

# Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen unter Berücksichtigung optisch gemessener und numerisch berechneter Eigendehnungen

P. Schaumann, M. Mickley, C. Keindorf

ForWind – Zentrum für Windenergieforschung, Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover, Germany

**Kurzfassung** Im Rahmen von experimentellen und numerischen Untersuchungen an geschweißten Stumpfnahverbindungen wurde der Einfluss der Eigendehnungen auf die Ermüdungsfestigkeit beurteilt. Dafür wurden beim Fügen zweier Stahlplatten mittels Lichtbogenschweißens zusätzlich zu den Temperaturzyklen auch die transienten Eigenspannungsfelder und Bauteilverzüge messtechnisch erfasst. In Ergänzung zu einer herkömmlichen Messmethode mit Dehnungsmessstreifen kam eine optische Messtechnik zum Einsatz, mit der sowohl eine flächige als auch kontinuierliche Messung der Verschiebungen und Dehnungen über die Zeit möglich war. Die Messergebnisse an der Stumpfnah dienten anschließend zur Verifizierung eines numerischen Modells, um damit verschiedene Einflussparameter quantifizieren zu können. Abschließend erfolgte eine Beurteilung der Ermüdungsfestigkeit des Kerbdetails „Stumpfnah“. Als Vergleichswert diente hierbei die Anrisschwingenspielzahl, die durch das Kerbdehnungskonzept auf Basis der örtlichen Beanspruchung mit Berücksichtigung des Eigenspannungszustandes ermittelt wurde. Mit einem im FE-Modell implementierten Werkzeug können auch für komplexere Schweißkonstruktionen potenzielle Anrissorte qualitativ dargestellt werden.

## 1 Einleitung

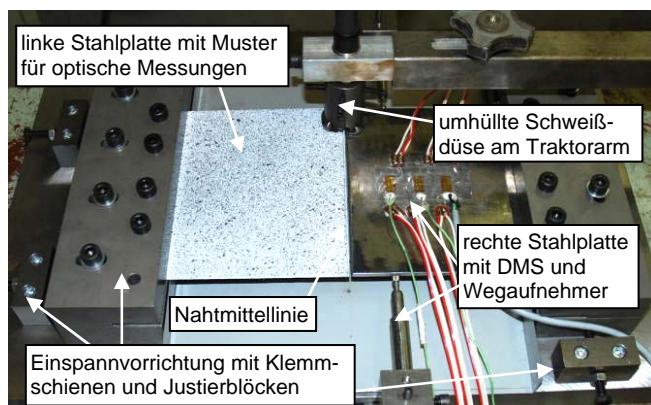
Schweißverbindungen bieten in vielen Fachrichtungen des Ingenieurwesens die Möglichkeit, stählerne Bauteile wirtschaftlich und mit großer Anwendungsvielfalt zu fügen. Allerdings stellen Schweißnähte bei dynamisch beanspruchten Konstruktionen ermüdungskritische Details dar. Dabei wird die Ermüdungsfestigkeit der gefügten Bauteile neben anderen Effekten auch durch die Eigenspannungen beeinflusst, die während der Abkühlphase längs und quer zur Naht in Abhängigkeit vom Einspanngrad entstehen können. Schweißereigenspannungen im Zugbereich wirken sich besonders negativ auf die Ermüdungsfestigkeit aus. Beim Schweißprozess unterliegen die zu fügenden Bauteile insbesondere im nahtnahen Bereich einer hohen Temperaturbeanspruchung. Infolge des nichtlinearen und transienten Temperaturverlaufs entstehen dabei während der Abkühlphase Schweißereigenspannungen und Bauteilverzüge. Je nachdem wie hoch der Einspanngrad der zu schweißenden Stahlplatten ist, können sich unterschiedliche Eigenspannungsniveaus einstellen. Die genaue Kenntnis über diese Eigenspannungen sowohl im Nah- als auch im Fernfeld ist nicht nur für die Wissenschaft, sondern auch für die Wirtschaft von großem Interesse. Zum Beispiel können Schweißverbindungen im Rahmen von Serienfertigungen hinsichtlich ihres Trag- und Ermüdungsverhaltens optimiert werden, wenn die Eigenspannungszustände bekannt sind.

## 2 Experimentelle Untersuchungen

Am Institut für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover wurden Schweißversuche an 4 mm dicken Stahlplatten aus S355 J2G3 durchgeführt. Der Aufbau des Prüfstandes sowie der verwendeten Messtechnik ist in Bild 1 dargestellt. Jeweils zwei quadratische Stahlplatten (150 x 150 mm) wurden mittels Lichtbogenschweißens (MAG) durch eine Stumpfnah verbunden. Die Schweißdüse wurde mit einem Traktorarm geführt, sodass ein vollmechanischer Schweißprozess realisiert werden konnte. Damit konnte eine sehr gleichmäßige Schweißnahtqualität und Schweiß-

nahtform über die gesamte Nahtlänge erzielt werden. Für die V-Nah wurde ein Nahtöffnungswinkel von 45° gewählt.

Die nahtentfernten Ränder der Platten wurden fest eingespannt, um ein hohes Eigenspannungsniveau zu erreichen. Dafür dienten aufgeraute und gehärtete Klemmschienen, zwischen denen die Platten positioniert wurden. Die Klemmwirkung erfolgte durch das Anziehen von jeweils vier Schrauben auf jeder Seite. Durch zusätzliche Justierblöcke konnten die Platten sowohl in Längs- als auch in Querrichtung zueinander positioniert werden. Die Schweißgeschwindigkeit betrug 255 mm/min.



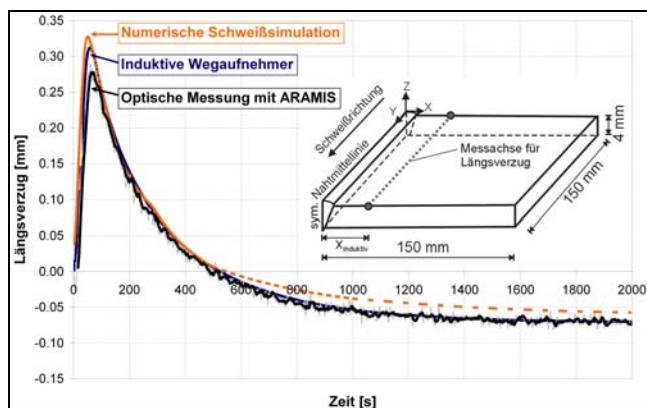
**Bild 1.** Prüfstand und Messtechnik für Schweißversuche

Während bei der rechten Platte induktive Wegaufnehmer und Dehnungsmessstreifen (DMS) zum Einsatz kamen, wurde die linke Platte mit einem hochtemperaturbeständigen und stochastischen Muster, aufgetragen mit einer Airbrush-Pistole, lackiert. Der Schwarz-Weiß-Kontrast ist für das verwendete optische Messsystem ARAMIS erforderlich, um die 3D-Verformungsanalyse durchführen zu können.

Bei diesem Prinzip wird die optisch erfasste Plattenoberfläche in einzelne Facetten eingeteilt und zunächst im Ausgangszustand fotografiert (Stufenbild 0). Während des Versuches werden in regelmäßigen Abständen weitere Bilder aufgenommen, die mit aus der Photogrammetrie bekannten Verfahren auf den

Ausgangszustand (Stufenbild 0) referenziert werden. Somit besteht die Möglichkeit, für jede Facette und für jedes Stufenbild die aktuellen Verschiebungen sowie Dehnungen auszuwerten.

Das Messergebnis hinsichtlich des Längsverzuges ist in Bild 2 dargestellt. Eine Messung des Querverzuges erfolgte nicht, weil sich die nahtentfernten Ränder durch die feste Einspannung nicht verschieben konnten. Die induktiven Wegaufnehmer wurden an den seitlichen Rändern der rechten Platte positioniert und wiesen einen Abstand zur Nahtmittellinie von  $x_{\text{induktiv}} = 30 \text{ mm}$  auf (vgl. Bild 1 mit Bild 2). Die Messachse beim optischen Messsystem ARAMIS auf der linken Platte wurde dementsprechend angepasst. Beim Vergleich der gemessenen Längsverzüge in Bild 2 ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Messmethoden zu erkennen. Durch den Wärmeintrag infolge des Schweißens dehnen sich die Platten zunächst in Längsrichtung der Naht aus. Ab dem Zeitpunkt  $t = 64 \text{ s}$  also  $30 \text{ s}$  nach Schweißende reduziert sich die Längsausdehnung wieder exponentiell bis sogar eine Längsschrumpfung vorliegt. Lediglich der Spitzenwert bei  $64 \text{ s}$  ist bei der optischen Verformungsanalyse etwas geringer, weil die Facetten des optischen Messmusters die Ränder der Platte nicht vollständig erfassen konnten. Die Länge der Messachse betrug  $146 \text{ mm}$ , der eigentliche Randabstand war jedoch  $150 \text{ mm}$ . Des Weiteren ist in Bild 2 zu erkennen, dass der mit ARAMIS gemessene Längsverzug einen rauerer Verlauf aufweist als bei den induktiven Wegaufnehmern. Es wird vermutet, dass die raue Oberfläche der aufgespritzten Lackschicht die Messqualität zusätzlich beeinflusst.

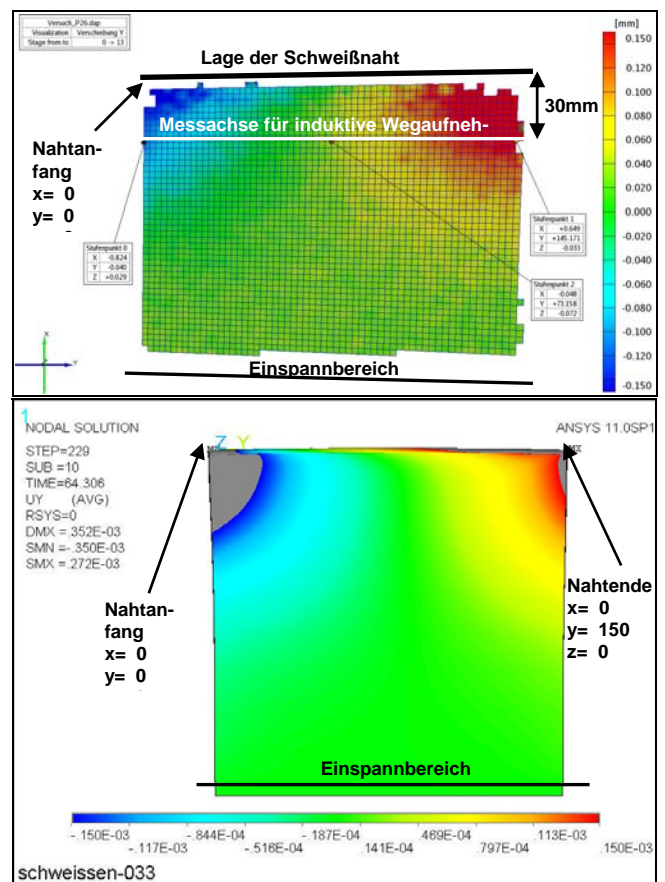


**Bild 2.** Vergleich der Messung hinsichtlich des Längsverzuges

Allerdings besitzt die optische Methode den Vorteil, dass mit den damit erzielten Messergebnissen nicht nur eindimensionale (punktuell), sondern auch zweidimensionale (vollflächige) Vergleiche möglich sind. Diese Messergebnisse sind sehr gut für die Überprüfung bzw. Validierung von FE-Modelle für numerische Schweißsimulationen geeignet.

Als Beispiel wird in Bild 3 der optisch gemessene Längsverzug einem numerisch berechneten Ergebnis gegenübergestellt. Als Zeitpunkt wurde  $t = 64 \text{ s}$  gewählt, weil dann gemäß Bild 2 der Längsverzug seine Maximalwerte aufweist. Der Koordinatenursprung

befindet sich in Bild 3 (oben) am linken Rand beim Nahtanfang. Die y-Achse verläuft in positiver Richtung entlang der Nahtmittellinie. Während die Facetten am linken Rand negative Werte aufweisen, also sich weiter nach links ausdehnen, verschieben sich die Facetten am rechten Rand weiter in positiver y-Richtung. Insgesamt betrachtet, dehnt sich die Platte zu beiden Seiten aus. Dies entspricht auch dem numerischen Ergebnis nach Bild 3 unten. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Min/Max-Werte der Legende angepasst, d.h. die grau markierten Randbereiche im Strukturplot von ANSYS weisen Verschiebungen über  $0.15 \text{ mm}$  bzw. unter  $-0.15 \text{ mm}$  auf, die in ARAMIS als tiefblau (am Nahtanfang) bzw. tiefrot (am Nahtende) dargestellt wurden. Qualitativ ist eine gute Übereinstimmung der flächig ausgewerteten Längsverzüge zwischen Messergebnis (ARAMIS) und Berechnungsergebnis (ANSYS) zu erkennen.



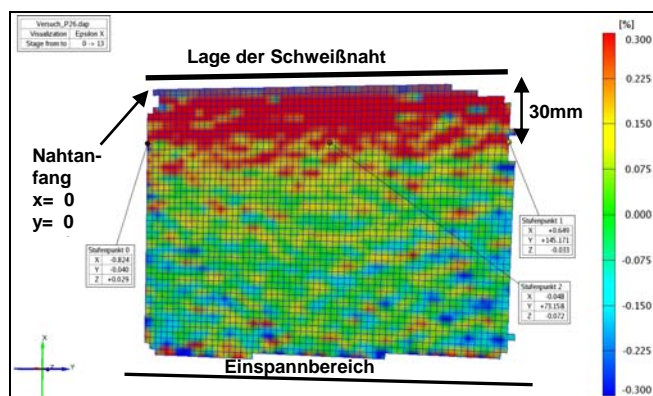
**Bild 3.** Vergleich des gemessenen Längsverzugs (oben, ARAMIS) mit der numerischen Simulation (unten, ANSYS)

Ein quantitativer Vergleich dieser Methoden erfolgte bereits in Bild 2 für den Längsverzug am Ort der induktiven Wegaufnehmer, wo eine sehr gute Übereinstimmung erzielt werden konnte. Auf der Ebene der Verschiebungen gilt somit das numerische Modell für die Schweißsimulation als verifiziert.

Auf der Ebene der Dehnungen fand ebenfalls ein Vergleich zwischen den Verläufen statt, die einerseits mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS) an der Plattenoberfläche (punktuell) und andererseits wieder

mit den optischen Sensoren von ARAMIS (flächig) erfasst wurden. Im Vergleich zu herkömmlichen Messmethoden, wie der Bohrlochmethode oder der röntgenografischen Methode, sind damit sowohl flächige als auch kontinuierliche Messungen der Eigendehnungen über die Zeit möglich. Dabei werden die Dehnungen aus den optischen erfassten Verschiebungszuständen der Facetten abgeleitet.

Exemplarisch sind in Bild 4 die optisch gemessenen Eigendehnungen in x-Richtung, also quer zur Naht, dargestellt. Das Stufenbild gehört zum letzten Messzeitpunkt  $t = 64$  s, bei dem die Platten bereits wieder abgekühlt. Die ersten 2 bis 4 mm neben der Naht waren durch Rauchspuren infolge des Schweißens verfärbt, sodass dort die Facetten nicht ausgewertet werden konnten. Das optisch erfasste Nahfeld beginnt also bei ca. 2 bis 4 mm entfernt vom Schweißnahtübergang, ist dann jedoch bis zum Fernfeld (Einspannbereich) vollständig als Fläche erhalten und steht für eine zweidimensionale Auswertung zur Verfügung.



**Bild 4.** Optisch gemessene Eigendehnungen in x-Richtung (quer zur Naht) während der Abkühlung ( $t = 64$  s)

In Bild 4 ist deutlich zu erkennen, dass im Nahfeld größere Eigendehnungen quer zur Naht (x-Richtung) gemessen wurden als im Fernfeld. Die maximalen Werte liegen bei ca.  $500 \mu\text{m}/\text{m}$  (0,5 %). Ein quantitativer Vergleich der optisch flächig erfassten Eigendehnungen mit numerischen Ergebnissen findet im folgenden Kapitel statt.

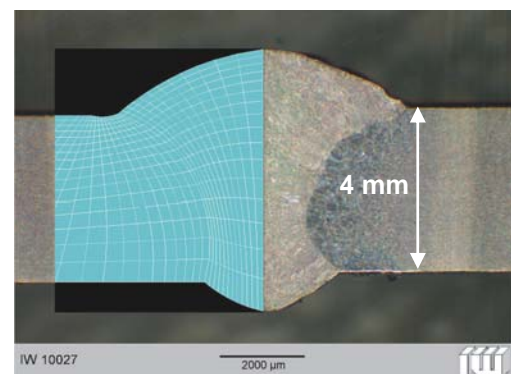
### 3 Numerische Schweißsimulation

Die numerische Simulation des Schweißvorganges bietet die Möglichkeit, bei einer Variation bestimmter Prozessparameter Aussagen über den daraus resultierenden Eigenspannungszustand zu treffen. Damit kann die FE-Simulation des Fügeprozesses bereits in der Planungsphase von geschweißten Tragstrukturen zu einem wichtigen Werkzeug werden. Besonders wichtig ist es, vorab eine gesicherte experimentelle Grundlage für diese numerischen Untersuchungen zu schaffen. Nur mit Hilfe von Versuchsdaten kann die Simulation validiert und verifiziert werden. Diese Basis wird durch die unter Kapitel 2 beschriebenen experimentellen Untersuchungen und die dort erfassten Daten der Eigendehnungen und Längsverzüge während des Schweißvorgangs gebildet.

Die im Folgenden vorgestellten numerischen Berechnungen sind mit dem FE-Programmsystem ANSYS® Release 11.0 durchgeführt worden.

Für die FE-Simulation ist es notwendig, die Geometrie und Randbedingung der experimentellen Untersuchung nach Kapitel 2 möglichst genau abzubilden. Unter Ausnutzung der Symmetriebedingung wird die Schweißverbindung als Halbmodell in ANSYS® generiert. Die drei Zonen Schweißnaht, Wärmeeinflusszone und Grundmaterial werden dabei berücksichtigt und die Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit der Temperatur definiert [3].

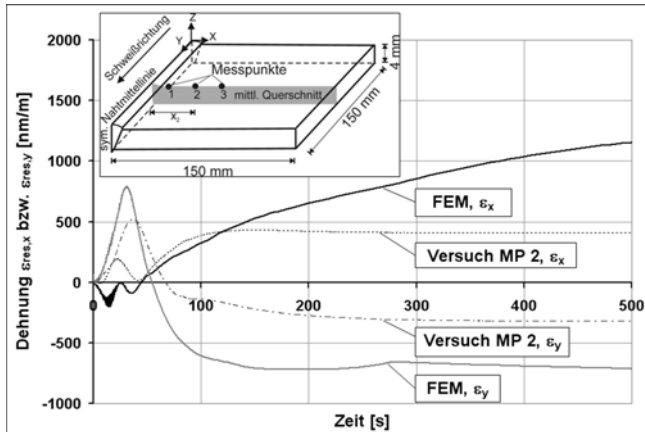
Bisher ist es noch nicht möglich, die Schweißsimulation ganzheitlich durchzuführen. Der Schweißprozess mit Schmelzbadströmung und -geometrie, resultierender Nahtausbildung und effektiv eingekoppelter Leistung wird unabhängig von der Konstruktionssimulation (Eigenspannung, Verzug) und der Werkstoffsimulation (Gefügestand, Härte) betrachtet. Da die Prozesssimulation die Grundlage der Schweißsimulation darstellt, wird es notwendig, die Parameter des Schweißprozesses über Schlißproben und thermische Kalibrierungsberechnungen zu berücksichtigen. Diese Daten fließen in die Modellierung einer Ersatzwärmequelle ein. Durch Versuche und genaue Betrachtung der Wärmeeinflusszone konnte eine allgemeingültige Aussage über die Volumenform getroffen werden. Nach Goldak [5] folgt eine normalverteilte, doppel-ellipsoide Volumenquelle. Das aus dem jeweiligen Schweißverfahren resultierende Nahtbild wird bereits im Zuge des Modellaufbaus mit abgebildet. Anhand der in Bild 5 dargestellten Schlißprobe ist daher die Modellgeometrie an die tatsächliche Nahtausbildung angepasst worden.



**Bild 5.** Geometrie des FE-Modells angepasst anhand der Schlißproben

Die FE-Berechnung des Schweißvorgangs beinhaltet zunächst eine thermische Analyse des transienten, nichtlinearen Temperaturfeldes, hervorgerufen durch die bewegliche Schweißwärmequelle. Dieser lokale Wärmeeintrag in Verbindung mit dem Schmelzen des Materials führt zu Gefügeumwandlungen und in Abhängigkeit der Randbedingungen zur Entwicklung von Eigenspannungen und Verzug. In ANSYS® ist es möglich, durch Werkzeuge zur multiphysikalischen Prozesskopplung thermische und strukturmechanische Analysen parallel durchzuführen. Hierfür wird die Struktur übereinander liegend aber unabhängig voneinander zum einem mit thermischen SOLID70-

Elementen und zum anderen mit strukturmechanischen SOLID185-Elementen vernetzt. Während der Simulation werden nun über den Multifield Solver für jeden Berechnungsschritt die Ergebnisse des Temperaturfeldes als direkte Belastung auf das strukturmechanische Modell übertragen. Diese Prozesskopplung ist besonders bei einer Berücksichtigung gefügekinetischer Umwandlungen in der Simulation unerlässlich. Denn diese Umwandlungen verursachen eine Veränderung der Materialeigenschaften und wirken sich damit direkt und in jedem Berechnungsschritt auf die strukturmechanische Analyse aus [9].



**Bild 6.** Vergleich der Eigendehnungen am Messpunkt 2 des Schweißversuchs mit der numerischen Simulation

Während ein Vergleich des numerisch ermittelten Längsverzugs eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten der Wegaufnehmer aus dem Schweißversuch (vgl. Bild 2 und Bild 3) zeigte, trifft dies für den Vergleich der Eigendehnungen in Bild 6 nur bedingt zu. Grundsätzlich bewegen sich jeweils für Simulation und Versuch die Eigendehnungen in y-Richtung, d.h. in Nahtlängsrichtung, im Druckbereich und diejenigen in x-Richtung, d.h. quer zur Naht, im Zugbereich. Weiterhin wird die Entwicklung der Eigenspannungen in x- und y-Richtung während des Schweißvorgangs bis  $t = 35$  s tendenziell richtig abgebildet. Auch für die erste Abkühlphase bis 75 s trifft dies noch zu. Ab diesem Zeitpunkt erreichen die im Versuch gemessenen Eigendehnungen sowohl quer als auch längs zur Naht konstante Werte von  $\epsilon_{res,x} = 410 \mu\text{m/m}$  und  $\epsilon_{res,y} = -320 \mu\text{m/m}$ .

Im Gegensatz dazu ist bei der numerischen Simulation zu erkennen, dass die Werte weiter steigen. Die Ursache hierfür könnte zunächst eine zu geringe Elementierung sein. Für den Schweißverzug können bereits bei einer groben Vernetzung gute Simulationsergebnisse erzielt werden. Die Berechnung des Eigenspannungs- bzw. Eigendehnungszustandes dagegen erfordert eine sehr feine Vernetzung. Mit zunehmender Anzahl der Freiheitsgrade steigt im Gegenzug die Simulationszeit exponentiell an und ist damit häufig nicht mehr praktikabel. Besondere Vernetzungsstrategien sind daher für zukünftige Untersuchungen zu verfolgen [4].

Darüber hinaus könnte der Einspanngrad der Schweißprobe im Versuchsaufbau verglichen mit dem im numerischen Modell einen weiteren Erklärungsansatz für die während der Abkühlphase stetig zunehmenden numerischen Eigendehnungswerte liefern. Das Modell besitzt eine ideal, 100%ige feste Einspannung der nahtentfernten Ränder, die im Versuchsaufbau ebenfalls eine Zielforderung war aber nicht ideal vorliegt. Dadurch bekommt die Schweißprobe die Möglichkeit durch eine geringere Zwängung zu einer Entlastung. Die Eigendehnungen nehmen daher im Versuch mit fortschreitender Abkühlzeit immer weiter ab.

## 4 Berechnung der Ermüdungsfestigkeit bis zum technischen Anriss

### 4.1 Kerbdehnungskonzept

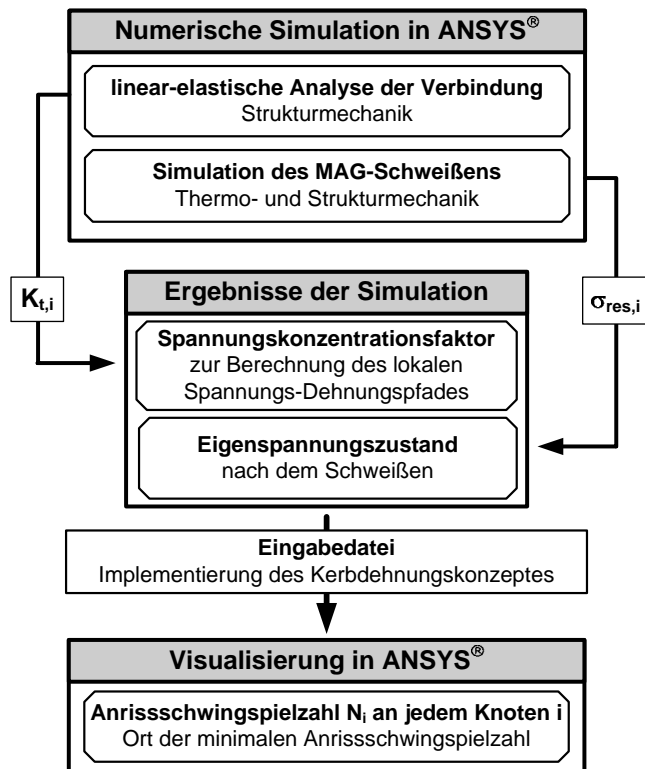
Mit Hilfe des Kerbdehnungskonzeptes, auch Kerbgrundkonzept oder Örtliches Konzept genannt, kann für dynamisch beanspruchte Strukturen die Schwingspielzahl bis zum technischen Anriss berechnet werden. Der technische Anriss wird dabei als erster detektierbarer Riss mit einer ungefähren Risstiefe von 0.5 mm und einer Risslänge von 1.0 mm verstanden. Um die Anrisschwingspielzahl  $N_i$  unter Anwendung des Kerbdehnungskonzeptes abzuschätzen, sind, basierend auf Seeger [2], die im Folgenden kurz beschriebenen Berechnungsschritte durchzuführen:

1. Zunächst ist für das Kerbdetail als Maß für die Spannungserhöhung infolge äußerer Belastung, der Spannungskonzentrationsfaktor  $K_t$  zu ermitteln. Hierfür ist eine linear-elastische Berechnung erforderlich.
2. Unter Berücksichtigung zyklischen Materialverhaltens nach der Beziehung von Ramberg-Osgood ist nun für die Belastung mit Hilfe der Neuber-Regel die lokale Beanspruchung in der Kerbe anzunähern.
3. Die Anwendung des Masing- und Memory-Effektes führt für die äußere dynamische Belastung zum lokalen Spannungs-Dehnungspfad in der Kerbe.
4. Durch den Ansatz eines Schädigungsparameters können Einflüsse aus Reihenfolge und mittelspannungsbehaftete Belastungen berücksichtigt werden. Jede sich aus dem Spannungs-Dehnungspfad ergebene, geschlossene Hysteresisschleife liefert einen Schädigungsbeitrag.
5. Abschließend werden diese Schädigungsbeiträge zu einem versagenskritischen Wert, der Anrisschwingspielzahl  $N_i$  akkumuliert.

### 4.2 Einbinden des Kerbdehnungskonzeptes in ANSYS

Um eine dynamische Analyse des Kerbdetails in ANSYS zu umgehen, wird der Spannungs-Dehnungspfad des Bauteils unter dynamischer Belastung weiterhin mit der Näherungsformel nach Neuber ermittelt.

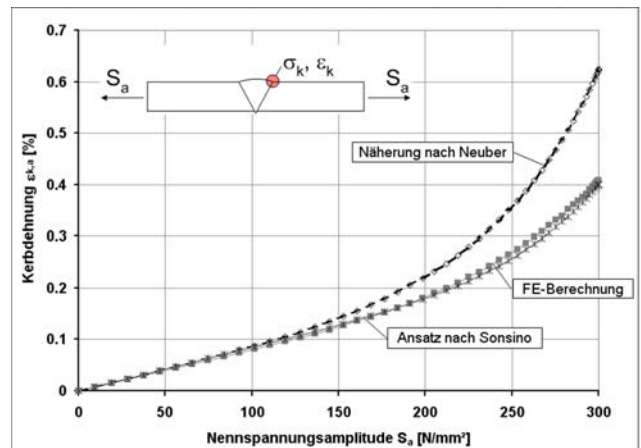
Die Berechnungsschritte sind in einer Eingabedatei, die auf der APDL-Programmiersprache in ANSYS® basiert, implementiert worden. Dieses Vorgehen ermöglicht für jeden Knoten innerhalb der FE-Simulation einen direkten Austausch der Daten ohne zusätzliche Schnittstelle. Diese Daten sind zum einen der Spannungskonzentrationsfaktor  $K_{t,i}$  und zum anderen die Eigenspannungen  $\sigma_{res,i}$ . Die gesamte Prozesskette ist in Bild 7 schematisch dargestellt.



**Bild 7.** Einbindung des Kerbdehnungskonzeptes in die numerische Simulation

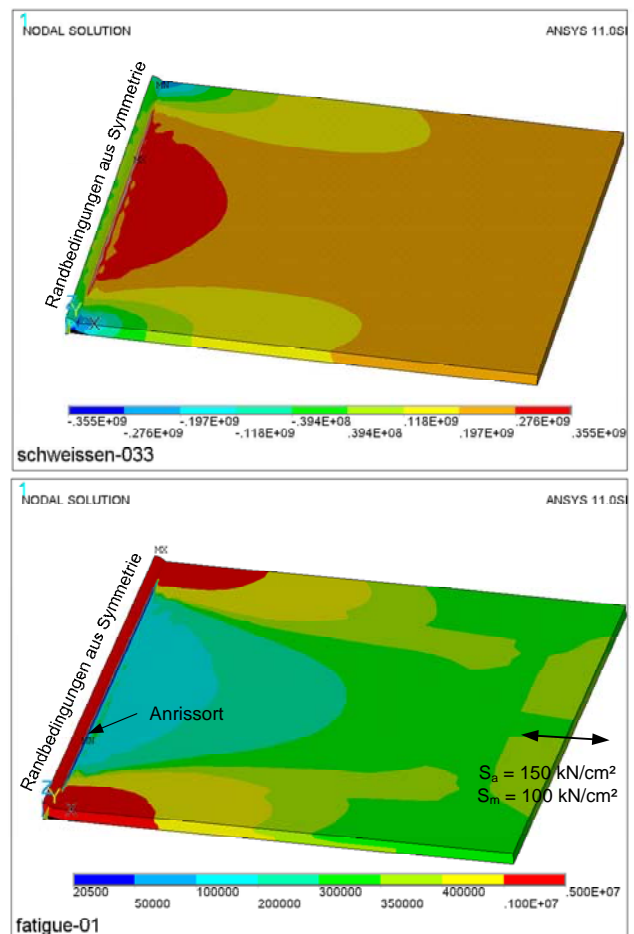
Der Spannungskonzentrationsfaktor  $K_t$  nimmt bei der Näherungsberechnung des lokalen Spannungs-Dehnungspfad in der Kerbe eine zentrale Rolle ein. Er beschreibt inwieweit die Geometrie des Bauteils den Kraftfluss innerhalb der Verbindung beeinflusst. Je höher der Faktor für die Spannungskonzentration ist, desto höher ist auch die lokale Beanspruchung in der Kerbe bei wechselnder Beanspruchung. In Bild 8 sind für verschiedene Nennspannungsamplituden  $S_a$  die lokale Dehnung am Nahtübergang des untersuchten Kerbdetails dargestellt. Numerische Vergleichsrechnungen unter dem Ansatz zyklischer Materialeigenschaften haben gezeigt, dass die Spannungsbzw. Dehnungserhöhung bei einer Näherung nach Neuber für das Kerbdetail der Stumpfnahut überschätzt werden (vgl. Bild 8). In Bereichen geringer Belastung und damit noch elastischer Dehnung in der Kerbe erzielen numerische Berechnung und die Näherung nach Neuber eine gute Übereinstimmung. Nehmen die plastischen Dehnungsanteile bei zunehmender Belastung zu, entfernen sich die ermittelten Gesamtdehnungen der beiden Näherungen voneinander. Ein Ansatz nach Sonsino [6], der nur die Hälfte des plastischen Dehnungsanteils bei der lokalen Gesamt-

dehnung berücksichtigt, führt zu einer deutlich besseren Annäherung. Dieser Ansatz wird daher besonders bei schwächerer Kerbwirkung, also bei Kerbdetails mit einem geringeren Spannungskonzentrationsfaktor  $K_t$ , empfohlen.



**Bild 8.** Numerische Vergleichsrechnung zur Neuber Regel

Eine weitere Frage ist, wie Eigenspannungen bzw. -dehnungen bei der Ermittlung des lokalen Spannungs-Dehnungspfad zu berücksichtigen sind. Hierfür stehen verschiedene Modifikationen der Näherungsform nach Neuber zur Verfügung.



**Bild 9.** Darstellung der Eigenspannungen senkrecht zur Naht (oben) und der Anrisschwingspielzahl  $N_i$  (unten)

Für den in Bild 9 dargestellten Ausdruck der Anrisschwingspielzahl  $N_i$  über das gesamte Bauteil wurde die Eigenspannung mit dem Charakter einer Mittelspannung innerhalb der Nahrungsform nach Neuber berücksichtigt. Ein möglicher Abbau der Eigenspannungen über die Zeit wurde nicht einbezogen.

Wie erwartet zeigt Bild 9, dass der Anriss zuerst am Schweißnahtübergang erfolgt. Hier sind sowohl die Eigenspannungen resultierend aus dem Schweißprozess als auch die Spannungskonzentration resultierend aus der Kerbgeometrie am größten. Ebenso liefern die Bereiche mit großen Druckeigenspannungen große Anrisschwingspielzahlen. Für den Nahtquerschnitt allerdings ergibt sich trotz hoher Zugeigenspannungen eine hohe Lebensdauer bis zum technischen Anriss, weil der vergrößerte Querschnitt zu einer geringeren Spannungskonzentration führt. Sowohl die Schweißsimulation als auch die linearelastische Analyse, um den Faktor  $K_t$  zu ermitteln, erfolgt bei gleicher Vernetzung. Es muss daher an dieser Stelle angemerkt werden, dass der Spannungskonzentrationsfaktor  $K_t$  nur bei feiner Vernetzung hinreichend genau berechnet werden kann. Eine höhere Vernetzungsfineinheit schon bei der Schweißsimulation ist allerdings aufgrund der langen Rechenzeit nicht praktikabel und auf eine aufwändige Interpolation des Eigenspannungszustandes auf die neue, feinere Vernetzung wurde zunächst verzichtet. Daher sind die genauen Werte der Anrisschwingspielzahl nur qualitativ zur Lokalisierung kritischer Schweißnahtbereiche zu geeignet. Trotzdem kann dies bei der Beurteilung auch komplexer Schweißkonstruktionen als zusätzliches Werkzeug hilfreich sein.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Forschungsaktivitäten ist die Quantifizierung des Eigenspannungseinflusses auf die Ermüdungsfestigkeit von Stumpfnahverbindungen. Dafür wurden im Rahmen von Schweißversuchen die transienten Eigendehnungsfelder und die Längsverzüge mit zwei unterschiedlichen Messmethoden erfasst. Die Messergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung beim Längsverzug, wobei die optische 3D-Verformungsanalyse gegenüber den Wegaufnehmern den Vorteil der flächigen Datenerfassung besitzt. Die gewonnenen Messergebnisse dienen anschließend zur Verifizierung eines numerischen Modells, um den Eigenspannungseinfluss zu quantifizieren.

Darauf erfolgte eine Beurteilung der Ermüdungsfestigkeit bezüglich des Kerbdetails „Stumpfnah“. Als Vergleichswert diente die Anrisschwingspielzahl, die mit dem Kerbdehnungskonzept unter Berücksichtigung des Eigenspannungszustandes ermittelt wurde. Die flächige Darstellung der Anrisschwingspielzahl einer geschweißten Tragstruktur ermöglicht bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Eigenspannungen eine schnelle Lokalisierung des Anrissortes. Die Beurteilung der Ermüdungsfestigkeit ist damit auch für komplexere Strukturen möglich.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die freundliche Unterstützung der Firma Mechanische Bearbeitung Horl, die den Schweißversuchsstand angefertigt hat. Weiterer Dank gilt dem Unternehmen GOM-Messtechnik für die Beratung bei den optischen Verformungsanalysen.

## Literatur

- [1] Hobbacher, A.: Recommendations for fatigue design of welded joints and components, IIW-Doc. XIII-2151-07/XV-1254-07, International Institute of Welding, 2007
- [2] Seeger, T.: Werkstoffmechanisches Konzept der Zeit- und Dauerfestigkeit, Vortrag auf der VDI-Tagung „Dauerfestigkeit und Zeitfestigkeit- Zeitgemäße Berechnungskonzepte“, 1988
- [3] Wichers, M.: Schweißen unter einachsiger, zyklischer Beanspruchung – Numerische und experimentelle Untersuchungen, Dissertation, Braunschweig, 2006
- [4] Voß, O.: Untersuchung relevanter Einflussgrößen auf die numerische Schweißsimulation, Dissertation, Braunschweig, 2001
- [5] Radaj, D.: Schweißprozesssimulation - Grundlagen und Anwendung, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1999
- [6] Radaj, D.; Sonsino, C.M.; Fricke, W.: Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches, 2<sup>nd</sup> edition, Woodhead Publishing, 2006
- [7] Schaumann, P.; Keindorf, C.: 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, 2007
- [8] Schaumann, P.; Keindorf, C.; Mickley, M.: Fatigue assessment of welded joints considering residual stresses due to welding process and post weld treatment, Conference for Fatigue Design, CETIM, Senlis, France, 2007
- [9] Schaumann, P.; Keindorf, C.; Kirsch, T.: Multiphysikalische Prozesskopplung am Beispiel einer stumpf geschweißten und nachbehandelten Stahlplatte, 2007