

# Verzugsberechnung bei mehrstufigen Schweisszusammenbauten

Die Vermeidung von Formabweichungen und Materialveränderungen durch das Schweißen ist eine interessante und herausfordernde Fragestellung, die in der Praxis zu lösen oft zu Schwierigkeiten führt. Mit der Schweissimulation ist es möglich, Schweissverzug, Eigenspannungen und die Gefügeänderungen im Voraus zu berechnen. Der Schweisszusammenbau findet oft unterteilt in mehreren Stufen statt. Bei mehrstufigen Schweisszusammenbauten müssen in der Simulation auch die Verformungen aus vorherigen Untereinbauten berücksichtigt werden. Damit wird die Schweissimulation erweitert zur Fertigungssimulation. Die Software FabWeld wurde von der Dr. Loose GmbH entwickelt, um den mehrstufigen Zusammenbau berechnen zu können. Abb. 1 zeigt den dreistufigen Zusammenbau am Beispiel einer Wanne aus Aluminiumprofilen.

Dr.-Ing. Tobias Loose  
Walzbachtal, Deutschland

Bei geschweißten Konstruktionen treten mehrere Fragestellungen auf, die simulationstechnisch beantwortet werden können. Beim Verzugsmanagement geht es darum, den Schweissverzug so einzustellen, dass die Geometrie der fertigen Konstruktion innerhalb geforderter Toleranzen liegt. Die Simulation erlaubt die Analyse und Auslegung der Fertigung bereits im frühen Stadium der Entwurfsplanung von Bauteilen und Baugruppen. Damit ist es möglich, die Herausforderungen an die Fertigung frühzeitig zu erkennen und notwendige Verbesserungsmaßnahmen rechtzeitig zu planen und umzusetzen.

Ziel ist es, Ressourcen, insbesondere Rohstoffe, Personaleinsatz, Zeit und somit Kosten zu sparen. Dies gelingt durch die Simulation, da die Fertigung ohne Zeitverlust und Einfahr-schleifen fehlerfrei starten kann.

## Validierung Schweissstruktursimulation

Die Schweissstruktursimulation als spezielle Anwendung der Finiten-Element-Methode betrachtet die Auswirkungen aus dem Schweißen am gesamten Bauteil. Einganggröße ist der Wärmeeintrag aus der Schweisswärmequelle. Dieser wird in Form einer sogenannten Ersatzwärmequelle angesetzt. Damit ist jedes Schmelzschweißverfahren abbildbar, unabhängig davon wie die Schmelzwärme erzeugt wird. Im Modell müssen selbstverständlich alle Randbedingungen berücksichtigt werden. Dazu gehört die Spannvorrichtung, Wärmeableitung durch Klemm- oder Kühlbacken und das Heften.

Ergebnisse aus der Schweissstruktursimulation sind die Geometrieänderung durch das Schweißen, der Schweissverzug, die Eigenspannungen und plastischen Dehnungen sowie bei Mitnahme der Gefügeumwandlungsberechnung auch der Gefügestand nach dem Schweißen und die sich damit verändernde Streckgrenze.

Goldak Technologies Inc., Dr. Loose GmbH und TIME – Technologieinstitut für Metall & Engineering haben in einem gemeinsamen Forschungsprojekt die Vorhersagegenauigkeit

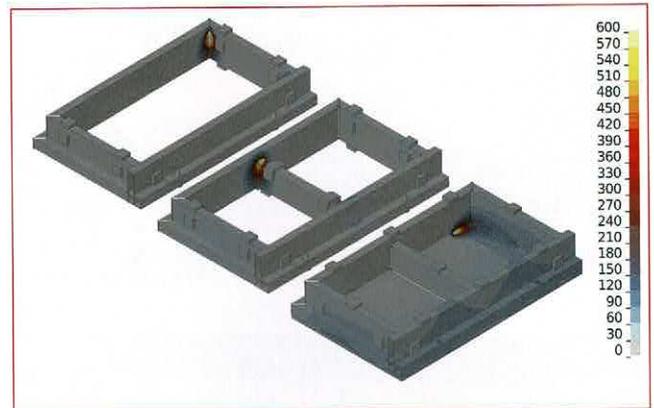


Abb. 1: Schweisszusammenbau einer Wanne in drei Fertigungsschritten



Abb. 2: Validierungsversuch TIME-Platte

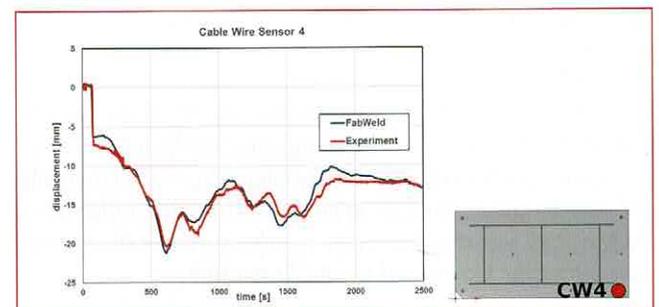


Abb. 3: Validierungsergebnis. Berechnete Verformung vs. gemessene Verformung

der Schweissstruktursimulation aufgezeigt. Dazu wurde eine orthotrope Platte 1200 × 600 mm gewählt, auf die zwei Längssteifen und 3 Quersteifen aufgeschweisst wurden (Abb. 2). Die Steifen werden mit insgesamt 17 Heftnähten fixiert. Die Platte wird statisch bestimmt gelagert und an drei Ecken aufgestützt. Die vierte Ecke bleibt frei. Dies ist die Ecke, an der während des Schweißens der grösste Verzug entsteht. Die der freien Ecke an der Längsseite gegenüberliegende Ecke wird gefast, damit die Ecken der Platte eindeutig zuzuordnen sind. Während die Heftnähte geschweisst werden, wird die Platte an der mittleren Quersteife an jeder Aussenseite mit jeweils einem Stempel unterstützt. Ohne Unterstützung biegt sich die Platte durch Eigengewicht soweit durch, dass ein zu grosser Spalt zwischen Platte und Steife entsteht. Nach dem Heften wird die Unterstützung entfernt. Dies führt zu einem Absenken der Platte an der nicht unterstützten Ecke. In der Simulation wird das Entfernen der Unterstützung realitätsgetreu mit abgebildet.

Anschließend werden zunächst die Längsnähte aussen, ausgeführt als zweilagige Naht mit 3 Schweissraupen, geschweisst. Alle weiteren 17 Nähte werden als einlagige Kehlnähte ausgeführt. Während des Schweissens werden an fünf Stellen die Bewegungen normal zur Platte mit Seilzugaufnehmern gemessen. An den gleichen Stellen wird der Vertikalverzug aus der Simulation ausgewertet. Abb. 3 zeigt exemplarisch das Ergebnis des Validierungsversuches am Wegaufnehmer 4. Im Graph ist jeweils die mit Seilzugaufnehmer (Cable Wire) gemessenen Vertikalverformungen den berechneten Vertikalverformungen gegenübergestellt. Auf dem Diagramm ist erkennbar, dass der Verformungssprung, der durch das Entnehmen der Mittelaufleger nach dem Heften entsteht, durch die Simulation zutreffend abgebildet wird. Auch wird der Vertikalverzug während des gesamten Schweissvorganges zutreffend berechnet. Damit wird belegt, dass die angewendete Berechnungsmethode der Schweissstruktursimulation in der Lage ist das Verformungsverhalten während des gesamten Schweissprozesses genau nachzubilden. Diese Erkenntnis ist neu, da bislang nur Endergebnisse, also der Zustand nach Schweissen und Abkühlen, zur Validierung verwendet wurden. Um die Schweissstruktursimulation zur Analyse des Schweissens vollumfänglich einsetzen zu können müssen auch die Simulationsergebnisse während des gesamten Prozesses zutreffend sein. Beispielsweise kommt dies zum Tragen, wenn die Spaltbildungen während des Schweissens untersucht werden soll um das Spann- oder Heftkonzept zu überprüfen.

### Simulation des Schweisszusammenbaus

Um bei der Simulation des Schweisszusammenbaus genaue Ergebnisse zu bekommen, muss der Einspannvorgang mit den daraus entstehenden Verzügen korrekt abgebildet werden. Weichen Einzelbauteile oder Unterzusammenbauten bereits von der Sollgeometrie ab, so entsteht beim Einspannen in die Spannvorrichtung ein Einspannverzug. Das Schweissen erzeugt den Wärmeverzug. Beim Ausspannen werden die Spannkraften freigesetzt kommt es zum Ausspannverzug der eine Rückfederung darstellt. Alle Verzugskomponenten zusammen ergeben den Verzug. Der Einspannvorgang muss realitätsgetreu in der Simulation abgebildet werden um exakte Berechnungsergebnisse zu erzielen.

Die Simulation des Zusammenbaus bedingt eine mehrstufige Simulation. Dabei werden in der Simulation wie auch in der Realität von Fertigungsstation zu Fertigungsstation Bauteile oder Unterbaugruppen ergänzt, gespannt und verschweisst. In Abb. 4 und Abb. 5 ist ein Batterieträger in der 2. Fertigungsstufe dargestellt, bei dem die Unterzusammenbauten Querträger und Bodenplatte hinzugefügt werden. Beide Bilder zeigen den Längsverzug in X-Richtung. Abb. 4 stellt die Situation vor dem Einlegen und Einspannen der Querträger dar. Die Bodenplatte weist Verformungen in X-Richtung auf. Beim Festspannen werden die Querträger auf die Bodenplatte gedrückt und aufgrund der Imperfektion der Bodenplatte dabei verformt. Beim Verschweissen wird diese Verformungskomponente eingefroren (Abb. 5).

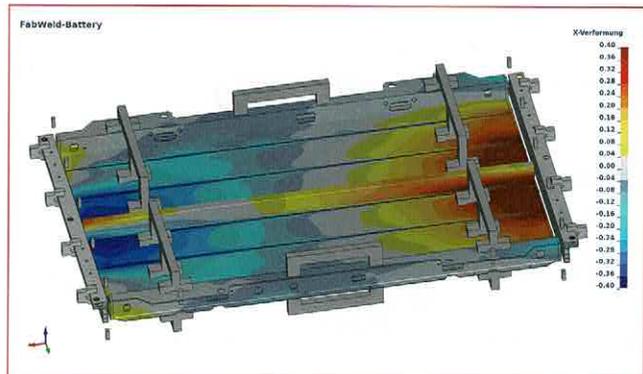


Abb. 4: Längsverzug Batterieträger vor dem Einspannen der Querträger

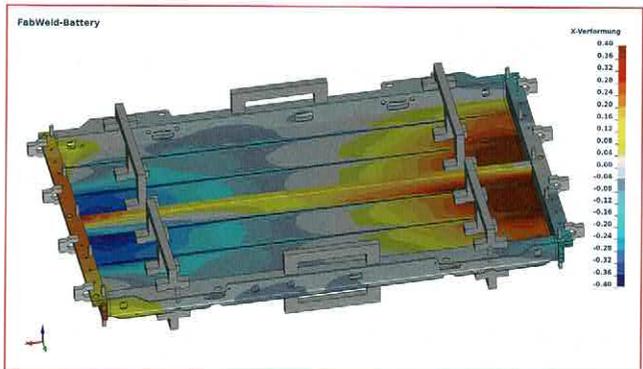


Abb. 5: Längsverzug Batterieträger nach dem Einspannen der Querträger

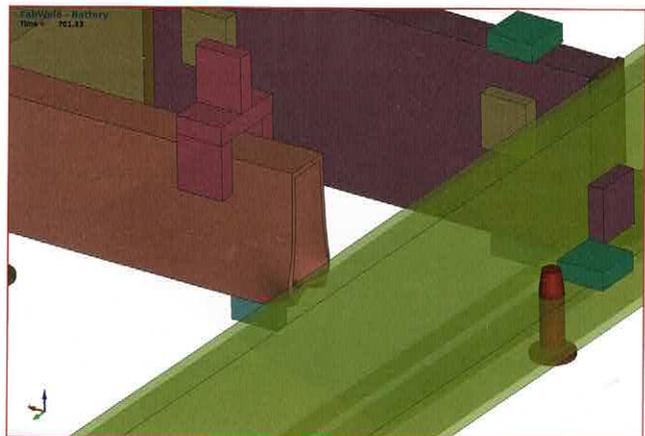


Abb. 6: Passungskonflikt beim Einlegen eines Querträgers.

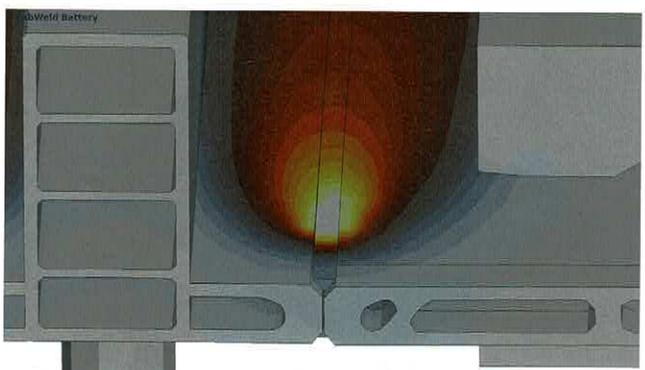


Abb. 7: Spaltbildung beim Verschweissen des Zusammenbaus

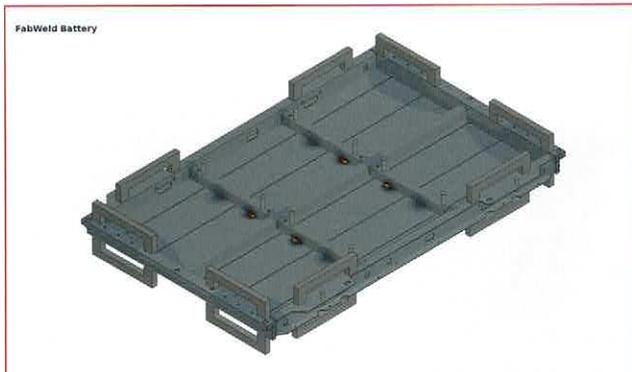


Abb. 8: Batterieträger, Schweißen der dritten und letzten Station

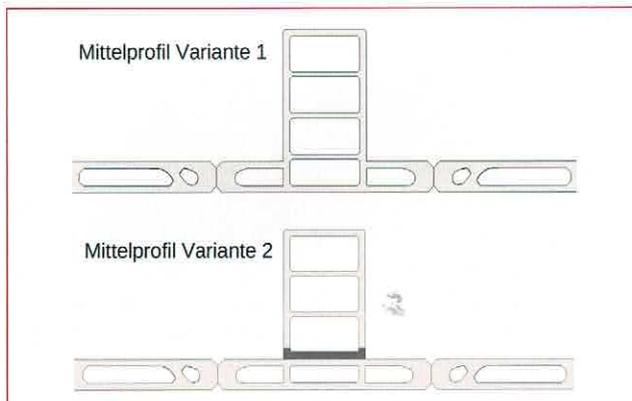


Abb. 9: Ausführungen des Mittelprofils. Variante 1 als ein und Variante 2 als geteiltes Profil

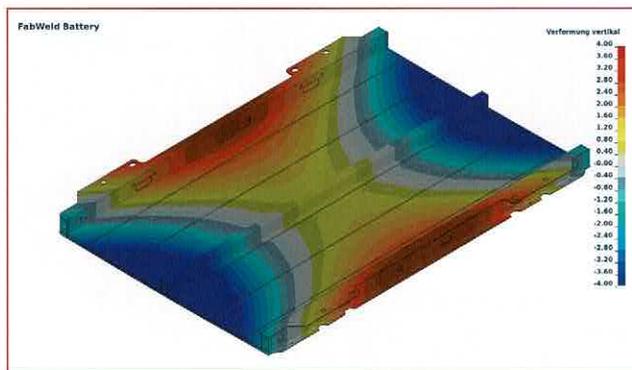


Abb. 10: Vertikalverzug Variante 1 nach Station 1

Aus der Zusammenbausimulation lassen sich kritische Stellen analysieren. Durch die Berechnung der Schweißverzüge kann im Vorfeld ermittelt werden, ob das Einlegen weiterer Komponenten möglich ist, oder ob es zu Passungskonflikten kommt. Abb. 6 zeigt einen solchen Passungskonflikt. Der Querträger hat die Länge der CAD-Soll-Geometrie. Die Seitenprofile haben sich durch die Verschweißung des Rahmens aus vorheriger Fertigungsstufe soweit nach innen verzogen, dass ein Einlegen des Querträgers nicht möglich ist. Hier ergibt die Simulation bereits im Vorfeld, dass Massnahmen getroffen werden müssen um ein störungsfreies Einlegen zu ermöglichen.

Mit der Zusammenbausimulation kann analysiert werden, ob während der Fertigung kritische Spalte entstehen. Beim Verschweißen der Bodenprofile des Batterieträgerbeispiels entsteht gegen Ende ein Spalt zwischen dem Mittelprofil und dem daran angrenzenden Profil. Der Spalt bildet sich sowohl in vertikaler als auch in lateraler Richtung aus (Abb. 7). Der vertikale Spalt kann durch Optimierung der Spannerposition deutlich verringert werden.

Da verzugsfreies Schweißen bei vielen Schweißaufgaben nicht möglich ist, muss durch geeignete Massnahmen erzielt werden, dass nach dem Schweißen die Geometrie den geforderten Toleranzen entspricht. Geeignete Massnahmen sind neben der Auslegung der Spannvorrichtung oder des Heftkonzeptes Kompensationsmassnahmen:

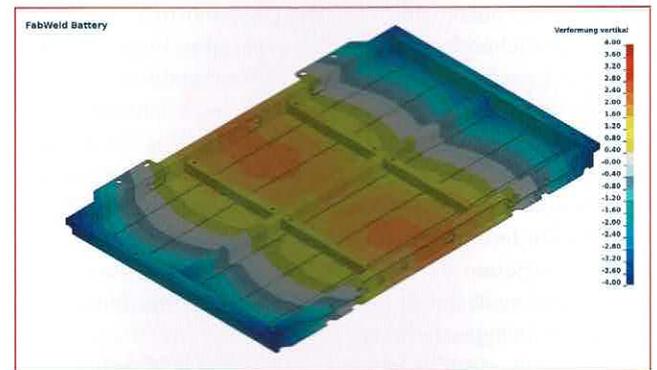


Abb. 12: Variante 1, finaler Vertikalverzug

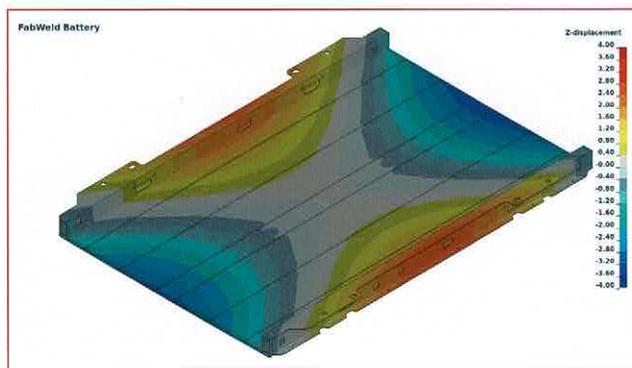


Abb. 11: Vertikalverzug Variante 2 nach Station 1

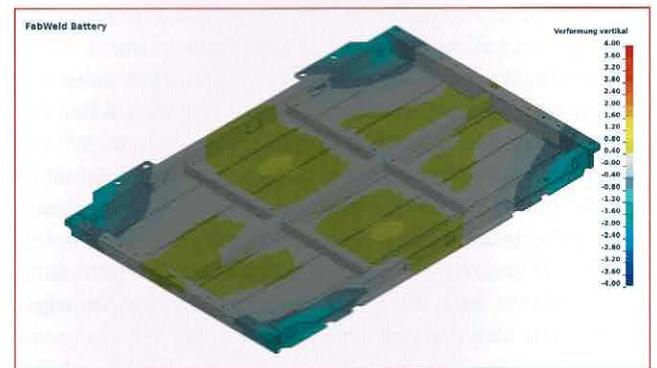


Abb. 13: Optimierung Variante 2, finaler Vertikalverzug

- Zugabe zum Schweisschumpf
- Winkelzugabe
- Vorovalieren von Kreisquerschnitten
- Vorprägen des inversen Schweissverzuges
- Geometrieanpassung am Bauteil, die dem Schweissverzug entgegenwirkt
- Steifigkeitsveränderung am Einzelbauteil die dem Schweissverzug entgegenwirkt

Genauso, wie der Verzug beim Schweisszusammenbau im Vorfeld berechnet werden kann, können auch die Kompensationsmassnahmen in diese Berechnung eingepflegt werden. Damit ist es möglich die Kompensationsmassnahmen numerisch abzusichern. Dies ist dann der Fall, wenn der berechnete Schweissverzug unter Berücksichtigung der Kompensationsmassnahme innerhalb der zulässigen Formabweichungstoleranz liegt.

#### **Simulationsgestützte Verzugoptimierung am Beispiel eines Batterieträgers**

Ein Batterieträger für die Elektromobilität wird aus Aluminiumstrangpressprofilen gefertigt. Zum Einsatz kommt ein MSG-Kaltdrahtverfahren. Der Zusammenbau erfolgt an drei Stationen mit einer Unterstation:

##### **Station 1:**

Zusammenbau der Bodenplatte

##### **Unterstation 1.1:**

Untersammenbau Buchsen an äussere Querträger

##### **Station 2:**

Zusammenbau Bodenplatte mit äusseren Querträgern

##### **Station 3:**

Einbau der inneren Querträger

Für diesen Batterieträger wird der Verzug, der während des Schweisszusammenbaus entsteht berechnet. Wie oben beschrieben, werden bei dieser Simulation die Verformungen aus der vorangegangenen Schweissstation berücksichtigt. In Abb. 8 ist der Batterieträger während des Schweissens in Station 3 dargestellt.

Für das Mittelprofil gibt es die in Abb. 9 dargestellten Konstruktionsvarianten. Variante 1 stellt die ursprüngliche Konstruktion dar. Das Mittelprofil ist mit dem Bodenprofil als ein Strangpressprofil ausgeführt. Dieses Profil wird in Station 1 mit den anderen Profilen zur Bodenplatte verschweisst. Variante 2 stellt die optimierte Konstruktion dar. Das Profil ist geteilt in Bodenprofil und Längsträgerprofil. Das Bodenprofil wird in Station 1 eingebaut während das Längsträgerprofil erst in der dritten und letzten Station ergänzt wird.

Aus der mehrstufigen Zusammenbausimulation kann zunächst die Station ermittelt werden, in der der grösste Verzug entsteht. In unserem Beispiel ist dies die Station 1 mit dem Verschweissen der Bodenprofile. Abb. 10 zeigt von Variante 1 den Vertikalverzug nach Ausspannen und Zwischenabkühlen kurz vor Einspannen in die Station 2. Die Station, an der der grösste Verzug auftritt ist auch die Station, an der die Kompensationsmassnahmen am wirkungsvollsten sind. Die Verzugsentstehung mit der Verwerfung der Platte erklärt sich durch die Ausmitte zwischen der Schwerlinie des Mittelprofils und den Längsschweissnähten. Die Verbesserung von Variante 2 beruht darauf, dass nun die Längsschweissnähte symmetrisch zur Schwerachse angeordnet sind. In Abb. 11 ist der Vertikalverzug von Variante 2 nach Station 1 dargestellt. Eine deutliche Verzugsminimierung ist erkennbar. Die Verbesserung in Station 1 wirkt sich unmittelbar auf den Gesamtverzug aus. In Abb. 12 ist der Vertikalverzug nach vollständigem Abkühlen für die Variante 1 mit ungeteiltem Mittelprofil und in Abb. 13 für die Variante 2 mit geteiltem Mittelprofil dargestellt.

Aus diesem Beispiel wird deutlich, wie gewinnbringend die Zusammenbausimulation in der Entwurfsphase eingesetzt werden kann. Wenn in dieser frühen Phase bereits der Schweissverzug präzise ermittelt wird, ist es möglich mit Geometrieänderungen, die keinen grossen Aufwand fordern, effizient den Schweissverzug zu minimieren. ■

**Dr.-Ing. Tobias Loose,**  
**Dr. Loose GmbH, Walzbachtal, Deutschland**  
[loose@dr-loose-gmbh.de](mailto:loose@dr-loose-gmbh.de) | [www.dr-loose-gmbh.de](http://www.dr-loose-gmbh.de)  
[www.fabweld.de](http://www.fabweld.de)