

Bericht 5139/2006

AiF-Nr. 13.775 N

DVS-Nr. 9.041

Experimentelle und theoretische Ermittlung der Eigenspannungen an ausgewählten Aluminiumschweißverbindungen

Der Bericht darf nur ungekürzt und unter Nennung der Urheberschaft der SLV München, NL der GSI mbH, veröffentlicht werden. Die gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf der vorherigen schriftlichen Genehmigung der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München.

Der Bericht enthält 147 Seiten.

November 2006

SLV München, NL der GSI mbH
Forschungsstelle (1)
LME, TU München
Forschungsstelle (2)
Ifs, TU Braunschweig
Forschungsstelle (3)

13775 N
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.08.2004 bis 31.07.2006
Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum: 01.08.2004 bis 31.07.2006

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema: **Experimentelle und theoretische Ermittlung
der Eigenspannungen an
ausgewählten Aluminiumschweißverbindungen**

Unterschrift des Projektleiters (1)

Unterschrift des Projektleiters (2)

München, 15.11.2006
Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters (3)

Zusammenfassung

Das Verbundprojekt "Experimentelle und theoretische Ermittlung von Eigenspannungen an ausgewählten Aluminiumschweißverbindungen" wurde gemeinsam von der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) München und dem Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig sowie dem Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung der TU München bearbeitet. Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Untersuchung des Einflusses der Bauteilgeometrie und der Schweißbedingungen auf den Schweiß eigenspannungszustand.

Aufgabe der SLV München war es, die Proben für die experimentellen Eigenspannungsuntersuchungen an den beiden anderen Instituten zu schweißen und anhand von gemessenen Thermozyklen FE- Modelle zu kalibrieren, mit denen zuverlässig Schweiß eigenspannungen berechnet werden konnten. Aufbauend auf diesen FE- Modellen wurden Variationsberechnungen zum Einfluss verschiedener Parameter, wie z.B. der Bauteilgeometrie, durchgeführt.

Der Vergleich von Messung und Berechnung zeigt, dass moderne Schweißsimulationssoftware in der Lage ist, qualitative und in der Regel auch quantitative Aussagen nicht nur zum Verzug, sondern auch zum Eigenspannungszustand zu liefern. Besonders die Ergebnisse aus den Untersuchungen am Querträger aus der Automobilindustrie verdeutlichen dies. Wie auch aus den Variationsberechnungen hervorgeht, ist es für die quantitative numerische Ermittlung von Schweiß eigenspannungen zwingend erforderlich, nicht nur exakte Werkstoffkennwerte zur Verfügung zu haben, sondern auch die Wirkungsweise der verwendeten Spanntechnik realitätsnah im Simulationsmodell abzubilden.

Die Simulationsberechnung liefert Eigenspannungswerte für das gesamte Bauteil. Um diese zu verifizieren, stellt die röntgenographische Methode ein sehr geeignetes Verfahren dar, das verlässliche Verläufe an der Bauteiloberfläche liefert, die sehr gut mit berechneten Kurven verglichen werden können. Im Gegensatz dazu bietet das Bohrlochverfahren die Möglichkeit, Verläufe über die Tiefe zu ermitteln.

Eine Klassifizierung der Bauteile aus den untersuchten Aluminiumlegierungen nach ihrem Schweiß eigenspannungszustand erscheint abschließend betrachtet unmöglich. Bei allen untersuchten Varianten ergab sich ein relativ einheitliches Zugeigenspannungsniveau von 100 N/mm² und darüber. Allerdings konnten eindeutige Einflüsse verschiedener Parameter auf den zu erwartenden Eigenspannungszustand ermittelt werden, die dem Praktiker wertvolle Hinweise zur optimalen Umsetzung einer Schweißaufgabe geben.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Ziel und Vorgehensweise	2
3	Stand der Technik/ Theorie	5
3.1	Eigenspannungen.....	5
3.2	Eigenspannungsmessverfahren	9
3.2.1	Bohrlochverfahren	11
3.2.2	Röntgenographische Eigenspannungsbestimmung (REB).....	12
3.3	Finite Element Methode und Schweißsimulation.....	15
4	Experimentelle Randbedingungen.....	18
4.1	Werkstoffe und Werkstoffkennwerte.....	18
4.2	Probenherstellung	18
4.3	Messungen.....	20
4.3.1	Messung der Thermozyklen	20
4.3.2	Eigenspannungsmessung nach der Bohrlochmethode	20
4.3.3	Eigenspannungsmessung nach der röntgenographischen Methode	26
4.4	Schweißsimulation.....	28
5	Ergebnisse	32
5.1	Schweißung der Proben.....	32
5.2	Simulationsergebnisse mit Ansys	33
5.2.1	Modell V1 (Überlappstoss, t = 10mm, l = 500mm).....	34
5.2.2	Modell V2 (T-Stoss, t=10mm, l=500mm)	38
5.2.3	Modell V4 (T-Stoss, t=2mm, l=500mm)	42
5.2.4	Modell V5 (Überlappstoss, t=2mm, l=500mm)	46
5.3	Simulationsergebnisse mit Sysweld und Vergleich mit Messungen	50
5.3.1	Kalibrieren der Wärmequelle	50
5.3.2	Modell V1 (Überlappstoss, t=10mm, l=500mm)	51
5.3.3	Modell V2 (T-Stoss, t=10mm, l=500mm)	56
5.3.4	Modell V3 (Überlappstoss, t=2mm, l=500mm)	60
5.3.5	Modell V4 (T-Stoss, t=2mm, l=500mm)	66
5.3.6	Modell V5 (Überlappstoss, t=2mm, l=500mm)	71
5.3.7	Modell V9 (Überlappstoss, t=2mm, l=166mm)	76
5.3.8	Modell V10-1 (T-Stoss, t=10mm, l=200mm).....	83
5.3.9	Modell V10-2 (T-Stoss, t=10mm, l=200mm).....	87
5.3.10	Modell V11 (Stumpfstoss, t=2mm, l=165mm).....	92
5.3.11	Realbauteil	96
6	Katalogisierung der Eigenspannungen.....	101
7	Diskussion	102
8	Zusammenfassung.....	108
9	Schrifttum	111
10	Tabellenverzeichnis.....	114
11	Abbildungsverzeichnis.....	115
12	Abkürzungen	119
13	Anhang.....	120

1 Einleitung

Im Zuge der Einführung des Eurocodes 9 [01] wird der Einfluss der Schweißeigen-
spannungen auf die Betriebsfestigkeit berücksichtigt. Dazu ist es erforderlich, diesen
Zusammenhang auf Grund fehlender bzw. unvollständiger Kenntnisse näher zu
untersuchen, um so die Norm in der Praxis anwenden und sich evtl. ergebende
konstruktive und wirtschaftliche Vorteile nutzen können.

Mit den laufend erweiterten Einsatzgebieten von Aluminiumwerkstoffen und deren
zunehmend höheren Beanspruchungen muss sich auch der Entwicklungs- und
Kenntnisstand der Füge- und Konstruktionsverfahren für diese Werkstoffgruppe
laufend weiter verbessern. Hierbei spielt insbesondere die Betriebsfestigkeit als oft
maßgebende Größe eine entscheidende Rolle.

Neben dem Abfall der Festigkeitseigenschaften im Bereich um die Schweißnaht
(Wärmeeinflusszone) treten zusätzlich Schweißeigenstressungen auf, deren Einfluss
insbesondere im Hinblick auf die Betriebsfestigkeit signifikant sein kann [02, 03].

Obwohl aus verschiedenen experimentellen Untersuchungen der Einfluss von
Eigenstressungen auf das Ermüdungsverhalten qualitativ relativ zuverlässig
beschrieben werden kann, bestehen immer noch Schwierigkeiten bei der Bewertung
der Eigenstressungen in der Praxis.

Bei Al- Legierungen entstehen aufgrund der lokalen verfahrensspezifischen Wärme-
einbringung schweißbedingte Eigenstressungen, bei denen es sich ausschließlich
um eine Folge der behinderten Schrumpfung beim Abkühlen der hocherhitzten
Bereiche handelt, da keine umwandlungsbedingten Eigenstressanteile auftreten
[05,06,07]. Neben dem Einfluss der Wärmeeinbringung auf den Verzug und den
Eigenstressungszustand bestimmt die Schrumpfungshinderung, die sowohl durch
die verwendete Spanntechnik als auch durch die Geometrie und damit die Steifigkeit
des Bauteils gekennzeichnet sein kann, den Betrag und die Verteilung der Zugeigen-
spannungen. Über pauschale Kenntnisse hinausgehende konkrete Aussagen wie
z.B. über das Zugeigenstressungsniveau in großen und kleinen, starr oder weniger
starr konstruierten Bauteilen unter Berücksichtigung des Einflusses der Schweiß-
bedingungen liegen aber nicht vor.

Nach [01, Abs. 5.3] entsprechen die Ermüdungsfestigkeitswerte in [01, Abs. 5.2]
hohen Zug- Mittelspannungsverhältnissen. Befindet sich die Mittelspannung im
Druckbereich oder im niedrigen Zugbereich, so kann unter bestimmten Bedingungen
die Lebensdauer verlängert werden. Dies wird in [01, Anhang G, Fall 2] geregelt und
kann für den Maximalfall ($R < -1$, Druckbeanspruchung größer als Zugbeanspru-
chung) eine Erhöhung um bis zu 30% des Bezugswertes der Ermüdungsfestigkeit
 $\Delta\sigma_c$ zur Folge haben.

Weiterreichende Erkenntnisse dazu sind nicht nur für den Fahrzeugbau von
Bedeutung, sondern auch im Brücken- und Hochbau, da sich immer mehr eine
architektonisch filigrane, aufgelöste Tragwerksstruktur durchsetzt und eine Berück-
sichtigung der Ermüdungsnachweise immer mehr Einzug in die neue Normung
(Eurocode) hält.

2 Ziel und Vorgehensweise

Ziel dieses Forschungsvorhabens sind eindeutige und verallgemeinerungsfähige Aussagen über den Einfluss der Bauteilgeometrie und anderer Einflussgrößen, wie dem Einspanngrad und der eingesetzten Werkstoffe, auf den schweißbedingten Eigenspannungszustand. Als weiteres Ziel wird angestrebt, für Schweißbauteile aus Al-Legierungen je nach Geometrie und konstruktiven Details eine Klasseneinteilung in Bauteile mit kleinen und mit großen Eigenspannungen vorzunehmen.

Genauere Kenntnisse über Eigenspannungszustände in Schweißbauteilen unterschiedlicher Größe, Steifigkeit und Herstellung sind ein erster wichtiger Schritt zu einer verbesserten Einschätzung, inwieweit eine Abminderung bzw. Erhöhung der Beanspruchbarkeit im Ermüdungsnachweis vorgenommen werden muss bzw. kann.

Um diese Ziele zu erreichen, erfolgte die Bearbeitung dieses Forschungsprojektes entsprechend der folgenden Schritte:

- Schweißung von Proben bei paralleler Messung von Thermozyklen und Schweißparametern, Herstellen von Schweißnahtquerschliffen,
- Erstellung der Finite- Element- (FE-) Modelle und Kalibrieren der zugehörigen Ersatzwärmequellen anhand von Thermozyklen und Schweißnahtquerschliffen,
- Vergleich der berechneten Eigenspannungsverläufe mit den durch das Bohrloch- und das röntgenographische Verfahren gemessenen Werten,
- Untersuchung diverser Einflussparameter auf die Schweiß eigenspannungen in Aluminiumbauteilen in Variationsrechnungen,
- Katalogisierung der Bauteiltypen nach ihrem Eigenspannungsniveau.
- Erfahrungswerte und Empfehlungen zur Eigenspannungsmessung mit unterschiedlichen Methoden und
- zur optimalen Anwendung von FE- Rechenprogrammen zur Eigenspannungsbestimmung sollten gegeben werden.

In Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PBA) wurden folgende Bauteile zur experimentellen und rechnerischen Untersuchung der Eigenspannungen nach dem Schweißen ausgewählt. Es handelt sich dabei um Überlapp-, T- und Stumpfstöße mit unterschiedlichen geometrischen Gegebenheiten (Blechdicke, Länge) und zwei verschiedenen Werkstoffen [Tabelle 1.1].

Bauteil	Typ	Schweißraupen	Länge	Blechdicke	Grundwerkstoff	Zusatzwerkstoff
V1	Überlapp	3	500mm	10mm	AlMgSi1	AlSi5
V2	T	3	500mm	10mm	AlMgSi1	AlSi5
V3	Überlapp	1	500mm	2mm	AlMg4,5Mn	AlSi5
V4	T	1	500mm	2mm	AlMg4,5Mn	AlSi5
V5	Überlapp	1	500mm	2mm	AlMg4,5Mn	AlMg4,5Mn
V9	Überlapp	1	166mm	2mm	AlMg4,5Mn	AlMg4,5Mn
V10-1	T	1	200mm	10mm	AlMgSi1	AlSi5
V10-2	T	3	200mm	10mm	AlMgSi1	AlSi5
V11	Stumpf	1	165mm	2mm	AlMg4,5Mn	AlMg4,5Mn
Realbauteil	Überlapp	1	165mm	2mm	AlMg3Mn	AlSi5

Tabelle 1.1: Übersicht über die Bauteile

Die Bauteile wurden an der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt München (SLV) (V1 bis V10-2) und dem Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig (IfS) (V11) geschweißt und parallel dazu alle zur eindeutigen Kalibrierung der Simulationsmodelle notwendigen Daten, wie die Thermozyklen für mehrere Punkte quer zur Schweißnaht und andere relevante Schweißparameter (Stromstärke, Spannung, Schweißgeschwindigkeit, Umgebungstemperatur) erfasst. Die entsprechenden Daten und Informationen zum Realbauteil stellte die BMW Group zur Verfügung.

Von einigen Bauteilen wurden mehrere Proben geschweißt, um die Streubreite der verschiedenen Messgrößen beurteilen zu können.

Die Eigenspannungen in den Bauteilen wurden mit Hilfe der röntgenographischen Methode am IfS entlang verschiedener Auswertungspfade an der Bauteiloberfläche gemessen, während an der Technischen Universität München, Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung (TUM), Eigenspannungsverläufe über die Bauteildicke an verschiedenen Stellen in unterschiedlichen Abständen vom Schweißnahttrand mit dem Bohrlochverfahren ermittelt wurden.

Parallel dazu konnten an der SLV jeweils FE- Modelle an Hand der folgenden drei Kriterien kalibriert werden:

- Langjährige Erfahrungen der SLV zeigen, dass beim Metall- Inert- Gas- (MIG-) Schweißen von Aluminium je nach den geometrischen Randbedingungen von einem Wirkungsgrad von etwa 70 – 85 % ausgegangen werden muss. Somit soll nur ein bestimmter Anteil der von der Stromquelle abgegebenen Leistung (Spannung x Stromstärke) durch die Goldak- Ersatzwärmequelle an das FE- Netz übergeben werden.
- Um eine hinreichend genaue Übereinstimmung des Temperaturfeldes in Messung und Simulation zu erreichen, müssen die Parameter der Goldak-

Ersatzwärmequelle iterativ so angepasst werden, dass die gemessenen Thermozyklen durch die Berechneten möglichst genau abgebildet werden und

- die Form und Ausdehnung des Schmelzbades in der Simulation der des Schliffbildes hinreichend genau entspricht.

Eine entsprechend kalibrierte Wärmequelle stellt die Abbildung des realen Temperaturfeldes im Simulationsmodell sicher und bildet damit die Grundvoraussetzung für eine zuverlässige numerische Bestimmung von Eigenspannungen und Verzug im mechanischen Teil der FE- Berechnung.

Variantenrechnungen sollen Aussagen zur Sensitivität der Simulationsergebnisse und zum Einfluss einiger Schweißparameter auf Niveau und Verteilung der Eigenspannungen im Bauteil ermöglichen und bei der Beurteilung der Verlässlichkeit und Aussagekraft die erhaltenen Werte helfen. Dazu wurde ausgehend vom an der Realität kalibrierten Modell jeweils nur eine Größe modifiziert, während alle anderen konstant gehalten wurden, um eindeutige und verallgemeinerungsfähige Aussagen zu bekommen. Auf diese Weise wurde untersucht, wie sich

- der Einspanngrad (Steifigkeit der Festhaltungen in verschiedene Richtungen),
- die Bauteilgeometrie (Länge, Breite, Blechdicke),
- die Wärmeeinbringung (Leistung $U \times I$ bei konstanter Geschwindigkeit),
- die Wahl des Werkstoffes (AlMg4,5Mn/AA5083 oder AlMgSi1/AA6005),
- die Schweißfolge und
- die Schweißgeschwindigkeit

auf den Eigenspannungszustand auswirken. Diese Ergebnisse wurden zusammengestellt und bilden den Grundstock für einen Katalog, der es ermöglichen soll, für eine Konstruktion mit zugehörigen Schweißparameter den Eigenspannungszustand abschätzen zu können und damit Aussagen zur Qualität der gewählten Verbindung vornehmen zu können, ohne zusätzliche praktische Versuche und Messungen durchführen zu müssen. Eine solche Klassifizierung ist bei Aluminiumwerkstoffen eher möglich, weil keine umwandlungsbedingten Eigenspannungsanteile wie etwa bei Stählen auftreten.

Vor dem Schweißen mussten die Halbzeuge auf fertigungsbedingte Eigenspannungen untersucht werden, um den Anteil, der auf die Schweißung zurückzuführen ist, eindeutig festlegen zu können.

Um bei den Eigenspannungsmessungen sicherzustellen, dass die wesentlichen schweiß- und geometriebedingten Einflussgrößen richtig erfasst und herausgestellt und Nebeneinflüsse, wie z. B. Randschichteneinflüsse, als solche erkannt werden können, war es wichtig, zwei Verfahren (Bohrloch- und röntgenographisches Verfahren) anzuwenden, die aufgrund ihres unterschiedlichen Messprinzips wichtige Differenzierungen bei der Erfassung der verschiedenen Einflüsse und der zu erwartenden Eigenspannungsverteilungen und ihrer Maxima ermöglichen.

3 Stand der Technik/ Theorie

3.1 Eigenspannungen

Eigenspannungen stellen in Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen innere Belastungen dar, die ohne die Einwirkung äußerer Kräfte und Momente vorhanden sind. Die mit diesen Spannungen verbundenen inneren Kräfte und Momente sind im mechanischen Gleichgewicht. Aufgrund der Vielkristallinität und des überwiegend heterogenen Aufbaus metallischer Werkstoffe ist es zweckmäßig, die folgenden drei Eigenspannungsarten zu unterscheiden [31]:

Eigenspannungen I. Art sind makroskopische Spannungen, die über größere Werkstoffbereiche (mehrere Körner) hinweg nahezu homogen, d.h. konstant in Betrag und Richtung sind.

Eigenspannungen II. Art sind über kleinere Bereiche (ein Korn oder Kornbereiche) homogen. Die ihnen zugeordneten Kräfte und Momente sind über hinreichend viele Körner im Gleichgewicht.

Eigenspannungen III. Art sind schon innerhalb kleinster Werkstoffbereiche (atomare Längen) inhomogen.

Eigenspannungen II. und III. Art werden als Mikroeigenspannungen bezeichnet. Eine mögliche Überlagerung der vorher genannten, idealisierten Eigenspannungsarten ist im Bild 1 dargestellt.

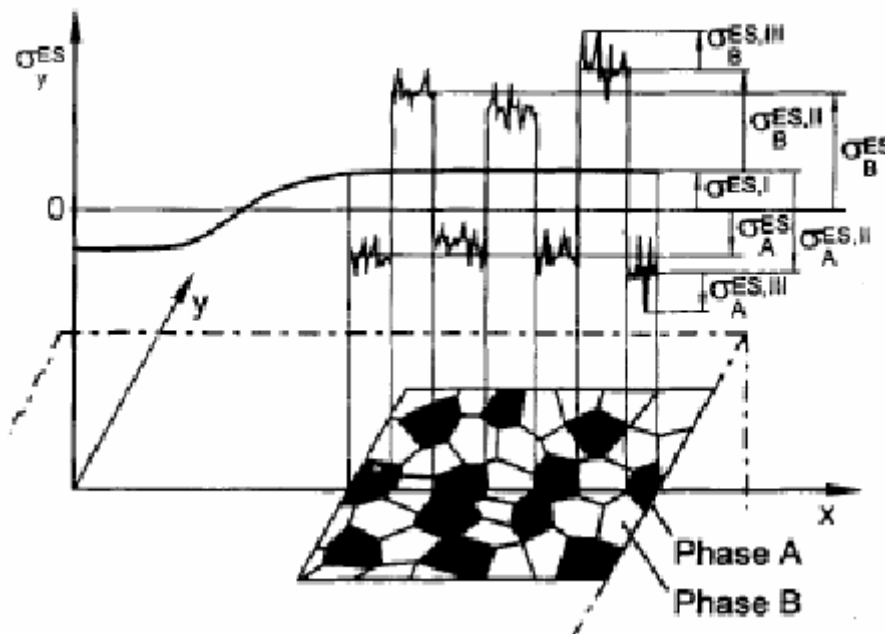


Bild 1.1: Mögliche Überlagerungen von Eigenspannungen I., II. und III. Art in mehreren Körnern [32]

8 Zusammenfassung

Das Verbundprojekt "Experimentelle und theoretische Ermittlung von Eigenspannungen an ausgewählten Aluminiumschweißverbindungen" wurde gemeinsam von der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München und dem Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig sowie dem Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung der TU München bearbeitet. Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Untersuchung des Einflusses der Bauteilgeometrie und der Schweißbedingungen auf den Eigenspannungszustand und das Ableiten allgemeingültiger Aussagen.

Aufgabe der SLV München war es, die Proben für die experimentellen Untersuchungen zu schweißen und parallel dazu alle für die zuverlässige Berechnung von Schweiß eigenspannungen erforderlichen Daten zu erfassen. Zusätzlich wurden zu allen Bauteilen, wie auch zum Realbauteil aus der Automobilindustrie, FE- Modelle erstellt und die Schweiß eigenspannungen numerisch ermittelt. Aufbauend auf diesen Modellen konnten Variationsberechnungen zum Einfluss verschiedener Parameter, wie z.B. der Geometrie oder der Spanntechnik, durchgeführt werden, welche schließlich als die Grundlage für die Ableitung allgemeingültiger Aussagen zum Eigenspannungszustand dienen.

Der Vergleich von Messung und Berechnung zeigt, dass moderne Schweißsimulationssoftware in der Lage ist, qualitative und in der Regel auch quantitative Aussagen nicht nur zum Verzug, sondern auch zum Eigenspannungszustand zu liefern. Auch besonders die Ergebnisse aus den Untersuchungen am Querträger aus der Automobilindustrie verdeutlichen dies. Für die quantitative numerische Ermittlung von Schweiß eigenspannungen ist es zwingend erforderlich, nicht nur exakte Werkstoffkennwerte zur Verfügung zu haben, sondern auch die Wirkungsweise der verwendeten Spanntechnik realitätsnah im Simulationsmodell abzubilden.

An der TU München wurden die experimentellen Eigenspannungsmessungen mittels der Bohrlochmethode und die numerische Berechnung der Schweiß eigenspannungen für einige Bauteile durchgeführt. Zur Genauigkeit und Aussagekraft des Bohrlochverfahrens ist festzuhalten, dass nicht tolerierbare Fehler bei der Bestimmung der Tiefenverteilung der Eigenspannungen durch mehrfachen Nachweis ausgeschlossen werden können [52]. Trotzdem können Messfehler generell nicht gänzlich vermieden werden, sollten aber natürlich so gering wie möglich gehalten werden. Bei dem im Rahmen dieser Arbeit angewandten Verfahren zur Messung von Eigenspannungen sind zahlreiche mögliche Fehlerquellen zu berücksichtigen. Allein an der DMS- Messstelle bestehen vielfältige Risiken für die Fehlerentstehung. Darüber hinaus sind noch Fehlerquellen an den anderen beteiligten Komponenten der Messprozedur oder bei der Bedienung der Geräte möglich.

Um die Genauigkeit und Aussagekraft zukünftiger Untersuchungen ähnlichen Inhalts zu verbessern, können im Gegensatz zu den hier verwendeten mechanischen, modernere Bohrsysteme verwendet werden, die mit Hochgeschwindigkeitsturbinen arbeiten und das sog. „high speed drilling“ erlauben. Mit diesen Geräten sind weniger Fehlereinflüsse und damit präzisere Ergebnisse zu erwarten.

Als weiteres Messverfahren zur Ermittlung der Schweißbeigenspannungen wurde am Institut für Füge- und Schweißtechnik in Braunschweig die Röntgenographie eingesetzt. Dieses sehr zuverlässige Verfahren ermöglicht die Bestimmung von Verläufen entlang von Messpfaden an der Bauteiloberfläche und bietet dadurch die Möglichkeit, ermittelte Werte qualitativ und quantitativ mit berechneten gegenüberzustellen und so das Simulationsmodell zu verifizieren.

Eine Klassifizierung der Bauteile aus den untersuchten Aluminiumlegierungen nach ihrem Schweißbeigenspannungszustand erscheint abschließend betrachtet unmöglich. Bei allen untersuchten Varianten ergab sich ein relativ einheitliches Eigenspannungsniveau von 100 N/mm² und darüber. Allerdings konnten eindeutige Einflüsse verschiedener Parameter auf den zu erwartenden Eigenspannungszustand ermittelt werden, die dem Praktiker wertvolle Hinweise zur optimalen Umsetzung einer Schweißaufgabe gegeben. Beispielsweise zeigen die Untersuchungen zur eingebrachten Wärmemenge ein Potential der neuen so genannten „kalten Verfahren“, wie z.B. CMT oder ColdArc, zur Reduzierung der Zugeigenspannungen auf.

Die Schweißsimulation hat sich in diesem Projekt als leistungsstarkes Hilfsmittel nicht nur zur Bestimmung des Bauteilverzuges sondern auch zu Ermittlung der Eigenspannungszustandes nach dem Schweißen erwiesen. Dadurch besteht die Möglichkeit, an Stellen, an denen eine Messung aus geometrischen Gründen nicht erfolgen kann, wichtige Aussagen zum Eigenspannungszustand zu bekommen. So können Zeit und Kosten für aufwändige praktische Versuchsreihen erheblich reduziert werden. Bauteile bzw. ganze Strukturen lassen sich schon weit vor der Fertigstellung erster Prototypen für die jeweilige Beanspruchung optimieren und so in einem immer stärker umkämpften Weltmarkt Entwicklungskosten und –zeit senken und Arbeitsplätze sichern.

Forschungsbedarf zur weiteren Verbesserung der Schweißsimulation und zu deren Einbindung in die virtuelle Prozesskette zur Produktplanung und –entwicklung besteht vor allem in der Untersuchung des Einflusses vorgelagerter Prozesse (z.B. Umformen) auf den Schweißbeigenspannungszustand und in der Optimierung der Spanntechnik, die ein sehr großes Potential zur Reduzierung von Verzug und Eigenspannungen in sich birgt.

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF-Nr. 13.775 N) gefördert und von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren des DVS unterstützt. Wir bedanken uns für die Förderung dieser Forschungsarbeit. Der Schlussbericht zu dem Forschungsvorhaben ist von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS in Düsseldorf bzw. von der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München, Niederlassung der GSI mbH und den anderen beteiligten Instituten zu beziehen.

Unser Dank für die Unterstützung der Forschungsarbeit richtet sich auch an folgende Firmen: BMW Group (München, Dingolfing), ESI GmbH, Niederlassung München sowie an die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.