

Fügbarekeit von Leichtbauteilen mittels Niet-Reibschweiß-Verbindungen

Der Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
vorgelegte Dissertation

Dipl.-Ing. Thomas Ziegler
geboren am 25.06.1988 in Freising

Tag der Einreichung: 08.03.2022

Tag der Verteidigung: 21.11.2023

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel
Prof. Dr.-Ing. Alexander Brosius
Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude

Vorwort

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel von der Professur für Fügetechnik und Montage der TU Dresden für die Betreuung und Begutachtung der Arbeit. Die wertvollen Diskussionen und Anregungen zu kombinierten Fügeverbindungen und Bindemechanismen haben wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Brosius und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude für die Erstellung der weiteren Gutachten.

Die Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der BMW Group. Mein besonderer Dank gebührt Herrn Thomas Richter, Leiter der Gruppe „Verbindungstechnik Karosseriebau“, für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und Schaffung der Rahmenbedingungen für diese Arbeit. Bei meinen Kollegen der BMW Group möchte ich mich für die freundliche Aufnahme und Unterstützung bedanken. Besonderer Dank gilt Herrn Harald Weigl für die Anregungen und hilfreichen Ratschläge. Herrn Philipp Kuhnert-Fischer und Herrn Dr.-Ing. Jonas Zweck möchte ich für die konstruktiven Diskussionen danken. Allen Labormitarbeitern danke ich für deren freundliche Unterstützung. Für das große Engagement danke ich herzlich allen betreuten Studenten. Mein Dank gilt auch den Firmen Harms und Wende, Klingel, Arnold Umformtechnik sowie Sampro für die hervorragende Zusammenarbeit.

Abschließend danke ich herzlich meiner Familie. Ganz besonderer Dank gilt meiner Frau für die Geduld und die Zusprüche während der Anfertigung dieser Arbeit. Ich danke ebenso meinem Sohn für die willkommene Ablenkung. Meinen Eltern danke ich für ihre bedingungslose Unterstützung.

Kurzreferat

In Leichtbaukonstruktionen kommen zur Abhängigkeit der Bauteilwerkstoffe vermehrt Niet-Reibschweiß-Verbindungen zum Einsatz. In der vorliegenden Arbeit werden für diese kombinierte Fügeverbindung Berechnungs- und Konstruktionsvorschriften sowie Bewertungskriterien zur Fügbarkeit erarbeitet. Eine Analyse der Bindemechanismen veranschaulicht die Anordnung von Form-, Kraft- und Stoffschluss innerhalb der Fügeverbindung bei äußerer Längs- oder Querkrafteinwirkung und die dazugehörigen Fügeflächenpaarungen zur Freiheitsgradeinschränkung. Die abgeleiteten kraftrelevanten Eigenschaften der tragenden Flächen ermöglichen eine gezielte Bemessung der Fügeverbindung während der Konstruktion. Kraftrelevante Eigenschaften sind die geometrischen Dimensionierungsgrößen, die lokalen Werkstofffestigkeiten der Bauteile, die Vorspannkraft und die statische Reibungszahl. Für die Ausbildung der Bindemechanismen ist beim Fügen eine Verformung und Erwärmung der Füge Teile erforderlich, was zu einer Beeinflussung der kraftrelevanten Eigenschaften führen kann. Beispielsweise treten umform und thermisch bedingte Festigkeitsänderungen im Werkstoff auf. Ein analytisches, thermodynamisches Modell veranschaulicht die Einflussfaktoren auf die Temperaturentwicklung während des Fügens. Simulative und experimentelle Untersuchungen bestätigten die theoretischen Betrachtungen. Mit Hilfe eines vereinfachten Berechnungsmodell kann ein Nachweis der Fügesicherheit bei statischer Längs- oder Querkrafteinwirkung erfolgen.

Abstract

Riveted friction-welded joints are increasingly used in lightweight constructions depending on the component materials. Calculation and construction regulations as well as evaluation criteria for the joinability of this combined joint are developed in this thesis. The analysis of the binding mechanisms illustrates the arrangement of form closure, force closure, and material closure inside the joint under an external longitudinal or transverse force and the associated combination of joint surfaces for limiting the degree of freedom. The force relevant properties of the load bearing areas enable a targeted dimensioning of the joint during the construction. Force relevant properties are the geometric dimensions, the local material strength of the components, the preload force and the static friction coefficient. During joining a deformation and heating of the parts for the formation of the binding mechanisms is necessary, which can influence the force relevant properties. Deformation and thermally induced strength changes occur in the material for example. An analytical, thermodynamic model illustrates the influencing factors on the temperature development during joining. Simulative and experimental investigations confirmed the theoretical considerations. With a simplified calculation model, the joining safety can be verified in the case of static longitudinal or transverse forces.

Inhaltsverzeichnis

FORMELZEICHEN- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	IV
1 EINLEITUNG.....	1
2 STAND DER TECHNIK.....	3
2.1 Mischbauverbindungen aus Aluminiumlegierungen und pressgehärteten Stählen..	3
2.2 Fügbarkeit von Bauteilen mittels Niet-Reibschweiß-Verbindungen	8
2.2.1 Fügesicherheit	9
2.2.2 Fügeeignung.....	13
2.2.3 Fügemöglichkeit.....	15
2.3 Ableitung der offenen Forschungsfragen	20
3 UNTERSUCHUNGSZIEL UND WISSENSCHAFTLICHER ANSATZ	21
4 BINDEMECHANISMEN IN NIET-REIBSCHWEIß-VERBINDUNGEN	23
4.1 Theoretische Analyse.....	23
4.1.1 Beschreibung der Bindemechanismenanordnung	23
4.1.2 Analyse des Formschlusses	27
4.1.3 Analyse des Kraftschlusses	33
4.1.4 Analyse des Stoffschlusses.....	35
4.2 Experimentelle Analyse.....	37
4.2.1 Untersuchungsziele	37
4.2.2 Untersuchungsmethodik.....	37
4.2.2.1 Versuchsmethoden.....	37
4.2.2.2 Probengeometrie	38
4.2.2.3 Versuchswerkstoffe.....	39
4.2.2.4 Nietgeometrien.....	39
4.2.2.5 Fügeeinrichtung und Prozessparameter	40
4.2.3 Untersuchung der Bindemechanismenanordnung.....	40
4.2.4 Analyse des Formschlusses	46

4.2.4.1	Kraftrelevante Eigenschaften des Formschlusses	46
4.2.4.2	Kraftrelevante Eigenschaften des Deckblechs	51
4.2.4.3	Kraftrelevante Eigenschaften des Niets	54
4.2.4.4	Kraftrelevante Eigenschaften des Basisblechs.....	56
4.2.5	Analyse des Kraftschlusses	60
4.2.5.1	Analyse der tragenden Flächen des Kraftschlusses	61
4.2.5.2	Messung der Vorspannkraft.....	61
4.2.5.3	Bestimmung der statischen Reibungszahl	63
4.2.6	Analyse des Stoffschlusses.....	66
5	ANALYSE DER FÜGEPUNKTAUSBILDUNG	69
5.1	Analytische Betrachtungen und Modellbildung	69
5.1.1	Beschreibung der kraft- und temperaturabhängigen Eigenschaftsausbildung	69
5.1.1.1	Ausbildung der tragenden Flächen	69
5.1.1.2	Ausbildung der Vorspannkraft.....	71
5.1.1.3	Ausbildung der kraftrelevanten Werkstoffeigenschaften	72
5.1.2	Beschreibung der Temperaturentwicklung und Umformung.....	76
5.1.2.1	Thermodynamisches Modell zur Einflussgrößenbestimmung.....	76
5.1.2.2	Einflussgrößen auf die Reibleistung	79
5.2	Simulative Untersuchungen.....	82
5.2.1	Beschreibung des Simulationsmodells.....	82
5.2.2	Analyse der Temperaturentwicklung in den Fügeteilen	83
5.2.3	Analyse der Temperatur-Zeit-Verläufe an den tragenden Flächen	88
5.2.4	Analyse der Umformgrade an den tragenden Flächen.....	91
5.3	Experimentelle Untersuchungen	92
5.3.1	Untersuchungsziele	92
5.3.2	Untersuchung der Temperaturentwicklung und Umformung	93
5.3.2.1	Analyse von Niet und Basisblech	93
5.3.2.2	Analyse des Deckblechs	97
5.3.3	Untersuchung der kraft- und temperaturabhängigen Eigenschaftsausbildung.....	99
5.3.3.1	Ausbildung der geometrischen Eigenschaften der tragenden Flächen	99

5.3.3.2	Ausbildung der mechanischen Werkstoffeigenschaften.....	102
5.3.3.3	Ausbildung der Vorspannkraft.....	104
5.3.3.4	Untersuchung der Kopf- und Scherzugkräfte	105
6	KONSTRUKTIONS- UND BERECHNUNGSVORSCHRIFTEN	108
6.1	Konstruktionsvorschriften.....	108
6.2	Berechnungsvorschriften	109
6.3	Vereinfachter Sicherheitsnachweis	109
6.4	Ableitungen für die Fügbarkeitsbetrachtung	114
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	117
	LITERATURVERZEICHNIS	FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XXIII
	TABELLENVERZEICHNIS	XXVI
	ANHANG	XXVII

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Benennung
A	$[mm^2]$	Flächeninhalt der tragenden Fläche
A_{BB-DB}	$[mm^2]$	Kontaktfläche zwischen Basisblech und Deckblech
$A_{BB,L}$	$[mm^2]$	Tragende Fläche im Basisblech (Längskraft)
$A_{DB,L}$	$[mm^2]$	Tragende Fläche im Deckblech (Längskraft)
$A_{DB,Q}$	$[mm^2]$	Tragende Fläche im Deckblech in Richtung Blechrand
$A_{NK-DB,Q}$	$[mm^2]$	Kontaktfläche zwischen Nietkopf und Deckblech (Querkraft)
A_{NS}	$[mm^2]$	Nietschaftquerschnittsfläche
$A_{NK-DB,L}$	$[mm^2]$	Kontaktfläche zwischen Nietkopf und Deckblech (Längskraft)
A_{NK-DB}	$[mm^2]$	Kontaktfläche zwischen Nietkopf und Deckblech
A_{NS-BB}	$[mm^2]$	Kontaktfläche zwischen Nietschaft und Basisblech
A_{NS-DB}	$[mm^2]$	Kontaktfläche zwischen Nietschaft und Deckblech
A_{SV}	$[mm^2]$	Schweißverbindungsfläche
$A_{UK,Q}$	$[mm^2]$	Tragende Fläche im Deckblech unterhalb des Nietkopfs
c_p	$[Jkg^{-1}K^{-1}]$	spezifische Wärmekapazität
d_{AK}	$[mm]$	Ausknöpfungsdurchmesser
d_{GK}	$[mm]$	Durchmesser an der geometrischen Kerbe
d_{NK}	$[mm]$	Nietkopfdurchmesser
d_{NS}	$[mm]$	Nietschaftdurchmesser
d_{SV}	$[mm]$	Schweißverbindungsdurchmesser
d_{UK}	$[mm]$	Durchmesser des Unterkopfraums
e	$[mm]$	Randabstand
F	$[N]$	Wirkende Kraft an der tragenden Fläche
$F_{BB,L}$	$[N]$	Zulässige Kraft an der tragenden Fläche im Basisblech
$F_{DB,L}$	$[N]$	Zulässige Kraft an der tragenden Fläche im Deckblech (Längskraft)
$F_{DB,Q}$	$[N]$	Zulässige Kraft an der tragenden Fläche im Basisblech (Querkraft)
F_m	$[N]$	Maximale Kraft des Zugversuchs
F_N	$[N]$	Normalkraft
F_{NH}	$[N]$	Niederhalterkraft
$F_{NK-DB,L}$	$[N]$	Zulässige Kraft am Formschluss zwischen Nietkopf und Deckblech (Längskraft)

$F_{NK-DB,Q}$	[N]	Zulässige Kraft am Formschluss zwischen Nietkopf und Deckblech (Querkraft)
F_{NS-DB}	[N]	Zulässige Kraft am Formschluss zwischen Nietschaft und Deckblech
$F_{NS,L}$	[N]	Zulässige Kraft an der tragenden Fläche im Nietschaft (Längskraft)
$F_{NS,Q}$	[N]	Zulässige Kraft an der tragenden Fläche im Nietschaft (Querkraft)
F_P	[N]	Prozesskraft
F_R	[N]	Statische Reibungskraft
$F_{R,BB-DB}$	[N]	Statische Reibungskraft zwischen Basis- und Deckblech
$F_{R,NK-DB}$	[N]	Statische Reibungskraft zwischen Nietkopf und Basisblech
$F_{SV,L}$	[N]	Zulässige Kraft an der Schweißverbindung (Längskraft)
$F_{SV,Q}$	[N]	Zulässige Kraft an der Schweißverbindung (Querkraft)
$F_{UK,Q}$	[N]	Zulässige Kraft an der tragenden Fläche im Deckblech unterhalb des Nietkopfs (Querkraft)
F_V	[N]	Vorspannkraft
F_{zul}	[N]	Zulässige Kraft an der tragenden Fläche
h_{UK}	[mm]	Höhe des Unterkopfraums
k_f	[N/mm ²]	Fließspannung
l_0	[mm]	Ausgangslänge
n	[min ⁻¹]	Drehzahl
n_P	[min ⁻¹]	Prozessdrehzahl
$p_{NK-DB,L}$	[N/mm ²]	Flächenpressung zwischen Nietkopf und Deckblech (Längskraft)
$p_{NK-DB,Q}$	[N/mm ²]	Flächenpressung zwischen Nietkopf und Deckblech (Querkraft)
p_{NS-DB}	[N/mm ²]	Flächenpressung zwischen Nietschaft und Deckblech
\dot{Q}_R	[W]	Reibleistung
\dot{Q}_{MS}	[W]	Wärmestrom aufgrund eines Massenstrom
$\dot{Q}_{MS,DB}$	[W]	Wärmestrom aufgrund des Massenstrom des Deckblechwerkstoffs
$\dot{Q}_{MS,N}$	[W]	Wärmestrom aufgrund des Massenstroms des Niets
\dot{Q}_{WL}	[W]	Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung
r	[mm]	Radiale Position
R_m	[N/mm ²]	Zugfestigkeit
$R_{m,NS}$	[N/mm ²]	Lokale Zugfestigkeit des Nietschaftwerkstoffs
$R_{m,SV}$	[N/mm ²]	Lokale Zugfestigkeit der Schweißverbindung
S	-	Sicherheit
s_u	[mm]	Umschaltpunkt
t	[s]	Zeit
t_{AB}	[s]	Abbremszeit
t_{BB}	[mm]	Basisblechdicke

t_{DB}	[mm]	Deckblechdicke
t_S	[s]	Schweißzeit
t_{SV}	[s]	Zeitpunkt des Verschweißens
$t_{>100}$	[s]	Erwärmungszeit bei Temperaturen $T > 100^\circ\text{C}$
$t_{>350}$	[s]	Erwärmungszeit bei Temperaturen $T > 350^\circ\text{C}$
$t_{>800}$	[s]	Erwärmungszeit bei Temperaturen $T > 800^\circ\text{C}$
T	[K]	Temperatur
T_{Ac1}	[K]	Untere Temperatur des α - γ -Mischkristallgebiets
T_{Ac3}	[K]	Untere Temperatur des γ -Mischkristallgebiets
T_{BB}	[K]	Temperatur des Basisblechs
T_{DB}	[K]	Temperatur des Deckblechs
T_{NS}	[K]	Temperatur des Nietschafts
T_{max}	[K]	Maximale Temperatur
T_{oH}	[K]	Obere Homogenisierungstemperatur zur Mischkristallbildung
T_{RK}	[K]	Rekristallisationstemperatur
T_{RT}	[K]	Raumtemperatur
T_U	[K]	Notwendige Umformtemperatur
T_{uH}	[K]	Untere Homogenisierungstemperatur zur Mischkristallbildung
T_x	-	Translatorischer Freiheitsgrad in x-Richtung
T_y	-	Translatorischer Freiheitsgrad in y-Richtung
T_z	-	Translatorischer Freiheitsgrad in z-Richtung
$v_{c,Al}$	[K/s]	Lokale Abkühlgeschwindigkeit im Aluminiumwerkstoff
v_{krit}	[K/s]	Kritische Abkühlgeschwindigkeit
$v_{c,ST}$	[K/s]	Lokale Abkühlgeschwindigkeit im Stahlwerkstoff
α	[K ⁻¹]	Längenausdehnungskoeffizient
γ	-	Bemessungswert
Δl	[mm]	Längenänderung
ΔT	[K]	Temperaturdifferenz
μ_s	-	Statische Reibungszahl
ρ	[kg/m ³]	Dichte
$\sigma_{d,DB}$	[N/mm ²]	Druckspannung im Deckblech
$\sigma_{dB,DB}$	[N/mm ²]	Lokale Druckfestigkeit des Deckblechwerkstoffs
σ_m	[N/mm ²]	Nennzugspannung
σ_{NS}	[N/mm ²]	Zugbeanspruchung im Nietschaft
$\sigma_{d,NS}$	[N/mm ²]	Druckspannung im Nietschaft
σ_{SV}	[N/mm ²]	Zugspannung in der Schweißverbindung
σ_{zul}	[N/mm ²]	Zulässige Zugspannung an der tragenden Fläche
$\tau_{BB,L}$	[N/mm ²]	Scherspannung im Basisblech (Längskraft)

$\tau_{DB,L}$	$[N/mm^2]$	Scherspannung im Deckblech (Längskraft)
$\tau_{DB,Q}$	$[N/mm^2]$	Scherspannung im Deckblech (Querkraft)
τ_m	$[N/mm^2]$	Nennschubspannung
τ_{NS}	$[N/mm^2]$	Scherspannung im Nietschaft
$\tau_{SB,BB}$	$[N/mm^2]$	Lokale Scherbruchfestigkeit des Basisblechwerkstoffs
$\tau_{SB,DB}$	$[N/mm^2]$	Lokale Scherbruchfestigkeit des Deckblechwerkstoffs
$\tau_{SB,NS}$	$[N/mm^2]$	Lokale Scherbruchfestigkeit des Nietwerkstoffs
$\tau_{SB,SV}$	$[N/mm^2]$	Lokale Scherbruchfestigkeit der Schweißverbindung
τ_{SV}	$[N/mm^2]$	Scherbeanspruchung in der Schweißverbindung
$\tau_{UK,Q}$	$[N/mm^2]$	Scherbeanspruchung im Deckblech unterhalb des Nietkopfs (Querkraft)
τ_{zul}	$[N/mm^2]$	Zulässige Scherspannung an der tragenden Fläche
φ	-	Umformgrad
$\dot{\varphi}$	$[s^{-1}]$	Umformgeschwindigkeit

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Benennung
BVS	Berechnungsvorschrift
FEM	Finite Elemente Methode
FESPOW	Fatigue Evaluation Spot Weld
FS	Formschluss
EFZ	Entfestigungszone
GW	Grundwerkstoff
KTL	Kathodische Tauchlackierung
KVS	Konstruktionsvorschrift
NVK	Nietvariante kurz
NVL	Nietvariante lang
PARK	Basisparameterkombination Nietvariante kurz
PARL	Basisparameterkombination Nietvariante lang
PARV	Basisparameterkombination Vorspannkraftmessung
SV	Schweißverbindung
VFZ	Verfestigungszone
WEZ	Wärmeeinflusszone

1 Einleitung

Die Senkung des Kraftstoffverbrauchs zur Reduzierung von Emissionen gilt derzeit als eine der größten technischen Herausforderung in der Automobilindustrie [1]. Niedrigere Emissionsgrenzwerte in nationalen und internationalen Gesetzen [2] sind der Anstoß für neue Entwicklungsanforderungen auf diesem Gebiet. Der Lösungsansatz für die Einhaltung dieser Gesetzesanforderungen ist die Weiterentwicklung des Antriebsstrangs und die Reduzierung des Fahrzeuggewichts zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs [3]. Eine Gewichtsreduktion um 100 kg reduziert den Kraftstoffverbrauch um bis zu $0,35 \text{ l}/100 \cdot \text{km}$ [4]. Die Gewichtsreduzierung nimmt auch bei Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten eine Schlüsselrolle ein. Bei Elektrofahrzeugen ist dem hohen Gewicht der Antriebsbatterie mit einer Gewichtsreduktion anderer Fahrzeugkomponenten entgegenzuwirken. Ein großes Potential liegt in der Senkung des Karosseriegewichts. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren hat es mit ca. 40 % [5] den größten Anteil am Gesamtfahrzeug. Neue Anforderungen an das Karosseriegewicht müssen bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Zusätzlich gibt es weitere Anforderungen, die an eine Fahrzeugkarosserie gestellt werden. Einen Überblick gibt die Abbildung 1-1. Die aufgeführten Anforderungen können grundsätzlich gegensätzlich sein. Die entsprechende Umsetzung muss bei der Konstruktion abgewogen werden.

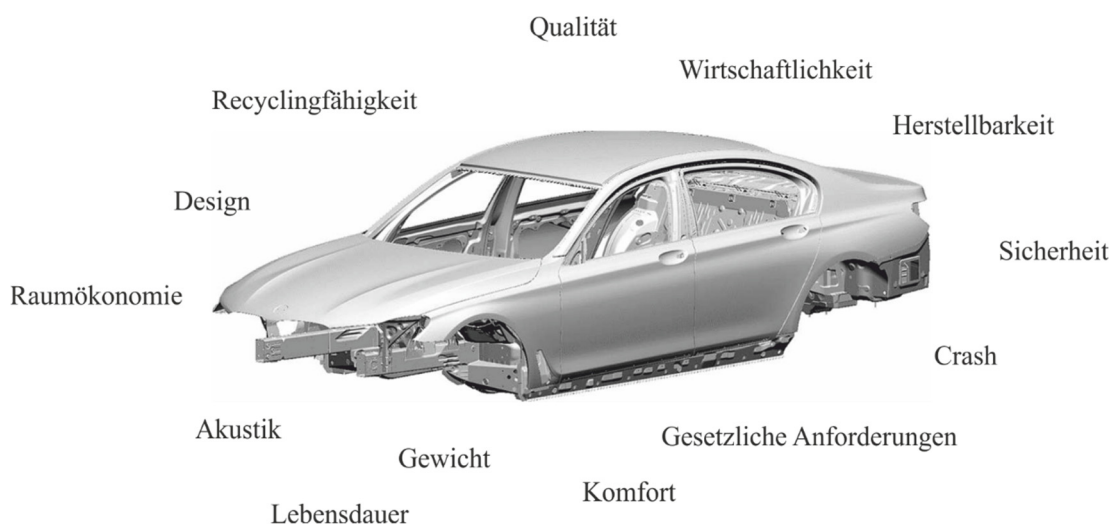


Abbildung 1-1: Anforderungen an eine Fahrzeugkarosserie (in Anlehnung an [6])

Zur Erfüllung der Gewichts- und Craschanforderungen wird deshalb die Strategie des Stoffleichtbaus verfolgt [7]. Diese setzt auf den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen [8, 9]. Insbesondere in Großserienfahrzeugen tragen kostengünstige, hochfeste Stähle zur Gewichtseinsparung durch Materialreduktion bei [10]. Darüber hinaus findet der Werkstoff Aluminium ein breites Anwendungsspektrum in der Rohkarosse. Der Entwicklungsgrundsatz, die Wahl des am besten geeigneten Werkstoffs für ein Bauteil von dessen Anwendungsfall abhängig zu machen, führt zur Kombination der beiden genannten Werkstoffe an den Fügeflächen [11, 12]. Für diese sogenannte Mischbauweise sind Systemlösungen umzusetzen. Speziell die Auswahl von Fügeverbindungen,

welche Konstruktionselemente innerhalb der Struktur darstellen, erfordert eine ganzheitliche Betrachtungsweise [9, 11]. Bei der Fügeverbindungs-konstruktion sind neben der Gewichts-anforderungen auch weitere Anforderungen, wie beispielsweise Sicherheit, Lebensdauer, Herstellbarkeit und Wirtschaftlichkeit, zu beachten. Eine ganzheitliche Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Konstruktion, Werkstoff und Fertigung kann anhand des Modells der Fügbarkeit als Systemeigenschaft [11, 13] erfolgen. Zur Beurteilung der Fügbarkeit von Karosseriebauteilen mit Fügeverbindungen, welche seit Jahrzehnten in Fahrzeugen eingesetzt werden, sind bereits umfangreiche Kenntnisse erarbeitet worden. Niet-Reibschweiß-Verbindungen, die bislang in Produkten weniger Automobilhersteller zum Einsatz kommen, sind unter dem Aspekt der Fügbarkeit dagegen kaum erforscht. Die durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen beschränken sich größtenteils auf den Fertigungsprozess und ermöglichen keine gezielte, anforderungsgerechte Verbindungsgestaltung. Die Abbildung 1-2 zeigt das Schiffbild einer Niet-Reibschweiß-Verbindung. Eine gezielte Optimierung der Fügeverbindungs-konstruktion in Bezug auf die gestellten Anforderungen ist nur auf Grundlage von umfassenden Kenntnissen zu den Teilgebieten der Fügbarkeit und deren Wechselwirkung, sowie durch Anwendung von allgemeingültiger Konstruktion und rechentechnischer Vorschriften möglich. Die anforderungsgerechte Festlegung der Blechdicken und Flanschbreiten kann beispielsweise eine Überdimensionierung der Bauteilgeometrie vermeiden und Bauteilgewicht einsparen. Ein rechnerischer Nachweis der Fügesicherheit erlaubt außerdem die Anzahl und die konstruktive Anordnung der Fügeverbindungen effektiver zu gestalten. Fügepunkt-abstände können dadurch vergrößert und Fügeverbindungen in Bauteilbereichen mit höherer Belastung eingesetzt werden. Die einhergehende Einsparung von Fügeverbindungen im Fahrzeug trägt zusätzlich zur Gewichtssenkung bei und vermeidet kostenintensive Fügeoperationen. Ziel der Arbeit ist deshalb die Erforschung der Fügbarkeit von Leichtbauteilen mittels Niet-Reibschweiß-Verbindung und die Ableitung von Konstruktions- und Berechnungsvorschriften.

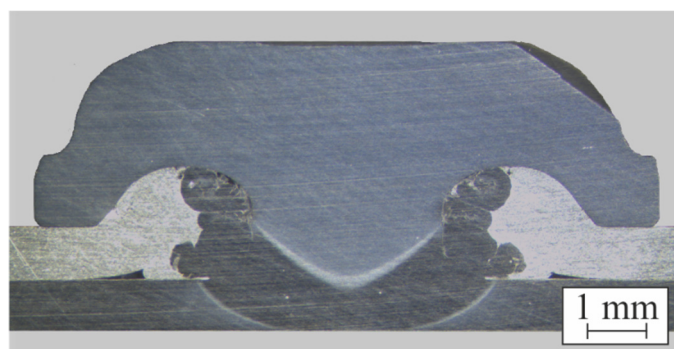


Abbildung 1-2: Niet-Reibschweiß-Verbindung

2 Stand der Technik

Im Rahmen dieses Kapitels wird der Stand der Technik zu Niet-Reibschweiß-Verbindungen näher analysiert. Hierbei wird zunächst auf Mischbauverbindungen mit Bauteilen aus Aluminiumlegierungen und pressgehärteten Stählen näher eingegangen. Anschließend folgt eine Analyse des aktuellen Stands der Technik zur Fügbarkeit von Bauteilen mittels Niet-Reibschweiß-Verbindungen.

2.1 Mischbauverbindungen aus Aluminiumlegierungen und pressgehärteten Stählen

Das Potential der Gewichtsreduktion von Karosserien in Mischbauweise wird bereits in Modellen unterschiedlicher Automobilhersteller genutzt [14]. Nach [15] nehmen bei der Entwicklung dieser Leichtbaukonstruktionen Werkstoff, Gestaltung und die Fertigung eine Schlüsselrolle ein. Das übergeordnete Ziel ist dabei, die Entwicklung von kosteneffizienten, gewichtsoptimierten Strukturen mit verbesserten Eigenschaften, wie beispielsweise das Crashverhalten [16]. Insbesondere der Einsatz von unterschiedlichen Leichtbauwerkstoffen, wie hochfestem Stahl, Aluminiumlegierungen und faserverstärkten Kunststoffen tragen zur Senkung des Gewichts bei [3]. Durch einen geeigneten Materialmix dieser Werkstoffe können außerdem die steigenden Steifigkeitsanforderungen erfüllt werden [17]. In Karosseriekonzepten basierend auf der Mischbauweise nimmt Stahl eine wichtige Rolle ein. Dieser wird vor allem für sicherheitsrelevante Bauteile und Strukturkomponenten verwendet [18]. Die in den vergangenen Jahren für den Automobilbau entwickelten hochfesten Stähle, weisen sehr gute Verformungsfähigkeiten bei hohen Festigkeiten auf [19]. Anwendungsbeispiele sind Dualphasenstähle, Komplexphasenstähle, ferritisch-bainitische Stähle, Warmarbeitsstähle, martensitische Stähle und Stähle mit umwandlungsbedingter Plastizität [20–22]. Das Zugfestigkeitsspektrum dieser Stähle reicht von ca. 300 N/mm bis ca. 1500 N/mm [12, 19]. Bauteile aus diesen hochfesten Stählen weisen neben den hohen Festigkeitseigenschaften eine gute Energieabsorption bei einem reduzierten Gewicht auf [14, 23]. Für komplexe, crashbelastete Strukturbauteile werden vorzugsweise pressgehärtete Stähle verwendet [24, 25]. Beispiele hierfür sind Anwendungen in der A-Säule, der B-Säule, im Stoßfänger, im Dachrahmen, im Schweller und im Bodenblech [26]. Die hohen Festigkeitseigenschaften von pressgehärteten Stählen werden durch eine Wärmebehandlung während eines mehrstufigen Umformprozesses eingestellt. Der zunächst ferritisch-perlitische Stahl wird durch Erwärmung austenitisiert und anschließend abgekühlt, wodurch eine Umwandlung in ein martensitisches Gefüge erfolgt [27]. Grundsätzlich wird bei der Herstellung pressgehärteter Bauteile zwischen indirekten und direkten Warmumformen unterschieden. Beim indirekten Warmumformen wird der Werkstoff bei Raumtemperatur umgeformt und anschließend auf Austenitierungstemperatur gebracht. Im Gegensatz dazu erfolgt beim direkten Warmumformen bereits vor der Formgebung die Erwärmung des Bauteils über Austenitierungstemperatur [28]. Grundsätzlich sind Stähle mit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen zum Presshärten geeig-

net [29]. Folglich können pressgehärtete Karosseriebauteile aus verschiedenen Werkstoffen gestaltet werden. Eine B-Säule aus 38MnB5 erfährt beispielsweise im simulierten Seitencrash eine geringere Verformung als eine baugleiche Struktur aus 22MnB5 [30]. Dennoch findet in der heutigen Serienproduktion überwiegend der letztere genannte Mangan-Bor-Stahl 22MnB5 Anwendung [31]. Dieser weist eine 0,2 %-Dehngrenze von ca. 1200 N/mm^2 , eine Streckgrenze von ca. 1500 N/mm^2 und eine Bruchdehnung von ca. 6 % auf [30]. Die chemische Zusammensetzung und der prozentuale Gewichtsanteil der Legierungsbestandteile von 22MnB5 unterliegt keiner Normung [32]. Nach [31] enthält der Werkstoff neben Kohlenstoff, Mangan und Bor auch die Elemente Silizium, Chrom, Nickel, Aluminium, Titan und Stickstoff. Zum Oxidationsschutz werden bei presshärtbaren Stählen unterschiedliche Beschichtungssysteme eingesetzt. Vor allem Aluminium-Silizium- und Zink-Schichtsysteme kommen in der Industrie zur Anwendung [33–36]. Es sind aber auch anorganisch-organische und nanopartikelbasierte Korrosionsschutzschichten entwickelt worden [37]. Für die vollständige martensitische Umwandlung während des Wärmebehandlungsprozesses ist die kritische Abkühlgeschwindigkeit von $\geq 27 \text{ K/s}$ einzuhalten [38, 38, 39]. Geringe Austenitisierungstemperaturen in Fügeverbindung mit einer längeren Austenitisierungszeit führen zu einem feineren martensitischen Gefüge [29]. Neben hochfesten Stählen haben sich als Leichtbauwerkstoffe auf Aluminiumlegierungen im Fahrzeugbau etabliert [18]. Grund hierfür ist die geringere Dichte gegenüber Stahl, gute mechanische Eigenschaften, die Korrosionsbeständigkeit aufgrund der natürlichen Oxidschicht und eine ausreichende Formbarkeit der Bauteile [10]. Anwendungsbeispiele für Karosseriebauteile aus Aluminiumlegierungen sind Bleche der Außenhaut, innenhochdruckumgeformte Motorträger und Strangpressprofile [40–42]. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrads und der daraus resultierenden hohen Produktivität hat sich außerdem in der Großserienfertigung das Druckgießen von Aluminiumbauteilen durchgesetzt [43]. Bei Komponenten, wie beispielsweise Druckgussfederstützen, wird zusätzlich durch Funktionsintegration Gewicht eingespart [15, 44]. Die mechanischen Eigenschaften der Aluminium-Druckgusswerkstoffe werden durch die Zugabe von Legierungselementen, wie beispielsweise Silizium oder Magnesium, eingestellt. Angestrebt wird der Einsatz von naturharten Aluminiumlegierungen, da bei diesen die kostenintensive nachgelagerte Wärmebehandlung zur Einstellung der benötigten Dehnwerte entfällt [45]. Für Blechbauteile in Karosserien werden vorwiegend Aluminiumlegierungen der nach [46] genormten 5xxx und 6xxx Serie verwendet [10]. Dabei sind die Legierungen der 5xxx Serie mit den Hauptlegierungselementen Aluminium und Magnesium nicht aushärtbar. Werkstoffe der 6xxxer Serie, welche unter anderem die Legierungselemente Aluminium, Magnesium und Silizium enthalten, können durch einen Wärmebehandlungsprozess ausgehärtet werden [47]. Nach [48] steht die Automobilindustrie außerdem am Beginn des Einsatzes von hochfesten Aluminiumlegierungen. Zukünftig sollen Werkstoffe der 7xxx Serie, welche bereits in der Luftfahrttechnik eingesetzt werden, Stahlwerkstoffe im Automobil ersetzen. Die Festigkeitswerte dieser Legierungen sind mit denen von hochfesten, mikrolegierten Stählen von über 500 N/mm^2 vergleichbar [49]. Beispielsweise weist die EN AW-7075 T6 mindestens eine Zugfestigkeit von 530 N/mm^2 und eine Bruchdehnung von

mindestens 10 % auf [50]. Die Eignung für die Großserienproduktion von einzelnen Bauelementen aus pressgehärteten Stahlwerkstoffen und Bauteilen aus Aluminiumlegierungen erweitert das mögliche Werkstoffspektrum für die Konstruktion. Der Leichtbaugrundsatz, die Wahl des geeigneten Werkstoffs nach dem Anwendungsfall zu treffen [10], führt zu Kombinationen unterschiedlicher Werkstoffe innerhalb der Karosseriestruktur. Diese Mischbauweisen stellen eine Herausforderung für die Fügetechnik dar, weshalb Systemlösungen anzustreben sind [11]. Grundsätzlich gibt es unterschiedliche konstruktive Ansätze zum Fügen von pressgehärteten Stahlwerkstoffen mit Aluminiumlegierungen. Die Abbildung 2-1 enthält eine Übersicht der Fügeverbindungen zwischen Aluminiumlegierungen und pressgehärteten Stählen, welche in bisherigen Veröffentlichungen untersucht wurden.

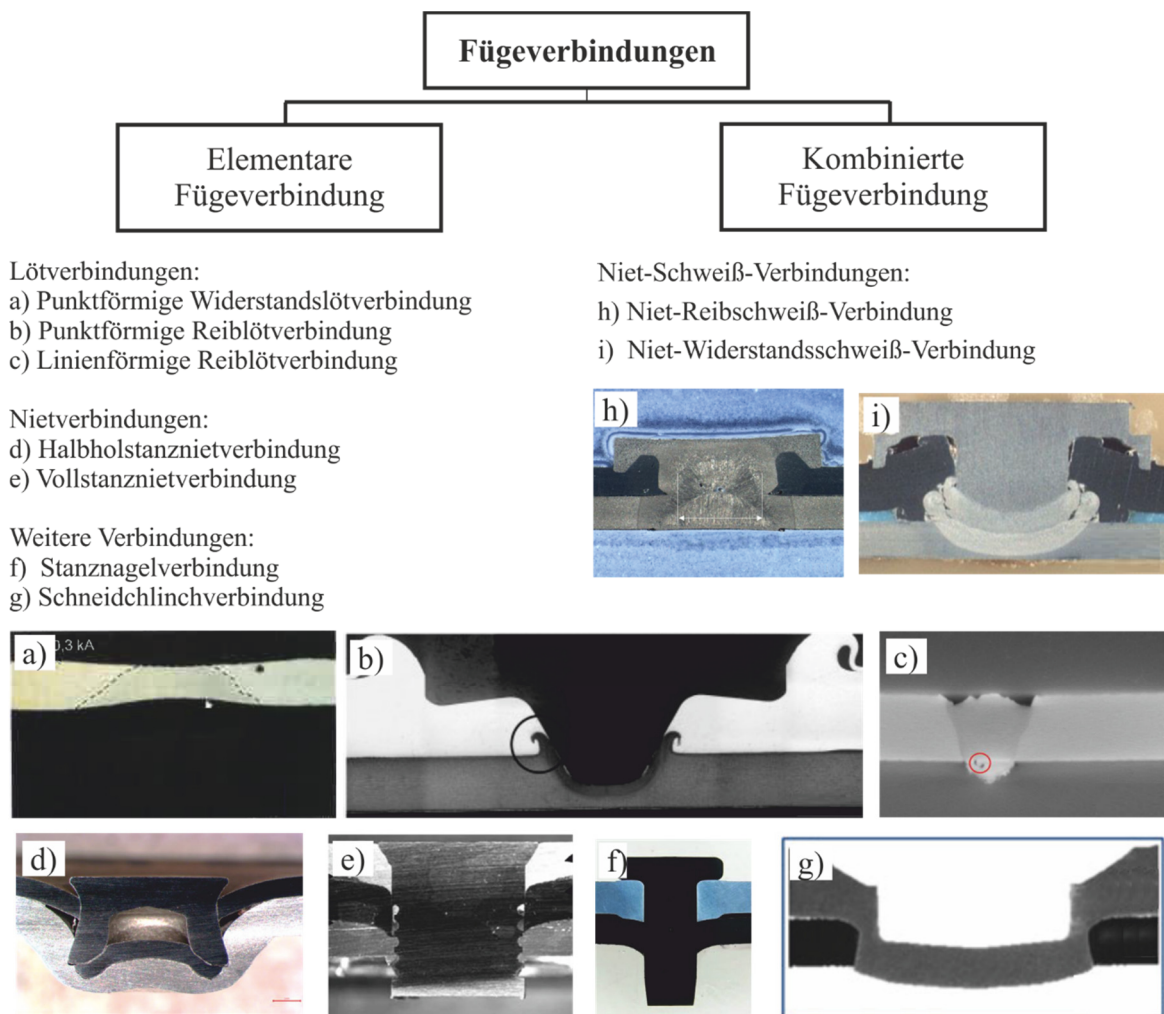


Abbildung 2-1: Fügeverbindungen aus Aluminiumlegierungen und pressgehärteten 22MnB5 [51–57]

Grundsätzlich kann bei den bislang untersuchten Fügeverbindungen zwischen elementaren und kombinierten Fügeverbindungen unterschieden werden. Laut Definition nach [58] können elementare Fügeverbindungen weder theoretisch noch physisch in mehrere einzelne Fügeverbindungen zerlegt werden. Im Gegensatz dazu wirken bei kombinierten Fügeverbindungen mehrere elementare Fügeverbindungen zugleich. Der Einsatz von elementaren stoffschlüssigen Fügeverbindungen zwischen Stahl und Aluminium, welche durch thermische Fügeverfahren hergestellt

werden, gilt aufgrund der reduzierten Festigkeit und dem geringen Verformungsvermögen als ungeeignet [59]. In diesen Fügeverbindungen bilden sich verschiedene intermetallische Phasen vom Typ Fe_xAl_y aus, welche unerwünschte Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Fügeverbindungen haben [35, 60–63]. In diversen Veröffentlichungen werden diese stoffschlüssigen Fügeverbindungen oftmals als Schweißverbindungen bezeichnet [51, 64, 65]. Gemäß der Definition nach [58] handelt es sich bei diesen Fügeverbindungen jedoch wegen der ungleichen chemischen Zusammensetzung der Fügepartner um Lötverbindungen. Letztere können, analog zu den in [13] klassifizierten Nahtarten, in punktförmige und linienförmige Lötverbindungen gegliedert werden. Die Herstellung der stoffschlüssigen, punktförmigen Lötverbindungen zwischen Bauteilen aus Aluminiumlegierungen und Stahl kann mittels Widerstandserwärmung oder Reibungswärme erfolgen [66]. Bei zuerst genannter Variante erfolgt der Wärmeintrag, ähnlich wie beim Widerstandspunktschweißen von Stahl-Stahl-Fügeverbindungen, auf Grundlage von elektrischer Widerstandserwärmung [67]. Die Anpassung der Kontaktwiderstände und Prozessführung soll nach [66, 68, 69] die Ausbildung von intermetallischen Phasen begrenzen. Die Untersuchungsergebnisse mit beschichteten 22MnB5 zeigen allerdings, dass das Aluminium-Silizium-Schichtsystem nicht aufgeschmolzen wird. Hierdurch fallen die maximalen Zugkräfte und Brucharbeiten geringer als bei unbeschichteten 22MnB5 aus [68]. Auch in [51] werden punktförmige Widerstandslötverbindungen zwischen Aluminium und pressgehärteten 22MnB5 untersucht. Die geringe Scherzugkraft der Fügeverbindung 1,5 mm AA6016 WWP+TS auf 1 mm pressgehärteten 22MnB5+AS150 wird auf das fehlende Aufschmelzen der intermetallischen Beschichtung des pressgehärteten Stahls zurückgeführt. Die Fügeverbindung zwischen dem Aluminium und der Beschichtung des pressgehärteten Stahls besteht nur aufgrund der Benetzung des geschmolzenen Aluminiums. Punktförmige Lötverbindungen können außerdem zwischen Aluminium und Stahllegierungen durch Reibungsenergie hergestellt werden [70, 71]. Untersuchungen an Fügeverbindungen zwischen AA1050 und 22MnB5 zeigen, dass die Aluminium-Silizium-Beschichtung des Stahlwerkstoffs intakt bleibt und sich eine Durchmischungszone, eine Wärmeeinflusszone und eine thermomechanisch beeinflusste Zone ausbildet [52]. Neben den punktförmigen Fügeverbindungen ist auch das Fügen mittels linienförmiger Lötverbindungen möglich. Die Veröffentlichungen [53, 72] untersuchen Mischverbindungen, welche beim Herstellungsprozess auf Laserstrahlung als Energiequelle zurückgreifen. Die Verbindungsproben sind in beiden Veröffentlichungen als Überlappstoß ausgeführt, wobei in [53] in der Überlappungsmittle der obenliegenden 22MnB5+AS aufgeschmolzen wird und so eine stoffschlüssige Fügeverbindung mit dem darunter liegenden AA6016-T4 erzeugt. [72] betrachtet die Fügeignung von 22MnB5 mit Aluminium-Silizium-Beschichtung bzw. Zink-Nickel-Beschichtung und AA6016 unter Einsatz der Zusatzwerkstoffe AlSi3Mn und ZnAl15. Die Herstellung einer Kehlnaht am Überlappstoß ist erst nach einer Entfernung der Beschichtung mittels Sandstrahlen möglich. Für die Herstellung von linienförmigen Lötverbindungen ist auch der Einsatz anderer Energieformen denkbar. Mischverbindungen zwischen Aluminiumlegierungen und hochfesten Stahlwerkstoffen werden in [73, 74] durch einen Rührreiblötprozess hergestellt. Li-

neare Lötverbindungen zwischen Aluminium und Stahl können durch Fügen mit Lichtbogen hergestellt werden. Wissenschaftliche Untersuchungen dazu sind Bestandteil von [62, 75, 76]. Die Ergebnisse dieser wissenschaftlichen Untersuchungen zeigen, dass bei Lötverbindungen zwischen Aluminiumlegierungen und pressgehärteten Stählen wegen der intermetallischen Phasen nur niedrige Zugkräfte erzielt werden. Die intermetallische Oberflächenrandsschicht des pressgehärteten 22MnB5 schränkt die Ausbildung einer tragfähigen Fügeverbindung stark ein. Für eine Ausbildung einer stoffschlüssigen Fügeverbindung in Form der intermetallischen Phasen des Typs Fe_xAl_y zwischen dem Aluminium- und dem Stahlwerkstoff ist die Beschichtung vor dem Fügen zu entfernen. Für das Verbinden von Aluminiumlegierungen mit pressgehärteten Stählen werden in unterschiedlichen Veröffentlichungen mechanisch gefügte Fügeverbindungen untersucht. Untersuchte Fügeverbindungen sind Halbhohl- und Vollstanznietverbindungen und Clinchverbindungen [77]. Für die Herstellung von Halbhohlstanznietverbindungen kann pressgehärter 22MnB5-Werkstoff vor dem Fügen thermisch entfestigt werden, um reproduzierbare hohe Tragfähigkeiten zu erlangen [78]. Aluminium und 22MnB5 ist nach [79] durch Halbhohlstanznietverbindungen auch ohne vorherige Entfestigung des Stahlblechs durch die Verwendung spezieller Nietgeometrien prozesssicher ffügbar. Bei Dreiblechverbindungen mit Aluminium-Stahl-Aluminium hat vor allem die Nietgeometrie einen Einfluss auf die Deformation der Fügebauteile und damit auf die Klebeverbindung bei kombinierten Fügeverbindungen [80]. Desweiteren eignen sich für Mischbaukonstruktionen Stanznagelverbindungen [81, 82]. Ein möglicher Einsatz sind außerdem Schneidclinchverbindungen [55, 83–86]. Neben den elementaren Fügeverbindungen gibt es kombinierte Fügeverbindungen. Deren Herstellungsverfahren werden oft als thermisch-mechanische Fügeverfahren bezeichnet [77]. Niet-Widerstandsschweiß-Verbindungen können mit dem in [57, 79, 87] beschriebenen Prozess des Widerstandselementschweißens gefügt werden. Zwischen Fügen mit vorkonfektionierten und selbststanzenden Elementen wird in [56] unterschieden. Bei zuerst genannter Variante wird das Nietelement in einem separaten Arbeitsgang in das Aluminium eingebracht und anschließend durch elektrische Widerstandserwärmung mit dem Stahlblech verschweißt [56, 88]. Bei Verbindungsherstellung mit selbststanzendem Nietelement erfolgt das Einstanzen und das Verschweißen in einer Anlagentechnik [56]. In Hinblick auf den industriellen Einsatz hat die zuletzt genannte Verfahrensvariante den Vorteil, dass die Positionierung der Schweißausrüstung entfällt und die Prozesskette verkürzt wird. Auch Niet-Reibschweiß-Verbindungen können als eine Kombination aus einer Niet- und einer Schweißverbindung gesehen werden [89]. Im Gegensatz zu Niet-Widerstandsschweiß-Verbindungen wird bei der Herstellung der Schweißverbindung die Reibenergie genutzt. In Niet-Reibschweiß-Verbindungen kann entweder eines der Bauteile oder ein weiteres Fügeelement die Funktion des Schließkopfs übernehmen [90]. Niet-Reibschweiß-Verbindungen können außerdem mit Widerstandspunktschweißverbindungen kombiniert werden [91] und sind bereits in Karosseriekonstruktionen enthalten [92–94]. Die Gegenüberstellung der maximalen Zugkräfte von Niet-Reibschweiß-Verbindungen mit Niet- und Stanznagelverbindungen in [95] zeigt, dass diese bei der kombinierten Fügeverbindung höher ausfällt. Der Abgleich mit den maximalen Zugkräften bei Lötverbindungen

dungen zeigt, dass durch die kombinierte Fügeverbindung höhere Kräfte übertragen werden können. Die Übertragung höherer Kräfte kann damit erklärt werden, dass die kombinierte Niet-Reibschweiß-Verbindung die Vorteile der Eigenschaften von Niet- und Schweißverbindungen vereint. Durch den Nietverbindungsanteil erfolgt mit dem mechanischen Kontakt die Kraftübertragung auf das Deckblech. Die Reibschweißverbindung zwischen Niet und Basisblech ergibt eine stoffschlüssige Kraftübertragung bei nahezu Grundwerkstoffeigenschaften. Die bisherigen Untersuchungen zu Niet-Reibschweiß-Verbindungen zeigen, dass im Gegensatz zu konventionellen Fügeverbindungen ein Versagen bei höheren Kräften auftritt. Sie beschränken sich allerdings auf bestimmte Blechkombinationen. Die Erarbeitung verallgemeinernder Kenntnisse zur Fügbarkeit steht aus. Im folgenden Abschnitt wird deshalb der aktuelle Stand der Technik zu den Teilaspekten der Fügbarkeit analysiert und die offenen Forschungsfragen formuliert.

Erarbeitete Kernergebnisse:

- Im Fahrzeugbau kann eine Gewichtsreduzierung durch Mischbau von Bauteilen aus pressgehärteten Stahl- und Aluminiumlegierungen erzielt werden.
- Niedrige Zugkräfte bei Lötverbindungen zwischen Aluminiumwerkstoffen und pressgehärteten 22MnB5 sind auf intermetallische Phasen des Typs Fe_xAl_y und hoher Schmelztemperaturen der intermetallischen Oberflächenbeschichtungen zurückzuführen.
- Das Versagen von Niet-Reibschweiß-Verbindungen tritt im Gegensatz zu konventionellen Fügeverbindungen bei höheren Kräften auf.
- Allgemeingültige Betrachtungen zur Fügbarkeit von Leichtbauteilen mittels Niet-Reibschweiß-Verbindungen stehen aus.

2.2 Fügbarkeit von Bauteilen mittels Niet-Reibschweiß-Verbindungen

Für eine umfassende Beurteilung, ob Bauteile gefügt werden können, bietet sich die Betrachtung der Fügbarkeit an. Diese stellt eine Systemeigenschaft dar [11]. Die Fügbarkeit der Bauteile ist gegeben, wenn die Fügeverbindung mit ihren Eigenschaften unter den konstruktiven, technologischen und werkstofflichen Voraussetzungen die an sie gestellten Anforderungen erfüllt [13, 96, 97]. Diese ganzheitliche Betrachtungsweise hat sich aus der Schweißbarkeit [98] entwickelt und ist deren Verallgemeinerung. Analog der Schweißbarkeit gliedert sich die Fügbarkeit in die drei Aspekte Fügeeignung, Fügbarkeit und Fügbarkeit [13]. Auf Grundlage des in Abbildung 2-2 dargestellten Schemas lassen sich Wechselwirkungen zwischen den drei genannten Bereichen aufzeigen und die Fügbarkeit von Bauteilen abschätzen. Hierbei können die Betrachtung beispielsweise von einem bestimmten Werkstoff [99] oder einer Füge-technologie [100] ausgehen. Für Leichtbaukonstruktionen, die mittels Niet-Reibschweiß-Verbindung hergestellt werden, steht nach dem aktuellen Stand der Erkenntnisse ein Fügbarkeitsbetrachtung aus. In den folgenden Abschnitten wird der Stand der Technik zu dieser kombinierten Fügeverbindung im

Rahmen einer Fügbarkeitsbetrachtung ausgearbeitet. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf Mischverbindungen aus Aluminiumlegierungen und hochfesten Stahlwerkstoffen.

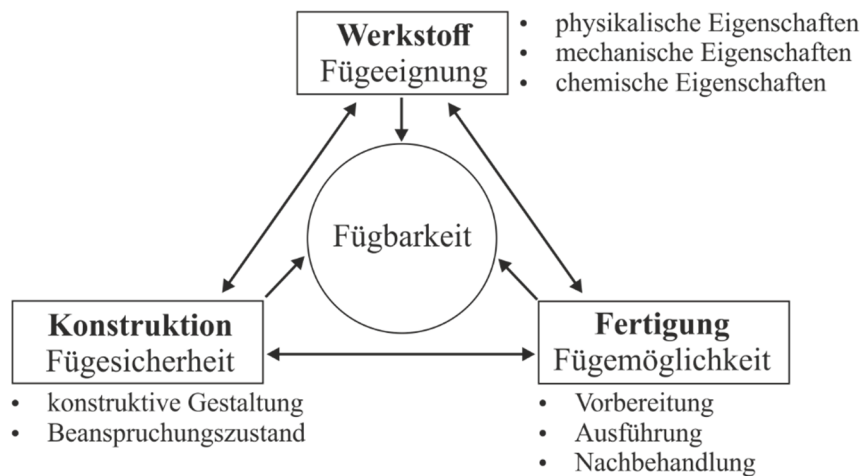


Abbildung 2-2: Fügbarkeit von Bauteilen [11]

2.2.1 Fügesicherheit

Die Fügesicherheit bezieht sich auf die Konstruktion der Fügeverbindung. Die Fügeverbindung ist als Konstruktionselement anzusehen. Die grundlegende Funktion einer Fügeverbindung besteht nach [58] in der Einschränkung der Freiheitsgrade zwischen den Fügeflächen. Unter dem Aspekt der Fügesicherheit ist die Fügeverbindung so auszulegen, dass es bei Einwirkung von äußeren Kräften und Momenten nicht zum Bauteilversagen kommt. Für die Auslegung muss die Kraftwirkung an den tragenden Flächen bekannt sein. Die auf die Fläche einwirkende Kraft darf die zulässige Kraft nicht überschreiten. Die zulässige Kraft ist von kraftrelevanten Eigenschaften abhängig, welche bei der Konstruktion festzulegen sind. Beispielsweise ist die zulässige Kraft von der Größe der tragenden Fläche abhängig, welche durch geometrische Größen zu dimensionieren ist. Für Niet-Reibschweiß-Verbindung wurde die Kraftwirkung an den tragenden Flächen nicht erforscht. Kraftrelevante Eigenschaften zur Festlegung bei der Konstruktion sind nicht beschrieben. Entsprechende geometrische Größen zur Dimensionierung der Fügeverbindung sind unbekannt. Deshalb gilt es Vorschriften für die Konstruktion zu erarbeiten. Bisherige Veröffentlichungen [101, 102] beschränken sich auf die Beschreibung, des in Abbildung 2-3 dargestellten, schematischen Aufbaus. Der untere Fügepartner wird als Basisblech bezeichnet. Darüber ist das Deckblech angeordnet. Durch den Niet wird eine formschlüssige Verbindung zwischen Deck- und Basisblech gebildet. Niet und Basisblech sind durch eine Reibschweißverbindung miteinander verbunden. Der umgeformte Teil des Nietschafts wird als Wulst bezeichnet.

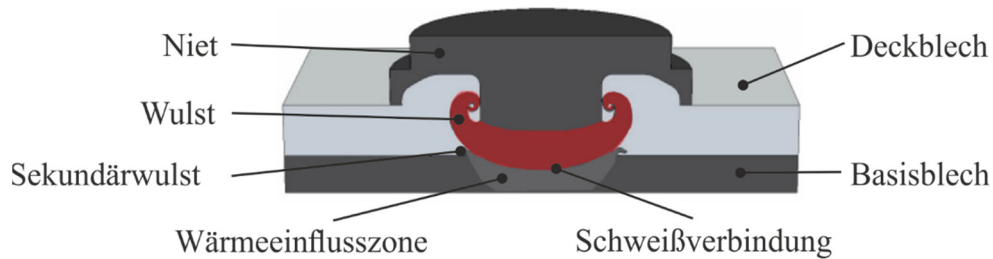


Abbildung 2-3: Aufbau einer Niet-Reibschweiß-Verbindung (in Anlehnung an [101, 102])

Der verdrängte Werkstoff des Basisblechs am Rand der Schweißverbindung stellt die Sekundärwulst dar. Die Wärmeinflusszone bildet sich um die Schweißverbindung aus. Für die Beurteilung der Verbindungsqualität werden in [95, 102, 103] geometrische Merkmale definiert. Die Ausbildung der Merkmale wird im Rahmen von Parameterstudien untersucht. Auf welcher Grundlage die Merkmale definiert werden, nennen die Veröffentlichungen nicht. In [103] wird der Durchmesser der Fügezone als geometrisches Merkmal definiert. In Abhängigkeit der eingestellten Prozessparameter kann dieser größer, gleich oder kleiner dem Schaftdurchmesser sein [103]. [101] untersucht den Einfluss des Durchmessers der Schweißverbindung auf die Kopfbzugkraft. Zur Erreichung hoher Kopfbzugkräfte sollte nach [101] der Durchmesser der Schweißverbindung nicht kleiner als der Schaftdurchmesser des Niets sein. Die geometrische Gestalt der Wulst hat nur einen sehr geringen Einfluss auf die Verbindungstragfähigkeit, solange der Schaftquerschnitt rissfrei ist. Positiv auf die Tragfähigkeit unter Scherzugbelastung wirkt sich eine umlaufende Ringnut an der Unterseite des Elementkopfes aus, durch die umgeformter Deckblechwerkstoff aufgenommen wird [104]. Analytische Betrachtungen zu der an den tragenden Flächen zulässigen Kraft und deren Einflussfaktoren stehen aus. Bislang erfolgte eine rein experimentelle Untersuchung einzelner Einflussgrößen auf die in Zugversuchen ermittelte Höchstkraft der Fügeverbindung. In den Experimenten wird der Einfluss von ausgewählten Blechdicken und Werkstoffen auf die Scher- und Kopfbzugkräfte untersucht. Den geometrischen und werkstofflichen Einfluss von Deck- und Basisblech auf die maximale Zugkraft, zeigen die Ergebnisse der quasistatischen Zugversuche in [102] und [95]. In beiden Veröffentlichungen werden Verbindungsproben aus Aluminiumlegierungen und Stählen geprüft. Die maximalen Elementkopfbzugkräfte der untersuchten Fügeverbindungen, sind von der Basisblechdicke und dem Werkstoff abhängig. Die Elementkopfbzugkraft wird ermittelt, indem ein Gewindebolzen auf den Elementkopf einer Eielementprobe geschweißt und anschließend durch Kraftangriff am Bolzen die Höchstkraft des Basisblech unter einer quasistatischen Kopfbzugbelastung bestimmt wird. Mit dieser Vorgehensweise soll die Höchstkraft ermittelt werden, mit welcher die Schweißverbindung belastet werden kann. Das Deckblech der Fügeverbindung wird nicht belastet. Als Basisblechwerkstoff wird 22MnB5+Z140 [102] und 22MnB5+AS150 [95] verwendet. Die Versuchsergebnisse in beiden Veröffentlichungen zeigen einen Einfluss der Basisblechdicke auf die Elementkopfbzugkraft. Mit zunehmender Basisblechdicke steigt die gemessene Höchstkraft. In [95] ist als Versagensart ausschließlich ein Ausknöpfen des Basisblechs zu beobachten. In [102] ist das Versagen bei den beiden geringeren Blechstärken identisch. Bei der größten Basisblechdicke tritt der

Bruch des Elementschafts auf. Neben dem Einfluss der Basisblechdicke untersucht [95] zusätzlich den Einfluss des Basisblechwerkstoffs auf die maximale Elementkopfzugkraft. Für neun unterschiedliche Stahlwerkstoffe, welche im Karosseriebau eingesetzt werden, werden die in Zugversuchen gemessene Höchstkräfte gegenübergestellt. Diese sind bei gleicher Blechstärke von der Festigkeit des Basisblechwerkstoffs abhängig. Der Nachteil der durchgeführten Elementkopfzugversuche ist, dass nur Aussagen über die in der Schweißverbindung maximal wirkenden Höchstkräfte bei einer bestimmten Kombination aus Element, Deck- und Basisblech getroffen werden können. Eine experimentelle Bewertung der in der Fügeverbindung zulässigen Kräfte auf Grundlage der Versuchsergebnisse kann nicht getroffen werden, da das Deckblech im Zugversuch nicht belastet wird. Den Einfluss des Deckblechs auf die Scherzugkraft verdeutlichen die Ergebnisse der Scherzugprüfungen in [95]. Im Versuch wird vom Aluminiumlegierungsdeckblech sowohl die Dicke als auch der Werkstoff bzw. Auslagerungszustand variiert. Es ist mit steigender Blechdicke eine Erhöhung der ermittelten Höchstkraft zu beobachten. Zudem ist die Scherzugkraft vom eingesetzten Deckblechwerkstoff und Auslagerungszustand abhängig. Das Versagen tritt in den Aluminiumfügeteilen auf. Unter Scherzugbelastung hat zusätzlich der Randabstand des Elements Einfluss auf die Höchstkraft. Dies beobachtet [105] in Scherzugversuchen mit unterschiedlichen Überlappungsbreiten der Prüfbleche. Die Zusammenfassung der bisherigen Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Niet-Reibschweiß-Verbindungen zeigt, dass vorwiegend die experimentelle Zugprüfung an Fügeverbindungen mit unterschiedlichen Geometrien und Werkstoffen durchgeführt wurde. Verallgemeinernde Erkenntnisse für Fügbarkeitsbetrachtungen können aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden. Eine Zusammenfassung der Vorgehensweise für den Sicherheitsnachweis von punktförmigen Fügeverbindungen in Karosseriestrukturen zeigt Abbildung 2-4. Die Sicherheit von Karosseriestrukturen ist durch Versuche nachzuweisen. Die Anforderungen an die passive Sicherheit von Fahrzeuginsassen bei einem Crash werden durch den Gesetzgeber vorgegeben. Ein Beispiel hierfür ist die Richtlinie 96/79/EG über den Schutz von Kraftfahrzeuginsassen bei einem Frontaufprall des europäischen Parlaments und Rates [10, 106]. Die Sicherheit des Fahrzeugs muss über die gesamte Produktlebensdauer gewährleistet sein. Beispielsweise darf die Karosseriestruktur aufgrund von zyklischer Beanspruchung nicht versagen [10, 107]. Der Nachweis, dass die Sicherheitsanforderungen an die Karosserie erfüllt werden, erfolgt auf Grundlage von experimentellen und numerischen Methoden [108, 109]. In Hinblick auf den rechnerischen Nachweis der Fügesicherheit von Karosseriestrukturen sind insbesondere Crash-Simulationsmodelle und Modelle zum Nachweis der Betriebsfestigkeit von Bedeutung. In diesen werden Fügeverbindungen als Ersatzmodelle abgebildet [108, 110–115]. Die Ermittlung der Modellparameter erfolgt dabei durch Versuche oder Berechnung. Berechnungsmodelle für den Sicherheitsnachweis von Niet-Reibschweiß-Verbindungen beschränken sich nach dem aktuellen Stand der Technik auf die Berechnung von Karosseriestrukturen. Die Ersatzmodellierung von Niet-Reibschweiß-Verbindungen in FEM-Struktursimulationen untersucht [95]. Das Verformungs- und Versagensverhalten von punktförmigen Niet-Reibschweiß-Verbindungen kann, durch die in [95] entwickelte Methodik, in der

numerischen Simulation als Ersatzmodelle abgebildet werden. Das Simulationsergebnis der Belastung einer T-Stoß-Probe zeigt eine gute Übereinstimmung des Kraft-Verformungs-Verhaltens zwischen Berechnung und Versuch [95].

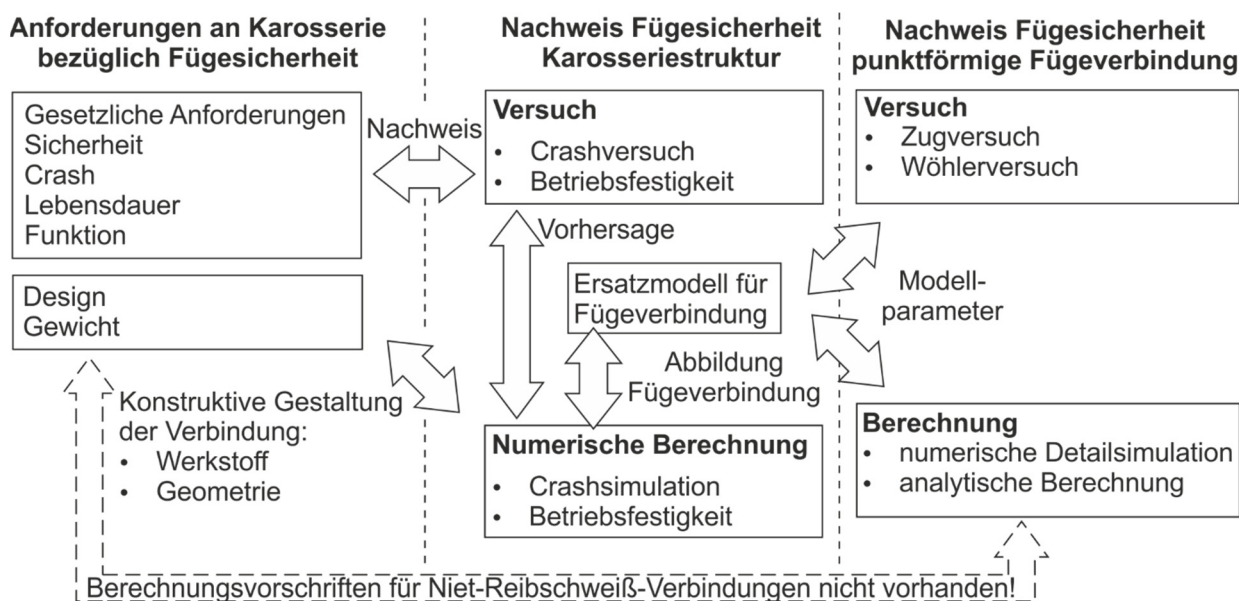


Abbildung 2-4: Nachweis der Fügeseicherheit von Karosseriestrukturen

Die Methodik lehnt sich an die Vorgehensweise der Modellierung anderer thermisch und mechanisch gefügten Fügeverbindungen an [110–113]. Im Modell wird die elastische Verformung, das plastische Fließen, die Schädigungsinitiierung und die plastische Verschiebung bis zum vollständigen Versagen nachgebildet. Die Kennwertermittlung zur Kalibrierung des in [95] aufgestellten Ersatzmodells erfolgt rein experimentell. Durch Prüfung von Enelementproben unter verschiedenen Belastungswinkeln und -geschwindigkeiten werden Modellparameter, wie beispielsweise Scher- und Normalsteifigkeiten, Torsions- und Biegesteifigkeiten, äquivalente Fließkraft und deren zugehörigen Verschiebung und die Kraftmaxima unter Scher- und Kopfbelastung ermittelt. Der Vorteil der Abbildung der Fügeverbindung in der FEM-Struktursimulation als Ersatzmodell ist, dass der Nachweis der Fügeseicherheit auch bei komplexen Geometrien möglich ist. Durch die Berechnung kann bestimmt werden, ob die Fügeverbindung ihre Funktion innerhalb der Struktur erfüllt. Eine Reduzierung des Versuchsaufwands zur Kalibrierung der FEM-Struktursimulation kann durch Berechnungsmodelle erzielt werden, welche die punktförmige Fügeverbindung abbilden. Die Erarbeitung von Vorschriften zur Berechnung von Niet-Reibschweiß-Verbindungen steht aus. Die FEM-Detailsimulation von Niet-Reibschweiß-Verbindungen wird aktuell in den Veröffentlichungen [95, 114] thematisiert. Es werden Berechnungsmodelle mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode beschrieben. Im Modellaufbau wird die reine Geometrie der untersuchten Fügeverbindungen modelliert. Eine mögliche Kraftübertragung durch Kraftschluss bilden die Modelle nicht ab. Das Berechnungsmodell in [95] dient der Dimensionierung der Kopfgeometrie eines Fügeelements unter statischer Belastung und der Beurteilung der Spannungsverteilung in einer Fügeverbindung unter Scherzugbelastung. Die Entwicklung analytischer Modelle für den Sicherheitsnachweis bei Längs- und Querkrafteinwirkung

steht aus. Eine Erarbeitung dieser Berechnungsmodelle ist zur Berechnung der maximalen zulässigen Kräfte sinnvoll. Der Versuchsaufwand für die FEM-Struktursimulation kann dadurch reduziert werden, da bereits vor Versuchsdurchführung berechnet werden kann, ob die Fügeverbindung die Anforderung erfüllt. Berechnungsmethoden der Schwingfestigkeit von Niet-Reibschweiß-Verbindungen untersucht [114]. In der Veröffentlichung wird die Übertragbarkeit zweier bewährter Berechnungskonzepte zur Beurteilung der Schwingfestigkeit von Fügeverbindungen auf Niet-Reibschweiß-Verbindungen geprüft. Zur Abschätzung der Lebensdauer werden im Rahmen des kerbspannungsbasierten Konzepts mit Hilfe einer FEM-Detailsimulation die lokalen Spannungen an Kerben berechnet und in Beziehung mit den ertragbaren Spannungen gesetzt. Letztere werden auf experimenteller Basis in Form von Wöhlerlinien von ausgewählten Fügeverbindungen unter Normal- und Scherbelastung ermittelt. Die Anwendung dieses Ansatzes ist bei Niet-Reibschweiß-Verbindungen allerdings nicht zielführend. [114] beschreibt die exakte Abbildung der Kerbgeometrie im Modell als problematisch. Zusätzlich wird in [114] die Beurteilung der Schwingfestigkeit mit FESPOW-Ansatz untersucht. In diesem wird, analog zu Widerstandspunktschweißverbindungen, unter Verwendung von Schalenelementen der Fügepunkt als Ersatzmodell dargestellt. Die Ersatzmodellierung der komplexen Struktur erfolgt dabei durch vereinfachte Balkenelemente. In der FE-Simulation werden für Fügeverbindungen unter quasi-statischer Kopf- und Scherzugbelastung die Schnittkräfte in der Fügeverbindung ermittelt und daraus die Radialspannungen berechnet. Die Untersuchungsergebnisse in [114] zeigen ein hohes Potential für die Anwendbarkeit des FESPOW-Ansatzes zur Lebensdauerberechnung von Niet-Reibschweiß-Verbindungen. Die berechneten und experimentellen Ergebnisse zeigen vor allem bei höheren Schwingspielzahlen eine gute Übereinstimmung.

Identifizierte Defizite zur Beurteilung der Fügesicherheit:

- Die Kraftwirkung auf die tragenden Flächen in der Fügeverbindung ist unbekannt.
- Kraftrelevante Eigenschaften für die Auslegung sind nicht beschrieben.
- Konstruktions- und Berechnungsvorschriften liegen nicht vor.
- Die Entwicklung eines analytischer Berechnungsmodelle für den Sicherheitsnachweis bei Längs- und Querkrafteinwirkung steht aus.

2.2.2 Fügeignung

Die Fügeignung bezieht sich auf die Eigenschaften der Bauteilwerkstoffe [13]. Die Fügeignung ist gegeben, wenn das Fügen möglich ist und die Werkstoffe mit ihren chemischen, metallurgischen und physikalischen Eigenschaften die Anforderungen erfüllen [97]. Die Fügeignung von Werkstoffen in Niet-Reibschweiß-Verbindungen wurde bislang nicht betrachtet. Die Ableitung der kraftrelevanten Werkstoffeigenschaften, welche einen Einfluss auf die zulässigen Kräfte an den tragenden Flächen haben, steht aus. Die Einflussfaktoren durch den Fertigungsprozess auf die Werkstofffestigkeit sind nicht beschrieben. Bisherige Veröffentlichungen beschränken sich

rein auf die experimentelle, metallurgische Analyse ausgewählter Fügeverbindungen [95, 105, 116]. Diese befassen sich insbesondere mit der Untersuchung intermetallischer Phasen innerhalb der Schweißverbindung, der Bestimmung des Gefüges in der Wärmeeinflusszone des Basisblechs und des Fügelements und Härtemessungen. Aus [95] ist bekannt, dass intermetallische Phasen in der Schweißverbindung, welche auf eine nicht entfernte Aluminium-Silizium-Beschichtung des 22MnB5+AS150 Basisblechs zurückzuführen sind, die Scher- und Kopfzugtragfähigkeit einer Fügeverbindung herabsetzen. Die Entfernung der Beschichtung aus dem Bereich der Schweißverbindung kann durch die Wahl eines geeigneten Elementwerkstoffs und die Anpassung von Prozessparametern sichergestellt werden [95]. Auf Grundlage von metallurgischen Gefügeuntersuchungen in Kombination mit Härtemessungen wird in [95, 105, 116] abgeleitet, dass es aufgrund des prozessbedingten Wärmeeintrags innerhalb der Füge Teile aus Stahl zu einer Veränderung der Werkstoffeigenschaften kommt. Die Abbildung 2-5 zeigt die Ergebnisse der Mikrohärteuntersuchungen der mittels Reibelementschweißen gefügten Fügeverbindung aus AA7075-T6 und DP980 [105]. [95] führt die Härtemessungen an der Blechkombination EN AW-6016-T4 und 22MnB6+AS150 durch, deren Werte ebenfalls in Abbildung 2-5 aufgetragen sind.

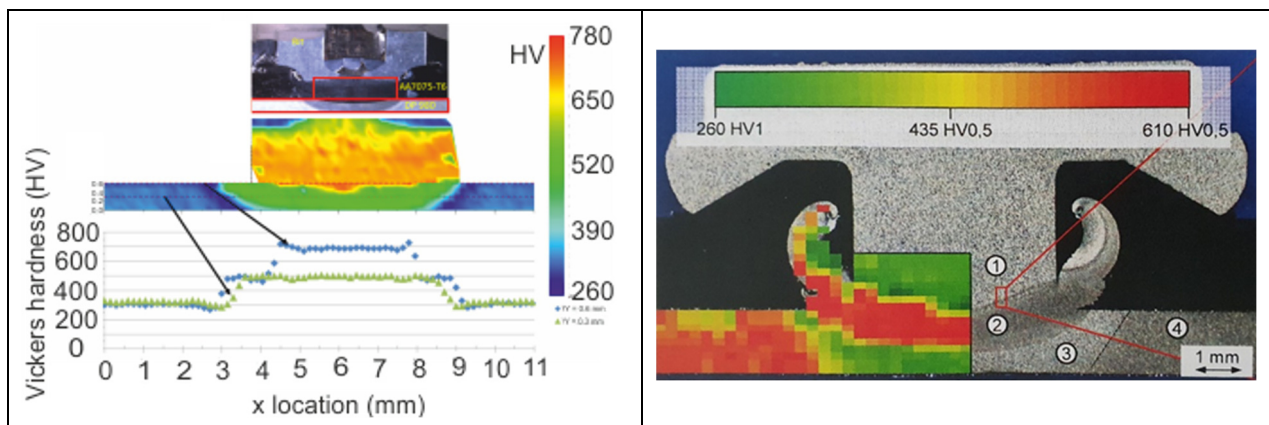


Abbildung 2-5: Härtemessungen an Niet-Reibschweiß-Verbindungen [95, 105]

Die maximalen ermittelten Härtewerte im Basisblech liegen bei beiden Untersuchungen im Bereich der Schweißverbindungen. [105] vermutet als Ursache dieser Aufhärtung im Dualphasenstahl eine Erhöhung des Kohlenstoffanteils, welche aus einer Vermischung des Grundwerkstoffs mit dem Fügeelementwerkstoffs innerhalb der Schweißverbindung resultiert. Diese Begründung ist zu hinterfragen, da die Solidus Temperatur der Werkstoffe beim Reibschweißen nicht erreicht wird und es nicht zu einer Durchmischung flüssiger Phasen kommt. Wahrscheinlicher ist die zweite Begründung nach [105]. Während des Fügeprozesses findet eine Gefügeumwandlung einer Mischung aus Ferrit und Martensit zu reinem Martensit statt, was zu einer Erhöhung der Härte führt. Mit zunehmendem Abstand zur Schweißverbindung sinkt die Härte bis auf den ursprünglichen Wert des Grundwerkstoffs [105]. Auch [95] führt die beobachtete lokale Aufhärtung um die Schweißverbindung auf eine Austenitisierung mit rascher Abkühlung zurück. Das entstandene Gefüge wird von [95] als Schmiedegefüge charakterisiert. In den angrenzenden Bereichen des 22MnB5+AS150 Basisblechs führt ein Anlassvorgang zu einer Reduzierung der Härtewerte. Der

benachbarte wärmeunbeeinflusste Grundwerkstoffe weist eine höhere Härte auf. Neben dem Basisblech zeigen nach den durchgeführten Untersuchungen auch Teilbereiche des Fügeelementschaffs aus 42CrMo4 eine Wärmeinflusszone. [105] beobachtet eine Härtesteigerung von ca. 290 HV auf bis zu 720 HV. Verursacht wird diese nach [105] durch eine fügeprozessbedingte Umwandlung von vergütetem Martensit zu reinem Martensit. [95] stellt im Schaft des Fügeelements aus vergütetem 22MnB4 eine lokale Wärmebeeinflussung des Werkstoffs in Form von feinkörnigem Schmiedegefüge fest. Nach [87] kann durch Variation der Prozessparameter Axialkraft und Drehzahl die Gestalt der Wärmeinflusszone nicht beeinflusst werden. Für die Beurteilung der Fügemöglichkeit der Werkstoffe von Niet-Reibschweiß-Verbindungen, ist grundsätzlich zu analysieren, welche Festigkeitsänderungen auftreten können. Einflussfaktoren auf Festigkeitsänderungen im Werkstoff wurden nach dem aktuellen Stand der Technik nicht betrachtet. Insbesondere die metallurgischen Vorgänge sind zu analysieren, welche aufgrund des Wärmeeintrags und der Umformung des Werkstoffs während der Fügepunktausbildung erfolgen.

Identifizierte Defizite zur Beurteilung der Fügemöglichkeit:

- Kraftrelevante Werkstoffeigenschaften sind nicht identifiziert.
- Mögliche Festigkeitsänderungen sind nicht beschrieben.
- Einflussfaktoren auf Festigkeitsänderungen sind unbekannt.

2.2.3 Fügemöglichkeit

Die Fügemöglichkeit der Bauteile stellt eine technologische Eigenschaft dar. Sie umfasst die Randbedingungen des jeweiligen Fügeprozesses, wie beispielsweise die apparative Ausstattung und die Zugänglichkeit der Fügestelle [97]. Mit der Fügemöglichkeit wird sichergestellt, dass die Eigenschaften der Fügeverbindung, welche im Rahmen der Konstruktion festgelegt werden, technologisch umsetzbar sind. Für eine Beurteilung der Fügemöglichkeit bedarf es detaillierter Kenntnisse über die Wirkzusammenhänge zwischen der Eigenschaftsbildung und den physikalischen Vorgängen während des Fügeprozesses. Die Ausbildung der kraftrelevanten Eigenschaften wurde in bisherigen Veröffentlichungen unzureichend beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung der Fügepunktausbildung in Bezug auf thermodynamische Vorgänge steht aus. Bisherige Veröffentlichungen beschränken sich auf qualitative Beschreibungen des Prozessablaufs. Für den Herstellungsprozess von Niet-Reibschweiß-Verbindungen werden unterschiedliche Begriffe verwendet. Eine Prozessvariante sind beispielsweise das Reibelementschweißen [95, 102]. Die Firma Ejot verkauft eine Anlagentechnik und verschiedene Fügeelemente unter dem Namen Ejoweld [93, 117–121]. Ein Vorlochen des Deckblechs ist nicht notwendig, da sich dieses während des Fügeprozesses ausbildet [95, 116, 118]. Der Prozess zur Herstellung von Niet-Reibschweiß-Verbindungen ist in den Patenten [122–125] beschrieben. Eine Unterteilung der Fügepunktausbildung in Prozessphasen erfolgt unterschiedlichen wissenschaftlichen Publikatio-

nen [57, 79, 95, 102, 103, 105, 126–132]. Die Beschreibungen der Fügeverbindungsbildung nach [128] ist in Abbildung 2-6 dargestellt.

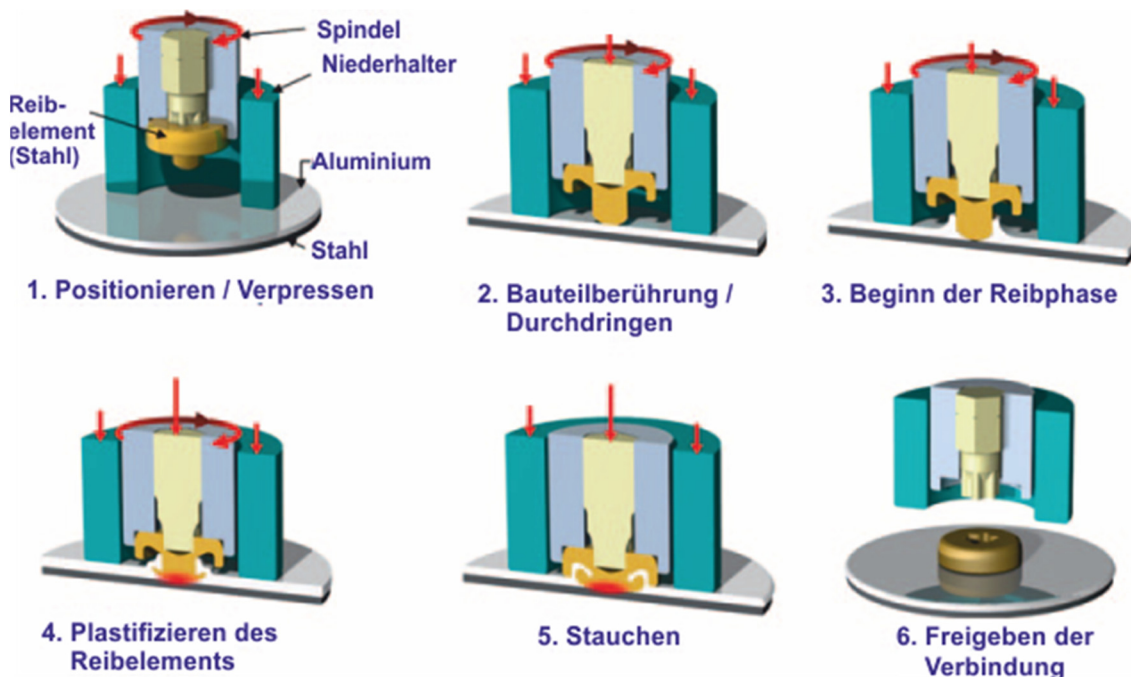


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung des Prozessablaufs [128]

Die Fügepartner werden mit Hilfe eines Niederhalters aneinander gepresst [102]. Der Niet wird anschließend in Richtung der beiden Fügepartner zugeführt. Im zweiten Prozessschritt beschleunigt der Antrieb das Element auf die Soll Drehzahl und eine axiale Kraft wird beaufschlagt. Bei der Prozessvariante des Reibelementschweißens [101] und des Ejoyelds [118] wird das Aluminiumblech durch die Reibungswärme plastifiziert und der Niet verdrängt unter einer translatorischen und rotatorischen Bewegung den Deckblechwerkstoff. Dieser steigt entlang des Schaftes auf und füllt später das Unterkopfvolumen des Elements aus [95]. Die Verformung des Deckblechwerkstoffs direkt am Nietschaft während des Durchdringens wird in [133] experimentell und simulativ bestätigt. Die Lochausbildung kann auch durch einen Bohrprozess bei niedrigeren Drehzahlen erfolgen. An der Nietschaftspitze befindet sich dazu eine geometrische Schneide [129, 134]. Die Reibphase beginnt mit dem Kontakt zwischen Elementspitze und Basisblech. Durch die axiale Kraft kommt es zu einer plastischen Verformung der Spitze was eine Vergrößerung der Kontaktfläche zur Folge hat. Die Erwärmung der Fügezone führt nach [95] zum lokalen Plastifizieren der Elementspitze und des Reibpartners. Die sich ausbildende Wulst verdrängt den Deckblechwerkstoff in Richtung des Elementkopfs und hat eine Reinigungswirkung auf die Kontaktflächen [95]. Die Höhe der Kraft in dieser Phase hat nach [135] den größten Einfluss auf die Prozessdauer und den Energieeintrag. Beim darauf folgenden Stauchen wird die Antriebspindel abgebremst und die Schweißverbindung erzeugt [136]. In [95] folgt hingegen der Reibphase eine Abbremsphase, in welcher die Motorbremse eingeschaltet und die Drehzahl verringert wird. Der Werkstoff kühlt ab und die Scherkräfte an den Kontaktflächen nehmen zu. Das Fügeelement wird in dieser Phase weiterhin durch die axiale Kraft verkürzt. Das Stauchen be-

ginnt nach [95] erst ab Unterschreitung eines bestimmten Drehzahlschwellwerts. Beim Stauchen bildet sich nach Stillstand der Spindel die Verschweißung aus [95, 102]. Grund hierfür sollen Diffusionsvorgänge an den Kontaktflächen sein. Für die Prozessführung beim Reibelementschweißen werden zeit- bzw. weggesteuerte Systeme eingesetzt [95, 102]. Die Beschreibungen des Prozessablaufes weisen ein Defizit in der Beschreibung der physikalischen Wechselwirkungen während der Fügepunktausbildung auf. Insbesondere die Temperaturentwicklung während des Fügeprozesses wird unzureichend betrachtet. Eine Berechnung der Temperatur und Verformung während der Fügepunktausbildung erfolgt in [135] durch die thermisch-mechanische numerische Modellierung des Fügeprozesses. Grundlegende technologische Einflussfaktoren auf die Temperaturentwicklung betrachtet [135] nicht. [137] misst die Temperatur während des Fügens mittels Micro-Dünnschicht-Thermoelementen. Andere Untersuchungen zum Fügeprozess beschränken sich überwiegend auf Parameterstudien, welche an unterschiedlichen Blechkombinationen durchgeführt wurden. Die untersuchten Prozessparameter sind Fügekraft bzw. Fügedruck, Drehzahl und die relative Reibphasenverkürzung. Die Reibphasenverkürzung ist nach der Definition in [95] der Quotient aus dem Weg, welcher nach Durchdringen des Deckblechs bis zum Beginn des Abbremsvorgangs zurück gelegt wird und der zu verkürzenden Schaftlänge. Die zu verkürzende Elementschafthöhe errechnet sich aus der Differenz zwischen Elementschafthöhe und Deckblechdicke. [80] variieren Drehzahl und Fügedruck für die Prüfung von Elementkopfbiegeproben verschiedener Blechkombinationen. Die Ergebnisse zeigen eine Abhängigkeit der maximalen Elementkopfbiegekraft von den Fügeparametern. Die Ausprägung der Fügezonbreite in Abhängigkeit unterschiedlicher Prozessparameter bei der Verbindungsherstellung ist Untersuchungsgegenstand in [57, 103]. Bei Veränderung der Prozessparameter Fügedruck, Drehzahl und Umschaltzeit zeigen Schweißuntersuchungen einen Einfluss auf das Verhältnis von Fügezonbreite und Schaftbreite, die Wulsthöhe, die Wulstkrümmung und den Wulstdurchmesser. Die für die Parameterkombinationen ermittelten Tragfähigkeiten für den Kopf- und Scherzug weisen unterschiedliche Höchstkräfte, Streubreiten der Höchstkräfte und Energieaufnahmen auf. Welcher der untersuchten Parameter Ursache für die unterschiedliche Ausprägung der geometrischen Merkmale und abweichenden Tragfähigkeiten ist, kann aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden. Grund dafür ist, dass mehrere Parameter gleichzeitig variiert wurden und es zu unbekanntem Wechselwirkungen kommt. Eine ausführliche Parameterstudie über die Einflüsse von Fügekraft, Drehzahl und relative Reibphasenverkürzung führt [95] durch. Die Untersuchungen zeigen eine Abhängigkeit des erreichten Fügezonendurchmessers von Drehzahl und Prozessdruck. Zusätzlich werden in Analysen der Schweißverbindung zwischen Element und Stahlblech bei zu geringen Prozessdrücken und hohen Drehzahlen Einschlüsse der Basisblechbeschichtung festgestellt. Aufgrund der hohen Schmelztemperatur des Al-Si-Beschichtungssystems empfiehlt [95] eine mechanische Entfernung während des Prozesses. Diese soll durch eine niedrige Prozess-temperatur und hohe axiale Kräfte erreicht werden. Mit Thermographieaufnahmen zum Zeitpunkt des Spindelstillstands veranschaulicht [95], dass das Temperaturfeld des Aluminiumdeckblech bei einer niedrigeren Drehzahl, einer niedrigen Prozesskraft und einer großen relati-

ven Reibphasenverkürzung größer ist als bei einer höheren Drehzahl, einem höheren Prozessdruck und einer geringeren relativen Reibphasenverkürzung. Eine Parameterstudie in [102] behandeln den Zusammenhang zwischen Drehzahl und Elementkopfzugkraft. Dabei wird ein Abfall bei den Mittelwerten der Elementkopfzugkräfte bei hohen Drehzahlen festgestellt. Außerdem beobachtet [102] mit zunehmender Prozesskraft höhere Elementkopfzugkräfte. Die Analyse der bisherigen Veröffentlichungen zur Fügepunktausbildung von Niet-Reibschweiß-Verbindungen zeigt, dass im Rahmen von Parameterstudien die Auswirkung der Veränderung bestimmter Prozessparameter auf geometrische Eigenschaften und die in Zugversuchen ermittelten Höchstkräfte untersucht wurden. Detaillierte Beschreibungen und Analysen der Prozessparameter auf die physikalischen Vorgänge bei der Fügepunktausbildung stehen aus. Neben der Durchführung von Prozessparameterkombinationen wird im aktuellen Stand der Technik vorwiegend der Einfluss der Fügeelementgeometrie auf den Ablauf des Fügeprozesses untersucht. Zusätzlich enthalten zahlreiche Patentanmeldungen [123, 138–143] und zwei Dissertationen [95, 102] Optimierungen der Gestaltung des Fügeelementes. Die Eigenschaften des Elements, welche einen Einfluss auf den Fügeprozess und die Ausbildung der Fügeverbindung haben, werden dabei berücksichtigt. Die Eigenschaften unterteilen sich in die Geometrie des Eingriffsmerkmals am Elementkopf, dessen Unterkopfgeometrie, die Schaftgeometrie, die Spitzengeometrie, den Werkstoff und die Elementbeschichtung. In den Arbeiten [95, 102] werden verschiedene Eingriffsmerkmale zur optimalen Übertragung des Antriebsdrehmoments von der Spindel auf das Element experimentell untersucht. Der Fokus liegt hier auf der Vermeidung des aus der Schraubenmontage bekannten Cam-Out-Effekts, womit das unbeabsichtigte Herausgleiten und Überrasten der Klinge des Schraubers im Eingriffsmerkmal unter Torsionsbelastung bezeichnet wird [144]. Das Patent [139] umfasst ein Reibschweißelement unter dessen Kopf sich ein Werkstoff befindet der durch die Prozesswärme schmilzt und eine Versiegelung zwischen Elementkopf und Bauteil bewirkt. Die Geometrie des Elementschafte zeichnet sich bei einer zylindrischen Schaftform durch den Durchmesser und die Länge aus. Die technologischen und kraftrelevanten Einflüsse des Schaftdurchmessers sind nicht bekannt. [95] trennt den Nietschaft gedanklich in zwei Teile auf. Zum einen in den Bereich, welcher während des Prozesses nicht umgeformt wird und dessen Länge der Deckblechdicke entspricht. Zum anderen in den sich zur Wulst umformende Teil. Dieser muss laut [95] ein gewisses Aktivierungsvolumen beinhalten, um die Beschichtung der Basisblechoberfläche aus der Verbindungszone zu entfernen. Einen konkreten Wert für die Größe des Aktivierungsvolumen gibt [95] hingegen nicht an, nur dass diese von unterschiedlichen Faktoren abhängig ist. [102] untersucht den Einfluss der Nietschaftlänge auf die Elementkopfzugkraft an Proben mit gleicher Blechstärke. Die Ergebnisse zeigen eine Abnahme der Elementkopfzugkraft bei den beiden längsten verwendeten Elementschäften. [102] führt dies auf Aluminiemeinschlüsse im Bereich der Schweißverbindung zurück. Ursache für dafür soll eine Berührung der sich ausbildenden Wulst mit dem Elementkopf und eine damit verbundene unzureichende Säuberung der Fügezone sein. Ein gezieltes Abführen von erweichtem Werkstoff soll das in [140] beschriebene, gewindeartige, unrunde Profil des Elementschafte bewirken, um eine sichere Fügeverbin-

derung herzustellen. Die Patentanmeldung [138] beinhaltet ein Element, welches als Rohrstück ausgeführt ist und den verdrängten Werkstoff des Deckblechs aufnehmen soll. Einen maßgeblichen Einfluss auf die Verbindungsbildung hat die Elementspitze. Dies wird in den Untersuchungen aus [95, 102] deutlich. In diesen werden Niet-Reibschweiß-Verbindungen mit Fügeelement, welche unterschiedliche Spitzengeometrien aufweisen hergestellt und anschließend die entstandene Fügeverbindung mit Hilfe von Schliffbildern miteinander verglichen. [102] stellt dabei fest, dass sich bei einer konkaven und kegeligen Spitzengeometrie zwischen Element und Basisblech teilweise Deckblechwerkstoff ansammelt und dadurch keine bzw. eine reduzierte Schweißverbindung zwischen beiden Fügepartnern vorhanden ist. Ursache für den angesammelten Aluminiumwerkstoff ist nach [102] eine unzureichende Verdrängung durch das Fügeelement während des Fügeprozesses. Durch die Wahl einer balligen Spitzenkontur wird der Deckblechwerkstoff ausreichend verdrängt und es bilden sich Fügezonen ohne Zwischenschichten aus. Die Schliffuntersuchungen in [95] zeigen, dass sich bei Fügeverbindungen, welche mit einer Kegelspitze hergestellt werden, im Randbereich mehr Rückstände der Aluminium-Silizium-Beschichtung des Basisblechs befinden, als bei Fügeverbindungen, die mit einem Element mit balliger Spitze gefügt wurden. Außerdem wird in verschiedenen Patenten und Offenlegungsschriften die Spitzengeometrie geschützt. In [123] wird eine sägezahnförmige Rillelung der Elementspitze beschrieben, welche radial nach außen verläuft. [141] beansprucht einen kleinen zylindrischen Dorn am Endabschnitt des Verbindungselements, welcher dies während des Durchdringens des Deckblechs zentrieren soll. [142] patentiert eine metallisch reine Elementspitze in Form eines runden Zapfens und eines Rohrstücks, um Rückstände in der Fügeverbindung durch Elementbeschichtung zu vermeiden. Die Erfindung [143] umfasst ein Fügeelement, das eine ballige Spitzengeometrie mit einer Abflachung aufweist. Zusätzlich kann die Spitze geometrische Schneiden und Aussparungen für eine bessere Durchdringung enthalten. Ein weiteres Merkmal des Fügeelements ist dessen Werkstoff. [95, 102] verwenden den Mangan-Bor-Stahl 23MnB4 im gehärteten Zustand. In [105, 129] ist das Fügeelement aus einem 42CrMo4 hergestellt. [141] schützt eine bestimmte chemische Zusammensetzung des Fügeelementwerkstoffs bei welcher die Festigkeit durch die Wärmeentwicklung während des Durchdringvorgangs nicht beeinflusst wird. Zur Vermeidung von Kontaktkorrosion zwischen ungleichen Metallpaarungen sind Fügeelemente mit Beschichtungen zu versehen [47, 145]. In [101] wird ein Einfluss der Elementbeschichtung auf den Ablauf des Fügeprozesses beschrieben. Die Zink-Nickel-Beschichtung soll einen geringen Reibungskoeffizienten aufweisen, was zu einer reduzierten Wärmeentwicklung führt. Dadurch wird der Durchdringvorgang des Elements durch das Deckblech und die Plastifizierung des Elements gehemmt. Bei einem Vergleich des Spindelvorschubsweg-Zeit-Verlaufs sind deshalb Abweichungen zwischen beschichtetem und unbeschichtetem Element zu erkennen. Durch Anpassung von Prozessparameter und der Verwendung von Fügeelementen mit metallisch blanker Spitze ist diesem Verhalten entgegenzuwirken. Die Vermeidung von Spanbildung beim Durchdringen von Aluminiumlegierungen mit hohen Festigkeiten untersuchen [134, 146–149]. Die Bildung von Spänen kann sich negativ auf die Korrosionseigenschaften der Füge-

verbindung auswirken. Die Spannbildung kann durch die Erwärmung des Deckblechs durch Widerstandserwärmung oder eine externen Laserquelle vermieden werden [147, 149].

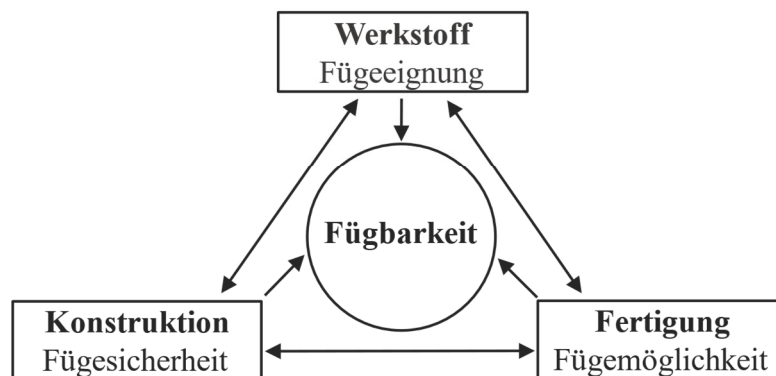
Identifizierte Defizite zur Beurteilung der Fügbarkeit:

- Die Analyse der Ausbildung der kraftrelevanten Eigenschaften steht aus.
- Thermodynamische Vorgänge beim Fügen sind nicht beschrieben.
- Technologische Einflussfaktoren auf die Temperaturentwicklung sind unzureichend erforscht

2.3 Ableitung der offenen Forschungsfragen

Die durchgeführte Fügbarkeitsbetrachtung zum Stand der Technik zeigt, dass allgemeingültige Konstruktions- und Berechnungsvorschriften für Niet-Reibschweiß-Verbindungen fehlen. Zur Erarbeitung dieser sind, die in Abbildung 2-7 dargestellten, Forschungsfragen zu den Teilgebieten der Fügbarkeit zu beantworten.

- Was sind die kraftrelevanten Werkstoffeigenschaften?
- Welche Festigkeitsänderungen können im Werkstoff auftreten?
- Von welchen Einflussfaktoren sind Festigkeitsänderungen abhängig?



- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Wie ist die Kraftwirkung auf die tragenden Flächen in der Fügeverbindung? • Welche kraftrelevanten Eigenschaften haben einen Einfluss auf die zulässige Kraft an den tragenden Flächen? • Durch welche geometrischen Größen kann die Fügeverbindung dimensioniert werden? • Wie kann ein Sicherheitsnachweis bei Quer- und Längskrafteinwirkung erfolgen? | <ul style="list-style-type: none"> • Wie erfolgt die Ausbildung der kraftrelevanten Eigenschaften? • Welche thermodynamischen Vorgänge laufen während des Fügeprozesses ab? • Wie gestaltet sich die Umformung und Temperaturentwicklung während der Fügpunktausbildung? • Welche technologischen Einflussfaktoren gibt es auf die Temperaturentwicklung? |
|--|---|

Abbildung 2-7: Forschungsfragen zur Fügbarkeit

3 Untersuchungsziel und wissenschaftlicher Ansatz

Das Ziel der Arbeit ist die Beantwortung der offenen Forschungsfragen zur Fügbarkeit und die Herleitung allgemeingültiger Konstruktions- und Berechnungsvorschriften. Die in Abbildung 3-1 dargestellten Teilaufgaben werden dazu durch analytische, experimentelle und numerische Untersuchungen gelöst.

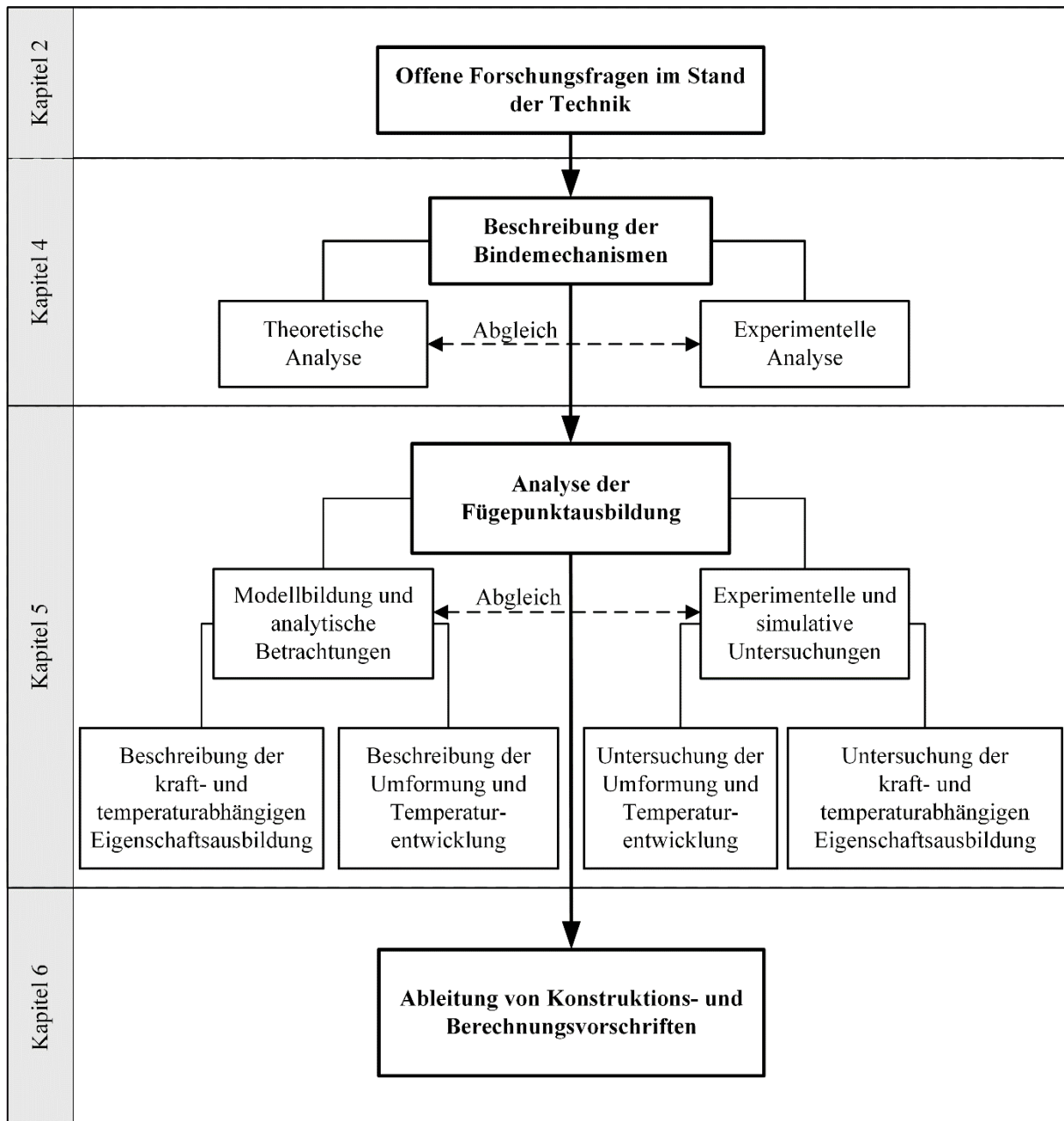


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des Aufbaus der Dissertation

Die Anordnung der Bindemechanismen und deren tragender Flächen wird in Kapitel 4 beschrieben. Die kraftrelevanten Eigenschaften, welche einen Einfluss auf die zulässigen Kräfte an den tragenden Flächen haben, werden daraus abgeleitet. Für die Ableitung wird die innere Kraftwirkung auf die Flächen analysiert. Die Bindemechanismenanordnung und die kraftrelevanten Ei-

enschaften werden anschließend experimentell bestätigt. In Kapitel 5 folgt eine umfangreiche Analyse der Fügepunktausbildung. Die kraft- und temperaturabhängige Ausbildung der kraftrelevanten Eigenschaften wird beschrieben. Grundlage dafür ist die Analyse der Ausbildung der Fügeflächenpaarungen der Bindemechanismen. Die Einflüsse der für die Ausbildung notwendigen Erwärmung und Verformung der Füge­teile auf die kraftrelevanten Eigenschaften werden diskutiert. Die Umformung und die Temperaturentwicklung bei der Fügepunktausbildung werden mit Hilfe eines thermodynamischen Modells beschrieben. Die Ableitung der technologischen Einflussfaktoren, durch welche die Fügepunktausbildung bei der Herstellung aktiv beeinflusst werden kann, erfolgt auf Grundlage des Modells. Es folgen simulative und experimentelle Untersuchungen zur Validierung der theoretischen Betrachtungen. Die Ableitung der Konstruktions- und Berechnungsvorschriften folgt in Kapitel 6 auf Grundlage der vorangegangenen Erkenntnisse. Ein vereinfachtes Berechnungsmodell zum Sicherheitsnachweis bei Einwirkung von Quer- und Längskräften wird erarbeitet. Verallgemeinernde Ableitungen für die Fügbarkeitsbetrachtung werden abschließend durchgeführt.