

Multiphysikalische Prozesskopplung am Beispiel einer stumpf geschweißten und nachbehandelten Stahlplatte

Peter Schaumann, Christian Keindorf und Thomas Kirsch

Institut für Stahlbau, Appelstraße 9A, Leibniz Universität Hannover, Deutschland

E-Mail: schaumann@stahl.uni-hannover.de / keindorf@stahl.uni-hannover.de / kirsch@stahl.uni-hannover.de

ZUSAMMENFASSUNG

In dem vorliegenden Beitrag wird über Schweißprozesssimulationen berichtet, bei denen eine Kopplung zu einem anschließenden Nahtnachbehandlungsprozess realisiert worden ist. Dabei kam für die Nachbehandlung das Ultrasonic Impact Treatment (UIT), welches zu den hochfrequenten Hämmerverfahren gehört, zum Einsatz. Mit dieser Methode kann die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Stahlkonstruktionen deutlich gesteigert werden. Am Beispiel einer stumpf geschweißten Platte werden die wesentlichen Aspekte dieser multiphysikalischen Prozesskopplung erläutert. Anhand von experimentellen Untersuchungen zum Schweißprozess sind die Ergebnisse der numerischen Simulationen verifiziert worden. Neben den Temperaturzyklen erfolgte auch für die transienten Eigenspannungsfelder ein Vergleich zwischen Experiment und Simulation. Das Ziel der Untersuchungen war die Quantifizierung der Eigenspannungen im Nahtbereich vor und nach der Schweißnahtnachbehandlung. Die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit am Nahtübergang erfolgte anhand des Kerbdehnungskonzeptes bis zur Anrisslebensdauer. Bei Berücksichtigung des Eigenspannungszustandes der behandelten Schweißverbindung ergibt sich eine signifikante Steigerung der Lebensdauer. Mit Hilfe der hier vorgestellten numerischen Prozesskopplungen können die Effekte einer Nachbehandlung während der Planungsphase für geschweißte Bauteile quantitativ bewertet werden, um später im Rahmen einer Serienfertigung gezielt die Ermüdungsfestigkeit von kritischen Schweißdetails zu steigern.

1. Einleitung

Bei geschweißten Stahlkonstruktionen mit hohen dynamischen Beanspruchungen sind oftmals die Schweißnähte die ermüdungskritischen Kerbdetails, die die Lebensdauer des Bauteils maßgeblich bestimmen. Deshalb wird immer eine hohe Ermüdungsfestigkeit von Schweißnahtdetails angestrebt. Eine Möglichkeit zur Steigerung der Lebensdauer stellen dabei die Nahtnachbehandlungsmethoden dar. Eine dieser Methoden ist das Ultrasonic Impact Treatment (UIT), das zu den hämmernden Verfahren gehört. Durch eine UIT-Behandlung am Nahtübergang können nicht nur Zugeigenspannungen aus dem Schweißprozess reduziert, sondern auch verbesserte Nahtgeometrien erzielt werden. [Statnikov et al., 1977]. Im Wesentlichen basiert das Verfahren auf der Umwandlung von harmonischen Schwingungen durch einen Ultraschallwandler in mechanische Impulse, die auf die Oberfläche aufgebracht werden. Die Nachbehandlung des Schweißnahtüberganges erfolgt dabei durch mechanisches Hämmern mit einem oder mehreren gehärteten Bolzen bei ca. 200 Hz, die sich mit einer Amplitude von rund 40 μm bewegen. Hierbei werden die Oberfläche verfestigt und Druckeigenspannungen im oberflächennahen Bereich induziert sowie die Kerbwirkung des Schweißnahtfußpunktes vermindert. Beide Effekte tragen zur Steigerung der Ermüdungsfestigkeit bei.

Im Abbildung 1 links ist die UIT-Technologie bestehend aus einer elektronischen Steuerbox, Schlauchpaket und Handgriff dargestellt. Vorn am Handgriff befinden sich ein oder mehrere gehärtete Bolzenstifte, die am Schweißnahtfußpunkt der Naht entlang geführt werden. Die Abbildung 1 rechts zeigt schematisch ein Schweißnahtdetail bei dem der Nahtübergang mittels UIT nachbehandelt wird.

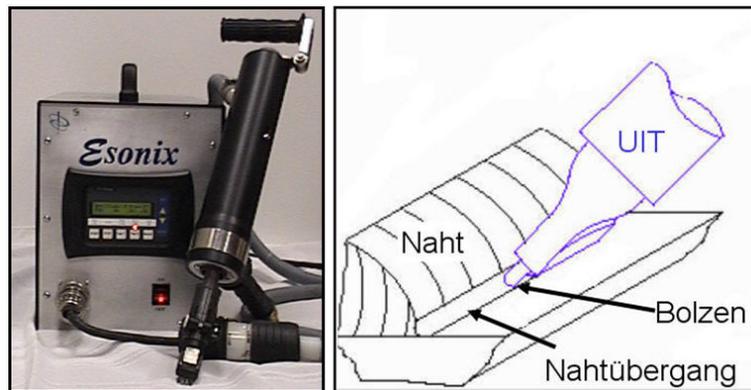


Abbildung 1: Nahtnachbehandlung mit Ultrasonic Impact Treatment (UIT)

Um qualitative Aussagen über die Erhöhung der Lebensdauer treffen zu können, wurde im Rahmen von numerischen Simulationen eine Kopplung des Schweißprozesses mit dem UIT-Prozess vorgenommen. Hierfür wurde zunächst ein numerisches Modell in ANSYS® zum Schweißprozess an zwei Stahlblechen mit Stumpfnahht erstellt. Durch begleitende Schweißversuche wurden die Simulationen sowohl hinsichtlich der Thermodynamik als auch Strukturmechanik verifiziert. Anschließend ist unter Berücksichtigung der numerisch ermittelten Eigenspannungsfelder (mit und ohne UIT) die Anrisslebensdauer mit dem Korbdehnungskonzept verglichen worden. Mit der hier vorgestellten numerisch abgebildeten Prozesskette können die Effekte einer UIT-Behandlung an ermüdungskritischen Schweißnahtdetails quantifiziert werden, um zukünftig eine gezielte und optimierte Nachbehandlung bei Serienfertigungen von geschweißten Bauteilen zu ermöglichen.

2. Prüfstand und Versuchsdurchführung

Am Beispiel einer einlagig geschweißten Stumpfnahht sind experimentelle Untersuchungen durchgeführt worden, um die Prozesssimulationen verifizieren zu können. Hierzu wurde ein Versuchsaufbau gewählt, mit dem ein vollmechanischer MAG-Schweißprozess realisiert werden konnte. Für den reibungslosen Ablauf des Versuchsbetriebes war die einwandfreie und gesicherte Messung des Verfahrweges von größter Bedeutung. Dafür wurde der Handgriff des Schweißgerätes über eine Führungsschiene mit einer Fräsmaschine verbunden, um somit die definierte Vorschubgeschwindigkeit zu gewährleisten (s. Abbildung 2). Ein weiterer Vorteil der parallel laufenden Fräsmaschine war die Feinjustierung in allen drei Achsrichtungen zum Einstellen der exakten Startposition der Schweißdüse. Die gegenüberliegenden Ränder der Stahlbleche wurden durch eine Klemmvorrichtung fest eingespannt. Dafür waren auf dem Schweißtisch Winkel montiert, an denen die Position der beiden Bleche ausgerichtet werden konnte.

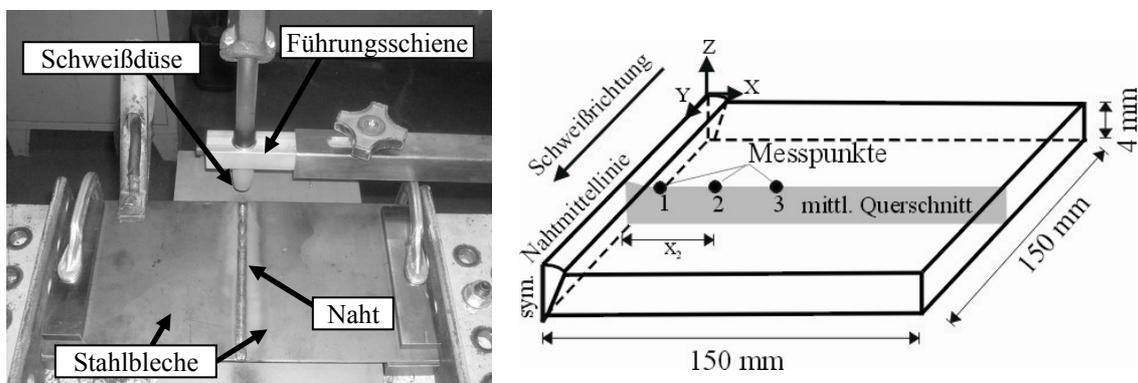


Abbildung 2: Versuchsaufbau (links) und Abmessungen (rechts) der Schweißproben

Bei dem Material der zu schweißenden Bleche handelte es sich um einen Baustahl aus einer Charge mit der Güte S355 J2G3. Die Versuchsanordnung und die geometrischen Abmessungen der Schweißproben sind in Abbildung 2 rechts dargestellt. Die Stahlbleche wurden quadratisch mit einem Seitenmaß von $L = B = 150$ mm zugeschnitten. Die Plattendicke betrug jeweils $t = 4$ mm. Die Nahtvorbereitung erfolgte mit einem Winkel von $22,5^\circ$ an jeder Flanke. Danach wurden die Bleche mit einem Spalt von 0,2 bis 0,5 mm zwischen den zu schweißenden Kanten positioniert und fest eingespannt. Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs ist in der Tabelle 1 enthalten [Kirsch, 2007].

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Stahls in Massenprozent

C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cu
0,180	0,010	1,520	0,012	0,007	0,004	0,028	0,060

Bei dem verwendeten Zusatzwerkstoff handelt es sich um eine handelsübliche Drahtelektrode nach DIN 8559 SG 2 mit einem Durchmesser von 0,8 mm. In Verbindung mit dem Schutzgas einer Zusammensetzung von 18 % CO₂ und 82 % Argon, hat die resultierende Naht nach DIN 8559 einen mechanischen Gütewert von Y 46 54.

Nachdem alle Vorbereitungen abgeschlossen waren, wurde zu Beginn jedes Schweißversuches zunächst der Vorschub der Fräsmaschine mit Führungsschiene gestartet. Zu dem Zeitpunkt, wo die Führungsschiene mit der daran befestigten Schweißdüse den Rand der Stahlbleche (s. Koordinatenursprung in Abbildung 2) erreichte, wurde der Lichtbogen gezündet und die Messung durch ein Triggersignal gestartet. Während des Schweißens wurde der Verfahrweg mittels eines Wendelpotentiometers mit ohmscher Widerstandsänderung erfasst. Zusammen mit der Zeitmessung konnte dadurch die Schweißgeschwindigkeit online berechnet werden. Des Weiteren erfolgte die Erfassung des Schweißstromes durch Messung am Schweißmassekabel mittels eines Stromwandlers vom Typ DHR 200 C5 von der Firma LEM. Der Messbereich des Stromwandlers reichte von 0 bis ± 200 A bei einer analogen Ausgangsspannung von ± 10 V. Als mittlere Stromstärke wurde ein Wert von 120 A festgestellt. Zusätzlich wurde die Spannung zwischen Versuchskörper und Schweißgerät mithilfe der Spannungsmessfunktion eines handelsüblichen Multimeters gemessen. Der über die Zeit gemittelte Wert betrug 18,3 V.

Zur lokalen Temperaturmessung auf der Oberfläche der rechten Stahlplatte wurden Thermoelemente der Firma Newport Omega vom Typ TC-GG-KI-30-40 verwendet, die einen Messbereich zwischen -90 °C und 1370 °C besitzen. Die Positionen der Thermoelemente 1 bis 3 sind in der Abbildung 2 rechts zu erkennen. Der jeweilige Abstand quer zur Naht ist entsprechend mit $x_1 = 5$ mm, $x_2 = 30$ mm und $x_3 = 50$ mm bezeichnet. Auf dem zweiten Stahlblech wurden Dehnungsmessstreifen in gleicher Entfernung senkrecht zur Naht angebracht (spiegelsymmetrisch), um für die gleichen Positionen auch die Eigendehnungen zu erfassen. Die verwendeten DMS von der Firma HBM basieren auf dem ohmschen Widerstandsprinzip und sind vom Typ 3/120LY11, die eine Messgitterlänge von 3 mm besitzen. Alle Messsignale wurden von einem Messverstärker vom Typ Spider8 der Firma HBM digital verarbeitet. Über eine USB-Schnittstelle wurden die Daten zum PC gesendet und mit der Software Diadem ausgewertet und gespeichert. Die Versuchsdauer unterteilte sich in den Schweißvorgang mit etwa 35 s und der anschließenden Abkühlphase bis 2000 s. Die Ergebnisse der Schweißversuche werden hier nach Erläuterung des zugehörigen numerischen Modells mit den Simulationsergebnissen verglichen.

3. Numerisches Modell

Das numerische Modell wurde unter Ausnutzung von Symmetriebedingungen als Halbmodell generiert, d.h. entlang der Schweißnahtlinie befindet sich die Symmetrieebene (s. Abbildung 3 links). Die Länge der Schweißnaht beträgt wie im Versuch 150 mm. Die Schweißgeschwindigkeit entspricht der Vorschubgeschwindigkeit der Fräsmaschine mit einem Wert von $v = 288$ mm/min. Die elektrischen Schweißparameter werden auf Grundlage der Messergebnisse zu $U = 18,3$ V und $I = 120$ A mit einem thermischen Wirkungsgrad von 90 % angenommen. Die Wärmequelle wandert beginnend im Koordinatenursprung entlang der positiven y-Richtung (vgl. Abbildung 2 rechts). Die Naht wird dabei elementweise aufgebaut,

wobei nur die bereits verschweißten Nahtelemente in der Steifigkeitsmatrix Berücksichtigung finden. Die von dem Lichtbogen unbeeinflussten Nahtelemente bleiben durch eine Birth-Death-Funktion in ANSYS® deaktiviert. Die Wärmeeinbringung erfolgt mittels einer Volumenwärmequelle nach [Goldak, 1984], durch welche die Anzahl der vor dem Lichtbogen aktivierten Elemente als Folge der Wärmeverteilung berechnet werden kann. Als Ergebnis der thermischen Analyse ergibt sich das transiente Temperaturfeld für die Schweißproben. Aus der thermischen Belastung kann innerhalb der strukturmechanischen Analyse die Berechnung des Eigenspannungszustandes vorgenommen werden. Hierfür dienen die Knotentemperaturen als Belastungsgrößen für den strukturmechanischen Prozess. Der Plattenrand bei $x = 150$ mm wird in x , y und z -Richtung gehalten. Die sich daraus ergebenden Verformungen bestimmen maßgeblich die Schweiß Eigenspannungen mit.

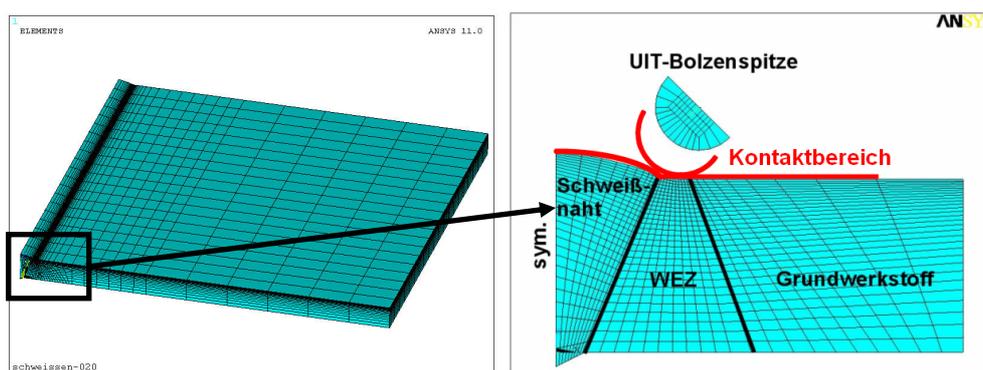


Abbildung 3: Numerisches Modell der Stahlplatte (links) mit Schweißnahtdetail (rechts)

Die temperaturabhängigen Materialdaten des S355 J2G3 wurden nach [Wichers, 2006] implementiert. Zur Netzoptimierung wurde das Modell in die Bereiche Naht, Wärmeeinflusszone und Grundwerkstoff unterteilt. Zur gleichzeitigen Simulation von Thermodynamik und Strukturmechanik ist ein Multifield-solver verwendet worden, wobei in jedem Zeitschritt das thermodynamische und das strukturmechanische Feld mit Hilfe von Stagger-Iterationen berechnet wird. Dafür war eine Doppelvernetzung mit Volumenelementen vom Typ Solid70 für die Temperaturfeldberechnung und Solid45 für die strukturmechanischen Freiheitsgrade erforderlich. Durch die parallele Berechnung je Zeitschritt konnte zusätzlich die Gefügekinetik der Schweißverbindung im Modell berücksichtigt werden. Zu jedem Zeitschritt wurde die vorhandene Menge jeder Gefügeart (z.B. Austenit oder Ferrit) aktualisiert. Zur Simulation der anschließenden Schweißnahtnachbehandlung wurde ein Kontaktalgorithmus implementiert, wobei nur die Bolzenspitze vom UIT als Halbzylinder abgebildet wurde.

Der Ablauf in der multiphysikalischen Prozesskette unterteilt sich in die folgenden Teilschritte:

1. Thermodynamik des Schweißens
2. Gefügekinetik
3. Strukturmechanik des Schweißens
4. Kontaktmechanik für UIT
5. Kerbdehnungskonzept

die im Folgenden näher erläutert werden sollen.

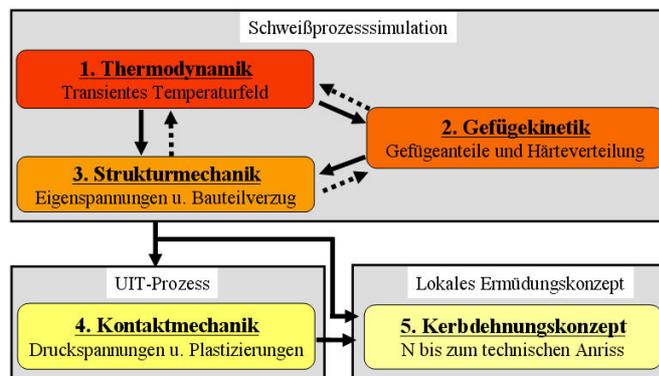


Abbildung 4: Multiphysikalische Prozesskopplung

4. Thermodynamik

Die numerische Simulation des transienten Temperaturfeldes wurde anhand zwei verschiedener Messtechniken verifiziert, zum einen mit Thermoelementen (1D) und zum anderen mit Thermographiekameras (2D). Die flächige Erfassung der Temperaturen mit einer Thermographiekamera wurde bei $t = 42$ s ab Schweißbeginn durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5(a) dargestellt. Die Schweißrichtung ist von rechts nach links und der Lichtbogen hat zum Zeitpunkt $t = 35$ s den linken Plattenrand passiert. Da der Lichtbogen die Optik der Thermographiekamera störte, wurde eine Aufnahme ohne selbigen gewählt. Es ist zu sehen, dass sich die Temperaturerhöhung über 80 °C sowohl im numerischen Modell, als auch im Versuch, am rechten Plattenrand weiter ausgedehnt hat, was auf den an dieser Position früheren Wärmeinput zurückzuführen ist. Die Flächen gleicher Temperatur haben augenscheinlich etwa die gleiche Ausdehnung. Dieser Vergleich zwischen Numerik und Experiment belegt damit qualitativ eine gute Abbildung des Temperaturfeldes durch das der Simulation zugrunde liegende Modell.

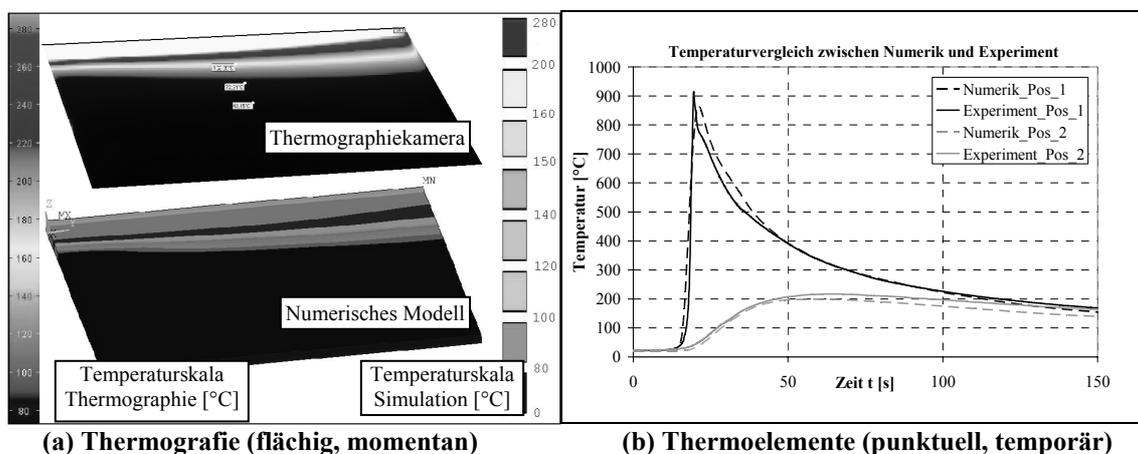


Abbildung 5: Temperaturvergleich Simulation und Experiment

In Abbildung 5(b) ist der Temperaturverlauf an zwei verschiedenen Messpunkten quantifiziert worden. Die Temperaturen sind jeweils in Schweißnahtichtung in Plattenmitte, an der Oberseite punktuell durch Thermolemente bzw. durch Ausgabe der Knotentemperaturen im Modell ermittelt worden. Beim Vergleich der Temperaturzyklen ist eine sehr gute Übereinstimmung erkennbar. Die Entfernung der Pos. 1 von der Schweißnaht ist mit $x_1=5$ mm sehr gering, was zu hohen Temperaturen von ca. 900 °C führt, die bei $t = 18$ s auftreten. Dies liegt an der Nähe des Lichtbogens, der etwa zu diesem Zeitpunkt die Schweißnahtmitte passiert. Aufgrund der mit $x_2=30$ mm größeren Entfernung von Pos. 2 zur Schweißnaht ist die maximale Temperatur mit ca. 200 °C deutlich geringer. Anhand der Übereinstimmungen bei den punktuellen und flächigen Vergleichen bezüglich der Temperaturzyklen kann geschlussfolgert werden, dass die Simulation des transienten Temperaturfeldes mit diesem FE-Modell als verifiziert anzusehen ist.

5. Gefügekinetik

Aus dem Bereich der Werkstoffkunde ist bekannt, dass das Kristallgefüge des S355 bei Temperaturen über der sogenannten Austenitisierungstemperatur kubisch flächenzentriert ist, was auch als γ -Mischkristalle oder Austenit bezeichnet wird. Bei Abkühlung unter die besagte vom Kohlenstoffgehalt abhängige Temperatur, bilden sich α -Mischkristalle. Dies ist jedoch nur ein Oberbegriff für die verschiedenen entstehenden Kristallstrukturen, die mit Ferrit, Perlit, Bainit und Martensit bezeichnet werden. Welche dieser Phasen mit welchem Anteil in der Wärmeeinflusszone entstehen, hängt vor allem von der chemischen Zusammensetzung des Stahls und von der Abkühlgeschwindigkeit ab. Wird ein Stahl z.B. sehr schnell abgekühlt (abgeschreckt) entsteht in einem diffusionslosen Vorgang hauptsächlich Martensit,

was eine große Härte aufweist. Wenn der Werkstoff langsamer abkühlt, entstehen vor allem Ferrit und Perlit, da der im Austenit gebundene Kohlenstoff aus dem Metallgitter diffundieren kann und sich mit freiem Eisen zu Fe_3C (Zementit) verbindet. Um diesen Vorgang der Gefügekinetik zu beschreiben und die Kristallstruktur vorhersagen zu können, wurden für die verschiedensten Legierungen S-ZTU-Diagramme (Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramme) erstellt. In Abbildung 6 ist für den hier verwendeten Stahl S355 J2G3 das S-ZTU-Diagramm dargestellt [Seyfarth et al., 1992], welches die Eingangswerte bzw. Sollkurven für die 1 % und 99 % Wachstumsgrenzen der einzelnen Gefügearten bei der numerischen Simulation liefern soll. Anhand einer Abkühlkurve, die in das dargestellte Diagramm eingetragen wird, kann ermittelt werden, zu welcher Zeit sich welche Gefügearten ausbilden. Da die Entstehung der verschiedenen Kristallstrukturen einer nahezu gleichmäßigen Geschwindigkeit unterliegt, kann ebenfalls ihr Anteil am Ende des Abkühlvorgangs bestimmt werden.

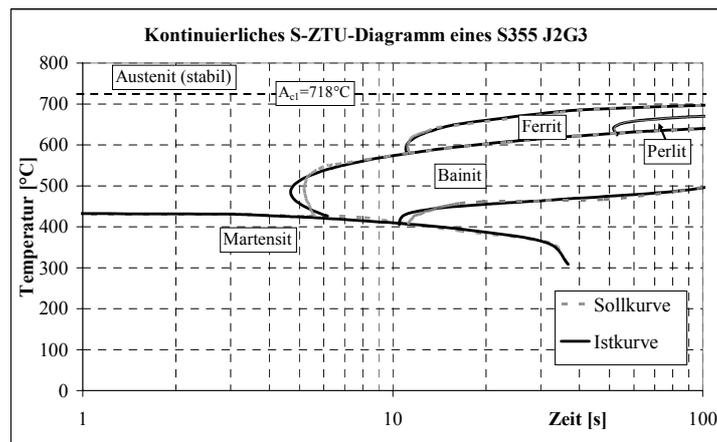


Abbildung 6: Schweiß-ZTU-Diagramm für einen S355 J2G3

Aus den jeweiligen Grenzlinien zwischen den Phasen (hier: Sollkurven) wurden anhand von Regressionsanalysen Funktionen (hier: Istkurven) approximiert, auf deren Basis ein Formelsatz in Anlehnung an [Börnsen, 1989] erstellt wurde. Mit diesem in ANSYS[®] implementierten Formelsatz wurden die Berechnungen der einzelnen Gefügeanteile über die Zeit und für beliebige Abkühlkurven ermöglicht. Die Verifizierung wurde anhand von ausgewählten Abkühlkurven aus [Seyfarth et al., 1992] durchgeführt. Abbildung 7 zeigt die verschiedenen Abkühlkurven, sowie die nach [Seyfarth et al., 1992] gemessenen und die in der Simulation berechneten Gefügeanteile nach abgeschlossener Abkühlphase.

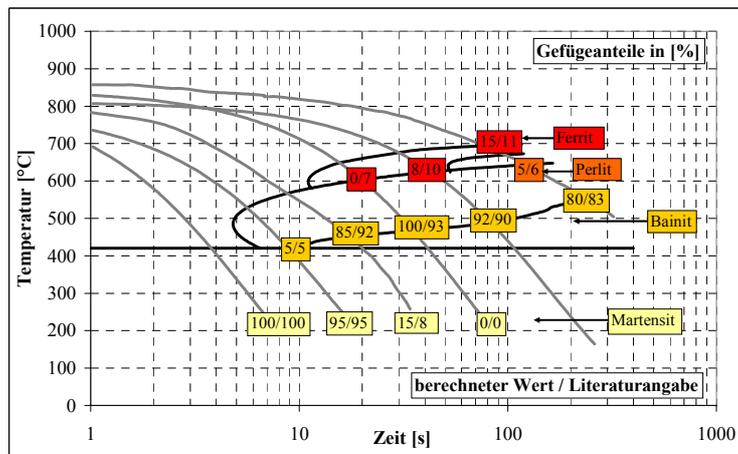


Abbildung 7: Vergleich der Gefügeanteile für verschiedene Abkühlkurven

6. Strukturmechanik

Zur quantitativen Beurteilung der Strukturfeldberechnung wurden die im numerischen Modell ermittelten Dehnungen mit den im Versuch gemessenen Dehnungen verglichen. Beispielhaft ist der zeitliche Verlauf der Dehnungen parallel zur Schweißnaht in $x_2 = 30$ mm Entfernung zur selbigen dargestellt (Abbildung 8). Die DMS wurden in Schweißnahtlängsrichtung in Plattenmitte auf der Oberseite angebracht (vgl. Abbildung 2 rechts). Der Verlauf der Längseigendehnungen stimmt für die ausgeführten und simulierten Schweißprozesse grundsätzlich überein. Erst steigt der Wert in den positiven Bereich, was zeigt, dass sich das Material an den gemessenen Stellen infolge der Erwärmung ausdehnt. Nach einer gewissen Zeit, je nach Abstand von der Schweißnaht, sinken die gemessenen Werte wieder und gehen in den negativen Bereich über. Dies ist auf die starke Abkühlung der Schweißnaht sowie der Wärmeeinflusszone zurückzuführen. Anhand des Vergleichs in Abbildung 8 ist zu erkennen, dass die Längseigendehnungen für die gleiche Messposition einer gewissen Streuung unterliegen (vgl. Versuch_26 mit Versuch_28). Die numerisch ermittelten Längseigendehnungen befinden sich jedoch innerhalb des gemessenen Datenspektrums, was zeigt, dass mit dem FE-Modell plausible Ergebnisse hinsichtlich der Strukturmechanik erzielt werden können. Der teilweise sinusförmige Verlauf der numerisch berechneten Eigendehnungen ist lediglich auf die größer gewählten Zeitschritte in der Abkühlphase zurückzuführen.

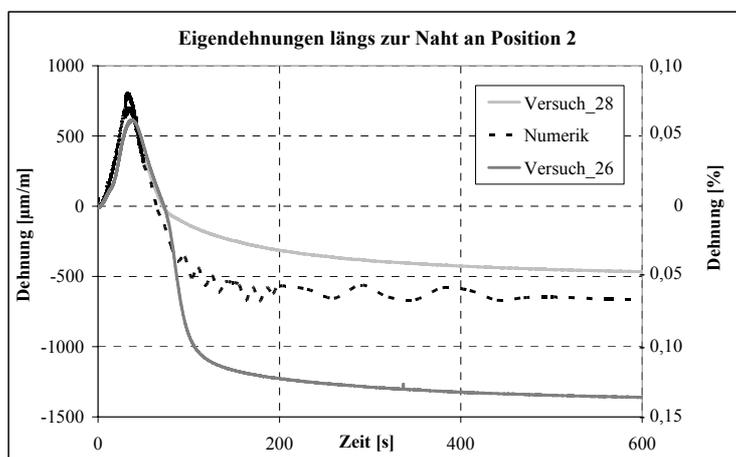


Abbildung 8: Verlauf der Längseigendehnungen in Simulation und Versuch

Nach ca. 2000 Sekunden ist die Platte wieder bis auf Raumtemperatur abgekühlt. Die Quereigenspannungen zu diesem Zeitpunkt sind in Abbildung 9 links dargestellt. Die maximalen Zugeigenspannungen befinden sich entlang der Schweißnahtfußpunktlinie. Nach vollständiger Abkühlung der Bleche schließt im nächsten Teilschritt der multiphysikalischen Prozesskopplung die Simulation der UIT-Behandlung an.

7. Kontaktmechanik

Mit Hilfe eines Kontaktalgorithmus wird die Schweißnahtnachbehandlung mit dem Hämmerverfahren UIT näherungsweise statisch simuliert. In der Praxis erfolgt die Nachbehandlung des Schweißnahtübergangs allerdings hochdynamisch durch mechanisches Hämmern mit einem oder mehreren gehärteten Bolzen bei ca. 200 Hz, die sich mit einer Amplitude von rund $40 \mu\text{m}$ bewegen (s. Abbildung 1). Hierbei wird die Oberfläche verfestigt und Druckeigenspannungen im oberflächennahen Bereich induziert sowie die Kerbwirkung des Schweißnahtfußpunktes vermindert. Im Rahmen der multiphysikalischen Prozesskopplung wird die Wirkungsweise eines Bolzens zunächst nur statisch berücksichtigt, weil in erster Linie die endgültigen Druckspannungen und Plastizierungen von Bedeutung sind, die im Endzustand einer dynamischen Berechnung denen einer quasistatischen Ersatzberechnung für die gleiche Eindringtiefe entsprechen sollten. Um eine Kopplung der beiden Prozesse Schweißen und Nachbehandlung zu erreichen, sind die Geometrie des Bolzens sowie die Definition der Kontaktelemente bereits innerhalb der

strukturmechanischen Analyse des Schweißprozesses zu implementieren [Schaumann, Keindorf, 2007]. Nach einem Restart der Schweißprozesssimulation besitzt der Bolzen zunächst einen geringfügigen Abstand von der Nahtoberfläche (s. Abbildung 3). Anschließend wird der Bolzen in Richtung des Schweißnahtfußpunktes in einem Winkel von 60° bis zu 0,3 mm in den Nahtübergangsbereich eingedrückt. Nachbehandelt wird nicht die gesamte Länge der Naht, sondern nur die mittlere Sektion über eine Breite von 20 mm. In Abbildung 9 links sind die Quereigenspannungen vor und in Abbildung 9 rechts nach der UIT-Behandlung dargestellt.

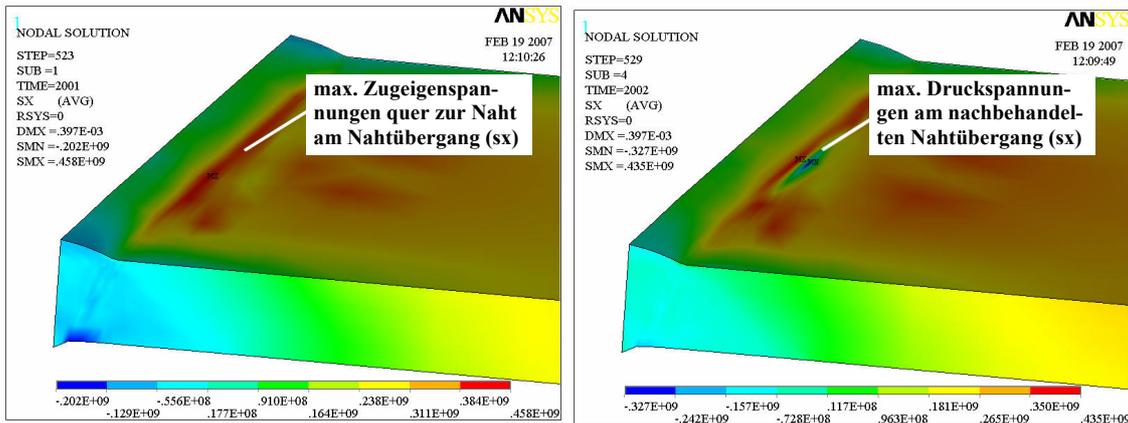


Abbildung 9: Berechnete Quereigenspannungsplots vor (links) und nach (rechts) der UIT-Behandlung

Beim Vergleich mit den Spannungsplots in Abbildung 9 ist zu erkennen, dass die Quereigenspannungen am nachbehandelten Nahtübergang von Zugspannungen ($\sigma_{e,x,geschwei\beta t} = +458 \text{ N/mm}^2$) auf Druckspannungen nahe der Streckgrenze wechseln ($\sigma_{e,x,uit} = -327 \text{ N/mm}^2$). Infolge dieser eingebrachten Druckspannungen kann die Ermüdungsfestigkeit gegenüber dem geschweißten Zustand signifikant gesteigert werden.

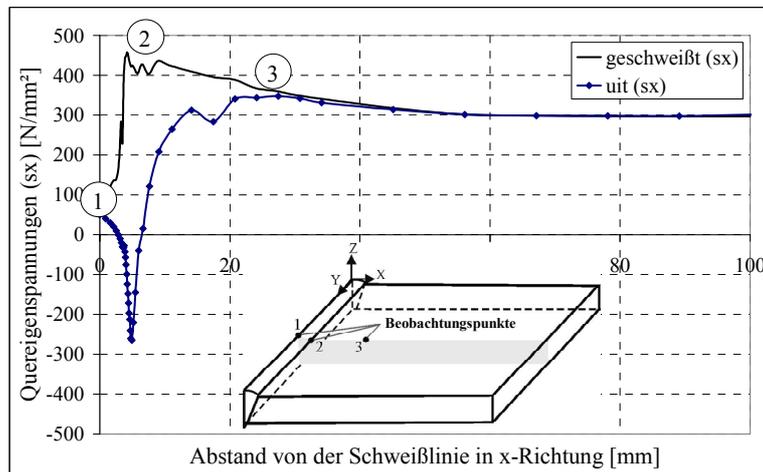


Abbildung 10: Berechnete Quereigenspannungsverläufe vor (links) und nach (rechts) UIT

Als Folge der Bolzenverschiebung in dem Nahtübergangsbereich werden zwei Effekte erreicht, die die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils steigern. Zum einen ist der erhöhte Kerbradius zu nennen, zum anderen bewirkt die plastische Verformung des oberflächennahen Bereiches Druckeigenspannungen, die sich mit den Zugeigenspannungen aus dem Schweißprozess überlagern. In Abbildung 10 werden die Verläufe der Quereigenspannungen in Blechmitte nach dem Schweißen und nach UIT-Behandlung

miteinander verglichen. Die Quereigenspannungen nach dem Schweißprozess steigen beginnend von der Schweißlinie (Punkt 1) bis zu einem Maximalwert am Nahtübergang (Punkt 2) und fallen anschließend wieder langsam auf ein Spannungsniveau von ca. 300 N/mm² im Grundwerkstoff (Punkt 3) zurück. Im Gegensatz dazu besitzt die Eigenspannungsverteilung nach der UIT-Behandlung genau am Schweißnahtfußpunkt einen markanten Peak im Druckbereich (Punkt 2). Die dort induzierten Druckspannungen erreichen einen Wert von -280 N/mm². In der näheren Umgebung des behandelten Nahtübergangs werden die Eigenspannungen ebenfalls reduziert. Jedoch mit zunehmendem Abstand zum Schweißnahtfußpunkt nähert sich die Kurve der im geschweißten Zustand an. Die UIT-Behandlung der Schweißnaht hat einen signifikanten Einfluss auf den Eigenspannungszustand besonders am Nahtübergang, der oftmals den Ort der Risseinleitung unter Ermüdungsbeanspruchung darstellt. Zudem erhöht die Ausrundung und plastische Eindrückung dieses Bereiches den Verschleißwiderstand. Mikrorisse und kleine Kerben können durch dieses Verfahren geschlossen werden und damit ebenfalls positiven Einfluss auf die Lebensdauer des Bauteils nehmen.

8. Ermüdungsfestigkeit nachbehandelter Schweißproben

Zur Bewertung der Ermüdungsfestigkeit nachbehandelter Schweißproben wird das Kerbdehnungskonzept herangezogen [Radaj, Sonsino, 2000]. Dieses lokale Ermüdungskonzept ist ein Verfahren zur Berechnung der Anrisslebensdauer zyklisch beanspruchter Bauteile. Dabei werden örtliche Beanspruchungsabläufe berücksichtigt, was eine realistische Beurteilung des Bauteilzustandes zulässt. Ausgehend von den lokalen elastisch-plastischen Dehnungsamplituden im Kerbgrund erfolgt die Bestimmung der Anrisslebensdauer über einen Vergleich mit der entsprechenden Dehnungs-Wöhlerlinie des Werkstoffs in einer ungekerbten Vergleichsprobe (s. Abbildung 11).

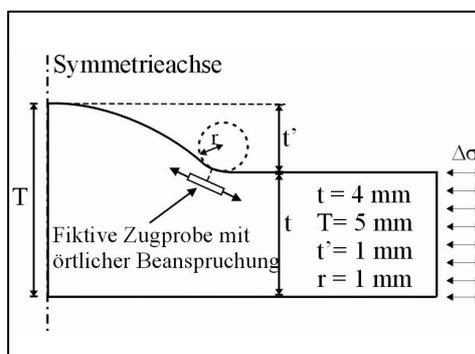


Abbildung 11: Kerbgeometrie an der Naht

Diese Vorgehensweise basiert auf der Übertragung der Verhältnisse im Kerbgrund hinsichtlich lokaler Deformationen, Schädigungen und Risseinleitung auf eine kleine, gedanklich an dieser Stelle positionierten Zugprobe. Die Zugprobe ist ideal glatt, besitzt demnach keine Kerben. Sie wird mit den lokalen Bedingungen der Kerbe des betrachteten Konstruktionsdetails beaufschlagt und anschließend zum Nachweis herangezogen. Für die folgenden Ermüdungsberechnungen wird die Version nach Seeger verwendet. Die Formulierungen zur zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve, Dehnungs-Wöhlerlinie, Bauteilfließkurve und zum Schädigungsparameter sind ausführlich in [Radaj, Sonsino, 2000] und [Radaj, Sonsino, Fricke, 2006] beschrieben.

Die Berücksichtigung der Eigenspannungen erfolgt als Definition eines verformten Ausgangssystems. Hierbei werden die Eigendehnungen als anfängliche Dehnungen miteinbezogen und mit den Verformungen aus der zyklischen Belastung überlagert. Der rechnerische Zusammenhang nach Bäumel und Seeger ist Gl. 1 zu entnehmen [Radaj, Sonsino, 2000].

$$\sigma_k (\varepsilon_k - \varepsilon_r) = \frac{1}{E} (\sigma_n \cdot K_t)^2 \quad (1)$$

Es handelt sich hierbei um eine Modifikation der im Allgemeinen verwendeten Makrostützwirkungsformel nach Neuber mit σ_k und ε_k als maximale örtliche Spannung bzw. Dehnung, σ_n als Nennspannung, der Formzahl K_t und ε_r als anfängliche Eigendehnung. Als Ergebnis der Anwendung des Kerbdehnungskonzeptes liegt die Anrisslebensdauer mit und ohne Berücksichtigung des Eigenspannungszustandes vor.

Abbildung 12 zeigt die ermittelten Anrisschwingspielzahlen in Abhängigkeit von der Nennspannungsamplitude.

Die Steigerung der Lebensdauer durch UIT ist deutlich erkennbar. Ohne Berücksichtigung des Eigenspannungseinflusses stellt sich der Kurvenverlauf zwischen den beiden anderen Kurven ein. Experimentelle Untersuchungen z.B. von [Schauermann, Keindorf, 2007] bestätigen die Wirkungsweise des UIT-Verfahrens. Anhand der Ergebnisse zur multiphysikalischen Prozesskopplung in diesem Beitrag konnte nun auch numerisch gezeigt werden, dass mit einer UIT-Behandlung qualitativ eine signifikante Steigerung der Anrisslebensdauer möglich ist.

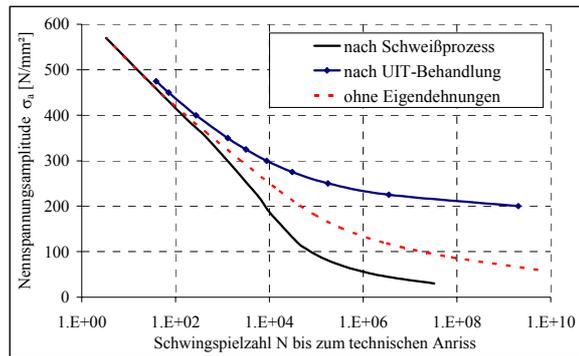


Abbildung 12: Vergleich der Anrisslebensdauern

In Abbildung 13 sind die ermittelten Anrisslebensdauern vor und nach der UIT-Behandlung grafisch gegenübergestellt. Als dynamische Beanspruchung liegt in diesem Fall eine Zugschwellspannung quer zur Naht vor (vgl. Abbildung 11). Die Naht selbst ist aufgrund des größeren Spannungsquerschnitts infolge der Nahtüberhöhung als unkritisch einzustufen. Im Gegensatz dazu ist der Schweißnahtfußpunkt im unbehandelten Zustand (as welded) in Abbildung 13 links als sehr ermüdungskritisch anzusehen, weil dort die größten Querzugeigenspannungen und der kleinste Spannungsquerschnitt anzutreffen sind. In Abbildung 13 rechts (with UIT) ist für den nachbehandelten Nahtübergang in Plattenmitte deutlich zu erkennen, dass die Anrisslebensdauer bis auf $5 \cdot 10^6$ gesteigert werden konnte. Anhand solcher „Ermüdungsplots“ kann die Wirkungsweise einer UIT-Behandlung nicht nur an der Oberfläche, sondern auch im Bauteil in Bezug auf die Lebensdauer beurteilt und hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit gezielt optimiert werden.

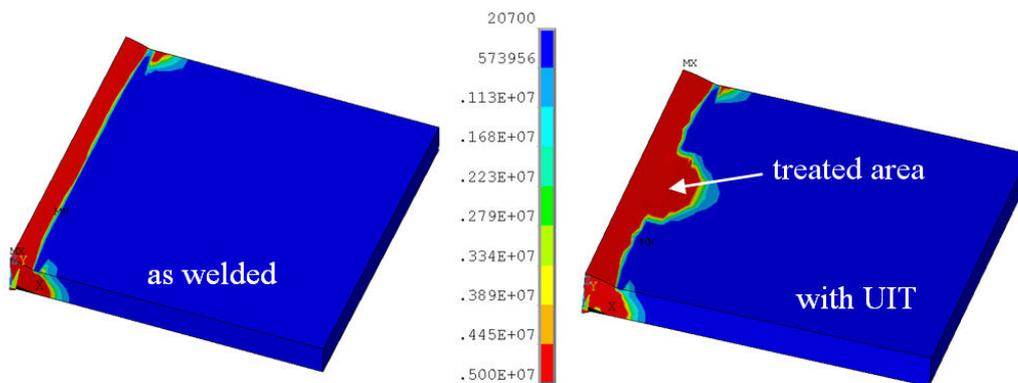


Abbildung 13: Grafische Gegenüberstellung der Schwingspielzahlen bis zum technischen Anriss

Im Ergebnis ist eine deutlich lebensverlängernde Tendenz infolge der UIT-Behandlung erkennbar. Die einfache Anwendbarkeit des Verfahrens erleichtert zudem eine automatisierte Integration in Fertigungsprozesse von geschweißten Konstruktionen. In Kombination mit der hier vorgestellten multiphysikalischen Prozesskopplung kann eine Nachbehandlung für in Serie gefertigte Schweißdetails gezielt optimiert werden. Auf dem Gebiet der numerischen Prozesssimulation besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich einer transienten und räumlich veränderlichen UIT-Behandlung. Die Ergebnisse sollen mit weiteren zukünftigen experimentellen Untersuchungen verglichen werden.

9. Literatur

Bäumel, A.; Seeger, T. (1990), “*Materials Data for Cyclic Loading*”, Suppl. 1, Amsterdam, Elsevier Science.

Börnsen, M. (1989), “Zum Einfluss von Gefügeumwandlungen auf Spannungen und Formänderungen bei thermischer und mechanischer Belastung”, *VDI-Fortschrittberichte, Reihe 18 (Mechanik/ Bruchmechanik)*, Nr. 72, VDI-Verlag, Düsseldorf.

Goldak, J. et al. (1984), “A new finite element model for welding heat sources”, *Metallurgical Transactions B*, 15B, pp. 299-305.

Kirsch, T. (2007), “Experimentelle und numerische Untersuchungen zum transienten Temperaturfeld beim Schweißen einer Stumpfnahverbindung“, *Diplomarbeit*, Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover (unveröffentlicht).

Radaj, D.; Sonsino, C.M.; Fricke, W. (2006), “*Fatigue assessment of welded joints by local approaches*”, Second edition, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC.

Radaj, D.; Sonsino, C.M. (2000), “*Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen nach lokalen Konzepten*”, DVS Verlag, Düsseldorf.

Schaumann, P.; Keindorf, C. (2007), “Enhancing fatigue strength by ultrasonic impact treatment for welded joints of offshore structures”, *Third International Conference on Steel and Composite Structures (ICSCS07)*, pp. 921-926, Manchester, UK.

Seyfarth, Meyer, Scharf (1992), “Großer Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder”, *Fachbuchreihe Schweißtechnik*, Band 110, DVS Verlag, Düsseldorf.

Statnikov, E.S. et al. (1977), “Ultrasonic impact tool for strengthening welds and reducing residual stresses”, *New Physical Methods of Intensification of Technological Processes*.

Wichers, M. (2006), “Schweißen unter einachsiger, zyklischer Beanspruchung - experimentelle und numerische Untersuchungen”, *Dissertation*, Institut für Stahlbau, TU Braunschweig.