

Dieter Eireiner

**Prozessmodelle zur statischen Auslegung  
von Anlagen für das Friction Stir Welding**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 201

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2006

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:  
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über  
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die  
der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von  
Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem  
oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Daten-  
verarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugs-  
weiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2006

ISBN-10 3-8316-0650-1  
ISBN-13 978-3-8316-0650-4

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utz.de](http://www.utz.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Aluminium als Konstruktionswerkstoff.....	1
1.2 Fügen von Aluminiumlegierungen.....	2
1.3 Friction Stir Welding als Fügeverfahren für Aluminiumlegierungen....	5
1.4 Ausgangssituation und Problembeschreibung.....	8
<b>2 Stand von Wissenschaft und Technik .....</b>	<b>11</b>
2.1 Allgemeines .....	11
2.2 Anlagen für das Friction Stir Welding .....	11
2.2.1 Sondermaschinen für die Produktion.....	11
2.2.2 Sondermaschinen für die Forschung.....	21
2.2.3 Robotersysteme .....	23
2.2.4 Fräsmaschinen.....	25
2.2.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	26
2.3 Grundlagen für die Auslegung von FSW-Anlagen .....	27
2.3.1 Messung von Prozessrückwirkungen.....	27
2.3.2 Simulation von Prozessrückwirkungen.....	30
2.3.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	34
<b>3 Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise.....</b>	<b>35</b>

<b>4</b>	<b>Grundlagen der statistischen Versuchsmethodik.....</b>	<b>39</b>
4.1	Allgemeines.....	39
4.1.1	Grundgedanken der statistischen Versuchsmethodik.....	39
4.1.2	Anwendbarkeit der statistischen Versuchsmethodik.....	40
4.1.3	Art und Güte von Beobachtungsdaten.....	41
4.2	Statistische Versuchsplanung.....	42
4.2.1	Präzisierung der Versuchsaufgabe.....	42
4.2.2	Auswertungsmethoden.....	44
4.2.3	Versuchspläne.....	48
4.2.4	Statistische Eigenschaften von Versuchsplänen.....	53
4.3	Statistische Versuchsauswertung.....	55
4.3.1	Definitionen.....	55
4.3.2	Signifikanzanalyse der Modellkoeffizienten.....	56
4.3.3	Konfidenzintervall des Modellwerts.....	58
<b>5</b>	<b>Versuchsplanung.....</b>	<b>61</b>
5.1	Allgemeines zur Versuchsplanung.....	61
5.2	Ursache-Wirkung-Modell für den FSW-Prozess.....	61
5.2.1	Bestimmung der Zielgrößen.....	62
5.2.2	Ermittlung der Einflussgrößen.....	64
5.2.3	Anpassung der Einflussgrößen nach den Vorgaben der statistischen Versuchsplanung.....	65
5.2.4	Identifizierung und Minimierung von Störgrößen.....	69

5.3	Erstellung der Versuchspläne für den FSW-Prozess.....	74
5.3.1	Festlegung eines geeigneten Modellansatzes.....	74
5.3.2	Auswahl und Anpassung des Versuchsplans.....	75
5.3.3	Festlegung der Einstellwerte.....	77
5.4	Zusammenfassung.....	79
<b>6</b>	<b>Versuchsaufbau.....</b>	<b>81</b>
6.1	Allgemeines zum Versuchsaufbau.....	81
6.2	Kraft- und Momentenmesssystem.....	82
6.3	Verformungsmessung der Maschinenstruktur.....	87
6.4	Zusammenfassung.....	91
<b>7</b>	<b>Versuchsdurchführung und -auswertung.....</b>	<b>93</b>
7.1	Allgemeines zur Versuchsdurchführung.....	93
7.2	Regressionsanalyse.....	95
7.3	Einheitsnormierung.....	98
7.4	Signifikanzanalyse der Modellkoeffizienten.....	100
7.5	Konfidenzintervall des Modellwerts.....	105
7.6	Möglichkeiten der Ergebnisdarstellung.....	107
7.7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	111
<b>8</b>	<b>Interpretation der Ergebnisse.....</b>	<b>113</b>
8.1	Allgemeines.....	113
8.2	Untersuchte Werkstoffe und Fertigungszustände.....	113
8.3	Ableitung allgemeingültiger Zusammenhänge.....	115
8.3.1	Interpretation der einheitsnormierten Regressionspolynome.....	115

8.3.2	Prozesskraftkomponente in Schweißrichtung $F_x$ .....	116
8.3.3	Prozesskraftkomponente quer zur Schweißrichtung $F_y$ .....	118
8.3.4	Anpresskraft des Schweißwerkzeugs $F_z$ .....	120
8.3.5	Drehmoment am Schweißwerkzeug $M_s$ .....	123
8.4	Zusammenfassung.....	124
<b>9</b>	<b>Anwendungsbeispiel .....</b>	<b>127</b>
9.1	Allgemeines.....	127
9.2	Grundlagen des Friction Stir Processing.....	127
9.3	Beschreibung des Anwendungsfalls.....	130
9.4	Anlagenauslegung .....	131
9.5	Wirtschaftliche Bewertung.....	135
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>143</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>147</b>
<b>12</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>167</b>
12.1	Verwendete Schweißwerkzeuge .....	167
12.1.1	Einstellungen der Schweißwerkzeuge .....	167
12.1.2	Fertigungszeichnungen der Schweißwerkzeuge.....	168
12.2	Eigenschaften der verwendeten Versuchswerkstoffe.....	170
12.3	Versuchspläne .....	171
12.3.1	Versuchsplan mit normierter Einstellmatrix für die Ermittlung der Kompensations- und Prozessmodelle.....	171
12.3.2	Einstellwerte der Versuchspläne zur Ermittlung der Kompensationsmodelle.....	172

12.3.3	Einstellwerte der Versuchspläne zur Ermittlung der Prozessmodelle .....	173
12.3.4	Einstellwerte der einheitsnormierten Prozessmodelle .....	174
12.4	Messergebnisse .....	175
12.5	Normierte Regressionskoeffizienten und deren Signifikanzgrenzen	179
12.6	Entnormierte Regressionskoeffizienten.....	183
12.7	Einheitsnormierte Regressionskoeffizienten .....	187
12.8	Toleranzen der Modellwerte.....	191
12.9	Messgeräte und Messsysteme.....	193
12.9.1	Verwendete Messgeräte .....	193
12.9.2	Genauigkeit der Kraft- und Momentenmesssysteme .....	193



# 1 Einleitung

## 1.1 Aluminium als Konstruktionswerkstoff

Seit der Entdeckung des Elements Aluminium gegen Ende des neunzehnten Jahrhunderts hat die Verbreitung dieses Werkstoffs enorm zugenommen. Wurden anfänglich weltweit nur wenige Tonnen dieses Metalls verarbeitet, so hat heute allein die Bundesrepublik Deutschland einen Jahresbedarf von ungefähr 240.000 Tonnen Aluminium (KAMMER 2003). Dies entspricht einem Pro-Kopf-Verbrauch von ca. 30 kg. Mittlerweile ist Aluminium nach Stahl das am häufigsten verwendete Metall und hat Einzug in die verschiedensten Anwendungsbereiche gehalten (siehe Abbildung 1-1).

Ein stetig zunehmender Bedarf von Aluminium ist auch künftig zu erwarten. Die Gründe dafür sind die speziellen Eigenschaften dieses Konstruktionswerkstoffs. So hat Aluminium eine vergleichsweise geringe Dichte von  $2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  bei dennoch hohen Festigkeitswerten (DIN EN 485 - Teil 2). Bei vielen Anwendungen ist auch die gute Korrosionsbeständigkeit entscheidend. Diese ist auf eine passivierende Oberflächenschicht zurückzuführen, die sich durch eine Reaktion mit dem Sauerstoff der Luft ausbildet. Eine weitere Werkstoffeigenschaft, die sich bei vielen Anwendungen als vorteilhaft erweist, ist die hohe Wärmeleitfähigkeit.

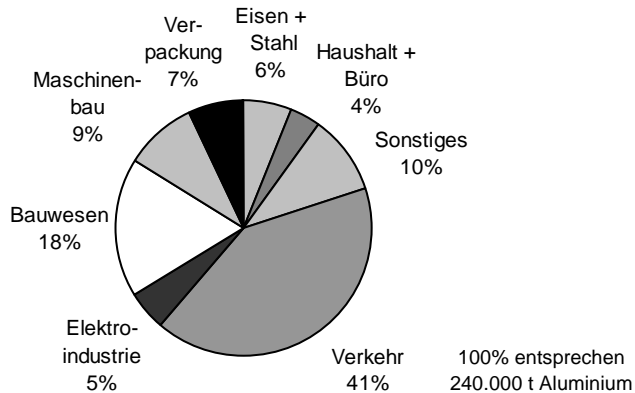


Abbildung 1-1: Aufteilung des Aluminium-Endverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland 2002 nach Branchen laut KAMMER (2003, S. 1)

Neben den beschriebenen physikalischen und technologischen Eigenschaften sind auch die fertigungstechnischen Möglichkeiten und die sich daraus ergebenden wirtschaftlichen Potenziale für die Verwendung ausschlaggebend. Bestimmte Aluminiumlegierungen lassen sich zum Beispiel gut gießen. Mit Hilfe von hochproduktiven Verfahren wie dem Druckguss können kostengünstig komplexe, endabmaßnahe Bauteile hergestellt werden. Auch mit umformenden Fertigungsverfahren lassen sich Aluminiumlegierungen verarbeiten. Durch Walzen, Ziehen und Strangpressen werden Halbzeuge wie Bänder, Bleche, Platten, Stangen, Rohre und Profile gefertigt, die vielfältige Anwendungen finden. Bei der Weiterverarbeitung der Halbzeuge bietet der Werkstoff Aluminium ebenfalls interessante Möglichkeiten. Mit dem High-Speed-Cutting steht auch bei der spannenden Bearbeitung eine wirtschaftliche Fertigungstechnologie zur Verfügung.

### **1.2 Fügen von Aluminiumlegierungen**

Die weite Verbreitung von Aluminiumwerkstoffen wird maßgeblich durch die vielfach sehr guten Eigenschaften bei der fertigungstechnischen Verarbeitung bestimmt. Das Schweißen von Aluminium und seinen Legierungen bildet hier eine Ausnahme. Obwohl ein Großteil der industriell relevanten Aluminiumlegierungen schmelzschweißbar ist, ergeben sich in Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung, des Herstellungsprozesses der Halbzeuge sowie des eingesetzten Schweißverfahrens gewisse Herausforderungen. Dafür gibt es in erster Linie vier Ursachen:

#### **Oxidschicht auf der Bauteiloberfläche**

Durch die hohe Affinität zum Element Sauerstoff bildet sich beim Kontakt von Aluminium mit der Umgebungsluft unmittelbar eine fest anhaftende Oxidschicht an der Bauteiloberfläche aus. Diese ist zwar als Schutz vor korrosivem Angriff erwünscht, bereitet jedoch Schwierigkeiten beim Schweißen. Grund ist der Schmelzpunkt der Oxidschicht, der bei ca. 2.050 °C liegt (BLACH & SENNE 2002). Da Aluminiumlegierungen in einem Temperaturbereich von 490 °C bis 660 °C schmelzen (DATTA 2004), kann die Oxidschicht beim Schmelzschweißen eine Trennschicht im Fügespalt bilden, was eine korrekte Ausbildung der Naht verhindert.

Neben dem hohen Schmelzpunkt stellt vor allem die schlechte elektrische Leitfähigkeit und die ungleichmäßige Dicke der Oxidschicht ein Problem dar. Als Folge ergeben sich beim Schweißen mit elektrischem Lichtbogen starke Leistungs-

schwankungen, was besonders bei Bauteilen mit dünner Wandstärke Schwierigkeiten verursacht. Zur Minimierung des Wärmeeintrags müssen derartige Schweißungen in einem niedrigen Leistungsbereich ausgeführt werden. Die dafür erforderlichen Prozesseinstellungen lassen aber kaum eine stabile Ausbildung des Lichtbogens zu (BUDDE ET AL. 2003). In der Praxis wird die Oxidschicht deshalb vor dem Schweißen entfernt. Dies geschieht z.T. mechanisch durch Schaben, Bürsten, Schleifen oder chemisch durch Beizen.

### **Erhöhte Gaslöslichkeit der Schmelze**

Aluminium besitzt im flüssigen Zustand ein sehr hohes Lösungsvermögen für das Element Wasserstoff. Beim Phasenübergang von flüssig zu fest ändert sich dieses schlagartig von  $7,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$  auf  $3,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  (BUDDE ET AL. 2003). Der dabei aus der Schmelze ausgeschiedene Wasserstoff bildet Gasblasen, die bei hohen Erstarrungsgeschwindigkeiten von der Erstarrungsfront eingeschlossen werden und als Poren in der Fügezone verbleiben. Zur Beurteilung der Schweiß-eignung spielt deshalb besonders bei Gusswerkstücken der Wasserstoffgehalt des Grundwerkstoffs eine Rolle. Besonders beim Druckguss verursacht die schnelle Formfüllung Turbulenzen in der einströmenden Schmelze, was eine intensive Reaktion des flüssigen Aluminiums mit dem im Formhohlraum befindlichen Gasgemisch aus Luft und Trennmitteldampf zur Folge hat. Durch das schnelle Erkalten unter hohem Nachverdichtungsdruck werden die Gase im Werkstoffgefüge zwangsgelöst.

Im Gegensatz zu Gusswerkstücken ist bei Walz- und Strangpresserzeugnissen der Wasserstoffgehalt im Grundwerkstoff unkritisch. Ein Eintrag in die Fügezone erfolgt hier auf andere Weise zum Beispiel über kohlenwasserstoffhaltige Schmierstoff- oder Lackrückstände auf der Bauteiloberfläche.

### **Niederschmelzende Phasen und Bauteilschrumpfung**

Beim Schmelzschweißen von Aluminiumlegierungen kann es zur Rissbildung in der Fügezone kommen. Man unterscheidet hier nach DIN 8524 - TEIL 3 Heiß- und Kaltrisse. Erstere entstehen während des Abkühlens der Schmelze, wobei sich ausgehend von Erstarrungskeimen Körner bilden, die mit abnehmender Temperatur wachsen. Zwischen diesen befindet sich das sog. Korngrenzeneutektikum. Während der Erstarrung wird die Schrumpfung im Idealfall durch das Nachfließen dieser Phase ausgeglichen. Ist sie aufgrund der Legierungszusammensetzung nicht in ausreichender Menge vorhanden, kann es zu Fehlstellen kommen, die beim weiteren Erkalten den Ausgangspunkt von Schweißrissen bil-

den (BUDDE ET AL. 2003). Entscheidend für das Auftreten dieses Phänomens ist die chemische Zusammensetzung der Schmelze und insbesondere die Konzentration der Elemente Magnesium, Silizium und Kupfer. Zur Beseitigung von Heißrissen ist eine gezielte Beeinflussung der Zusammensetzung der Schmelze notwendig, die durch die Verwendung von Schweißzusatzwerkstoffen erreicht werden kann (DIN EN 1011 - TEIL 4).

Die zweite Art der beim Schweißen auftretenden Risse sind die sog. Kaltrisse. Sie entstehen, wenn die Schrumpfung der Fügezone behindert wird. Diesem Prozessfehler kann grundsätzlich auf zwei Arten entgegengewirkt werden. Zum einen ist es möglich die Schrumpfung an sich zu minimieren, indem der Wärmeeintrag durch eine gezielte Auswahl des Schweißverfahrens, der Schweißparameter und der Schweißfolge gering gehalten wird. Zum anderen sollte die Spanntechnik so konstruiert werden, dass die Bauteilschrumpfung nicht behindert wird.

### **Gefügeveränderung aufgrund von Wärmeeintrag**

Zur Festigkeitssteigerung von Aluminiumlegierungen werden vorwiegend zwei Mechanismen eingesetzt. Die Kaltverfestigung wird hauptsächlich bei den Legierungen der Gruppe 5xxx angewandt, während das Ausscheidungshärten bei den Legierungsgruppen 2xxx, 6xxx und 7xxx weit verbreitet ist.

Beim Verschweißen wird das Werkstoffgefüge einem erneuten Temperaturzyklus unterzogen, der bei gehärteten Aluminiumlegierungen einen Festigkeitsabfall zur Folge hat. Bei den kaltverfestigten Legierungen werden durch den Wärmeeintrag im Wesentlichen zwei Mechanismen des Festigkeitsabbaus angeregt, die Erholung und die Rekristallisation. Bei den ausscheidungsgehärteten Legierungen verändern sich aufgrund des Energieeintrags Gefügeausscheidungen in ihrer Art und Größe, was ebenfalls einen Festigkeitsabfall nach sich zieht.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Erreichen einer hohen Nahtgüte eine gezielte Auswahl des Schweißverfahrens sowie eine dem Anwendungsfall entsprechende Anpassung von Prozessführung und Spanntechnik erfordert. Die ständig steigenden Ansprüche an die Verbindungsqualität verlangen vielfach aufwändige Prozessoptimierungen, die hohe Kosten in der Entwicklung und in der Fertigung nach sich ziehen. Deshalb wird nach neuen Verfahren gesucht, mit deren Hilfe die beschriebenen Probleme beim Schweißen von Aluminium umgangen werden können.