

Zur Wahl des Verfestigungsmodells bei der Berechnung von Schweißzugspannungen

Jens Sakkiettibutra¹⁾, Tobias Loose²⁾, Frank Vollertsen¹⁾, Helmut Wohlfahrt³⁾

¹⁾ Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH, Bremen,
E-mail: sakkiettibutra@bias.de

²⁾ Ingenieurbüro Tobias Loose GbR, Karlsruhe,
E-mail: loose@tl-ing.de

³⁾ Institut für Füge- und Schweißtechnik, Technische Universität Braunschweig,
E-mail: h.wohlfahrt@tu-bs.de

ZUSAMMENFASSUNG

Neueren Untersuchungen zufolge können bei der Berechnung von Schweißzugspannungszuständen die maximal auftretenden Zugzugspannungen durch Wahl eines ungeeigneten Verfestigungsmodells unterschätzt werden. Da die maximalen Zugzugspannungen das Verhalten geschweißter Bauteile unter bestimmten Beanspruchungsarten sehr nachteilig beeinflussen, erscheint eine eingehende Diskussion der Frage welches Materialgesetz je nach geschweißtem Werkstoff angewendet werden muss, um korrekte Angaben zum möglichen Maximalwert der Zugzugspannungen zu erhalten, unumgänglich.

Nachfolgend wird über die Ergebnisse von 3D-Berechnungen berichtet, die für einen austenitischen Stahl und den Baustahl S355 das Modell der isotropen Verfestigung anwenden und mit den Resultaten von Messungen sowie von Berechnungen mit verschiedenen gemischten Verfestigungsmodellen vergleichen. Die bei Annahme rein isotroper Verfestigung erzielten Berechnungsergebnisse zeigen stets eine recht gute, zum Teil nahezu vollkommene Übereinstimmung mit den Messergebnissen und geben maximale Zugzugspannungsbeträge weitgehend korrekt wieder. Die Berechnung der schweißbedingten Verformungen und Verfestigungen bringt dabei wichtige Hinweise für die Diskussion der verschiedenen Ergebnisse.

Zusätzliche Berechnungen der Schweißzugspannungen mit dem Modell der kinematischen Verfestigung weisen erhebliche Unterschiede zu denen mit dem Modell isotroper Verfestigung und auch zu den Messergebnissen auf. Die Unterschiede können beim Austenit im Detail mit der unterschiedlichen Berücksichtigung des Bauschingereffektes erklärt werden. Hierbei muss man in Rechnung stellen, dass die Wirksamkeit des Bauschingereffektes je nach Werkstoff und außerdem je nach Verformungstemperatur unterschiedlich stark ist. Da die sich beim Schweißen ergebenden plastischen Verformungen und Spannungen gerade bei erhöhten Temperaturen eintreten, erscheint eine Nichtbeachtung des Bauschingereffektes bei Anwendung des Modells der isotropen Verfestigung, wie die Ergebnisse bestätigen, gerechtfertigt.

Die starken Abweichungen von den Messergebnissen und eine Überschätzung maximaler Zugzugspannungen, wie sie bei Berechnungen mit dem Modell kinematischer Verfestigung beim umwandlungsbehafteten Stahl S355 auftreten, lassen sich ebenfalls mit der nicht gerechtfertigten

Berücksichtigung des Bauschingereffektes begründen. Dieser stellt bei dem umwandlungsbehafteten Stahl vermutlich verformungsbedingte Verfestigungen bzw. Streckgrenzenerhöhungen in Rechnung, die aufgrund der Gefügeumwandlungen gar nicht wirksam werden.

1 Einleitung

Ein wichtiges Ziel bei der Berechnung von Schweißeigenspannungszuständen ist die Erfassung der maximal auftretenden Zugeigenspannungen, die das Verhalten geschweißter Bauteile unter bestimmten Beanspruchungsarten stark nachteilig beeinflussen können. Bei einem Ringversuch haben Vergleiche von gemessenen mit den berechneten Eigenspannungsverteilungen einer geschweißten Platte eines austenitischen Stahles gezeigt, dass bei Wahl eines ungeeigneten Verfestigungsmodells die maximal auftretenden Zugeigenspannungen unterschätzt werden [Janosch, 2005; Janosch, 2008; Wohlfahrt und Dilger, 2008]. Eine eingehende Diskussion und Klärung der Frage welches Materialgesetz je nach geschweißtem Werkstoff angewendet werden muss, um korrekte Angaben zum möglichen Maximalwert der Zugeigenspannungen zu erhalten und kontraproduktive Fehleinschätzungen zu vermeiden, erscheint daher unumgänglich.

Im zeitlichen Ablauf der Ausbildung schweißbedingter Spannungen treten während der eritzungsbedingten Ausdehnung nahtnaher Zonen des Grundwerkstoffs – als Folge der Behinderung durch kalt gebliebene Bereiche - zunächst Druckspannungen auf, die als Folge der Schrumpfung beim Abkühlung in Zugspannungen übergehen. Es muss davon ausgegangen werden, dass mit dieser Spannungsumkehr der Bauschingereffekt auftritt. Dieser Effekt kann bei der Eigenspannungsberechnung z.B. durch Anwendung des Modells der kinematischen Verfestigung berücksichtigt werden. Für austenitische Stähle ist bekannt, dass sie neben einer starken Verfestigung auch einen stark ausgeprägten Bauschingereffekt bei plastischer Verformung aufweisen. Deshalb wurde für die Eigenspannungsberechnungen an einer zweilagig mit Einschweißungen versehenen austenitischen Platte in dem zitierten Ringversuch die Anwendung des kinematischen Verfestigungsmodells vorgegeben. Die durchgeführten Rechnungen ergaben im Bereich von Schweißnaht und Wärmeeinflusszone (WEZ) überwiegend ein breites Plateau der Längseigenspannungen mit Zugspannungswerten im Bereich der Werkstoffstreckgrenze (275 MPa) oder einem Maximum in Nahtmitte (290 MPa). Eigenspannungsmessungen mit den verschiedensten Techniken zeigten aber in der WEZ Zugspannungmaxima der Längseigenspannungen mit viel höheren Beträgen von 350 MPa bis über 500 MPa.

Werkstoffwissenschaftliche Veröffentlichungen weisen jedoch darauf hin, dass die Wirksamkeit des Bauschingereffektes stark werkstoff- und temperaturabhängig ist. Für einen austenitischen Stahl kann zum Beispiel eine Mischung aus etwa gleichen Anteilen kinematischer und isotroper Verfestigung bei Berechnung von Eigenspannungen infolge plastischer Verformungen bei Raumtemperatur angenommen werden [Manninen et al., 2009]. Noch wichtiger erscheint, dass bei plastischen Verformungen unter erhöhten Temperaturen (z.B. bei 480 °C), wie sie beim Schweißen in der WEZ auftreten, der Einfluss des Bauschingereffektes geringer wird [Matay et al., 1983].

In neueren 3D-Berechnungen wurden deshalb für den obgenannten austenitischen Stahl [Wohlfahrt, 2009] das Modell der isotropen Verfestigung, sowie verschiedene gemischte Verfestigungsmodelle, angewendet. Die bei Annahme rein isotroper Verfestigung erzielten Berechnungsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Die Wahl des Verfestigungsmodells kann daher als entscheidend für die Qualität der Ergebnisse der Eigenspannungsmodellierung angesehen werden. Die Variation weiterer Modellansätze wie beispielsweise die Modellierung des Zusatzwerkstoffes („chewing gum“ Methode oder Elementaktivierung) oder verschiedene Varianten der Modellierung der statisch bestimmten Auflagerung zeigten einen nur sehr geringen Einfluss auf die Eigenspannungen. Die

Vereinfachungen durch eine 2D-Modellierung hingegen lassen nur unzureichende Resultate erzielen. Die zu verschiedenen Zeitschritten berechneten schweißbedingten Verformungen und Verfestigungen ermöglichen wichtige Schlussfolgerungen zur Erklärung der Ergebnisse und der Unterschiede zwischen Berechnungen mit isotroper und mit kinematischer Verfestigung.

Mit der erfolgreichen Berechnung von Schweißeigenstressungen unter Verwendung des isotropen Verfestigungsmodells im Beispielfall eines austenitischen Stahles ergab sich die Frage, mit welchem Verfestigungsmodell Berechnungen bei den allgemeinen Baustählen zu nutzbaren Ergebnissen führen. Bei diesen Stählen mit ihrem gegenüber Austeniten geringeren Verfestigungsexponenten spielen verformungsinduzierte Verfestigungen allenfalls in nicht umwandelnden Bereichen eine geringe, umwandlungsbedingte Aufhärtungen und Eigenspannungsanteile aber eine große Rolle, so dass eine Prüfung der Anwendbarkeit des kinematischen Verfestigungsmodells mit seiner Annahme verformungsbedingter Verfestigungen durch Einbeziehen des Bauschinger-effektes besonders angebracht erscheint. Für den Fall einer Blindnaht an einem Stahlblech der Güte S355 wurden daher ebenfalls Rechnungen sowohl mit kinematischem als auch isotropem Verfestigungsverhalten durchgeführt und diese, wie nachfolgend dargestellt, mit Messungen verglichen.

2 Untersuchungsobjekte und Bedingungen der FE-Berechnungen

2.1 Neue Berechnungen zu dem IIW Ringversuch an einem austenitischen Stahl

Die in dem Ringversuch verwendeten austenitischen Stahlplatten des Typ 316L waren auf jeweils drei Stiften statisch bestimmt gelagert. Auf dieser Platte wurden nach Ausfräsen einer U - förmigen Nahtvorbereitung zwei Blindnähte nacheinander geschweißt. Detaillierte Angaben zu den Bedingungen der neuen numerischen Untersuchungen und zu den berechneten Temperaturverläufen an dem austenitischen Stahl finden sich in [Wohlfahrt, 2009].

2.2 Berechnungen zu Blindnahtschweißungen an einem Baustahl der Güte S355

Die zum Vergleich verwendeten Messergebnisse stammen von Stahlblechen eines S355J2 der Dicke 9,2 mm. Nach dem Einschweißen einer Blindnaht in die ebenfalls nicht eingespannten Bleche, wurden die Eigenspannungen röntgenographisch bestimmt. [Nitschke, 1985]. Unter Zugrundelegung der angewandten Schweißbedingungen erfolgten für diese Bleche FE - Eigenspannungsberechnungen mit dem kommerziellen FEM Programm SYSWELD Version 2007 und 2008. Dabei wurden die Schweißeigenstressungen sowohl mit einem isotropem Verfestigungsmodell [Loose, 2008, Loose und Sakkietitbutra, 2008] als auch mit kinematischer Verfestigung berechnet. Außer den Verfestigungsmodellen sind zur Vergleichbarkeit der Rechenergebnisse die gleichen Rechenmodelle und Prozessparameter wie beim austenitischen Stahl verwendet worden. Vereinfachend wurde hierbei die Symmetrie ausgenutzt und die Berechnungen nur am halben System vorgenommen. Dabei fand das in der

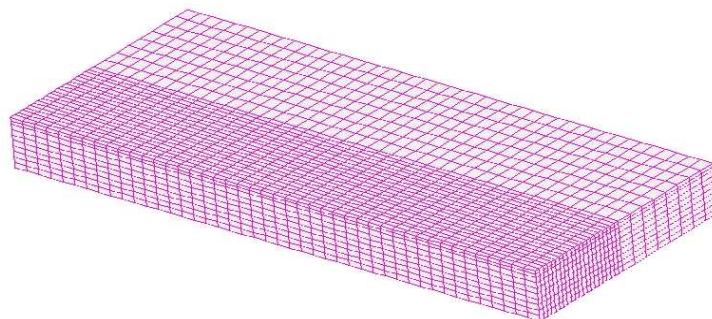


Abbildung 1: modelliertes Netz für die Berechnung der Schweißeigenstressungen einer Stahlplatte aus einem Stahl der Güte S355

Abbildung 1 dargestellte Netz mit 15840 linearen Volumenelementen des Typs 3008 Verwendung.

Für die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungsbeziehungen der ferritischen Phase wurden die in [Peil und Wichers, 2004] für das ferritisch-perlitische Grundmaterial vorgestellten gemessenen Werte genutzt. Die Festigkeiten der einzelnen Gefüge wurden nach dem Verhältnis der Festigkeiten der Messwerte der einzelnen Gefüge bei Raumtemperatur skaliert und nach den unter isothermen Bedingungen ermittelten Warmzugversuchen ähnlich modelliert. Mithilfe von Mischungsregeln lassen sich hieraus die Materialeigenschaften den Gefügeanteilen entsprechend gewichtet berechnen. Die Verfestigungskurven der Einzelphasen wurden hierzu analog skaliert. Oberhalb einer Temperatur von 1300 °C wurden in der strukturmechanischen Berechnung die verfestigungsrelevanten kumulierten plastischen Dehnungen gelöscht. Ein Zurücksetzen der plastischen Dehnungen bei Feststoffphasentransformationen erfolgte nicht.

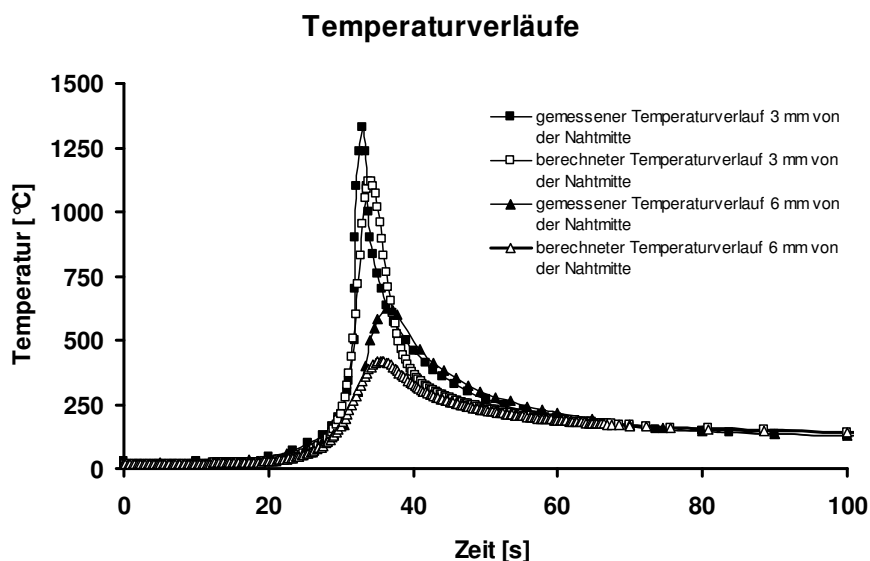


Abbildung 2: Vergleich von modellierten und gemessenen Temperaturverläufen

Abbildung 2 zeigt sowohl die modellierten als auch gemessenen Temperaturverläufe an zwei Messpunkten die jeweils 3 mm und 6 mm von der Naht entfernt sind. Das modellierte Temperaturfeld ist etwas schmaler als die im Experiment beobachteten Temperaturen. Es gibt den prinzipiellen Verlauf für die Berechnung des mechanischen Verhaltens der Platte ausreichend genau wieder.

3 Ergebnisse

3.1 Austenitischer Stahl

Die mit dem Materialgesetz „isotrope Verfestigung“ berechneten Eigenspannungen in einer Oberflächenschicht der austenitischen Stahlplatte sind [Wohlfahrt, 2009] zu entnehmen. Dort wird deutlich, dass beidseitig entlang der Schweißnaht Zug-Längseigenspannungen mit hohen Beträgen verlaufen, während im Nahtbereich selbst nur geringere Zugeigenspannungsbeträge auftreten. Die Quereigenspannungen weisen eine ungleichmäßige Verteilung über die Nahtlänge auf. Die höchsten Zugeigenspannungen sind zum Nahtanfang oder Nahtende hin verschoben, was in Anbetracht des kontinuierlichen Schweißprozesses mit vorgegebener Geschwindigkeit verständlich erscheint. Im Nahtbereich liegen signifikante Quer-Druckeigenspannungen vor.

Im Folgenden werden für den Vergleich von Ergebnissen, die mit unterschiedlichen Materialgesetzen berechnet wurden, und auch für den Vergleich mit gemessenen Eigenspannungsverteilungen die Eigenspannungsverläufe längs einer Linie quer zur Naht im Abstand von 90 mm vom Nahtende betrachtet. Dabei werden bevorzugt Vergleiche der Längseigenspannungen nach dem Schweißen der 2. Lage vorgenommen, da bei den Ergebnissen des Ringversuches die erwähnten Diskrepanzen zwischen Messung und Rechnung insbesondere für die Längseigenspannungen bedeutsam waren, während sich bei den Quereigenspannungen weniger bedeutsame Unterschiede ergaben.

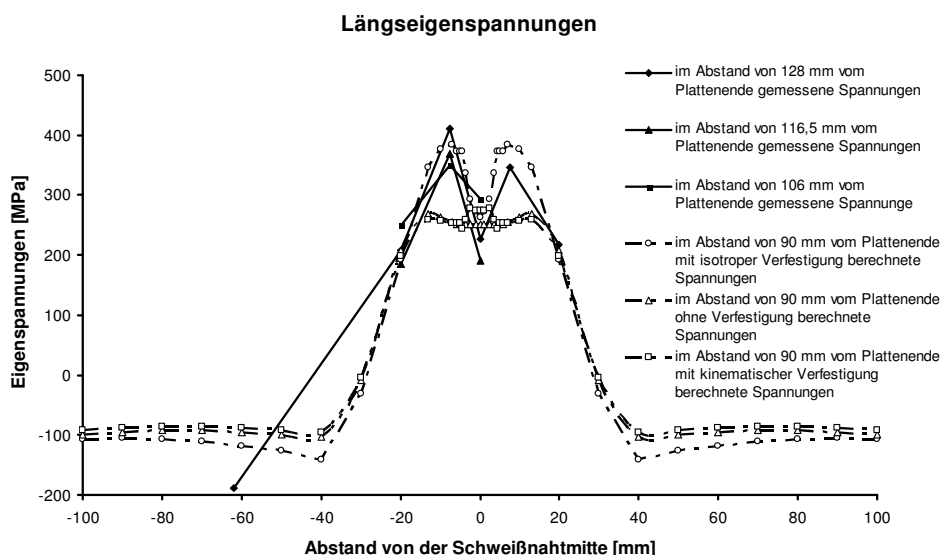


Abbildung 3: Vergleich gemessener und berechneter Längseigenspannungen an der austenitischen Stahlplatte, Berechnungen mit verschiedenen Verfestigungsmodellen

Abbildung 3 stellt deutlich heraus, wie stark bei den Längseigenspannungen die berechneten Eigenspannungsverläufe von gemessenen Verläufen abweichen, wenn kein isotropes Verfestigungsmodell verwendet wird. Dabei werden Berechnungen für eine Oberflächenschichtdicke von 1 mm mit Messungen mittels der Bohrlochmethode in Kombination mit elektronischer Speckle-Interferometrie verglichen, bei denen die Schichtdicke, über die die Eigenspannungen integrierend erfasst werden, ebenfalls 1 mm betrug. Während sich bei Berechnung mit isotroper Verfestigung eine recht gute Übereinstimmung mit den gemessenen Verläufen und insbesondere mit den Zugspannungsmaxima ergibt, lassen sich bei Berechnung mit kinematischer Verfestigung gar keine Zugeigenspannungsmaxima am Nahtrand darstellen und das flache Eigenspannungsplateau bleibt – wie auch bei den Ergebnissen im Rahmen des Ringversuches – etwa auf Höhe der Raumtemperaturstreckgrenze des Austenits. Interessant erscheint, dass die Berechnung mit ideal elastisch-plastischem Materialgesetz praktisch auf denselben Eigenspannungsverlauf führt, wie die Berechnung mit der Annahme kinematischer Verfestigung.

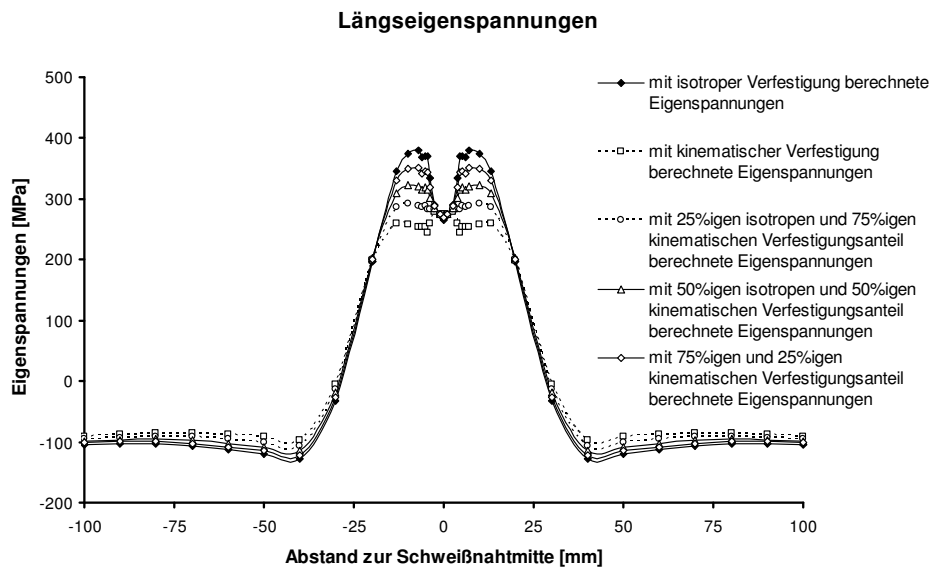


Abbildung 4: Vergleich der mit unterschiedlichen Verfestigungsmodellen berechneten Längseigenspannungen an der Oberfläche der austenitischen Stahlplatte

In Ergänzung zu diesen Ergebnissen stellt Abbildung 4 dar, dass bei Berechnungen mit Kombinationen aus isotroper und kinematischer Verfestigung sich zwar noch Zugeigenspannungsmaxima in der nahtnahen WEZ ergeben, diese aber immer geringer ausfallen, je größer der verwendete Anteil an kinematischer Verfestigung wird. Bei Berechnung unter Verwendung des rein kinematischen Verfestigungsmodells erhält man – wie schon in Abbildung 3 dargestellt – statt der Zugeigenspannungsmaxima in der WEZ ein Zugspannungsplateau etwa in Höhe der Raumtemperaturstreckgrenze und leicht erhöhte Zugspannungswerte in Nahtmitte, die die Fließgrenze der Materials bei Raumtemperatur überschreiten.

In Abbildung 5 ist der Aufbau der Längsspannungen zu verschiedenen charakteristischen Zeitpunkten während des Schweißens der 2. Lage dargestellt. Die vom Schweißen der 1. Lage herrührenden Eigenspannungen mit Zugspannungsmaxima von etwa 300 MPa (3000 s) werden beim Schweißen der 2. Lage zunächst abgebaut und es entstehen im nahtnahen Bereich Druckspannungen von bis zu -310 MPa (3245 s). Mit dem Erreichen der Maximaltemperatur (3269 s) sind diese Druckspannungen schon wieder verringert. Im nahtnahen WEZ-Bereich und in der jetzt vorhandenen 2. Nahtlage wachsen Zugspannungen an, wobei deren Beträge in der Naht immer etwas geringer als in der WEZ ausfallen (z.B. nach 3301 s). Dies lässt sich damit begründen, dass die erzeugten Spannungen nach den lokal vorhandenen Festigkeiten gewichtet werden. Beim Abkühlen steigt die temperaturabhängige lokale Fließgrenze wieder an. Im aufgeschmolzenen Nahtbereich ist das Material nicht vorverfestigt, so dass Längseigenspannungen etwa in Höhe der Raumtemperaturstreckgrenze (275 MPa) zurückbleiben. In dem beim Erhitzen verfestigten nahtnahen Bereich können jedoch Längseigenspannungen von bis zu 380 MPa nach dem Abkühlen (15000 s) aufgenommen werden. Mit dem Anwachsen der Zugspannungen stellen sich in nahtferneren Zonen Gleichgewichts-Druckspannungen mit zunächst zunehmenden Beträgen ein (z.B. 3301 s), die schließlich immer größere Querschnittsbereiche erfassen (15000 s).

Längseigenspannungen (2. Lage)

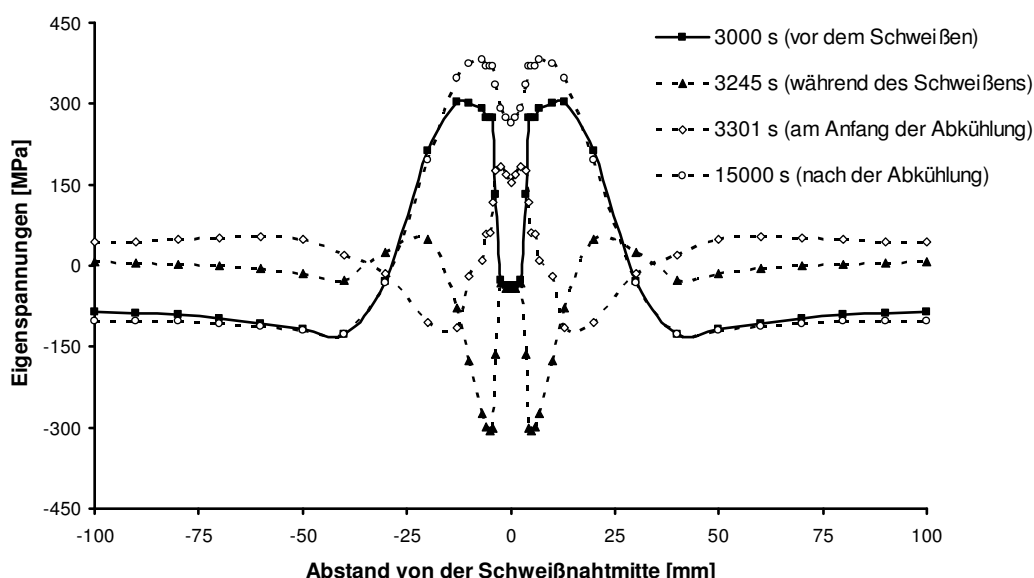


Abbildung 5: Mit isotroper Verfestigung berechnete Längsspannungen zu verschiedenen charakteristischen Zeitpunkten während des Schweißens der 2. Lage der austenitischen Stahlplatte

Das Entstehen der Druckspannungen im nahtnahen WEZ-Bereich während der Erhitzungsphase (z.B. 3245 s) ist für die Ausbildung hoher Eigenspannungen oberhalb der Raumtemperaturstreckgrenze des Grundwerkstoffs entscheidend. Da die erhitzungsbedingten Druckspannungen die mit steigender Temperatur sinkende Druckfließgrenze des Stahls erreichen, werden plastische Verformungen eingepreßt, die zu Verfestigungen im nahtnahen WEZ-Bereich führen. Die eingetretenen Verfestigungen bleiben offenbar auch noch richtungsunabhängig während der Abkühlung wirksam und ermöglichen einen Anstieg der Streckgrenze und damit auch der abkühlbedingten Zugeigenspannungen bis über den ursprünglichen Wert der Raumtemperaturstreckgrenze.

Der Nachweis der entstandenen und zu verschiedenen Zeiten vorliegenden Verfestigungen oder Streckgrenzenerhöhungen ergibt sich aus Abbildung 6. Nach der deutlich erkennbaren Verfestigung durch die 1. Lage sinkt die Fließ- bzw. Streckgrenze bis zum Erreichen der Maximaltemperatur (3269 s) im Nahtbereich auf Null ab. Im Verlauf der Abkühlung steigt die Fließgrenze in der Naht temperaturbedingt und in der an die Naht angrenzenden WEZ temperatur- und verfestigungsbedingt wieder an (3301 s) bis nach 15000 s mit vollständiger Abkühlung der Endzustand erreicht wird. Die in der WEZ letztlich eingetretene Verfestigung ergibt sich als Differenz aus dem Endwert von Fließ- bzw. Streckgrenze und deren Ausgangswert. Die Fließgrenzenmaximalwerte in der Kurve für den Endzustand belegen, dass auch noch höhere Zugeigenspannungen möglich wären als unter der Annahme eines isotropen Verfestigungsverhaltens berechnet.

Verfestigungs- und temperaturabhängige Fließgrenze (2. Lage)

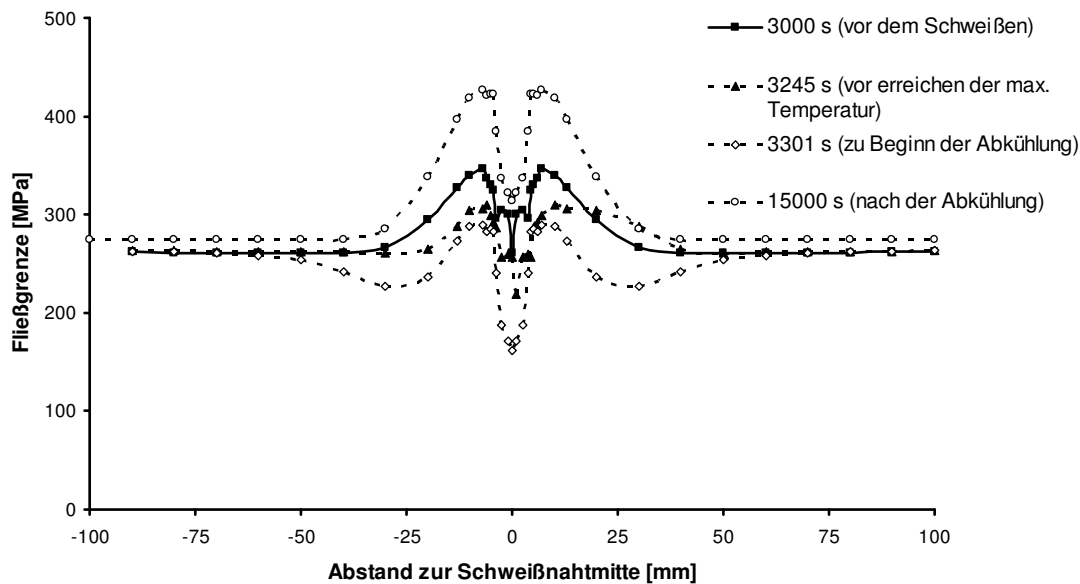


Abbildung 6: Verfestigungsbedingte Streckgrenzenerhöhungen zu verschiedenen Zeiten während des Schweißens der 2. Lage (isotrope Verfestigung)

Das Modell isotroper Verfestigung stellt die aus den Verfestigungen während der Erhitzungsphase resultierenden Streckgrenzenerhöhungen nach Lastumkehr in der Abkühlphase in Rechnung. Die Anwendung des Modells kinematische Verfestigung bedeutet dagegen mit der vollen Berücksichtigung des Bauschinger-effektes, dass die im 1. Zyklus (Druckspannungen in der Erhitzungsphase der WEZ) erreichte verfestigungsbedingte Streckgrenzenerhöhung am Ende des 2. Zyklus (Zugspannungen in der Abkühlphase der WEZ) nicht zur Geltung kommt. So ergibt sich nach vollständiger Abkühlung ungefähr wieder der Streckgrenzenwert im Ausgangszustand, wie dies in dem gegenüber den Messungen zu tief liegenden Plateau der Zugeigen-spannung aus Berechnungen mit kinematischer Verfestigung zum Ausdruck kommt. Bei Eigenspannungsberechnungen für Schweißverbindungen aus austenitischen Stählen kann die Benutzung des Modells kinematische Verfestigung also zu einer deutlichen Unterschätzung der Zuglängseigen-spannungen führen.

3.2 Baustahl S355

Allgemeine Baustähle, wie auch der Stahl S355, besitzen einerseits geringere Verfestigungsexponenten als der austenitische Stahl, auf der anderen Seite haben bei diesen Stählen aber die Phasenumwandlungen beim Erhitzen und Abkühlen eine wesentliche Bedeutung für die Eigenspannungsbildung. Die bei der Abkühlung von Schweißtemperatur eintretende Umwandlung des Austenits, die je nach Abkühlgeschwindigkeit zu Ferrit, Bainit oder Martensit führt, geht mit einer Volumenvergrößerung einher, die durch nicht umwandelnde, kälter gebliebene Zonen behindert wird und so einen gesonderten Eigenspannungsanteil, die Umwandlungseigen-spannungen, bedingt. Je nach Schweiß- bzw. Abkühlbedingungen können sich durch Überlagerung des schrumpfungsbedingten und des umwandlungsbedingten Eigenspannungsanteils sehr unterschiedliche, komplexe Eigenspannungsverläufe ergeben, die durch zahlreiche Messergebnisse belegt und umfassend gedeutet sind [Wohlfahrt, 1986; Nitschke-Pagel und Wohlfahrt, 2005]

Erst neuerdings konnten die Autoren zeigen, dass gemessene Eigenspannungsverläufe mit typischen umwandlungsbedingten Charakteristika [Nitschke, 1985] mit der Modellannahme

isotroper Verfestigung recht gut nachvollzogen werden können [Loose, 2008; Loose und Sakkiettibutra, 2008]. Hierzu wird nachfolgend zusätzlich geprüft, zu welchen Ergebnissen das Modell der kinematischen Verfestigung bei der Eigenspannungsberechnung für umwandlungsbehaftete Baustähle wie dem S355 führt, obwohl zu erwarten ist, dass verformungsinduzierte Verfestigungen bzw. Streckgrenzenänderungen, wie sie dieser Modellansatz berücksichtigt, infolge der Gefügeumwandlungen bei solchen Stählen keine Rolle spielen.

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen zunächst die mit den beschriebenen FE-Berechnungen unter Verwendung des Materialgesetzes isotroper Verfestigung ermittelten Eigenspannungen in einer Oberflächenschicht eines Stahlbleches aus S355. In Abbildung 7 sind deutlich die beidseitig entlang der Schweißnaht verlaufenden Zugeigenspannungen mit hohen Beträgen zu sehen. Im Nahtbereich selbst hebt sich aus geringeren Zugeigenspannungsbeträgen ein kleines Maximum ab. Abbildung 8 lässt erkennen, dass eine nicht ganz gleichmäßige Verteilung der Quereigenspannungen über die Nahtlänge auftritt. Dass die höchsten in Nahtmitte liegenden Zugeigenspannungen zum einen Nahtende hin verschoben sind, erscheint in Anbetracht des kontinuierlichen Schweißprozesses mit vorgegebener Geschwindigkeit verständlich. An den Nahtändern liegen merkliche Druckeigenspannungen vor.

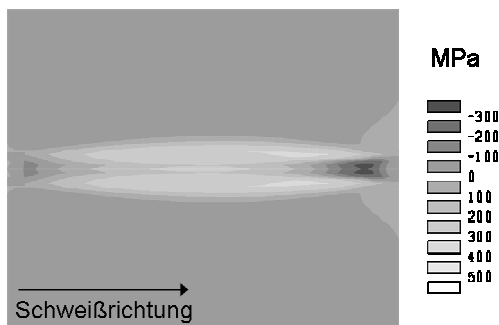


Abbildung 7: Längseigenspannungen nach der 2. Lage einer Einschweißung an der Oberseite einer Platte aus einem Baustahl der Güte S355J2, isotropes Verfestigungsmodell

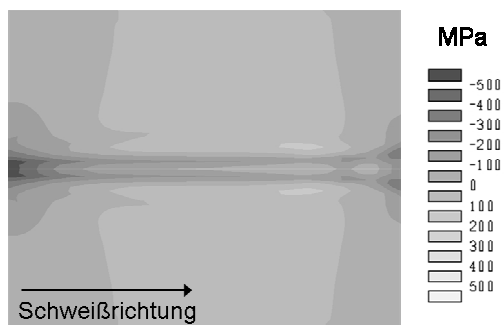


Abbildung 8: Quereigenspannungen nach der 2. Lage einer Einschweißung an der Oberseite einer Platte aus einem Baustahl der Güte S355J2, isotropes Verfestigungsmodell

Für Vergleiche von berechneten und gemessenen Eigenspannungen werden im Folgenden wieder Verläufe längs einer Linie quer zur Naht herangezogen. Die Abbildungen 9 bis 11 zeigen röntgenographisch gemessene Eigenspannungsverläufe an 9,2 mm dicken Blechen aus dem Stahl S355 mit Einschweißungen jeweils im Vergleich mit berechneten Eigenspannungsverläufen. Berechnungen mit isotroper Verfestigung geben die Abfolge von Maxima und Minima der Längs- und Quereigenspannungen sowohl qualitativ also auch quantitativ treffend wieder, können also die durch die Phasenumwandlung und die Überlagerung von umwandlungsbedingten und schrumpfungsbedingten Anteilen beeinflusste Eigenspannungsbildung beim Stahl S355 nachvollziehen. Die bei der kleinen Wärmeeinbringung von 5,8 kJ/cm als umwandlungsbedingt interpretierten Zugmaxima der Längseigenspannungen und die Einsattelung zur Nahtmitte hin werden bei Annahme isotroper Verfestigung mit Abweichungen von unter 100 MPa wiedergegeben (Abbildung 9) und auch der kleine schrumpfungsbedingte Querspannungsgipfel in Abbildung 10, wird gut in das Tal umwandlungsbedingter Druckeigenspannungen eingebunden. Beim Schweißen mit geringer Wärmeeinbringung (5,8 kJ/cm) und 300 °C Vorwärmung wächst aufgrund der veränderten Abkühlbedingungen (höhere Umwandlungs-Temperaturbereich) ein viel ausgeprägterer schrumpfungsbedingter Spannungsgipfel in Nahtmitte aus dem umwandlungsbedingten Quereigenspannungstal auf (Abbildung 11) als in Abbildung 10. Die Berechnung unter Annahme isotroper Verfestigung bildet auch dieses typische Maximum korrekt ab, wenngleich

es ein wenig bis in den Zugspannungsbereich überhöht ist [Loose und Sakkietitubtra, 2008].

Für Berechnungsergebnisse unter Annahme kinematischer Verfestigung gilt die Aussage einer korrekten Wiedergabe von Maxima und Minima in den Eigenspannungsverteilungen nur noch in sehr eingeschränktem Maße. Die so berechneten Eigenspannungen weichen wesentlich stärker von den Messwerten ab als bei Berechnungen mit isotroper Verfestigung (Abbildung 9 bis 11). Zugeigenspannungmaxima werden dabei nicht nur stark überschätzt (Abbildung 9), sondern auch an Stelle von Spannungmaxima aufgezeigt, die gemäß Messung noch im Druckbereich bleiben (Abbildung 10 und 11). Außerdem lassen sich die umwandlungsbedingt weit in den Druckbereich reichenden Minima der Quereigenspannungen, und damit wesentliche Charakteristika der Schweiß eigenspannungen bei Baustählen, unter Annahme kinematischer Verfestigung nicht richtig erfassen, allenfalls andeuten (Abbildungen 10 und 11).

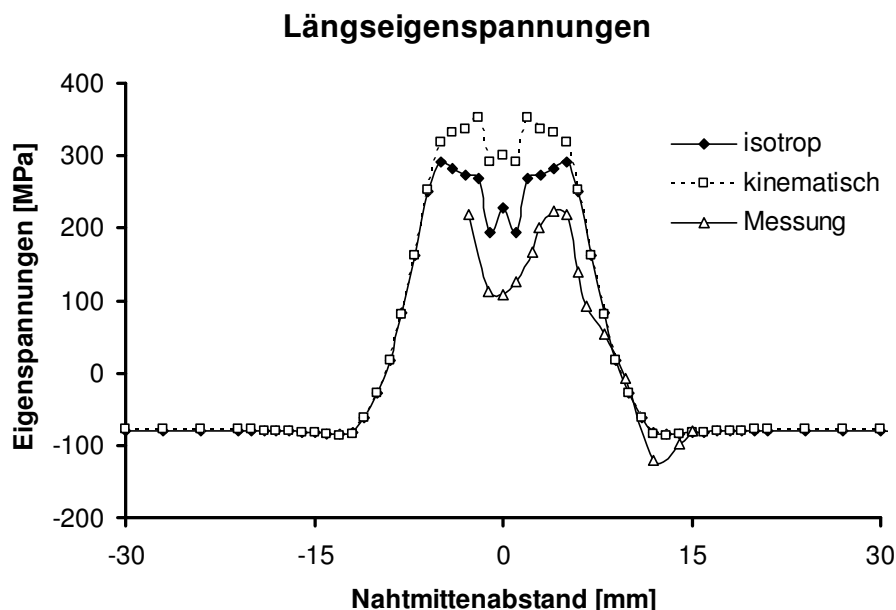


Abbildung 9: Vergleich gemessener und berechneter Längseigenspannungen, Blech von 9,2 mm Dicke aus Stahl S355 mit Aufschweißung, Streckenenergie 5,8 kJ/cm, [Messungen Nitschke, 1985; Berechnung isotrop Loose, 2008]

Die Ergebnisse belegen eindeutig, dass auch beim Stahl S355 nur der Modellansatz isotrope Verfestigung zur Eigenspannungsberechnung geeignet ist und messtechnisch gut abgesicherte komplexe Eigenspannungsverteilungen mit schrumpfungs- und umwandlungsbedingten Maxima und Minima recht gut nachvollziehen kann.

Die mit dem Modell kinematische Verfestigung berechneten und durchweg in den Zugbereich verschobenen Eigenspannungsverteilungen mit den überschätztem Zugeigenspannungmaxima lassen zur Deutung folgende Vermutung zu: beim Schweißen umwandlungsbehafteter Stähle wechseln mit steigender und später sinkender Temperatur Zug- und Druckspannungen in der WEZ bzw. Naht mehrfach ab. Der Modellansatz kinematische Verfestigung berücksichtigt vermutlich jede Spannungsumkehr im Sinne des Bauschingereseffektes, so dass sich je nach Zyklenzahl bzw. Spannungsrichtung am Abkühlungsende eine verformungsbedingt erhöhte oder erniedrigte Streckgrenze ergibt. Wird die Eigenspannungsbildung mit einem Druckzyklus abgeschlossen, rechnet das Modell mit einer erhöhten Streckgrenze, was erklären könnte, dass die umwandlungsbedingten lokalen Druckspannungsminima nicht wiedergegeben werden, sondern die Eigenspannungsverläufe mit korrekt widergespiegelten Maxima und Minima in den Zugbereich angehoben sind.

Es bleibt zu klären, inwiefern verformungsbedingte Streckgrenzenerhöhungen die Eigenspannungsbildung umwandelnder Stähle beeinflussen können, obwohl anzunehmen ist, dass die Streckgrenzenerhöhungen in Zonen mit einer Gefügeumwandlung nicht wirksam werden [Leblond et. al., 1986, van der Aa, 2007]. Die Klärung dieser Frage sollte im Rahmen von umfassenderen Vergleichen von berechneten und gemessenen Eigenspannungen bei weiteren typischen Vertretern wichtiger Stahlgruppen erfolgen.

Quereigenspannungen

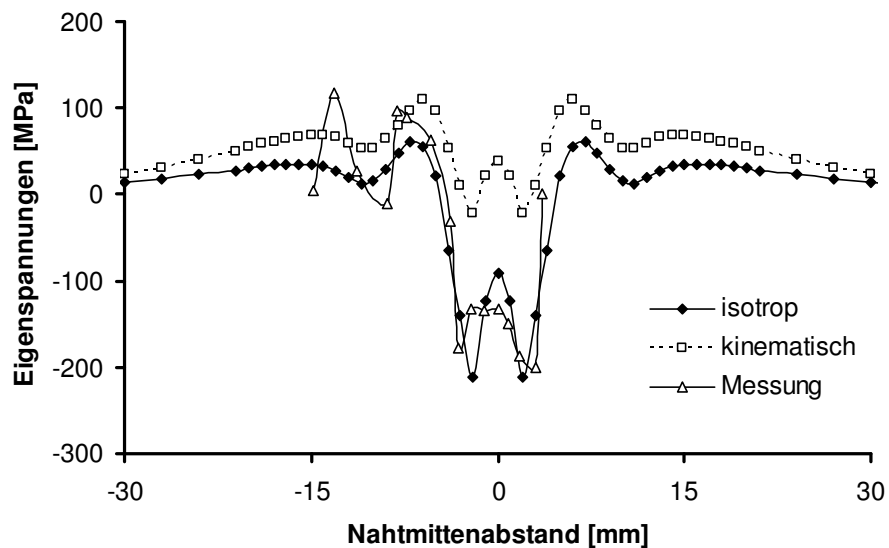


Abbildung 10: Vergleich gemessener und berechneter Quereigenspannungen, Blech von 9,2 mm Dicke aus Stahl S355 mit Aufschweißung, Streckenenergie 5,8 kJ/cm, [Messungen Nitschke, 1985; Berechnung isotrop Loose, 2008]

Quereigenspannungen

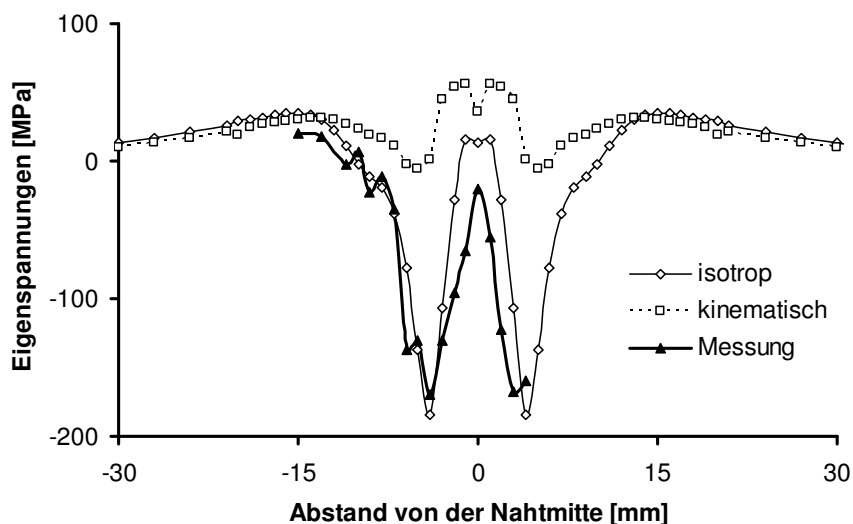


Abbildung 11: Vergleich gemessener und berechneter Quereigenspannungen, Blech von 9,2 mm Dicke aus Stahl S355 mit Aufschweißung, Vorwärmung bei 300 °C und Streckenenergie 5,8 kJ/cm, [Messungen Nitschke, 1985; Berechnung isotrop Loose und Sakkietitbutra, 2008]

4 Zusammenfassung und Folgerungen

Die dargestellten Ergebnisse belegen, dass nicht nur bei einem austenitischen Stahl, sondern auch beim Baustahl S355, Eigenspannungsberechnungen mit dem Modellansatz isotroper Verfestigung in guter Übereinstimmung mit den gemessenen Verläufen stehen und sowohl hohe Zugeigenspannungsmaxima als auch Druckspannungstäler gut wiedergeben können.

Der Modellansatz mit kinematischer Verfestigung ergab bei einem austenitischen Stahl anstelle von Zugeigenspannungsmaxima ein flaches Eigenspannungsplateau auf niedrigerem Niveau und bei einem Baustahl erheblich von gemessenen Eigenspannungsverteilungen abweichende Eigenspannungswerte und überschätzte Zugeigenspannungen. Für beide Fälle, lassen sich detaillierte Begründungen für die Abweichungen von abgesicherten Messergebnissen anführen, die darauf hinauslaufen, dass bei der Berechnung von Schweißigenspannungen mit dem Modell kinematischer Verfestigung der Bauschinger Effekt ungerechtfertigt einbezogen wird. Wie eingangs angeführt, ist davon auszugehen, dass dieser Effekt aufgrund der hohen Temperaturen in der WEZ von Schweißverbindungen gar nicht wirksam sein kann. Dies bedeutet, dass das Modell kinematischer Verfestigung für Schweißigenspannungsberechnungen nicht geeignet ist.

Schließlich bleibt zu klären, ob sich bei Baustählen die Übereinstimmung von Berechnungs- mit Messergebnissen noch weiter verbessern lässt, indem mögliche Verfestigungen in Zonen ohne Gefügeumwandlungen bei der Eigenspannungsberechnung berücksichtigt werden. Zur Absicherung der Brauchbarkeit des Modellansatzes isotrope Verfestigung erscheint eine Klärung dieser Frage im Rahmen von umfassenderen Vergleichen von berechneten und gemessenen Eigenspannungen bei weiteren typischen Vertretern wichtiger Stahlgruppen dringend notwendig.

5 Literatur

- Janosch, J.J. (2005), „Round robin phase II - 3D modelling“, Updated results. IIW-X/XIII/XV-RSDP-114-05.
- Janosch, J.J. (2008), „International Institute of Welding work on residual stress and its application to industry“. *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, 85 (2008) pp. 183-190.
- Leblond, J.B.; Mottet, G. and Devaux, J.C. (1986), „A Theoretical and Numerical Approach to the Plastic Behaviour of Steels During Phase Transformation I: Derivation of General Relations“, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 34(1986), No.4, pp. 395-409.
- Loose, T. (2007), „Einfluss des transienten Schweißvorganges auf Verzug, Eigenspannungen und Stabilitätsverhalten axial gedrückter Kreiszyinderschalen aus Stahl“. Dr.-Ing. Diss. Karlsruhe 2007.
- Loose, T. and Sakkietitbutra, J. (2008), „Leistungsmerkmale der Schweißstruktursimulation“, *Schweißen und Schneiden*, 9(2008), pp. 487-491.
- Manninen, T.; Myllykoski, P.; Taulavuori, T.; Korhonen, A.S. (2009), „Large-strain Bauschinger effect in austenitic stainless steel sheet“. *Materials Science and Engineering*, A 499 (2009) pp. 333-336.
- Matay, M.C., Carr, M.J. and Krauss, G. (1983), „The Bauschinger Effect in a Nitrogen-strengthened Austenitic Stainless Steel“. *Materials Science and Engineering*, 57 (1983) pp. 205-222.
- Nitschke, Th. (1985) „Untersuchungen zum Einfluß des Vorwärmens auf den Eigenspannungszustand von WIG-geschweißten Platten aus St 52-3 und StE70“. Institut für Werkstofftechnik der Universität-Gesamthochschule Kassel, Diplomarbeit, 1985.
- Nitschke-Pagel, Th. and Wohlfahrt, H. (2005), „Residual Stresses in Welded Joints – Sources and Consequences“. *Handbook of Residual Stress*, 2nd edition, Vol.1: Residual Stress: Manufacturing and Materials Processing. Editor J.Lu. Society for Experimental Mechanics, Inc., 2005.

Peil, U. and Wichers, M. (2004), „Schweißen unter Betriebsbeanspruchung - Werkstoffkennwerte für einen S355J2G3 unter Temperaturen bis 1200°C“, *Stahlbau*, 73(2004), No.6, pp. 400-416.

van der Aa, E.M. (2007), „Local Heating during welding: Prediction and Control of Residual Stresses and Buckling Distortion“, Delft 2007.

Wohlfahrt, H. (1986), „Die Bedeutung der Austenitumwandlung für die Eigenspannungsentstehung beim Schweißen“, *Härtereitechn. Mitt.*, 41(1986), No.5, pp. 248-257.

Wohlfahrt, H. and Dilger, K. (2008), „New results of the IIW Round Robin Residual Stress Measurements“. Report on the Experimental Round Robin Tests on Residual Stresses 2008. IIW-Document IIW-XIII-2241-08, IIW-XV-1283-08.

Wohlfahrt, H. (2009), „New calculations checking an adequate materials law. New results on distortion measurements“. Report on the Round Robin Tests on Residual Stresses 2009, IIW-Document IIW-X-1668-09, XIII-2291-09, XV-1326-09.