

Numerische Simulation der Phasenumwandlungen bei Schienenschweißungen von perlitischem Stahl

Leonhard Weingrill¹ und Norbert Enzinger¹

¹ Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, Kopernikusgasse 24, Technische Universität Graz, Österreich
E-Mail: leonhard.weingrill@tugraz.de

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde ein Modell für die numerische Simulation einer Schienenschweißung mit dem Abbrennstumpfverfahren mit SYSWELD® erstellt. Der Schwerpunkt liegt in der Untersuchung der Umsetzbarkeit des gewählten Modellierungsansatzes für die vereinfachte Abbildung der Wärmequelle. Diese wird allein durch den Kontaktwiderstand R_T an Schalenelementen in der Fügefläche während des Aufheizvorgangs definiert und zur Quantifizierung der Wärmeeinbringung mit zunehmendem Detaillierungsgrad abschnittsweise basierend auf Messdaten des Temperaturverlaufs in einem Referenzpunkt am Kopf der Schiene invers angepasst. Für die Phase des Planbrennens konnte eine sehr gute Übereinstimmung des Temperaturverlaufs erzielt werden. In den übrigen Prozessphasen führte die Vorgehensweise noch nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen.

1 Einleitung

Die Anforderungen an das Streckennetz im Eisenbahnverkehr haben in den letzten Jahrzehnten aufgrund unterschiedlicher Gründe zugenommen. Dazu zählen mitunter das generell gestiegene Verkehrsaufkommen und die dadurch höhere Streckenauslastung, höhere Reisegeschwindigkeiten und höhere Passagieranforderungen hinsichtlich Fahrkomfort, höhere Achslasten insbesondere im Güterverkehr, sowie aber auch erhöhte Sicherheitsanforderungen von Gesetzes wegen. Um einen wirtschaftlichen und sinnvollen Betrieb weiter zu gewährleisten, sehen sich Bahnbetreiber vor diesem Hintergrund gezwungen bei ihren Life-Cycle-Costs-Betrachtungen die Grenzen enger zu stecken. [Girsch et al., 2008]

Im zusammenfassenden Abschlussbericht einer auf EU-Ebenen durchgeführte Reihe von Studien [Ekberg and Paulsson, 2010] wurden wichtige Kostentreiber beim Betrieb von Bahnstrecken untersucht. Die durchgehende Formbeständigkeit des Schienenprofils ist notwendig um ausreichend Führung und damit sicheres Fahren zu gewährleisten. Der Verschleiß an den Gleisen bestimmt notwendige Intervalle für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten. Die Verwendung moderner Schienenstahlgüten mit verbesserten mechanischen Eigenschaften stellt einen wichtigen möglichen Aspekt bei der Steigerung der Kosteneffizienz von Eisenbahnstrecken dar. Insbesondere eine angepasste Mikrostruktur im Kopfbereich der Schiene kann den Widerstand gegen Rollkontaktermüdung (Rolling Contact Fatigue (RCF)) und Verschleiß verbessern und somit den Instandhaltungsbedarf verringern. [Trummer et al., 2016][Demofonti et al., 2005]

Geschweißte Schienen weisen im Bereich der WEZ eine weiche Zone auf. Im Bereich der Schweißung kann es daher lokal zu verstärkter Materialermüdung und Verschleiß kommen. Auch das Schweißen von Schienen stellt somit einen nicht unerheblichen Kostenfaktor bei der Installation und dem Betrieb von Eisenbahnstrecken dar. [Demofonti et al., 2005]

In Abhängigkeit des Schweißprozesses und des Werkstoffs kann die Ausdehnung und auch in der Höhe des Härteabfalls in dieser weichen Zone variieren. [Micenko and Li, 2013]

2 Abbrennstumpfschweißen von Schienen

Das Abbrennstumpfschweißen (ABS) ist eines der weltweit am häufigsten eingesetzte Verfahren zum Schweißen von Schienen. [Keichel and Gehrman, 2008]

Es zählt allgemein betrachtet zu den Sonderschweißverfahren Für Schienen findet es sowohl in stationärer Form mit Gleichstrom in der Produktion, als auch mit mobilen Anlagen und Wechselstrom bei der Neuverlegung von Schienen im Gleis Anwendung. Im Wesentlichen handelt es sich um einen Widerstandsschweißprozess, der sich während der Aufheizphase in vier charakteristischen Abschnitte mit zusätzlich auftretenden Phänomenen gliedert. (siehe Abbildung 1)

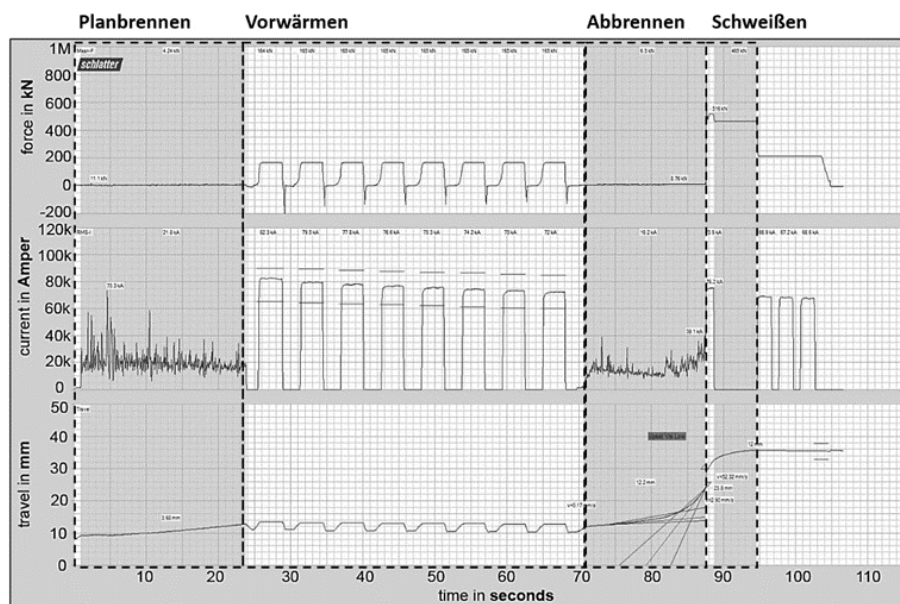


Abbildung 1: Prozessgrößen und Prozessabschnitte während der Aufheizphase einer Abbrennstumpfschweißung einer Vignolschiene.

Bei näherer Betrachtung der in der Schweißfläche beim ABS ablaufenden Vorgänge im mikroskopischen Maßstab kann festgestellt werden, dass der Prozess – im Speziellen während des Plan- und Abbrennens – aus einer komplexen Abfolge von Vorgängen besteht. Durch das Aneinanderdrücken der Werkstücke mit geringer Kraft entsteht aufgrund der Oberflächenrauigkeiten nur punktuell Materialkontakt. Beim Anlegen einer Spannung fungieren diese Stellen als elektrische Leiterbrücken und führen lokal zu sehr hohen Stromdichten und damit einhergehender sehr schneller Materialerhitzung. Dadurch kommt es zum charakteristischen explosionsartigen Ausschleudern des Materials, somit der Zerstörung der Leiterbrücke an dieser Stelle. Der Vorgang beginnt dann durch die Änderungen der Oberflächenstruktur an einer anderen Stelle von neuem. Zusätzlich kommt es parallel dazu auch zur kurzzeitigen Bildung von Lichtbögen.

[Kuroda and Shimada, 2008]

Über den gesamten Querschnitt betrachtet bestehen die ‚Brennphasen‘ beim ABS aus unzähligen, parallel ablaufenden sehr schnellen Abfolgen der beschriebenen Vorgänge.

Beim ABS von Schienen wird noch zusätzlich während der Zwischenphase ‚Vorwärmen‘ durch das Aneinanderpressen der Schienen mit hoher Kraft und gleichzeitig angelegten hohen Schweißströmen, eine zusätzliche Erwärmung und Homogenisierung des Temperaturprofils im Schienenquerschnitt erreicht.

Dieser spezielle mehrstufige Prozessablauf während der Aufheizphase ist beim ABS essentiell und dient der Einstellung der geeigneten Eigenschaften der Schweißverbindung.

3 Arbeitsinhalte

In dieser Arbeit soll ein Simulationsmodell einer Abbrennstumpfschweißung von Eisenbahnschienen mithilfe der Software SYSWELD® erstellt werden. Die Simulation soll schlussendlich als Werkzeug bei der Prozessentwicklung dienen, mit welchem durch Optimierung des Schweißzyklus die Ausdehnung des Bereichs der weichen Zone in der WEZ der heute noch gängigsten voll perlitischen Schienenstahlgüten möglichst gering gehalten werden kann.

Der wesentliche Teil der Implementierung einer entsprechenden metallurgischen Simulation bereits vorab erfolgreich umgesetzt und in einer Veröffentlichung vorgestellt. [Weingrill, Nasiri, and Enzinger, 2016]

Der zweite wichtige Bestandteil beinhaltet die Modellierung der Wärmequelle bei einer Abbrennstumpfschweißung einer Schiene in SYSWELD®. Die Komplexität der oben beschriebenen Abläufe während des ABS lässt sich in einer FE-Schweißsimulation wie sie in diese Arbeit angestrebt wird nicht sinnvoll abbilden. Den ersten wichtigen Schritt stellt somit die geeignete Abstraktion der oben beschriebenen komplexen Vorgänge während des Aufheizvorgangs beim ABS von Schienen durch die Implementierung eines vereinfachten numerischen Modells der Wärmequelle dar. Das wichtigste Ziel dabei ist, dass dennoch die exakte Abbildung des transienten Temperaturfeldes in der thermischen Simulation anhand der auch in der Realität an der Maschine verwendeten Schweißparameter möglich ist.

Insbesondere wird dabei der folgende Ansatz untersucht: die Modellierung der Hauptwärmequelle während aller Phasen des Aufheizvorgangs kann durch Abstraktion der komplexen Vorgänge auf eine einfache Funktion für den Kontaktwiderstand R_T realisiert werden. Dadurch wird die Wärmeeinbringung auf die Joulesche Wärme an den Fügeflächen reduziert und somit eine stark vereinfachte Möglichkeit zur Simulation des transienten Temperaturfeldes bei der Abbrennstumpfschweißung ermöglicht.

Durch die ausreichend exakten Kenntnisse des Temperaturverlaufs, sowie der bestimmenden elektrischen Prozessgrößen aus vorab durchgeführten instrumentierten Schweißversuchen [Weingrill, Krutzler, Enzinger, 2016] kann eine systematische, abschnittsweise und inverse Optimierung von R_T gemacht werden, mit welcher der Prozess in der FE-Simulation abgebildet werden kann.

3.1 Simulationsmodell

Für die Simulation wurde die elektro-kinetische und thermisch gekoppelte Rechnungsoption inklusive metallurgischer Kopplung in SYSWELD® verwendet.

Von einer zusätzlichen Kopplung einer mechanischen Simulation wurde vorerst noch abgesehen. Ziel ist es, den Temperaturzyklus ohne die Berücksichtigung des Materialverlusts aufgrund des Abbrennens sowie der Wulstbildung während der Umformung trotzdem mit hinreichender Genauigkeit abbilden zu können.

3.1.1 Modellgeometrie, Randbedingungen und Lasten

Die Geometrie des Modells (siehe Abbildung 2) entspricht zwei jeweils 340mm langen, zentrisch vertikal entlang der Schienenachse geteilten Hälften einer Vignolschiene des Profils 60E1 laut EN- 13674-1. Die Abmessungen wurden dabei von jenen der instrumentierten Schweißung an einer stationären Schlatter GAA100 Maschine übernommen worden.

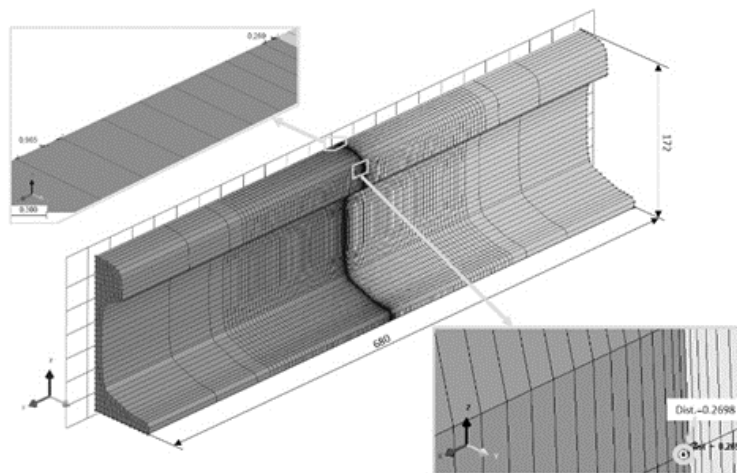


Abbildung 2: Simulationsmodell in SYSWELD® und Lage des Referenzpunkts für Temperaturkurven.

An der Stoßfläche im Modell sind die begrenzenden Schalenelemente mit den entsprechenden gegenüberliegenden Schalenelementen der anderen Schiene in Kontakt. Dabei hat jedoch jede Schiene in der Kontaktfläche ihre eigenen Knotenpunkte und Elemente. Der Schienenkörper besteht aus in Richtung der Schienenachse aus der Querschnittfläche extrudierten Volumenelementen. Die Elementgröße wird dabei in Richtung der Schienenachse mit zunehmendem Abstand vom Schweißspalt kontinuierlich vergrößert. Der Grund dafür sind die nur im unmittelbaren Bereich der Schweißung auftretenden hohen Temperaturgradienten. Die Größe vordersten Elemente wurde in vereinfachten Vorversuche solange schrittweise verkleinert, bis nachweislich kein Einfluss mehr auf das Ergebnis vorhanden war. Im weiter entfernten Bereich werden die Elemente größer gestaltet, um den Anzahl so gering wie möglich zu halten und somit die Berechnungszeit zu optimieren.

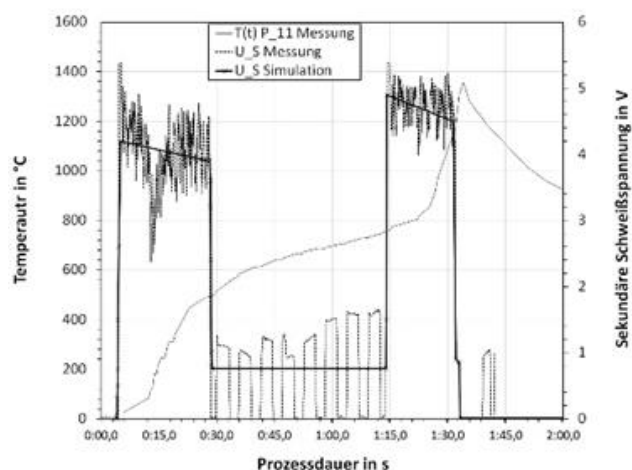


Abbildung 3: Gemessener Verlauf der Temperatur und der Schweißspannung während der Aufheizphase einer Abtrennstumpfschweißung einer 60E1 Schiene sowie der in der Simulation als vereinfachte Last angenommene zeitliche Spannungsverlauf.

An der Außenseite ist eine geschlossene Hülle an Schalenelementen über die Schiene gelegt. Diese Elemente werden durch die Knotenpunkte der darunter liegenden Volumenelemente bestimmt. An dieser Oberfläche wird anhand einer temperaturabhängigen Funktion der Wärmeübergang durch Strahlung und Konvektion an die Umgebung simuliert. Die Lufttemperatur wird dabei als Randbedingung mit konstant 20°C an den Knoten dieser Außenhaut festgelegt. Das Emissionsverhältnis für die Berechnung des Strahlungsanteils wird mit 0,8 festgelegt und der Wärmeübergangskoeffizient für die Konvektion mit 25 W/m².K.

Als Last wird an den Knoten im äußersten Querschnitt der im Bild rechten Schiene eine Spannung in Abhängigkeit der Zeit definiert. Dieser wurde basierend auf dem Verlauf der gemessenen sekundären Schweißspannung vereinfacht angenommen. (siehe Abbildung 3) An den Knoten des äußersten Querschnitts auf der gegenüberliegenden Schiene wird die Spannung entsprechend als konstant null definiert.

3.1.2 Materialkennwerte

Für die Simulation wurden die thermo-physikalischen, und die relevanten thermo-elektrischen Eigenschaften des Schienenstahls R350HT (gemessene Zusammensetzung) in JMatPro® simuliert und in SYSWELD® implementierte. (siehe Abbildung 4)

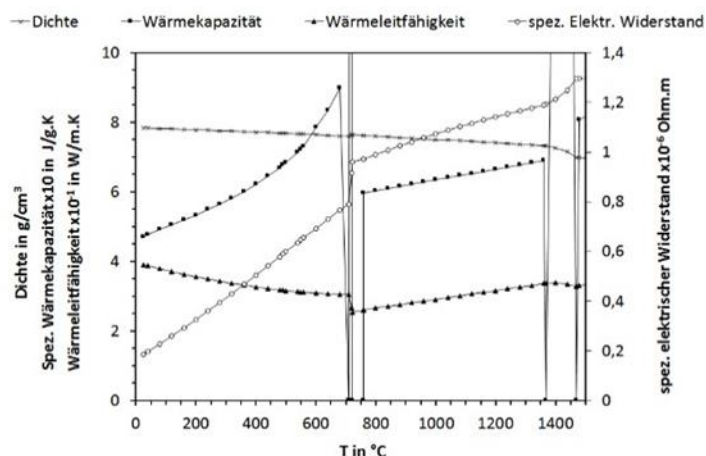


Abbildung 4: Simulierte thermo-physikalische Materialeigenschaften und spezifischer elektrischer Widerstand des Schienenstahls R350HT in Abhängigkeit der Temperatur.

3.1.3 Vorgehensweise bei der Modellierung des Kontaktwiderstands R_T

SYSWELD® bietet in der elektro-kinetisch thermischen Berechnungsoption die Möglichkeit zwischen zwei Flächen ein Medium zu modellieren, wodurch durch Definition eines elektrischen Widerstandes und eines thermischen Übergangskoeffizienten der Energiefluss zwischen den an die Flächen angrenzenden Volumenelementen in der transienten Simulation berechnet werden kann. Dabei können sowohl konstante Werte als auch Abhängigkeiten von der Temperatur und der elektrischen Spannung berücksichtigt werden. [ESI GmbH München, 2016]

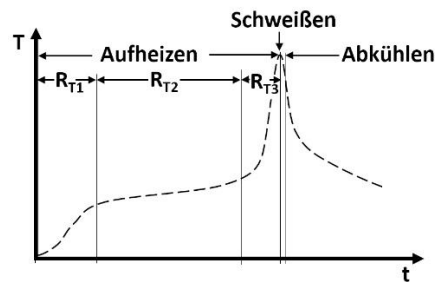


Abbildung 5: Schematische Darstellung des anhand des Temperaturverlaufs in drei Phasen eingeteilten Aufheizvorgangs einer Abbrennstumpfschweißung einer Schiene.

Im Modell wird diese Option genutzt und der Wert für den Übergangswiderstand R_T während der Aufheizphase abschnittsweise festgelegt. Die Einteilung der Abschnitte der Aufheizphase entspricht dabei im Wesentlichen der in der Einleitung gemachten Prozessvorstellung (siehe Abbildung 1). Zusätzlich wurde auf die detailliertere Charakterisierung anhand des genauen Temperaturverlaufs in diesen Abschnitten wie sie in einer vorangegangenen Veröffentlichung im Detail vorgestellt zurückgegriffen. [Weingrill, Krutzler, Enzinger, 2016]

Um die Optimierung von R_T effizient zu gestalten, werden vorbereitend zwei Ansätze verfolgt. Das Ziel dabei ist vorerst, die richtige Größenordnung für den Kontaktwiderstand R_T in jedem Abschnitt abschätzen zu können. Im Anschluss erfolgt dann die eigentlich detailliertere inverse Optimierung innerhalb des abgeschätzten Bereichs.

3.1.4 Kontaktwiderstand als vereinfachter ohmscher Widerstand

Für die erste Abschätzung wird die Schweißung als vereinfachter elektrischer Schaltkreise angenommen (siehe Abbildung 6). Dieser besteht aus einer Gleichspannungsquelle und drei in Serie geschalteten ohmschen Widerständen, wovon zwei dem elektrischen Widerstand der Schienen R_S auf beiden Seiten entsprechen, und der dritte in der Mitte der Schweißlinie dem gesuchten Widerstand des Schweißspalts R_T entspricht.

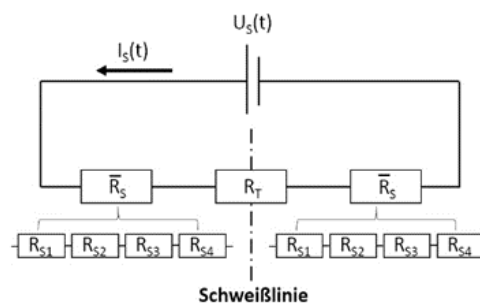


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Schweißprozesses als ohmscher Stromkreis.

Beruhend auf der Annahme des quer zur Schienenachse relativ konstanten, und um den Schweißspalt in Richtung der Schienenachse symmetrischen und mit steilem Gradienten sich ausbildenden Temperaturfeldes, wird R_S – auf beiden Seiten der Schweißung gleich – als Summe von vier Serienwiderständen berechnet. Die WEZ wird dafür in Abhängigkeit der für den jeweiligen Abschnitt des Aufheizvorgangs aus der Messung bekannten Temperaturverteilung in drei Bereiche (R_{S1} bis R_{S3}) und einen ‚kalten‘ Bereich mit konstant Raumtemperatur 20°C (R_{S4}) parallel zur Stoßfläche eingeteilt, s. Abbildung 7. Anhand deren Länge und mithilfe des spezifischen

elektrischen Widerstandes des Schienenstahl als Funktion der Temperatur können R_{S1} bis R_{S4} berechnet und dann aufsummiert werden.

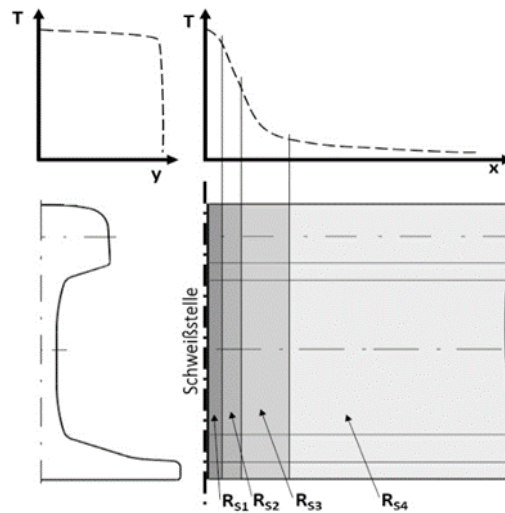


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Temperaturverlaufs im Bereich der Schweißstelle quer und längs zur Schienenachse und schematische Darstellung der zur Berechnung der temperaturabhängigen Widerstände verwendeten Bereiche der Schiene.

Daraus lässt sich dann anhand der Kenntnis der sekundären Schweißspannung und des Schweißstroms aus der Messung mithilfe des ohmschen Gesetzes R_T für jeden der in Abbildung 5 dargestellten Abschnitte der Aufheizphase berechnen.

Die Simulation wird dann für jeden Abschnitt einzeln gestartet und das Temperaturfeld des letzten Abschnitts als Anfangsbedingungen für den nächsten verwendet.

3.1.5 Kontaktwiderstand aus Literaturquellen

Um den Größenordnungsbereich für R_T weiter einzugrenzen wird zusätzlich eine in der Literatur für die Definition des Kontaktwiderstands bei ABS von Schienen verwendete Gleichung verwendet. [Li and Zhang, 2010; Zhipeng et al, 2011] Danach wird der Kontaktwiderstand R_c in Ohm beim ABS von Schienen wie in (1) gezeigt als Funktion eines Materialfaktors K , der Querschnittsfläche S in cm^2 , der Stauchgeschwindigkeit v_f in cm/s und der elektrischen Stromdichte j in A/mm^2 definiert.

$$R_c = \frac{9500 K}{S^{2/3} v_f^{1/3} j} 10^{-6} \quad (1)$$

Auch hier werden wieder die Daten aus den instrumentierten Schweißversuchen und mithilfe von Gleichung (1) wurde der Übergangswiderstand abschnittsweise berechnet und in die Simulation übernommen.

Im Unterschied zum vorherigen Ansatz wird dabei ein vierter Abschnitt unterschieden. Dieser bildet die letzten Sekunden unmittelbar vor der Schweißung ab, in denen aufgrund der Stauchung des Materials v_f sehr stark zunimmt und somit auch R_T stark beeinflusst wird. (siehe Abbildung 1)

3.1.6 Finale Optimierung des Kontaktwiderstand

Die schlussendliche Optimierung von R_T basiert auf den Erkenntnissen der nach den beiden oben vorgestellten Ansätzen durchgeführten Abschätzung der richtigen Größenordnung von R_T .

Um die angestrebte Genauigkeit des transienten Temperaturfeldes in der WEZ zu erreichen, werden die oben gewählten Abschnitte allerdings noch einmal detaillierter eingeteilt. Die Einteilung erfolgt anhand der noch genaueren Betrachtungen der Temperaturkurve im markierten Referenzpunkt in der WEZ am Kopf der Schiene. Sobald eine deutliche Änderung der Steigung des Temperaturverlaufs erfolgt, wird auch entsprechend ein neuer Abschnitt, in dem R_T neu festgelegt und optimiert wird.

Als weitere Indikatoren für die detailliertere Einteilung werden noch die verbleibenden Schweißprozessdaten Kraft und Stauchweg herangezogen.

3.2 Vorgehensweise bei Ergebnisanalyse

Bei der Ergebnisanalyse werden die transienten Temperaturfelder in der gesamten Schiene, und zusätzlich Vergleiche der simulierten zu den gemessenen Temperaturverläufe im Referenzpunkt, herangezogen, um die Wärmeeinbringung im jeweiligen Abschnitt zu überprüfen. R_T wird bei Abweichung entsprechend nach oben oder unten – innerhalb des zuvor festgelegten Größenordnungsbereichs und mit zunehmend feiner Skalierung – angepasst und der sich dadurch ergebende Unterschied im Temperaturverlauf präsentiert.

Anhand des beschriebenen iterativen Vorgehens wird R_T kontinuierlich für den gesamten Prozess optimiert, bis ausreichend Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation vorliegt.

Zusätzlich wird auch noch in jedem Abschnitt das sich einstellende Spannungsprofil in der Schiene und die elektrische Stromdichte in Richtung der Schienenachse bei unterschiedlichen R_T auch analysiert und zu den Messdaten zur Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse verglichen.

4 Ausblick auf Ergebnisse

Für die ersten Prozessabschnitte konnte nach ausreichender Optimierung von R_T eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation für den Temperaturverlauf erzielt werden. Der grundsätzliche Nachweis der Umsetzbarkeit des gewählten Modellierungsansatzes konnte somit erbracht werden. Beim Übergang von einem zum nächsten Prozessabschnitt kam es zu im Vergleich zur Messung großen Unterschieden des Temperaturverlaufs und mitunter auch zu Konvergenzproblemen beim SYSWELD-Solver.

Aufgrund größer als erwarteter Herausforderungen bei der Implementierung in SYSWELD® lagen zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Veröffentlichung noch nicht die Ergebnisse für die vollständige Prozessdauer vor. Die Präsentation dieser ist für den Vortrag bei der Konferenz in Weimar geplant.

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Modellierungsansatz für den thermischen Teil einer FE-Simulation einer Abbrennstumpfschweißung von Schienen in SYSWELD® vorgestellt. Der wesentliche Bestandteil dabei ist die abschnittsweise Festlegung eines geeigneten Wertes des Übergangswiderstands R_T im Schweißspalt als Hauptwärmequelle. Die Vorgehensweise beinhaltet dabei zuerst eine vereinfachte Abschätzung von R_T mithilfe von zwei unterschiedlichen Ansätzen und optimiert darauf aufbauend R_T im Detail. Der so simulierte Temperaturverlauf an einem ausgewählten Referenzpunkt am Kopf der Schiene wird zu gemessenen Daten verglichen und R_T solange angepasst bis ausreichende Übereinstimmung vorliegt.

6 Literaturverzeichnis

Demofonti, G. et al. 2005. "WELDRAIL- Role of Steel Composition and Welding Parameters in the Improvement of Fatigue Behaviour of High Strength Welded Rails."

Ekberg, A. and B. Paulsson. 2010. "Concluding Technical Report - Innotrack." 288.

ESI GmbH München. 2016. "SYSWELD 2016: Reference Manual."

Girsch G., Frank N., Pointner P. and Stock R.. 2008. "Life-Cycle Cost Considerations on High-Strength Rail Steels." in *8th World Congress on Railway Research*. Seoul, Korea: voestalpine Schienen GmbH, Austria.
Retrieved (http://www.uic.org/cdrom/2008/11_wcrr2008/pdf/l.2.2.1.1.pdf).

Hiensch M. et al. , 2005. "Two-Material Rail Development: Field Test Results Regarding Rolling Contact Fatigue and Squeal Noise Behaviour." *Wear* 258(7–8):964–72.

Keichel J. and Gehrmann R. . 2008. "Neues Thermit-Schweißverfahren SkV-Elite." *Elektro Thermit GmbH & Co KG Halle Germany*, September, 50–53.

Kuroda T. and Shimada M. . 2008. "Micro Flash Butt Welding of Super Duplex Stainless Steel with Zr-Based Metallic Glass Insert." *Vacuum* 83(1):153–56.
Retrieved (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042207X08002029>).

Li Y. and Fucheng Z.. 2010. "Numerical Simulation Of Flash Butt Welding Of High Manganese Steel Crossing With Carbon Steel Rail." *Advanced Materials Research* 123–125:571–74.

Maya-Johnson S., Ramirez A.-J., Toro A. . 2015. "Fatigue Crack Growth Rate of Two Pearlitic Rail Steels." *Engineering Fracture Mechanics* 138:63–72.
Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.03.023>).

Micenko P. and Li H.. 2013. *Double Dip Hardness Profiles in Rail Weld Heat-Affected Zone — Literature and Research Review Report*. Brisbane, Australia.

Trummer, G. et al. 2016. "Modeling Wear and Rolling Contact Fatigue : Parametric Study and Experimental Results." *Wear* 1–7. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2016.04.024>).

Weingrill L., Krutzler J. and Enzinger N. 2016. "Temperature Field Evolution during Flash-Butt Welding of Railway Rails." THERMEC CONFERENCE Graz.

Weingrill L., Nasiri M. and Enzinger N. . 2016. "Trends in Welding Program." Pp. 589–602 in *Trends ind Welding Research Conference Tokyo*. Tokyo.

Zhipeng, C. A. I., Masashi N., Ninshu M. A., Yuebo Q. U. and Bin C. A. O.. 2011. "Residual Stresses in Flash Butt Welded Rail." *Transactions of JWRI* 40(1):79–87.