

Mit Schweissimulation zu sicheren Produkten und effizienten Fertigungsprozessen

Mit welcher Reihenfolge soll ich schweissen um einen möglichst geringeren Bauteilverzug zu erzielen? Welche Parameter wähle ich für meinen Schweissprozess um das optimale Gefüge zu erreichen? Wie gross sind die Eigenspannungen nach dem Schweissen und wie hoch ist die Lebensdauererwartung meiner Schweissnähte im Betrieb? Diese und viele anderen Fragen stellen sich täglich viele Schweisser und Entwicklungsingenieure. Nach wie vor ist dabei die praktische Erfahrung unverzichtbar und bildet die wichtigste Grundlage bei der Entscheidungsfindung. Dennoch ist Erfahrung alleine in vielen Fällen, etwa bei komplexen Geometrien oder neuen Werkstoffen, nicht mehr ausreichend. Eine Alternative zu dem oft teuren «trial and error» bietet eine numerische Abbildung eines Schweissprozesses. Zudem ermöglicht sie Einblicke in bei einem Versuch komplett verborgene Stellen und sorgt damit für mehr Verständnis im Prozess und bei den Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Prozessparametern.

*Dr.-Ing. Andriy Krasovskyy, DYNAmore Swiss GmbH
Technoparkstrasse 1, CH-8005 Zürich*

Mit modernsten Simulationsverfahren bietet das Finite Element (FE) Programm LS-DYNA seit Jahrzehnten eine weltweit von vielen Ingenieuren geschätzte Beihilfe bei der Auslegung von Bauteilen und Optimierung von Fertigungsprozessen. Die aus Kalifornien stammende Software, die ursprünglich für die Simulation von hoch nichtlinearen dynamischen Prozessen entwickelt wurde, hat schnell ihren Platz in der Industrie und der angewandten Forschung gefunden und gehört heutzutage insbesondere in den Bereichen Crash und Metallumformen zu den Marktführern. Die Firma DYNAmore, welche das Programm in der Schweiz vertreibt und auch mitentwickelt, bietet ihren Kunden nun auch umfangreiche Möglichkeiten zur einer Simulation von Schweissprozessen.

Die gesamte multidisziplinäre Komplexität eines typischen Schweissprozesses, wo auch Elektromagnetismus, Plasma-physik, Fluidmechanik, Wellen- und Elektronenoptik eine Rolle spielen [1], wird in einer solchen FE-Simulation auf eine thermo-mechanische Problemstellung mit Hilfe einer Ersatzwärmequelle vereinfacht (Abb. 1). Das reduziert den rechnerischen Aufwand erheblich und ermöglicht dem Benutzer direkt mit den messbaren Daten aus dem Schweissprozess, wie etwa der elektrischen Stromstärke und Spannung, zu arbeiten. Einen grossen Einfluss auf das Endergebnis hat dabei die Werkstoffbeschreibung – sowohl thermophysikalische als auch mechanische Materialeigenschaften hängen sehr stark von der Temperatur ab und beeinflussen sich gegenseitig. Spezielle Materialmodelle in LS-DYNA ermöglichen es, das mechanische Verhalten mit Berücksichtigung komplexer Vorgänge wie die Umwandlungskinetik und Transformationsplastizität, realitätsnah zu beschreiben. Die Beschaffung der Daten für die Ermittlung der Modellparameter bleibt allerdings oft ein Hindernis, da eine experimentelle Ermittlung von thermomechanischen Materialeigenschaften schnell die Kosten von mehreren zehntausend Franken verursachen

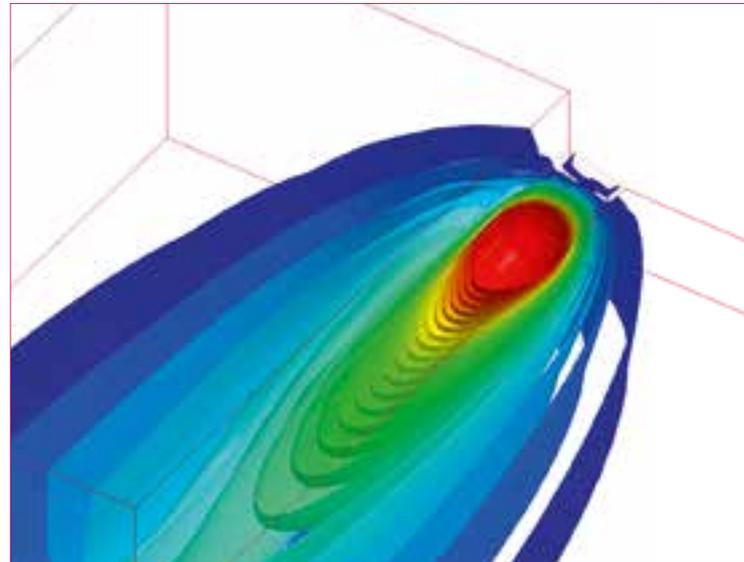


Abb. 1: Typischer Temperaturverlauf bei einer Schweissimulation mit Ersatzwärmequelle.

kann. Eine deutlich günstigere Alternative bieten Programme, welche mit physikalischen Ansätzen die thermomechanische Eigenschaften vorhersagen können – als Input benötigen sie lediglich eine chemische Zusammensetzung der untersuchten Legierung.

All das ermöglicht einen nutzbringenden Einsatz der Schweissimulation in der Industrie bereits heute. Dank einem sehr robusten impliziten Solver, ist die Schweissimulation in LS-DYNA, zumindest aus numerischer Sicht, leicht gemacht. Fragestellungen, die sich experimentell nur mit hohem Aufwand durchführen lassen, können nun deutlich effizienter beantwortet werden. Je nach Problem können auch unterschiedliche Detaillierungsgrade verwendet werden. Dort wo es mehr um eine Vorhersage der lokalen Grössen wie etwa Eigenspannungen und Mikrostruktur geht, kann eine Simulation mit feinem Volumennetz und komplexeren Werkstoffbeschreibung eingesetzt werden. Geht es um einen Schweissverzug einer Baugruppe mit mehreren Schweissnähten, können auch rechengünstige Schalenelemente mit spezieller Formulierung, welche die starken thermischen Gradienten über die Blechdicke berücksichtigen, zum Einsatz kommen. Derzeit arbeitet DYNAmore zusammen mit der Brandenburgischen Technischen Universität an einem noch schnelleren analytisch-numerischen Hybridsimulationsverfahren, welches für die Vorhersage und Optimierung des Schweissverzuges bei sehr grossen Bauteilen, wie etwa im Schiffsbau zum Einsatz kommt.

Folgend sind zwei Anwendungsgebiete aus der Industrie dargestellt, wo die Schweissimulation als Entwicklungswerkzeug sehr wertvolle Erkenntnisse gebracht hat.

Lebensdauervorhersage

Es ist bekannt, dass die Schweissverbindungen generell eine strukturelle Schwachstelle darstellen. Neben der rein geometrischen Schwächung, wobei die Schweissnahtkerben

als starke Spannungskonzentratoren wirken, unterliegt das Material an der Schweißnaht zusätzlich starken mikrostrukturellen Transformationen und Veränderungen seiner mechanischen Eigenschaften. Durch die Gefügemwandlung, starke Volumenänderung und Transformationsplastizität entstehen dort auch hohe Eigenspannungen. Alle diese Faktoren haben einen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer einer Schweißverbindung und können mit Hilfe der Simulation vorhergesagt werden. Damit kann die klassische und in der Regel sehr konservative Vorgehensweise den Festigkeitsnachweis mit Hilfe der Richtlinien [2] und Empfehlungen [3] zu machen, durch eine genauere ergänzt bzw. ersetzt werden. Dies kann beispielsweise im Leichtbau zu deutlichen Materialersparnissen führen und bei der Betrachtung von speziellen Schweißnahtgeometrien oder Materialien die fehlende Information liefern.

Am Beispiel einer, gemeinsam mit der Firma Winterthur Gas & Diesel Ltd., durchgeführten Untersuchung für eine fünf-flügelige einseitige V-Naht, wird hier exemplarisch gezeigt wie man eine genauere Lebensdauervorhersage mit Hilfe der Schweißsimulation und Bruchmechanik machen kann. Es handelt sich dabei um eine meterlange MAG-Schweißung aus dem Stahl S235JR, aus welcher dann mehrere Proben ausgeschnitten und zyklisch belastet wurden. Solche Art von Schweißung kommt bei den grossen 2-Takt Schiffsdieselmotoren vor, wobei keine der Richtlinien ein Festigkeitslimit dafür liefert.

Zuerst wird der rechnerisch günstige thermische Teil der Simulation validiert, mit dem Ziel die Temperaturverläufe an den Messpunkten und die Schweißbadgeometrien in den Schliffbildern zu reproduzieren (Abb. 2).

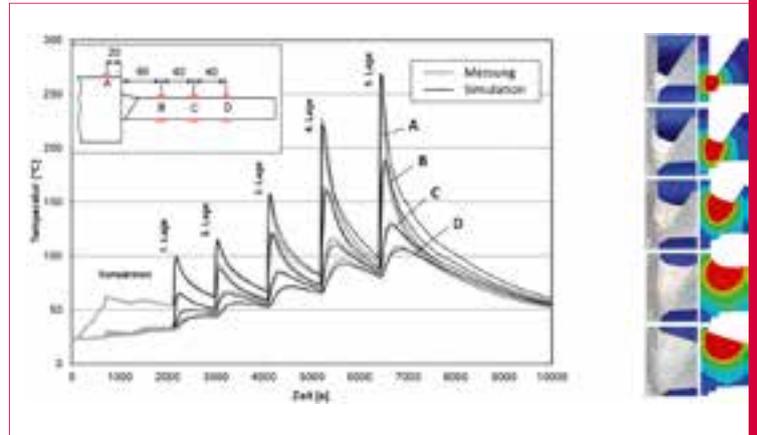


Abb. 2: Gemessene und gerechnete Temperaturverläufe (links) und Geometrie des Schweißbades.

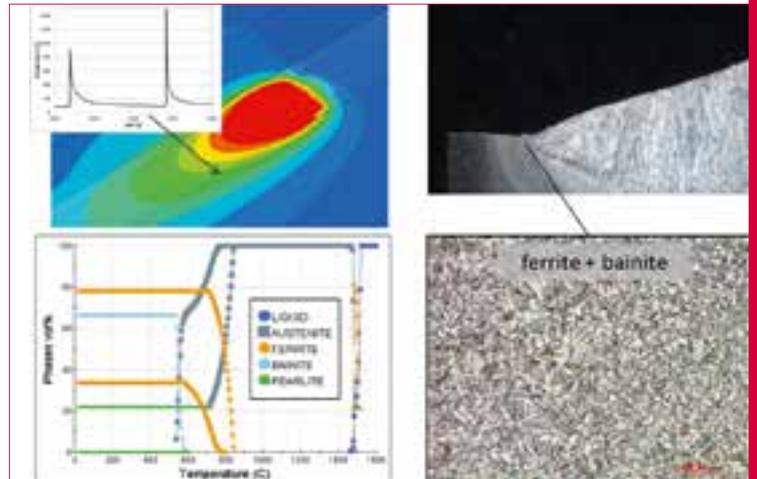


Abb. 3: Vergleich zwischen mit dem Programm JMatPro (links) vorhergesagten und beobachteten Mikrostruktur.

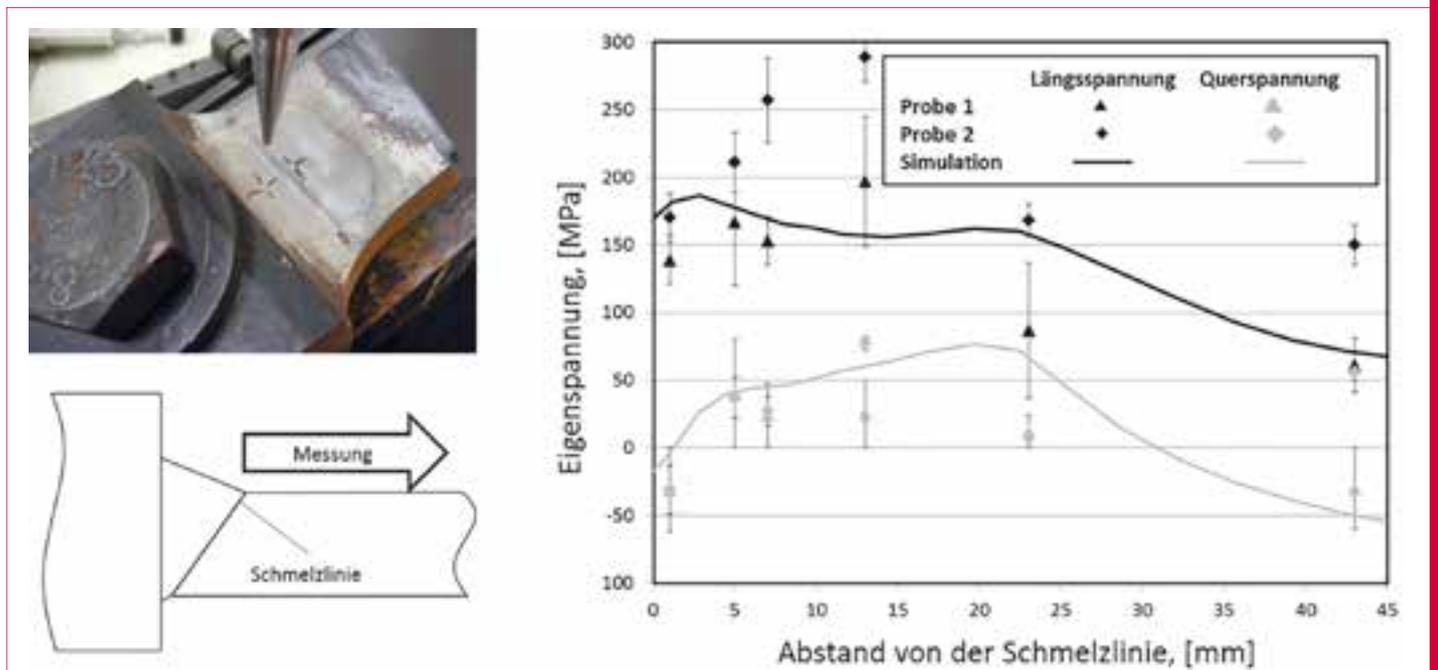


Abb. 4: Gemessene und gerechnete Eigenspannungen in Quer- und Längsrichtung.

Bereits mit Hilfe der thermischen Rechnung lassen sich die Werkstoffeigenschaften nach dem Schweißen vorhersagen. Abb. 3 zeigt die Temperaturverläufe an der Schweißnahtkerbe und die mit dem Programm JMatPro vorhergesagten ferritisch-bainitischen Gefüge im Vergleich zu den experimentellen Untersuchungen.

Um nun die Eigenspannungen an der Schweißnahtkerbe vorhersagen zu können, wird der aufwändigere mechanische Simulationsteil durchgeführt (auch eine gekoppelte Vorgehensweise ist möglich). Dabei haben die thermomechanischen Werkstoffeigenschaften eine sehr wichtige Bedeutung bei der Vorhersage der Eigenspannungen. Sollten die experimentell ermittelten Werkstoffdaten vorhanden sein, kann heutzutage eine Schweissimulation mit Hilfe eines raffinierten Werkstoffmodells die Eigenspannungen, zumindest bei einfachen Geometrien, gut vorhersagen. Abb. 4 zeigt ein Vergleich zwischen den gerechneten und mit Röntgenverfahren gemessenen Eigenspannungen.

Sollten die makroskopischen Größen, wie die Temperaturverläufe oder Eigenspannungen vorhanden sein und das Gefüge an der Nahtkerbe bekannt werden, können mit Hilfe der mechanismusbasierten mikromechanischen Ansätzen die Dauerfestigkeitsgrenzen einer Schweißnaht vorhergesagt werden. Da die Oberflächenqualität nach dem Schweißen, insbesondere entlang der Schmelzgrenze, oft niedrig ist, ist dort die Wahrscheinlichkeit eines Anfangsrisse bereits nach dem Schweißprozess hoch. Aus diesem Grund eignet sich in den meisten Fällen die Bruchmechanik sehr gut um das Ermüdungsverhalten sowohl bei niedrigeren als auch bei sehr hohen Lastspielzahlen zu beschreiben. So kann der Schwellenwert des Spannungsintensitätsfaktors für die Festigkeitsgrenze im Bereich der hohen Lastspielzahlen während das Risswachstum für die Lebensdauer bei höheren Spannungsamplituden und niedrigeren Lastspielzahlen eingesetzt werden.

Moderne Methoden sind in der Lage den Schwellenwert des Spannungsintensitätsfaktors abhängig von der Rissgröße (hier ist es wichtig zwischen den Kurz- und Langrisen zu

unterscheiden), Materialhärte und der Asymmetrie der Belastung sehr gut für verschiedene Legierungen vorhersagen zu können [4]. Für die Berechnung des Rissfortschrittes stehen unterschiedliche Modelle zur Verfügung, welche zu robusten Aussagen führen. Da die Spannungsverläufe in der Nähe der Schweißnahtkerbe sehr hohen Gradienten aufweisen, können solche Berechnungen genauer mit Hilfe der FEM oder der analytischen Ansätzen, den sogenannten Gewichtsfunktionen, durchgeführt werden [5]. Mit dieser Vorgehensweise lassen sich beispielsweise die Festigkeitsgrenzen aus den IIW-Richtlinien recht gut reproduzieren (Abb. 5), allerdings mit einem entscheidendem Unterschied – hier kann der Benutzer die Lebensdauer speziell für seinen Werkstoff, Schweißprozess, Geometrie, Eigenspannungszustand und Lastfall abschätzen. So liesse sich in der oben genannten Versuchsreihe die unterschiedlichen Versagensmechanismen, je nachdem ob die Proben nach dem Schweißen wärmebehandelt wurden oder nicht, quantitativ reproduzieren und was noch wichtiger ist – verstehen. Ein deutlicher Abbau der Eigenspannungen durch die nachträgliche Wärmebehandlung an der unteren linken Kerbe führte dazu, dass sich der Schwellenwert des Spannungsintensitätsfaktors dort vergrößerte und das Risswachstum von der Nachbarkerbe schlussendlich energetisch günstiger war.

Sollten die Festigkeitslimite für verschiedene Nahtarten in der geschweißten Struktur bekannt werden, können diese mit Hilfe der Methode der kritischen Ebene für eine allgemeine multiachsigale und nicht-proportionale Belastung formuliert werden und so, für die Bewertung grossflächiger Bauteile eingesetzt werden [5].

Schweisverzugsimulation innerhalb einer Prozesskette

Sehr oft führt das Schweißen zu einer unerwünschten Geometrieänderung der gesamten Struktur. Insbesondere bei grossflächigen Bauteilen kann das zu Schwierigkeiten bei dem nachfolgenden Zusammenbau führen. Oft ist aber Schweißen nur eine von vielen Prozessstufen, die auf die Endgeometrie vom Bauteil sowie auf dessen Eigenschaften einen Einfluss hat. In diesem Fall ist die Optimierung des Schweißprozesses alleine nicht unbedingt zielführend

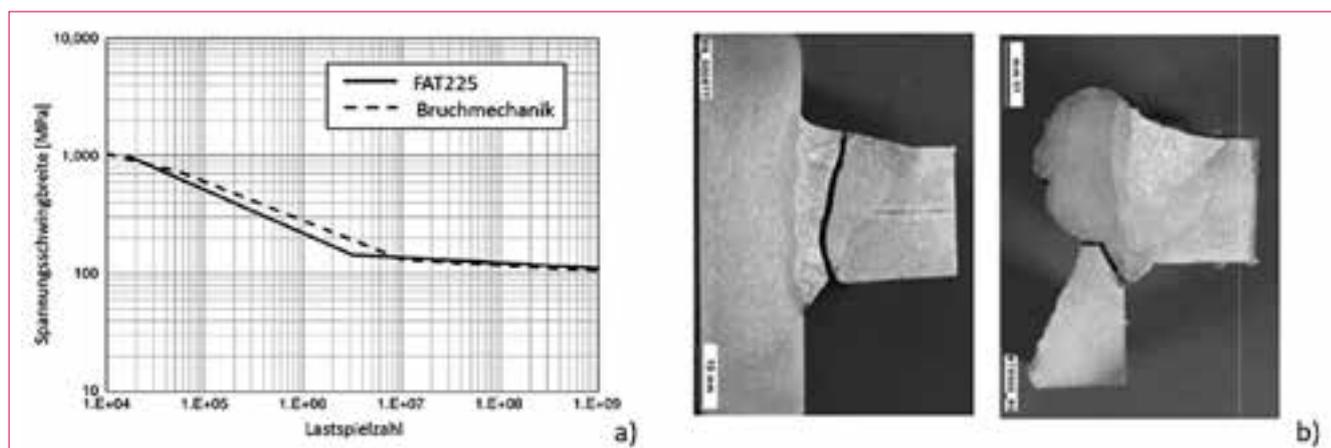


Abb. 5: a) Vergleich der Wöhlerkurve aus [3] für FAT225 mit der mit Hilfe der Schweissimulation und Bruchmechanik ermittelten; b) repräsentative Querschnitte gebrochener Proben mit (links) und ohne Wärmebehandlung.

oder, besser formuliert, nicht immer der effizienteste Weg. In solchen Fällen kann die Simulation entlang der Prozesskette zu wesentlichen Verbesserungen führen. Am Beispiel der Komponente für einen Flugzeugtriebwerk [5] lässt sich die Simulation entlang der Fertigungsprozesskette gut darstellen (Abb. 6). Das Blech wird zuerst in den Umformwerkzeugen tiefgezogen, danach wird die Rückfederung und Beschneiden berechnet. Später wird das Halbezeug in der Mitte getrennt. Am Ende folgt die Schweissprozesssimulation mit anschließendem Abkühlen und Rückfedern. Um die erwünschte Geometrie am Ende zu erzielen, wurden mit Hilfe der Optimierungssoftware LS-OPT sämtliche Prozessparameter, inklusive Geometrie der Tiefziehwerkzeuge, in mehreren Simulationsschleifen optimiert. In dieser Prozesskettensimulation wurden verschiedene Netze, Elementformulierungen und auch Solver verwendet – während sich das Umformen am effizientesten mit explizitem Solver behandeln lässt, wird das Rückfedern und Schweißen mit einem impliziten Integrationsschema berechnet.

Zusammenfassung

Ob Vorhersage der Betriebsfestigkeit, schweißinduzierten Verformungen, Eigenspannungen oder Mikrostruktur - eine Schweißsimulation liefert bei vielen Fragestellungen entscheidende Erkenntnisse. Die Simulation kann sowohl bei der Verbesserung der Produkteigenschaften als auch bei der Erhöhung der Prozesssicherheit und -robustheit bedeutend beitragen. Die Möglichkeit eine Schweißsimulation in eine Prozesskettensimulation zu integrieren, ermöglicht ausserdem die Erfassung komplexer Wechselwirkungen zwischen den

verschiedenen Prozessschritten und die Optimierung des gesamten Fertigungsprozesses, was bei vielen metallverarbeitenden Industriebetrieben zu einem effizienteren Ressourcenverbrauch führen kann.

Literatur

- [1] Radaj, D. (1999), Schweißprozesssimulation: Grundlagen und Anwendungen, DVS-Verlag, Düsseldorf.
- [2] Klöppel, T., Loose, T. (2015), «Recent developments for thermo-mechanically coupled simulations in LS-DYNA with focus on welding processes», 10th European LS-DYNA Conference 2015, Würzburg, Germany
- [3] FKM-Richtlinie (2002), «Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenelemente aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, Vol. 4, erweiterte Ausgabe, VDMA Verlag.
- [4] Hobbacher, A. (2008), «Recommendations for fatigue design of welded joints and components». IIW document IIW-1823-07/XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07.
- [5] Murakami, Y. (2002), Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions, Elsevier, Kidlington, Oxford.
- [6] A. Krasovskyy A. Virta, (2015), «Fatigue life assessment of welded structures based on fracture mechanics», International Journal of Structural Integrity, Vol. 6 Iss 1 pp. 2 – 25
- [7] M. Schill E. Odenberger, (2014), «Simulation of residual deformation from a forming and welding process using LS-DYNA®», 13th International LS-DYNA Users Conference, Dearborn, Michigan USA

SVS ASS

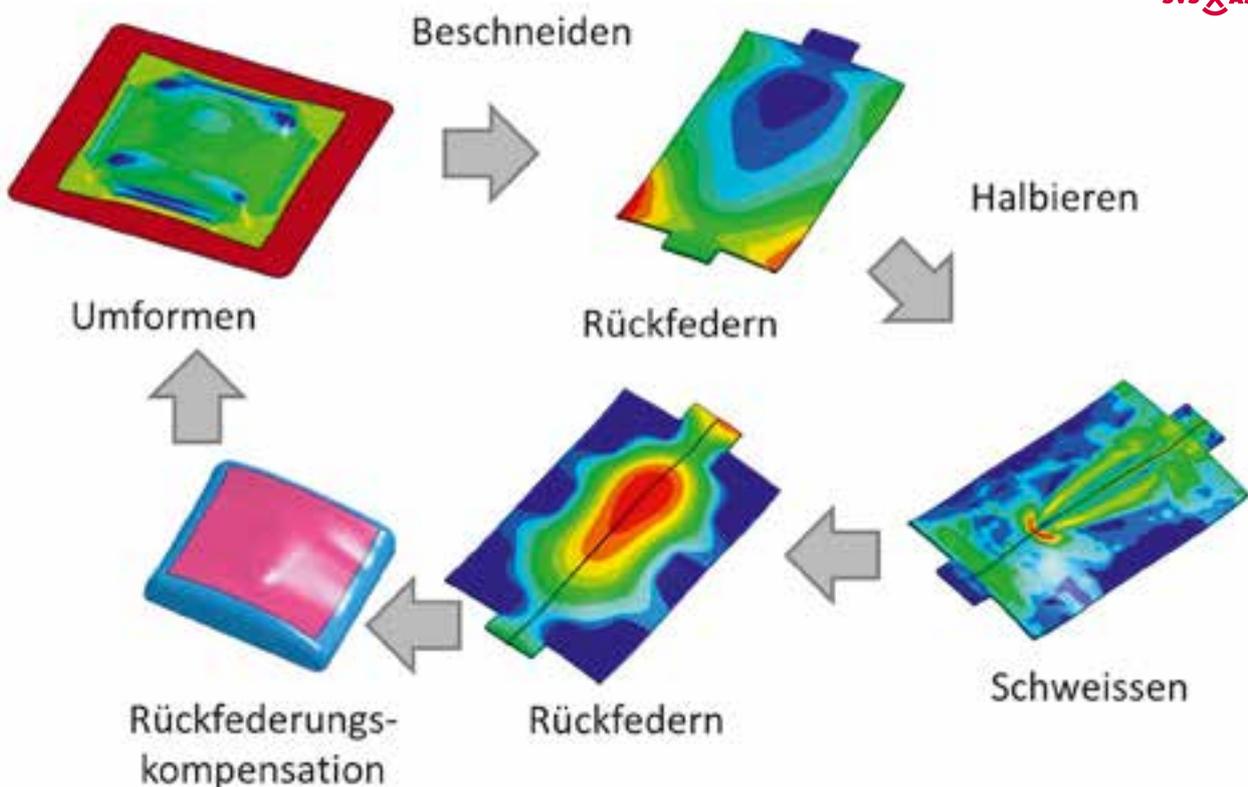


Abb. 6: Virtuelle Fertigungsprozesskette, wo die Schweißsimulation eine Prozessstufe präsentiert.