

# **Schlussbericht**

zu IGF-Vorhaben Nr. 18344 N

#### Thema

Schwingfestigkeit thermisch-mechanisch gefügter Verbindungen für Mischbauanwendungen mit ultrahöchstfesten Stählen

#### **Berichtszeitraum**

01.10.2014 - 30.09.2016

#### Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

# Forschungsstelle(n)

Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik

Paderborn, den 16.01.2017

Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)



Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

# 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.

Aluminium Technologie-Service	Herr Prof. Dr. Ostermann
AUDIAG	Herr DrIng. Alber
Benteler Automobiltechnik GmbH	Herr DrIng. Tölle
DAIMLER AG	Herr Schubert
Dr. Lappe & Niemeier Profiltechnik GmbH	Herr DrIng. Lappe
EJOT GmbH & Co. KG	Herr Maiwald
Ford Forschungszentrum Aachen GmbH	Herr Ölscher
Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.	Herr Heise
Harms und Wende GmbH & Co. KG	Herr Oelkers
Kumpf Schweißtechnik	Herr Kumpf
Novelis Switzerland SA	Herr Radermacher
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH	Herr DrIng. Fritzsche
ThyssenKrupp Steel Europe	Herr DrIng. Chergui
Volkswagen AG	Herr DrIng. Meyer / Hr. Wiese
Wilhelm Böllhoff GmbH & Co. KG	Herr DrIng. Hartwig-Biglau

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 wissenschaftlichtechnisches 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 vergangen Jahren zur Serienreife und nicht ausschließlich für diese Anwendung entwickelten thermisch-mechanischen Widerstandselement-Fügeverfahren 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 Mischbauverbindungen gefügter aus Aluminiumblechwerkstoffen und ultrahöchstfesten 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 Berechungskonzept 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 aefüate Verbindungen unter Berücksichtigung lokaler Spannungen in der Verbindungszone in Abhängigkeit der äußeren Lasten bewertet. Ein Vergleich der Lebensdauerkennwerte thermischmechanisch gefügter Verbindungen mit denen vollstanzgenieteter und blindgenieteter Verbindungen ist durchgeführt worden.

#### Das Ziel des Vorhabens wurde somit erreicht.

# Inhaltsverzeichnis

In	halts	verzei	chnis	I
A	bkürz	zunger	n und Formelzeichen	IV
1	Eir	nleitun	g und Zielsetzung	5
2	Sta	and de	r Technik	8
	2.1	Wider	standselementschweißen (WES)	8
	2.2	Reibe	lementschweißen (RES)	9
	2.3	Mecha	anische Fügeverfahren	10
		2.3.1	Blindnieten	11
		2.3.2	Halbhohlstanznieten	12
		2.3.3	Vollstanznieten	13
	2.4	Grund	dlagen 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	Lasthorizonteverfahren	18
	2.5	Berec	hnungskonzepte für Lebensdauerbewertungen	18
3	Ve	rsuchs	svorbereitung und -durchführung	21
	3.1	Versu	chswerkstoffe und Werkstoffkombinationen	21
	3.2	Füge-	und Fertigungseinrichtungen	23
		3.2.1	Widerstandselementschweißen	23
		3.2.2	Reibelementschweißsystem EJOWELD <sup>®</sup>	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 LEITZ "Durimet"	30

Inhaltsverzeichnis

	3.3	Probe	ngeometrien	31				
4	Eig	Eigenschaftsanalyse gefügter Verbindungen35						
	4.1	Identi	fikation geeigneter Fügeprozessparameter	35				
		4.1.1	Widerstandselementschweißen	35				
		4.1.2	Reibelementschweißen	39				
	4.2	Festig	keitsuntersuchungen 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	Detail	analysen der Verbindungszone	46				
	4.4	Festig	keitsuntersuchungen 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	Detail	analyse der Anrissbildung	58				
		4.5.1	Durchführung und Auswertung der Abschaltversuche	58				
	4.6	Festig	gkeitsuntersuchungen an bauteilähnlichen Strukturen unter zyklischer	63				
5	ام ا	hensd	auerabschätzung auf Basis der Finite-Flemente-Methode	65				
Ŭ	5.1	l okal-	- bzw. kerbspannungsbasiertes Konzept	65				
	011	5.1.1	Vorgehensweise. Modellaufbau und -validierung	.65				
		5.1.2	Berechnungsergebnisse	.70				
	5.2	Radia	Ispannungskonzept (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	Zu	samm	enfassung und Ausblick	.83				
7	Lite	eratur	verzeichnis	.87				
8	Pla	n zum	n Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Einschätzung des Nutze	ns				
	für	KMU.	- •	89				

8.1	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten
	Transferkonzeptes90
8.2	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaft-lichen Nutzens
	der erzielten Ergebnisse insbesondere für KiviU sowie inres innovativen
	Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten91

# 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 <sub>max</sub>	Differenz der Härte
N <sub>B</sub>	Bruchschwingspielzahl
WL	Wöhlerlinie
k	Neigungsexponent
R	Lastverhältnis
SZ / KZ	Scherzug / Kopfzug

# Formelzeichen [Einheit] Benennung

Fs	Ν	Elektrodenkraft
l <sub>s</sub>	A	Stromstärke
t <sub>S</sub>	S	Schweißzeit
σ	MPa	Spannung
F <sub>A</sub>	Ν	Amplitude
t	mm	Blechdicke
f	Hz	Frequenz

#### 1 Einleitung und Zielsetzung

Vor dem Hintergrund knapper und damit teurer werdender Ressourcen und der Durchsetzung klimapolitscher Ziele zur Verringerung von CO<sub>2</sub>-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 gleichzeitigem Erfüllen hoher Anforderungen an Crashsicherheit bei und Lebensdauer eignet sich der aleichzeitiae. belastungsgerechte Einsatz verschiedenartiger Werkstoffe in Form der Mischbauweise [Ame11].

Dabei werden im Bereich der Fahrgastzellen in zunehmendem Umfang ultrahöchstfeste pressgehärtete Stähle mit Festigkeiten von R<sub>m</sub> > 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 ultrahöchstfesten Stahlwerkstoff kann durch konventionelle Verfahren nur unter hohem Aufwand, beispielsweise durch Adapterteile aus Stählen mit geringeren Festigkeiten oder durch das Vorlochen des gelöst werden. Auch andere Bereiche ultrahöchstfesten Fügepartners, des Herausforderuna. Maschinenbaus der stehen vor Mischbauweisen mit ultrahöchstfesten Stählen prozesssicher und kosteneffizient fügen zu können.

Das für Verbindungen von Mischbaustrukturen derzeit dominant eingesetzte Verfahren ist das Stanznieten mit Halbhohlniet. Bei Fügeteilfestigkeiten von über 1000 MPa können Sonderniete (z.B. HDX® der Fa. Böllhoff) eingesetzt werden, die jedoch in der Fügerichtung und der Dicke des hochfesten Stahlfügeteiles beschränkt Direktverschrauben mit fließlochformender Schraube sind. Das stößt bei Fügeteilfestigkeiten von  $R_m \approx 800$  bis 1000 MPa an seine Prozessgrenzen. Das Vollstanznieten erlaubt nach aktuellem Stand der Forschung das Fügen von Vergütungsstählen mit Aluminium, jedoch treten teilweise pressgehärteten unerwünschte Fügeteildeformationen 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 weiter maximalen steigenden Zugfestigkeiten zu erwartenden 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 Bearbeitungsund Positionieraufwand darstellt und daher aus Kostensicht für eine automobile 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 Möglichkeit zu wirken. Eine weitere stellt das direkte Widerstandspunktschweißen von Aluminium und Stahl dar. Die hierbei auftretenden spröden intermetallischen Phasen und Problematiken in Bezug auf das Anlegierungsverhalten 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 Verbindungsgualität 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 bekannten "Härtesäcken" auf, als auch geometrische Kerben, bedingt durch die 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. stichprobenartig Ebenfalls nur 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 eines Konzeptes zur Lebensdauerberechnung die Entwicklung thermischmechanisch gefügter Mischbauverbindungen aus Aluminiumblechwerkstoffen und ultrahöchstfesten 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 Fügetechnik 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 Fügepartner z.B. Stahl. entsprechenden artgleichen Material. aefertiat. sodass die schweißmetallurgische Verträglichkeit gegeben ist. Der grundlegende Prozessablauf ist in Abbildung 2-1 dargestellt.





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 ultrahöchstfester, 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 Fügen Mischbauverbindungen mittels das von 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 Klemmkräfte 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 thermischmechanischen 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 Nietelementes eine unlösbare Verbindung ausgebildet wird. Durch die Kombination aus Form- und Kraftschluss überträgt dabei das Nietelement spielfrei 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 (Hülsenfalter) und wichtige geometrische Kenngrößen

Die Fügepartner müssen zuerst vorgelocht werden, bevor das Nietelement eingeführt werden kann. Diese Vorlochoperation 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 Blindniettechnik erreicht werden [DL04]. Aufgrund geringer Montagekosten werden Blindnietsysteme 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 Nietelementes behindert. Neben der genauen Vorlochung der Fügeteile stellt die exakte Fügeteilund 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 Lateralversatze 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-Merkblatt 3410 "Stanznieten – Überblick" 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 Vollstanzniets 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

Es wird im Wesentlichen zwischen den Belastungsarten "schwellend" und "wechselnd" im Rahmen der Untersuchung von Schwingbelastungen unterschieden. Eine schwellende 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 guasi 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 lebensdauerverringernde Werkstoffschädigung.

Die Auswertung der ermittelten Versuchsdaten kann anhand definierter Untersuchungsschwerpunkte nach Bedarf angepasst werden. Es empfiehlt sich iedoch anhand einer Streugeraden Versuchswerte, der 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 Anrissoder Bruchschwingspielzahl ermittelt wird. Zweckmäßig dabei ist es, je eine Probe bei hoher Schwingspiellast und eine bei niedriger Schwingspiellast bis zu einer festgelegten Schwingspielzahl zu prüfen, den Dauerfestigkeitsbereich um abzuschätzen. Es gibt diverse Varianten, wie die Proben untersucht werden. Hier soll auf die meist verwendeten Vorgehensweisen, sich dem Perlschnurund 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 Lasthorizonteverfahrens gezielt zu ergänzen.

## 2.4.5 Lasthorizonteverfahren

Beim Lasthorizonteverfahren 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.



Abbildung 2-8: Übersicht und Beschreibung 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 Für punktförmige Verbindungen vor. aus artverschiedenen Feinblechwerkstoffen. beispielsweise Stanznietoder Clinchverbindungen, vergleichsweise liegen dagegen wenia Daten. Auslegungsrichtlinien und Erfahrungswerte in der wissenschaftlichen Fachliteratur

verschiedener

Für vor. Widerstandselementund 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 Fügestellen 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 thermischmechanisch gefügter Verbindungen überprüft werden.

# 3 Versuchsvorbereitung und -durchführung

diesem werden die Untersuchungen In Kapitel bei den eingesetzten Versuchswerkstoffe und Werkstoffkombinationen (Kap. 3.1), Fügeund 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         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 beziechntet. 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.

Legierungselement	С	Mn	Si	Ni	Cr	Cu
Masse-%	0,221	1,29	0,28	0,013	0,193	0,01
Legierungselement	S	Р	AI	V	Ti	В
Masse-%	0,001	0,018	0,032	0,005	0,039	0,0038

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

#### 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	Z	'n
Masse-%	1-1,5	0,25-0,6	< 0,2	< 0,2	< 0,5	< (	),2
Mechanische	Zugfestigkeit R <sub>m</sub> [MPa]		Streckgrenze Rp <sub>0,2</sub> [MPa]		Max. D T4	ehnung T6	
Eigenschaft	T4	Τ6	T4		T6		
Zustand T4 / T6	170-250	260-300	80-140	18	0-260	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 Kopfund 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 <sub>max</sub> = 8 kN	
		Umrichter	PSI64C0.759W1	
	Schweiß- strom- steuerung	Schnittstellen	SPS Steuerung 2. Gen. (CML25, Firmware XLC V13), ProfiNet / Ethernet, SercosIII-Master	
		Trafo	PSG 6180.00 RSTK, I <sub>max</sub> = 50 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 de	r verwendeten	Hilfsfügeteile
		<b>.</b>		<b>.</b>



Zusätzlich wurden die Hilfsfügeteile gehärtet und angelassen sowie mit einer ZnNi Beschichtung versehen. Die Beschichtungsstärken der Hilfsfügeteile betragen zwischen 2  $\mu$ m und 9  $\mu$ m für die Blechwerkstoffe mit 1,2 mm Blechstärke und 5  $\mu$ m bis 18  $\mu$ m 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 Fima *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 Reibelementschaft 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*<sup>®</sup> eingesetzt. Als Niettyp kam ein Gesipa 6643029 (Ø4,8 x 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.

Fügeequipment	Böllhoff RIVSET® Gen2-System
Stanzniettyp	HDX 6,5x6 SK H6 ZnNi+B18E
Matrizentyp	SM 120 0130
Nietkopfendlage	0,03 mm
Max. Fügekraft	75 kN
Min. Hinterschnitt	0,5 mm
Min. Restbodendicke	0,22 mm

 Tabelle 3-6:
 Daten zum Einsatz des Halbhohlstanznietens mit Sonderniet



Abbildung 3-6 Bemusterungsergebnis zum Halbhohlstanznieten mit Sonderniet

#### 3.2.5 Vollstanznietanlage

Für die Verbindungsherstellung mittels Vollstanznieten wird eine kraftgesteuerte hydraulische Vollstanznietanlage der Firma *KerbKonus Vertriebs GmbH* genutzt. Die wesentlichen Teile der Anlage sind die Hydraulikpumpe mit Steuereinheit, der C- Bügel, der Hydraulikzylinder, die Stempeleinheit und die automatische Nietzuführung.



Abbildung 3-7: Verwendete Vollstanznietanlage der Firma KerbKonus und Kraftmessung am C-Bügel

Der Hydraulikzylinder ist an dem C-Bügel befestigt und wandelt den Öldruck der Hydraulikpumpe in eine translatorische Bewegung beziehungsweise in eine Kraft um. Diese wird auf den Stempel übertragen, an dem der Niederhalter über eine Feder befestigt ist. Eine Prozessüberwachung ist über einen Wegaufnehmer am Hydraulikzylinder und Dehnungsmessstreifen am C-Bügel mittels einer Auswertungssoftware realisiert.

Zur Verbindungsherstellung mittels Vollstanznieten wurde ein Mehrbereichsniet verwendet. Der Niettyp sowie die eingesetzten Werkzeuge sind in Tabelle 3-7 gegenübergestellt.

Fügeequipment	Kerb-Konus PM000027
Stanzniettyp	Tuk-Rivet-MB 493 100 008.230
Matrizentyp	Ø5,1 x 0,6 x Ø <sub>A</sub> 9,0
Nietkopfendlage	+0,21 mm
Max. Fügekraft	48,2 kN
Min. Hinterschnitt	0,25 mm

Tabelle 3-7:	Daten zum Einsatz des	Vollstanznietens
--------------	-----------------------	------------------

Das Ergebnis der Bemusterung des Vollstanznietens ist als metallographisches Schliffbild der Abbildung 3-8 zu entnehmen.



Abbildung 3-8 Bemusterungsergebnis zum Vollstanznieten

#### 3.2.6 Kennwertermittlung unter quasistatischer Belastung

Die Zugversuche unter quasistatischer Belastung wurden an der Universalprüfmaschine Zwick Z100 bei einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min (0,00016 m/s) durchgeführt. Die technischen Daten und der Versuchsaufbau der Universalprüfmaschine können der Tabelle 3-8 entnommen werden. Die Kraftmessung erfolgte mit Hilfe einer DMS-Kraftmessdose. Als globaler Weg wurde der Traversenweg ausgewertet.

Tabelle 3-8:	Technische Daten zur	Universalprüfmaschine	Zwick Z100
--------------	----------------------	-----------------------	------------

	Typ, Lieferant	Zwick Z100 (Zwick Allround Line) der Zwick GmbH & Co. KG
	Zulässige Prüfkraft	100kN Zug oder Druck
	Kennwerttoleranz	Kennwerttoleranz: =+0,2 %
	Traversenhub	Max. 1700 mm
	Traversengeschwindigkeit	0,001 – 200 mm/min, stufenlos regelbar
	Wegmessmethode, Mess-	Traverse, inkrementales System, Auflösung 0,0083 µm,
	genauigkeit, Anzeige	Genauigkeit ± 0,2 μm, digital
	Max. Messrate	f <sub>mess</sub> = 20 kHz

#### 3.2.7 Kennwertermittlung unter schwingender Belastung

Die magneterregte Resonanzprüfmaschine RUMUL MIKROTRON ist eine universell einsetzbare Prüfmaschine für Untersuchungen unter schwingender Belastung. Sie ist für Prüfkräfte bis 20 kN bei einer Frequenz von 40 Hz bis 250 Hz ausgelegt und eignet sich für Untersuchungen, welche große Amplituden erfordern. Auch bei hohen Dämpfungseigenschaften können durch den dynamischen Antrieb dieser Prüfmaschine sehr genaue und zeitnahe Untersuchungen bei sehr geringen Betriebskosten im Vergleich zu servohydraulischen Prüfmaschinen durchgeführt werden. Die Kraftmessung erfolgt durch eine Kraftmessdose mit unbegrenzter
Lebensdauer, integriertem Beschleunigungsaufnehmer und einer sehr hohen Steifigkeit in Bezug auf Axial-, Biege-, Schub- und Torsionskräfte. Die technischen und bauartbedingten Daten können der folgenden Tabelle 3-9 entnommen werden [RUM15].

•	Technische Daten RUMUL MIKROTRON	Einheit	Wert
·	Nennlast	<u>kN</u>	20
	Max statische Last	<u>kN</u>	20
	Max. dynamische Amplitude	<u>kN</u>	±10
	Max. dynamischer Schwingweg	mm	4(±2)
1 21	Frequenzbereich	Hz	40-250
1	Frequenzstufen		5
	Freier Säulenabstand	mm	500
	Mess- und Regelgenauigkeit statisch	%	<0,5
	Mess- und Regelgenauigkeit dynamisch	%	<0,5
	Vertikaler Prüfraum	mm	80-540
	Ma. Gesamthöhe	mm	2450
	Breite	mm	740
	Tiefe	mm	550
	Gesamtgewicht	kg	Ca 580
	Elektrischer Anschluss	V / Amp.	1x230V / 10A

# Tabelle 3-9:Technische Daten zur Resonanzprüfmaschine RUMUL<br/>MIKROTRON [RUM15]

#### 3.2.8 Mikrohärtemessgerät LEITZ "Durimet"

Für die erforderlichen Härtemessungen in der Wärmeeinflusszone und deren Randbereichen wurde das Mikrohärtemessgerät "Durimet" von Leitz aus der Tabelle 3-10 verwendet. Das Mikrohärtemessgerät eignet sich für die hier untersuchten Proben besonders gut, da es einen mittels Mikrometerschrauben sehr genau verstellbaren Kreuztisch bietet. So können auf den kleinen Wärmeeinflussbereichen der Proben genau definierte Härtemessungen durchgeführt werden. Es können bis zu 2000g als Prüfgewicht aufgebracht werden. Die sehr kleinen Eindrücke können direkt im Anschluss durch das Auflichtmikroskop und die Vermessungseinheit vermessen werden. Die Ermittlung der Härtewerte erfolgt nach dem Verfahren von Vickers.

#### Tabelle 3-10: Technische Daten zum Leitz Kleinlastprüfer "Durimet"

Â.	Technische Daten	Kleinlastprüfer Durimet
	Hersteller:	Leitz
	Art:	Härteprüfgerät mit optischer Eindruck- Vermesseinrichtung
	Prüfgewicht:	50g bis 2000g
	Prüfkörper:	Vickersprüfdiamant
	Objektive:	10x - 40x
	Okular:	10x

Dem entsprechend wird ein pyramidenförmiger Eindruck eingebracht und dessen Diagonalen vermessen. Mit Hilfe des Mittelwertes aus den beiden Diagonalen wird die Härte entsprechend bestimmt. Für die im Rahmen dieses Forschungsprojektes untersuchten Proben wurde ein Gewicht von 1000g mit einer Einwirkzeit von 10 Sekunden verwendet.

#### 3.3 **Probengeometrien**

Für quasistatische und dynamische Belastungsversuche wurde die einfach DVS/EFB überlappte Scherzugprobe gemäß 3480-1 angefertigt. Die Probengeometrie ist der folgenden Abbildung 3-9 zu entnehmen. Diese Probenform eignet sich für die Untersuchung des Hilfsfügeteiles auf Scherung bzw. Biegung und Überlappungslänge von 16 mm auf. Zur Herstellung weist eine der Scherzugprobenhälften wurden pressgehärtete Tafelbleche sowie Aluminiumbleche verwendet, die mit einer Schlagschere zugeschnitten wurden.



Abbildung 3-9: Probengeometrie einer einfach überlappten Scherzugprobe

Zur Untersuchung wurden die Proben mit Hilfe von hydraulischen Spannzangen in die Prüfmaschinen zur quasistatischen sowie dynamischen Kennwertermittlung eingespannt. Die Proben wurden mit einem entsprechenden Versatz in der jeweiligen Blechstärke zueinander eingespannt, um die Biegebelastung möglichst minimal zu halten.

Für die Ermittlung von Kopfzugkennwerten wurde am LWF in Anlehnung an DVS/EFB-3480 die Probengeometrie der LWF-KS2-Probe, welche in Abbildung 3-10 (A) dargestellt ist, entwickelt. Durch die steife Einspannung der beiden Schenkel wird die Probe minimal auf Biegung beansprucht, was den bei Kreuzkopfzugproben auftretenden Schälzuganteil auf ein Minimum reduziert. Auch mit diesen Probenformen wurden sowohl quasistatische. als auch dynamische Dauerfestigkeitsversuche zur Kennwertermittlung durchgeführt. Die LWF-KS2-Proben aus 22MnB5+AS150 wurden in einem am LWF entwickelten seriennahen Umformwerkzeug im direkten Presshärteverfahren mit anschließendem **3D-Laserbeschnitt** hergestellt, während die Aluminiumfügeteile mittels 2D-Laserschneiden und **CNC-Biegen** hergestellt Die wurden. LWF-KS2-Kopfzugproben wurden mit Hilfe einer speziellen und passgenauen Vorrichtung (siehe Abbildung 3-10 B) zur guasistatischen und dynamischen Kennwertermittlung in der Prüfmaschine eingespannt.



Abbildung 3-10:LWF- KS2-Kopfzugprobe mit Einspannung an Zwick Z100 (Quelle: LWF)

Zur Prüfung von Mehrpunktproben wurde als bauteilähnlicher Prüfkörper eine H-Scherzugprobe eingesetzt. Aufgrund von Zugänglichkeit des Fügeequipments müssen die Stahlfügeteile abgewinkelt werden. Da bislang am LWF kein geeignetes Warmformwerkzeug zur Herstellung von pressgehärteten H-Proben existiert, wurden die H-Proben durch 3D-Laserbeschnitt aus pressgehärteten Hutprofilen erzeugt. Die Fügereihenfolge zur Herstellung der H-Scherzugprobe ist in Abbildung 3-11 aufgezeigt.



Abbildung 3-11: Fügereihenfolge der H-Scherzugprobe mit pressgehärteten Schenkeln

# 4 Eigenschaftsanalyse gefügter Verbindungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zur Identifikation geeigneter Fügeprozessparameter für das Widerstands- und Reibelementschweißen (Kap. 4.1) vorgestellt. Folgend werden die Ergebnisse zu den Festigkeitsuntersuchungen unter quasistatischer Belastung (Kap. 4.2) gezeigt. Kap. 4.3 beinhaltet eine Detailanalyse der Verbindungszone zur Bestimmung metallurgischer und geometrischer "Kerben" mittels Härtemessungen. In Kap. 4.4 werden die Ergebnisse zur zyklischen Belastung an Einpunktproben gezeigt. In Kap. 4.5 wird eine detaillierte Analyse des Anrissverhaltens von widerstands- und reibelementgeschweißten Verbindungen durchgeführt. Abschließend wird in Kap. 4.6 das Festigkeitsverhalten bauteilähnlicher Strukturen und zyklischer Belastung diskutiert.

# 4.1 Identifikation geeigneter Fügeprozessparameter

#### 4.1.1 Widerstandselementschweißen

Die verwendeten Fügeparameter für die widerstandselementgeschweißten Verbindungen in Bezug auf den Schweißstrom wurden anhand von Versuchsreihen im Rahmen einer Schweißbereichsermittlung bestimmt. Für die Elektrodenkappen wurde die Elektrodenkappenform entsprechend ISO5821-A0-16-100 (SR1) gewählt. Die verwendeten Schweißparameter für die Material-Dicken-Kombination 1 bis 3 wurden in Anlehnung an SEP 1220-2 ermittelt. Im der folgenden Abbildung 4-1 sind beispielhaft die Parameter der MDK1 zusammen mit den Ergebnissen in Bezug auf entstandene Spritzer und der erlangten Schweißlinsendurchmesser sowie die Eindringtiefe der Schweißlinse in das Stahlblech und die Grenze einer Haftschweißung dargestellt.



Abbildung 4-1: Schweißbereichdiagramm in Anlehnung an SEP 1220-2 für die MDK1

Zur Beurteilung der Schweißergebnisse wurde nicht die beim Widerstandspunktschweißen übliche Meißelprüfung herangezogen, da diese nur eine recht ungenaue Charakterisierung der Schweißergebnisse zulässt. Um aussagekräftige Messungen bezüglich der geometrischen Beschaffenheit von Schweißlinse und Hilfsfügeteil nach dem Schweißen vornehmen zu können, wurden entsprechende metallographische Schliffbilder parallel zur Rotationsachse des Hilfsfügeteiles in Belastungsrichtung hergestellt. Darüber hinaus sind die Schliffbilder erforderlich, um mit Hilfe von Ätzverfahren die entstandene Wärmeeinflusszone der hergestellten Verbindung zu beurteilen. Anhand der folgenden Abbildung 4-2 soll verdeutlicht die und beispielhaft werden. wie Eindringtiefe der Schweißlinsendurchmesser bestimmt wurden. um daraus die idealen Schweißparameter herauszustellen, welche für die Probenherstellung verwendet wurden.



Abbildung 4-2: Vermessung von Eindringtiefe und Schweißlinsendurchmesser für die MDK1

Die Schaftspitzengeomtrie für die verwendeten Hilfsfügeteile weist einen Radius von 14 mm auf. Auf Wunsch des pbA und zu Vergleichszwecken wurden auch Fügeversuche mit einer kegelförmigen Spitze von 10° durchgeführt. Für sämtliche MDK und für die zwei betrachteten Schaftspitzengeometrien sind in der folgenden Tabelle 4-1 die für die folgenden Festigkeitsuntersuchungen verwendeten Schweißparameter aufgeführt.

Tabelle 4-1:Verwendete Schweißparameter für die unterschiedlichen MDK und<br/>exemplarische metallographische Schliffbilder



Abgesehen von der MDK2, bei welcher verringerte Elektrodenkräfte eingestellt wurden, sind für sämtliche Verbindungen identische Schweißparameter verwendet worden. In Bezug auf die Schaftspitzengeometrie ließen sich beim Vergleich der metallographischen Schliffbilder keine signifikanten Unterschiede feststellen. Auch das Versagensverhalten unter quasistatischer Kopf- und Scherzugbelastung (siehe folgende Kapitel) belegte die Gleichwertigkeit beider Elementausprägungen.

Zusätzlich zu den o.g. Schweißbereichen wurde der Einfluss eines Elektrodenversatzes auf die Schweißlinsenausbildung und die Tragfähigkeit beim WES untersucht. In Abbildung 4-3 ist die Schweißlinsenausbildung bei einem Elektrodenversatz von 1,5 mm gegenübergestellt.



Abbildung 4-3: Einfluss eines Elektrodenversatzes von 1,5 mm auf die Schweißlinsenausbildung (rechts) gegenüber einer Referenzverbindung (links)

Es die bleibt festzuhalten. dass durch Verwendung der Kappenform DIN ISO 5821 A16-R100, welche zur Herstellung sämtlicher WES-Verbindungen verwendet wurde, keine signifikanten Einflüsse durch Konzentrizitätsversatz auf die Schweißlinsenausbildung im metallographischen Schliffbild erkennbar. Bezüglich der Tragfähigkeit konnte kein Einfluss für sämtliche MDK und die Belastungsrichtungen Scher- und Kopfzug festgestellt werden. So zeigt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse für eine Kopfzugbelastung in Abbildung 4-4 vergleichbare Werte sowohl für die Prüfkraft, als auch für die Energieaufnahme.



Abbildung 4-4: Gegenüberstellung der erreichten Maximalprüfkräfte und Energieaufnahmen für die MDK1-3 von Proben mit/ohne Versatz unter quasistatischer Kopfzugbelastung

# 4.1.2 Reibelementschweißen

Die Prozessparameter für das Reibelementschweißen wurden von der Firma *EJOT* bestimmt, welche auch die Probenfertigung in ihrem Hause vornahm. Daher können hier keine Fügeparameter vorgestellt werden. In der folgenden Abbildung 4-5 sind exemplarische Schliffbilder der Material-Dicken-Kombinationen 1 bis 3 zu sehen. Deutlich zu erkennen ist die Wulstausprägung und das aufgestauchte Material unter dem Kopf des Reibelementes, welche charakteristisch für dieses Fügeverfahren ist.



Abbildung 4-5: Metallographische Schliffbilder reibelementgeschweißter Verbindungen der MDK1-3 (Quelle: EJOT)

Der Unterkopfbereich ist, wie auf den Schliffbildern zu sehen, weitestgehend aufgefüllt, was eine erheblichere Verbesserung in Bezug auf die lokalen Spannungen im Deckblech im Vergleich zu widerstandselementgeschweißten Verbindungen erwarten lässt. Die darin resultierende lokale Blechdickenerhöhung im Hinterschnitt des Reibelementes wirkt sich auch im Zugversuch, wie in den folgenden Kapiteln zu sehen, positiv aus.

# 4.2 Festigkeitsuntersuchungen unter quasistatischer Belastung

Es wurden zunächst quasistatische Zugversuche von Scher- und Kopfzugproben aller Material-Dicken-Kombinationen der jeweiligen widerstands- und reibelementgeschweißten Proben durchgeführt. Die folgenden Abschnitte enthalten ausgewählte Ergebnisse dieser Versuchsreihen.

#### 4.2.1 Tragverhalten unter Scherzugbelastung

Die folgende Abbildung 4-6 zeigt anhand von exemplarischen Kraft-Weg-Kurven der jeweiligen Prüfreihe das Tragverhalten für die beiden Fügeverfahren WES und RES für die jeweiligen Material-Dicken-Kombinationen im Vergleich.



Abbildung 4-6: Kraft-Weg-Verläufe von widerstandselement- und reibelementgeschweißten Verbindungen der MDK1-3 unter quasistatischer Scherzugbelastung

Anhand des Kraft-Weg-Diagrammes lässt sich belegend erkennen, dass die reibelementgeschweißten Proben im quasistatischen Scherzugversuch wesentlich höhere Kräfte im Vergleich zu den widerstandselementgeschweißten Proben übertragen können. Dies liegt im Wesentlichen an dem im Unterkopf des Elementes eingeformten Blechmaterial in der Ringnut, was für zusätzliches Material in der Scherebene und damit höheres Kraftaufnahmevermögen sorgt. Das Festigkeitsverhalten der Materialkombinationen ist in Relation zum Fügeverfahren relativ konstant. Die folgende Tabelle 4-2 zeigt exemplarische Versagensbilder der jeweiligen Versuche.

# Tabelle 4-2:Gegenüberstellung des Bruchverhaltens von widerstandselement-<br/>und reibelementgeschweißten Verbindungen der MDK1-3 nach<br/>quasistatischer Scherzugbelastung



Bis auf die reibelementgeschweißte Probe der MDK3 haben alle Proben durch den Auszug des Aluminiumdeckbleches versagt. Die reibelementgeschweißte Probe der MDK3 versagt durch das Ausknöpfen des Reibelementes aus dem Stahlblech. Dies ist darin zu begründen, dass das dünnere Blech eine schlechtere Wärmeableitung im Bereich der Wärmeeinflusszone aufweist, was zu einer langsameren Abkühlung und so zu einer Entfestigung des Stahlwerkstoffes geführt hat.

Die folgende Abbildung 4-7 zeigt einen Energie- und Maximalkraftvergleich für alle Material-Dicken-Kombinationen sowohl von widerstandselementgeschweißten als auch von reibelementgeschweißten Proben unter quasistatischer Scherzugbelastung. Als Vergleichskriterium dienen die maximalen Zugkräfte und die dabei aufgenommene Energie bis zu einem Kraftabfall von 30% des Kraftmaximums.





Es ist deutlich zu erkennen, dass die reibelementgeschweißten Proben in Bezug auf die Stärke des jeweiligen Deckbleches höhere Kräfte aufnehmen können als die widerstandselementgeschweißten Verbindungen. Dies liegt im Wesentlichen an der lokal höheren Blechdicke unter dem Kopf des Reibelementes infolge der Materialverdrängung beim Reibelementschweißen. Auch die Energieaufnahme zeigt dieses Verhalten bei MDK1 und MDK3. Die Material-Dicken-Kombination 2 hingegen weicht beim Vergleich der Energieaufnahme von diesem Trend ab, was am Versagensverhalten des dünneren Deckbleches liegt.

# 4.2.2 Tragverhalten unter Kopfzug

In der folgenden Abbildung 4-8 sind im Kraft-Weg-Diagramm beispielhafte Verläufe quasistatischer Kopfzugprüfungen aller Materialkombinationen mit WES und RES geschweißten Proben dargestellt. Auch hier ist die deutliche Überlegenheit der mittels RES gefügten Verbindungen zu erkennen.



Abbildung 4-8: Kraft-Weg-Verläufe von widerstandselementgeschweißten Verbindungen der MDK1-3 unter quasistatischer Kopfzugbelastung

Das abrupte Abknicken des Kraft-Weg-Verlaufes von mittels RES und WES gefügter Proben der MDK3 ist, wie in der Gegenüberstellung des Bruchverhalten der Tabelle 4-3 gezeigt, in dem Ausziehen des Hilfsfügeteiles oder dem Ausreißen aus dem Grundblech zu begründen.

Tabelle 4-3:Gegenüberstellung des Bruchverhaltens von widerstandselement-<br/>und reibelementgeschweißten Verbindungen der MDK1-3 nach<br/>quasistatischer Kopfzugbelastung



Die maximalen Kopfzugkräfte und die Energieaufnahme mittels WES und RES gefügter Proben aller MDK's bis zu einem Kraftabfall von 30% ist in Abbildung 4-9, dargestellt.



Abbildung 4-9: Maximalkräfte und Energieaufnahme für die MDK1-3 unter quasistatischer Kopfzugbelastung

Auch unter Kopfzug ist das deutlich bessere Tragkraftverhalten der reibelementgeschweißten Proben zu beobachten. Die mittels RES gefügten Proben der MDK2 nehmen deutlich mehr Energie und Maximalkraft auf, als mittels WES gefügte LWF-KS2 Proben. Dieser Effekt entsteht zunächst durch die Belastung der Hilfsfügeteile in Kopfzugrichtung. Dass die reibelementgeschweißten Proben, anders mehr Energie aufnehmen als unter Scherzug, können, liegt an der Blechdickenerhöhung des Deckbleches im Unterkopfbereich der Reibelemente, was zu einer Stützwirkung führt. Dadurch wird das Widerstandsmoment gegen Biegung des Deckbleches erhöht, was die Probensteifigkeit positiv beeinflusst.

# 4.2.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Für die Materialkombination untersuchten können weitere punktförmige umformtechnische Fügeverfahren wie das Halbhohlstanznieten mit Sonderniet, das Vollstanznieten oder das Blindnieten eingesetzt werden. Zur Einordnung der erreichbaren Maximalkräfte und Energieaufnahmen wurden Scherzugund wobei Kopfzugversuche an entsprechenden Verbindungen durchaeführt. ausschließlich die Material-Dicken-Kombination 1 verwendet wurde. In der folgenden Abbildung 4-10 ist zunächst eine Gegenüberstellung der erreichten Prüfkräfte unter quasistatischer Scherzugbelastung für die betrachteten Vergleichsfügeverfahren gezeigt. Grundsätzlich resultieren die Unterschiede in den Verbindungsfestigkeiten aus den unterschiedlichen Schaft- und Kopfdurchmessern der Hilfsfügeteile.



Abbildung 4-10:Kraft-Weg-Verläufe blindnietgefügter, halbhohlstanznietgefügter und vollstanznietgefügter Verbindungen der MDK1 unter quasistatischer Scherzugbelastung

Zur Vollständigkeit ist in Abbildung 4-11 eine Gegenüberstellung der unter quasistatischer Zugbelastung ermittelten Maximalprüfkräfte und Energieaufnahmen für sämtliche Fügeverfahren gezeigt. Das Reibelementschweißen unter Scherzugbelastung weist die höchsten Werte auf.



Abbildung 4-11:Maximalprüfkräfte und Energieaufnahme für unterschiedlich gefügte Mischbauverbindungen unter quasistatischer Zugbelastung

# 4.3 Detailanalysen der Verbindungszone

Verfahrensbedingt weisen die thermisch-mechanisch gefügten Mischverbindungen im Vergleich zu mechanisch gefügten Verbindungen Wärmeeinflusszonen auf. Während es sich beim Reibelementschweißen um einen Solid-State-Fügeprozess handelt, kommt es beim Widerstandselementschweißen zum lokalen Aufschmelzen und Erstarren des Elementwerkstoffes sowie des Stahlblechwerkstoffes. Da es sich bei den eingesetzten Werkstoffen um Vergütungsstähle (22MnB5 bzw. 20MnB4) handelt, kommt es in der Verbindungszone zu Anlass- und Aufhärtungseffekten.

Da diese Härtegradienten einen Einfluss auf das Versagensverhalten unter quasistatischer und schlagartiger Belastung und damit potenziell auch unter zyklischer Belastung haben, wurden Härtemappings von allen sechs Kombinationen angefertigt, die in Abbildung 4-12 aufgeführt sind.



Abbildung 4-12: Härteverteilung in Reibelement- und Widerstandselementschweißverbindungen der MDK1-3

Daraus wird ersichtlich, dass Reibelementschweißverbindungen trotz der geringeren Maximaltemperaturen tendenziell höhere maximale Härtewerte und auch höhere Härtegradienten aufweisen als Widerstandselementschweißverbindungen. Dies ist auf Gefügeveränderungen infolge von Rekristallisationseffekten in der Reibschweißzone zurückzuführen. Diese gefügetechnischen Kerben fallen zusammen mit den geometrischen Kerben der Verbindungszone.

Abbildung 4-13 zeigt exemplarisch ausgewählte Detailaufnahmen von Reibelementund Widerstandselementschweißungen. Infolge der Wulstbildung beim Reibschweißprozess ergibt sich eine scharfkantige Kerbe. In dem markierten Bereich ist gut erkennbar, das die etwa 30 µm dicke Aluminium-Silizium-Eisen-Beschichtung des Stahlbleches verdrängt wurde. Der Kerbradius beträgt etwa 30 µm.



Abbildung 4-13: Geometrische Kerben einer widerstandselement- (oben) und reibelementgeschweißten (unten) Verbindung

# 4.4 Festigkeitsuntersuchungen an Einpunktproben unter zyklischer Belastung

#### 4.4.1 Vorgehensweise und Versuchsprogramm

Zur Analyse des Tragverhaltens unter zyklischer Belastung wurden kraftgesteuerte Wöhlerversuche an gefügten Mischverbindungen auf Resonanzprüfmaschinen, teils auch weggesteuerte Versuche auf Servopulsmaschinen durchgeführt. Dabei wurden alle drei Material-Dicken-Kombinationen unter Kopf- und Scherzug geprüft. Zusätzlich wurden für die Material-Dicken-Kombination 1 zu Vergleichszwecken Nietverbindungen geprüft. Bei den Wöhlerversuchen wurden mindestens 12 Proben je Versuchsreihe verwendet.

Belastungs- richtung	R	WES		RES		HSN	VSN	BN		
		MDK1	MDK2	MDK3	MDK1	MDK2	MDK3	MDK1	MDK1	MDK1
Cohorne 27	0,1	×	✓	~	1	×	<b>√</b>	~	~	×
Scherzug	0,8	×	Ŧ	1	✓	Ŧ	✓			
Kopfzug	0,1	~	~	1	~	✓	×	Ŧ		
	0,8	1	✓	1	✓	1	1			
H-Probe	0,1	~	Keine Prüfung	~	Keine Prüfung	Keine Prüfung	Keine Prüfung	-	-	-

Abbildung 4-14: Durchgeführte Wöhlerversuche im Rahmen des Forschungsprojektes

Abbildung 4-14 zeigt eine Übersicht über das innerhalb der Laufzeit des Vorhabens durchgeführte Versuchsprogramm. Nicht aufgeführt sind die Versuchsreihen, bei denen zur Rissfortschrittsbestimmung Abschaltversuche durchgeführt wurden. Ebenso sind mehrfach durchgeführte Versuchsreihen aufgeführt. So wurden beispielsweise für das Lastverhältnis R=0,8 alle Versuchsreihen sowohl auf einem Resonanz- als auch auf einem servohydraulischen Prüfstand durchgeführt. Wie anhand des roten Blitzsymbols ersichtlich, konnten bei drei Versuchsreihen keine für Wöhlerlinien verwertbaren Versuchsergebnisse ermittelt werden. In diesen Versuchsreihen traten extrem starke Streuungen der Lebensdauer auf, was darauf zurückzuführen ist, dass bei sehr ähnlichen Kraftniveaus es entweder zu einer schnellen zyklischen Plastifizierung des Aluminiumwerkstoffes in den Verbindungen mit entsprechend geringer Lebensdauer oder zu Durchläufern (stichprobenartig bis zu 5x10<sup>7</sup> Schwingspiele) kam. Die Anfälligkeit für diesen Effekt ist bei lokal sehr dünnen Aluminiumbereichen in der Verbindung hoch, weshalb dieser Effekt bei MDK2-Verbindungen Halbholstanznietverbindung sowie bei der unter Kopfzugbelastung trotz großer Sorgfalt bei der Probenherstellung und -prüfung wiederholt auftrat.

Im Weiteren werden die Ergebnisse der Dauerfestigkeitsuntersuchungen bei den Lastverhältnissen von R=0,1 und R=0,8 vorgestellt.

#### 4.4.2 Tragverhalten bei Lastverhältnis R=0,1

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 4-15 und Abbildung 4-16) sind die Ergebnisse der Wöhlerversuche mit einem Lastverhältnis von R=0,1 mit dem jeweiligen Fügeverfahren und unterschiedlichen Material-Dicken-Kombinationen unter Scher- und Kopfzug dargestellt.

Anhand der Streubereiche lässt sich eine gute Reproduzierbarkeit aller Proben und Verbindungen feststellen. Die Festigkeitsunterschiede, welche in den statischen Zugversuchen zwischen den Fügeverfahren RES und WES ermittelt wurden, sind

unter dynamischer Last nicht mehr gegeben. Die Wöhlerlinien aller Material-Dicken-Kombinationen liegen in Abhängigkeit des Fügeverfahrens und der Material-Dicken-Kombination nahe beieinander.



Abbildung 4-15: Wöhlerdiagramm für die MDK1-3 bei einem Lastverhältnis von R=0,1 für die Scher- und Kopfzugbelastung widerstandselementgeschweißter Verbindungen



Abbildung 4-16: Wöhlerdiagramm für die MDK1-3 bei einem Lastverhältnis von R=0,1 für die Scher- und Kopfzugbelastung reibelementgeschweißter Verbindungen

Exemplarisch sind in Tabelle 4-4 die Versagensbilder der Material-Dicken-Kombination 1 jeweils einer mittels RES und WES gefügten Scherzugprobe dargestellt. Deutlich ist unter beiden Hilfsfügeteilen ein Riss im Aluminiumfügeteil zu erkennen. Bei näherer Betrachtung des Stahlfügeteils bzw. der Schliffbilder der Detailaufnahmen ist jedoch ebenso ein Riss im Stahlfügeteil festzustellen. Der Anriss im Stahlfügeteil befindet sich vom Hilfsfügeteil gesehen auf dem langen Schenkel des Stahlfügeteils. Dies lässt darauf schließen, dass die Biegespannungen trotz versetzt angeordneter Einspannungen der Probe wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, für das Versagen der Proben beider Fügeverfahren ausschlaggebend sind. Der Rissverlauf ist bei beiden Fügeverfahren charakteristisch gleich. Er beginnt im Bereich der geometrischen und metallurgischen Kerbe am Rand des Hilfsfügeteiles und wächst durch die Wärmeeinflusszone bis auf die Blechunterseite. Tabelle 4-4:Gegenüberstellung des Bruchverhaltens von widerstandselement-<br/>und reibelementgeschweißten Verbindungen der MDK1 nach<br/>Scherzugbelastung bei einem Lastverhältnis von R=0,1 sowie<br/>Detailaufnahme der auftretenden Risse



Das Versagensverhalten für die unterschiedlichen Material-Dicken-Kombinationen ist in Tabelle 4-5 für eine Scherzugbelastung und in Tabelle 4-6 für eine Kopfzugbelastung gegenübergestellt. Unter Scherzugbelastung treten die oben beschriebenen Rissphänomene auf. Unter Kopfzugbelastung treten unterschiedliche Versagensmodi auf, welche von dem Fügeverfahren und der MDK abhängig sind.

Tabelle 4-5:Gegenüberstellung des Bruchverhaltens von widerstandselement-<br/>und reibelementgeschweißten Verbindungen der MDK1-3 nach<br/>Scherzugbelastung bei einem Lastverhältnis von R=0,1

Füge- verfahren	MDK1 EN AW-6016-T4, t=2,0 mm + 22MnB5+AS150, t=1,5 mm	MDK2 EN AW-6016-T4, t=1,2 mm + 22MnB5+AS150, t=1,5 mm	MDK3 EN AW-6016-T4, t=2,0 mm + 22MnB5+AS150, t=1,0 mm	
WES	<b>N</b> <sub>B</sub> = 1.713.600	$N_{\rm B} = 1.693.300$	<b>N</b> <sub>B</sub> = 1.713.600	
R=0,1	<b>F</b> <sub>A</sub> = 0,68	$F_{\rm A} = 0.54$	<b>F</b> <sub>A</sub> = 0,68	
RES	$N_{\rm B} = 481.800$	<b>N<sub>B</sub></b> = 516.500	N <sub>B</sub> = 243.700	
R=0,1	$F_{\rm A} = 0.9$	<b>F<sub>A</sub></b> = 0,68	$F_A = 0,72$	

Tabelle 4-6:Gegenüberstellung des Bruchverhaltens von widerstandselement-<br/>und reibelementgeschweißten Verbindungen der MDK1-3 nach<br/>Kopfzugbelastung bei einem Lastverhältnis von R=0,1



Um eine bessere Vergleichbarkeit der Verbindungen herstellen zu können, wurde für das Lastverhältnisse von R=0,1 und aus den oben gezeigten Wöhlerlinien die ertragbare Amplitude bei einer Lastspielzahl von 2 Mio. Schwingspielen aus der ermittelten Zeitfestigkeitsgeraden berechnet. Zusätzlich wurden die 10% und 90% Überlebenswahrscheinlichkeiten berechnet und als "Fehlerindikatoren" in einem Säulendiagramm dargestellt. Für sämtliche Versuchsergebnisse sind die ertragbaren Amplituden in Abbildung 4-7 gezeigt. In dieser Darstellung zeigt sich, dass zwischen den widerstandselement- und reibelementgeschweißten Proben der jeweiligen Material-Dicken-Kombination keine signifikanten Unterschiede der ertragbaren Herausstellen sich. dass die Amplituden bestehen. lässt Proben unter Kopfzugbelastung eine deutlich geringere ertragbare Amplitude im Vergleich zu Scherzugproben aufweisen.



Abbildung 4-17: Gegenüberstellung der ertragbaren Amplituden bei 2 Mio. Schwingspielen und einem Lastverhältnis von R=0,1 für alle MDK's für widerstandselement- und reibelementgeschweißte Verbindungen unter Kopf- und Scherzugbelastung

Zur Einordnung der Tragfähigkeiten der thermisch-mechanischen Fügeverfahren wurden zusätzlich blind-, halbhohl- und vollstanzgenietete Scherzugproben der MDK1 bei einem Lastverhältnis von R=0,1 im Wöhlerversuch geprüft. Außerdem wurden auf Wunsch des pbA widerstandselementgeschweißte Proben, die mit einem Lateralversatz von 1,5 mm zwischen Elektrode und Hilfsfügeteil gefügt wurden, geprüft. Abbildung 4-18 zeigt die ermittelten Wöhlerlinien. Auf eine Darstellung der 10%- und 90%-Linien wurde aus Übersichtlichkeitsgründen verzichtet. Es fällt auf, dass die Zeitfestigkeitsgeraden der halbhohl- und vollstanzgenieteten Proben mit k≈5,3 eine geringere Neigung als die übrigen Fügeverfahren aufweisen und höhere ertragbare Kraftamplituden im Bereich der technischen Dauerfestigkeit (2x10<sup>6</sup> Lastwechsel) aufweisen. Wie anhand exemplarischer Versagensbilder der mechanisch gefügten Proben in Tabelle 4-7 ersichtlich, befindet sich der versagenskritische Riss bei Schwingspielzahlen größer 100.000 ausnahmslos im Aluminiumfügeteil. Aufgrund der höheren Blechdicke sowie einer schnelleren Plastifizierung aufgrund der deutlich geringeren mechanischen Festigkeiten des Aluminiums im Vergleich zum Stahlfügeteil ergeben sich somit tendenziell höhere Lebensdauern, als bei gleicher Belastung an thermisch-mechanisch gefügten Einpunktproben.



Abbildung 4-18:Wöhlerdiagramm für die MDK1 bei einem Lastverhältnis von R=0,1 für die Scherzugbelastung verschiedener Fügeverfahren

Tabelle 4-7:GegenüberstellungdesBruchverhaltensverschiedenerFügeverfahrenderMDK1nachScherzugbelastungbeieinemLastverhältnis von R=0,1

	HSN mit Sonderniet	VSN	BN
AI			6
Stahl			0

#### 4.4.3 Tragverhalten bei Lastverhältnis R=0,8

Die gleichen Versuche aus dem vorangehenden Abschnitt wurden auch für ein Lastverhältnis von R=0,8 durchgeführt. In Abbildung 4-19 ist zunächst das Wöhlerdiagramm für die MDK1-3 widerstandselementgeschweißter Verbindungen zu sehen. In Abbildung 4-20 ist das äquivalente Diagramm für reibelementgeschweißte Verbindungen zu sehen. Anders als in den oben gezeigten Wöhlerdiagrammen für ein Lastverhältnis von R=0,1 weisen die hier gezeigten Wöhlerlinien starke Streuungen auf. Der Grund liegt in den geringen ertragbaren Amplituden bei einem Oberkräfte Lastverhältnis von R=0,8, was hohe erfordert. um im Zeitfestigkeitsbereich ein Versagen zu erzielen. Diese hohen Oberkräfte können bei den Verbindungen zu lokalen plastischen Verformungen führen, weshalb starke Streuungen auftreten und die Versuchsergebnisse beeinflussen.



Abbildung 4-19: Wöhlerdiagramm für die MDK1-3 bei einem Lastverhältnis von R=0,8 für die Scher- und Kopfzugbelastung widerstandselementgeschweißter Verbindungen



Abbildung 4-20: Wöhlerdiagramm für die MDK1-3 bei einem Lastverhältnis von R=0,8 für die Scher- und Kopfzugbelastung reibelementgeschweißter Verbindungen

Auch die hier dargestellten Amplituden  $F_A$  wurden auf ein Lastspiel von N=2.000.000 normiert um eine Vergleichbarkeit der Verbindungen herstellen zu können. Die entsprechende Gegenüberstellung der ertragbaren Amplituden ist in Abbildung 4-21 zu sehen. So weisen die Scherzugproben dieser Versuchsreihe mit einem Lastverhältnis von R=0,8 geringere ertragbare Amplituden  $F_A$  auf als die Scherzugproben mit R=0,1. Auch die Kopfzugproben dieser Versuchsreihe ertragen wesentlich geringere Amplituden  $F_A$  im Vergleich zu den Scherzugproben.



Abbildung 4-21:Gegenüberstellung der ertragbaren Amplituden bei 2 Mio. Schwingspielen und einem Lastverhältnis von R=0,8 für alle MDK's für widerstandselement- und reibelementgeschweißte Verbindungen unter Kopf- und Scherzugbelastung

# 4.5 Detailanalyse der Anrissbildung

#### 4.5.1 Durchführung und Auswertung der Abschaltversuche

Abschaltversuche dienen der Untersuchung und Bestimmung des Anrissverhaltens und des Risswachstums in der Verbindung. Als Kriterium für einen Anriss wird der Frequenzabfall aus den Wöhlerversuchen Dabei wird die genutzt. Steifigkeitsänderung einer Probe und damit einhergehende Änderungen der Prüffrequenz der Resonanzprüfmaschine genutzt. Die durch den Anriss bzw. das Risswachstum hervorgerufene Querschnittsänderung ist die Ursache für die Steifigkeitsänderung. Wird also ein Frequenzabfall festgestellt, so ist dies ein Indikator für einen möglichen Anriss der untersuchten Probe. Die folgende Abbildung 4-22 zeigt beispielhaft die Frequenzverläufe von widerstandselementgeschweißten Proben der Material-Dicken-Kombination 1, jeweils dargestellt mit der aufgebrachten Amplitude. Auch ist die Rissinitierung in Abhängigkeit der Schwingspielzahl aufgetragen.



Abbildung 4-22: Frequenzabfall bei widerstandselementgeschweißten Verbindungen der MDK1 und dem Lastverhältnis von R=0,1 sowie die jeweils aufgebrachte Kraftamplitude



Abbildung 4-23: Detailanalyse des Frequenzabfalls bei widerstandselementgeschweißten Verbindungen der MDK1 und dem Lastverhältnis von R=0,1

Es wurden nun jeweilige Proben im Schwingfestigkeitsversuch mit einem Lastverhältnis von R=0,1 geprüft und bei einem Frequenzabfall  $\Delta f$  von 0,1 Hz, 0,5 Hz und 1,0 Hz der Prüfmaschine entnommen und untersucht. Tabelle 4-8 zeigt exemplarische Schliffbilder der Material-Dicken-Kombination 1 von mittels WES gefügten Scherzugproben nach dem Abbruch des Dauerfestigkeitsversuches nach einem Frequenzabfall von 0,1 Hz, 0,5 Hz und 1,0 Hz und den Rissfortschritt

Tabelle 4-8:Detailanalyse des Rissfortschrittes widerstandselementgeschweißter<br/>Verbindungen nach Scherzugbelastung für die MDK1 und für das<br/>Lastverhältnis von R=0,1

F <sub>A</sub>	0,62 kN						
Abschalt- kriterium ∆f	0,1 Hz	0,5 Hz	1 Hz				
Schwing- spielzahl N	102.700	139.100	209.400				
	€ LWF	LWF	LWF ○ Riss 1mm				

Anhand der obigen Schliffbilder ist deutlich zu erkennen, dass bei einem Frequenzabfall von  $\Delta f=0,5$  Hz ein Anriss von ca. 0,15 mm Länge beobachtet werden kann, während bis 0,1 Hz noch kein technischer Anriss nachweisbar ist. Zur Berechnung der Anrisswöhlerlinien aus den experimentell ermittelten Bruchwöhlerlinien wurde das Anrisskriterium auf einen Frequenzabfall von 0,5 Hz festgelegt. Ein ähnliches Verhalten ist auch bei den mittels RES gefügten Proben, wie in Abbildung 4-24 und Tabelle 4-9 dargestellt, zu beobachten.



- Abbildung 4-24: Frequenzabfall bei reibelementgeschweißten Verbindungen der MDK1 und dem Lastverhältnis von R=0,1 sowie die jeweils aufgebrachte Kraftamplitude
- Tabelle 4-9:DetailanalysedesRissfortschrittesreibelementgeschweißterVerbindungen nachScherzugbelastung für dieMDK1 und für dasLastverhältnis von R=0,1

F <sub>A</sub>		0,62 kN	
Abschalt- kriterium ∆f	0,1 Hz	0,5 Hz	1 Hz
Schwing- spielzahl N	838.646	974.300	1.187.100
	LWF 1 mm ↔	LWF 1 mm	LWF 1 mm

Durch eine manuelle Prüfung aller Frequenzverläufe wurden die Anrisswöhlerlinien und dessen Streubereiche, welche den folgenden Diagrammen der Abbildung 4-25 und Abbildung 4-26 zu entnehmen sind, für einen Frequenzabfall von  $\Delta f$  0,5 Hz der MDK1 für mittels RES und WES gefügte Scherzugproben ermittelt.



Abbildung 4-25: Vergleich der Bruch- und Anrisswöhlerlinie für die MDK1 bei einem Lastverhältnis von R=0,1 für die Scherzugbelastung widerstandselementgeschweißter Verbindungen



Abbildung 4-26: Vergleich der Bruch- und Anrisswöhlerlinie für die MDK1 bei einem Lastverhältnis von R=0,1 für die Scherzugbelastung reibelementgeschweißter Verbindungen

Aus den ermittelten Daten der Wöhlerversuche und den daraus berechneten Anriss-Wöhlerlinien lassen sich die Verfahren, in Bezug zu den ertragbaren Schwingspielen bis zum Anriss bzw. bis zu einem Frequenzabfall von  $\Delta f=0,5$  Hz, vergleichen. Die folgende Abbildung 4-27 zeigt den Vergleich der ertragbaren Schwingspiele bis zum definierten Anriss (bei 0,5 Hz) von mittels WES und RES gefügten Scherzugproben aller Materialkombinationen unter der dargestellten berechneten ertragbaren Kraftamplituden bis zum Bruch bei einem Schwingspiel von N<sub>b</sub>=2.000.000.



Abbildung 4-27: Vergleich der Schwingspiele und ertragbaren Amplituden widerstandselement- und reibelementgeschweißter Verbindungen bis zum Anriss bei einem Lastverhältnisse von R=0,1 unter Scherzugbelastung

Beide Fügeverfahren zeigen auch bei den errechneten ertragbaren Schwingspielen bis zum Anriss keine wesentlichen Unterschiede.

# 4.6 Festigkeitsuntersuchungen an bauteilähnlichen Strukturen unter zyklischer Belastung

Zusätzlich zu den Einpunktproben wurden Schwingfestigkeitsversuche an Mehrpunktproben in Form der etablierten H-Scherzugprobe durchgeführt. Aufgrund der Zugänglichkeit der Anlagentechnik zum Reibelementschweißen wurden in Abstimmung mit dem pbA lediglich Versuche an widerstandselementgeschweißten Proben durchgeführt. Wie in Abbildung 4-28 beispielhaft erkennbar, weist die berechnete Zeitfestigkeitsgerade eine geringere Neigung als die Zeitfestigkeitsgerade der vergleichbaren Einpunktprobe unter Scherzugbelastung auf. Zusätzlich zeigt die Abbildung 4-29 den Prüfaufbau bei dieser Versuchsreihe und beispielhaft den dabei auftretenden Riss.



Abbildung 4-28: Wöhlerlinien widerstandselementgeschweißter H-Proben der MDK3 bei einem Lastverhältnis von R=0,1



Abbildung 4-29: Prüfaufbau (links) und exemplarisches Versagensverhalten (rechts) einer geprüften H-Probe

# 5 Lebensdauerabschätzung auf Basis der Finite-Elemente-Methode

In diesem Kapitel werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse zur Lebensdauerabschätzung auf Basis der Finite-Elemente-Methode vorgestellt. In Kap. 5.1 wird zunächst die Durchführung eines lokal- bzw. kerbspannungsbasierten Konzeptes erläutert. Kap. 5.2 beinhaltet die Ergebnisse des für Widerstandsschweißpunkte erstellten FESPOW-Konzeptes.

# 5.1 Lokal- bzw. kerbspannungsbasiertes Konzept

#### 5.1.1 Vorgehensweise, Modellaufbau und -validierung

Lokal- oder kerbspannungsbasierte Konzepte zielen darauf ab, aus den äußeren Belastungen (z.B. Kräften) die Spannungen an Kerben und Inhomogenitäten zu berechnen und in Beziehung zu ertragbaren Spannungen zu setzen, um so die Lebensdauer abschätzen zu können. Die Ermittlung der im Anrissbereich auftretenden Spannungen lässt sich bei komplexen Geometrien, wie beispielsweise der Verbindungszone der in diesem Projekt betrachteten thermisch-mechanisch gefügten Verbindungen, mit vertretbarem Aufwand nur in FEM-Simulationen umsetzen. Die gewählte Vorgehensweise zur Entwicklung und Überprüfung der Eignung eines solchen Konzeptes für die hier betrachteten Verbindungsarten ist schematisch in Abbildung 5-1 dargestellt.


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei Nutzung des Lokal- bzw. Kerbspannungskonzeptes

Mithilfe der FEM-Simulation werden die äußeren Belastungen in lokale Spannungen, genauer in Spannungsamplituden, umgerechnet und somit Lokalspannungs-Wöhlerlinien erstellt. Diese können dann mit den Lokalspannungs-Wöhlerlinien anderer Versuchsreihen und den Wöhlerlinien für Werkstoffsubstanzproben verglichen werden. Idealerweise ergibt sich dabei eine ähnliche Lage der Zeitfestigkeitsgeraden im Wöhlerdiagramm, sodass zukünftig auf Basis einer Masterwöhlerlinie oder einer Werkstoff-Wöhlerlinie für beliebige Belastungsrichtungen und Material-Dicken-Kombinationen Lebensdauerprognosen erstellt werden können.

Zur Berechnung der lokalen Spannungen wird ein möglichst realitätsnahes 3D-FEM-Modell benötigt. Hierbei müssen jedoch Modellierungsaufwand und Rechendauer berücksichtigt werden. Abbildung 5-2 zeigt beispielhaft den Aufbau der FE-Belastungssimulation am Beispiel des Reibelementschweißens. Da während der Projektbearbeitung keine aussagekräftigen, validierten Prozesssimulationen des Widerstandselement- und Reibelementschweißprozesses zur Verfügung standen, muss die Verbindungszone anhand eines repräsentativen metallographischen Schliffbildes nachgebildet werden. Aus Gründen der Vernetzbarkeit müssen dabei gewisse Glättungen und Vereinfachungen vorgenommen werden. Ebenso liegen keine aus einer Prozesssimulation berechneten Werkstoffkennwerte für das Stahlfügeteil und die Hilfsfügeteile vor. Daher werden auf Basis eines Härtemappings verschiedene Sektionen definiert und diesen entsprechende Fließkurven, die mit den Härtewerten korrelieren, zugewiesen.



Abbildung 5-2: Aufbau der FE-Belastungssimulation am Beispiel des Reibelementschweißens

Bei dieser Vorgehensweise tritt jedoch das Problem auf, dass die exakte Kerbgeometrie entweder nicht bekannt ist oder aber nicht hinreichend genau im Modell abgebildet werden kann. Zudem können Einflüsse wie lokales Plastifizieren, Stützwirkungen usw. nicht exakt abgebildet werden. In anderen Bereichen des Maschinenbaus, wie z.B. der Lichtbogenschweißtechnik bzw. des Metallbaus, liegen verschiedene Handlungsempfehlungen zur Modellierung von Kerben vor. Beispielhaft sind diese in Abbildung 5-3 (oben) visualisiert. Die Übertragbarkeit auf die bei thermisch-mechanischen Fügeverfahren vorliegenden Kerbradien ist beschränkt.

Empfehlungen aus IIW-Guideline (IIW-Doc. XIII-2240-08/XV-1289-08) nach Prof. Fricke, TUHH							
Table 3.1: Recommend	dations for	r element siz	es (along and	l vertical to no	otch surface)		
Element type (displacement function)	Relative size	size for $r = 1 \text{ mm}$	size for <i>r</i> = 0.05 mm	No. of ele- ments over 45 deg arc	No. of ele- ments over 360 deg arc		
quadratic (e.g. with mid-side nodes)	≤ <i>r</i> /4	$\leq$ 0.25 mm	$\leq$ 0.012 mm	≥ 3	≥ 24		
linear	≤ <i>r</i> /6	$\leq$ 0.15 mm	$\leq$ 0.008 mm	≥ 5	≥ 40		
Schliffbild (MDK2)							
Bestimmung Ersatz-Kerbradien für RES-Verbindung							
Schliffbild (MD	K2)	C. C. W.			FE-Mo	dell (MDK1, Scherzug)	
Schliffbild (MD	K2)				FE-Mo	dell (MDK1, Scherzug)	
Schliffbild (MD	к2)				FE-Mo	dell (MDK1, Scherzug)	
Schliffbild (MD	K2)				FE-Mo	dell (MDK1, Scherzug)	
Schliffbild (MD	K2)				FE-Mo	dell (MDK1, Scherzug)	

Abbildung 5-3: Modellierungsvorschriften für Kerben

Zur Validierung des FE-Modells wurde das Kraft-Weg-Verhalten von simulativ und experimentell geprüften Proben unter quasistatischer Belastung ermittelt. Exemplarisch sind in Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 die entsprechenden Verläufe für die MDK1 und MDK3 gegenübergestellt. Für die MDK1 zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung bis zur maximal geprüften Oberkraft der Wöhlerversuche. Auch für MDK3 stimmen die Berechnungsergebnisse sehr gut mit den Versuchen überein. Die Modelle können für die zyklischen Untersuchungen verwendet werden. Aufgrund von Konvergenzproblemen liegen die Berechnungsergebnisse für MDK3 bis knapp unterhalb der maximal geprüften Oberkraft der Wöhlerversuche vor.



Abbildung 5-4: Validierung des FE-Modells anhand des Kraft-Weg-Verlaufes für die MDK1



Abbildung 5-5: Validierung des FE-Modells anhand des Kraft-Weg-Verlaufes für die MDK3



Abbildung 5-6: Gegenüberstellung der Spannungsverteilung und lokalspannungsbasiertes Berechnungskonzept

Abbildung 5-6 zeigt exemplarisch die Durchführung und Auswertung der zyklischen Berechnungen an den vorgestellten Detailmodellen. Zunächst wurde der hochbeanspruchte und damit ermüdungskritische Bereich identifiziert. Der Bereich wird im Stahlfügeteil im Bereich der Kerbe vorhergesagt. Dieses korreliert sehr gut mit dem experimentell ermittelten Anrissort (vgl. Tabelle 4-9). Anschließend konnten auf Basis dieser Berechnungen die Kerbspannungswöhlerlinien durch die Auswertung der max. Hauptspannungsamplituden erstellt werden.

#### 5.1.2 Berechnungsergebnisse

In Abbildung 5-7 sind die berechneten Lokalspannungswöhlerlinien für eine Scherzugbelastung der MDK1- und MDK3-Reibelementverbindung sowie für eine Kopfzugbelastung der MDK1 dem Ergebnis auf Basis einer 22MnB5+AS150 Substanzprobe gegenübergestellt. In Abbildung 5-8 sind die berechneten "Hauptspannungsamplituden"-Wöhlerinien für RES-Verbindungen gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Lokalspannungswöhlerlinien der MDK1 und MDK3 deutlich unterschiedliche Neigungen aufweisen. Zudem zeigt sich, dass die umgerechnete Zeitfestigkeitsgeraden erheblich höhere Amplituden als die verwendeten Substanzproben aufweisen und somit der Grad der Vergleichbarkeit gering ist, was die Nutzung für eine Lebensdauerabschätzung einschränkt.



Abbildung 5-7: Berechnete Lokalspannungswöhlerlinien



Abbildung 5-8: Berechnete "Hauptspannungsamplituden"-Wöhlerinien für RES-Verbindungen, MDK1+3

# 5.2 Radialspannungskonzept (FESPOW)

Das von Rupp et. al. maßgeblich entwickelte FESPOW-Konzept (Fatigue Evaluation Spot-Weld) sieht vor, zunächst aus den äußeren Belastungen einer Baugruppe die jeweiligen Schnittkräfte und -momente im Schweißpunkt zu berechnen. Die Blechbauteile werden dabei im Schweißpunktbereich als Scheiben und Platten mit starrem Kern angenommen. Unter Einbeziehung des Schweißpunktdurchmessers und der Blechdicke können dann über analytische Formeln aus den Schnittkräften die Radialspannungen berechnet werden. Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 5-9 skizziert.



Abbildung 5-9: Erläuterung des FESPOW-Ansatzes

Um die Schnittkräfte in den thermisch-mechanisch gefügten Verbindungen in Abhängigkeit der äußeren Belastung zu bestimmen, werden FE-Simulationen durchgeführt. Die Scherzug- und LWF-KS2-Kopfzugproben werden dazu in ABAQUS als Schalenelemente vom Typ Quad mit einer Kantenlänge zwischen 2,0 mm und 4,5 mm abgebildet, während die Fügeverbindung durch einen Fastener vom Typ Beam mit einem Einflussradius von 2,25 mm, welcher Kräfte und Momente übertragen kann, repräsentiert wird (vgl. Abbildung 5-10).



Abbildung 5-10: Erläuterung des Simulationsmodellaufbaus für eine Scher- (oben) und Kopfzugprobe (unten)

Die Proben werden in der Simulation quasistatisch belastet und aus den Ergebnisfiles werden die Schnittkräfte und –momente in Abhängigkeit der äußeren Belastung ausgelesen. Wie beispielhaft in der Abbildung 5-11 erkennbar, ergibt sich bei Scherzug erwartungsgemäß eine hohe Schnittkraft in x-Richtung (CTF1) und ein Schnittmoment um die y-Achse (CTM2).



Abbildung 5-11: Darstellung der in der FE-Simulation ermittelten Schnittkraftverläufe für widerstandselementgeschweißte Verbindungen für die MDK1

Anschließend erfolgt in einem Tabellenkalkulationsprogramm die Berechnung der Radialspannungsverläufe mithilfe der Formeln des FESPOW-Modells. Da der versagensrelevante Riss bei höheren Schwingspielzahlen stets im Stahlblech auftritt, wird die Radialspannung auf der Stahlblechseite ausgewertet. Der Modellparameter "Schweißlinsendurchmesser d" wird auf den Schaftdurchmesser des Hilfsfügeteils festgelegt, ungeachtet der Tatsache, dass die realen Durchmesser bis zur geometrischen Kerbe insbesondere bei den WES-Verbindungen üblicherweise kleiner sind.

Die Korrelationsanalyse zwischen ermittelter Radialspannung und äußerer Belastung ergibt für den relevanten Prüfkraftbereich für die Wöhlerversuche an Einpunktproben (bis ca. 5 kN) in allen Fällen einen mittels linearer Funktion hinreichend genau abbildbaren Zusammenhang, wie Abbildung 5-12 exemplarisch zeigt.



Abbildung 5-12: Gegenüberstellung der Radialspannung zur Prüfkraft für die MDK1-3 am Beispiel des Widerstandselementschweißens

Aufgrund des angenommenen linearen Zusammenhangs zwischen Kraft und Radialspannung können Radialspannungsamplituden direkt berechnet werden, beispielsweise über die Formel

$$\sigma_{r,a} = \sigma_r(F_o) - \sigma_r(F_m)$$

## 5.2.1 Berechnungsergebnisse für Einpunktproben

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der im vorangegangen Kapitel beschriebenen Vorgehensweise des FESPOW-Radialspannungskonzeptes werden alle Kraft-Wöhlerlinien in Radialspannungswöhlerlinien umgerechnet und geprüft, ob die

Wöhlerlinien nun ähnliche Lagen und Neigungen aufweisen. Wie Abbildung 5-13 exemplarisch zeigt, fallen die Wöhlerlinien der experimentell ermittelten Kopf- und Scherzugproben unabhängig von der Blechdicke nun zusammen. Damit ist die Voraussetzung für Lebensdauerprognosen geschaffen.



Abbildung 5-13:Berechnete Radialspannungsamplituden für ein Lastverhältnis von R=0,1 für widerstandselementgeschweißte Verbindungen

Möglichkeit zur Überprüfung der Vorhersagegenauigkeit eines solchen Eine Ansatzes besteht darin, auf Basis einer experimentell ermittelten Wöhlerlinie weitere Wöhlerlinien vorherzusagen und das Vorhersageergebnis mit experimentell ermittelten Daten zu vergleichen. Dazu werden zunächst die ermittelten Wertepaare (Kraft und Schwingspielzahl) der MDK1 unter Scherzugbelastung in Wertepaare mit Radialspannung umgerechnet und anschließend eine Radialspannungswöhlerlinie berechnet. Aus Anfangs- und Endpunkt dieser Radialspannungswöhlerlinie werden anschließend über die in den FE-Simulationen für andere Material-Dicken-Kombinationen und Belastungsrichtungen ermittelten Zusammenhänge zwischen Prüfkraft und Radialspannung die Prüfkräfte bzw. die Kraftamplituden berechnet. Wie Abbildung 5-14 exemplarisch dargestellt, liegt die für MDK1 unter in Kopfzugbelastung vorhergesagte Wöhlerlinie (orange) sehr nahe bei der im experimentellen Versuch ermitteln Wöhlerlinie, was die Anwendbarkeit des Berechnungsmodells mindestens für identische Materialkombinationen und gleiche Lastverhältnisse bestätigt.



Abbildung 5-14: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten und mittels des FESPOW-Modells errechneten Wöhlerlinien für widerstandselementgeschweißte Verbindungen (Berechnung der Wöhlerlinie für die Kopfzugbelastung aus der Wöhlerlinie für eine Scherzugbelastung)

Zur Überprüfung der Prognosegüte werden entsprechende Auswertungen auch für die weiteren experimentell durchgeführten Wöhlerversuche erstellt. Zur besseren bildlichen Darstellung werden aus den vorhergesagten Wöhlerlinien und den ermittelten Wöhlerlinien die ertragbare Amplitude bei 2x10<sup>6</sup> experimentell (50% Überlebenswahrscheinlichkeit) bestimmt Lastwechseln und in einem Säulendiagramm gegenübergestellt (Abbildung 5-15). Dabei kann festgestellt werden, dass bereits mit nur einer experimentell ermittelten Wöhlerlinie (MDK1, Scherzug, mit R=0,1) eine gute Prognosegüte für weitere geprüfte Belastungsarten und Materialkombinationen bei einem Lastverhältnis von R=0,1 erreicht wird. Für ein Lastverhältnis von R=0,8 ergeben sich deutlich höhere Abweichung von experimentell und mittels FESPOW berechneten Amplitude.



Abbildung 5-15: Gegenüberstellung der aus dem Experiment und mittels FESPOW berechneten Amplituden bei Anwendung des Berechnungskonzeptes für eine angenommen Schwingspielzahl von N=2.000.000 für widerstandselementgeschweißte Verbindungen (Berechnung auf Basis der Scherzugversuche bei R=0,1 / R=0,8; MDK1)

In entsprechender Weise wurde auch die Anwendbarkeit des Modellansatzes bei RES-Verbindungen geprüft. Auch hier lassen sich zufriedenstellende Ergebnisse erzielen, wenn beispielsweise aus der MDK1-Scherzug-Wöhlerlinie die MDK1-Kopfzugwöhlerlinie vorhergesagt wird, wie Abbildung 5-16 zeigt.



Abbildung 5-16:Gegenüberstellung der experimentell ermittelten und mittels des FESPOW-Modells errechneten Wöhlerlinien für reibelementgeschweißte Verbindungen (Berechnung der Wöhlerlinie für die Kopfzugbelastung aus der Wöhlerlinie für eine Scherzugbelastung)

Die Abweichungen zwischen experimentell ermittelter und berechneter ertragbarer Kraftamplitude bei 2x10<sup>6</sup> Lastspielen sind sogar deutlich geringer als bei den Widerstandselementschweißverbindungen. Eine mögliche Erklärung für die höheren Abweichungen beim Widerstandselementschweißen ist der fertigungsbedingt schwankende Schweißlinsendurchmesser sowie zufällig auftretende geringfügige Schiefstellungen des Hilfsfügeteiles nach dem Schweißen. Somit herrschen in der Verbindungszone im Kerbgrund unterschiedliche Konditionen, die sich auf die Streuung der Wöhlerlinien auswirken und die Prognosegüte des Modells verringern. Eine Verbesserung der Prognosegüte bei WES-Verbindungen konnte durch genauere Berücksichtigung des Schweißlinsendurchmessers im Modell jedoch nicht erreicht werden.

Der Übertrag des Ergebnisses auf die weiteren aus den vorhergesagten Wöhlerlinien und den experimentell ermittelten Wöhlerlinien wird die ertragbare Amplitude bei 2x10<sup>6</sup> Lastwechseln (50% Überlebenswahrscheinlichkeit) ist in den Säulendiagrammen der Abbildung 5-17 gegenübergestellt. Auch hier kann festgestellt werden, dass mit nur einer experimentell ermittelten Wöhlerlinie (MDK1, Scherzug, mit R=0,1) für das Lastverhältnis von R=0,1 eine sehr gute Prognosegüte für weitere geprüfte Belastungsarten und Materialkombinationen vorliegt. Analog zum Widerstandselementschweißen zeigen die Resultate für ein Lastverhältnis von R=0,8 höhere Abweichung der experimentell und mittels FESPOW berechneten Amplituden.





## 5.2.2 Berechnungsergebnisse für bauteilähnliche Probe

Um die Übertragbarkeit des Modells auf Mehrpunktproben oder Bauteile grundlegend zu prüfen, werden die H-Proben in der FE-Simulation analog zu den Scherzugproben nachgebildet, siehe Abbildung 5-18. Aus Gründen der Recheneffizienz wurden die Schenkel nur bis zur festen Einspannung modelliert.



#### Abbildung 5-18:

Die Auswertung der Schnittkräfte der insgesamt 10 Verbindungspunkte (5x je Seite) zeigte eine recht homogene Verteilung der äußeren Last auf die einzelnen Verbindungspunkte. Über die ausgewerteten Schnittkräfte wurde der Zusammenhang zwischen Radialspannung und äußerer Belastung für den bzw. die ermittelt. Anschließend höchstbelasteten Punkte wird mithilfe der Radialspannungswöhlerlinie der Einpunktprobe eine Kraft-Wöhlerlinie für die H-Proben berechnet und der experimentell ermittelten Wöhlerlinie gegenübergestellt. Auch hier zeigt sich erwartungsgemäß eine sehr gute Übereinstimmung und somit eine gute Anwendbarkeit des Modells, wie Abbildung 5-19 exemplarisch zeigt.



Abbildung 5-19: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten und mittels des FESPOW-Modells errechneten Wöhlerlinien am Beispiel für widerstandselementgeschweißte H-Proben der MDK3

## 5.2.3 Berechnung einer Master-Wöhlerlinie

In den vorangegangenen Kapiteln wurden aus den Daten nur einer experimentellen Versuchsreihe, z.B. MDK1-Scherzug, die Wöhlerlinien für andere Belastungsarten (Kopfzug) und Materialdickenkombinationen (z.B. MDK3) berechnet und mit den experimentellen Ergebnissen verglichen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, alle Versuchsdaten zu einer Master-Wöhlerlinie zusammenzufassen, die für künftige Auslegungen verwendet werden kann. Abbildung 5-20 zeigt die Wertepaare aus berechneter Radialspannung und Schwingspielzahl für alle WES- und RES-Einpunktproben (um Ausreißer bereinigt) sowie eine dazugehörige ermittelte Zeitfestigkeitsgerade inkl. Streubändern. Trotz der Berücksichtigung einer Mittelspannungsempfindlichkeit zeigen die Proben mit R=0,8 eine geringfügig andere Steigung und Lage als die Proben mit R=0,1, wodurch das Maß für die Streuung, der T<sub>N</sub>-Wert, einen recht hohen Wert annimmt. Dennoch kann mit der Masterwöhlerlinie auch für andere Lastfälle und abweichende R-Verhältnisse die Lebensdauer thermisch-mechanisch gefügter Verbindungen in erster Näherung abgeschätzt werden, wenn die Verbindungsqualität den hier untersuchten Verbindungen entspricht.



Abbildung 5-20: Ermittelte Radialspannung-Masterwöhlerlinie für thermischmechanisch gefügte Mischverbindungen mit 22MnB5-Werkstoffen als Basisblech und 6000er Aluminiumblechlegierungen

# 6 Zusammenfassung und Ausblick

Getrieben durch die CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung und weitere Aspekte gewinnt der Karosserieleichtbau in Form der Mischbauweise zunehmend an Bedeutung. Eine Herausforderung stellt dabei das wirtschaftliche Verbinden von pressgehärteten Stählen, die heute bereits bei konventionellen Stahlkarosserien einen Anteil in nahezu allen Fahrzeugklassen von 20-35% aufweisen, mit Aluminiumwerkstoffen dar. Zur wirtschaftlichen Fertigung ist die Entwicklung mischbautauglicher Fügeverfahren, wie beispielsweise Widerstandsdes oder des Reibelementschweißens, sowie deren Absicherung und Charakterisierung erforderlich. Im Rahmen dieses öffentlich geförderten Forschungsprojektes wurden daher quasistatische und zyklische Versuche an Einpunkt- und Mehrpunktproben entsprechender Materialkombinationen durchgeführt, wobei die verwendeten Materialien und Hilfsfügeteile sowie der Fügeprozess so serienproduktionsnah wie möglich ausgeführt wurden.

Reibelementgeschweißte Verbindungen weisen im quasistatischen Belastungsfall höhere Maximalkräfte und Energieaufnahmen gegenüber widerstandselementgeschweißten Verbindungen auf, während unter zyklischer Belastung Widerstands- und Reibelementschweißverbindungen gleicher Material-Dicken-Kombination jeweils eine ähnliche Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden und ähnliche ertragbare Amplituden aufweisen.

Mithilfe von Abschaltversuchen auf Basis der Eigenfrequenzänderung bei einem Resonanzprüfsystem konnte gezeigt werden, dass der Anrissort bei zyklischen Scher- und Kopfzugprobenprüfungen sich in der verfahrensbedingt vorhandenen geometrischen Kerbe in der Trennebene zwischen den Fügeteilen, ähnlich wie bei zyklisch belasteten Stahl-Widerstandspunktschweißverbindungen befindet. Die Härteunterschiede, Kerbwirkung der sehr großen die sich infolae der Gefügeveränderungen aufgrund der Prozesswärme und -kräfte in der Fügezone thermisch-mechanisch gefügter Verbindungen einstellen, ist dagegen für die Anrissbildung offenbar unkritisch. Inwiefern sie das weitere Risswachstum begünstigen oder verringern, konnte im Rahmen des Vorhabens nicht abschließend geklärt werden.

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit etablierter Berechnungskonzepte für die neuartigen thermisch-mechanischen Verbindungen wurden zwei Ansätze verfolgt. Beim kerbspannungsbasierten Ansatz wurde die Fügezone im Detail in einer FEM-Simulation mit Hexaeder-Volumenelementen auf Basis von metallographischen Schliffen und Härtemappings nachgebildet und verschiedene mechanische Kennwerte im Bereich des Anrisses bezüglich ihrer Korrelation zu den experimentellen Ergebnissen geprüft. Beim FESPOW-Ansatz, der sich für Widerstandspunktschweißverbindungen bewährt hat, können dagegen die

typischerweise in der Karosserieberechnung verwendeten Schalenelemente verwendet werden und der Fügepunkt wird durch ein Ersatzmodell repräsentiert.

Aufgrund der Ähnlichkeit im Versagensverhalten bei zyklisch belasteten thermischmechanischen und widerstandspunktgeschweißten Verbindungen zeigte sich eine **FESPOW-Ansatzes** sehr qute Anwendbarkeit des sowohl für das Widerstandselement- als auch das Reibelementschweißen. Dabei wurde der Rissort im Basisblech (Stahl) angenommen und der nominelle Schaftdurchmesser der Hilfsfügeteile für die Simulation verwendet. Mit exemplarischen Rechnungen konnte das Einsatzpotenzial der FESPOW-Methode nachgewiesen werden. So wurden die Wöhlerlinien für verschiedene Belastungsarten (Kopf- und Scherzug) und Material-Dicken-Kombinationen auf Basis einer ausgewählten experimentellen Wöhlerlinie berechnet und den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt, wobei eine sehr gute Übereinstimmung insbesondere bei höheren Schwingspielzahlen auftrat. Auch die Lage der Wöhlerlinie für H-Scherzugproben konnte korrekt vorhergesagt werden.

Im Gegensatz dazu konnten trotz zahlreicher Analysen bezüglich Kerbradiusmodellierung, Netzgrößensensitivität und Auswerte- und Anrisskriterium keine zufriedenstellenden Ergebnisse mit dem kerbspannungsbasierten Ansatz erzielt werden. Vor dem Hintergrund der begrenzten Projektlaufzeit sowie einer begrenzten Anwendbarkeit von detaillierten Volumenmodellen in der FEM-Karosserieberechnung sollte daher der FESPOW-Ansatz oder gleichwertige Variationen davon verwendet werden.

Durch die Gegenüberstellung des Tragverhaltens thermisch-mechanisch gefügter Verbindungen zum Tragverhalten mechanisch gefügter Verbindungen unter zyklischer und quasistatischer Belastung konnte gezeigt werden, dass die thermischmechanischen Fügeverfahren ausreichende Tragfähigkeiten aufweisen.

Aus Gründen des Korrosionsschutzes, der Steifigkeit und Festigkeit werden Mischverbindungen aus Stahl und Aluminium im Karosseriebau üblicherweise als Hybridverbindungen mit zähmodifizierten Epoxidharzklebstoffen ausgeführt. Für entsprechende Klebverbindungen existieren bereits Berechnungsansätze zur Lebensdauerprognose. Die Fragestellung, inwiefern diese Ansätze mit dem hier empfohlen Berechnungsansatz für die elementar gefügten Verbindungen kombinierbar ist, war nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens und sollte in nachfolgenden Forschungsprojekten überprüft werden. Ebenso können Versuche mit variablen Amplituden (Betriebsfestigkeitsversuche) an thermisch-mechanisch gefügten Verbindungen unter Mixed-Mode-Belastung an realbauteilähnlichen Strukturen sinnvoll sein, um weitere Kenntnisse über das Tragverhalten zu erlangen und den Berechnungsansatz zu validieren. Auch die Überprüfung weiterer Materialkombinationen (beispielsweise mit 5000er Aluminiumblech) ist zielführend, um die Anwendbarkeit der innovativen Fügetechnologien voranzutreiben.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten, in Zusammenarbeit mit dem pbA, wertvolle Erkenntnisse zur Auslegung von thermisch-mechanisch gefügten Karosseriestrukturen gewonnen werden, wodurch ein Betrag zur wirtschaftlichen Realisierung von Leichtbau in der Karosserie geleistet wird und die teilnehmenden Unternehmen aus dem Bereich der Fügetechnik profitieren können. Die Ergebnisse wurden bereits während der Projektlaufzeit regelmäßig veröffentlicht.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde somit vollständig erreicht.

## 7 Literaturverzeichnis

- [Alb12] Alber, U.: "Friction element welding Innovations for hybrid body parts". In: Online-Tagungsband "Fügen im Karosseriebau 2012", Automotive International Circle, Bad Nauheim 2012.
- [Ame11] Amedick, J.; Borowetz, H.; Heyn, H.: Fügetechnologien im Wettbewerb - Anforderungen der Automobilindustrie. Tagungsband Gemeinsame Forschung in der mechanischen Fügetechnik, Garbsen, EFB e.V. 2011, 06/07. Dezember 2011, S. 11-23.
- [Bar10] Baron, T.: "Entwicklung des Reibelementschweißens für den Karosseriebau", Dissertation, Universität Paderborn, Shaker Verlag, Aachen 2010.
- [DIN8593-5] Deutsche Industrie Norm / Deutsches Institut für Normung: DIN 8593-5, Fertigungsverfahren Fügen - Teil 5: Fügen durch Umformen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 2003
- [DIN50100] Deutsche Industrie Norm / Deutsches Institut für Normung: DIN 50100, Schwingfestigkeitsversuch - Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile, 2016
- [DL04] Di Lorenzo, G.; Landolfo, R.: Shear experimental reponse of new connection systems for cold-formed structures. Journal of Constructional Steel Research, Volume 60, Issue 3-5, Pages 561-579, Elsevier Ltd., 2004
- [Dra06] Draht, T.: Entwicklung des Bolzensetzens für Blech-Profil-Verbindungen im Fahr-zeugbau. Dissertation, Universität Paderborn, Shaker Verlag, Aachen, 2006
- [DVS1] DVS Merkblatt 3410: Halbhohlstanznieten Überblick : Taschenbuch DVS-und –Richtlinien – Mechanisches Fügen. Düsseldorf, Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. 2008
- [Goe05] Goede M. et al.: "Innovationen durch bezahlbaren Leichtbau", Vortrag auf dem 14. Aachener Leichtbaukolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen 2005.
- [Hah11a] Hahn, O.; Meschut, G.; Bednorz, S.: "Vollstanznietbeschichtungen für den Einsatz bei hochfesten Stahlwerkstoffen". In: Tagungsband 1. Fügetechnisches Gemeinschaftskolloquium 2011, Garbsen.
- [Hah12b] Hahn, O.; Schübeler, C.; Füssel, U.; Kalich, J.: "Mechanisches Fügen pressgehärteter Vergütungsstähle"; Abschlussbericht zum Forschungsprojekt Nr. P762 der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, gefördert über die AiF (IGF: 16806N).
- [Hai06] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung; ISBN-10 3-540-29363-9, Berlin, Heidelberg; 2006

- [HS10] Hahn, O.; Schübeler, C.: Vollstanznietkleben von Stahlwerkstoffen mit Zugfestigkeiten von 800 MPa bis 1600 MPa. Düsseldorf, Laboratorium für Werkstoff und Fügetechnik Universität Paderborn, 2010.- Forschung für die Praxis P773
- [Kog11] Koglin, K.: "Die Karosserie als Initiator für den Fahrzeugleichtbau", Vortrag auf der VDI-Tagung Leichtbaustrategien für den Automobilbau, 07.-08.07.2011, Ludwigsburg
- [Mes13] Meschut, G.; Janzen, V.; Matzke, M.; Olfermann, T.: Vergleich innovativer thermischer Fügeverfahren zum Verbinden von ultrahöchstfesten Stählen in Mischbaustrukturen. In: DVS-Berichte 296, S.365-371. DVS-Media GmbH, Düsseldorf, 2013. ISBN: 978-387155-614-2.
- [Mey16] Meyer, C.: Weiterentwicklung des Widerstandselementschweißens für den Einsatz in der automobilen Serienfertigung. Dissertation Universität Paderborn, Shaker Verlag, Aachen, 2016
- [Mor06] Morgenstern, C.: Kerbgrundkonzepte für die schwingfeste Auslegung von Aluminiumschweißverbindungen am Beispiel der naturharten Legierung AlMg4,5Mn (AW-5083) und der warmausgehärteten Legierung AlMgSi1 T6 (AW-6082 T6), Dissertation, TU Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, 2006
- [Muc13] Mucha, J.: The effect of material properties and joining process parameters on behaviour of self-pierce riveting joints made with the solid rivet. In: ELSEVIER Journal Materials & Design, issue 52 (2013), S. 932-946.
- [Neu12] Neudel, C.; Merklein, M.: "Resistance spotwelding of aluminium to steel". In: Online-Tagungsband "Fügen im Karosseriebau 2012", Automotive International Circle, Bad Nauheim 2012.
- [NP12] Naganathan, A.; Penter, L.: Hot Stamping. In: Altan, T.; Tekkaya, A. E. (Hrsg.): Sheet Metal Forming. ASM International, Ohio, USA, 2012, S. 133-156 (ISBN 978-1-61503-844-2)
- [Ove10] Overrath, J.; Lenze, F.-J.; Sikora, S.: Aktuelle Entwicklung der Warmumformung im automobilen Fahrzeugbau. In: Bauteile der Zukunft – Methoden und Prozesse, Tagungsband zum 30. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung 2010.
- [RUM15]¬ http://www.rumul.ch/pdf/mikrotron\_d.pdf, technischer Katalog der RUMUL MIKROTRON, abgerufen am 7.12.2015
- [STN15] http://www.steelnumber.com/en/steel\_alloy\_composition\_eu.php?na me\_id=1144, aufgerufen am 10.11.2015
- [WFS+10] Wanner, M.-C.; Fuchs, N.; Schwaß, A.; Kuehl, H.; Henkel, K.-M.: Ermittlung der Fügeprozesssicherheit von Blindniet-Setzvorgängen bei Montage- und Bauteilunregelmäßigkeiten, EFB-Forschungsbericht Nr. 317, EFB-Verlag, Hannover, 2010

# 8 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Einschätzung des Nutzens für KMU

Zum Transfer der Ergebnisse in die industrielle Fertigung wurden die in Tabelle 8-1 aufgelisteten Maßnahmen während der Projektlaufzeit durchgeführt.

Tabelle 8-1: Maßnahmen und ihre Zielsetzung während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitraum
Maßnahme A:	Die Forschungsergebnisse sollen fortlaufend im PA	A1 Vorstellung der Projektinhalte und	19.11.2014
Information der Unternehmen des	ausführlich diskutiert werden, wodurch die	Diskussion der geplanten Arbeiten	
projektbegl. Ausschusses (PA)	aktualisierten Interessen der beteiligten Unternehmen	A2 Ergebnissvorstellung und Diskussion	16.06.2015
	in den Projektumfängen berücksichtigt werden. Die	des weiteren Vorgehens	
	Mitglieder des PA werden auch außerhalb der	A3 Ergebnissvorstellung und Diskussion	13.12.2015
	Sitzungen informiert, um ggfs. rechtzeitig Änderungen	aller Ergebnisse	
	in der Methodik und im Umfangvornehmen zu können.	A4 Ergebnissvorstellung und Diskussion	24.05.2016
		aller Ergebnisse	
		A5 Ergebnissvorstellung und Diskussion	24.11.2016
		aller Ergebnisse	
Maßnahme B:	Die Mitarbeiter der FST sind aktive Mitglieder in	B1 Ergebnistransfer in den Arbeitskreis	25.11.2014
Vorstellung von Ergebnissen in	unterschiedlichen Gremien, wodurch die Ergebnisse	Fachausschuss 9 "Konstruktion und	26.03.2015
Ausschüssen und Arbeitskreisen	bereits während der Laufzeit einer Vielzahl von	Berechnung" der Forschungsvereinigung	05.11.2015
	Experten präsentiert bzw. diskutiert werden können.	des DVS	04.05.2016
		B2 Ausschuss für Technik (AfT) des DVS	31.05.2016
		AGV11.1 "Reibschweißen"	
Maßnahme C:	Die Forschungsstelle präsentiert regelmäßig aktuelle	C1 DVS-EFB-FOSTA-Kolloquium	09.12.2015
Präsentation auf Messen und	Forschungsergebnisse auf Messen und Fachtagungen	"Gemeinsame Forschung in der	
Tagungen	in Form von Postern, Demonstratoren und	mechanischen Fügetechnik" 2015	
	Fachbeiträgen	C2 Sondertagung Widerstandsschweißen	29.06.2016
		des DVS/GSI SLV	
		C3 DVS Congress 2016	20.09.2016
Maßnahme D:	Vermittlung von wissenschaftlichen Kenntnissen und	D1 Abschlussarbeiten	projektbegleitend
Studien- und Diplomarbeiten im	Methoden Anleitung der Studenten zum		durchgeführt
Rahmen des Projektes am LWF	wissenschattlichen Arbeiten		(z.B. Hr. Stahl 2015)

Tabelle 8-2 zeigt die bereits nach dem Projektende durchgeführten und noch durchzuführenden Maßnahmen zum Ergebnistransfer auf.

#### Tabelle 8-2: Maßnahmen und deren Ziele nach Projektende

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitraum
Maßnahme E:	Verbreitung der Forschungsergebnisse über die	E1 Fachzeitschrift Schweißen und	2017
Publikation in Fachzeitschriften	Fachliteratur sowie Transfer in die Wirtschaft durch	Schneiden	
und auf Tagungen	Präsentation der Ergebnisse einem Fachpublikum auf	E2 Fachzeitschrift Journal of Fatigue	2017
	Tagungen.		
Maßnahme F:	Vermittlung der Ergebnisse aus erster Hand an die	F1 Vorlesung "Grdl. der Fügetechnik"	WS16/17
Übernahme der	Studierenden durch enge Verzahnung von Forschung	F2 Vorlesung "Thermische Fügetechnik"	WS16/17
Forschungsergebnisse in die	und Lehre		
akademische Lehre			
Maßnahme G:	Präsentation der Ergebnisse	G1 Öffentlicher Verweis auf	2017
Abstract auf Internetseiten des		Forschungsergebnisse	
DVS und der Forschungsstelle			
Maßnahme H:	Transfer der Erkenntnisse durch den Wechsel der	H1 Promotion des projektverantwortlichen	2017
Personaltransfer	Studenten und wissenschaftlichen Mitarbeiter in ein	Mitarbeiters	
	industrielles Umfeld		
Maßnahme I: Merkblattarbeit	Übernahme und Multiplikation des Wissens durch	11 DVS/EFB Merkblätter 3470, 3480, 2909	< 2 Jahre nach
	Erarbeitung von Relwerken und Merkblättern.		Projektende

# 8.1 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzeptes

Die Aufgabenstellung ist von der Industrie an die Forschungsstelle herangetragen worden mit der Bitte um Unterstützung. Die erfolgreiche Bearbeitung der Aufgabenstellung erlaubt nun eine direkte und schnelle Umsetzung der Erkenntnisse in die Praxis in kleinen und mittelständischen Betrieben. Aufgrund der oben genannten und bereits durchgeführten vielfältigen Transfermaßnahmen werden die Anforderungen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und insbesondere zu kleinen und mittleren Unternehmen erfüllt. Vor allem aufgrund der Vorstellung von Projektergebnissen auf dem DVS-EFB-FOSTA-Kolloguium "Gemeinsame Forschung in der mechanischen Fügetechnik" 2015 und 2016 sowie aufgrund der intensiven Diskusionen auf dem DVS Fachausschuss FA9 sowie in dem Ausschuss AGV11.1 wurde und kann weiterhin ein breites Fachpublikum, besonders auch KMU, erreicht werden. Die geplanten Maßnahmen stellen überdies eine weitere Verbreitung der Ergebnisse sicher. So wird über eine Publikation des Abschlussberichts auf der Homepage der betreuenden Forschungsvereinigung sichergestellt, dass die Projektergebnisse für KMU zugänglich gemacht werden. Die weiteren genannten Transfermaßnahmen erlauben zudem geplanten die Verbreitung der Projekterkenntnisse über Veröffentlichungen, Schulungen und weitere Publikationen an zusätzliche interessierte Unternehmen.

Das vorgeschlagene und aktualisierte Transferkonzept ist realisierbar und es können ausreichend viele KMU über die Projektergebnisse erreicht werden.

Der wirtschaftliche und technologische Nutzen der Projektergebnisse wird sich bei Hilfsfügeteilherstellern, Fügesystemherstellern, Prototypenund Kleinserienherstellern und in der blechverarbeitenden Industrie sowie bei Dienstleistungsunternehmen einstellen. Besonders Erstere sind häufig den KMU zuzurechnen, was der pbA dieses Projektes widerspiegelt. Es kann von einer Realisierung Verfahrensumsetzung sowie Verwertung der der der Forschungsergebnisse und weiteren Etablierung innerhalb der kommenden 1-2 Jahren ausgegangen werden, da das Interesse der Industrie an dem prozesssicheren Fügen von ultra-höchstfesten Stählen mit weiteren modernen Leichtbauwerkstoffen grundsätzlich als sehr hoch anzusehen ist. Denn alle europäischen Fahrzeughersteller gehen von einer Steigerung des Anteils pressgehärteter Materialien in der Karosserie aus. Die zu erarbeitenden Ergebnisse und Maßnahmen ermöglichen somit die direkte Umsetzung zweier innovativer neuer Fügetechniken und den Auswahl- und Auslegungsprozess.

Das Widerstandselementschweißen stellt ein sehr wirtschaftliches Verfahren im Hinblick auf die Investitionskosten dar, da dieselbe Anlagentechnik zum konventionellen Widerstandspunktschweißen und zum Widerstandselementschweißen genutzt werden kann. Dies ermöglicht trotz verschiedener Produktvarianten die Verwendung einer Anlage oder eines Anlagentyps, wodurch sich bessere Return-On-Invest-Raten (bessere Auslastung, einheitliche Anlagentechnik, geringere Ersatzteillagerkosten) erreichen lassen. Die Kosten für die Hilfsfügeteile liegen unter denen von Halbhohlstanznieten und sind daher konkurrenzfähig, was der bereits erfolgte Serieneinsatz zeigt.

Die Reibelementschweißverbindungen werden mit einer weiterentwickelten Anlagentechnik erstellt, die für das konventionelle Reibschweißen entwickelt wurde. Der Preis für ein Reibelementschweißsystem liegt in etwa im Bereich einer gut ausgestatteten Mittelfrequenzpunktschweißzange und ist daher ebenfalls konkurrenzfähig. Die kaltschlagend herstellbaren Hilfsfügeteile dürften in ihren Produktionskosten ebenfalls mit Halbhohlstanznieten vergleichbar sein und sind daher auch konkurrenzfähig.