraft und Fa-

erschädigung wurden mit dem in AP 1.2 aufgebauten Versuchsstand Durchdringungsversuche durchgeführt. Die Verläufe der durch das Simulationsmodell berechneten Zusammenhänge gleichen in weiten Teilen den experimentellen Untersuchungen (Abbildung 55 bis Abbildung 58). Eine Erklärung des Unterschieds, insbesondere die Abhängigkeit der Durchdringungskraft vom Spitzenradius ab 0,5 mm (Abbildung 58), liegt bei der softwarebedingten nicht Berücksichtigung der Reibung. Dennoch lässt sich das Simulationsmodell sowie die experimentell gewonnenen Daten in AP 3 zur Optimierung der Verbindungselemente verwenden.

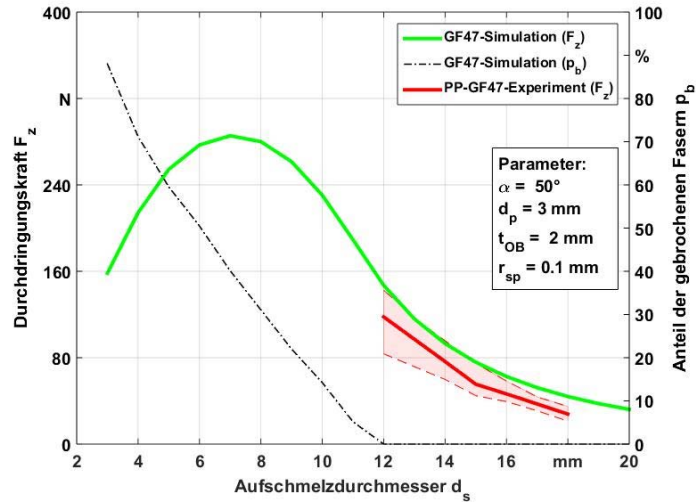


Abbildung 55: Durchdringungskraft und Faserschädigung in Abhängigkeit des Aufschmelzdurchmessers

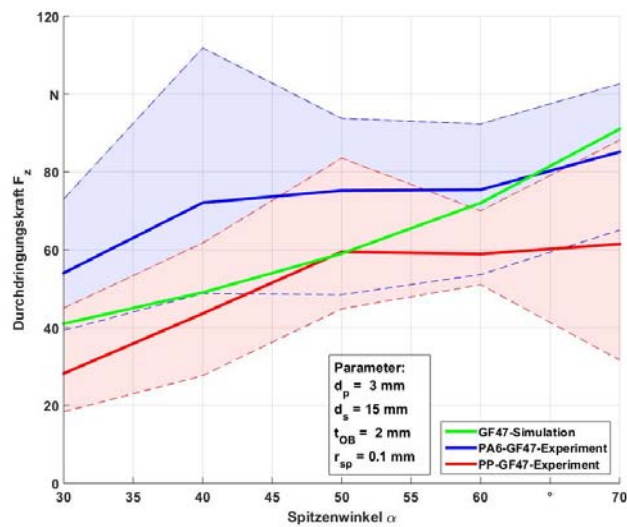


Abbildung 56: Durchdringungskraft in Abhängigkeit des Spitzenwinkels

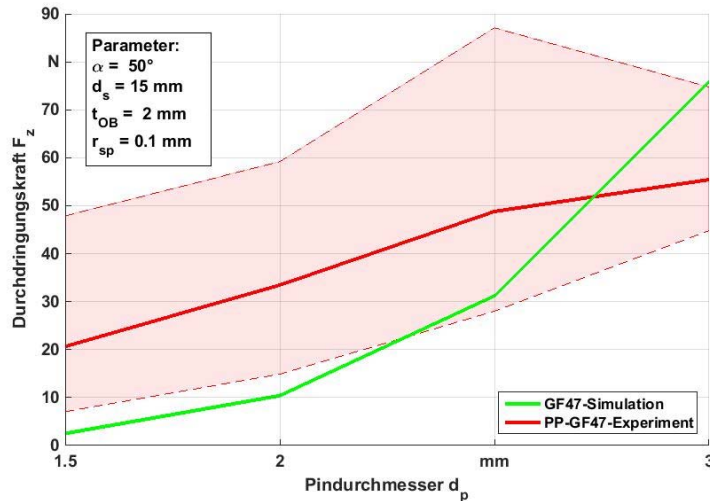


Abbildung 57: Durchdringungskraft in Abhängigkeit des Pindurchmessers

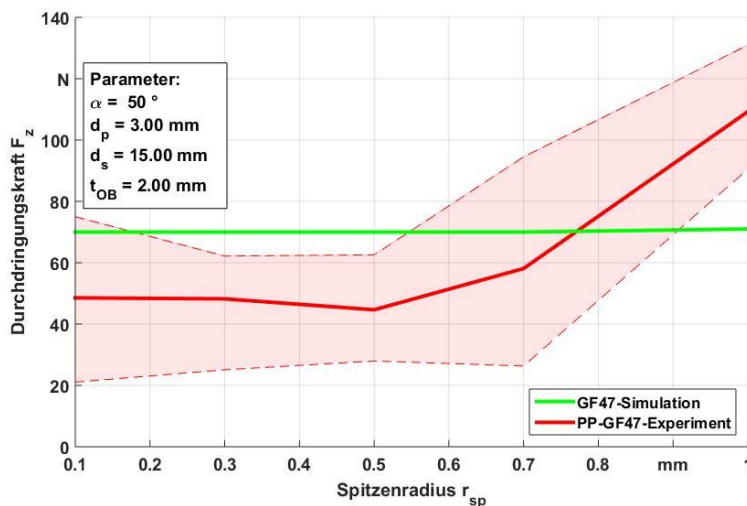


Abbildung 58: Durchdringungskraft in Abhängigkeit des Spitzenradius

5.1.4 Fazit aus AP1

Als Fazit aus AP1 liegt ein validiertes Simulationsmodell vor, mit dem die Mechanismen der Durchdringung von Faserverbundwerkstoffen untersucht werden können. Dieses Simulationsmodell wurde in AP3 für die Optimierung der Pin-Geometrie eingesetzt. Die Untersuchungen hinsichtlich der Pin-Geometrie haben ergeben, dass ein dünner spitzwinkliger Durchdringungskörper mit geringem Spitzenradius die besten Resultate erzielt. Außerdem wurde durch die Weiterentwicklung des Versuchsstandes und die Anpassung der Maschinensteuerung die Grundlage für reproduzierbare Durchdringungsversuche geben. Somit wurden alle Teilziele aus dem ersten Arbeitspaket erreicht.

5.2 Arbeitspaket 2 | Schweißtechnische Anbindung von FVK-Werkstoffen an eine metallische Struktur (IWF OvGU)

5.2.1 Anwendungsspezifische Entwicklung des Verbindungselements

Um eine Metall FVK-Struktur mittels Widerstandspunktschweißen herzustellen, soll in diesem Forschungsprojekt ein geeignetes Verbindungselement entwickelt und hergestellt werden. Auf diesem Grund wurden parallel zu den Durchdringungsversuchen in AP 1 des IWFs der Technischen Universität Braunschweig am IWF der Universität Magdeburg erste Elementkonzepte auf Basis vom konventionellen nietförmigen Widerstandselement entwickelt. In Tabelle 9 sind die Entwicklungsstufen (aufeinander aufbauen) präsentiert und individuell vorgestellt.

Tabelle 9: Elemente für grundlegende und Untersuchungen und Herstellungskonzepte

Elementabbildung	Beschreibung
<p>Stiftelement</p> 	<p>Nietförmiges Element; ähnliche Elemente finden bereits in der Serie beim Fügen von Aluminium mit Stahl Anwendung; Durchdringung ist nicht möglich (große Kontaktfläche); <u>Ziel:</u> das Nietelement diente als Ausgangspunkt für weitere Elemententwicklungen und Parameteroptimierungen</p>
<p>gebautes Element</p> 	<p>Gebautes Element; nicht aus Blechwerkstoff herstellbar; Verbesserte Durchdringung für FVK durch Verkleinerung des Stiftdurchmessers und Spitzenwinkels; <u>Ziel:</u> Erprobung unterschiedlicher Stiftdurchmesser und Spitzenwinkel und Untersuchung der Einflüsse auf die Schweißbarkeit → Ermöglichung konkreter Aussagen zum Spitzenwinkel und Fußdurchmesser</p>
<p>Ringelement</p> 	<p>Element mit flexibler Geometriegestaltung; Fußgestaltung von innen nach außen; Großer Kopfdurchmesser; aus Blech herstellbar; Begrenzte Fußlänge (konstruktionsbedingt); <u>Ziel:</u> Untersuchung der Herstellbarkeit im Umformprozess</p>
<p>Sternelement</p> 	<p>Element mit flexibler Geometriegestaltung; Fußgestaltung von außen nach innen; Großer Kopfdurchmesser; aus Blech herstellbar; Flexible Variation von Fußgeometrie (konstruktionsbedingt); <u>Ziel:</u> Untersuchung der Herstellbarkeit im Umformprozess</p>

Stiftelement – Optimierung der Schweißparameter zur Reduzierung der Wärmeeintrag

Das Stiftelement entspricht in seiner Simplizität und Geometrie üblichen Fügeelementen des Widerstandselementschweißens und diente als Ausgangspunkt der Elemententwicklung. Abbildung 59 zeigt die unterschiedlichen Längen, in welchen die Elemente für die Schweißuntersuchungen hergestellt wurden. Alle Elemente weisen eine einheitliche Kontaktfläche von annähernd 20 mm² auf und bestehen aus einem für das Lichtbogenbolzenschweißen vorgesehenen unlegierten Baustahl mit einer entsprechenden Kupferbeschichtung.

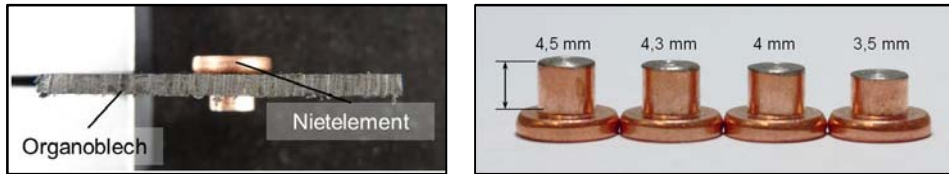


Abbildung 59: Hergestellte Stiftelemente für die Schweißuntersuchungen

Das Stiftelement lässt sich bei einer kurzen Schweißzeit von 10 ms sehr gut verschweißen. Weiterhin werden zufriedenstellende Verbindungsfestigkeiten bei Stromstärken von ca. 20 kA erzielt. Abbildung 60 (links) stellt das Bruchverhalten nach der zerstörenden Prüfung mit induziertem Bruch im Elementschaft außerhalb der Fügezone dar. Die Abhängigkeit zwischen Deformation und eingebrachter Schweißenergie ist deutlich erkennbar. Die Elementbreite steigt im direkten Vergleich von 14 % auf 44 %. Des Weiteren ist erkennbar, dass sich aufgrund der kurzen Schweißzeit keine übliche Schweißlinse gebildet hat. Der Wärmeeinfluss auf den angrenzenden Kunststoff ist gering. Es kommt zu leichten Aufschmelzungen rund um die Kopfscheibe, doch sind Verbrennungen nicht zu erkennen.

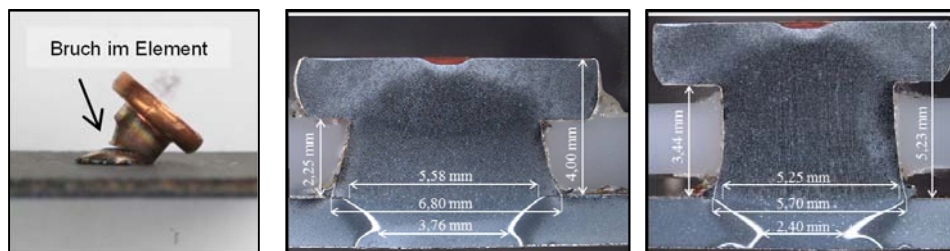


Abbildung 60: geschweißtes Stiftelement nach zerstörender Scherzugprüfung (links) und die Schlibbilder des Elements bei 21 kA (mittig) und 25 kA (rechts) bei 10 ms und 2kN

Fazit: Die Senkung der Schweißzeit reduziert die thermische Wirkung in der Wärmeeinflusszone und somit die Schädigungen im Kunststoff. Für weitere Schweißuntersuchungen ist eine Schweißzeit im Bereich von 10-20 ms zu empfehlen. Die Stromstärke ist element- und anlagenspezifisch und muss der ausgewählten Schweißzeit angepasst werden. Die Elektrodenkraft ist abhängig von der Elementgeometrie und -festigkeit (Stauchung) und kann im Bereich von 2 bis 4 kN eingesetzt werden.

Gebautes Element – Untersuchung des Einflusses von Spitzenwinkel und Stiftdurchmesser auf die Schweißung

Als Weiterführung der Stiftgeometrie mit Kopfscheibe, wird beim gebauten Dreifuß-Element ein einzelner Stift durch drei kleinere Stifte ersetzt. Hierbei wird die Kopfscheibe aus einem 1,5 mm starken, verzinkten Blech lasergeschnitten und anschließend mit den Einzelstiften zusammengefügt. Durch Variation einzelner Stifte wird der Einfluss des Spitzenwinkels sowie Stiftdurchmessers auf die Schweißbarkeit untersucht. In Abbildung 61 sind die untersuchten geometrischen Einflussgrößen zusammengestellt. Eine Übersicht aller gebauten Elemente ist in Abbildung 62 vorgestellt.

Die Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses des Stiftdurchmessers erfolgen ohne Spitze (Abbildung 62 links). Bei den Dreifuß-Elementen mit den Stiftdurchmessern 2 mm und 2,5 mm wurde das Fügen durch sich verbiegende Stifte erschwert.

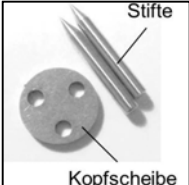
	Untersuchter Fußdurchmesser	2 mm; 2,5 mm und 3 mm	Spitzenzustand stumpf
	Untersuchter Spitzenwinkel	stumpf; 30°, 50°, und 70°	Stiftdurchmesser 3 mm

Abbildung 61: Versuchsmatrix



Abbildung 62: Variationen des Spitzenwinkels

Das Resultat ist eine enorme Verformung bzw. Stauchung des Stiftes unter Einwirkung des Schweißstroms und der Elektrodenkraft mit geringer Reproduzierbarkeit (Abbildung 63 b). Das Problem liegt im geometrischen Zusammenhang zwischen Breite und Länge eines Stiftes. Je länger und dünner der Stift, desto unstabiler läuft der Schweißvorgang ab. Nur mit den 3 mm Stiftdurchmessern konnten reproduzierbar gute Schweißverbindungen bei einer Schweißzeit von 10 ms hergestellt werden.

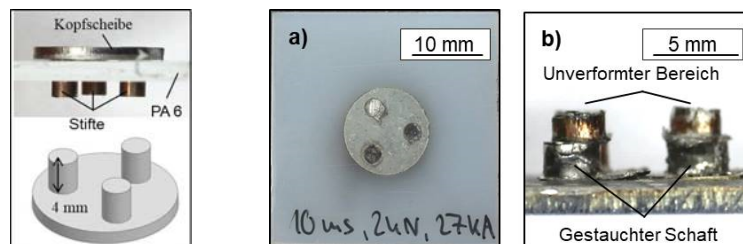


Abbildung 63: Verschweißtes gebautes Dreifußelement –Sicht von oben (a); Stifte nach Entfernung des Kunststoffblechs – starke Stauchung von Stiften (b) und durch Flachmeißel abgescherte Stifte

Im weiteren Verlauf erfolgten Untersuchungen bzgl. des Spitzenwinkels. In Absprache mit dem IWF der Technischen Universität Braunschweig sind die Spitzenwinkel 30°, 50° und 70° aufgrund der Ergebnisse im Durchdringungsprozess ausgewählt worden. In Abbildung 64 sind die Schliffbilder der geschweißten Proben mit unterschiedlichen Spitzenwinkeln dargestellt. Durch die kurze Schweißzeit von ca. 10 ms erfolgt keine Ausbildung einer Schweißlinse. Zur qualitativen Bewertung der Versuchsergebnisse wurden die Anbindungszone und die Reproduzierbarkeit der Schweißversuche herangezogen. Elemente mit 30° Spitzenwinkel weisen keine reproduzierbaren Schweißergebnisse auf. Das Problem liegt in einem sehr großen Nachsetzweg von ca. 5 mm, welcher für den konventionellen Widerstandsschweißprozess als kritisch zu betrachten ist. Das Schliffbild in Abbildung 64 (rechts) weist zusätzlich eine unvollständige Anbindung mit dem Stahlblech auf. Weiterhin ist die Verschiebung der Fügezone außerhalb des Stiftes zu erkennen. Diese Erscheinung ist auch auf den großen Nachsetzweg und geringen reproduzierbaren Nachsetzprozess zurückzuführen. Auf diesem Grund wird der Spitzenwinkel als nicht anwendbar bewertet. Im Gegensatz dazu ist bei einem Spitzenwinkel

von 70° eine vollständige und gleichmäßige Anbindung im Schliff (Abbildung 64 links) zu erkennen. Der Nachsetzweg beträgt ca. 2 mm und erfordert ebenfalls ein schnelles Nachsetzverhalten der Schweißanlage. Der 50° Spitzenwinkel weist ein gemittelttes Ergebnis auf und wurde als akzeptabel bewertet.

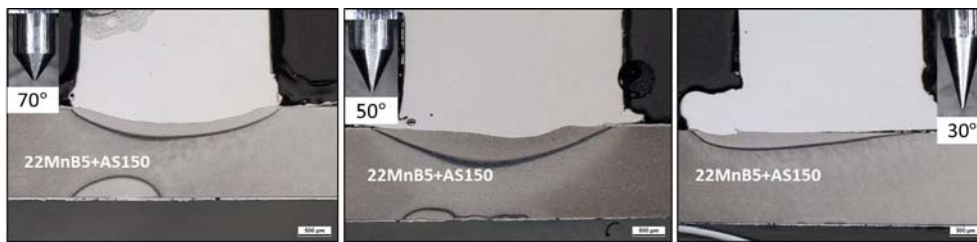


Abbildung 64: Geschweißte gebaute Elemente mit unterschiedlichen Spitzenwinkeln

Fazit: Die Spitze wird benötigt, um Wärme in der Fügezone zu konzentrieren, eine gleichmäßige Erwärmung zu erzeugen und damit die Stauchung des Verbindungsfußes zu vermeiden (Abbildung 65). Der 30° Spitzenwinkel ist aufgrund des großen Nachsetzweges sowie der nicht reproduzierbaren Schweißergebnisse ungeeignet. Die 70° sowie 50° Spitzenwinkel sind akzeptabel, wobei der 70° Spitzenwinkel das beste Ergebnis liefert.

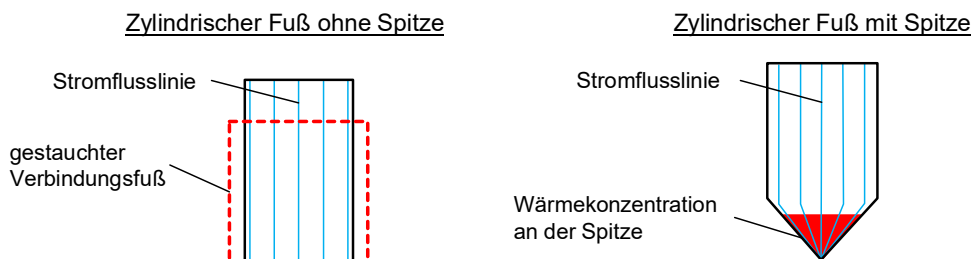


Abbildung 65: Einfluss einer Spitze auf Wärmentwicklung im Verbindungsfuß beim Schweißen

Ring- und Sternelement – Untersuchung des Herstellungskonzepts von Elementen aus dem Blech

Das Ring- und Sternelement verfolgen eine möglichst einfache und reproduzierbare Herstellung durch Umformung aus einem Blechteil. Die Herstellung der Elemente erfolgt in einem zweistufigen Prozess. Im ersten Schritt wird die Basiskontur aus einem Blech mit Hilfe eines Lasers herausgeschnitten. Dieser Schritt ermöglicht das Bereitstellen der Blechzuschnitte in großer Stückzahl innerhalb kurzer Zeit. Im zweiten Schritt werden die Elemente in einem Umformwerkzeug verformt, sodass die gefertigten Teile untereinander nahezu identisch sind. In Abbildung 66 sind die beiden entwickelten Elementkonzepte vorgestellt. Das Ringelement verfolgt das Herstellungskonzept „von innen nach außen“, sodass die Kontaktfüße aus dem inneren Teil des Elementes ausgestanzt werden sollen. Das zweite Konzept „von außen nach innen“ bietet die Möglichkeit die Verbindungsfüße aus dem außenstehenden Material auszustanzen. Zur weiteren Elemententwicklung erfolgen Untersuchungen zur Eignung der Konzepte. Jene haben gezeigt, dass beim Sternelement die Fußgeometrie (wie z.B. Länge und Breite) von Elementkopf entkoppelt ist und sehr einfach variiert sowie optimiert werden kann. Die Form und der Durchmesser des Elementkopfs können auch ohne signifikante Einflüsse auf die Geometrie der Verbindungsfüße geändert werden. Beim Ringelement ist die Fußgeometrie durch den Elementdurchmesser begrenzt, sodass die Variation der Fußlänge ggf. zu

einer Änderung des gesamten Elementdurchmessers führt. Des Weiteren ist bei diesem Element eine größere Deformation nach dem Umformprozess im Ringbereich zu erkennen. Aus den genannten Gründen wurde für die weitere Elemententwicklung das Sternelement mit dem Konzept „von außen nach innen umgeformten Kontaktfüße“ verfolgt.

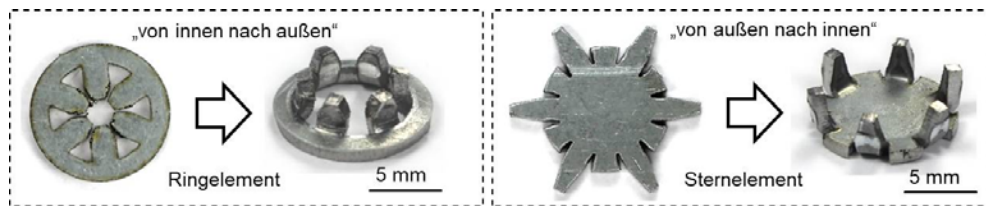


Abbildung 66: Hergestellte Elemente zur Untersuchung des Herstellungskonzeptes

Fazit: Mit beiden Konzepten lassen sich Elemente aus einem Stahlblech herstellen. Das Sternelement hat gegenüber dem Ringelement den Vorteil, dass die Verbindungsfüße durch den Einsatz der Lasertechnik operativ variiert sowie angepasst werden können. Weiterhin kann die Kopfgeometrie ohne signifikante Einflüsse auf den Schweißprozess geändert werden.

Zusammenfassung zu der anwendungsspezifischen Entwicklung des Verbindungselements

In der ersten Entwicklungsstufe sind Schweißparameter, geometrischen Einflussgrößen und Herstellungskonzepte Gegenstand intensiver Untersuchungen. Weiterhin sind Erkenntnisse zur Elementgestaltung hinsichtlich der Schweißtechnik zu erzeugen. Tabelle 10 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 10: Ergebnisstabelle: Schweißprozess, Fußgeometrie und Herstellungskonzept

Schweißprozess	Fußgeometrie	Herstellungskonzept
<p><u>Schweißzeit:</u> 10-20 ms</p> <p><u>Stromstärke:</u> Anlagen- und elementspezifisch → Anpassung erforderlich</p> <p><u>Elektrodenkraft:</u> 2-4 kN</p>	<p><u>Breite:</u> 3 mm</p> <p><u>Länge:</u> 2 mm</p> <p><u>Spitzenwinkel:</u> 50° - 70°</p>	<p>Sternelement</p> <p>„von außen nach innen“</p>

Die Reduzierung der thermischen Belastungen auf den Verbundwerkstoff erfolgt durch Senkung der Schweißzeit auf 10-20 ms. Gleichzeitig ist der Schweißstrom der verwendeten Schweißzeit anzupassen. Die kurzen Schweißzeiten führen zu einem Fehlen der Schweißlinse in der Fügezone, welche als Qualitätsbewertung der Schweißverbindung gilt. Eine Anpassung der Qualitätskriterien ist folglich erforderlich. Als wichtigster Faktor für die Elementgestaltung hat sich die Geometrie des Verbindungsfußes herausgestellt. Für die weitere Elemententwicklung ist ein Fußdurchmesser von 3 mm mit einem Spitzenradius zwischen 50°-70° zu empfehlen. Die Spitze wird benötigt, um einerseits den Schweißstrom und damit einhergehend die Wärme, an der Fußspitze zu konzentrieren, sowie andererseits die Fügezone zu erwärmen. Weiterhin wird die Stauchung unter einer gleichmäßigen Stromerwärmung des gesamten Fußes vermieden. Die Fußlänge ist abhängig von der Dicke des Verbundwerkstoffs. Die Fußbasis (Fuß ohne Spitze) darf minimal aus dem Verbundwerkstoff herausragen. Als Herstellungskonzept wird in weiteren Entwicklungsstufen das Sternelement mit dem Konzept

„von außen nach innen umgeformten Kontaktfüßen“ verfolgt. Der Vorteil dieses Elementes liegt in der Flexibilität der Anpassung von Fußgeometrie sowie Elementkopfdurchmesser.

5.2.2 Elementherstellung

In AP 2.1 wurde festgelegt, dass für die Elementherstellung das Sternelement mit dem Konzept „von außen nach innen verformten Kontaktfüßen“ weiterverfolgt wird. Bei der Herstellung von Versuchskörpern in hoher Stückzahl liegt der Schwerpunkt in der Einfachheit, der Reproduzierbarkeit und eines möglichst geringen Aufwands je Stück. Für diese Zwecke wurden die Elemente in einem zweistufigen Prozess hergestellt. Im ersten Prozessschritt werden die Elementhalbzeuge aus einem Blech mittels einer Laserstrahlanlage laut projektiertem Modell in großer Stückzahl ausgeschnitten. Anschließend werden die Teile in einer Pneumatikpresse verformt und mit der Sichtprüfung im Hinblick auf erkennbare Unregelmäßigkeiten kontrolliert. Das gesamte Ablaufschema ist in Abbildung 67 dargestellt. Abbildung 68 zeigt das Stempel-Matrize-Paar sowie die Konstruktionszeichnung.

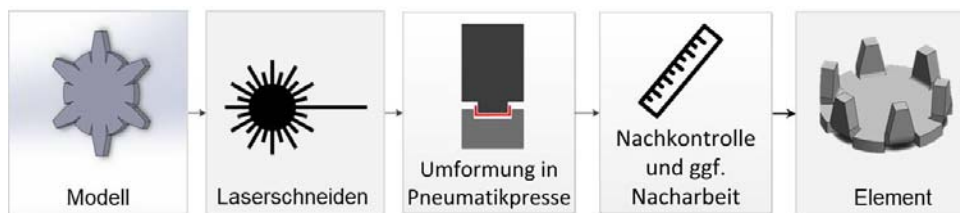


Abbildung 67: Schematischer Ablauf der Elementherstellung aus dem Blech

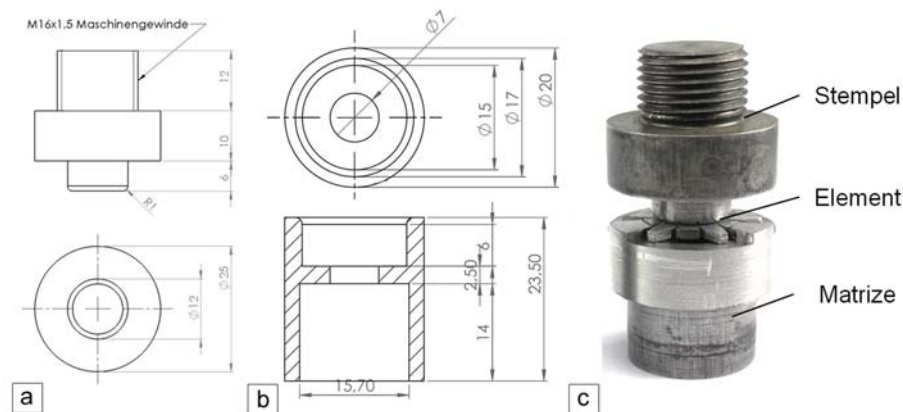


Abbildung 68: Zeichnung von Stempel (a) und Matrize (b); Werkzeug mit einem Element (c)

Um den zweiten Prozessschritt des Umformens durchzuführen, bedarf es eines passenden Werkzeugs. Anhand der zeichnerischen Gestaltung des Sternelements wurden die Maße auf einen Stempel und eine Matrize transformiert. Das Umformwerkzeug wurde aus einer 30 mm dicken C45-Stahlstange gebaut und anschließend gehärtet. Für den Umformprozess wird die Tox®-FinePress PFHL 0.56.002 der Firma Tox® Pressotechnik GmbH & Co. KG verwendet. Es handelt sich um eine pneumatische Presse mit manueller Zustellung (Abbildung 69). Zur Bewältigung des Umformens durch Tiefziehen wurde die Anlage angepasst und mit dem hergestellten Stempel-Matrizen-Paar ausgestattet.

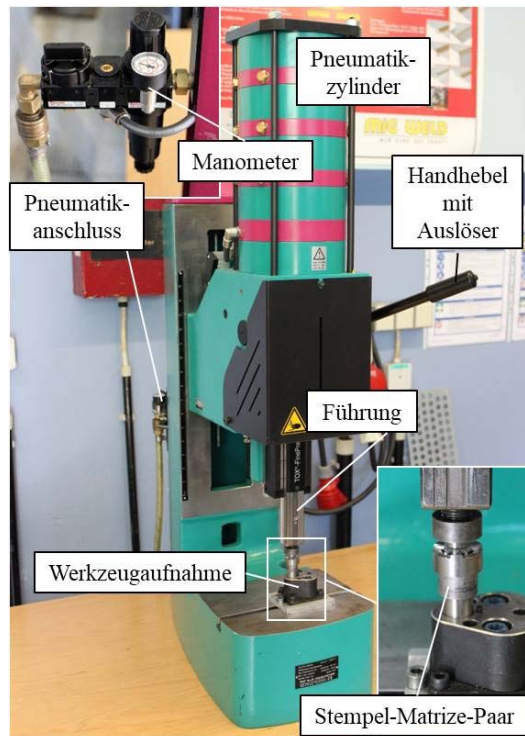


Abbildung 69: Pneumatische Presse für Umformvorgänge der Elementherstellung

5.2.3 Qualitätskriterien zur Ermittlung eines Prozessfensters

Um das Widerstandsschweißen als prozessstabil bezeichnen zu können, sollte es durch einen möglichst großen Schweißbereich gekennzeichnet sein. Die Schweißbereiche von mindestens 1,2 kA gelten als prozesssicher. Um den Schweißbereich einer Widerstandsschweißung bestimmen zu können, ist es erforderlich zuerst die Schweißbereichsgrenzen zu definieren. Beim konventionellen Widerstandspunktschweißen wird die untere Schweißbereichsgrenze erreicht, wenn die eingestellten Schweißparameter (Schweißstrom, Schweißzeit und Elektrodenkraft) ein Schweißpunktdurchmesser von $3,5 \cdot \sqrt{t}$ und $4 \cdot \sqrt{t}$ erzeugen, wobei t die Blechdicke des dünneren verschweißten Bleches beschreibt. Der obere Grenzwert des Schweißbereiches ist erreicht, sobald eine Bildung von Spritzern im Schweißprozess erfolgt. Der Bereich der sich zwischen den minimalen Punktdurchmesser und der Spritzergrenze ergibt, wird Schweißbereich bezeichnet. Im Gegensatz zu gängigen Normen ist beim Widerstandselementschweißen die bisher übliche Vorgehensweise zur Schweißbereichsermittlung nicht zielführend. Ein Hauptgrund ist hierbei die fehlende Ausbildung einer Schweißlinse in der Fügeebene aufgrund der sehr kurzen Schweißzeiten. Dies hat zur Folge, dass das Messen des Punktdurchmessers zur Qualitätssicherung nicht möglich ist. Des Weiteren kommt es bei der zerstörenden Meißelprüfung entweder zu einem Ausknöpfen des Deckblechs, wobei das Element auf dem Basisblech verbleibt, oder zum Scherbruch in der Fügeebene. Aufgrund dieser genannten Einschränkungen bedarf es einer modifizierten Vorgehensweise zur Schweißbereichsermittlung. Der schematische Ablauf der Schweißbereichsermittlung ist in Anlehnung an SEP 1220-Teil 2 in Abbildung 70 dargestellt. Nach Erreichen der unteren Qualitätsgrenze, entsprechend der zuvor definierten Kriterien, und der Absicherung durch mindestens fünfmaliger Wiederholung dieser, erfolgt eine schrittweise Erhöhung des Schweißstroms um 0,2 kA.

Die Schrittweise Anhebung des Schweißstroms erfolgt bis zum Erreichen der oberen Qualitätsgrenze. Eine Absicherung der unteren und oberen Qualitätsgrenze erfolgt durch aufeinanderfolgende Schweißungen.

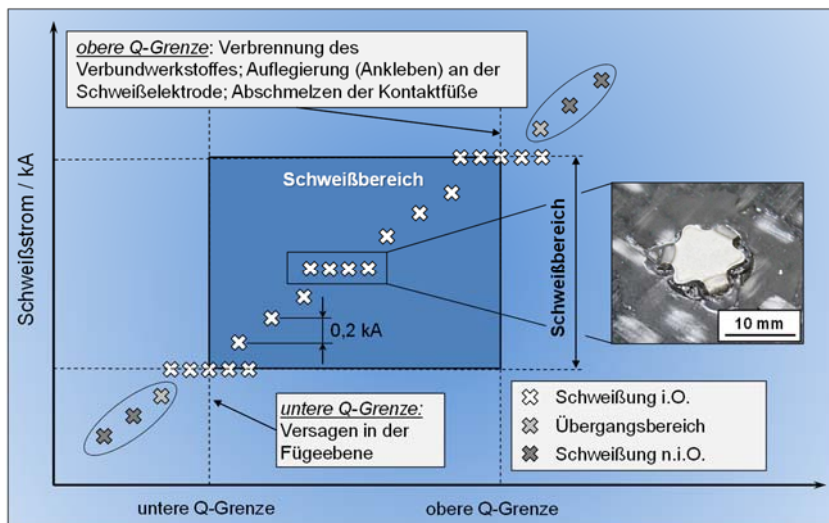


Abbildung 70: Ermittlung des Schweißbereichsdiagramms in Anlehnung an SEP 1220-Teil 2

Untere Qualitätsgrenze

Im Gegensatz zu gängigen Normen ist beim Widerstandselementschweißen (WES) die bisher übliche Vorgehensweise zur Schweißbereichsermittlung nicht zielführend. Ein Hauptgrund ist hierbei die fehlende Ausbildung einer Schweißlinse in der Fügeebene aufgrund der sehr kurzen Schweißzeiten. Des Weiteren kommt es bei der zerstörenden Meißelprüfung entweder zu einem Ausknöpfen des Deckblechs, wobei das Element auf dem Basisblech verbleibt, oder zum Scherbruch in der Fügeebene.

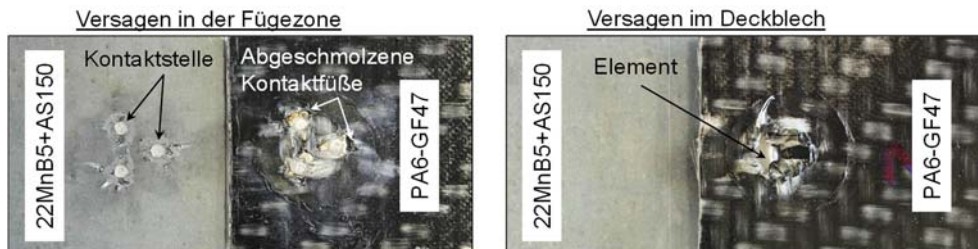


Abbildung 71: Versagensart der Fügeverbindungen in der Scherzugprüfung

Aufgrund dieser genannten Einschränkungen bedarf es einer modifizierten Vorgehensweise zur Schweißbereichsermittlung. Das Vorgehen bei der Ermittlung der unteren Qualitätsgrenze und der Bewertung der dabei entstehenden Fehlerbilder erfolgt mittels der Meißelprüfung.

Dabei ist die WES-Verbindung akzeptabel, wenn das Deckblech ausknöpft und das Element auf dem Grundmaterial verbleibt. Das gleiche Prinzip gilt bei weiteren zerstörenden Prüfver-

fahren wie dem Kopf- und der Scherzugprüfung. In Abbildung 71 sind die zwei charakteristischen Versagensarten in einer Scherzugprüfung dargestellt. Hier weist das Versagen in der Fügezone auf die nicht ausreichende Festigkeit der stoffschlüssigen Verbindung hin und liegt folglich außerhalb des Schweißbereichs. Das Versagen im Deckblech weist auf die ausreichende Festigkeit der Fügeverbindung hin und wird positiv bewertet.

Obere Qualitätsgrenze

Nach SEP 1220 sowie DIN EN ISO 14327 ist die Spritzerbildung ein zulässiges Qualitätskriterium, das die obere Schweißbereichsgrenze definiert. Im Fall des Widerstandselementschweißens mit Kurzzeittechnik ist der Einsatz dieses Kriteriums nicht zielführend, weil der Prozessablauf und das Zustandekommen der Schweißverbindung sich gegenüber dem Widerstandspunktschweißen unterscheidet. Es findet keine Ausbildung einer Schweißlinse statt. Im Gegenzug wird das Widerstandselement abgeschmolzen und angepresst. In Abbildung 72 ist ein Fügeprozess von 22MnB5+AS150 mit FVK mittels einem in diesem Projekt entwickelten Verbindungselements dargestellt. Hier ist eine Spritzerbildung zu erkennen, obwohl die Schweißverbindung akzeptabel ist.

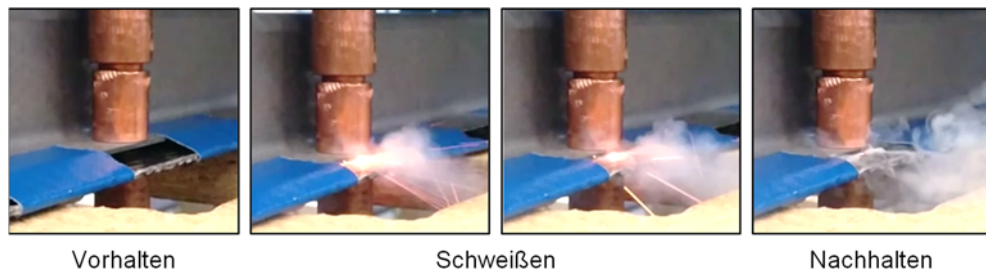


Abbildung 72: Spritzerbildung beim Widerstandsschweißen mit dem neuartigen Verbindungselement

Bereits bei der unteren Bereichsgrenze sind geringe Spritzer zu erkennen, sodass mit steigender Stromstärke die Intensität der Spritzer ebenfalls zunimmt. Die Bewertungskriterien der oberen Bereichsbrenze werden wie folgt ergänzt:

- Lokale durch das Aufschmelzen entstehende Auflegierung (Schädigung) der Elektrodenoberfläche
- Verbrennung bzw. das Aufschmelzen der Kontaktfue

Das lokale Aufschmelzen der Elektrodenoberfläche mit anschließender Auflegierung findet am Übergang Elektrodenkappe/Elementkopf statt.

Die Ursache hierfür liegt in einem groen Kontaktwiderstand an dieser Stelle, sodass ab einer definierten Stromstärke diese Stelle eine starke thermische Belastung erfährt. Bei einer weiteren ubermaigen Erhöhung der Stromstärke kann dieses Phänomen auch am Übergang Elektrode/Stahlblech beobachtet werden.

Zum besseren Verständnis wird der Schweißprozess in Abbildung 73 (links) sowie die dabei gemessenen Prozessparameter (Schweißstrom und Schweißspannung) mit typischen Prozessstörungen (rechts) dargestellt. Im hier abgebildeten Schweißstromverlauf ist eine kurzfristige Stromunterbrechung erkennbar welche mit einem Spannungsspeak korreliert. Die Unterbrechung entsteht durch eine kurzzeitige thermische uberbelastung an den Kontaktstellen, was in einem explosionsartigen Aufschmelzen der Elementfue sowie dem Ankleben der Elektroden am Elementkopf resultiert.

In Abbildung 74 ist eine Kontaktoberfläche der Schweißelektrode sowie ein geschweißtes Element mit dieser Elektrode mit Auflegierung dargestellt. Die Elektroden- sowie Elementschadigung nach einem Schweißversuch sind gut zu erkennen. Bei weiteren Schweißungen

wird diese Erscheinung weiter akkumuliert, sodass die Elektrodenoberfläche weiter beschädigt und der Schweißprozess damit unterbrochen wird. Aus diesem Grund wird dieses Phänomen als unzulässig bewertet und führt zu einer Eingrenzung des Schweißbereichs.

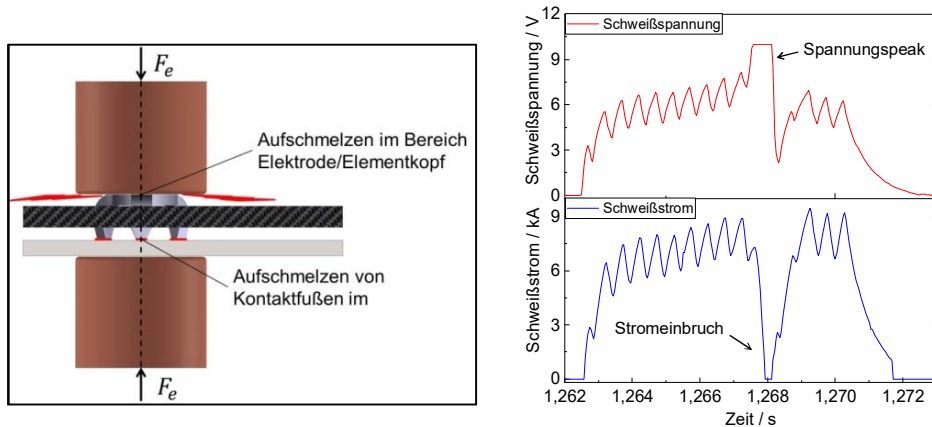


Abbildung 73: Darstellung des Schweißprozesses mit Auflegierung links und Parameterverläufe mit rechts Prozessstörungen bei der Auflegierung

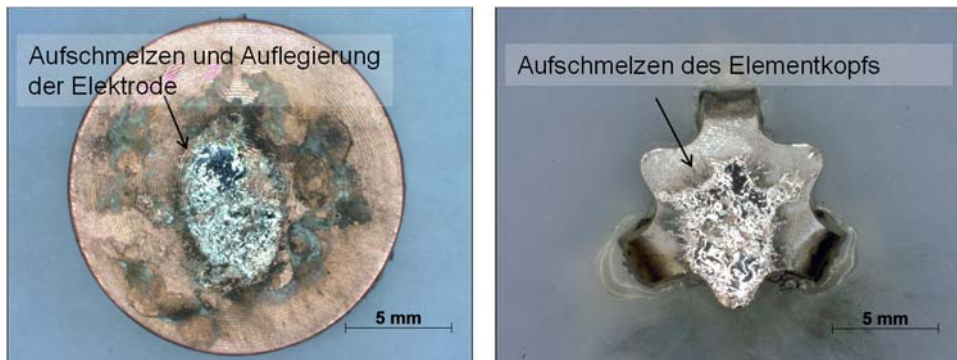


Abbildung 74: Kontaktoberfläche der Schweißelektrode mit Auflegierung (links). Ein geschweißtes Element (rechts)

Das weitere Kriterium zur Bestimmung des oberen Schweißbereichs- bzw. der Qualitätsgrenze ist das infolge des übermäßigen Energieeintrags vollständige Abschmelzen (Abbildung 75 links) bzw. partielle Aufschmelzen (Abbildung 75 rechts) des Verbindungsfußes. Diese Erscheinung wird ebenfalls als nicht zulässig bewertet und muss bei der Ermittlung des Prozessfensters berücksichtigt bzw. vermieden werden.

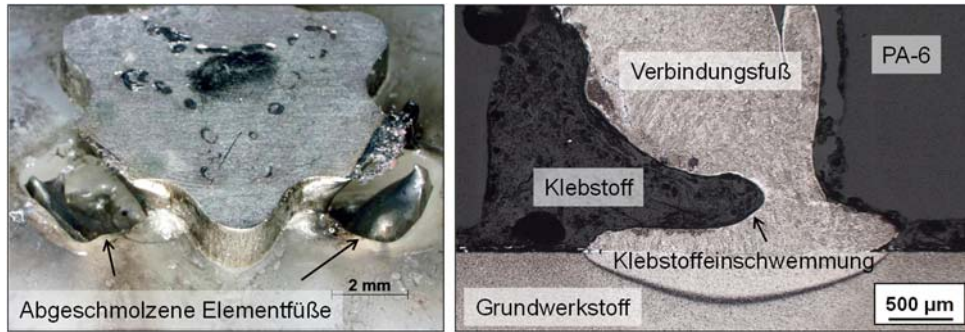


Abbildung 75: Vollständiges Abschmelzen von Kontaktfüßen (links) und lokales Aufschmelzen mit Klebstoffeinschwemmung im Fuß (rechts)

5.2.4 Schweißtechnische Herstellung eines Hybridverbundes durch Verwendung des neuartigen Verbindungselements

Versuchsplan

Die Untersuchung der Schweißbarkeit der aus einem Blech hergestellten Sternelemente mit einem hochfesten Stahl beim Widerstandspunktschweißen ist ebenfalls Gegenstand von Arbeitspaket 2. Die Schweißbereiche wurden sowohl mit, als auch ohne, Klebstoff ermittelt, sowie die Verbindungsfestigkeit mittels Scher- und Kopfzugprüfung bewertet. Die in diesem Arbeitspaket vorgestellten Ergebnisse wurden mit einer, auf das Kurzzeit-Widerstandsschweißen, optimierten Anlagentechnik der Fa. NIMAK hergestellt. Die Ständeranlage in C-Bauweise besitzt neben einem verbesserten 1 kHz-MFDC Schweißtransformator zusätzlich einen neuartigen, hybriden Antrieb zur Krafterzeugung, der ein ultraschnelles Nachsetzen der Elektroden ermöglicht und eine maximale Elektrodenkraft von 10 kN aufbringt. Dies ermöglicht aufgrund der schnellen Stromanstiegsgeschwindigkeit die Anwendung der Kurzzeitschweißtechnik, wodurch sich die Wärmeentwicklung in der Wärmeeinflußzone verringert und somit eine Schädigung der Kunststoffmatrix sowie der Glas- bzw. Kohlenstofffasern minimiert.

Basisblech	Klebstoff	Deckblech	Element
22MnB5+AS150 (1,5 mm)	BM 1480	PA 6 (2,0 mm) – vorgeb.	HCT780+Z (1,5 mm)
22MnB5+AS150 (1,5 mm)	BM 1480	PA 6-GF47 (2,0 mm) – vorgeb.	HCT780+Z (1,5 mm)

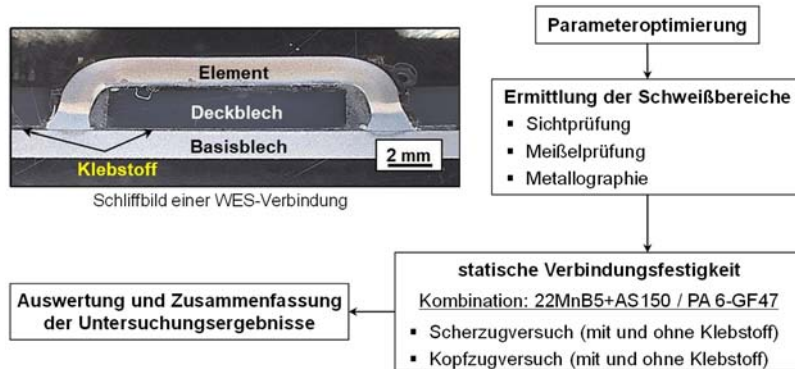


Abbildung 76: Plan der praktischen Schweißversuchen in AP 2

Für die Untersuchungen wurde das Sternelement (Abbildung 66) gewählt, welches sich in dieser Entwicklungsstufe als ungeeignet für die schädigungsarme Durchdringung des FVK herausstellte. Als Basis für die Schweißparameter dient die Kurzzeitschweißtechnik, die eine Reduzierung der Schweißzeit auf 10-20 ms sowie eine Erhöhung der Schweißstromstärke ermöglicht. Um das gesamte praktische Vorgehen in diesem Arbeitspaket strukturiert darzustellen, ist die gesamte Versuchsdurchführung in einem Versuchsplan schematisch in Abbildung 76 dargestellt.

Prozessparameter

Neben der Schweißzeit und Stromstärke sind das Elektrodennachsetzverhalten und der Elektrodenkraftverlauf weitere wichtige Kriterien. Aufgrund der sehr kurzen Schweißzeit sowie des großen Nachsetzweges müssen die Elektroden beim Aufschmelzen der Kontaktfüße schnell nachsetzen, um eine fehlerfreie Verschweißen des Elements mit dem Stahlblech gewährleisten zu können. In Abbildung 77 sind die gemessenen Prozessgrößen beim Widerstandselementschweißen einer FVK/Stahl Verbindung mit dem neuartigen Verbindungselement dargestellt.

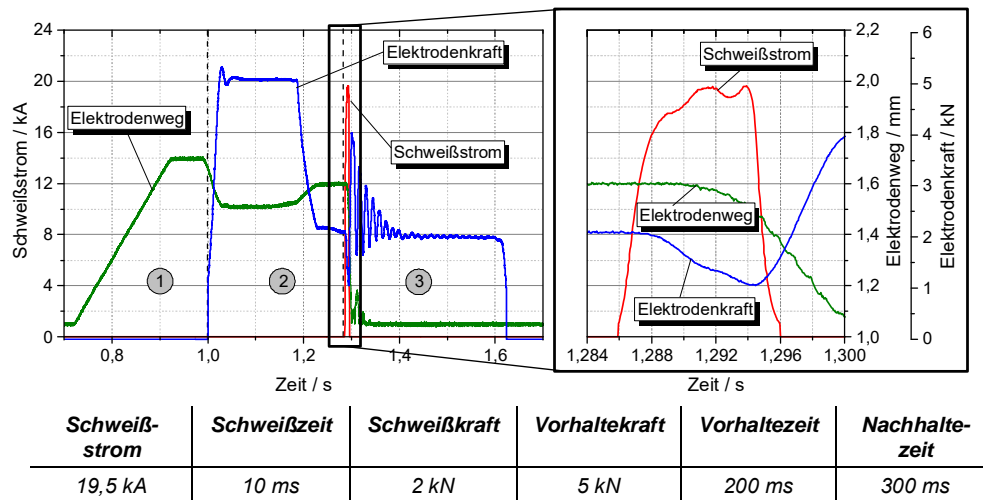


Abbildung 77: Gemessene Prozessgrößen beim Widerstandselementschweißen mit neuartigem Verbindungselement

Der gesamte Schweißprozess wird in drei Bereiche unterteilt. In Bereich 1 fahren die Elektroden, bis das Element erreicht wird, zusammen. Nach einer definierten Haltezeit wird eine Elektrodenkraft aufgebaut und das Element mit einer Vorhaltekraft belastet. Die in diesem Fall verwendete Vorhaltekraft von 5 kN dient zur Verbesserung der Kontaktsituation sowie gleichmäßigen Verteilung der Elektrodenkraft durch das Anpressen aller Kontaktfüße. Anschließend wird die wirkende Elektrodenkraft auf 2 kN reduziert und der Schweißstrom zugeschaltet. In Bereich 3 findet unter Zuschaltung der restlichen Schweißparameter die Ausbildung der Fügeverbindung statt. Die Zuführung der konzentrierten und impulsförmigen Schweißenergie in die Verbindung wird durch die Zuschaltung sowie dem schnellen Aufbau des Schweißstroms ermöglicht. Die maximal gemessene Stromstärke beträgt 20 kA bei einer Schweißzeit von 10 ms.

Während des Schweißprozesses erweichen bzw. schmelzen die Elementfüße, was zu einem Abfall der Elektrodenkraft führt. Der Kraftabfall beträgt in diesem Fall 50 %, 2 kN auf 1 kN. Nach dem Abschalten des Schweißstroms wird innerhalb der nächsten 100 ms die Elektrodenkraft der Schweißanlage nachgeregelt, um den eingestellten Sollwert von 2 kN erneut zu

erreichen. Die Nachregelung führt zu Schwankungen im Kraftsignal, sodass die Elektrodenkraft kurzfristig 200% des Einstellwerts erreicht, was wiederum ein übermäßiges Verformen des Elements provozieren kann. Die Ursache liegt in der Reaktivität der Nachsetzregelung der Schweißanlage. Ein weiteres wichtiges Kriterium stellt das Elektrodennachsetzverhalten dar. In Abbildung 78 ist eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines Schweißprozesses mit Sternelement dargestellt. Der Schweißprozess beginnt an der Kontaktzone zwischen den Fußspitzen und dem Stahlblech. Hier findet durch eine Erhöhung der Stromdichte ein lokales Abschmelzen der Verbindungsfüße in der Kontaktzone statt, sodass der verbleibende Fuß im festen Zustand bleibt. Durch die Elektrodenkraft wird das schmelzflüssige Material spritzerförmig aus der Fügezone gepresst. Aus diesem Grund ist eine leichte Spritzerbildung zulässig und wird nicht als Ausschlusskriterium bewertet. Nach der Abkühlung bildet sich eine stoffschlüssige Verbindung aus. Es wird deutlich, dass sich ein Nachsetzen der Elektroden nach Beendigung eines Stromimpulses nachteilig auf die Verbindungsfestigkeit auswirkt. Eine konstante Elektrodenkraft wird benötigt, um die Fügeoberflächen möglichst nah an einander zu bringen. Dies unterstützt die Diffusionsvorgänge bei der Peaktemperatur nach der Stromabschaltung.



Abbildung 78: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Schweißprozesses vom Sternelement

Ermittelte Schweißbereiche

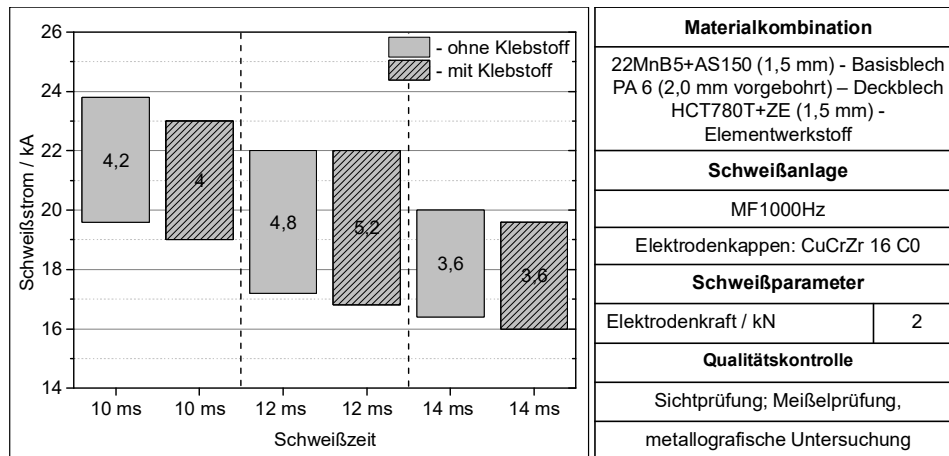


Abbildung 79: Ermittelte Schweißbereiche mit und ohne Klebstoff mit einem Sternelement

Als Startparameter der Untersuchungen zum Schweißbereich sind eine Schweißzeit von 10 ms, eine Vorhaltekraft von 5 kN und eine Kraft von 2 kN übernommen worden. Um den Einfluss des Klebstoffs auf das Schweißergebnis beurteilen zu können, werden die Untersuchungen sowohl mit, als auch ohne, den Einsatz des Strukturklebstoffs BETAMATE™

1480V203 durchgeführt. In Abbildung 79 sind die Schweißbereiche in Abhängigkeit der Schweißzeit dargestellt. Diese beziehen sich auf die Verwendung des Sternelements mit einem vorgeborteten Polyamid 6-Deckblech. Alle ermittelten Schweißbereiche der drei Schweißzeiten übersteigen die Mindestgröße von 1,2 kA und können demnach als prozesssicher angesehen werden. Darüber hinaus ist der Einfluss des Klebstoffs auf die Schweißbereichsgröße bei dieser Materialkombination gering. Entsprechend der Proportionalität zwischen der induzierten Widerstandswärme, Zeit und Stromstärke, verschieben sich die ermittelten Schweißbereiche mit zunehmender Zeit in Richtung einer niedrigeren Stromstärke. Die Größe der einzelnen Schweißbereiche ist von den in Abschnitt 5.2.3 definierten Qualitätskriterien abhängig. Die Verkürzung der Schweißzeit auf 8 ms führe zu keinem gültigen Ergebnis. Ebenso führen weitere Verkürzungen der Stromzeit unterhalb von 10 ms generell mit dem genutzten Schweißinverter für dieses spezielle Fügeelement zu keinen ausreichenden Ergebnissen. Die Schweißzeit von 10 ms stellt folglich die technisch bedingte Mindestschweißzeit dar. Die Verlängerung der Schweißzeit auf 16 ms führten tendenziell zu einem vergleichbaren Ergebnis wie bei 14 ms.

Metallographische Untersuchung

Nachdem die Schweißbereiche definiert wurden, folgt die metallographische Untersuchung der hergestellten Fügeverbindungen. Abbildung 80 zeigt das Schlibbild einer bei 10 ms geschweißten Probe ohne Klebstoff.

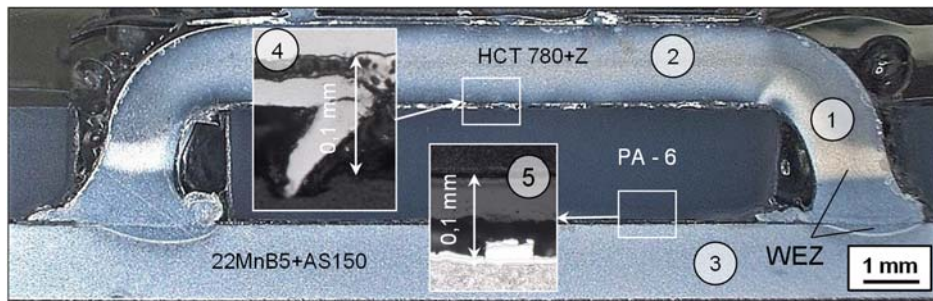


Abbildung 80: Metallographische Analyse hergestellter Fügeverbindung ohne Klebstoff

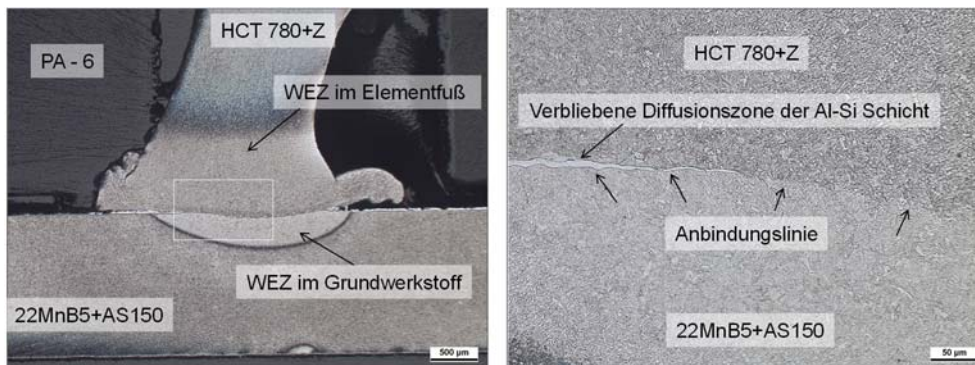


Abbildung 81: Detaillierte metallographische Analyse der Fügeverbindung

Sowohl in Abbildung 80 als auch in Abbildung 81 ist keine übliche Schweißlinie in der Fügezone zu erkennen, sondern lediglich die Wärmebeeinträchtigungszone und eine Anbindungsline. Die Wärmebeeinträchtigungszone ist ungleichmäßig verteilt, einerseits mit einer nur geringen Wirtiefe im

Basisblech (3) und andererseits mit ca. der Hälfte des Elementfußes (1). Die Verbindungsfüße werden dabei stark gestaucht, sodass sich eine Wulst ausbildet. Der Elementkopf (2) bleibt hingegen thermisch unbeeinflusst. Die Ursache hierfür liegt in der geometrischen Gestaltung des Sternelements. Die sehr kleinen Fußdurchmesser erzwingen eine höhere Stromdichte als im Basisblech, wodurch es zu einer stärkeren Widerstandserwärmung, besonders im Bereich der Fußinnenseiten, kommt. Ebenfalls gut zu erkennen, ist die Spritzerbildung, welche sich in Richtung des Elementinneren ausprägt. Zu sehen ist diese seitlich und oberhalb des PA 6 im Spalt (4) zwischen dem Elementkopf und im Spalt zwischen dem 22MnB5-Blech (5). Das Spaltmaß beträgt 0,1 mm, was für den Klebstoffeinsatz geeignet ist. Eine detaillierte Betrachtung der Fügezone lässt eine restliche Diffusionsschicht der Al-Si Schicht erkennen (Abbildung 81). Die verbleibende Schicht wurde sowohl an der unteren als auch an der oberen Schweißbereichsgrenze detektiert. Bei der unteren Grenze handelt es sich um eine fast durchgehende Schicht, wobei die Schicht bei der oberen Grenze fast vollständig aufgebrochen wird. An der Anbindungslinie bzw. am Übergang vom Grundwerkstoff zum Element wurden keine umgeschmolzenen Bereiche detektiert. Das Schweißergebnis der Verbindungen mit dem Klebstoff ist an der unteren sowie oberen Grenze in Bezug auf den Wärmeeinfluss trotz verminderter Stromstärke annähernd identisch. An der Anbindungslinie lassen sich analog zur unteren Qualitätsgrenze ohne Klebstoffapplikation die Rückstände der Al-Si-Fe-Interdiffusionsschicht vergleichbar zu Abbildung 81 (rechts) erkennen. Überschüssiger Klebstoff wird während des Schweißprozesses über die Bohrungen im PA 6 herausgepresst. An den Kontaktstellen zum Elementfuß sind vernachlässig kleine Klebstoffverbrennungen im direkten Kontakt mit dem Verbindungsfuß erkennbar. Der Klebstofffilm mit einer Dicke von 0,1 mm wird gleichmäßig zwischen Stahlblech und Kunststoff verteilt und liegt im akzeptablen Bereich.

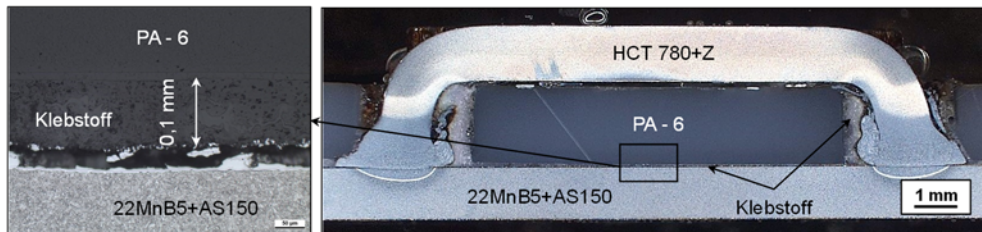


Abbildung 82: Metallographische Analyse hergestellter Fügeverbindung mit Klebstoff

Mechanische Eigenschaften der Fügeverbindungen

Abbildung 83 stellt die Ergebnisse des quasistatischen Scher- und Kopfzugversuchs der WES-Verbindungen an der unteren und oberen Schweißbereichsgrenzen bei 10 ms Schweißzeit und konstanter Elektrodenkraft von 2kN dar. Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 14273 und 14272. Das Schweißen der Scherzugproben erfolgt mit dem Sternelement und mit vorgebohrtem faserverstärkten Verbundwerkstoff. Die WES-Verbindungen versagen aufgrund einer Langlochbildung im Deckblech, sowie durch Rissbildung in der Kunststoffmatrix, wobei das Fügeelement und die Fügezone unbeschädigt bleiben. Die Proben mit dem Klebstoff zeigen ein ähnliches Bruchverhalten sowie einen Mischbruch aus Adhäsionsbruch an der Stelle Klebstoff-Verbundwerkstoff. Weiterhin ist ein Versagen der Al-Si Schicht zu erkennen. Die Kopfzugproben weisen ein ähnliches Bruchverhalten, wie die Scherzugproben (Abbildung 84), auf. Die ermittelten Maximalkräfte der Proben ohne Klebstoff betragen durchschnittlich 6,5 kN und werden damit hauptsächlich von der Festigkeit des Deckblechmaterials und einer sich durch das Nachsetzen ergebenden Flächenpressung bestimmt. Darüber hinaus liegen die maximalen Werte in einem relativ großen Streubereich (bis 2 kN), was auf die unterschiedliche Versagensart des Verbundwerkstoffes zurückzuführen ist.

Aus diesem Grund kann keine Aussage über den Einfluss der Schweißzeit auf die Verbindungsfestigkeit getroffen werden. Das Versagen tritt, wie in Abbildung 85 zu erkennen, durch ein Abreißen der Klebstoffschicht mit direkt folgendem Herausreißen des Sternelements auf.

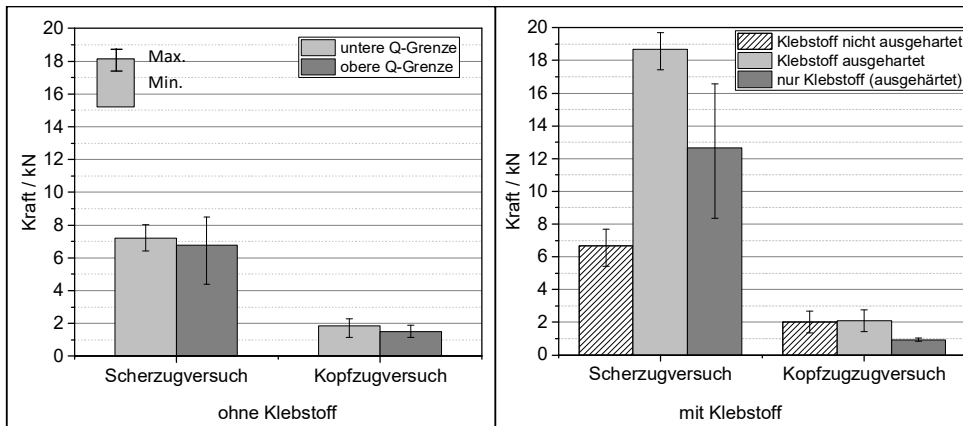


Abbildung 83: Ermittelte maximale Scherzug- und Kopfzugkräfte mit und ohne Klebstoff der Materialkombination 22MnB5+AS150 und PA6-GF47

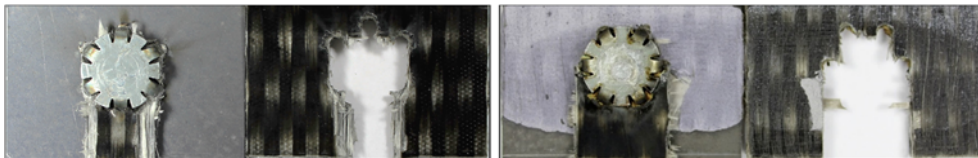


Abbildung 84: Versagensart der hybrid gefügten Scherzugproben ohne Klebstoff (links) und mit Klebstoff (rechts)

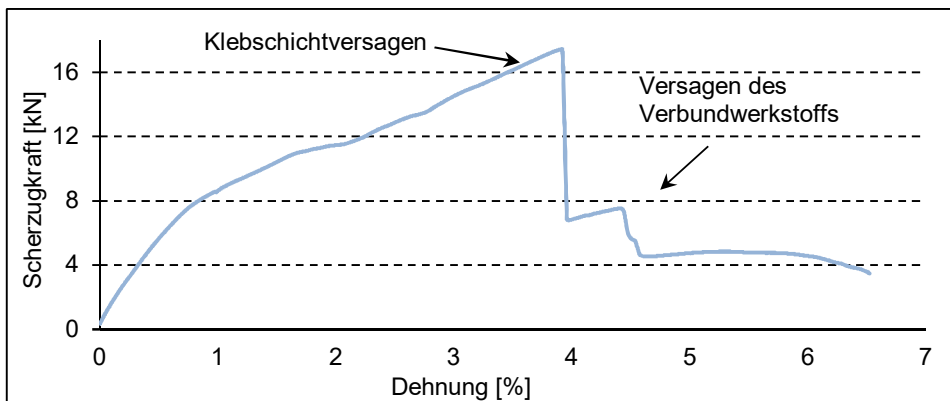


Abbildung 85: Kraft-Dehnungsverlauf einer hybrid gefügten Scherzugprobe mit dem Klebstoff

Die geklebten Verbindungen ohne Verbindungselement halten eine Kraft von ca. 12,5 kN aus. Mit zusätzlich geschweißtem Widerstandselement lässt sich die durchschnittliche Scherzug-

kraft auf 18,6 kN erhöhen. Die Kopfzugprüfung mit geklebten und hybrid gefügten Verbindungen führt zu keinen aussagekräftigen Ergebnissen, da sich die Klebverbindungen durch eine unzulässige Schälbeanspruchung bereits bei ca. 1 kN lösen. Anschließend stoppt die Schälung am Sternelement, bis das Organoblech ausknöpft. In der weiteren Projektphase erfolgen Untersuchungen an durchdrungenen FVK-Proben, um den Einfluss der Faserschädigung auf das Festigkeitsverhalten zu analysieren. In AP 3 werden die Elementgeometrien hinsichtlich des Durchdringungsverhaltens und des Schweißverhaltens optimiert, um ein geeignetes Verbindungselement sowohl für die Durchdringung als auch die Schweißung zu entwickeln und eine anforderungsgerechte Lösung für die vorliegende Werkstoffkombination zu erzielen.

Fazit zu AP 2

In diesem Arbeitspaket wurden unterschiedliche Elementkonzepte betrachtet und damit Erkenntnisse für die Schweißparameter, Elementgestaltung, Geometrie der Verbindungsfüße hinsichtlich der Schweißtechnik und Herstellungskonzepte von Verbindungselementen aus dem Blech erarbeitet. Hierzu wurde für die schweißtechnischen Untersuchungen ein geeignetes, reproduzierbares Verbindungselement entwickelt. Eine schädigungsarme Durchdringung war mit diesem Element hingegen nicht möglich. Die Optimierung sowie weitere Entwicklung des Elements für eine schädigungsarme Durchdringung und geeignete Schweißung erfolgt in AP 3. Die Schweißuntersuchungen zeigen, dass die Herstellung von Hybridstrukturen aus höchstfestem Stahl und Verbundwerkstoff mittels eines aus einem Blech umgeformten Verbindungselements möglich ist. Durch die hier realisierten sehr kurzen Schweißzeiten im Bereich von 10-14 ms Millisekunden ist es folglich möglich, die thermische Belastung auf wärmeempfindliche Materialien, wie die Kunststoffmatrix des faserverstärkten Kunststoffes, zu minimieren, sodass jene schweißtechnisch schädigungsarm zu verarbeiten sind. Für die WES-Verbindungen konnten mit Schweißzeiten zwischen 10 und 14 ms ausreichend große Schweißbereiche mit und ohne Klebstoff ermittelt werden. Aufgrund der kurzen Schweißzeiten bildet sich im vorliegenden Fall keine Schweißlinse in der Fügezone aus. Darüber hinaus ist der Einsatz von aktuellen Normen zur Schweißbereichsermittlung wie SEP 1220 oder DIN EN ISO 14327 ohne Anpassung der Qualitätskriterien nicht anwendbar. Es wurde eine Methode für eine angepasste Vorgehensweise erarbeitet, die jedoch noch weiterführender Untersuchungen bedarf. Sie ist werkstoffspezifisch, sodass für unterschiedliche Verbundwerkstoffe die Schweißbereiche separat ermittelt werden müssen. Hierzu wurde auch von der Forschungsstelle in Magdeburg ein entsprechender Forschungsantrag erarbeitet [IWF]. Die Ergebnisse der Scherzugversuche verdeutlichen, dass die maximale Scherzugkraft von der Festigkeit des Verbundwerkstoffes bestimmt wird. Die maximale Scherzugkraft wurde in Kombination mit dem Verbindungselement und Klebstoff ermittelt. Die Kopfzugversuche mit Klebstoff ließen kein eindeutiges Ergebnis zu, da es zu einer unzulässigen Schälbeanspruchung kommt und der Klebstoff bereits bei ca. 1 kN versagt.

5.3 Arbeitspaket 3 | Optimierung und Bewertung der Verbindungseigenschaften (IWF TU-BS & IWF OvGU)

Für die hybride Verbindung wurden Prüfverfahren für die Scher- und die Kopfzugprüfung entwickelt, die sich hinsichtlich Prüfkörpergeometrie und Versuchsdurchführung an den Normen für die Punktschweißung orientieren. Ergänzend wurde ein weiteres Prüfverfahren zur Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit eines von einem Pin durchdrungenen Organobleches entwickelt.

5.3.1 AP 3.1 Gestaltoptimierung zur lastgerechten Kraftverteilung sowie zur Verbesserung des Schweißprozesses

In den ersten beiden Arbeitspaketen wurden die Prozessschritte Durchdringung und Elementschweißen unabhängig voneinander entwickelt. Hinsichtlich Durchdringbarkeit und Schweißbarkeit (Abbildung 86) resultiert hieraus ein Zielkonflikt in der Elementgeometrie. Der Durchdringungsprozess wird durch möglichst schlanke spitze Elementfüße begünstigt, während für den Schweißprozess ein guter Kontakt der Fußspitzen zum Grundblech über eine ausreichend große Kontaktfläche notwendig ist und sich anlagentechnisch nur verhältnismäßig geringe Nachsetzwege realisieren lassen. Deswegen wurde in AP 3 eine Kompromissgeometrievarianten entwickelt, die außer den genannten Prozessanforderungen ebenfalls Anforderungen aus dem kostengünstigen Elementherstellungsprozess (Stanzumformung) erfüllt.



Abbildung 86: Ausgangsgeometrien für die Optimierung in AP3

Das Grundkonzept sowie die Geometrie des Verbindungselements ist in Abbildung 87 dargestellt.

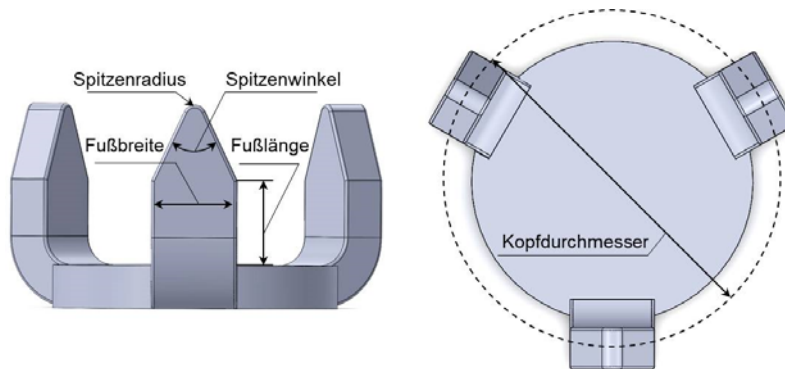


Abbildung 87: Model eines in AP 3 optimierten Elements

Mit den Ergebnissen aus AP 1 und AP 2 wurden geometrische Restriktionen für das Verbindungselement erarbeitet. Diese sind in Tabelle 11 aufgelistet. Mit diesen Parametern wurden in einem iterativen Gestaltoptimierungsprozess Element-Prototypen entwickelt (Abbildung

88). Für jede Prototypenvariante wurde zunächst eine Blechzuschnittzeichnung erstellt. Mit diesen Geometriedaten wurden auf einer Laserschneidanlage des IWF der OvGU im ersten Schritt Blechzuschnitte erstellt. Im zweiten Arbeitsschritt wurden die Füße mittels spezieller Vorrichtungen umgeformt. In den ersten Durchdringungsversuchen mit lasergeschnittenen Verbindungselementen wurden aufgrund der Gratbildung an den Schnittkanten viele Fasern ausgerissen.

Tabelle 11: In AP 1 und AP 2 erarbeitete Restriktionen für die Geometrieparameter

Einflussgröße	Durchdringen	Schweißen	Durchdringen + Schweißen
Fußbreite, mm	max. 3	min. 3	3
Fußlänge, mm	min. 2	min. 2	min. 2
Blechdicke, mm	nicht relevant	min. 1,5	1,5
Spitzenwinkel, °	max. 50°	70°	50
Spitzenradius, mm	max. 0,5	nicht relevant	0,5
Fußanzahl	3	6	3
Kopfdurchmesser, mm	min. 10	max. 15	10



Abbildung 88: Elemententwicklungsstufen des Blechverbindungselements

Der Grat an der Schnittkante führt zu erhöhten Durchdringungskräften sowie ebenfalls zum Faserbruch. Außerdem werden die Fußspitzen nach der Durchdringung nicht ausreichend für die anschließende Schweißung freigelegt. Dieses Problem wurde durch das Entgraten der Verbindungselemente mittels Gleitschleifen (Trowalisieren) gelöst. Im letzten Optimierungsschritt wurde das Verbindungselement an geometrische Restriktionen (vorwiegend der Kopfplatte) aus dem Stanzumformprozess angepasst (Abbildung 89).

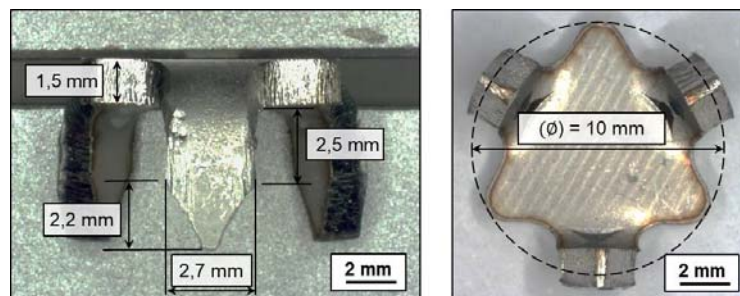


Abbildung 89: Blechelement für die Durchdringung und Schweißung

Dies geschah in enger Abstimmung mit der Firma Stüken. Die Entwicklung zur endgültigen Elementgeometrie, welche hinsichtlich Durchdringung und Schweißung erfolgreich getestet wurde, ist in Abbildung 88 rechts dargestellt. Dabei wird die Kantenverrundung durch einen Prägeprozess erreicht.

Gegenhalteroptimierung für die verbesserte Durchdringung

Eine wesentliche Herausforderung des Durchdringungsprozesses besteht in der Gewährleistung des sauberen Wiederaustritts der Verbindungselementspitzen aus der Probenunterseite am Ende des Durchdringungsprozesses. Zur Sicherstellung eines guten Schweißkontaktes für den folgenden Prozessschritt müssen die ausgetretenen Pin-Spitzen möglichst von Kunststoff und Fasern freigelegt sein. Dafür ist ein spezieller Gegenhalter erforderlich, der ebenfalls im Projekt entwickelt wurde. Dieser muss sowohl den aufgeschmolzenen FVK abstützen, als auch die daraus austretenden Elementspitzen aufnehmen und diese von Kunststoff und Fasern freilegen können. Dazu wurden zunächst Untersuchungen mit gebohrten Löchern durchgeführt. Die durchdrungenen Proben weisen dabei eine auffällige Häufung von Faserbrüchchen an der Austrittsseite auf (Abbildung 90).

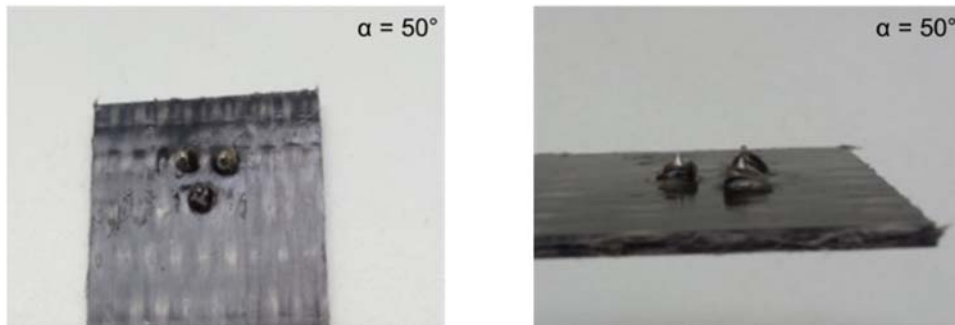


Abbildung 90: Durchdringungsergebnis mit gebohrtem Einsatz

Anschließend wurde eine Gegenhaltervariante entwickelt, bei der eine gefräste Kreistasche mit Temperaturbeständigem Silikon ausgegossen wird. Hiermit durchdrungene Proben weisen eine starke Verformung auf, wobei die Pin-Spitzen nicht im ausreichenden Maße auf der Unterseite austreten (Abbildung 91).

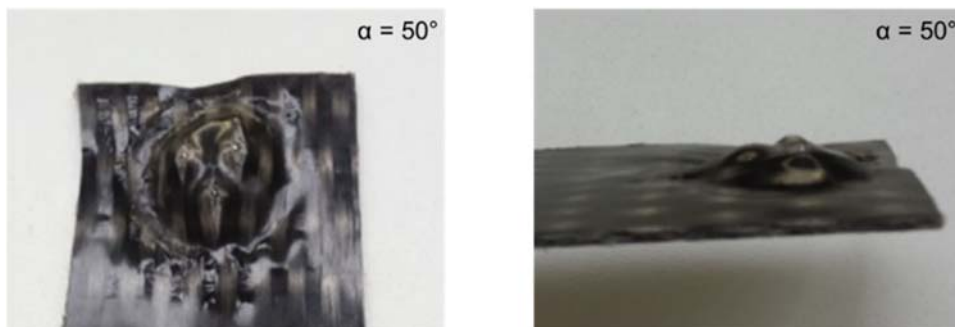


Abbildung 91: Durchdringungsergebnis mit Silikoneinsatz

In einem Kombinationsansatz wurde in der Mitte der Kreistasche vor dem Vergießen mit Silikon ein Stützstift ergänzt, der eine überkritische Verformung des FVKs verhindert (Abbildung 92).

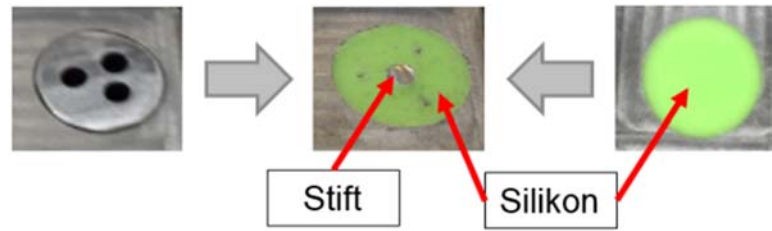


Abbildung 92: Gegenhalteroptimierung, links: Gebohrter Gegenhalter, rechts: Silikongegenhalter; Mitte: optimierter Gegenhalter (Kombinationsansatz)

Dies führt zu den gewünschten Durchdringungsergebnissen (Abbildung 93).



Abbildung 93: Durchdringungsergebnis mit Kombinationseinsatz (Silikoneinsatz mit Stift in der Mitte)

Ermittlung der Schweißbereiche

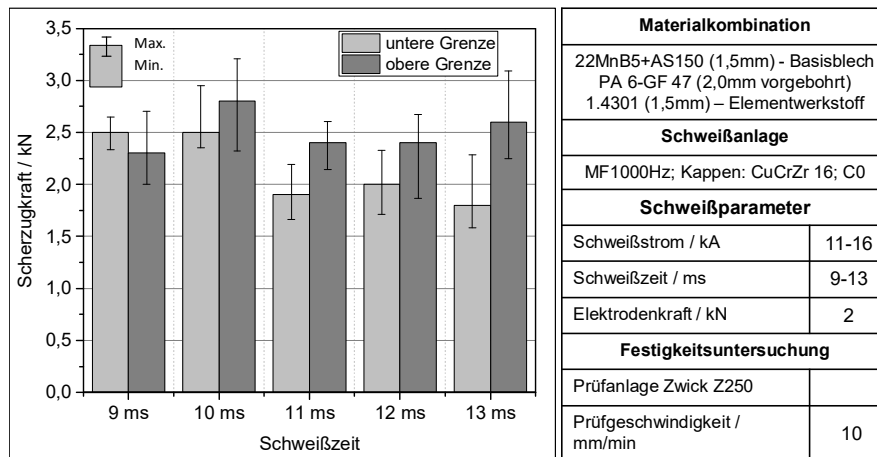


Abbildung 94: Scherzugkräfte der Schweißbereichsgrenzen ohne Klebstoff mit optimiertem Verbindungselement

In Arbeitspaket 3 wurden die Schweißbereiche mit der Kompromissgeometrie für den nicht rostenden Stahl 1.4301 (Werkstoffauswahl in Abstimmung mit PbA) in Analogie zu AP 2 ermittelt. Um die Festigkeit der schweißtechnisch hergestellten Verbindungen zu bestimmen,

wurden Scherzugversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 14273 ohne Klebstoff an allen Schweißbereichsgrenzendurchgeführt. Die jeweiligen ermittelten Scherzugkräfte sind in Abbildung 94 veranschaulicht. Die durchschnittliche Scherzugkraft aller 50 hier betrachteten Untersuchungen ohne Klebstoff beträgt ca. 2,3 kN (+0,9 kN, -0,6 kN). Alle Proben versagen in der Fügezone (Anbindungslinie) in Form eines Scherbruchs. Diese Versagensart ist auf die in bezug auf die Schweißseignung ungünstige Materialkombination 22MnB5+AS150 (Basisblech) und 1.4301 (Elementwerkstoff) zurückzuführen.

5.3.2 AP 3.2 Charakterisierung der Verbindungstechnologie hinsichtlich unterschiedlicher Werkstoffkombinationen

Schweißseignung der ausgewählten Werkstoffe

In diesem Arbeitspaket wurden unterschiedliche Elementwerkstoffe hinsichtlich ihrer Schweißbarkeit untersucht. Die Untersuchungen wurden mit dem industriell gefertigten Blechverbindungsselement (Abbildung 89) durchgeführt, das sowohl für die Durchdringung, als auch für die Schweißung geeignet ist. Die für die Untersuchung verwendeten Werkstoffe sind in Tabelle 12 dargestellt. Hier kamen ein nichtrostender Stahl 1.4301 sowie ein mikrolegierter Stahl ZE800 zum Einsatz.

Tabelle 12: Verwendete Werkstoffe in Arbeitspaket 3

No	Grundwerkstoff	Blechdicke, mm	Elementwerkstoff	Elementdicke, mm	Klebstoff
Ziel → Untersuchung der werkstoffliche Einflüsse auf den Schweißprozess und Fügeverbindung					
1	22MnB5+AS150	1,5	1.4301	1,5	Ja
2	22MnB5+AS150	1,5	ZE800	1,5	Ja
3	HX340LAD+Z	1,5	1.4301	1,5	-
4	HX340LAD+Z	1,5	ZE800	1,5	-
Ziel → Ermittlung der Verfahrensgrenzen hinsichtlich der Schweißtechnik					
5	22MnB5+AS150	2,5	ZE800	1,5	-
6	22MnB5+AS150	1,2	ZE800	1,5	-
7	DC06+ZE	0,7	ZE800	1,5	-
8	TL1550+Z100	2,0	ZE800	1,5	-

Der signifikante Unterschied der verwendeten Elementwerkstoffe liegt in ihren spezifischen elektrischen Widerständen und Wärmeleitfähigkeiten (Tabelle 13). Das hat zur Folge, dass verschiedene Materialkombinationen bei konstanter Schweißstromstärke ein unterschiedliches Erwärmungsverhalten aufweisen.

Tabelle 13: Elektrische Eigenschaften der untersuchten Stähle

Stahl	Wärmeausdehnung [$10^{-6} K^{-1}$]	Spez. elektr. Widerstand [$\Omega mm^2/m$]	Wärmeleitfähigkeit [W/mk]
	20-400 °C	Bei Raumtemperatur	
Grundwerkstoffe			
22MnB5+AS150	12,0*	0,25**	40-60*
HX340LAD	12,0*	0,1*	40-60*

Elementwerkstoffe			
1.4031	17,5*	0,73	15
ZE800	12,0	0,1*	40-60*

Untersuchung des Einschlusses von Elementwerkstoff auf Fügeverbindung

Die Geometrie des Elementfußes einen wesentlichen Einfluss auf die Wärmegenerierung im Schweißbereich und damit auf den gesamten Schweißprozess. Das relativ hohe Aspektverhältnis (Verhältnis Pin-Höhe zu Fußbreite) bewirkt eine höhere Stromdichte als im Basisblech, wodurch es zu einer stärkeren Widerstandserwärmung, besonders im Bereich der der Fußinnenseiten, kommt. Im Vergleich zum Grundwerkstoff findet hier keine Abkühlung der Elektrode durch benachbarte Bereiche statt. In Abbildung 95 (links) ist eine schematische Darstellung der Wärmeverteilung im Schweißprozess dargestellt. Hierbei ist eine in den Elementfuß verschobene Wirkwärmequelle zu erkennen, wodurch der Grundwerkstoff deutlich weniger beeinflusst wird.

Neben der Elementform kommt der zu schweißenden Werkstoffpaarung eine entscheidende Rolle zu. In Abbildung 95 sind metallographische Schliffe der Materialkombination 22MnB5+AS150/1.4301 (mittig) und 22MnB5+AS150/ZE800 (rechts) dargestellt. Hier ist eine unterschiedliche Eindringtiefe im Grundwerkstoff zu erkennen. Dies weist darauf hin, dass beim Schweißen der Materialkombination 22MnB5+AS150 mit ZE800 eine höhere Temperatur am Übergang Element/Blech erreicht wird. Die lokal aufgeschmolzenen Bereiche des Grundwerkstoffes werden aus der Fügezone herausgepresst, so dass das Element in den Grundwerkstoff eindringt. Bei der Materialkombination 22MnB5+AS150 mit 1.4301 ist keine Eindringung in den Grundwerkstoff zu erkennen. Der Verbindungsfuß wird dabei stark erwärmt und ebenfalls an das Blech gepresst. Das herausgepresste Material neigt hier eher zu Spritzerbildung als zum Anpressen, wie es beim Werkstoff ZE800 beobachtet werden konnte. Die Wärmeeinflussgröße ist in beiden Fällen annähernd gleich.

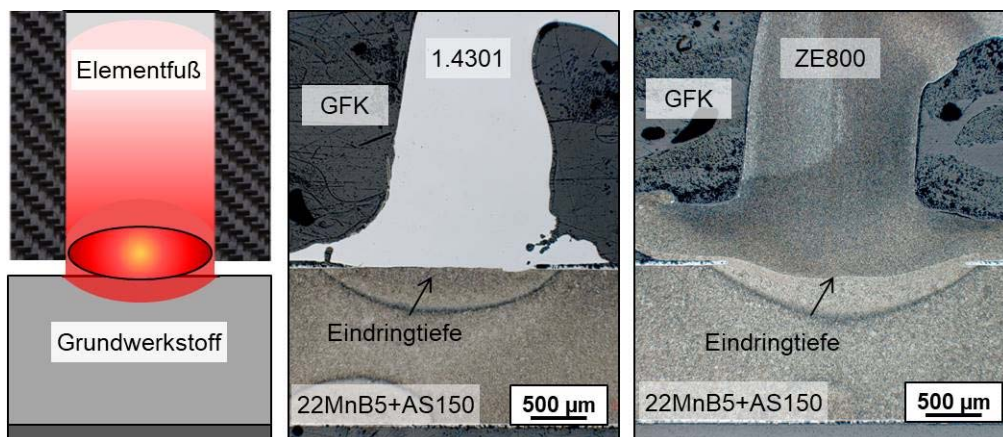


Abbildung 95: Schematische Darstellung der Wärmeverteilung in der Fügezone – links; Schliff der Materialkombination 22MnB5+AS105 / 1.4031 – mittig und 22MnB5+AS150 / ZE800 - rechts

Bei der Materialkombination 22MnB5+AS150/1.4301 findet aufgrund des höheren elektrischen Widerstandes des Elementwerkstoffes eine signifikante Verschiebung der Wärmegenerierung in den Elementfuß statt. Mit ZE800 als Elementwerkstoff lässt sich jedoch ausreichend Wärme in der Fügezone generieren, um die Eindringung des Elements in das Grundblech zu ermöglichen. Im weiteren Verlauf wurden die Schweißparameter im Schweißprozess

gemessen und ausgewertet. Anhand der gemessenen Schweißstrom- und Schweißspannungverläufe wurde der gesamte dynamische Widerstand beim Schweißen dieser Materialkombinationen ermittelt. Die Widerstandsverläufe sind in Abbildung 96 dargestellt. Zu Beginn des Schweißprozesses ist der Widerstand relativ groß und fällt nach 1 ms rapide ab. Im Widerstandsverlauf ist ein Unterschied von Faktor 2 zu erkennen. Der maximale Wert beträgt nach dem Startabfall bei der hier vorliegenden Kombination mit 1.4301 ca. 900 $\mu\Omega$ sowie 500 $\mu\Omega$ bei ZE 800. Zum Ende des Schweißprozesses sinken die Widerstände weiter. Eine detaillierte metallographische Untersuchung dieser Materialkombinationen lässt eine Linie bei den Verbindungen mit dem Werkstoff 1.4301 und dem Element im Bereich zwischen dem Element und Grundwerkstoff erkennen. Diese Linie verläuft über die gesamte Fügezone und wird durch den Schweißprozess bei dieser Materialkombination nicht aufgebrochen. Die Dicke der verbleibenden Schicht beträgt ca. 5 μm . Wie bereits beschrieben, findet ein sichtbares Einsinken des Elementkörpers in den Grundwerkstoff statt.

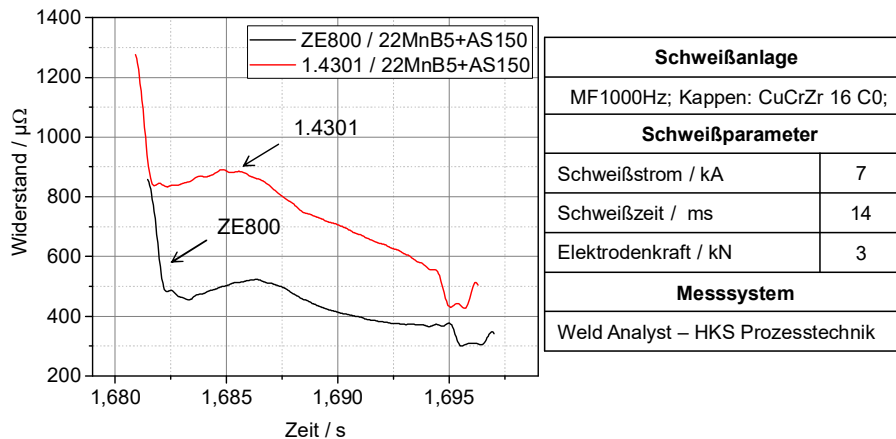


Abbildung 96: Gemessener dynamischer elektrischer Widerstand beim Schweißen mit Blechelementen aus 1.4301 und ZE800 mit 22MnB5+AS150

Für die Untersuchung der beobachteten Trennschicht in der Materialkombination 22MnB5+AS150/1.4301 wurde eine EDX-Analyse der Übergangszone mittels REM-Untersuchungen an beiden Materialkombinationen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 97 dargestellt.

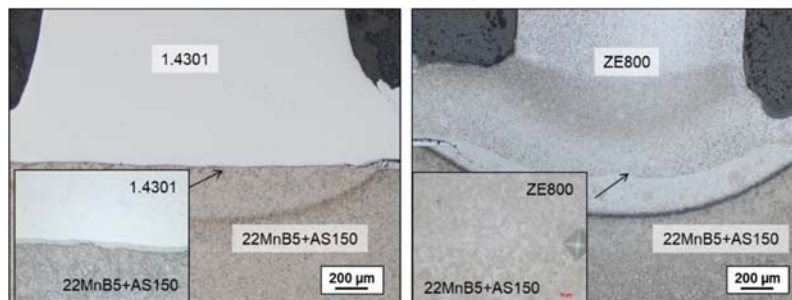


Abbildung 97: Schliffbilder der Materialkombinationen von 22MnB5+AS150 mit Blechelementen aus 1.4301 und ZE800

Hier sind das Grundmaterial des 22MnB5 (unten), des Elementfußes (oben) und die untersuchte Trennlinie (mittig) zu sehen. In jedem Bereich wurde zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung jeweils eine EDX-Analyse durchgeführt. Die Analyse im Elementwerkstoff (oben) mit ca. 18%Cr und 8% Ni und im Grundwerkstoff (unten) mit ca. 97.6% Fe und 1.5%Mn zeigen eine annähernd gleiche chemische Zusammensetzung dieser Werkstoffe. Die Analyse der Zwischenschicht zeige ca. 7% Al, 2,3% Si und 89% Fe, was der Diffusionszone der Al-Si Schicht zuzuordnen ist. Die restliche, teilweise spröde intermetallische Fe-Al-Si Phase, wurden im Schweißprozess zerstört.

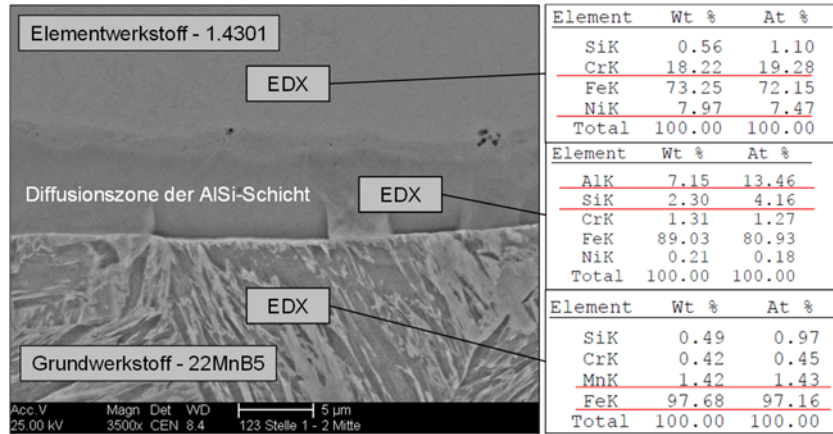


Abbildung 98: REM-Aufnahme der Überganszone Element-Grundwerkstoff mit der EDX-Analyse bei der Kombination 22MnB5+AS150 und 1.4301

Für den Elementwerkstoff ZE800 wurde die gleiche EDX-Analyse durchgeführt (Abbildung 99 links). Hier wurde zur Referenzierung und Wiederauffindbarkeit des Messpunktes im REM im Übergang zwischen Element und Grundwerkstoff in ein Härteabdruck gesetzt. Ein Übergang vom Elementfuß im Grundwerkstoff ist nicht zu erkennen. Es wurde keine restliche Schicht sowie dafürsprechende Elemente nachgewiesen. Diese Schicht wurde im Schweißprozess vollständig zerstört. Die gleichen Untersuchungen wurden für beide Elementwerkstoffe auch mit dem Grundwerkstoff HX340LAD+Z durchgeführt.

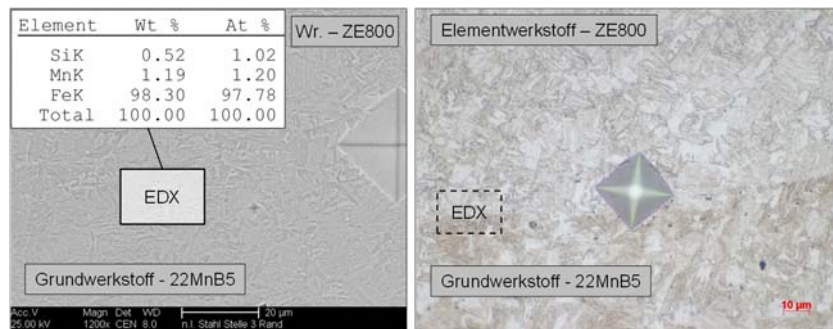


Abbildung 99: REM-Aufnahme der Überganszone Element-Grundwerkstoff mit der EDX-Analyse bei der Kombination 22MnB5+AS150 und ZE800

In Abbildung 100 sind die Ergebnisse der metallographischen Untersuchung dieser Materialkombinationen dargestellt. Hierbei ist eine ähnliche Tendenz wie bei der Materialkombination

mit 22MnB5+AS150 zu erkennen. Der Elementfuß aus 1.4301 wird an das Grundmaterial angepresst, ohne in das Grundmaterial einzudringen. Im Gegensatz dringt das Element aus ZE800 (Abbildung 100 rechts) in die das Material ein. Darüber hinaus ist eine größere Anbin-
dungsfläche mit dem Element aus ZE800 zu erkennen.

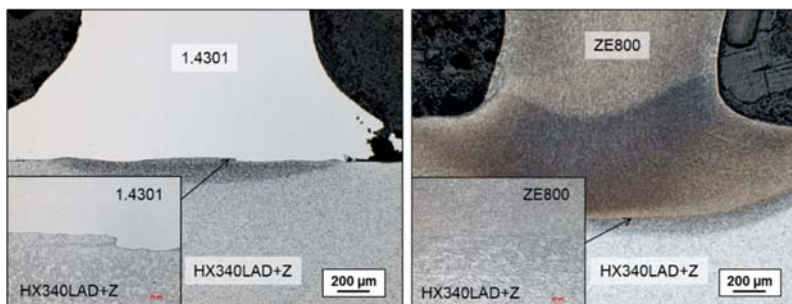


Abbildung 100: Schlichtbilder der Materialkombinationen von HX340LAD+Z mit Blechelementen aus 1.4301 und ZE800

Die durchgeführten Untersuchungen mit je zwei Grund- und Elementwerkstoffen zeigen, dass der Elementwerkstoff aus fügetechnischer Sicht eine signifikante Rolle einnimmt. Aufgrund der unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeiten lässt sich der nicht nichtrostende Stahl 1.4301 gegenüber dem mikrolegierten Stahl ZE800 schlechter schweißen. Hier findet der Wärmeübergang im Elementfuß statt, so dass in der Fügezone keine ausreichende Wärmeenergie zur Verfügung steht. Die Auswirkungen auf die Verbindungsfestigkeit werden im Weiteren betrachtet.

Härtemessung

Aufgrund der sehr kurzen Schweißzeiten und der damit einhergehenden hohen Abkühlraten besteht die Gefahr einer lokalen Aufhärtung sowohl im Element als auch im Grundwerkstoff. Diese können sich bei schlagartigen Beanspruchungen potenziell negativ auswirken und zu einem spröden Versagen der Schweißverbindung führen. Zur Ermittlung der Härtezonen wurden für alle Werkstoffpaarungen Härtemessungen mittels eines Mappings durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 101 dargestellt.

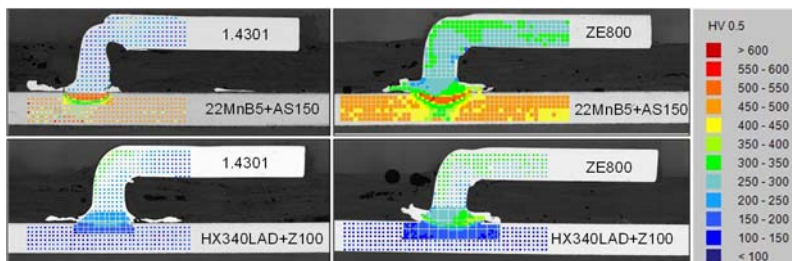


Abbildung 101: Härtemapping an geschweißten Verbindungen mit Blechelementen aus 1.4301 und ZE800 mit 22MnB5+AS150 und HX340LAD+Z100

Bei allen Verbindungen sind generell keine Aufhärtungen erkennbar. Bei Verbindungen mit dem Werkstoff 22MnB5+AS150 sind im Grundwerkstoff zwei typische Bereiche zu erkennen. Der erste Bereich liegt direkt unter dem Elementfuß und hat einen Härtewert von 500-550 HV, welcher ca. 50 HV höher als im Grundwerkstoff. Direkt um diese Härtezone liegt der zweite Bereich mit Härteabfall, der sogenannte Härtesack mit 300-350 HV. Diese Härteverteilung

entspricht in ihrer Struktur der üblichen Wärmeinflusszone, die beim Widerstandspunktschweißen von 22MnB5 entsteht. Darüber hinaus lässt sich anhand der Größe der Wärmeinflusszone nachweisen, dass beim Schweißen mit einem 1.4301-Element ein geringer Wärmeeintrag im Grundwerkstoff im Vergleich zum ZE800 stattfindet.

Mechanische Eigenschaften der erzeugten Schweißverbindungen

Wie bereits in der metallographischen Untersuchung festgestellt, hat der Elementwerkstoff einen Einfluss auf die Ausbildung der Schweißverbindung. Die Ergebnisse der hier durchgeführten Scherzuguntersuchungen an den untersuchten Materialkombinationen können diese Einflüsse weiter bestätigen.

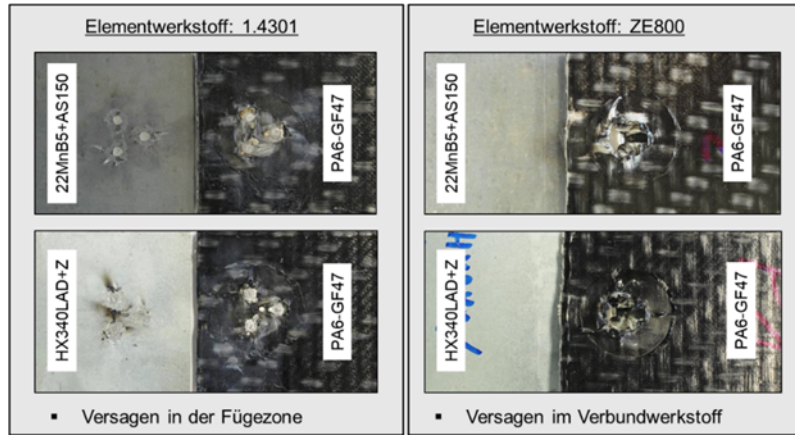


Abbildung 102: Probenversagen nach dem Scherzugversuch

Auf dem dargestellten Diagramm (Abbildung 102) ist zu erkennen, dass bei allen Verbindungen, die mit einem Blechverbindungselement aus 1.4301 geschweißt wurden, der Bruch ausschließlich in der Fügezone auftritt. Die Schweißverbindungen versagt bei ca. 3,5 kN.

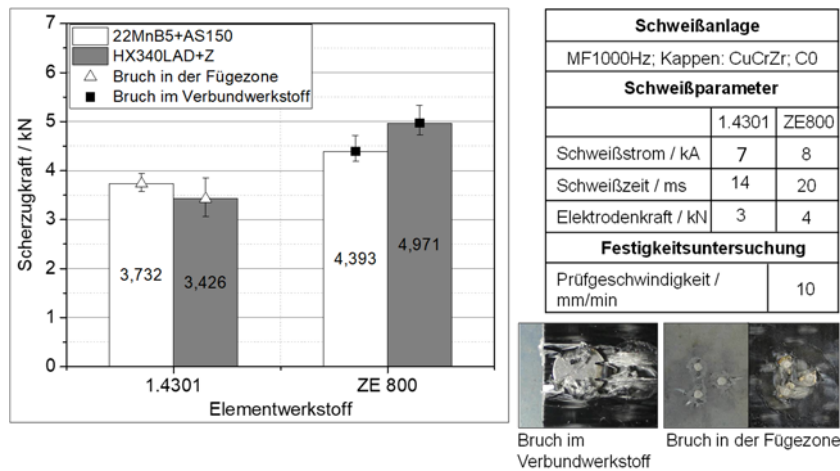


Abbildung 103: Einfluss vom Elementwerkstoff auf die Festigkeit der Fügverbindung

Im Gegensatz dazu versagen die Proben mit dem Element aus ZE800 im Verbundwerkstoff, sodass das Element verschweißt bleibt und die stoffschlüssige Fügeverbindung nicht zerstört wird. Dieses Bruchverhalten weist auf eine gute Verbindungsfestigkeit und erfüllt somit die gestellten Anforderungen an die Fügechnik. Die dabei erreichte Scherzugkraft liegt im Bereich von ca. 4,5 kN und wird durch die Festigkeit des Verbundwerkstoffs beschränkt. Die Proben und Versagensarten der Scherzuguntersuchung sind in Abbildung 103 dargestellt. Die maximale Scherzugkraft der Verbindungen mit einem Element aus ZE800 ist hauptsächlich durch die Festigkeit bzw. die maximale Lochleibungskraft im Verbundwerkstoff begrenzt. Diese ist abhängig von Fußdurchmesser, -anzahl, -anordnung sowie den Fasern im Verbundwerkstoff. Anhand optischer Analysen der Bruchflächen lassen sich ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen beiden Elementwerkstoffen erkennen. Abbildung 104 (links) stellt die gesamte Aufnahme nach dem Versagen und die detaillierte Aufnahme einer Verbindungszone der Materialkombination 22MnB5+AS150 mit 1.4301 dar. Ein Sprödbbruch ist direkt in der Anbindungszone zwischen Element und Grundwerkstoff zu erkennen. Es sind keine Kristalline an der Trennstelle zu erkennen, so dass das gesamte Bruchbild der Haftschiweißung zuzuordnen ist.

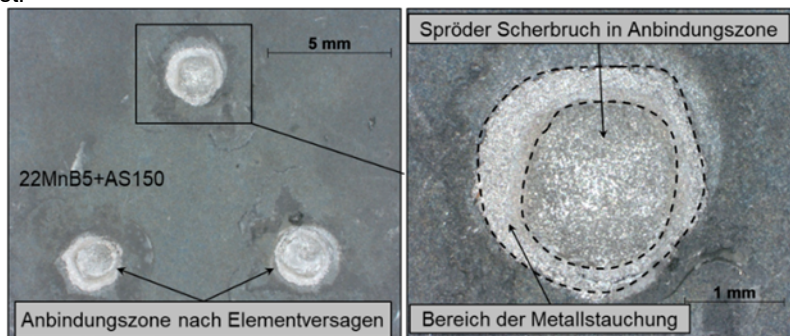


Abbildung 104: Bruchflächen nach der Scherzuguntersuchung der Materialkombination 22MnB5+AS150 mit dem Blechelement aus 1.4301

Neben der Bruchstelle ist ein weiterer Bereich zu erkennen. Es handelt sich bei dieser Stelle um das Anpressen des Materials während der Fußumformung, welche folglich keinen Beitrag zur Kraftübertragung liefert. Darüber hinaus ist in den Schlifffbildern eine deutlich bessere Anbindung des niedriglegierten Stahl ZE 800 als bei 1.4301 zu erkennen. Aufgrund seiner beschränkten Schweißbarkeit ist ein Einsatz des nichtrostenden Stahls 1.4301 als Elementwerkstoff als nicht zielführend anzusehen.

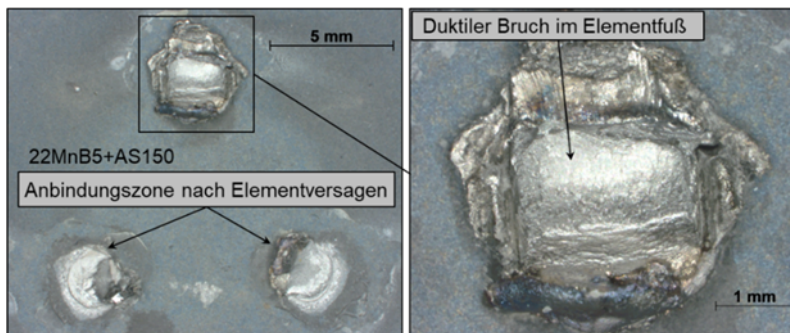


Abbildung 105: Bruchflächen nach der Scherzuguntersuchung der Materialkombination 22MnB5+AS150 mit dem Blechelement aus 1.4301

5.3.3 AP 3.3 - Vergleich zum Referenzprozess Blindnieten

Ein wesentlicher Unterschied des neuen Verfahrens zu gängigen Verfahren, die in Abschnitt 2.4 vorgestellt wurden, besteht in der Lochformung, die durch eine schädigungsarme Durchdringung erreicht wird. Dadurch bleiben die lasttragenden Fasern aus dem Lochbereich intakt und werden an den Lochrand geschoben. Zur Beurteilung der neuen Verbindungstechnologie wurde die Lochleibungsfestigkeit von Pin-geformten Durchgangslöchern im Vergleich mit konventionellen Bohrungen untersucht. Dazu wurden FVK-Proben aus den Durchdringungsversuchen in Anlehnung an DIN 65562 auf Lochleibung geprüft (Abbildung 106).

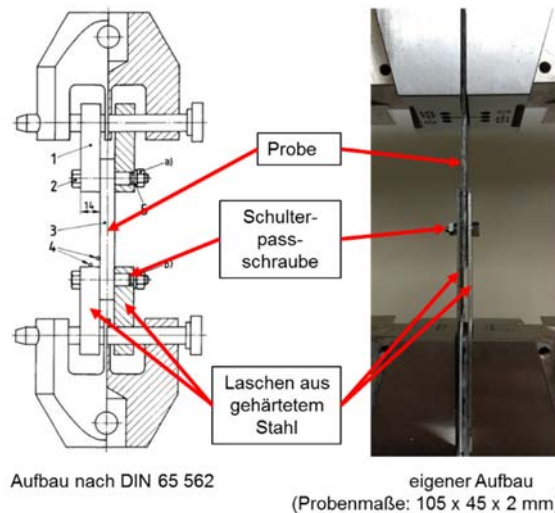


Abbildung 106: Lochleibungsprüfung in Anlehnung an DIN 65562

Dabei zeigt sich, dass die Lochformung gegenüber der konventionellen Bohrung zu einer Festigkeitssteigerung führt, wenn ein ausreichender Anteil der Fasern in Querrichtung zur Belastung angeordnet ist (vgl. Abbildung 107).

Es ist zweifelsfrei erkennbar, dass eine positive Korrelation zwischen dem Querfaseranteil und dem Festigkeitsgewinn durch Einsatz des Lochformungsprozesses vorliegt. Im bestmöglichen Fall, bei 80% Querfaseranteil, sind Lochleibungsfestigkeitssteigerungen von ca. 28% gegenüber lochgebohrten Proben möglich. Die Begründung für den Zusammenhang zwischen den beiden im Diagramm betrachteten Größen wird in Abbildung 108 deutlich. Fasern, die bei der Lochbohrung in 0°-Lage und somit in Zugrichtung liegen, tragen trotz des unterbrochenen Kraftflusses zu Beginn die Belastung noch mit, während die Fasern nahe des geformten Loches zunächst keine Kraft aufnehmen können und nur die vergleichsweise nachgiebige Matrix die Zugbelastung trägt. Entsprechend anders sieht es jedoch bei der 90°-Lage quer zur Zugrichtung aus, da die Fasern bei der Lochformung um das Loch gespannt sind und direkt zu Beginn die Zugkraft verstärkt aufnehmen [Sei13]. Je höher der Anteil an Fasern in 90°-Lage ist, desto stärker ist dieser Effekt, was mit den obigen Ergebnissen empirisch bestätigt wird.

In der Praxis ist davon auszugehen, dass geformte Durchgangslöcher in erster Linie aufgrund des geringeren prozessualen Aufwands bei der Einbringung Anwendung finden werden, da auf eine maschinelle Locheinbringung und damit verbundene periphere Einrichtungen und Kosten verzichtet werden kann. Die nachgewiesene gesteigerte Lochleibungsfestigkeit bei hohen Querfaseranteilen widerspricht einer lastpfadgerechten Allokation von FVK bei der Bauteilauslegung und ist daher von niedriger Relevanz.

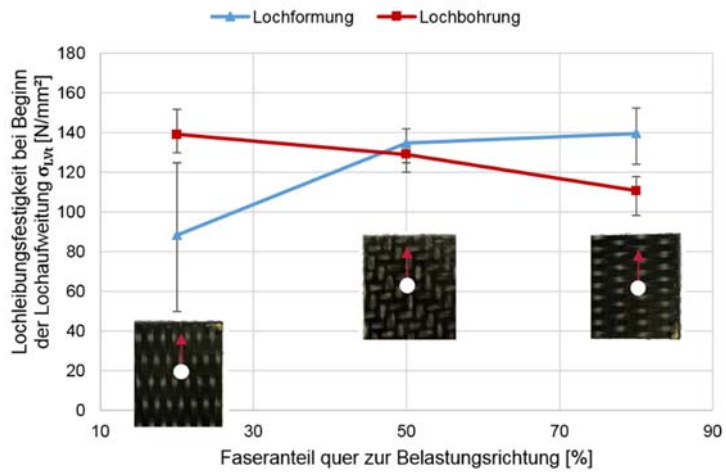


Abbildung 107: Einfluss der Faserorientierung auf die Lochleibungsfestigkeit bei Beginn der Lochaufweitung σ_{LYt} bei geformten und gebohrten Proben (in Anlehnung an DIN 65562)

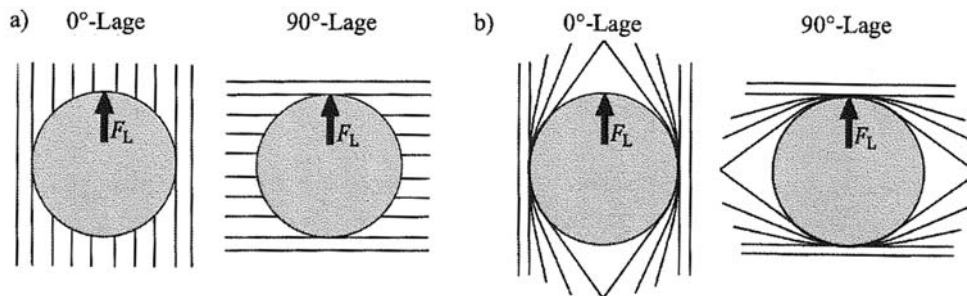


Abbildung 108: Darstellung der Faseranordnung im lochnahen Bereich bei a) Lochbohrung und b) Lochformung in Anlehnung an [Sei13]

5.4 Arbeitspaket 4 | Entwicklung und Bewertung von Konzepten für den automatisierten Einsatz

Im abschließenden vierten Arbeitspaket wurden Konzeptvarianten für die vorwettbewerbliche Technologie „Hybrides Blechverbindungselement“ entwickelt und bewertet. Dies erlaubt eine erste Einschätzung für einen späteren industriellen Einsatz, der im Anschluss zu diesem Forschungsvorhaben zu entwickeln wäre. Hierbei wird auf die Elementherstellung, die Applizierung und die schweißtechnische Anbindung eingegangen.

5.4.1 AP 4.1 Erstellung und Bewertung von Technologien zur automatisierten Elementapplikation und schweißtechnische Anbindung

Anhand der VDI-Richtlinie wurden Varianten für Automatisierungslösungen entwickelt und bewertet. Dazu wurde zunächst ein Funktionsflussbild des Erwärmungs- und Durchdringungsprozess erstellt (Abbildung 109)

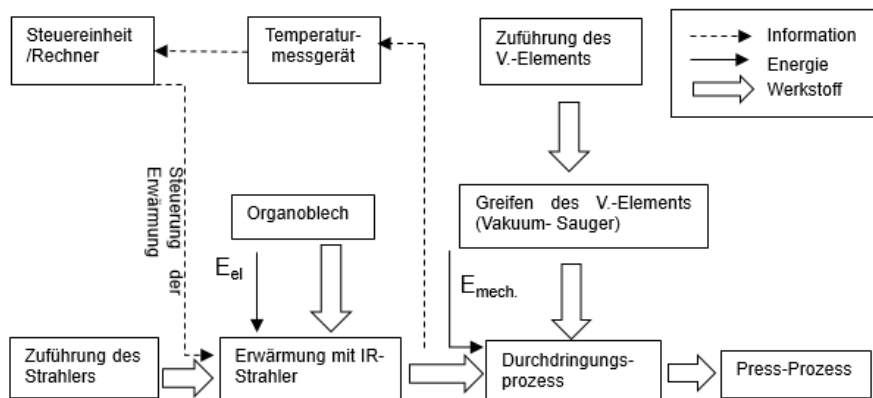



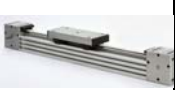


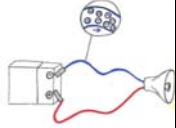
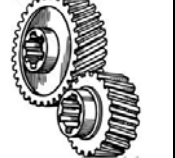



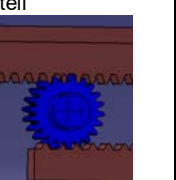
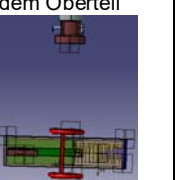
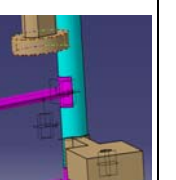

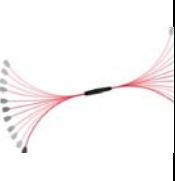
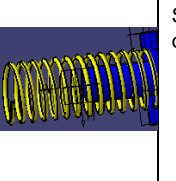
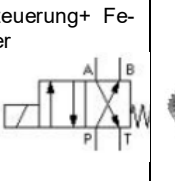



Abbildung 109: Funktionsflüsse der Durchdringungseinheit

Für relevante Teilfunktionen wurden mittels eines morphologischem Kastens Teillösungen entwickelt (Tabelle 14).

Tabelle 14: Morphologischer Kasten für die Automatisierung der Durchdringung

Teilfunktionen	Teillösungen				
	1	2	3	4	5
1. Zuführung der Energiequelle	Rotation 	Translation 			

2. Leistungs-erzeugung	Rotationsmotor 	Linearaktuator 	Hydraulik 	Pneumatik 	
3. Betätigung der Erwärmsanlage	Elektrische Betätigung 	Zahnradsystem 	Hydraulische Betätigung 	Pneumatische Betätigung 	Elastischer Mechanik 
4. Bewegung des Gegenhalters	Linearbewegung gegen den Oberteil 	Linearbewegung senkrecht zu dem Oberteil 	Rotationsbewegung 		
5. Steuerung des Gegenhalters	Zahnrad + Zahnstange 	Elastischer Mechanik 	Elektromagnet + Feder 	Hydraulische/ Pneumatische Steuerung + Feder 	Zahnradsystem 

Aus diesem Morphologischen Kasten wurden durch Kombination der gefundenen Teillösungen Automatisierungskonzepte entwickelt die im Folgenden vorgestellt werden:

Konzept 1:

Beim ersten Konzept besteht die Konstruktion hauptsächlich aus einem angefertigten mit Gradzahnstange ausgerüsteten Durchdringungsoberteil, einem Zahnradsatz aus Kegelrad mit Geradzahnrad, einem Kegelrad, einer Welle mit Kegelrad, einer Radscheibe, einer Welle mit Radscheibe, einer Erwärmsanlage, einem auf der Welle verschraubten Gegenhalter, einem Gehäuse und einem Schrittmotor. Durch den Zahnradsatz kann der Schrittmotor die Durchdringungs- und Erwärmsanlage in vertikale und horizontale Richtung antreiben. Der Gegenhalter und die Erwärmsanlage werden um die Welle angeordnet (Abbildung 110).

Durch die intermittierende Struktur werden die beide Bauteile um 60° gedreht. Die Funktionsweise ist ähnlich wie die Zeigerbewegung in der Uhr (Malteserkreuz). Wenn das Durchdringungsoberteil nach unten angetrieben wird, dreht sich der Gegenhalter nach innen. Nach der Drehung um 60° lässt der Gegenhalter sich in der genauen Position halten. Anschließend

beginnt der Einpressprozess. Danach wird das Oberteil nach oben angetrieben. Die Erwärmungsanlage wird zurückgedreht und das Erwärmen gestartet.

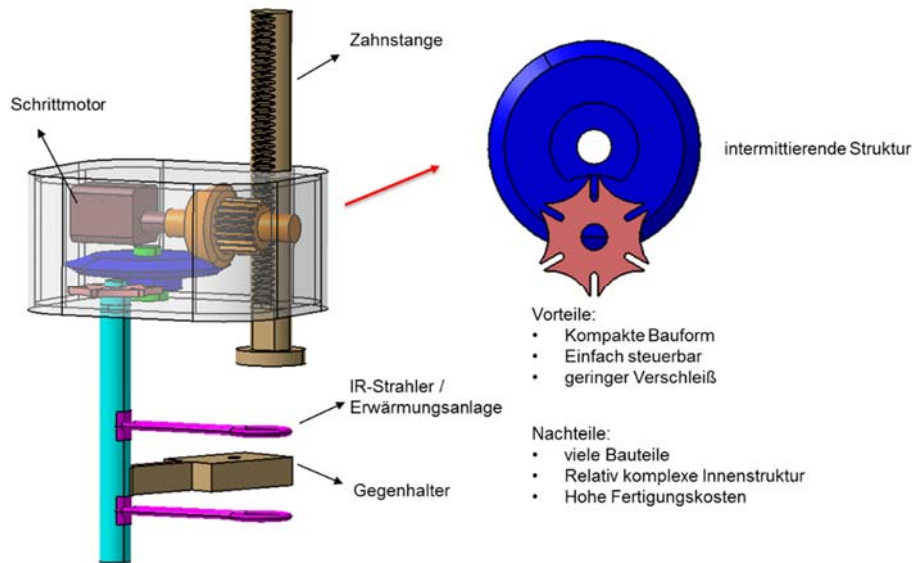


Abbildung 110: Automatisierungskonzept 1

Konzept 2:

Beim zweiten Konzept besteht die Konstruktion aus einem Linearaktuator mit einem fixierten Presshalter darauf, einer Laufschiene, einem Elektromagnet, einer Druckfeder, einem Schieber, einem Gegenteil und einer Erwärmungsanlage. Der Schieber kann in der Laufschiene gleiten. Darauf werden der Gegenhalter und die Erwärmungsanlage fixiert. Die Linearaktuator kann direkt eine Translationsbewegung durchführen. Nach der Erwärmung wird der Presshalter durch den Linearaktuator nach unten angetrieben. Gleichzeitig lässt sich der Elektromagnet bestromen. Im Anschluss wird der Schieber nach rechts angezogen. Anschließend wird der Gegenhalter an der richtigen Position gehalten damit der Durchdringungsprozess durchgeführt werden kann. In diesem Zustand ist die Druckfeder einzuspannen. Nach der Durchdringung fließt kein Strom in dem Elektromagnet. Die eingespannte Druckfeder drückt den Schieber nach links. Der neue Erwärmungsprozess beginnt (Abbildung 111).

Konzept 3:

Die Hauptbestandteile des dritten Konzepts sind ein Linearmotor, ein besonders gefertigter Presshalter mit einer Zahnstange und einer Umlenkschräge, ein Zahnrad, ein Gegenhalter mit einer Zahnstange, ein Gehäuse, eine elastische Verbindungsachse aus Gummi und eine Erwärmungsanlage. Die Erwärmungsanlage lässt sich durch die elastische Verbindungsachse auf dem grünen Rahmen fixieren. Das Zahnrad greift mit zwei Zahnstangen ineinander. Der Linearaktuator und der Linearmotor treiben den Presshalter und Gegenhalter in der Mitte hin und zurück (Abbildung 112).

Wenn der Presshalter in die Mitte bewegt wird, verschiebt die Schrägung die Erwärmungsanlage wegen der Elastizität der Verbindungsachse entlang der Hypotenuse nach außen, so dass der Durchdringungsprozess durchgeführt werden kann. Nach der Durchdringung werden beide Halter in die Ursprungsposition gebracht.

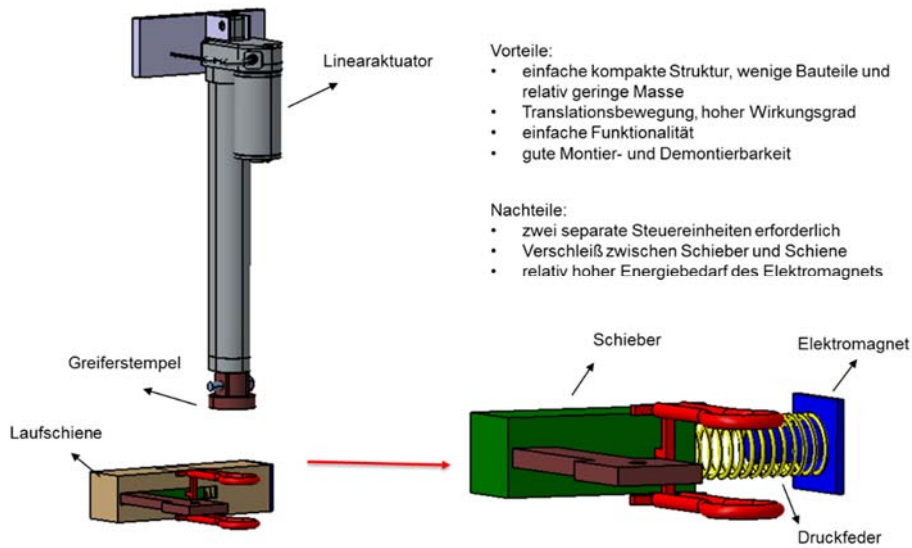


Abbildung 111: Automatisierungskonzept 2

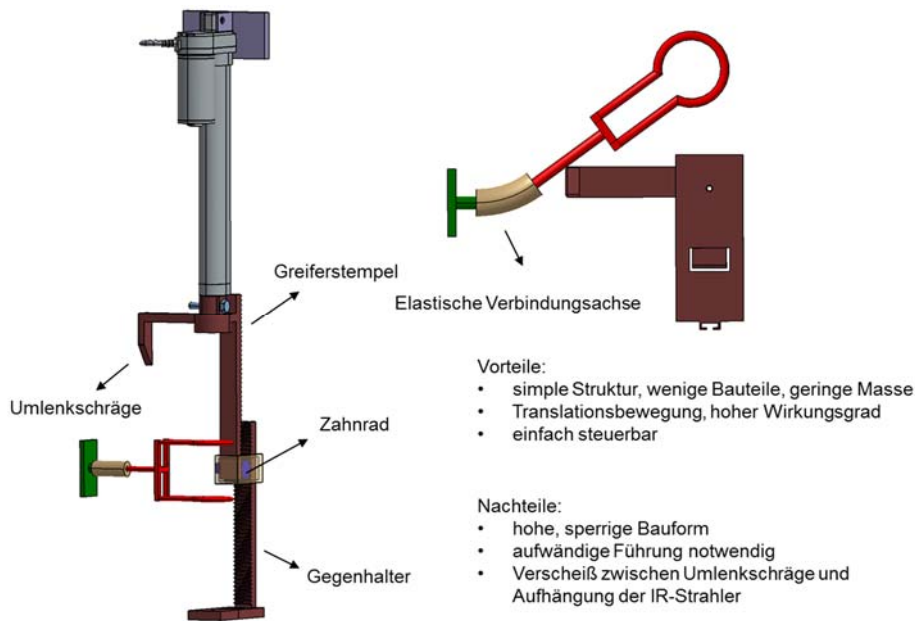


Abbildung 112: Automatisierungskonzept 3

Bewertung der Konzepte

Zur Bewertung der erstellten Automatisierungskonzepte wurden nach VDI-Richtlinie 2225 zunächst Bewertungskriterien festgelegt. Diese wurden sowohl hinsichtlich technischer Eigen-

schaften als auch wirtschaftlicher Kriterien gewichtet. Abschließend wurden die Konzepte anhand dieser Kriterien bewertet und es wurden aus den Gewichtungen Gesamtbewertungen der Konzepte berechnet.

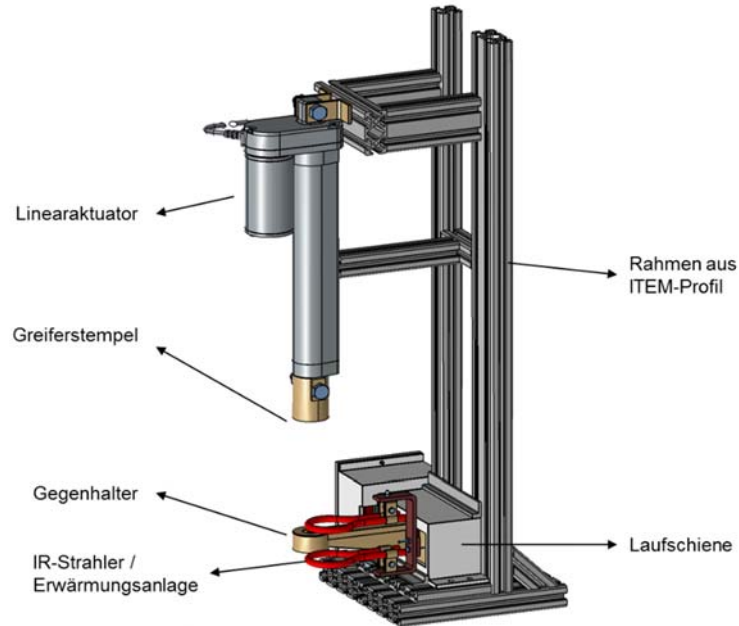


Abbildung 113: Auskonstruktion Konzept 2

Tabelle 15 zeigt die Technische Bewertung der Automatisierungskonzepte. Dabei zeigt Konzept 2 Vorteile gegenüber den beiden anderen Konzepten.

Tabelle 15: Technische Bewertung der Automatisierungskonzepte

Nr.	Technische Kriterium	Gewichtungsfaktoren	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
i		g_i	P_{1i}	P_{2i}	P_{3i}
1	Komplexität	0,265	2	4	3
2	Störanfälligkeit	0,224	4	2	3
3	Bauraum	0,163	2	3	3
4	Kompaktheit	0,163	4	4	2
5	Montage	0,082	2	4	3
6	Gewicht	0,082	1	3	3
7	Effizienz	0,021	2	4	3
Wertigkeit			2,962	3,368	2,837
Rangfolge			2	1	3

In Tabelle 16 ist die wirtschaftliche Bewertung dargestellt. Dabei schneidet ebenfalls Konzept 2 am besten ab.

Tabelle 16: Wirtschaftliche Bewertung der Automatisierungskonzepte

Nr.	Wirtschaftliche Kriterium	Gewichtungsfaktoren	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
i		g_i	P_{1i}	P_{2i}	P_{3i}
1	Fertigungskosten	0,40	3	4	3
2	Verbrauch	0,33	4	3	4
3	Design	0,20	2	4	2
4	Materialkosten	0,07	3	1	3
Wertigkeit			3,00	3,46	3,13
Rangfolge			3	1	2

Aus diesem Grund wurde Konzept 2 zur Auskonstruktion ausgewählt. Dazu wurden die notwendigen Bestandteile dimensioniert. In Abbildung 113 ist eine CAD-Ansicht einer Erwärmungs- und Durchdringungseinheit entsprechend Konzept 2 dargestellt. Dabei ist der Rahmen aus handelsüblichen ITEM-Profilen aufgebaut. Eine Bauweise mit industriell häufig eingesetzten C-Bügeln für die Anbringung an Industrierobotern ist ebenfalls denkbar und einfach umsetzbar.

5.4.2 AP 4.2 Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des neuen Verfahrens

Das angestrebte Entwicklungsziel des Projektes, ein Verbindungselement aus einem Stahl Coil herzustellen, wurde erreicht. Die zudem durch einen einfachen Umformprozess herzustellenden Elemente haben den großen Vorteil, dass die Elementoptimierung und der Prototypenbau sehr einfach sind.

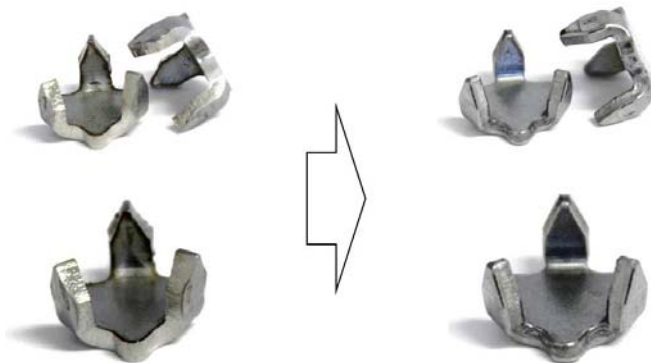


Abbildung 114: Mittels Laser ausgeschnittenes und selbst umgeformtes Blechelement (am IWF Magdeburg)-links, industriell im Stanzprozess gefertigtes Blechelement (Fa. Hubert Stüken)-rechts

Ein Vergleich des Herstellprozesses mit der handelsüblicheren Stanzniete zeigt, dass es bei diesen Nieten pro jeweiliger Nietgeometrie einer separaten Werkzeugauslegung bedarf. Die Auslegung macht den Entwicklungsprozess sehr teuer und unflexibel. Des Weiteren müssen diese Nieten einem Beschichtungsprozess unterzogen werden, was bei den neuartigen Verbindungselementen nicht erforderlich ist. Die Art der Beschichtung kann durch die entsprechende Blechenauswahl erfolgen. Die Faserschädigung fällt im Vergleich zum Nieten ebenfalls

deutlich niedriger aus. Auf diese Weise können Kräfte lastpfadgerecht verteilt werden. Gegebenenfalls lässt sich auf diese Weise das Material bzw. mindestens die Materialdicke reduzieren, was ebenfalls zu einer Kostenreduzierung führt. Wie eingangs beschrieben, bietet sich die Lasertechnik als optimales Schneidwerkzeug zur Ausarbeitung der Grundgeometrie aus dem Stahl Coil an, Stanzformprozesse sind aber ebenfalls möglich. Ein Vergleich zwischen eigens und industriell hergestellten Blechelementen ist in Abbildung 114 dargestellt. Eine konkrete Abschätzung der Herstellkosten kann für das entwickelte Blechelement nicht getroffen werden. Zur schweißtechnischen Weiterverarbeitung, können sowohl konventionelle Schweißanlagen mit Mittelfrequenztechnik als auch Kondensatorschweißanlagen eingesetzt werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass für eine hohe Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit der Schweißergebnisse ein schnelles Elektrodennachsetzverhalten erforderlich ist. Vergleicht man die Schweißzeiten mit herkömmlichen Schweißnieten, ist eine deutliche Reduzierung der Schweißzeit erkennbar. Ein weiterer Vorteil des neuentwickelten Blechelementes ist die Unabhängigkeit vom Werkstoff, solange Stahl verwendet wird, und der Blechdicke des Basisbleches. Die Elementgeometrie bedarf nur der Auslegung in Abhängigkeit des Deckbleches.

6 Anwendung an einem bauteilähnlichen Prüfkörper

Im Rahmen des Projektes wurde ein Demonstrator gefertigt (Abbildung 115). Anhand dieses Demonstrators wurde gezeigt, dass die entwickelte Fertigungstechnologie auch für Baugruppen anwendbar ist, die typischerweise in Großserien beispielsweise im Karosseriebau zum Einsatz kommen. Sowohl die definiert positionierte und ausgerichtete Einbringung mehrerer Verbindungselemente in ein Faserverbundbauteil, als auch das Anschweißen an ein Blechbauteil aus höchstfestem Stahl (22MnB5) konnte hierbei mit gleichbleibender Qualität und Genauigkeit realisiert werden.

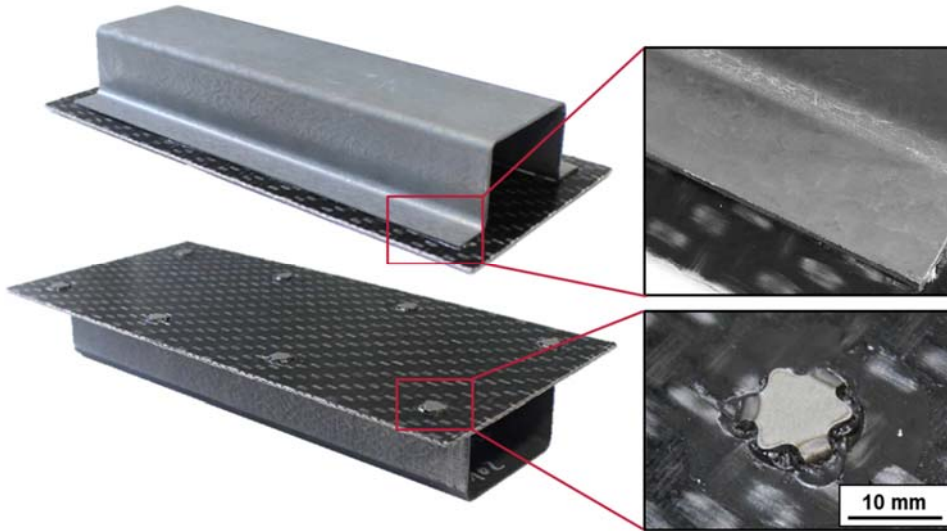


Abbildung 115: Demonstrator zum Verbinden von FVK höchstfestem Stahl mittels hybriden Blechverbindungselementen

7 Zusammenfassung

Im Projekt „Verfahrensentwicklung zur Herstellung von hybriden FVK/Stahl Strukturen mittels eines neuartigen Blechverbindungselementes – „HyBVE“ “ wurden Verbindungselemente entwickelt und untersucht.

Als Grundkonzept der Verbindungselemente wurde eine Kopfplatte mit drei oder mehr Verbindungsfüßen festgelegt. Die Verbindungsfüße durchdringen zunächst den lokal aufgeschmolzenen Faserverbundwerkstoff. Anschließend werden deren Spitzen mittels konventioneller Widerstandspunktschweißtechnik an ein Stahlblech angeschweißt. Dabei wird der Strom über die Kopfplatte in die Verbindungsfüße eingeleitet. Die Verbindungselemente lassen sich kostengünstig im Stanzumformprozess herstellen.

Die drei erforderlichen Prozessschritte Elementherstellung, Durchdringung und Schweißung führen zu Zielkonflikten hinsichtlich geometrischer Gestaltung und Werkstoffauswahl für die Verbindungselemente.

Im Projekt ist es gelungen, zunächst die Teilprozesse zu entwickeln und anschließend so zu optimieren, dass eine Verbindung mit ausreichender Festigkeit erzeugt wird. Dazu wurde ebenfalls die Elementgeometrie schrittweise angepasst.

Das Ziel des Vorhabens wurde somit erreicht.

8 Verwendung der Zuwendungen

Im Folgenden (Tabelle 17) ist die Verwendung der Zuwendung tabellarisch aufgeführt. Hierbei wird dargestellt, dass die Zuwendungen wie bewilligt abgerufen wurden.

Tabelle 17: Verwendung der Zuwendung

Art der Zuwendung	Bewilligte Mittel	Abgerufene Mittel	Institut
wissenschaftlich-technisches Personal, HPA Gr. A	21 Personenmonate	21 Personenmonate	IWF TU-BS
staatl. Abschluss Techniker oder Meister, HPA Gr. C	8 Personenmonate	8 Personenmonate	IWF TU-BS
Hilfskräfte, HPA Gr. F	18 Personenmonate	18 Personenmonate	IWF TU-BS
wissenschaftlich-technisches Personal, HPA Gr. A	14 Personenmonate	14 Personenmonate	IWF OvGU
Hilfskräfte, HPA Gr. F	12 Personenmonate	12 Personenmonate	IWF OvGU
Geräte	nur unter 2500 Euro	es wurden nur Geräte unter 2500 Euro angeschafft	IWF TU-BS / IWF OvGU
Leistungen Dritter	keine	keine	IWF TU-BS / IWF OvGU

Die wissenschaftlichen Mitarbeiter haben die Planung, Durchführung und Überwachung der theoretischen und experimentellen Untersuchungen und die sich daran anschließende wissenschaftliche Auswertung und Interpretationen der Ergebnisse durchgeführt. Sie waren für die Projektkoordination – insbesondere auch die Abstimmung mit den Industriepartnern und die systematische Konzeption des Versuchsprogramms verantwortlich. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter verfügten über Erfahrung auf dem Gebiet der Konstruktion und Fertigungstechnik und konnten mit dieser Qualifikation eine erfolgreiche Bearbeitung des Vorhabens sicherstellen. Sie wurden von dem Technischen Personal und den Hilfskräften hierbei insbesondere beim Aufbau der Versuchsstände und der Durchführung der Analysen unterstützt und haben einen wertvollen Beitrag zum Gelingen des Vorhabens beigetragen.

Die Simulation des Durchdringungsprozesses war notwendig, um die große Anzahl an möglichen Geometrieparametervarianten analytisch reduzieren zu können. Außerdem kann mit dem Simulations-Modell bereits im Voraus auf mögliche Prozesskräfte sowie Faserschädigung geschlossen und der Einfluss verschiedenster Prozessparameter abgeschätzt werden. Zur Validierung des Modelles und für die Erprobung der Verbindungselement-Prototypen musste ein entsprechender Versuchsstand aufgebaut werden. Neben einer geeigneten Kraftmessensorik war der Versuchsstand so auszulegen, dass mit diesem unterschiedlichen Prozessparameter abgebildet und neue Pin- und Verbindungselementgeometrien erprobt werden können.

Die Berechnungen und Simulationen zur Faserschädigung bei der Durchdringung waren notwendig, um für den Durchdringungsprozess den geometrisch notwendigen Aufschmelzbereich zu kennen. Es war notwendig zunächst eine einfache rotationssymmetrische Pin-Geometrie mit zylindrischem Schaft und kegelförmiger Spitze zu untersuchen, um den Einfluss konkreter Geometrie-Parameter auf Durchdringungs- und Schweißprozess nachzuweisen. Dazu mussten Prototypen gefertigt und Durchdringungs-Prüfstände aufgebaut werden. Zum besseren Verständnis des Durchdringungsprozesses, des Pin Vorschubes und der Möglichkeiten der Temperaturführung wurden verschiedene Prüfstandvarianten aufgebaut.

Um die optimale Elementgestalt hinsichtlich des Füge- und Herstellungsprozesses festzulegen, war es notwendig unterschiedliche Fügeelemente herzustellen und zu untersuchen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde die Elementgeometrie mit von außen umgeformten Kontaktfüßen (Sternelement) festgelegt, die im Weiteren zu verfolgen ist.

Um die Verbindung hinsichtlich aufnehmbarer Kräfte beurteilen zu können, mussten Prüfverfahren aus dem Bereich des Punktschweißens auf die hybride Verbindung und die Lochleibung angepasst werden.

Der Aufbau des Simulationsmodells war notwendig, um einen erheblichen Versuchsaufwand einzugrenzen. Der Durchdringungsversuchsstand war für wiederholbare Versuchsdurchführungen umzurüsten, um damit das Simulationsmodell zu validieren. Dieser dient außerdem zum Einbringen von Verbindungselementen in FVK-Proben für anschließende Schweißversuche und Verbindungsfestigkeitsuntersuchungen. Die Entwicklung des Kurzzeit-Element-Schweißens war erforderlich, um bei einer stoff- und formschlüssigen Verbindung den Faserverbundwerkstoff schadigungsarm an 22MnB5-Stahlblech anzubinden. Darüber hinaus mussten die Verbindungselemente optimiert werden, um bei Erfüllung der Restriktionen aus Durchdringungs-, Elementschweiß- und Elementherstellungsprozess die Verbindungsfestigkeit auf ein brauchbares Maß zu steigern. Die Durchführung der Referenzversuche mit Elementen aus einem niedriglegierten Stahl ermöglichte die Ermittlung des Einflusses eines Elementwerkstoffes auf die Schweißbeignung.

9 Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der erzielten Forschungsergebnisse

9.1 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen

Die Leistungsfähigkeit eines hybriden Verbindungselements hängt maßgeblich von der Werkstoffgerechten Lastübertragung ab. Etablierte Verbindungstechniken wie z. B. das Schweißen können aufgrund der unterschiedlichen Materialparameter von Metallen und Kunststoffen insbesondere den thermischen Eigenschaften bei dieser neuen Bauteilkategorie nicht ohne Weiteres eingesetzt werden. Aus dem Stand der Technik in Kapitel 2 geht hervor, dass es zahlreiche Forschungsansätze zu neuen Verbindungsverfahren gibt. Hierbei haben sich neben der klassischen Klebtechnik vor allem formschlüssige Verfahren als besonders geeignet herausgestellt, um den strukturellen Zusammenhalt von hybriden Werkstoffsystemen deutlich zu verbessern. Die Verfahren sind jedoch teilweise mit einem erheblichen prozesstechnischen Aufwand verbunden, eignen sich nur für bestimmte Werkstoffkombinationen oder sind in Ihrer Anwendung stark auf den Einzelfall begrenzt. Klassische Fügeverfahren berücksichtigen nicht die spezifischen Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen.

Die Entwicklung des vorgestellten Verfahrens erweitert das klassische Widerstandsschweißen auf die Materialkombination Metall-FVK, wodurch neue Möglichkeiten für die Umsetzung von Leichtbaukonzepten in Mischbauweise geschaffen werden.

Hierdurch lässt sich das Verfahren großserientauglich einsetzen.

In dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben ist ein hybrides Blechverbindungselement entwickelt worden. Neben der Optimierung der Geometrie stehen in diesem Zusammenhang ebenfalls Simulationsmodelle zur Verfügung, mit denen die Eignung für andere Faserverbundwerkstoffe überprüft werden können. Dies bietet vor allem für kleine und mittelständische Unternehmen den Vorteil, dass diese keine kostenintensive experimentelle Entwicklung vornehmen müssen. Des Weiteren können die Unternehmen die Analysetools und Ergebnisse zu den Festigkeitswerten unterschiedlicher Untersuchungsschwerpunkte einsetzen, um bereits für den jeweiligen Anwendungsfall eine Potenzialabschätzung für das neue Verfahren vorzunehmen. Außerdem wurde im Vorhaben bereits gezeigt, dass sich die Blechverbindungselemente für unterschiedliche Blechdicken des Stahlblechs anwenden lassen. Diese zeigt für die Unternehmen aus der Zulieferbranche zusätzliche Anwendungsfelder auf. Das Verfahren zeichnet sich im Gegensatz zu anderen im Stand der Technik aufgeführten Verfahren durch eine einfache kostengünstige Herstellung der Elemente sowie eine schnelle und prozesssichere Elementapplikation aus.

9.2 Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Das Forschungsvorhaben leistet einen Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen, die in der Zulieferbranche tätig sind.

Mit der Weiterentwicklung des Verbindungselements ist es möglich in großer Serie Faserverbundbauteile mit Anbindungspunkten für das Anschweißen an Stahlbleche auszustatten und damit das Potenzial für Mischbauweisen zu steigern. Hierbei ist keine kostenintensive Anschaffung von neuer Prozesstechnik erforderlich. Lediglich einfache Infrarotstrahler sowie eine Einpressvorrichtung werden zusätzlich benötigt. Vorhandene konventionelle Schweißanlagen lassen sich kostengünstig für das neu entwickelte Kurzzeitschweißen umrüsten. Grundlegendes fachfremdes Knowhow oder Anlagentechnik wie Gießanlagen oder strahltechnische Systeme werden nicht benötigt. Das Verfahren lässt sich in unterschiedlichen Bereichen für

hybride Bauteile einsetzen. Im Bereich der Montage können Verbindungselemente genutzt werden, um die FVK-Komponente mit Anbindungspunkten für konventionelle Widerstandspunktschweißtechnik auszustatten.

9.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Rahmen des Projekts wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem eine form-, kraft- und stoffschlüssige Verbindung zwischen Metall und FVK erzeugt werden kann. Es liegen Erkenntnisse zu unterschiedlichen Einflussgrößen hinsichtlich der Geometrie- und Prozessparameter auf Durchdringungs- und Schweißprozess vor. Die Modelle zum Durchdringungsprozess sind validiert und können für andere Geometrien eingesetzt werden. Sie bilden die Grundlage für die Anwendung mit weiteren Faserverbundwerkstoffen. Dazu wurden parametrierbare Modelle für FVK-Werkstoffe aufgebaut und validiert. Für andere Materialien müssen neben den Materialparametern ggf. die Simulationsparameter angepasst werden.

Die geleisteten Arbeiten bilden die Grundlage für die weiteren Untersuchungs- und Entwicklungsfelder und waren notwendig und angemessen für die Erreichung des Projektziels. In Tabelle 18 sind die Teilergebnisse in Bezug auf die Arbeitspakete kurz zusammengefasst.

Tabelle 18: Erreichen der Ziele in den Arbeitspaketen

Arbeitspaket	Inhalt/Ziele	Erzielte Ergebnisse
1	Schädigungsarme Durchdringung	Ein Prozess zur Schädigungsarmen Durchdringung wurde entwickelt. Einflüsse der Parameter wurden untersucht
2	Schweißtechnische Anbindung	Ein Schweißprozess zum Anbinden des Elements an Stahlblech wurde entwickelt
3	Optimierung	Element und Prozesse wurden für höhere Verbindungsfestigkeiten optimiert
4	Automatisierungskonzept	Es wurde ein Automatisierungskonzept entwickelt

10 Fortgeschriebener Plan zum Ergebnistransfer

Ein neues Verbindungselement, das form- kraft- und stoffschlüssige Verbindungsmechanismen nutzt, wurde entwickelt. Es wurden Vorschläge zu Konzepten zur optimierten Ausnutzung einer serientauglichen Herstellung getätigt.

Während der Projektlaufzeit wurden die jeweiligen Zwischenergebnisse bei den Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses und der Open Hybrid LabFactory vorgestellt, sodass sichergestellt war, dass die Forschung stets anwendungsnah orientiert war.

Die Ergebnisse wurden bereits mehrfach auf Fachtagungen und in Veröffentlichungen vorgestellt (Tabelle 19). Für eine anschauliche Präsentation wurden Demonstratoren und Funktionsmuster der verschiedenen Prototypen verwendet. Im Laufe des Vorhabens wurde es mehreren Studierenden ermöglicht, auf dem Thema eine Forschungsarbeit anzufertigen.

Tabelle 19: Während der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen (chronologisch)

Maßnahme	Rahmen	Zeitraum
Arbeitskreistreffen IWF TU-BS	Das Kickoff-Treffen wurde mit dem projektbegleitenden Ausschuss am IWF TU-BS durchgeführt. Dort wurde eine inhaltliche Abstimmung bzgl. der einzusetzenden Materialien vorgenommen.	Juli 2015
Newsletter	Das Projekt wurde im Newsletter „Portal“ des IWF TU-BS thematisiert und so allen Industrie- und Forschungspartnern der Forschungsstelle vorgestellt	Nov. 2015 Nr. 35
Veröffentlichung im Ingenieurspiegel Fachmagazin	Vorstellung des Forschungsansatzes sowie erster Ergebnisse zur induktions- und schwingungsunterstützten Durchdringung sowie Schweißversuchen [1]	Ausgabe 3 2015
EFB Arbeitskreissitzung	Vorstellung der Ergebnisse aus AP1 und AP2 auf der Arbeitskreissitzung der EFB in Bremen	Januar 2016
NFF OHLF Arbeitskreissitzung	Präsentation der technischen Umsetzung zur faser-schädigungsarmen Durchdringung sowie zu den ersten Versuchsproben, die im Spritzgussverfahren hergestellt worden sind.	Juli 2015 Januar 2016
DVS-Kolloquium Fachtagung	Vorstellung des Projektes und erster Schweißversuche auf dem DVS-Kolloquium in Halle	November 2015
Projekttreffen OVGU	Das Treffen wurde mit dem projektbegleitenden Ausschuss am IWF OVGU durchgeführt. Dort wurden die Ergebnisse aus AP1 und AP2 vorgestellt.	Januar 2016
EFB Arbeitskreissitzung	Vorstellung der Ergebnisse aus AP1 und AP2 auf der Arbeitskreissitzung der EFB in Bremen	Januar 2016
NFF OHLF Arbeitskreissitzung	Präsentation der technischen Umsetzung zur faser-schädigungsarmen Durchdringung	Januar 2016
Fa. Stüken	Präsentation erster Projektergebnisse und Workshop zum Stanzumformprozess bei Fa. Hubert Stüken in Rinteln	März 2016
DVS-Sondertagung	Das Projekt wurde mit Schwerpunkt auf AP2 bei der DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen präsentiert [1]	März 2016

23. Innovationstag Mittelstand des BMWi		Das Projekt wurde auf dem 23. Innovationstag des Mittelstandes in Berlin mit einem Poster, der Ausstellung von Exponaten sowie einer Präsentation des Projektes vorgestellt	Juni 2016	
EFB	Arbeitskreissitzung	Vorstellung der Ergebnisse aus AP1 und AP2 auf der Arbeitskreissitzung der EFB in Clausthal-Zellerfeld	Juni 2016	
NFF	OHLF	Arbeitskreissitzung	Präsentation des Projektes bei der NFF OHLF Arbeitskreissitzung	September 2016
Projekttreffen	IWF	TU-BS	Das Treffen wurde mit dem projektbegleitenden Ausschuss am IWF TU-BS durchgeführt. Dort wurden die Ergebnisse aus AP1, AP2 und AP3 vorgestellt.	September 2016
58. International Welding Conference		Das Schweißverfahren wurde bei der International Welding Conference in Sosnowiec (Polen) präsentiert [2]	Oktober 2016	
Composite Structures		Ein Beitrag zur Durchdringungssimulation und deren Validierung wurde beim Journal Composite Structures eingereicht (im Reviewprozess). [3]	November 2016	
6. Füge-technisches Gemeinschaftskolloquium (FOSTA, EFB, DVS)		Das Projekt wurde beim 6. Füge-technischen Gemeinschaftskolloquium von FOSTA, EFB und DVS in München im Rahmen einer Posterausstellung, mit einem Vortrag und einem Beitrag im Tagungsband vorgestellt [4].	Dezember 2016	
EFB	Arbeitskreissitzung	Vorstellung der Ergebnisse mit Schwerpunkt auf AP 3 auf der Arbeitskreissitzung der EFB in Paderborn	Januar 2017	
NFF	OHLF	Arbeitskreissitzung	Postervorstellung des Projektes bei der NFF OHLF Arbeitskreissitzung	März 2017
Projekttreffen	OHLF	TU-BS	Das Treffen wurde mit dem projektbegleitenden Ausschuss an der OHLF der TU-BS durchgeführt. Dort wurden die Ergebnisse aus AP3 und AP4 vorgestellt.	August 2017
NFF	OHLF	Arbeitskreissitzung	Postervorstellung des Projektes bei der NFF OHLF Arbeitskreissitzung	September 2017
Abschlussbericht		Zusammenstellung der Forschungsergebnisse, Software-Dokumentation sowie Druckfassung an die EFB Geschäftsstelle	November 2017	

Die finalen Projektergebnisse werden am 7. Füge-technischen Gemeinschaftskolloquium im Dezember 2017 vorgestellt. Hierzu ist der Beitrag für das Tagungsband bereits eingereicht. Weiterhin ist in Tabelle 20 der Plan des realisierbaren Ergebnistransfers über das Projektende hinaus dargestellt.

Tabelle 20: Tabellarische Übersicht der geplanten Transfermaßnahmen (chronologisch)

Maßnahme	Rahmen	Zeitraum
7. Füge-technisches Gemeinschaftskolloquium (FOSTA, EFB, DVS)	Das Projekt wird beim 7. Füge-technischen Gemeinschaftskolloquium von FOSTA, EFB und DVS in Dresden im Rahmen eines Vortrags und einem Beitrag im Tagungsband vorgestellt .	Dezember 2017
EFB Arbeitskreissitzung	Vorstellung der finalen Projekt Ergebnisse auf der Arbeitskreissitzung der EFB in Dresden.	Januar 2018
Akademische Ausbildung	Wissensvermittlung und Einbeziehung neuester Forschungsergebnisse in die Lehrveranstaltung Fertigungstechnik	Februar 2018
ICCS21 21th International Conference on Composite Structures	Es wird ein Beitrag zur Durchdringung und deren Validierung bei der ICCS21 21th International Conference on Composites Structures eingereicht	März 2018
NFF OHLF Arbeitskreissitzung	Vorstellung der finalen Ergebnisse als Vortrag im Rahmen der NFF OHLF Arbeitskreissitzung.	März 2018
Folgeprojekt	Es wird Bedarf für ein Folgeprojekt aufbauend auf den gezielten Ergebnissen bei der EFB eingereicht.	Mai 2018
Dissertation	Wissenschaftliche Qualifikation der Bearbeiter des Forschungsvorhabens	2019

11 Literatur

- [Arc17a] Arcelor, M.: Mikrolegierte Kaltumformstähle, Automotive Worldwide, http://automotive.arcelormittal.com/saturnus/sheets/F_DE.pdf, 10.07.2017
- [Arc17b] Arcelor, M.: Warmumformstähle -Usiborw® und Ductibor®, http://automotive.arcelormittal.com/saturnus/sheets/E_DE.pdf, 10.02.2017
- [Avk10] AVK-Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.): Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, Jahrestagung, Vieweg+Teubner Wiesbaden, 2010
- [Auw15] Van der Auwera, R.: Hybridisierung mittels Niederdruckguss, Projekt HyDru; Abreitskreissitzung der Open Hybrid Labfactory, Braunschweig; 14.07.2015
- [Ber14] Bergau, M.: Verbinden von Blechstrukturen mit Faserverbundwerkstoffen mittels Funktionselementen, IGF-Nr.: 17437 N, Paderborn, 2014
- [Bet17] BETAMATE™ 1480V203: Crashresistant Structural Adhesive, Technisches Datenblatt, 2017
- [Bla11] Blackburn, J. et al.: Producing Surface Features with a 200 W Yb-fibre Laser and the Surfi-Sculpt® Process, Physics Procedia 12 (2011), S. 529–36
- [Buc07] Buchmayr, B.: Innovative Beiträge der Umformtechnik zum Leichtbau von Kraftfahrzeugen, 2007
- [Chi12] Chimani, C. M.: Leichtmetallentwicklungen für hybride Leichtbaulösungen, AIT Austrian Institut of Technologie. LKR Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH. Fill-Academy, Gurten, 2012
- [Cha87] Chang, L.-W. et al.: Notched strength of woven fabric composites with moulded-in holes, Composites (1987), S. 233-241
- [Lan99] Di Lanza Scalea, F. et al.: On the Effect of Interference Fits in Composite Pin-Joints, Journal of Thermoplastic Composite Materials 12 (1999), S. 23-32
- [DIN 928] DIN German Institute for Standardization Dokumentart: Vierkant-Schweißmuttern, ST, N - Ausgabedatum: 2013-05-00
- [Drö15] Dröder, K. et al.: Increasing the Structural Integrity of Hybrid Plastics-Metal Parts by an Innovative Mechanical Interlocking Effect (2015). Schweiz
- [Ear12] Earl, C. et al.: Parameter Influence on Surfi-Sculpt Processing Efficiency, Physics Procedia 39 (2012), S. 327–35
- [For1224] DFG Forschergruppe 1224: "Schwarz-Silber: Bauweisen für CFK-Aluminium Übergangsstrukturen im Leichtbau, <http://www.for-schwarzsilber.de/>
- [Ham17] Hammaburger Industrie: Leichtbau stellt Automatisierung vor Herausforderungen. <http://www.hammaburger-industrie.de/leichtbau-automatisierung-herausforderungen/> Letzter Zugriff: 13.11.2017
- [Fra11] Franco, D. et al.: Influence of the distance between rivets in self-piercing riveting bonded joints made of carbon fiber panels and AA2024 blanks, Materials and Design 35, S. 342ff, 2011
- [Fra12] Franco, D. et al.: Analysis of the mechanical performance of hybrid (SPR/bonded) single-lap joints between CFRP panels and aluminum blanks, International Journal of Adhesion & Adhesives 41, S.24ff, 2012

- [Fri13] Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013
- [Fuc10] Fuchs, H. et al.: Super Lap Shear Joint Structural Test-Analysis Correlation Studies, Tagungsbeitrag Automotive Composites Conference & Exhibition (SPE ACCE), 15.-16.09.2010, Troy (USA), 2010
- [Gra10] Gradinger, R. et al.: FEM-basierte Untersuchungen einer innovativen Metall-FVK Fügetechnik, AIT Austrian Institut of Technologie. LKR Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH. Hybridica Forum, 2010
- [Gri15] GRIP Metal, 2015: Grip Metal Broschüre, http://www.nucap.com/admin/includes/doc_view.php?ID=691, Letzter Zugriff: 17.09.2015
- [Gud15] Gude, M. et al.: Development of novel form-locked joints for textile reinforced thermoplastics and metallic components, Journal of Materials Processing Technology 216 (2015) pp. 140–145. doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.09.007
- [Hah12] Hahn, O. et al.: Stanznieten hoch-fester Stähle mit NE-Hochleistungswerkstoffen, Tagungsband zum 32. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung, 14./15.02.2012, S. 163-178
- [Heu12] Heuss, R. et al.: Lightweight, heavy impact, Advanced Industries, Februar 2012
- [Hue15] Huelsbusch, D. et al.: Influence of pin size on tensile and fatigue behavior of ti-cfrp hybrid structures produced by laser additive manufacturing, 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, 19-24th July 2015
- [Huf06] Hufenbach, W. et al.: Verfahren und Anordnung zur Herstellung genieteter Verbindungen zwischen flächigen Strukturen aus verstärkten Thermoplasten, 2006
- [Hol17] Holtschke, N. et al.: Joining lightweight components by short-time resistance spot welding, Welding in the World, 2017, 61; S. 413–421
- [Hop13] Hopmann, C. et al.: Comparison of the properties of Onserts and In-serts for a high volume production of structural composite parts, Journal of Plastics Technology 9, S. 179ff, 2013
- [IWF] Institut für Werkstoff und Fügetechnik: Entwicklung von Prozessen und Qualitätskriterien zum Kurzzeitschweißen mit reduziertem Wärmeeintrag für Widerstandspunkt- bzw. buckelschweißverbindungen, DVS-Nr. 04.067, Magdeburg
- [Kar10] Karbasian, H. et al.: A review on hot stamping, Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210; S. 2103–2118
- [Kol07] Kolleck, R. et al.: Optimierung gekühlter Werkzeuge für das Presshärten borlegierter Stähle, 2. Erlanger Workshop Warmblechumformung 2007, S. 93–102
- [Kra14] Krause, W.: Thermoplastischer flächiger Körperverbund und Einrichtung zum Fügen flächiger Körper, 2014
- [Kro09] Kroll, L. et al.: Verbindungstechniken für belastungsgerechte Hochleistungsbauteile in Mischbauweise, 9. Wissenschaftstage an der Hochschule Lausitz, 2009

- [Kro16] Kropp, T.: Großserientaugliche Prozessketten für hochintegrierte Bauteile aus hybriden Faser-Kunststoff-Metall-Verbunden, Teilprojekt 6: Anbindungstechnologien DFG-AIF Cluster, EFB Arbeitskreissitzung, Clausthal 21.06.2016
- [Lan11] Lang, A.: Schwarz-Silber: Bauweisen für CFK-Aluminium-Übergangsstrukturen im Leichtbau, http://www.faserinstitut.de/downloads/21-schwarz-silber_projekte Letzter Zugriff: 16.11.2016
- [Lan12] Lang, H. et al.: Development and optimization of an innovative joining technique for composite structures using the finite element method, European Congress on Computational Methods (ECCOMAS 2012), Austria, 2012
- [Lan13] Lang, H. et al.: A numerical analysis of an innovative joining technique for composite structures, Advanced Composites on its way to industrialization (SEICO 2013), Paris, 2013
- [Lei06] Leiser, J.: Schriftenreihe Strukturleichtbau, Bd. 11: Beitrag zu innovativen Verbindungstechniken für Hochleistungsverbundwerkstoffe: Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2006 Chemnitz: Inst. für Allg. Maschinenbau und Kunststofftechnik, 2006. - ISBN 9783936766103
- [Lin94] Lin, H. J. et al.: Fatigue strength of woven fabric composites with drilled and moulded-in holes, Composites Science and Technology 52 (1994), S. 571-567
- [Lin95] Lin, H. J. et al.: Failure analysis of woven-fabric composites with moulded-in holes, Composites Science and Technology 55 (1995), S. 231-239
- [Mes13a] Meschut, G. et al.: Werkstoffgerechtes Fügen von Faser-Kunststoff-Verbunden mit Metallen für automobiler Leichtbaukonzepte, 19. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde 03.-05. Juli 2013, Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V., Karlsruhe, 2013
- [Mes13b] Meschut, G. et al.: Fügen von Leichtbaustrukturen in der FVK/Metall-Mischbauweise, Düsseldorf, 2013
- [Mes15a] Meschut, G. et al.: Hybridfügen von Mischbaustrukturen aus faserverstärkten Kunststoffen mit metallischen Halbzeugen, IGF-Nr.: 17618 N; DVS-Nr.:08.080
- [Mes15b] Meschut, G. et al.: Bewertung der Schädigung beim Stanznieten von Faser-Verbund-Kunststoffen, IGF-Nr.: 17667 GB/1, Paderborn, 2015
- [Mes15c] Meschut, G. et al.: Fügen von Mischbaustrukturen aus metallischen Werkstoffen und FVK-Bauteilen mittels Schließelement-Stanznieten, IGF-Nr.:17597 N, Paderborn, 2015
- [Mou10] Mouritz, A. P.: Design dilemma for Z-pinned composite structures, School of Aerospace, Mechanical & Manufacturing Engineering, RMIT University ICAS 2010, 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2010
- [Ng01a] Ng, S.-P. et al.: Progress failure analysis of 2/2 twill weave fabric composites with moulded-in circular hole, Composites: Part B 32 (2001), S. 139-152
- [Ng01b] Ng, S.-P. et al.: Progressive failure analysis of 2/2 twill weave fabric composites with moulded-in circular hole, The Hong Kong Polytechnic University. In Composites Part B: Engineering, 2001, 32; S. 139-152
- [Nie12] Niedermeier, M.: Mechanische Verbindungen und Klebungen, Vortrag ETH Zürich, 2012

- [Nuc13] Nucap Industries Inc.: NRS, <http://www.nucap.com/products/backing-plates/nrs/>, Letzter Zugriff: 17.09.2015
- [Obr15] Obruch, O. et al.: Untersuchungen zum Fügen von 22MnB5 mit Leichtbauelementen durch das Widerstandselementschweißen, Magdeburg, 2015
- [Par03] Partridge, I.K. et al.: Manufacture and performance of z pinned composites, Advanced Polymeric Composites, ed. G. Shonaike and S. Advani, CRC Press, FL, 2003
- [Rau09] Rauch, M.: „Pinnen“, was nicht zu schweißen ist, Metall mit organischem Material verpinnen. Pressemitteilung Fronius International GmbH, 2009
- [Sal12] Salzgitter Flachstahl GmbH: HX340LAD - Stähle mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen – mikrolegiert, Materialdatenblatt, 2012
- [Sal14] Salzgitter Flachstahl GmbH: 22MnB5 – Kaltband, Produktinformation. https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationsmaterial/produktinformationen/kaltgewalztes_feinblech/deu/22mnb5.pdf, 2014
- [Sch05] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Berlin Springer, 2005 (VDI). - ISBN 9783540402831
- [Sch11] Schimanski, K. et al.: Werkstoffgerechte Übergangsstrukturen für CFK-Aluminium-Verbindungen, Clausthaler Metall-Tagung 2011, Clausthal-Zellerfeld 21.-23.09.2011
- [Sch13] Schwedler, O. et al.: Formhärten im Automobilbau, Wolfsburg, 2013
- [Sei11] Seidlitz, H. et al.: Thermomechanisches Ausformfügen für thermoplastische FVK. LightweightDesign Ausgabe Nr.: 2011-03, 2011
- [Sei13] Seidlitz, H.: Entwicklung von kraftungsgerechten Verbindungstechniken für Mischbauweisen mit thermoplastischen Faserverbunden und Metallen, Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2013. München: Verl. Dr. Hut, 2013 (Ingenieurwissenschaften). - ISBN 9783843909617
- [Sha10] Shah B. et al.: Structural Performance Evaluation of Composite-to-Steel Weld Bonded Joint, Tagungsbeitrag Auto-motive Composites Conference & Exhibition (SPE ACCE), 15.-16.09.2010, Troy (USA), 2010
- [Sok12] Sokolova, O.; Study of metal/polymer/metal hybrid sandwich composites for the automotive industry, Dissertation TU Clausthal 2012; noch nicht veröffentlicht.
- [Str03] Stringer, L. G. et al.: Through-thickness reinforcement of composites: z-pinning, stitching and 3-D weaving, 2003
- [Thy13] ThyssenKrupp Steel Europe AG: Technisches Merkblatt - Litecor, 2013
- [Tur06] Turetta, A. et al.: Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations, Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177; S. 396–400
- [Wie73] Wiedemann, J. et al.: Ausschnitte in GFK-Flächen - Festigkeit, Berechnung, konstruktive Maßnahmen, Kunststoffe 63 (1973), Nr. 12, S. 867-873
- [Wil13] Wilhelm, M. et al.: Herausforderung CFK-Stahl-Mischbau: Quantifizierung von Delaminationen infolge des umform-technischen Fügens, DGZFP-Jahrestagung, Dresden 06.-08.05.2013
- [Zit11] Zitoune, R. et al.: Behaviour of composite plates with drilled and moulded hole under tensile load, Composite Structures 93 (2011), S. 2384-2391