

Förderhinweis und Danksagung

Das IGF-Vorhaben 18.344 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Dafür sei an dieser Stelle gedankt. Für die zur Durchführung dieses Forschungsprojektes zur Verfügung gestellten Versuchswerkstoffe und Dienstleistungen sowie für die Unterstützung und die konstruktiven Diskussionen möchten wir uns außerdem bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses bedanken.

ÖE| ~ { ã } ã ~ { Á V Ù ^ & ! @ } ã & ¶ * ã ^ P ^ ! Ú ! ! Á ~ È Á Ö ! È Á U • c ^
ÖEWÖÖÖÁ P ^ ! Ö ! ! - Ö } * È Á ÖE| à ^ !
Ó ^ } c ^ | ^ ! Á ÖE ~ c [{ [à ã | c ^ & (P ^ ! Ö ! ! - Ö } * È Á V 4 | | ^
Ö ÖEQ T Š Ò Ü Á ÖE Ö P ^ ! ! Á Ù & @ ~ à ^ ! c
Ö ! È Á Š æ]] ^ Á B Á Þ ã ^ { ^ ã ^ ! Á (P ^ ! Ö ! ! - Ö } * È Á Š æ]] ^
Ò R U V Á Ö { à P Á B Á Ô [È Á S Ö P ^ ! ! Á T æ ã , æ | á
Ø [! á Á Ø [! • & @ ~ } * • : ^ } c | ~ { P ^ ! \$ | Á & @ ^ !
Ø [! • & @ ~ } * • ç ^ ! ^ ã } ã * ~ } * / P ^ ! ! Á P ^ ã • ^
P æ ! { • Á ~ } á Á Y ^ } á ^ Á Ö { à P Á E P ^ ! U ^ Á \ ^ ! •
S ~ {] ~ Á Ù & @ , ^ ã i c ^ & @ } ã \ P ^ ! ! Á S ~ {] ~
Þ [ç ^ | ã • Á Ù , ã c : ^ ! | æ } á Á Ù (P ^ ! ! Á Ü æ á ^ ! { æ & @ ^ !
Ù æ | : * Á æ c) ^ ! • { æ } } Á Ø [! • & @ P ^ ! ! - Ö } * È Á Ø ! ã c : • & !
V @ ^ • • ^ } ß d ^ Ò ~ ! ! Á] ^ P ^ ! Ö ! ! - Ö } Ö @ ^ ! * ~ ã
X [| \ • , æ * ^ } Á ÖE Ö P ^ ! ! - Ö } * È Á Á P ^ È Á Y !
Y ã | @ ^ | { Á Ó 4 | | @ [~ ~ Á Ö { à P / P ^ ! ! - Ö } P È Á c Ó ã ** | æ ~

Das Team der Forschungsstelle trauert um Herrn Maximilian Stahl, B. Sc., SFI, der im Rahmen einer studentischen Arbeit zum Gelingen des Projektes beigetragen hat und während der Projektlaufzeit im Sommer 2016 unerwartet verstorben ist.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF), Universität Paderborn

Zur Bearbeitung des Projektes wurden insgesamt 23 Monate wissenschaftlich-technisches Personal (A1) eingesetzt.

Die für das Forschungsprojekt geleisteten Arbeiten waren angemessen und zur Erreichung des Forschungszieles notwendig.

Angaben über gewerbliche Schutzrechte

Es wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes keine gewerblichen Schutzrechte erworben. Eine Anmeldung eines gewerblichen Schutzrechtes ist nicht beabsichtigt.

Kurzdarstellung

In den letzten Jahren setzt die Automobilindustrie, bedingt durch die gesetzlichen Vorgaben, verstärkt auf Leichtbaumaßnahmen, insbesondere in der Karosseriestruktur durch den belastungsgerechten Einsatz verschiedener Leichtbauwerkstoffe. Zur Realisierung leichter, aber dennoch steifer und crashstabiler Karosseriestrukturen in Schalenbauweise bietet sich insbesondere für Großserien eine Mischbauweise an, in der ultrahochfeste, pressgehärtete Stahlblechteile mit Aluminiumwerkstoffen kombiniert werden. Die in den vergangenen Jahren zur Serienreife und nicht ausschließlich für diese Anwendung entwickelten thermisch-mechanischen Fügeverfahren Widerstandselement- oder Reibelementschweißen bieten ein hohes Anwendungspotenzial und erste Serienanwendungen sind bereits erfolgt. Aufgrund der Neuheit dieser Verfahren wurden thermisch-mechanisch gefügte Mischbauverbindungen bisher hinsichtlich ihrer Eigenschaften unter schwingenden Beanspruchungen nur unzureichend untersucht, so dass gesicherte Erkenntnisse zum Versagensverhalten und zur Lebensdauerabschätzung entsprechender Verbindungen und Werkstoffkombinationen fehlen. Zur wirtschaftlichen Fertigung ist die Absicherung und Charakterisierung der Festigkeitseigenschaften erforderlich.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Konzeptes zur Lebensdauerberechnung thermisch-mechanisch gefügter Mischbauverbindungen aus Aluminiumblechwerkstoffen und ultrahochfesten Stählen, um eine effiziente Auslegung von Bauteilen mit derartigen Verbindungen zu ermöglichen. Dazu werden im Rahmen dieses Vorhabens Schwingfestigkeitskennwerte ermittelt, die als Eingangsdaten für ein Berechnungskonzept verwendet werden. Hierzu wurde das Versagensverhalten zyklisch belasteter thermisch-mechanisch gefügter Verbindungen ermittelt und die Festlegung von Anriss- und Bruchkriterien festgestellt sowie eine Analyse von Ort und Geschwindigkeit der Rissausbreitung durchgeführt. Ferner ist die Ermittlung von Anriss- und Bruchwöhlerlinien in Abhängigkeit von der Werkstoffkombination, dem Lasteinleitungswinkel und dem R-Verhältnis durchgeführt worden. Zudem wurden Masterwöhlerlinien ermittelt und das Berechnungskonzept hinsichtlich der Anwendbarkeit auf thermisch-mechanisch gefügte Verbindungen unter Berücksichtigung lokaler Spannungen in der Verbindungszone in Abhängigkeit der äußeren Lasten bewertet. Ein Vergleich der Lebensdauer kennwerte thermisch-mechanisch gefügter Verbindungen mit denen vollstanzgenieteteter und blindgenieteteter Verbindungen ist durchgeführt worden.

Das Ziel des Vorhabens wurde somit erreicht.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen und Formelzeichen	IV
1 Einleitung und Zielsetzung	5
2 Stand der Technik	8
2.1 Widerstandselementschweißen (WES)	8
2.2 Reibelementschweißen (RES).....	9
2.3 Mechanische Fügeverfahren	10
2.3.1 Blindnieten	11
2.3.2 Halbhohlstanznieten.....	12
2.3.3 Vollstanznieten.....	13
2.4 Grundlagen zur Betriebsfestigkeitsanalyse.....	15
2.4.1 Belastungsarten	15
2.4.2 Wöhlerdiagramm.....	15
2.4.3 Der Wöhlerversuch	17
2.4.4 Perlschnurverfahren.....	17
2.4.5 Lasthorizontverfahren	18
2.5 Berechnungskonzepte für Lebensdauerbewertungen	18
3 Versuchsvorbereitung und -durchführung	21
3.1 Versuchswerkstoffe und Werkstoffkombinationen	21
3.2 Füge- und Fertigungseinrichtungen.....	23
3.2.1 Widerstandselementschweißen	23
3.2.2 Reibelementschweißsystem EJOWELD®.....	24
3.2.3 Blindnieten	25
3.2.4 Halbhohlstanznieten mit Sonderniet.....	26
3.2.5 Vollstanznietanlage	27
3.2.6 Kennwertermittlung unter quasistatischer Belastung	29
3.2.7 Kennwertermittlung unter schwingender Belastung	29
3.2.8 Mikrohärtemessgerät Š Ò Q V Z Á %oÖ...!...ã...{...^...c...%o.....	30

3.3	Probengeometrien	31
4	Eigenschaftsanalyse gefügter Verbindungen	35
4.1	Identifikation geeigneter Fügeprozessparameter	35
4.1.1	Widerstandselementschweißen	35
4.1.2	Reibelementschweißen	39
4.2	Festigkeitsuntersuchungen unter quasistatischer Belastung	40
4.2.1	Tragverhalten unter Scherzugbelastung	40
4.2.2	Tragverhalten unter Kopfzug	42
4.2.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse	44
4.3	Detailanalysen der Verbindungszone	46
4.4	Festigkeitsuntersuchungen an Einpunktproben unter zyklischer Belastung ..	48
4.4.1	Vorgehensweise und Versuchsprogramm	48
4.4.2	Tragverhalten bei Lastverhältnis $R=0,1$	49
4.4.3	Tragverhalten bei Lastverhältnis $R=0,8$	56
4.5	Detailanalyse der Anrissbildung	58
4.5.1	Durchführung und Auswertung der Abschaltversuche	58
4.6	Festigkeitsuntersuchungen an bauteilähnlichen Strukturen unter zyklischer Belastung	63
5	Lebensdauerabschätzung auf Basis der Finite-Elemente-Methode	65
5.1	Lokal- bzw. kerbspannungsbasiertes Konzept	65
5.1.1	Vorgehensweise, Modellaufbau und -validierung	65
5.1.2	Berechnungsergebnisse	70
5.2	Radialspannungskonzept (FESPOW)	72
5.2.1	Berechnungsergebnisse für Einpunktproben	74
5.2.2	Berechnungsergebnisse für bauteilähnliche Probe	79
5.2.3	Berechnung einer Master-Wöhlerlinie	81
6	Zusammenfassung und Ausblick	83
7	Literaturverzeichnis	87
8	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Einschätzung des Nutzens für KMU	89

8.1	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzeptes	90
8.2	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaft-lichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	91

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzung	Benennung
MDK	Material-Dicken-Kombination
RES	Reibelementschweißen
WES	Widerstandselementschweißen
VSN	Vollstanznieten
HSN	Halbhohlstanznieten mit Sonderniet
BN	Blindnieten
KTL	Kathodische Tauchlackierung
DIN	Deutsche Industrienorm
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
FEM	Finite-Elemente-Methode
FESPOW	Fatigue Evaluation Spot-Weld
D_{\max}	Differenz der Härte
N_B	Bruchschwingspielzahl
WL	Wöhlerlinie
k	Neigungsexponent
R	Lastverhältnis
SZ / KZ	Scherzug / Kopfzug

Formelzeichen	[Einheit]	Benennung
F_s	N	Elektrodenkraft
I_s	A	Stromstärke
t_s	s	Schweißzeit
\dot{A}	MPa	Spannung
F_A	N	Amplitude
t	mm	Blechdicke
f	Hz	Frequenz

1 Einleitung und Zielsetzung

Vor dem Hintergrund knapper und damit teurer werdender Ressourcen und der Durchsetzung klimapolitischer Ziele zur Verringerung von CO₂-Emissionen mittels gesetzlicher Vorgaben für die Flottenemissionen sind Automobilhersteller bestrebt, den Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch ihrer Neufahrzeuge trotz steigender Kundenanforderungen an Sicherheit, Komfort, Qualität und Langlebigkeit deutlich zu senken. Ein wesentlicher Hebel zur Senkung des Energieverbrauchs im Fahrbetrieb ist die Reduzierung der Gesamtmasse des Fahrzeugs, hier insbesondere der Karosserie als massereichste Komponente eines Fahrzeugs [Goe05]. Zur großserientauglichen und kosteneffizienten Realisierung leichtbauender Strukturen bei gleichzeitigem Erfüllen hoher Anforderungen an Crashesicherheit und Lebensdauer eignet sich der gleichzeitige, belastungsgerechte Einsatz verschiedenartiger Werkstoffe in Form der Mischbauweise [Ame11].

Dabei werden im Bereich der Fahrgastzellen in zunehmendem Umfang ultrahochfeste pressgehärtete Stähle mit Festigkeiten von $R_m > 1000$ MPa verwendet, wodurch unzulässige Verformungen dieses Bereiches im Crashfall, insbesondere im Seitenaufprall, vermieden werden können [Goe05]. Diese Strukturen werden häufig mit Bauteilen aus Aluminium, insbesondere im Vorderwagenbereich und im Beplankungsbereich, kombiniert. Das Fügen eines Aluminiumwerkstoffes mit einem ultrahochfesten Stahlwerkstoff kann durch konventionelle Verfahren nur unter hohem Aufwand, beispielsweise durch Adapterteile aus Stählen mit geringeren Festigkeiten oder durch das Vorlochen des ultrahochfesten Fügepartners, gelöst werden. Auch andere Bereiche des Maschinenbaus stehen vor der Herausforderung, Mischbauweisen mit ultrahochfesten Stählen prozesssicher und kosteneffizient fügen zu können.

Das für Verbindungen von Mischbaustrukturen derzeit dominant eingesetzte Verfahren ist das Stanznieten mit Halbhohlmet. Bei Fügepartfestigkeiten von über 1000 MPa können Sonderniete (z.B. HDX® der Fa. Böllhoff) eingesetzt werden, die jedoch in der Fügeichtung und der Dicke des hochfesten Stahlfügeteiles beschränkt sind. Das Direktverschrauben mit fließlochformender Schraube stößt bei Fügepartfestigkeiten von $R_m > 1000$ MPa auf Schwierigkeiten. Das Vollstanznieten erlaubt nach aktuellem Stand der Forschung das Fügen von pressgehärteten Vergütungsstählen mit Aluminium, jedoch treten teilweise unerwünschte Fügepartdeformationen sowie Problematiken aufgrund der Anfälligkeit der höchstfesten Nietwerkstoffe für Wasserstoffversprödung auf [Hah11a]. Weitere Nachteile sind die notwendige Butzenabfuhr und die hohen Fügekräfte, die eine Roboterintegration von Setzgeräten häufig nicht erlauben [Muc13; Mes13]. Mit den zu erwartenden weiter steigenden maximalen Zugfestigkeiten bei Stahlblechwerkstoffen für den Karosseriebau [vgl. Ove10] sind mechanische

Fügeverfahren, die eine Umformung oder Durchdringung des ultrahöchstfesten Fügepartners benötigen, zunehmend nicht mehr einsetzbar. Zum Fügen entsprechender Verbindungen kann prinzipiell das Blindnieten nach Stand der Technik eingesetzt werden, welches jedoch in beiden Fügeteilen exakt zueinander positionierte Vorlöcher benötigt, was einen hohen Bearbeitungs- und Positionieraufwand darstellt und daher aus Kostensicht für eine automobiler Großserie ein unattraktives Verfahren darstellen kann.

Das Kleben kommt für diese Fügeaufgabe in Frage, jedoch muss ein Fixierverfahren in den Fertigungsablauf integriert werden, um dem Nachteil langer Aushärtezeiten entgegen zu wirken. Eine weitere Möglichkeit stellt das direkte Widerstandspunktschweißen von Aluminium und Stahl dar. Die hierbei auftretenden spröden intermetallischen Phasen und Problematiken in Bezug auf das Anlegungsverhalten des Aluminiums an den Schweißelektroden schränken den prozesssicheren Anwendungsbereich sehr stark ein und bedingen hohen Instandhaltungs- und Wartungsaufwand und verhindern bisher, bis auf wenige Nischenanwendungen, einen Einsatz in Großserie (vgl. dazu auch [Kog11; Neu12]).

Die bisher beschriebenen Verfahren sind demnach allesamt nur eingeschränkt für die beschriebene Fügeaufgabe zum kosteneffizienten Verbinden von Aluminium mit ultrahöchstfesten Stählen einsetzbar. Das Widerstandselementschweißen und das Reibelementschweißen sind vergleichsweise neue Fügeverfahren, die sowohl thermische als auch mechanische Fügeprinzipien kombinieren und sich in hervorragender Weise zum Fügen von Mischbauverbindungen mit einem Fügepartner aus ultrahöchstfestem Stahl eignen, da sie keinerlei Umformbarkeit des ultrahöchstfesten Fügepartners bedürfen. Beide Verfahren basieren auf der Erzeugung einer metallisch-stoffschlüssigen Verbindung zwischen einem Hilfsfügeteil und dem ultrahöchstfesten Fügepartner in Kombination mit der Erzeugung einer kraft- und formschlüssigen Verbindung des Hilfsfügeteiles mit dem artverschiedenen zweiten Fügepartner [Mes13]. Für beide Verfahren existiert bereits eine größere Anzahl sehr ähnlicher Verfahrensvarianten.

Aufgrund der hohen Attraktivität beider Verfahren sind bereits Untersuchungen zur Tragfähigkeit entsprechender Verbindungen unter quasistatischen Lasten durchgeführt worden oder sind Gegenstand aktueller Forschungsprojekte [Mes13]. Dabei wurden Grundlagen hinsichtlich der Beeinflussung der Verbindungsqualität durch die Variation der Prozessparameter geschaffen und die Hilfsfügeteilgeometrie optimiert. In [Hah12b] konnte unter anderem gezeigt werden, dass beim Reibelementschweißen aufgrund der entstehenden zusätzlichen Scherebene unter dem Reibelementkopf gegenüber anderen mechanischen Fügeverfahren deutlich höhere Maximalkräfte und eine höhere Energieaufnahme unter quasistatischem Scherzug erreicht werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Verfahren sowohl thermische als auch mechanische Fügeprinzipien miteinander vereinen, treten in der Fügezone sowohl metallurgische Kerben in Form von prozesswärmebedingten

Gefügeumwandlungen mit entsprechenden, vom Widerstandpunktschweißen à ^ \ æ} } c ^ } Á s P ê | c ^ • ê & \ ^ } %Á æ ~ Ê Á æ | • Á æ & @Á * ^ [Elementgeometrie oder die Sekundärwulstbildung beim Reibelementschweißen. Diese Kerben sowie die in der Fügezone entstehenden Eigenspannungen sind je nach Werkstoffkombination verfahrensbedingt vorhanden und können bei zyklischer Belastung als Rissinitiierungsort dienen.

Aufgrund der Neuheit dieser Verfahren wurden thermisch-mechanisch gefügte Mischbauverbindungen bisher hinsichtlich ihrer Eigenschaften unter schwingenden Beanspruchungen nur unzureichend untersucht, so dass gesicherte Erkenntnisse zum Versagensverhalten und zur Lebensdauerabschätzung entsprechender Verbindungen und Werkstoffkombinationen fehlen. In [Alb12] werden einige Wöhlerlinien ausgewählter reibelementgeschweißter Verbindungen gezeigt. Ebenfalls nur stichprobenartig ist das zyklische Versagensverhalten reibelementgeschweißter Verbindungen in [Hah12b] betrachtet worden. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Verbindungen unter zyklischer Last ein komplexes Versagensverhalten in Bezug auf den Rissinitiierungsort und die Rissausbreitung aufzeigen können.

Zur sicheren Auslegung von Verbindungen ist es jedoch erforderlich, nicht nur den Zeitpunkt des Totalversagens, sondern zusätzlich den Zeitpunkt und Ort der Bildung des technischen Anrisses sowie das Risswachstumsverhalten zu kennen. Aufgrund des komplexen Versagensverhaltens besteht hier seitens der Anwender ein sehr hohes Interesse, diese Sachverhalte zu analysieren. Daher sind die Ermittlung sogenannter Anrisswöhlerlinien sowie die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen (Rest-) Lebensdauer, Risslänge und während des Wöhlerversuchs messbaren Größen ebenfalls zentrale Inhalte dieses Abschlussberichtes und leisten einen wichtigen Beitrag für Anwender hinsichtlich der sicheren Auslegung von thermisch-mechanischen Verbindungen. Ziel des Forschungsprojektes war zudem die Entwicklung eines Konzeptes zur Lebensdauerberechnung thermisch-mechanisch gefügter Mischbauverbindungen aus Aluminiumblechwerkstoffen und ultrahochfesten Stählen, um eine effiziente Auslegung von Bauteilen mit derartigen Verbindungen zu ermöglichen.

2 Stand der Technik

Mit dem Stand der Forschung soll in diesem Kapitel die Basis für ein besseres Verständnis der behandelten Thematik geschaffen werden. Nach einer Erläuterung der Verfahren Widerstandselementschweißen (Kap. 2.1) und Reibelementschweißen (Kap. 2.2) werden anschließend Referenzverfahren der mechanischen Fügechnik beschrieben (Kap. 2.3). In Kap. 2.4 werden die Grundlagen zur Betriebsfestigkeitsanalyse erläutert und in Kap. 2.5 wird eine kurze Übersicht der Berechnungskonzepte wiedergegeben.

2.1 Widerstandselementschweißen (WES)

Im Unterschied zum konventionellen Widerstandspunktschweißen kommt beim Widerstandselementschweißen ein zusätzliches nietähnliches Element, ein sogenanntes Hilfsfügeteil, zum Einsatz. Dieses ist aus einem dem Fügeteilepartner entsprechenden artgleichen Material, z.B. Stahl, gefertigt, sodass die schweißmetallurgische Verträglichkeit gegeben ist. Der grundlegende Prozessablauf ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

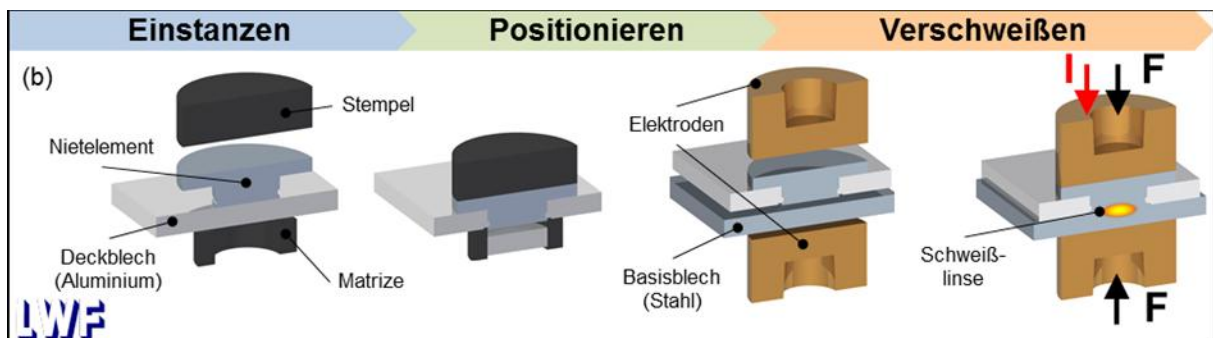


Abbildung 2-1: Darstellung des Widerstandselementschweißens mit Vorkonfektionierung

Beim Widerstandselementschweißen mit Vorkonfektionierung wird das Hilfsfügeteil bereits während oder nach der Bauteilfertigung, zumindest jedoch vor dem Fügen mit dem Basisblech, eingebracht. Dies kann für ein Aluminiumbauteil beispielsweise in einem Stanzprozess oder für ein Bauteil aus faserverstärkten Kunststoffen im Bauteilherstellungsprozess erfolgen. Zum sicheren Einstanzen ist eine gewisse Mindestfestigkeit des Hilfsfügeteiles erforderlich. Eine fertigungstechnische Herausforderung liegt anschließend in der Positioniergenauigkeit der Punktschweißelektroden auf dem vorher eingestanzten Hilfsfügeteil.

Da das Widerstandselementschweißen im Gegensatz zu mechanischen Fügeverfahren keine Umformbarkeit des Basisbleches erfordert, eignet sich das Verfahren durch die Auswahl geeigneter Hilfsfügeteilmaterialien zum Fügen ultrahochfester, pressharter Stähle, ebenso zum Fügen von Complex- und

Dualphasenstählen. Die erste Großserienumsetzung des Widerstandselementschweißens mit Vorkonfektionierung erfolgte in dem Fahrzeug Volkswagen Passat B8. Die Hutablage aus Aluminium wird mit 51 Hilfsfügeteilen mit einem Stahlpartner gefügt (siehe Abbildung 2-2).



Abbildung 2-2: Mittels Widerstandselementschweißen gefügte Hutablage im Volkswagen Passat B8 (Quelle: Volkswagen)

Das Widerstandselementschweißen erfüllt durch die Möglichkeit der Verwendung konventioneller Punktschweißtechnik die Anforderungen der Wirtschaftlichkeit. Es erlaubt, mit derselben Anlagentechnik sowohl klassische punktschweißbare Werkstoffkombinationen, z. B. Stahl-Stahl-Verbindungen als auch Mischbauverbindungen, z. B. Aluminium-Stahl-Verbindungen, zu fertigen [Mey16]. Angesichts steigender Variantenvielfalt in der Automobilindustrie und damit tendenziell geringeren Stückzahlen pro Variante können die benötigten Investitionen für die Fügetechnik erheblich gesenkt bzw. bessere Anlagenauslastungen erzielt werden. Darüber hinaus besteht im Gegensatz zu klassischen zweiseitig wirkenden mechanischen Fügeverfahren mit dem Widerstandselementschweißen auch die Möglichkeit, bei einseitiger Zugänglichkeit, ähnlich dem einseitigen bzw. indirekten Widerstandspunktschweißen, eine Verbindung zu erzeugen. Weitere Konzepte, die das Fügen von Mischbauverbindungen mittels konventioneller Widerstandspunktschweißtechnik und unter Zuhilfenahme von Hilfsfügeteilen verfolgen, sind das Prägeelementschweißen und das Widerstandspunktschweißen mit Stanzelement. Beide Verfahren haben die Zielstellung, das Korrosionsrisiko durch einen mediendichten Abschluss des Fügepunktes zu verringern [MP15; KKN+15].

2.2 Reibelementschweißen (RES)

Das Reibelementschweißen nutzt, ähnlich dem Widerstandselementschweißen, ein Hilfsfügeteil um Verbindungen zwischen zwei artfremden Materialien, wie beispielsweise Aluminium und Stahl, herzustellen. In Anlehnung an das Rotationsreibschweißen, bei welchem die Reibwärme zum stoffschlüssigen Verbinden zwischen zwei Bauteilen erzeugt wird, erfolgt die Reibwärmeeinbringung zwischen dem Hilfsfügeteil und den Bauteilen. Das im Rahmen der Untersuchungen

verwendete EJOWELD®-Verfahren wird im AUDI Q7 (Modell 2015) zum Fügen des Bodenbleches an die Tunnelverstärkung sowie des Federbeindoms an die Stirnwand eingesetzt. Der schematische Verfahrensablauf ist in der Abbildung 2-3 dargestellt.

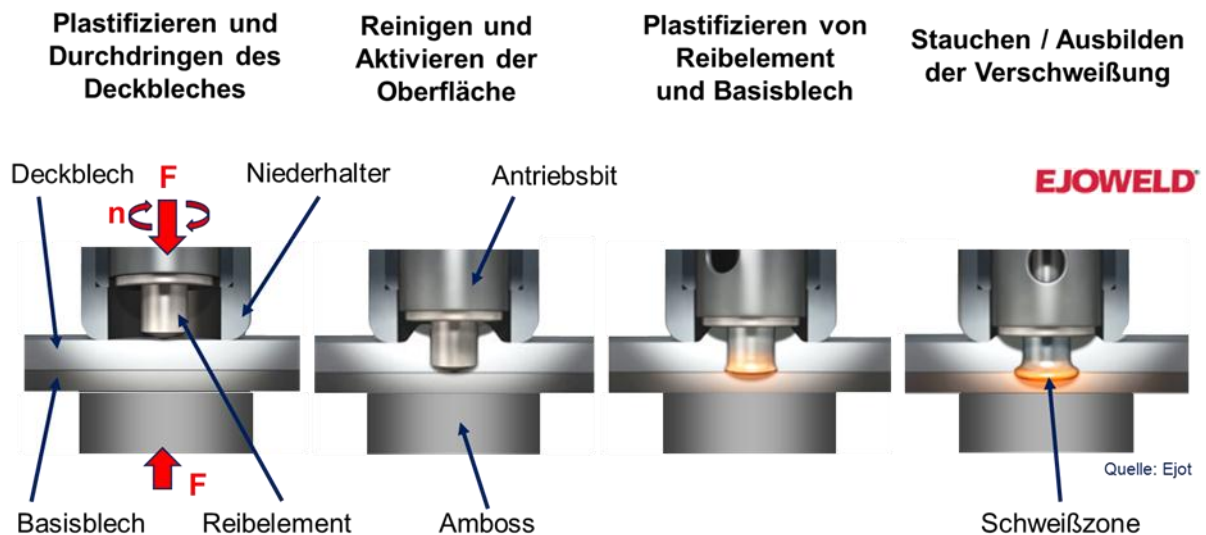


Abbildung 2-3: Darstellung des Reibelementschweißens (Quelle: EJOT)

Zunächst müssen die zu verbindenden Bleche zueinander positioniert und das Reibelement zugeführt werden. Die gewünschte Position wird durch das Aufpressen des Niederhalters fixiert. Die Spindel fährt nun zusammen mit dem Reibelement auf das Bauteil zu, bis das Reibelement mit dem Deckblech in Kontakt steht. Die Spindel wird mit bis zu 9.000 U/min. in Rotation versetzt und drückt das Reibelement mit bis zu 10 kN langsam in das Deckblech hinein, wobei sich das verdrängte Material am Schaft des Elementes zu einem Wulst ausformt. Die Ringnut unterhalb des Nietkopfes ist so ausgeprägt, dass das verdrängte Material darin Platz findet. Sobald das Reibelement unter den genannten Bedingungen auf das Grundblech trifft, kommt es in der Fügezone zu einer thermischen Aktivierung und Reinigung durch die Verdrängung des sich plastifizierenden Elementwerkstoffes.

Noch während der Reib- und Anpressphase bzw. der Anpassung des Fügedrucks wird das Reibelement verkürzt. Der dabei verdrängte Reibelementwerkstoff formt so einen Wulst aus und drängt das darüber liegende Material des Deckbleches weiter in die Ringnut unterhalb des Reibelementkopfes. Die dabei auftretenden Klemmkkräfte infolge der Schaftschrumpfung aufgrund der Abkühlung des Reibelementes sorgen so für eine form- und kraftschlüssige sowie unlösbare Verbindung [Bar10].

2.3 Mechanische Fügeverfahren

Um eine Vergleichbarkeit der Schwingfestigkeitskennwerte der thermisch-mechanischen Fügeverfahren zu ermöglichen, sind zusätzliche Wöhlerversuche an mechanisch gefügten Proben vollzogen worden. Im Folgenden werden daher die

Verfahren Blindnieten, Halbhohlstanznieten mit Sonderniet und Vollstanznieten in ihren Grundzügen beschrieben.

2.3.1 Blindnieten

Beim Blindnieten (BN) handelt es sich um einen mehrstufigen Prozess, bei welchem durch Umformen des Nieteles eine unlösbar Verbindung ausgebildet wird. Durch die Kombination aus Form- und Kraftschluss überträgt dabei das Nietelespielfrei die Kräfte zwischen den Fügeteilen. Die wesentlichen Bestandteile eines Blindnietes sind der Nietdorn und die Niethülse. Der Setzkopf befindet sich auf der Verarbeitungsseite und ist in Form und Größe variabel. Abbildung 2-4 zeigt den Aufbau eines hülsenfaltenden Blindnietes sowie wichtige geometrische Kenngrößen.

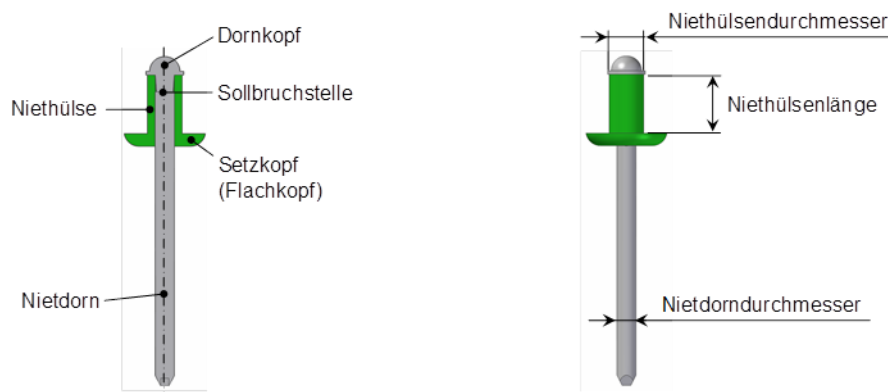


Abbildung 2-4: Aufbau eines Blindnietes (Hülsenfaltes) und wichtige geometrische Kenngrößen

Die Fügepartner müssen zuerst vorgelocht werden, bevor das Nieteles eingeführt werden kann. Diese Vorlochoption erfordert eine Tolerierung der Löcher am jeweiligen Fügeteil, um einen Versatz dieser zueinander zu vermeiden. Für eine dauerhafte und sichere Verbindung sollten Nietmaterial, Nietdurchmesser und Nietlänge auf den Fügeteilwerkstoff, dessen Geometrie und die Belastung angepasst werden. Beim konventionellen Blindnieten müssen die zu fügenden Bauteile durch Bohren oder Stanzen axial gelocht werden. Der Durchmesser der Bohrung wird entsprechend des Nietdurchmessers gewählt. Anschließend wird der Niet in die Bohrung eingesetzt und mit einer Nietzange der Nietdorn gezogen. Durch die gesteigerte Kraft beginnt je nach Niettyp der Dornkopf die Niethülse zu weiten oder zu falten, bis der Nietdorn nach dem Erreichen eines Kraftmaximums abreißt. Blindnieten kommt üblicherweise zum Einsatz, wenn die Fügestellen nur einseitig zugänglich sind.

Im Laufe der Jahre wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Blindnietausführungen entwickelt. Generell wird das Blindnieten als etablierte und prozesssichere Fügetechnik seit langer Zeit bei anspruchsvollen Fügeaufgaben verwendet. Aufgrund seiner einfachen Handhabung ermöglicht es einen kostengünstigen und vor allem

flexiblen Fertigungsprozess. Mit über 200 unterschiedlichen Blindnietvarianten, steht dem Anwender zudem ein breites Angebot unterschiedlicher Eigenschaftsprofile zur Verfügung. Dadurch lassen sich wirtschaftliche Verbindungen für eine Vielzahl von Problemstellungen realisieren. Besonders vorteilhaft erweist sich das Verfahren auf dem Gebiet profilintensiver Bauweisen mit Aluminiumtragrahmen. Hier kann bei hoher Prozesssicherheit eine hohe Verbindungsfestigkeit mit Hilfe der Blindnietechnik erreicht werden [DL04]. Aufgrund geringer Montagekosten werden Blindnietssysteme zum Teil auch bei beidseitig zugänglichen Bauteilen eingesetzt [WFS+10].

Der große Nachteil beim Blindnieten ist der mehrstufige Prozess. Bedingt durch das Verfahrensprinzip müssen die Fügeteile vorgelocht werden, wobei die Lage dieser Löcher selbst und zueinander entsprechend eng toleriert sein muss, damit kein Versatz entsteht, der das Einführen des Nitelementes behindert. Neben der genauen Vorlochung der Fügeteile stellt die exakte Fügeteil- und Werkzeugpositionierung eine weitere Herausforderung in der automatisierten Fertigung dar, so dass das Blindnieten in der Großserienfertigung häufig als nicht wirtschaftlich eingestuft wird [Dra06].

2.3.2 Halbhohlstanznieten

Das Halbhohlstanznieten (HSN) mit Sonderniet, wie dieses z.B. von der Fa. Böllhoff mit dem HDX® entwickelt wurde, zählt zu den mechanischen Fügeverfahren mit zweiseitiger Zugänglichkeit. Im Gegensatz zu vielen anderen Fügeverfahren benötigt das HSN keine Vorlochoperationen und ist, aufgrund der entfallenden strengen Positioniergenauigkeiten, gut in der automatisierten Fertigung einsetzbar. Das Verfahren ist nach DIN 8593 in die Fertigungsverfahren Fügen Teil 5, Fügen durch Umformen eingeteilt [DIN8593-5]. Der Prozessverlauf des Halbhohlstanznietens ist in Abbildung 2-5 dargestellt.

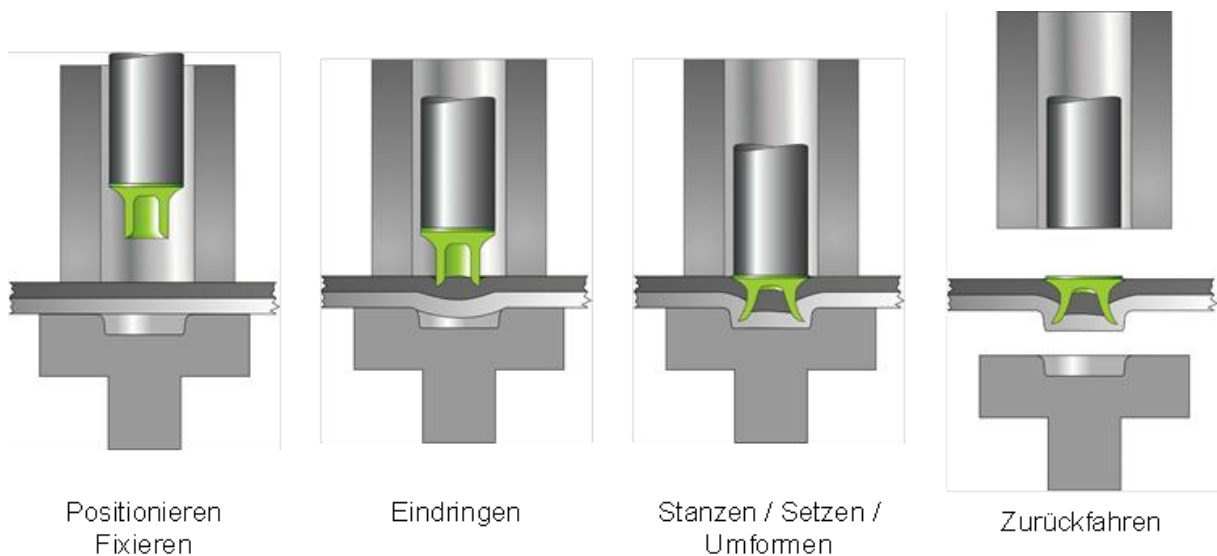


Abbildung 2-5: Darstellung des Halbhohlstanznietens

Die zu fügenden Blechteile werden im ersten Prozessschritt positioniert und mit Hilfe des Niederhalters fixiert. Durch die aufgebrachte Niederhaltekraft wird eine Aufspreizung der Fügeteile verhindert. Im nächsten Schritt, dem Stanzvorgang, treibt der Stempel den Niet vor sich her und dringt in die Bleche ein. Nachdem der Niet eingedrungen ist, folgt der dritte Verfahrensschritt, wobei der Niet das erste Blech vollständig durchstanzt hat und nun mit Hilfe der Matrize und dem matrizenseitigem Blech so umgeformt wird, dass sich mindestens ein Hinterschnitt ausbildet [DVS1]. Für das Hilfsfügeteil, den Halbhohlstanzniet, bedeutet das, dass es ausreichend hart zum Durchstanzen des stempelseitigen Fügeteils sein muss und ausreichend duktil, um die entsprechende Verspreizung im matrizenseitigen Fügeteil über sich ergehen zu lassen. Durch die Umformungen des Nietes, sowie der beiden Fügeteile, wird ein spalt- und rissfreier Formschluss angestrebt. Dieser ist mediendicht, da das zweite Fügeteil ausschließlich umgeformt und nicht durchstanzt wird [DVS1]. Bei einer nicht optimal ausgerichteten Anordnung von Niederhalter und Matrize können unerwünschte Winkel- sowie Lateralversätze auftreten.

2.3.3 Vollstanznieten

Das Vollstanznieten ist ein Fügeverfahren und ist als solches in der DIN 8593 eingeordnet. Dort ist das Fügeverfahren in der Gruppe 4.5 zu finden, Fügen durch Umformen, welche in verschiedene Untergruppen unterteilt ist. Das Vollstanznieten wird hier in der Untergruppe 4.5.3, Fügen durch Nietverfahren, geführt. Zusätzlich wird das Vollstanznieten über das DVS-T ^ | \ à | æ c c Á H I F € Á š ù c æ } ä & ã A geregelt. Der Fügeprozess beim Vollstanznieten ist in Abbildung 2-6 gezeigt und lässt sich in vier Schritte gliedern.

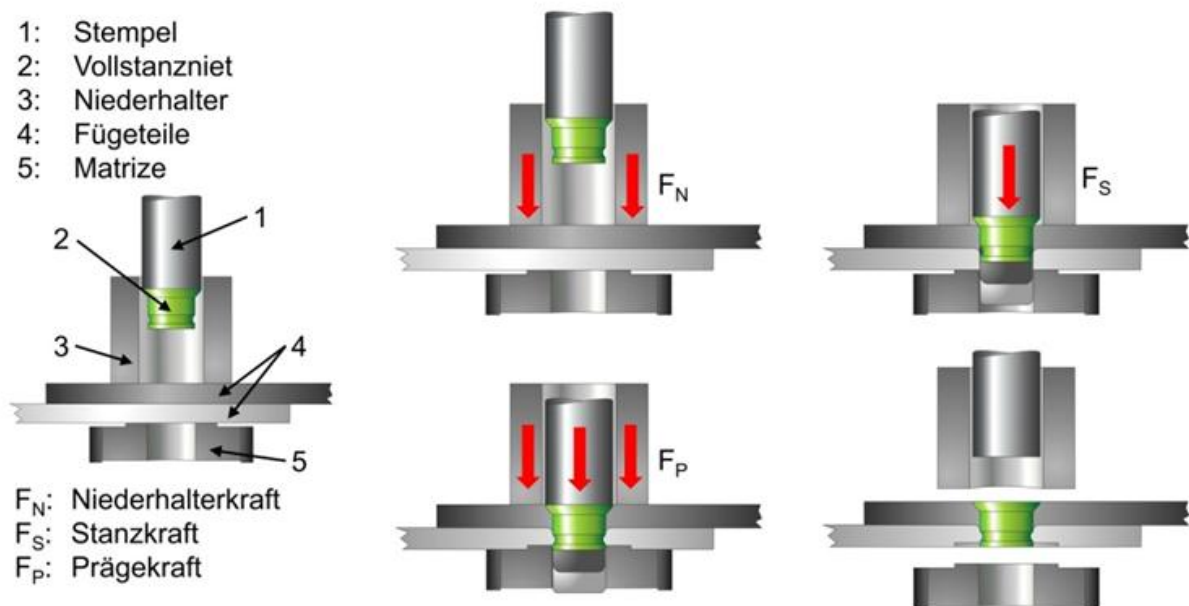


Abbildung 2-6: Darstellung des Vollstanznietens nach [DVS1]

Im ersten Schritt werden die Fügeteile positioniert und mit dem Niederhalter vorgespannt. Im zweiten Schritt fährt die Nietnadel bzw. der Stempel vor und bringt damit die Stanzkraft auf den Vollstanzniet auf, der in diesem Prozessschritt als Schneidstempel fungiert. Der Vollstanzniet durchstanzt die Fügeteile und der Stanzbutzen wird durch die Matrize abgeführt. Im dritten Prozessschritt erfolgt das Verprägen. Hierbei bringen Stempel und Niederhalter gemeinsam Kraft auf und verfahren miteinander gekoppelt in Richtung der Fügeteile. Dabei werden die Materialien auf den Prägering der Matrize gepresst. Dadurch wird im Material des matrizenseitigen Fügeteils die Fließspannung überschritten und der Prägering der Matrize wird in das Material eingeformt, wodurch der Werkstoff in die Ringnut des Vollstanznietes verdrängt wird. In dem letzten, dem vierten Schritt fahren der Stempel und der Niederhalter wieder gemeinsam zurück und geben damit die Verbindung frei [DVS1].

Die qualitätsentscheidenden Merkmale des Verfahrens sind die Spaltfreiheit zwischen Niet und Fügeteilen sowie der erreichte Füllgrad der Ringnut, beide sind aber nur im Schliff zu beurteilen. Der Füllgrad korreliert mit dem verdrängten Material, dessen Menge sich durch den Durchmesser und die Höhe des Prägerings beziehungsweise durch die Tiefe des Prägeringabdrucks beeinflussen lässt. Um diesem Punkt Rechnung zu tragen, werden entsprechend verschiedene Matrizen mit unterschiedlichen Prägeringdurchmessern und Prägeringhöhen genutzt. Die Tiefe des Prägeringabdrucks kann über die Prägekraft beeinflusst werden. Die Einsatzgrenzen des Vollstanznietens werden durch die Festigkeiten der Werkstoffe vorgegeben, stempelseitig sind Werkstoffe mit Zugfestigkeiten bis 1600 MPa möglich und matrizenseitig bis zu 1000 MPa [HS10].

2.4 Grundlagen zur Betriebsfestigkeitsanalyse

Grundlage der hier untersuchten Problemstellung ist die Betriebsfestigkeitsanalyse. Dabei ist es das Ziel, aussagefähige Daten zu einem Werkstoff oder, wie hier, zu einer Werkstoffkombination bzw. dessen Verbindung zu ermitteln, um daraus das Versagensverhalten unter wechselnder Belastung bestimmen zu können. Das Versagensverhalten beschreibt hierbei eine zyklisch angelegte Spannung gegenüber der Schwingspielzahl, welche in einem Wöhlerdiagramm dargestellt wird.

2.4.1 Belastungsarten

Eine schwelende Belastung bezeichnet die Auslenkung der Belastungsamplituden entweder in Zug- oder Druckrichtung. Bei einer Wechselbelastung werden von einem Schwingspiel beide Bereiche gleichermaßen durchfahren.

2.4.2 Wöhlerdiagramm

Anhand der folgenden Abbildung 2-8 sollen die Zusammenhänge im Rahmen einer Betriebsfestigkeitsanalyse sowie die Begriffe aus dem vorangegangenen Abschnitt anhand eines Wöhlerdiagramms für Stahlwerkstoffe verdeutlicht werden:

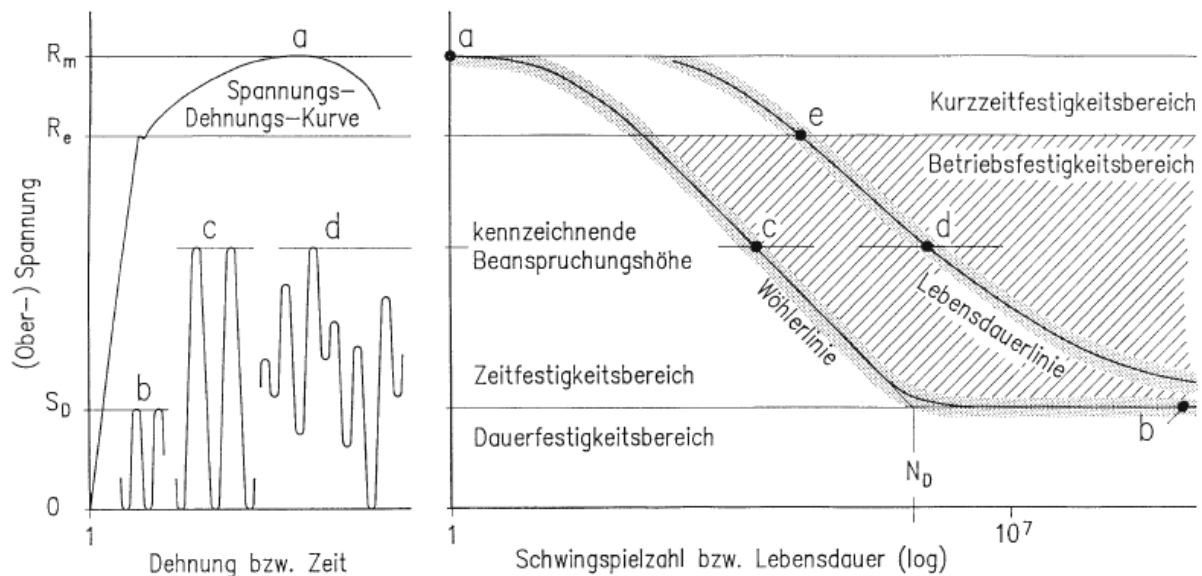


Abbildung 2-7: Spannungs-Dehnungs- und Wöhlerdiagramm für Stahlwerkstoffe [Hai06]

Der Zugversuch ist die grundsätzliche Ausgangsbasis für ein Wöhlerdiagramm bzw. die Ermittlung einer Wöhlerkurve. Im Spannungsdehnungsdiagramm (linkes Diagramm in Abbildung 2-7) sind verschiedene Spannungsverläufe dargestellt. Verlauf b und c stellen dabei zwei Spannungsverläufe mit konstantem Lastverhältnis

dar. Das Lastverhältnis R beschreibt das Verhältnis der Ober- zur Unterspannung. Spannungsverlauf d zeigt einen Schwingspielverlauf mit verändertem Lastverhältnis. Für letzteres kann mit einem Lastkollektiv die Bauteillebensdauer bestimmt werden. Im Wöhlerdiagramm (siehe rechts in Abbildung 2-7) können verschiedene Bereiche definiert werden. Das Wöhlerdiagramm unterscheidet sich zum Spannungs-Dehnungsdiagramm in der Art, dass auf der x-Achse nicht die Dehnung sondern die Schwingspielzahl gegenüber der auferlegten Spannung aufgetragen ist. Im oberen Bereich des Diagramms findet sich der Kurzzeitfestigkeitsbereich, in welchem die Beanspruchungshöhe nur wenige Male vom Bauteil ertragen werden kann. Darunter befindet sich der Zeit- oder Betriebsfestigkeitsbereich. In diesem Bereich werden zum Beispiel Krananlagen dimensioniert, wobei deren Belastung mit jedem Hub ermittelt und zu einer Gesamtbelastung zusammengerechnet wird, um ihre Lebensdauer zu bestimmen. So können in diesem Bereich auch statistische Berechnungen zu einer Lebensdauer- und Schädigungsbeurteilung eines Bauteils herangezogen werden. Der darunterliegende Dauerfestigkeitsbereich ist dadurch gekennzeichnet, dass ein Bauteil unterhalb dieser Spannung theoretisch einer unbegrenzten Schwingspielzahl standhält und quasi keine Schädigung mehr erfährt. Das Wöhlerdiagramm wird in der Regel doppellogarithmisch dargestellt, da sich so die drei Bereiche besser voneinander abgrenzen lassen. Der Zeitfestigkeitsbereich wird zudem so in eine Gerade überführt, was die Lebensdauerberechnung in diesem Bereich wesentlich vereinfacht und den Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich besser voneinander abgrenzen lässt.

Hier ist ein wesentlicher Unterschied zu Aluminiumwerkstoffen zu nennen, da diese im Bereich der Dauerfestigkeit von Stahlwerkstoffen, wie bereits erwähnt, eine abknickende Wöhlerlinie aufweisen. Sie besitzen daher keinen Dauerfestigkeitsbereich und erfahren theoretisch bei jeder Belastung eine lebensdauerverringende Werkstoffschädigung.

Die Auswertung der ermittelten Versuchsdaten kann anhand definierter Untersuchungsschwerpunkte nach Bedarf angepasst werden. Es empfiehlt sich jedoch anhand einer Streugeraden der Versuchswerte, Überlebenswahrscheinlichkeiten zu definieren, um daraus statistisch ertragbare Schwingspielzahlen und Spannungen bestimmen zu können. Es hat sich bei einem Versuchsumfang von je 10 Versuchen je Prüfhorizont als sinnvoll herausgestellt, als untere Grenze eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 90% anzunehmen. Dies besagt, dass eine Probe diese Schwingspielzahl unter der angenommenen Spannung zu 90% oder mehr erreicht. Äquivalent wird als Obergrenze eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 10% angenommen.

Ein statischer Zugversuch zur Ermittlung der Maximalkräfte dient dabei als eine gute Orientierungshilfe in welcher Höhe das erste Lastniveau gewählt werden sollte um den Beginn des Zeitfestigkeitsbereichs zu treffen.

2.4.3 Der Wöhlerversuch

Ziel des Wöhlerversuchs ist das Ermitteln einer Wöhlerlinie, wonach im Anschluss eine Betriebsfestigkeitsanalyse und Bauteilbemessung vorgenommen werden kann, um ein kritisches Bauteilversagen vorherzusehen und zu vermeiden. Dazu werden entsprechende Proben in eine sogenannte Resonanzprüfmaschine oder einen Servopulser fest eingespannt. Eine Seite der Probeneinspannung ist dabei starr mit dem Maschinenbett verbunden. An der anderen Probenseite wird ein Gewicht befestigt, welches mit Hilfe eines Erregermotors die Probe in eine sinusförmige Eigenschwingung versetzt. Die Schwingfrequenz wird kontinuierlich aufgezeichnet und ist charakteristisch für die Probensteifigkeit. Sobald in der Probe bzw. im Werkstoff eine Schädigung auftritt ändert sich simultan die Probensteifigkeit, was eine Änderung der Eigenfrequenz zur Folge hat. Schon ein geringer Frequenzabfall ist daher ein Zeichen für eine hervorgerufene Schädigung im Werkstoffinneren. Die Lastamplitude sowie das Last- bzw. Spannungsverhältnis von der Unterspannung zur Oberspannung bleibt dabei über den gesamten Versuch konstant.

Eine andere Möglichkeit der maschinellen Probenprüfung bieten die servomotorischen Prüfmaschinen. Diese haben über ihren servomotorischen oder auch servohydraulischen Antrieb die Möglichkeit, auch andere Amplitudenverläufe wie Sägezahn, Dreieck etc. der Probe aufzuerlegen. Ein wesentlicher Vorteil ist jedoch, dass die Prüflast und somit das Lastverhältnis ohne einen Eingriff in den maschinellen Aufbau variiert werden kann und somit dynamische Schwingspiele durchfahren werden können. So lassen sich z. B. reale Schwingbeanspruchungen eines Bauteils unter Laborbedingungen nachstellen und das Versagensverhalten untersuchen. Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes untersuchten Proben wurden stets mit konstantem Lastverhältnis und in einer sinusförmigen Schwingungsausprägung mit schwellendem Lastverlauf geprüft.

Zur Ermittlung einer gesamten Wöhlerlinie sind mehrere Wöhlerversuche mit unterschiedlichen Belastungen notwendig. Nach [DIN50100] wird ein Vorgehen empfohlen, wonach ca. 10 absolut gleiche Proben in zweckmäßig unterschiedlichen Versuchen hinsichtlich der Schwingbeanspruchung unterzogen und deren Anriss- oder Bruchschwingspielzahl ermittelt wird. Zweckmäßig dabei ist es, je eine Probe bei hoher Schwingspiellast und eine bei niedriger Schwingspiellast bis zu einer festgelegten Schwingspiellast zu prüfen, um den Dauerfestigkeitsbereich abzuschätzen. Es gibt diverse Varianten, wie die Proben untersucht werden. Hier soll sich auf die meist verwendeten Vorgehensweisen, dem Perlschnur- und Lasthorizonteverfahren, beschränkt werden.

2.4.4 Perlschnurverfahren

Das Perlschnurverfahren ist bei Zeitmangel oder einer geringen Probenanzahl sehr vorteilhaft. Jede Probe wird gezielt bei einem bestimmten Lastniveau geprüft. Das

Lastniveau wird für jeden Versuch solange reduziert, bis ein Durchläufer geprüft wird. Es gibt also nur wenige Versuchsdaten bei identischem Lasthorizont, womit die Streubandbreite nicht genau klassifiziert werden kann. Daher bietet es sich an, die Versuchsdaten mit Hilfe des Lasthorizontverfahrens gezielt zu ergänzen.

2.4.5 Lasthorizontverfahren

Beim Lasthorizontverfahren werden gezielte Lastniveaus, möglichst in Anlehnung an die Lastniveaus aus dem Perlschnurverfahren, angesteuert um die Streubandbreite bestimmen zu können und so weitere Versuchsdaten zu erhalten. Empfehlenswert sind mindestens drei Versuche pro Lasthorizont um ein Streuband abschätzen zu können.

2.5 Berechnungskonzepte für Lebensdauerbewertungen

Ziel eines Berechnungskonzeptes ist es, Versuche an Realbauteilen zu minimieren bzw. überflüssig zu machen. Für die Festigkeitsbewertung von geschweißten, vor allem Metall-Schutzgasgeschweißten Bauteilen existieren verschiedene Konzepte zur Lebensdauerberechnung bzw. zum Betriebsfestigkeitsnachweis, vgl. [Mor06]. Exemplarisch sind diese in Abbildung 2-8 gegenübergestellt.

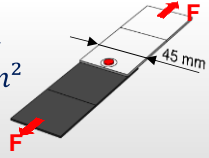
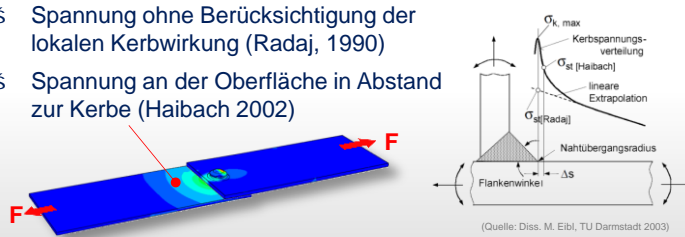

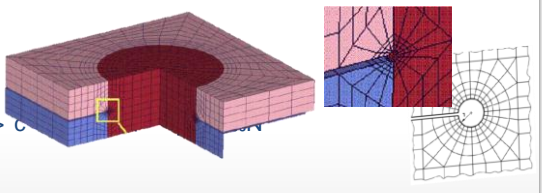
<p>Nennspannungskonzept</p> <ul style="list-style-type: none"> § Analytische Berechnung und Auslegung § Nur geeignet für definierte Kerbfälle $\sigma_{max} = \alpha_k \cdot F/A$ $A_{SZ} = t \times 45 \text{ mm}^2$ $\alpha_k = ? \quad \beta_k = ?$ 	<p>Strukturspannungskonzepte</p> <ul style="list-style-type: none"> § Spannung ohne Berücksichtigung der lokalen Kerbwirkung (Radaj, 1990) § Spannung an der Oberfläche in Abstand zur Kerbe (Haibach 2002)  <p>(Quelle: Diss. M. Eibl, TU Darmstadt 2003)</p>
<p>Bruchmechanische Konzepte</p> <ul style="list-style-type: none"> § Spannungsintensitätsfaktoren (SIF) und Rissfortschritte § Sehr hoher Berechnungsaufwand § Bislang mäßige Anwendbarkeit für Widerstandspunktschweißverbindungen 	<p>FESPOW-Modell nach Rupp für Widerstandsschweißpunkte</p> <ul style="list-style-type: none"> § Modellierung der Fügeiteile durch Schalenelemente, in der Schweißpunktmitte durch Balkenelement verbunden § Berechnung von Radialspannungen, z.B. $\sigma_{r,max} = F_{x,y}/\pi ds$  <p>Zhang, 2001</p>
<p>Kerbspannungskonzept (Beispiel)</p> <ul style="list-style-type: none"> § Detaillierte Modelle mit Volumenelementen, jedoch 100%ige Abbildung der realen Kerbe nicht möglich § Zulässige Vereinfachungen der Kerbgeometrie? § Notwendige Netzfeinheit? § Zielführende Größen? (von-Mises, Hauptspannung, ...) è Berechnung der Spannungsverteilung gekerbter Strukturen vor einer Schädigung è Keine bzw. nur bedingt Aussage über Lebensdauer nach Anriss  <p>Detailmodell der Verbindungszone eines Widerstandsschweißpunkts mit kleiner Elementkantenlänge</p> <p>Detaillierungsgrad, Radius, Elementtypen in der Kerbe?</p> <p>(Bildquellen: de Bryune / Hoppe 2006)</p>	

Abbildung 2-8: Übersicht und Beschreibung verschiedener Lebensdauerberechnungskonzepte

Das Nennspannungskonzept ist Bestandteil vieler Regelwerke, die beispielsweise im Stahl-, Anlagen- oder Schiffsbau verwendet werden. Es basiert im Wesentlichen auf der analytischen Berechnung der Nennspannungen im Querschnitt und lässt sich bei geometrisch bekannten Kerbstellen und einfachen Geometrien und Belastungen einsetzen. Struktur- und Kerbspannungs- sowie Kerbdehnungskonzepte erlauben, ebenso wie Bruchmechanikkonzepte, eine deutlich detailgenauere Festigkeitsanalyse gekerbter bzw. geschweißter Bauteile.

Für die Berechnungen an klassischen Schweißnähten im Dickblechbereich liegen zahlreiche Konzepte, Ergebnisse und Erfahrungswerte bezüglich der Anwendung der unterschiedlichen Methodiken vor. Für punktförmige Verbindungen aus artverschiedenen Feinblechwerkstoffen, beispielsweise Stanzniet- oder Clinchverbindungen, liegen dagegen vergleichsweise wenig Daten, Auslegungsrichtlinien und Erfahrungswerte in der wissenschaftlichen Fachliteratur

vor. Für Widerstandselement- und Reibelementschweißverbindungen liegen aufgrund der Neuheit der Verfahren keine öffentlich zugänglichen Berechnungskonzepte vor. Diese werden jedoch benötigt, wenn die Verfahren in Mischbaukarosserien in zunehmendem Umfang eingesetzt werden sollen.

Eine Fahrzeugkarosserie weist heute mehrere Tausend Fügstellen und sehr komplexe Geometrien auf, sodass zur Berechnung von Crash-, NVH- oder Betriebsfestigkeitsnachweisen numerische Methoden, wie die Finite-Elemente-Methode, zum Einsatz kommen muss. Anfang und Mitte der 1990er Jahre wurden grundlegende Arbeiten auf dem Gebiet der Betriebsfestigkeitsberechnung von Punktschweißverbindungen in Fahrzeugkarosserien und Karosseriekomponenten geleistet.

Aufgrund zahlreicher Auslegungslastfälle mit großen plastischen Verformungen, wie beispielsweise Crashberechnungen, erfolgt die numerische Abbildung von komplexen Karosseriestrukturen in der Regel vereinfacht durch Schalenelemente, wobei die Elementkantenlänge heute typischerweise im Bereich 2 - 7 mm liegt.

Punktförmige Blechverbindungen, wie sie auch in diesem Forschungsprojekt betrachtet werden, lassen sich in derartigen Modellen nicht detailliert abbilden, weshalb auf Ersatzmodelle zurückgegriffen werden muss. Ein solches Ersatzmodell kann beispielsweise ein Balkenelement sein, das die Netzknoten von zwei mit Schalenelementen abgebildeten Bauteilen miteinander in Beziehung setzt und Kräfte und Momente übertragen kann.

Das maßgeblich von Rupp entwickelte FESPOW-Modell wurde für die Lebensdauerabschätzung von Widerstandsschweißpunkten erfolgreich angewendet. Dabei werden aus den Schnittkräften in einer Punktschweißverbindung über analytische Formeln die sogenannte Radialspannung und die Risslage im Blech berechnet. Unter zyklischer Belastung weisen Schweißpunkte üblicherweise einen Anriss in der Verbindungsebene aufgrund der Spannungsüberhöhung am Schweißpunktrand auf. Die Radialspannung an dieser Stelle wird als somit als schädigungsrelevanter Wert angenommen. Somit lassen sich unterschiedliche äußere Belastungen über die Radialspannung vergleichen.

Für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens betrachteten Verfahren sollen sowohl ein kerbspannungsbasiertes Konzept als auch das FESPOW-Konzept bezüglich einer möglichen, wirtschaftlichen Einsetzbarkeit zur Auslegung thermisch-mechanisch gefügter Verbindungen überprüft werden.

3 Versuchsvorbereitung und -durchführung

In diesem Kapitel werden die bei den Untersuchungen eingesetzten Versuchswerkstoffe und Werkstoffkombinationen (Kap. 3.1), Füge- und Fertigungseinrichtungen (Kap. 3.2) sowie in Kap. 3.3 die verwendeten Probengeometrien vorgestellt.

3.1 Versuchswerkstoffe und Werkstoffkombinationen

Für die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden Blecherzeugnisse aus dem Stahlwerkstoff 22MnB5+AS150 in Kombination mit dem Aluminiumwerkstoff EN AW-6016 für die Probenherstellung verwendet. In Tabelle 3-1 sind die verwendeten Material-Dicken-Kombinationen sowie in Abbildung 3-1 die Spannungs-Dehnungs-Kurven für die eingesetzten Materialien dargestellt.

Tabelle 3-1: Kurzbezeichnung der Material-Dicken-Kombinationen (MDK)

	MDK1	MDK2	MDK3
Deckblech EN AW-6016-T4/T6*	2,0 mm	1,2 mm	2,0 mm
Basisblech 22MnB5+AS150, PH	1,5 mm	1,5 mm	1,0 mm

*gefügt stets im Zustand T4, geprüft stets im Zustand T6 (180°C, 30 min)

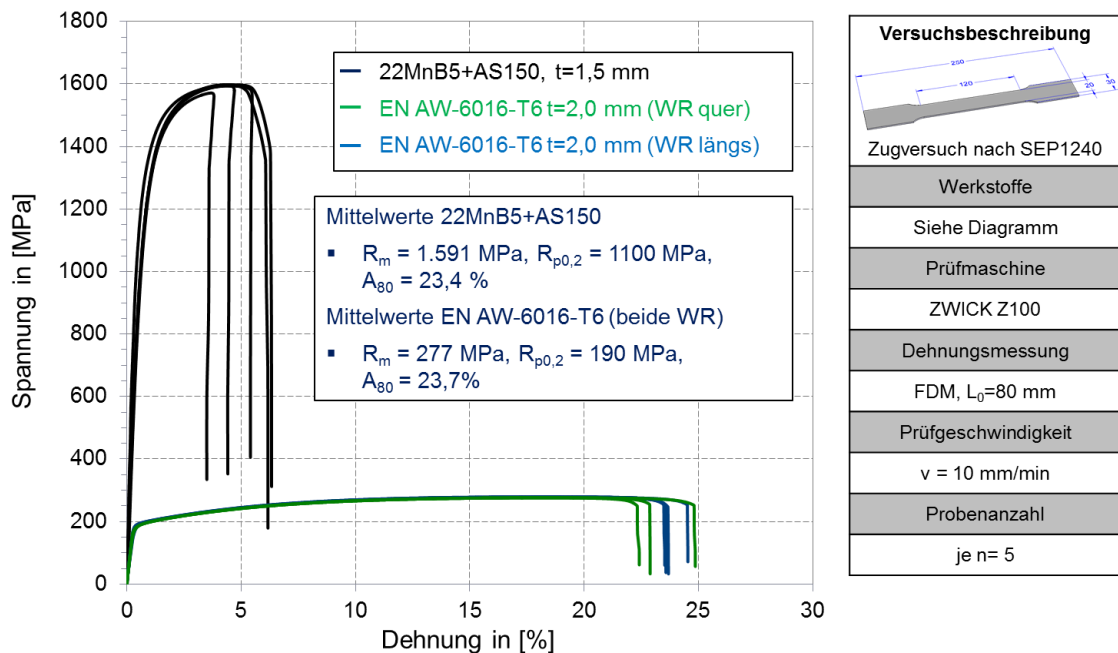


Abbildung 3-1: Spannungs-Dehnungs-Kurven für die verwendeten Materialien

Mangan-Bor-Stahl 22MnB5+AS150

Der Werkstoff 22MnB5+AS150 erhält seine mechanischen Eigenschaften während des Formgebungsprozesses, bei dem durch Abschrecken aus dem austenitisiertem Werkstoff ein martensitisches Gefüge mit hoher Festigkeit erzeugt wird. Dieser Prozess bzw. diese Prozessvariante wird als direktes Presshärten bezeichnet. Bei größeren Umformungen treten im KTL-Trocknungsprozess (180° C, 30 min) Bake-Hardening-Effekte auf. Da die gefügten Mischbauproben zur Aushärtung des Aluminiumwerkstoffes einer entsprechenden Wärmebehandlung unterzogen werden, ist dieser Effekt in der Versuchsdurchführung ebenfalls berücksichtigt.

Die folgende Tabelle 3-2 enthält die chemische Zusammensetzung des presshärtbaren Stahlwerkstoffes *USIBOR 1500*, der einem 22MnB5+AS150 entspricht.

Tabelle 3-2: Chemische Zusammensetzung *USIBOR 1500* [NP12]

Legierungselement	C	Mn	Si	Ni	Cr	Cu
Masse-%	0,221	1,29	0,28	0,013	0,193	0,01
Legierungselement	S	P	Al	V	Ti	B
Masse-%	0,001	0,018	0,032	0,005	0,039	0,0038

EN AW-6016

Der Werkstoff EN AW-6016 ist eine durch Wärmebehandlung aushärtbare Aluminiumknetlegierung. Diese Legierung besitzt im Lieferzustand T4 eine sehr gute Umformbarkeit bei geringen Festigkeitswerten. Um den ausgehärteten Zustand T6 zu erreichen, wurden im Anschluss an den Fügeprozess die Proben zusammen mit dem Grundblech zur Aushärtung für 30 min. bei einer Temperatur von 180°C in einem Ofen Wärmebehandelt. Das entspricht der Wärmebehandlung, welche eine Automobilkarosserie im Tauchbad-Lackier-Prozess (KTL) durchläuft.

In der folgenden Tabelle 3-3 sind die chemischen und mechanischen Eigenschaften bezogen auf den jeweiligen Werkstoffzustand T4 bzw. T6 zusammengestellt.

Tabelle 3-3: Chemische und mechanische Eigenschaften EN AW-6016 [STN15]

Legierungselement	Si	Mg	Mn	Cu	Fe	Zn
Masse-%	1-1,5	0,25-0,6	< 0,2	< 0,2	< 0,5	< 0,2
Mechanische Eigenschaft	Zugfestigkeit R_m [MPa]		Streckgrenze $R_{p0,2}$ [MPa]		Max. Dehnung	
Zustand T4 / T6	T4	T6	T4	T6	T4	T6
	170-250	260-300	80-140	180-260	24%	10%


3.2 Füge- und Fertigungseinrichtungen

Die Durchführung der Arbeiten erfolgte an unterschiedlichen Füge- und Fertigungseinrichtungen, welche in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt und deren technische Daten und Eigenschaften vorgestellt gezeigt.

3.2.1 Widerstandselementschweißen

Für die Kopf- und Scherzugprobenherstellung der Widerstandselementschweißverbindungen wurde eine Widerstandspunktschweißanlage der *BoschRexroth AG* verwendet. Die Führung der Elektroden wird über eine elektromotorisch angetriebene Schweißzange realisiert. Die Stromquelle liefert einen konstantstromgeregelten Mittelfrequenz-Gleichstrom. Um die Proben reproduzierbar positionieren zu können, wurden entsprechende Vorrichtungen konstruiert. Die technischen Daten sind dem Datenblatt der Widerstandspunktschweißanlage sind der der folgenden Tabelle 3-4 zu entnehmen.

Tabelle 3-4: Technische Daten der Widerstandspunktschweißanlage

	Stromart		MF-DC (1.000 Hz)
	Zange		Düring Euro-X, Servomot., $F_{\max} = 8 \text{ kN}$
	Schweißstromsteuerung	Umrichter	PSI64C0.759W1
		Schnittstellen	SPS Steuerung 2. Gen. (CML25, Firmware XLC V13), ProfiNet / Ethernet, SercosIII-Master
		Trafo	PSG 6180.00 RSTK, $I_{\max} = 50 \text{ kA}$
		Regelung	KSR, U-I, ALR
	Bediensoftware	BOS-Software	BOS6000, 1.44.0
	Messtechnik	Kraft, Strom, Spannung	intern + extern möglich

Das Vorkonfektionieren der Proben mit Hilfsfügeteilen erfolgte an der in Kap. 3.2.5 gezeigten Kerb-Konus Vollstanznietanlage. Die Hilfsfügeteile wurden in zwei verschiedenen Ausführungen (für 1,2 mm und 2,0 mm Blechstärken) gefertigt. Die hier verwendeten und mit ihren Abmessungen in Tabelle 3-5 dargestellten Hilfsfügeteile wurden spanend aus dem Drahtmaterial 20MnB4 hergestellt.

Tabelle 3-5: Geometrische Abmessungen der verwendeten Hilfsfügeteile

Hilfsfügeteil für t=2mm	Hilfsfügeteil für t=1,2mm

Zusätzlich wurden die Hilfsfügeteile gehärtet und angelassen sowie mit einer ZnNi Beschichtung versehen. Die Beschichtungsstärken der Hilfsfügeteile betragen zwischen 2 μm und 9 μm für die Blechwerkstoffe mit 1,2 mm Blechstärke und 5 μm bis 18 μm für die Hilfsfügeteile der Blechwerkstoffdicke von 2,0 mm (vgl. Abbildung 3-2).

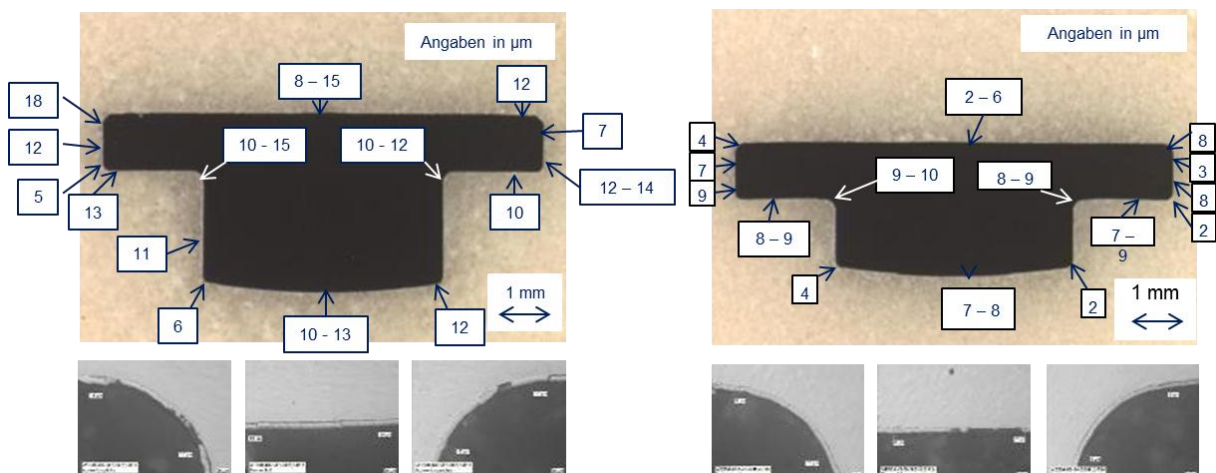


Abbildung 3-2: Vermessung der Beschichtungsdicke an den Hilfsfügeteilen

3.2.2 Reibelementschweißsystem EJOWELD®

Das grundsätzliche Prinzip des Reibelementschweißens wurde bereits oben beschrieben. Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes verwendeten reibelementgeschweißten Proben wurden bei der Firma EJOT GmbH im Labor in Tambach-Dietharz auf einer Roboteranlage mit automatischer Elementzuführung hergestellt (siehe Abbildung 3-3). Die Krafterzeugung und Wegerfassung erfolgt über ein servomotorisches System mit Inkrementgebern.



Abbildung 3-3: Robotergeführte Reibelementschweißzange (Quelle: EJOT)

Die Reibelemente wurden von der Firma EJOT bereitgestellt. Es wurden Serienelemente der Firma EJOT verwendet, welche in ähnlicher Ausführung in der Serienproduktion des Audi Q7 Typ 4M eingesetzt werden, weshalb in der folgenden Abbildung 3-4 nur eine 3D-Darstellung gezeigt werden kann. Auch die Probenfertigung wurde bei der Firma EJOT auf den hauseigenen Anlagen durchgeführt.

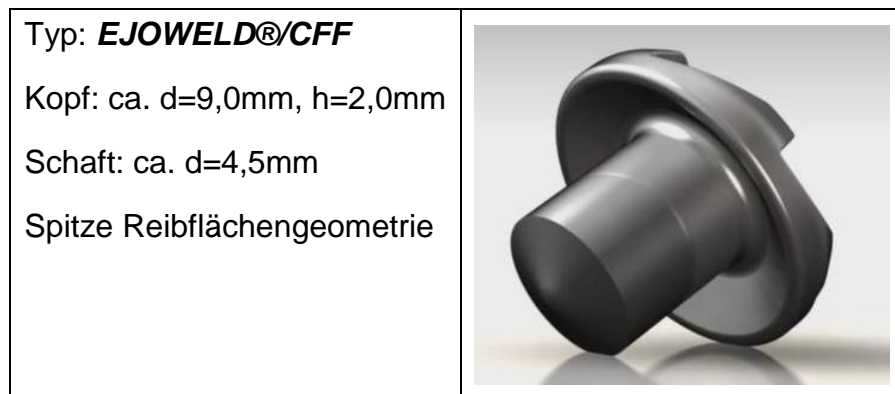


Abbildung 3-4 Hilfsfügeteil zum Reibelementschweißen EJOWELD®/CFF (Quelle: EJOT)

Das Hilfsfügeteil ist auf der Reibfläche spitz ausgeprägt. Es verfügt im Kopfbereich über eine Unterkopfringnut für das plastifizierte und vom Reibelementschafft und -wulst verdrängte Aluminiumdeckblechmaterial. Die sich darin ausbildende Wulst verbindet den Vorteil der Werkstoffaufnahme mit der positiven Eigenschaft, dort eine gute Spannungsverteilung zu ermöglichen.

3.2.3 Blindnieten

Beim kraftschlüssigen Fügeverfahren Blindnieten wurde für die Aluminium/Stahl-Werkstoffkombination ein Fügeequipment bzw. Handsetzgerät *Gesipa Powerbird®* eingesetzt. Als Niettyp kam ein Gesipa 6643029 ($\text{Ø}4,8 \times 10,5$) mit einem

Klemmbereich von 1,6 - 6,4 mm zum Einsatz. Ein Vorloch mit einem Durchmesser von 4,9 mm wurde stanzend in die Bleche eingebracht. Es handelt sich bei den Blindnieten um hülsenweitende Blindniete, die in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss für die Zug-Druck-Belastung bei den Schwingfestigkeitsuntersuchungen dieses Projektes ausgewählt wurden. Diese Niete wurden aufgrund ihres anteiligen Formschlusses gewählt, um das Lochspiel zwischen Niethülse und Vorloch zu minimieren. Das Ergebnis der Bemusterung zum Blindnieten ist als metallographisches Schliffbild der Abbildung 3-5 zu entnehmen.

Abbildung 3-5: Bemusterungsergebnis zum Blindnieten

Zur Überwachung des Prozesses ist die Blindnietpistole mit einem Messrechner verbunden, über welchen sich während des Fügevorgangs die Dornzugkraft über dem Setzgerätehub aufzeichnen lässt. Bei der Fertigung wurden die dazugehörigen Kurven protokolliert, sodass n.i.O.-Verbindungen direkt identifiziert und aussortiert werden konnten.

3.2.4 Halbhohlstanznieten mit Sonderniet

Für das Halbhohlstanznieten kam ein RIVSET® Gen2-System Fügeequipment der Fa. *Wilhelm Böllhoff GmbH & Co. KG* zum Einsatz. Die wesentlichen Kenndaten zum eingesetzten Nietsystem und Niettyp sowie des Bemusterungsergebnisses sind in Tabelle 3-6 mit Bezug auf die Abbildung 3-6 dargestellt.

