# 1 Forschungsthema

**„Optimierung von Verzug und Eigenspannungen beim Schweißen dickwandiger Bauteile“**

# 2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Eine effektive Beurteilung der Fertigungsqualität dickwandiger Schweißkonstruktionen ist nur bei Kenntnis der durch den Fügeprozess bedingten Verzüge und Eigenspannungen möglich. Gerade in dickwandigen Bauteilen ist der Spannungszustand hauptsächlich durch zwei Aspekte bedingt. Zum Einen hat die konstruktive Steifigkeit der einzelnen Bauteile sowie der gesamten Baugruppe einen großen Einfluss, zum Anderen sind die Wirkungen zusätzlicher externer Einspannvorrichtungen bei der Fertigung überaus komplex. Hinzu kommen bei Werkstoffen mit Phasenumwandlung, beispielsweise Baustählen, noch die metallurgisch verursachten Spannungszustände. Eine überschlägige Abschätzung des gesamten Verformungs- und Spannungszustandes ist daher auch für Experten in der Regel nicht mehr möglich. Da die Verformungen und Spannungen jedoch maßgeblich die Eigenbeanspruchung der Schweißkonstruktion bestimmen, haben sie einen hohen Einfluss auf die spätere Belastbarkeit im Betrieb. Eine Kenntnis dieser Daten würde wertvolle Informationen zur Qualitätsoptimierung des Endproduktes liefern.

In den bisherigen simulationsgestützten Vorgehensweisen zur Abschätzung des schweißbedingten Verzuges und der Eigenspannungen fanden die aus den Wechselwirkungen zwischen der Schweißverbindung und der Gesamtkonstruktion resultierenden Belastungen während der Fertigung häufig kaum Beachtung. Wenn sie berücksichtigt wurden, dann beschränkten sie sich zumeist auf Einlagen- bzw. einfache Mehrlagenschweißungen mit typischerweise 2 bis 3 Schweißlagen. Gerade für sicherheitsrelevante dickwandige Bauteile aus höherfesten umwandlungsfähigen Stählen, wie sie beispielsweise aus dem Schienenfahrzeugbau bekannt sind, kommen solche Simulationstools deshalb für die Bewertung der thermisch induzierten Spannungen und der daraus resultierenden Verzüge nur sehr eingeschränkt zur Anwendung. Aufgrund der typischen Bauteilgröße und Stückzahl kommen gerade im Dickblechbereich aufwändige Experimente nur selten in Frage. Bauteilschweißversuche mit hoher Probenanalogie sind, speziell bei KMU, in der Regel zu aufwändig und kostenintensiv. Eine systematische Analysemöglichkeit durch numerische Berechnungen ist daher unerlässlich um die stetig steigenden Anforderungen an solche Bauteile auch in Zukunft in vollem Maße erfüllen zu können.

# 3 Forschungsziel, Arbeitsdiagramm und Ergebnisse

## *3.1 Forschungsziel*

Das definierte Forschungsziel ist die Analyse, Vorhersage und Bewertung der schweißbedingten Verzüge und der Gesamteigenbeanspruchung an dickwandigen (>20 mm), in Mehrlagentechnik (>3 Lagen) geschweißten Komponenten. Dazu werden geeignete Berechnungsmodelle generiert, mit denen insbesondere der Einfluss einer äußeren globalen Schrumpfbehinderung (durch mechanische Einspannung ebenso wie durch die Eigensteifigkeit der Konstruktion) auf die entstehenden Verzüge und Eigenspannungen exakt abgebildet werden kann. Ein besonderes Augenmerk wird auf die numerische Abbildung der Phasenumwandlung bei umwandelnden Werkstoffen gelegt, um die komplexen thermometallurgischen Vorgänge realitätsnah abbilden zu können.

Potentiellen Nutzern wird damit eine KMU-taugliche wirtschaftliche Analyse ermöglicht, bei der die in der jeweiligen Fertigungsphase des geschweißten Bauteils vorliegenden Schrumpfbehinderungen aufgrund der Eigensteifigkeit und der äußeren Einspannung Berücksichtigung findet. Dies ist für die gezielte Einstellung eines bevorzugten Eigenspannungszustandes der fertigen Bauteile wichtig, um entsprechende Anforderungen hinsichtlich Eigenspannungen und Verzug kritischer Bauteilbereiche erfüllen zu können. Hierbei liegen höherfeste Feinkornbaustähle aufgrund ihres verbreiteten Einsatzes im Dickblechbereich im Fokus des Interesses.
Das weitere Ziel der Untersuchungen ist die Anwendung der erarbeiteten Ergebnisse zur Optimierung des Verzugs- und Eigenspannungszustandes eines praxisrelevanten Versuchsbauteils mit hoher Probenanalogie. Auf diese Weise wird die prinzipielle Vorgehensweise sowie deren Anwendbarkeit aufgezeigt, um das Potential einer mit kommerziell verfügbaren Methoden möglichen numerisch unterstützen Optimierung schweißbedingter Bauteileigenschaften darzustellen.
Aus den bisher erreichten Zielen, siehe auch Abschnitt 3.2, und der laufenden sowie geplanten Bearbeitung ergeben sich keine Anzeichen für notwendige Änderungen der Zielsetzung. Ebenso haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens gegenüber dem ursprünglichen Antrag nicht geändert. Die bereits abgearbeiteten Arbeitsschritte sowie die laufenden Untersuchungen haben keine Probleme oder Verzögerungen erbracht, darüber hinaus sind bisher keine Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, die einen direkten Einfluss auf das Vorhaben besitzen.

## *3.2 Bisher erzielte Ergebnisse*

Die experimentellen und numerischen Untersuchungen an den Einlagen- und Zwei-Lagenschweißungen sind abgeschlossen worden. Im Zuge der Einlagenschweißungen ist eine Sensitivitätsanalyse der Eigenspannungen und Verzüge auf das ZTU-Verhalten, wie es in ZTU-Schaubildern abgebildet wird, für den Werkstoff S355J2 durchgeführt worden. Dabei untersuchte man zwei experimentell bestimmte (genannt Sysweld, Gleeble) und ein berechnetes ZTU-Schaubild (genannt JMatPro). Die Untersuchungen ergaben, dass experimentelle ZTU-Schaubilder berechneten Schaubildern vorzuziehen sind. Es sind Optimierungsmöglichkeiten von bis zu 70 MPa in Abhängigkeit von den drei untersuchten ZTU-Schaubildern ermittelt worden, dies bezieht sich auf quantitative Unterschiede in Bezug auf die entsprechenden numerisch berechneten Eigenspannungen, Abbildung 1.

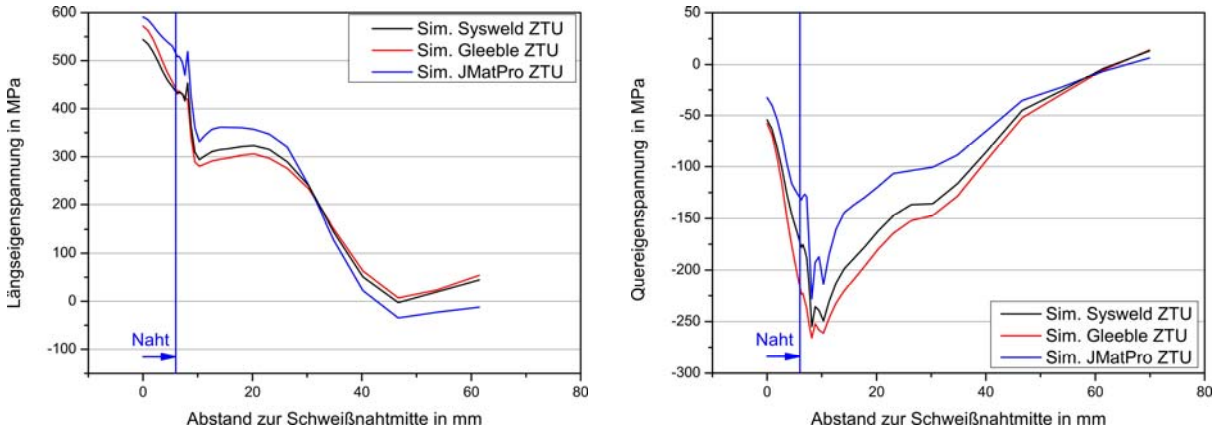


**Abbildung 1: Berechnete Eigenspannungsausbildung quer zur Schweißnaht bei 250 mm (Blechlänge 500 mm) in Abhängigkeit vom betrachteten ZTU-Schaubild, links: Längseigenspannungen, rechts: Quereigenspannungen, MAG-Schweißung, Q = 1 kJ/mm, S355J2**

Weiterhin wurde das ZTU-Schaubild aus der Materialdatenbank der FE-Sysweld anhand des experimentell bestimmten Gefüges modifiziert. Die Modifikation des ZTU-Schaubildes aus der Sysweld-Materialdatenbank ermöglichte in der Wärmeeinflusszone besonders in der Nähe der Schweißnaht geringere Längseigenspannungswerte (bis zu 130 MPa) zu realisieren, so dass eine Annäherung an das Experiment auftrat.

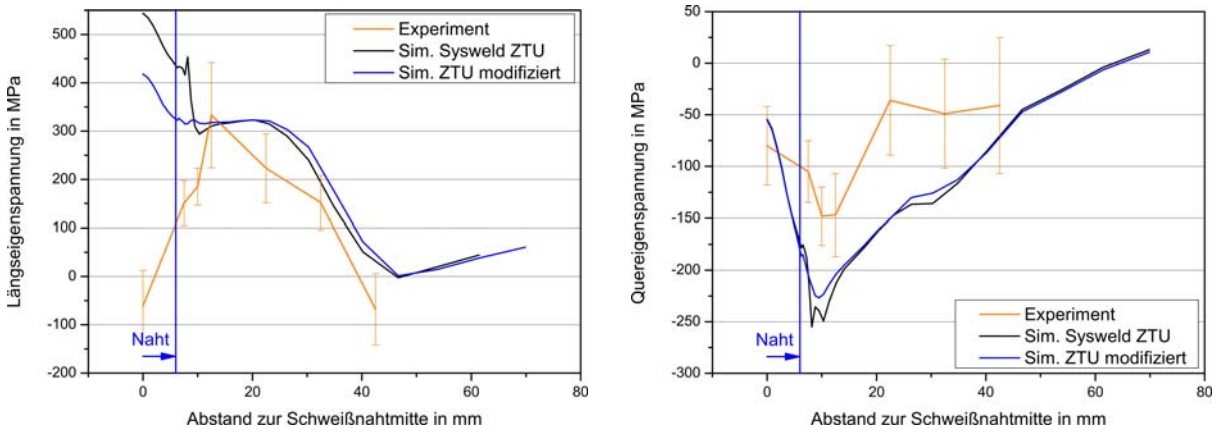


**Abbildung 2: Eigenspannungsausbildung quer zur Schweißnaht bei 250 mm (Blechlänge 500 mm), Betrachtung des modifizierten ZTU-Schaubildes, links: Längseigenspannungen, rechts: Quereigenspannungen, MAG-Schweißung, Q = 1 kJ/mm, S355J2**

In Bezug auf die Quereigenspannungen ist eine Verschiebung des globalen Minimums um ca. +25 MPa zu erkennen, dass ebenfalls als Verbesserung zu bewerten ist.
Die Modifikationen des vorhandenen Sysweld-ZTU-Schaubildes führt zu unwesentlichen Veränderungen bei der Verzugsausbildung, speziell der Durchbiegung, Abbildung 3. Jedoch zeigt der Vergleich der drei gewählten ZTU-Schaubilder (Sysweld, Gleeble, JMatPro) untereinander Abweichungen bis zu 40 %, wobei das ZTU-Schaubild „Gleeble“, welches auf eigenen Untersuchungen an der Versuchscharge basiert, die beste Übereinstimmung mit dem Experiment zeigt. Der große Streubereich der Verzugsmessung ist bei der Auswertung zu beachten, Abbildung 3.

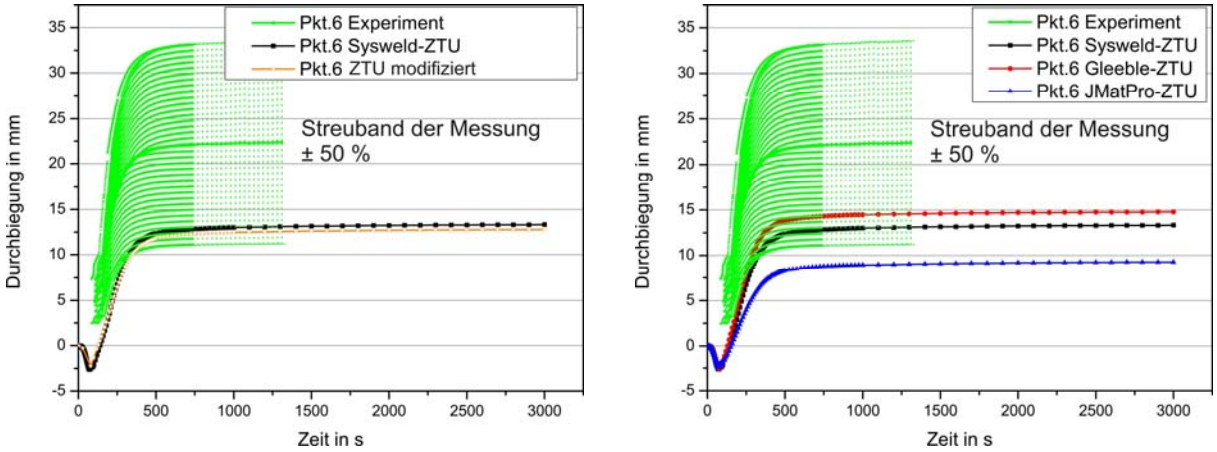


**Abbildung 3: Transiente Ausbildung der Durchbiegung an einem Punkt in Blechmitte (250 mm), Aussenkante, links: Sysweld-ZTU- und modifiziertes ZTU-Schaubild im Vergleich, rechts: Vergleich Sysweld-, Gleeble- und JMatPro-ZTU-Schaubild; MAG-Schweißung, Q = 1 kJ/mm, S355J2**

Die Modifikation des ZTU-Schaubildes der Sysweld-Materialdatenbank für S355J2 wurde auch für die untersuchten 2-Lagen-Schweißungen durchgeführt. Abbildung 4 zeigt die entsprechenden experimentell bestimmten und berechneten Eigenspannungsverläufe der Blechunterseite in Blechmitte vor und nach der Modifikation. Die Optimierung der berechneten Eigenspannungsverläufe gegenüber dem Experiment ist deutlich zu erkennen.

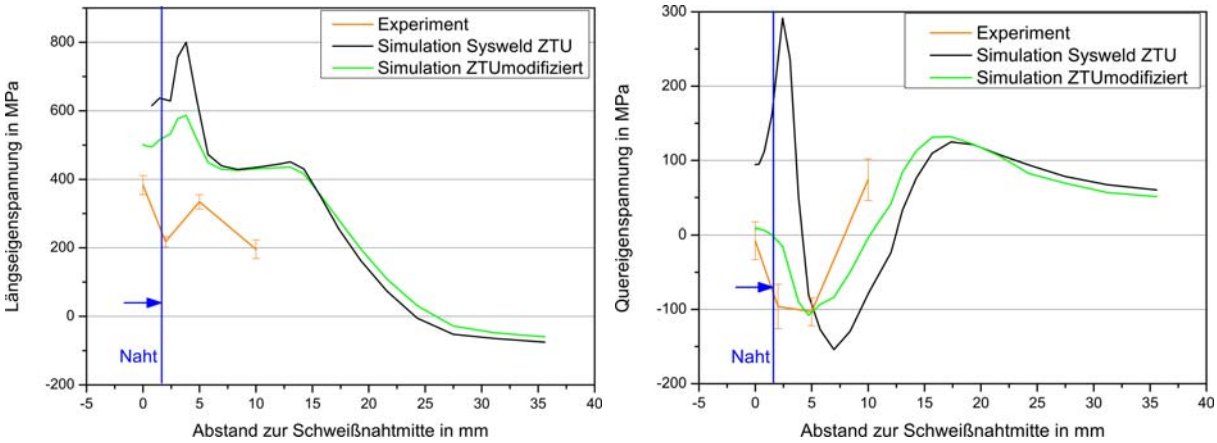


**Abbildung 4: Experimentell bestimmte und berechnete Eigenspannungsausbildung quer zur Naht an der Blechunterseite der 2-Lagenschweißung, links: Längseigenspannungen, rechts: Quereigenspannungen, MAG-Schweißung, Q = 1 kJ/mm, S355J2**

Zusätzlich bietet die Simulationssoftware Sysweld die Möglichkeit die Härte anhand des Modells von Blondeau, welches für unlegierte Stähle anwendbar ist, zu berechnen. Die Eingangsdaten stellen dabei die Abkühlzeit, chemische Zusammensetzung und Gefügezusammensetzung (unterschieden in Anteile von Ferrit, Bainit und Martensit) dar. Abbildung gibt das Ergebnis für die 2-Lagenschweißung im Vergleich zu gemessen Werten und dem Ausgangs-ZTU-Schaubild für die Härte 1 mm oberhalb der Blechunterseite wieder. Weiterhin ist eine Anpassung der Grundwerkstoff-(GW)-härte innerhalb der Möglichkeiten des Modells von Blondeau vorgenommen worden.

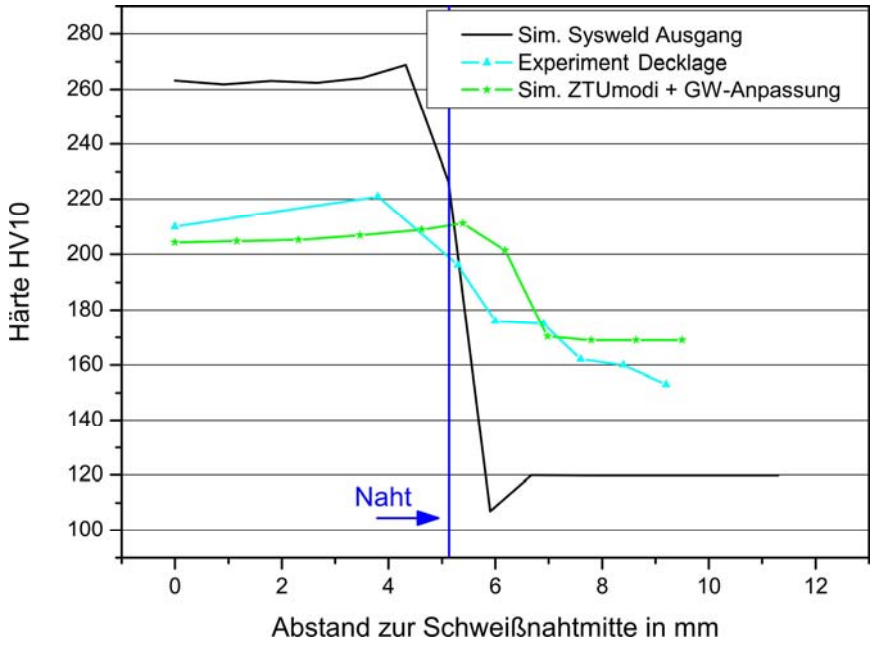


**Abbildung 5: Berechnete und experimentell bestimmte Härteverläufe mit Einfluss der ZTU-Schaubild- und Grundwerkstoff-Modifikation, MAG-Schweißung, Q = 1 kJ/mm, S355J2**

Die nächsten Schritte beinhalten im Wesentlichen die Durchführung von Schweißexperimenten des Demonstratorbauteils in Form eines bauteilähnlichen Prüfstückes unter fester Einspannung und freier Schrumpfung in unserer Einrichtung. Die Untersuchungen unter fester Einspannung gewährleisten dabei eine erhöhte Übertragbarkeit im Zusammenhang mit Reparaturschweißungen und Schweißarbeiten an Großbauteilen, wie Brücken. In diesem Zusammenhang werden die, für die Validierung der numerischen Simulation, notwendigen experimentellen Messungen durchgeführt. Das validierte Temperaturfeld findet anschließend in der Berechnung und späteren Optimierung der Verzüge und Eigenspannungen Anwendung.
Aufgrund von PBA-Beschlüssen ist der Aufbau des Zeitplans geändert worden. Die veränderte Darstellung ist als Anhang beigefügt.
Das, in diesem Zwischenbericht geschilderte, Projekt wird voraussichtlich innerhalb der Laufzeit erfolgreich abgeschlossen werden.

# 4 Durchführende Forschungsstelle

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Fachgruppe V.5 „Sicherheit gefügter Bauteile“
Unter den Eichen 87
12205 Berlin

| | |
|---|---|
| Forschungsstellenleiter: | Prof. Dr. rer.nat. Manfred Hennecke |
| Fachgruppenleiter: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier |
| Projektleiter: | Dr.-Ing. Christopher Schwenk |

| | 2008 | | | | | 2009 | | | | | | | | | | | | 2010 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Arbeitsschritte** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |
| **Einlagenschweißungen** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Überprüfung Werkstoffkennwerte | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Schweißversuche | | X | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Eigenspannungsermittlung | | | | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Vernetzung und Modellgenerierung | | | | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Abgleich Temperaturfelder | | | | | X | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Verzugs-/Spannungsberechnung Einlagenschweißungen | | | | | | | X | X | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sensitivitätsanalyse ZTU-Schaubilder S355J2 | | | | | | | | | X | X | X | X | | | | | | | | | | | | |
| **Zwei-Lagen-Schweißungen** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Überprüfung Werkstoffkennwerte | | | | | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Schweißversuche | | | | | | | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Eigenspannungsermittlung | | | | | | | | X | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| Vernetzung und Modellgenerierung | | | | | | | | X | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| Abgleich Temperaturfelder | | | | | | | | | X | X | X | | | | | | | | | | | | | |
| Verzugs-/Spannungsberechnung Zwei-Lagen-Schweißungen | | | | | | | | | | | X | X | X | X | X | X | | | | | | | | |
| **Demonstrator** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Überprüfung Werkstoffkennwerte | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | X | | | | | | |
| Schweißversuche | | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | X | X | | | | |
| Eigenspannungsermittlung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | | | |
| Vernetzung und Modellgenerierung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | | | |
| Abgleich Temperaturfelder | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | | |
| Verzugs-/Spannungsberechnung Zwei-Lagen-Schweißungen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | |