

Stefan Mayer

**Werkstoffkundliche Untersuchungen
zur Eignung hochfester Stähle
zum Laserstrahlschweißen**



Herbert Utz Verlag · München

Institut für Materialforschung – Bayreuth

Band 20

Umschlagabbildung: Querschliff von Laserstrahlschweißnaht in 1,8 mm CP1000

Zugl.: Diss., Bayreuth, Univ., 2004

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 photomechani-
schem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in
Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur
auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2005

ISBN 3-8316-0507-6

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	v
Summary	vii
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung	5
3 Stand der Technik	7
3.1 Laser als innovatives Werkzeug zum Schweißen von Stählen	7
3.1.1 Verfahrenstechnische Besonderheiten des Laserstrahlschweißens	7
3.1.2 Industriell eingesetzte Laser	10
3.1.3 Laserstrahlschweißen im Vergleich zu konventionellen Schweißverfahren	14
3.2 Klassifikation von Stählen zum Laserstrahlschweißen	16
3.2.1 Universelle Konstruktionsstähle (Massiv- und Blechwerkstoffe)	18
3.2.2 Stähle für Wärmebehandlung (Massivwerkstoffe)	22
3.2.3 Stähle für Umformung (Blechwerkstoffe)	23
3.3 Festigkeitsrelevante Aspekte des Aufbaus von Laserstrahlschweißnähten	27
3.3.1 Gefügeausbildung	27
3.3.2 Ribbildung	31
3.3.3 Eigenspannungen	32
3.4 Mechanische Eigenschaften von Laserstrahlschweißungen	34
3.4.1 Aufhärtung	34
3.4.2 Festigkeiten unter statischer Belastung	38
3.4.3 Dauerfestigkeit	40
4 Experimentelle Vorgehensweise	43
4.1 Verwendete Laser	43
4.2 Auffinden geeigneter Parameter	44
4.2.1 Fokusslage	44
4.2.2 Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit	46
4.3 Ermittlung der zulässigen Spalt-Toleranzen	51
4.4 Untersuchung des Einflusses der Vorwärmung	53
4.5 Verwendete Werkstoffe	54
4.5.1 Schweißverbindungen von artgleichen Werkstoffen	54
4.5.2 Schweißen von Blechkombinationen	55
4.6 Untersuchung struktureller und mechanischer Eigenschaften	56

5	Ergebnisse und Diskussion	63
5.1	Auswirkung des Laserschweißens auf die Gefüge-ausbildung	63
5.1.1	Schweißverbindungen artgleicher Werkstoffe	63
5.1.2	Blechkombinationen	67
5.2	Mechanische Eigenschaften	70
5.2.1	Aufhärtung	70
5.2.1.1	Schweißverbindungen artgleicher Werkstoffe	70
5.2.1.2	Blechkombinationen	74
5.2.2	Festigkeiten unter statischer Beanspruchung	78
5.2.2.1	Grundwerkstoffe	78
5.2.2.2	Artgleiche Werkstoffpaarungen	79
5.2.2.3	Blechkombinationen	82
5.2.3	Hochtemperaturfestigkeit	87
5.2.4	Dauerfestigkeiten	90
5.2.4.1	Korrelation der Festigkeit unter wechselnder Belastung mit der statischen Festigkeit des Grundwerkstoffes	93
5.2.4.2	Einfluß der Schweißnaht auf die Festigkeiten unter wechselnder Belastung	94
5.2.4.3	Versagen: Ort, Gefüge und Ursachen	94
5.2.4.4	Abbau von Eigenspannungen	96
5.2.4.5	Kerbwirkung der Schweißnahtflanken	98
5.2.4.6	Probenerwärmung	101
5.2.5	Eigenspannungen artfremder Schweißverbindungen	103
5.3	Einflüsse der Vorwärmung	104
5.3.1	Vorwärmung zur Vermeidung der Rißbildung	104
5.3.2	Einfluß auf den Schweißnahtaufbau	107
5.3.2.1	Schweißnahtgeometrie	107
5.3.2.2	Einfluß auf die Gefügeausbildung	108
5.3.3	Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften	110
5.3.3.1	Aufhärtung	110
5.3.3.2	Tieftemperaturzähigkeit	115
6	Literaturverzeichnis	119
7	Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	133
Anhang A: Tabellen und Daten		139
Anhang B: Eigenschaften und Gefüge bei Raumtemperatur laserstrahlgeschweißter Proben		155
Anhang C: Gefüge vorgewärmter Stähle		185

Anhang D: Bilder laserstrahlgeschweißter Blechkombinationen ..	205
Danksagung	215
Curriculum Vitae	216

1 Einleitung

Leichtbau-Werkstoffe

Aufgrund ihrer hohen Festigkeit, guten Formbarkeit und Fügbarkeit werden Stähle seit Anbeginn der motorisierten Verkehrstechnik im Kraftfahrzeugbau, Schienenfahrzeugbau und Schiffbau als Konstruktionswerkstoffe eingesetzt. Während der Treibstoffverbrauch anfangs eine untergeordnete Rolle spielte, setzte die rasche Zunahme des Verkehrsaufkommens ökologische Betrachtungen in Gang. So ist die Reduzierung des Energieverbrauchs ein wesentliches Ziel heutiger und künftiger Entwicklungen der Verkehrstechnik /Flegel 2004/. Neben wirtschaftlichen Aspekten ist dies in zunehmendem Maße auch durch umweltpolitische und energieressourcenschonende Zwänge bestimmt. Dabei versucht man den Treibstoffverbrauch einerseits durch effektivere Nutzung mittels Hochleistungs-Verbrennungsmotoren und andererseits durch gewichtsparende Bauweise bewegter Teile zu reduzieren. Letzteres birgt konstruktives und werkstoffkundliches Entwicklungspotential im Rahmen von Leichtbau-Konstruktionen /Haldenwanger 1997/. Die Vielzahl an öffentlich geförderten Leichtbau-Projekten wie "FORLAS" /Schultz 1997/, "Innovativer Leichtbau" /Tönshoff 2000/, "ULSAB" /Damschen 1998/, /Ratzek 1998/, ULSAS, ULSAC, ULSAB-AVC /ULSAB-AVC 2002/ spiegelt das gesteigerte Interesse an dieser Zielsetzung wieder.

Leichtbau läßt sich realisieren durch die Verwendung von Werkstoffen geringer Dichte oder durch die Reduzierung der Wandstärken unter Einsatz höherfester bzw. höhersteifer Werkstoffe. Je nach Anwendungsfall gilt es zu unterscheiden, ob hohe Steifigkeit oder hohe Festigkeit erforderlich ist /Haldenwanger 1993/.

Als Leichtbauwerkstoff mit geringer Dichte bietet sich z.B. Aluminium ($\rho_{Al} = 2,7 \text{ g/cm}^3$) an. Nachteilig wirkt sich die geringere Festigkeit und der geringere E-Modul von Aluminium im Vergleich zu Stahl aus. Zwar kann die Festigkeit durch die Verwendung von aushärtbaren AlMgSi-Legierungen von ca. 100 N/mm^2 (Reinaluminium) auf ca. 216 N/mm^2 angehoben werden, führt aber bei der Auslegung auf hohe Kraftübertragungsfähigkeit zu entsprechend dicken Bauteilquerschnitten. Darüberhinaus ergeben sich beim Schweißen von AlMgSi-Legierungen Probleme, wie z.B. Heißrißbildung beim Schweißen in Blechrandlage /Hilbinger 2000/, was zur Verbreiterung des Schweißflansches ($> 9 \text{ mm}$) bei Blechkonstruktionen führt.

Effektiver Leichtbau läßt sich auch durch die Anwendung von Stählen mit einer Festigkeit von über ca. 620 N/mm^2 erreichen. Dies ist aus Abb.1 zu ersehen, in der die sog. Reißlänge¹⁾ für Al-Legierungen und Stähle verschiedener Festigkeiten dargestellt sind. Beflügelt vom Druck erster aus Aluminium gefertigter Automobilkarosserien wurde die Entwicklung einer neuen Generation von hochfesten Stahlhalbzeugen mit Zugfestigkeiten bis zu 1000 N/mm^2 bei guten Duktilitätskennwerten vorangetrieben. Aufgrund ihres geringen Kohlenstoffgehaltes sind sie durchwegs gut umformbar und gut schweißbar und stellen somit geeignete Leichtbau-Konstruktionswerkstoffe für die Verkehrstechnik dar.

¹ Die Reißlänge ist die auf die Dichte bezogene Festigkeit. Anschaulich stellt die Reißlänge die Länge dar, bei welcher der Werkstoff unter seinem Eigengewicht durch Reißen versagt, wenn man ihn fortgesetzt aneinanderhängt.

Innovatives Verfahren Laserstrahlschweißen

Verkehrstechnisch eingesetzte Transportmittel bestehen aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten, welche zusammengefügt werden müssen. Dabei hat im Fahrzeug-Schiff- und Waggonbau die Schweißtechnik einen vorrangigen Platz unter den Füge-techniken eingenommen. Die Vielzahl gleichartiger Schweißnähte favorisiert dabei die Verwendung eines automatisierten Schweißverfahrens. So sind im Schiffbau bei Panelenbauweise ca. 700 km (!) Schweißnahtlänge für ein Großpassagierschiff erforderlich /Roland 1995/. Im Kfz-Bau sind pro Fahrzeug zwar nur einige Meter Schweißnahtlänge nötig /Kuka 1996/, dafür liegt der Fertigstellungstakt eines Automobils bei ca. 3 Minuten, so daß sich ein Gesamtbedarf an Schweißnahtlänge von ca. 17 km pro Tag in einem Automobilwerk ergibt.

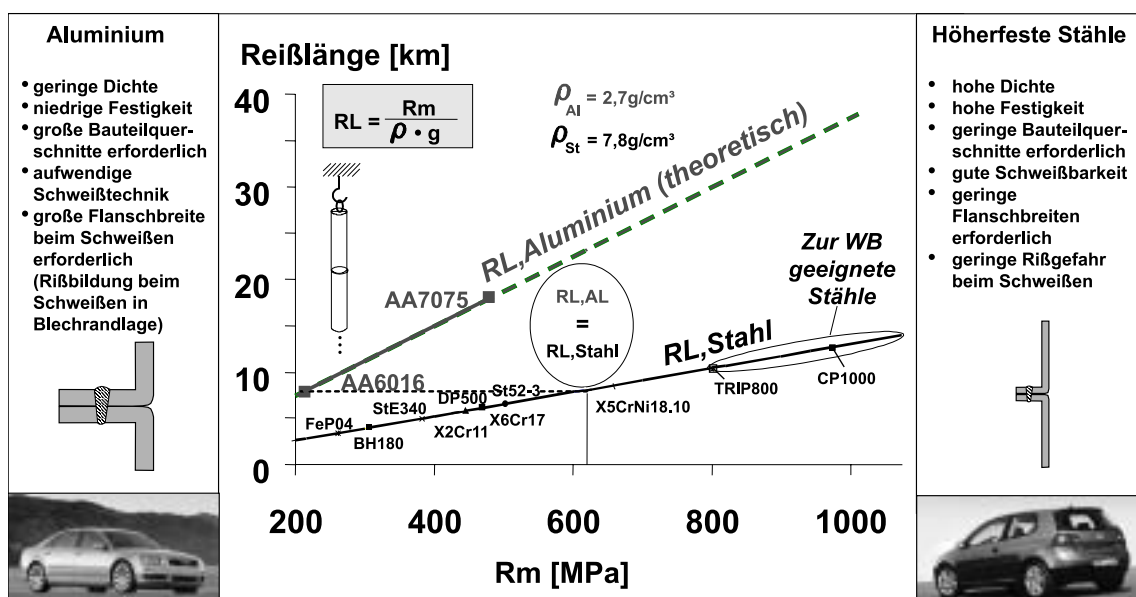


Abb.1 : Betrachtung der Eignung zum Leichtbau anhand des Vergleiches von Reißlängen (RL) verschiedener Al- und Stahl-Werkstoffe in Abhängigkeit ihrer Festigkeiten

Die Forderungen nach möglichst hoher Fertigungsgeschwindigkeit und minimalem Bauteilverzug (keine nachfolgenden Richtvorgänge) führen zur Verwendung des Laserstrahlschweißens. Das Laserstrahlschweißen bietet im Vergleich zu konventionellen Füge-techniken viele Vorteile, wie Präzision, gute Automatisierbarkeit, Reproduktivität und die Möglichkeit über neue Füge-strategien (verkürzte Flanschlängen, tailored blanks oder Patchwork-Techniken) Gewicht einzusparen. Während man früher versuchte, mit möglichst wenig Verbindungstechnik auszukommen, war es im Zuge fortschreitender Automatisierung einfacher, leicht zu fertigende Grundkörper zusammenzufügen und nachfolgend umzuformen. Im Zuge dessen entstanden Sandwich-Konstruktionen /Daurelio 1997/, Innenhochdruckumformen, Tailored Blanks /Prange 1994/, /Miyazaki 2003/ und Patchwork-Techniken /Hillmann 1996/, bei denen maßgeschneidert nur an Stellen hoher Beanspruchung höherfeste Werkstoffe eingesetzt werden, welche mit normalfesten Komponenten an Stellen geringerer Beanspruchung abwechseln. Für diese

neuartigen Fertigungskonzepte stellt das Laserstrahlschweißen die ideale Fügetechnik dar, da dieses Verfahren sehr flexibel hinsichtlich der Automatisierung ist und bestimmte Fügestrategien erst ermöglicht (s. 3.1.1).

Schweißbarkeit und Verhalten der geschweißten Komponenten

Die Schweißbarkeit eines metallischen Werkstoffes ist abhängig von der Schweißbeignung des Werkstoffes, der Schweißmöglichkeit der Fertigung und der Schweißsicherheit der Konstruktion (s. Abb.2) /DIN 8528 1973/.

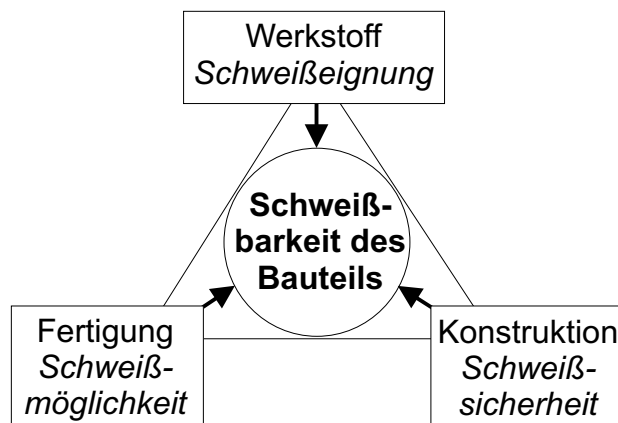


Abb.2: Darstellung der Schweißbarkeit nach /DIN 8528 1973/

Sind diese drei Komponenten gewährleistet, gilt ein Bauteil als zuverlässig schweißbar. Dabei ist es wichtig alle drei Komponenten gleichermaßen zu betrachten. Die Betrachtungsweise dieser drei Komponenten ist interdisziplinär (Werkstoffwissenschaften, Fertigungstechnik und Konstruktionslehre).

Ein entscheidender Gesichtspunkt der Auswahl des geeigneten Konstruktionswerkstoffes ist neben der spezifischen Festigkeit oder Steifigkeit das Verhalten der geschweißten Komponenten. Da Fügestellen gegenüber dem Grundwerkstoff eine Veränderung des Gefügebau aufweisen, hat dies in der Regel auch eine Veränderung des mechanischen Verhaltens zur Folge. Dies betrifft neben den statischen Eigenschaften auch die dynamischen Eigenschaften bzw. Eigenschaften unter rasch wechselnder Belastung (Schwingfestigkeit). So hat die Erarbeitung der mechanischen Eigenschaften geschweißter Aluminiumkonstruktionen zu einem gesteigerten Interesse an der Entwicklung von höchstfesten Stahlblechen (TRIP800, CP1000), sowie alternativen Fügetechniken wie Kleben und Stanznieten bzw. deren Kombinationen geführt /Haldenwanger 1997/, /Ahlers-Hesterm. 2004/.