

Linear Friction Welding of High Strength Chains

Kemal Mucic¹⁾ (kemal.mucic@tugraz.at)

Franz Fuchs²⁾ (fu@pewag.at)

Norbert Enzinger¹⁾ (norbert.enzinger@tugraz.at)

¹⁾ Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, TU Graz,
Kopernikusgasse 24, 8010 Graz, Österreich

²⁾ pewag austria GmbH, Mariazeller Straße 143, 8605 Kapfenberg, Österreich

Abstract:

Flash butt welding is the common process for the welding of big diameter steel chains. This process has been used for many years, and is successfully applied for different profiles and dimensions of chain links. However, this process yields low production, due to relatively long cycle time. Due to the heat input of this low energy density fusion welding process the material becomes liquid and the microstructure is influenced significantly in a wide heat affected zone and makes post-weld heat treatment and an expensive quality control necessary.

Through detailed analysis and a subsequent evaluation of six alternative welding processes a worldwide completely new and innovative approach for welding of chains has been chosen for further investigation. Linear friction welding (LFW) is a solid state joining process in which a stationary part is forced against a part that is moving in a linear transverse direction. The heat is generated due to frictional heating at the weld interface. Instead of one weld in each link like in the conventional flash butt welding process, in linear friction welding two half links are joined with two welds, each of it maintaining a much smaller heat affected zone and making the application of different geometries, materials and semis of the chain possible.

Linear friction welding of high strength half link chains is investigated using experimental and numerical analyses. By a three-dimensional (3-D) coupled thermo mechanical finite element (FE) model, the temperature profile, axial shortening and flash formation at the joint interface are analyzed. Additionally the volume fractions of the final microstructure and the size of the heat affected zone are also predicted. The transient heat input, which is an essential for these models is estimated by an sophisticated inverse heat-transfer analysis. The predicted HAZ width, upset, thermal history and final microstructure are compared with experimentally measured values and showed a very good agreement.

Using the Design of Experiment (DoE) method the relationship between the main welding parameters, the flash formation and the joint strength was investigated. For this investigation, forged chain half links from 30CrNiMo8 were linear friction welded. Subsequently a detailed metallographic, light and scanning electron microscopy analysis to characterize the link quality was conducted. The static strength properties of the joints were quantified and analyzed using the statistical software Minitab 16. With this approach, the significant factors affecting the linear friction welding of chain links have been identified, and their optimal combination for ensuring the highest quality at very good reproducibility determined.

Based on these results chain links 26x100 of 30CrNiMo8 were linear friction welded for an 8.3 m long conveyor chain pair. With flush butt welding such exactly the same length chain pairs-which are very important for the conveyor systems, can only be produced through calibration which are then pairwise sorted. By linear friction welding, these complicated production steps can be eliminated. This 8,3m long conveyor chain pair is successfully incorporated into a cement bucket elevator since February 2012.

Lineares Reibschweißen von hochfesten Kettengliedern

Kemal Mucic¹⁾ (kemal.mucic@tugraz.at)

Franz Fuchs²⁾ (fu@pewag.at)

Norbert Enzinger¹⁾ (norbert.enzinger@tugraz.at)

¹⁾ Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, TU Graz,
Kopernikusgasse 24, 8010 Graz, Österreich

²⁾ pewag austria GmbH, Mariazeller Straße 143, 8605 Kapfenberg, Österreich

1. Einführung

Das Abbrennstumpfschweißen ist das traditionelle Schweißverfahren in der Produktion von Förderketten ab einem Durchmesser von 18mm. Das Abbrennstumpfschweißen ist ein Widerstandsschweißverfahren das aus der Widerstandserwärmung der Fugestelle und der anschließenden Stauchung der Kette besteht.

Bei einer Kette mit 26mm Durchmesser werden ca. 2 Kettenglieder pro Minute verschweißt. Da es bei dem Abbrennstumpfschweißen zum Aufschmelzen des Werkstoffes kommt sind Erstarrungsprobleme wie Porosität, Entmischung oder Heißrissbildung möglich, sodass es zum Versagen in der Schweißzone kommen kann, siehe Abbildung 1. Je nach den erforderlichen Eigenschaften der Kette ist eine nachfolgende Wärmebehandlung nötig. Zur Sicherung der geforderten Qualität werden aufwendige Qualitätskontrollen standardmäßig angewendet.



Abbildung 1: Abbrennstumpfgeschweißtes Kettenglied (Schweißbruch)

Eine erfolgreiche Umsetzung von fortschrittlichen Fügetechniken könnte zu einer signifikanten Reduktion der Prozesszeit und einer Verbesserung der Verbindungsqualität führen wobei es dadurch zu einer Verringerung der Produktionskosten kommen würde.

In einer umfangreichen Nutzwertanalyse [1], [2] wurden die Hochenergieschweißverfahren (Elektronenstrahlschweißen, Laserstrahlschweißen und Plasmaschweißen) und Reibschweißprozesse (Linearreibschweißen, Orbitalreibschweißen und Friex) anhand von 26, für die Kettenfertigung, wichtigen Parametern wie z.B.:

- Produktivität,
- Verbindungsqualität,

- Wiederholgenauigkeit des Prozesses,
- Investitions- und variable Kosten, bewertet.

Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigte, dass das Abbrennstumpfschweißen im Verhältnis zu diesen modernen Schweißverfahren der am wenigsten geeignete Prozess für das Fügen von Förderketten ist. Das lineare Reibschweißen hingegen wurde als der am besten geeignete Prozess abgeschätzt. Daher wurde dieser weltweit einmalige innovative Ansatz, Ketten durch das lineare Reibschweißen zu fertigen, für eine detaillierte Untersuchung ausgewählt. [3]

2. Das Lineare Reibschweißen in der Kettenproduktion

Beim linearen Reibschweißen entsteht durch Druck und Relativbewegung der zu fügenden Teile die für den Prozess notwendige Wärme. Im Gegensatz zum Abbrennstumpfschweißen wo nur eine Fügestelle bei dem Kettenschweißen entsteht ist das beim Reibschweißen aufgrund der nötigen Relativbewegung nicht möglich. Deshalb wurde ein völlig neuartiges Konzept für die Kettenfertigung entwickelt und angewendet. Dabei werden zwei Halbglieder in der Fertigung zu einem Kettenglied verschweißt (Abbildung 2).

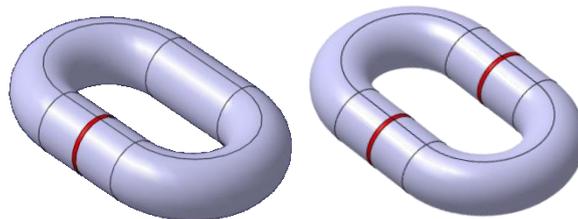


Abbildung 2: Gegenüberstellung der Kettengeometrie mit einer (Bild links) und zwei (Bild rechts) Fügstellen

Die Wärme und Kraft die auf die Fügestelle wirken, führen beim Reibschweißen zu einer Verformung und Plastifizierung des Materials. Dieses plastifizierte Material, zusammen mit den Oberflächenoxyden und Verunreinigungen [4], wird während des Schweißprozesses und in der nachfolgenden Stauchphase aus der Fügestelle herausgedrückt und bildet den charakteristischen Schweißgrat, siehe Abbildung 3. Die wichtigsten Schweißparameter die einen wesentlichen Einfluss auf die Verbindungsqualität haben können sind: die Amplitude und Frequenz der Schwingung, Reib- und Stauchkraft sowie die axiale Verkürzung und die Reibzeit.

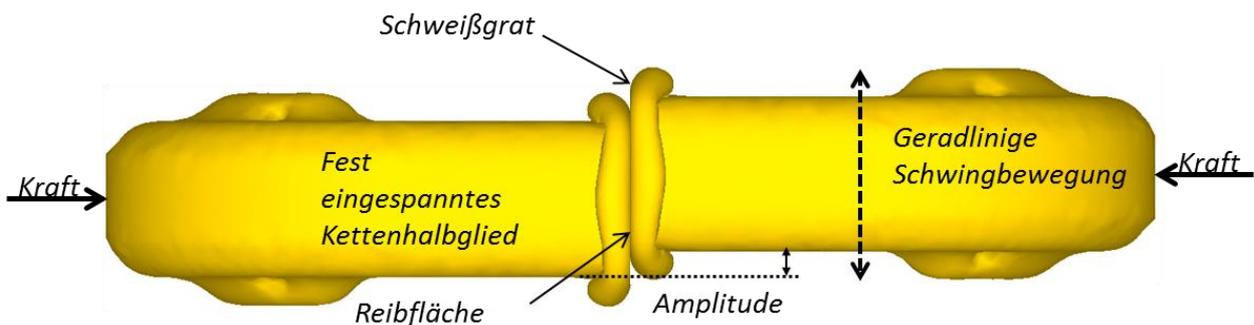


Abbildung 3: Schematische Darstellung des linearen Reibschweißens von Ketten

Pewag Engineering und das Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik der TU Graz entwickelten auf Basis dieser Schweißparameter den ersten Prototypen (RSM1) für das lineare Reibschweißen von Kettengliedern [5].

Durch die Anwendung des linearen Reibschweißens in der Kettenfertigung ergeben sich folgende Vorteile:

1. Die Möglichkeit Werkstoffe zu verschweißen die nicht durch das Abbrennstumpfschweißen gefügt werden können. Die Kettenglieder als Halbzeug können gegossen, geschmiedet oder gesintert vorliegen.
2. Es können daher unterschiedliche Profile und Geometrien der Kettenglieder realisiert werden.
3. Im Vergleich zum Abbrennstumpfschweißen ist das lineare Reibschweißen ein ökologisch saubereres Verfahren, da während des Schweißens keine Dämpfe, Gase oder Rauch entstehen und der Wirkungsgrad von Reibschweißprozessen höher liegen als beim Abbrennstumpfschweißen [6], [7].
4. Der Prozess ist vollständig automatisiert.
5. Der Prozess ist ein Festphasenfügeprozess, weshalb keine mit der Erstarrung verbundenen Probleme entstehen, was zu hervorragenden Qualität der geschweißten Ketten führt [8], [9], [10], [11].
6. Im Gegensatz zum Abbrennstumpfschweißen ist das lineare Reibschweißen wesentlich schneller und es benötigt einen niedrigeren Energiebedarf für die gleiche Schweißaufgabe [12].

In weiterer Folge wird die Untersuchung einer 26x100 Kette aus geschmiedetem 30CrNiMo8 (siehe Abbildung 4) präsentiert. Dabei werden Kettenvollglieder mit linear reibgeschweißten Kettenhalbgliedern zur einen Förderkette verbunden.

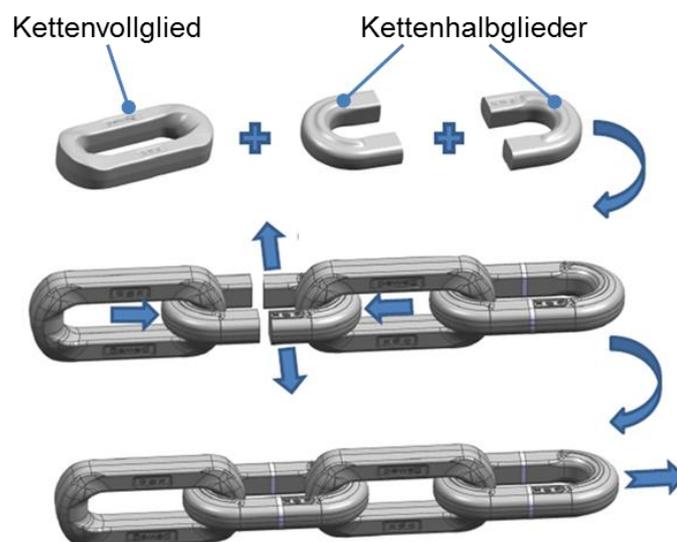


Abbildung 4: Linear reibgeschweißte Förderkette

3. Schweißprozesssimulation

Lineares Reibschweißen ist ein komplexer Prozess der durch eine Reihe von physikalischen Phänomenen begleitet wird. Die wichtigsten Einflüsse sind die Erzeugung der Reibungswärme, die plastische Verformung und die Gefügeumwandlung.

Um den Prozess besser verstehen zu können wird ein mathematisches Modell erstellt, welches diese Phänomene (Wärmewirkung, Verformung und Phasenumwandlung) richtig berücksichtigen muss. Das wurde in einem thermo-mechanischen und ein thermo-metallurgischen gekoppelten 3D FE Model realisiert [13].

3.1 Berechnung der Reibungswärme in der Fügefläche

Um die Wärmeerzeugung in der Fügefläche zu berechnen wurde ein inverses Wärmeleitungsmodell [14] verwendet. Dabei wurde eine eindimensionale explizite Finite Differenzen Methode zur Lösung des inversen Wärmeleitungsproblems benutzt und mit Matlab2012 programmiert. Experimentell ermittelte Temperaturmessungen im zugänglichen Bereich des Kettenhalbgliedes, wurden als Eingabeparameter für das Modell eingesetzt, siehe Abbildung 5. Das Ergebnis der Berechnung ist die Wärmestromdichte $q(t)$ die während des linearen Reibschweißens auf der Reibfläche des Kettengliedes wirkt. Die so ermittelte Wärmestromdichte $q(t)$ wird nun als Wärmeeintrag für das thermo-mechanische und thermo-metallurgische FE Model verwendet [15].

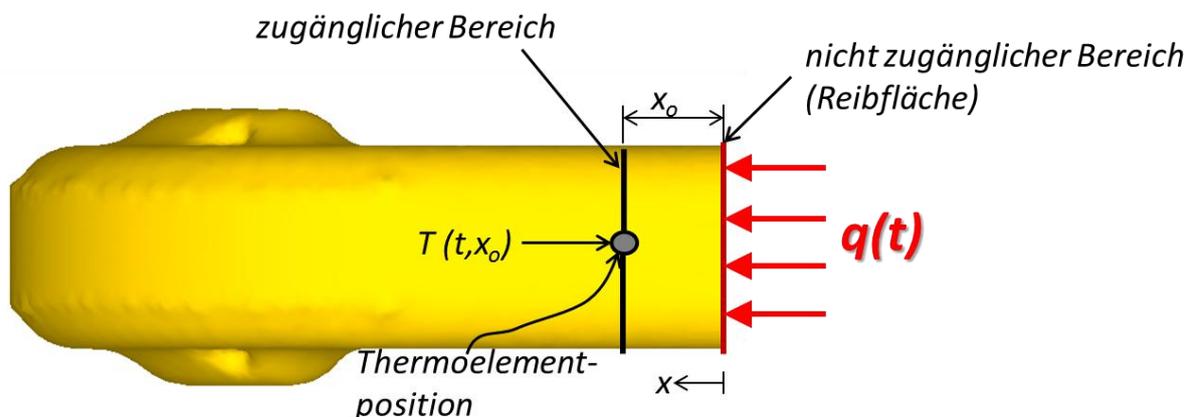


Abbildung 5: Darstellung des Modells zur Lösung des inversen Wärmeleitungsproblems

3.2 Thermo-mechanisches Modell

Mit dem thermo-mechanischen Modell [6] wurden die Temperaturentwicklung und die Verformung (Gratbildung und axiale Verkürzung) analysiert. Um die Genauigkeit des Modells zu überprüfen, wurden die Ergebnisse mit experimentellen Daten verglichen.

3.2.1 Temperaturentwicklung im Kettenglied

In der Abbildung 6 ist die berechnete Temperaturverteilung im Kettenglied nach 2,3 Sekunden (Ende der Reibphase) dargestellt.

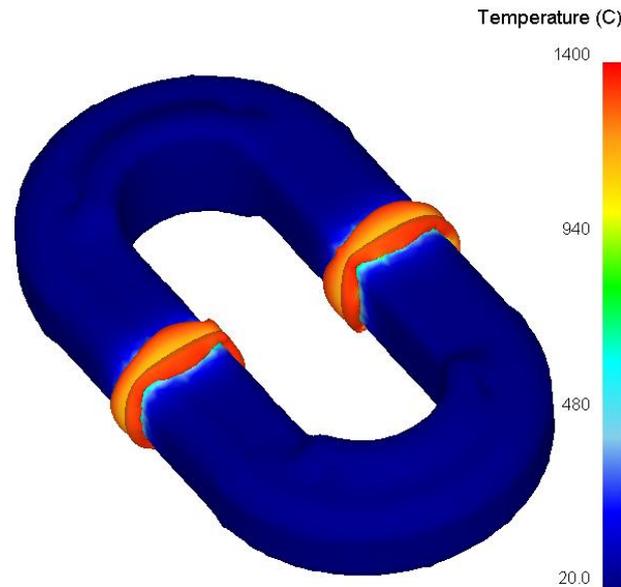


Abbildung 6: Temperaturverteilung im Kettenglied nach 2,3 Sekunden

Die mit DEFORM-3D berechnete Temperatur 3,5mm und 4,5mm von der ursprünglichen Reibfläche entfernt wird zusammen mit der experimentell gemessenen Temperatur in der Abbildung 7 dargestellt.

Die Temperatur erreicht ihr Maximum mit einer hohen Aufheizrate und einen steilen Temperaturgradienten bei 2,3 Sekunden für den Anfangsabstand von 3,5 mm.

Dabei zeigt der Vergleich zwischen der berechneten und gemessenen Temperatur für beide Positionen eine sehr gute Übereinstimmung.

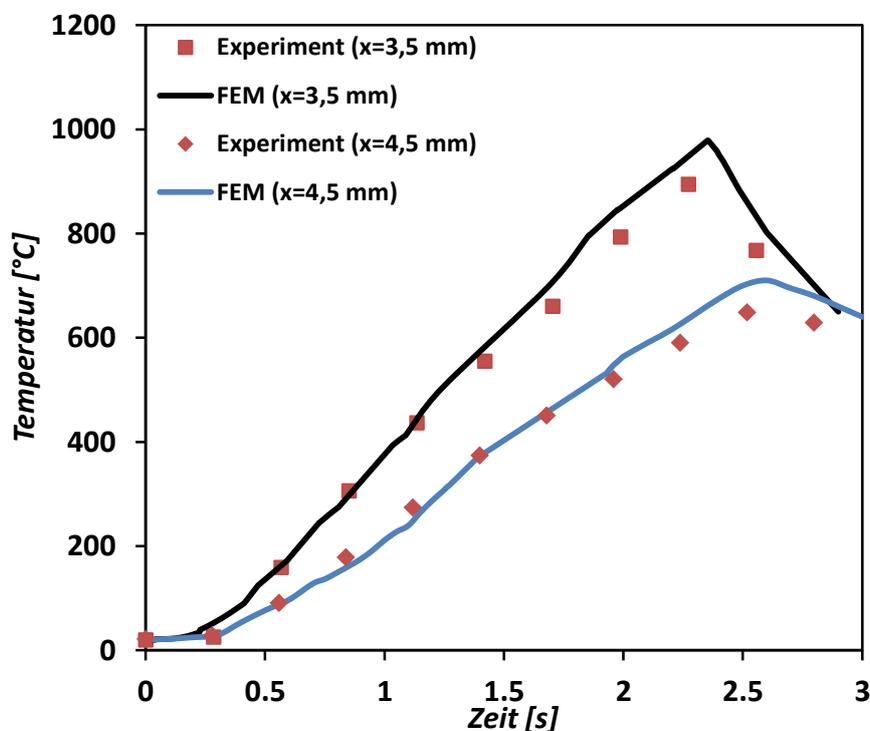


Abbildung 7: Vergleich der simulierten mit der berechneten Temperaturentwicklung bei 3,5mm und 4,5mm Anfangsabstand von der Fügefläche

3.2.2 Axiale Verkürzung im Kettenglied

Sobald das Material an der Reibfläche infolge der hohen Temperaturen ausreichend weich wird, wird eine axiale Verkürzung initiiert und das plastifizierte Material in den Schweißgrat ausgetrieben.

Abbildung 8 vergleicht die berechnete mit der experimentell ermittelten axialen Verkürzung. Dabei zeigt sich ein Unterschied im Startpunkt der axialen Verkürzung die darauf zurück zu führen ist, dass während des gesamten Prozesses des linearen Reibschweißens der plastifizierte Werkstoff - aufgrund der Relativbewegung - aus der Reibfläche der Berührungsflächen ausgetrieben wird.

Im Gegensatz dazu, basiert die axiale Verkürzung in dem thermo-mechanischen FE Modell rein auf der aufgetragenen axialen mechanischen Belastung und der Temperatur.

Abgesehen von dem Unterschied in dem Startpunkt der axialen Verkürzung zwischen dem Experiment und dem FE-Modell ist die gesamte axiale Verkürzung des Kettengliedes gut von dem thermo-mechanischen Modell vorhergesagt. Die Differenz zwischen berechneter und gemessener axialer Verkürzung beträgt ca. 13%

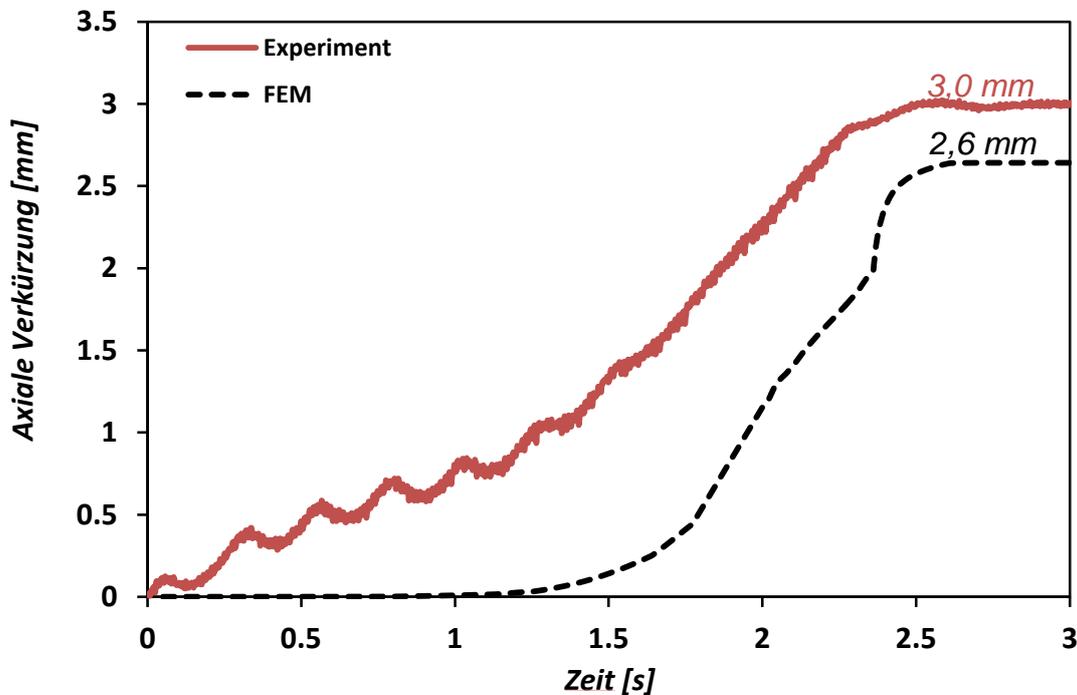


Abbildung 8: Vergleich der experimentellen mit der berechneten axialen Verkürzung des Kettengliedes

3.3 Thermo-metallurgisches Modell

Das thermo-metallurgisches Modell wurde verwendet um die Schweißnahtbreite und die Mikrostruktur im Kettenglied vorrangig aber in der Schweißverbindung zu analysieren. Die Schweißnahtbreite wird mit Hilfe der sichtbaren Wärmeeinflusszone charakterisiert. Mit dem thermo-metallurgischen Modell wurde die Schweißnahtbreite mit 4,2mm abgeschätzt, und eine 100% martensitische Umwandlung in der Schweißnahtmitte berechnet, siehe Abbildung 9.

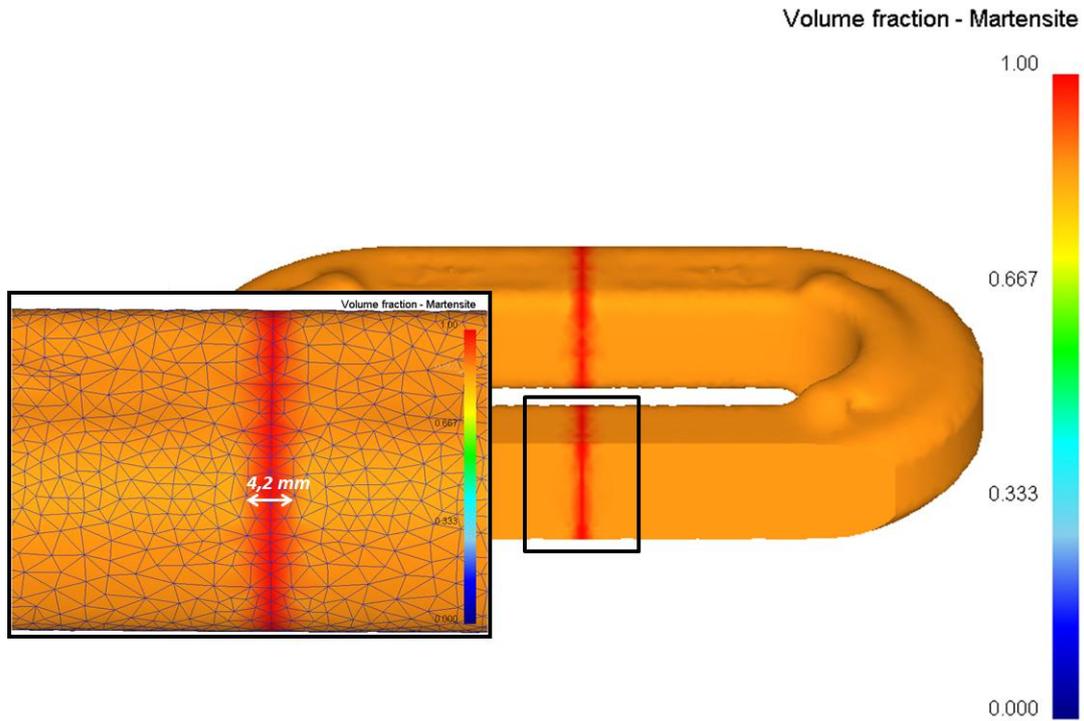


Abbildung 9: Simulierte Gefügeentwicklung im Kettenglied und die daraus abgeleitete Schweißnahtbreite

Die berechneten Werte zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Daten, siehe Abbildung 10, links. Die Aufnahme in der Abbildung 10, rechts zeugt von einem rein martensitischen Gefüge in der Schweißnahtmitte.

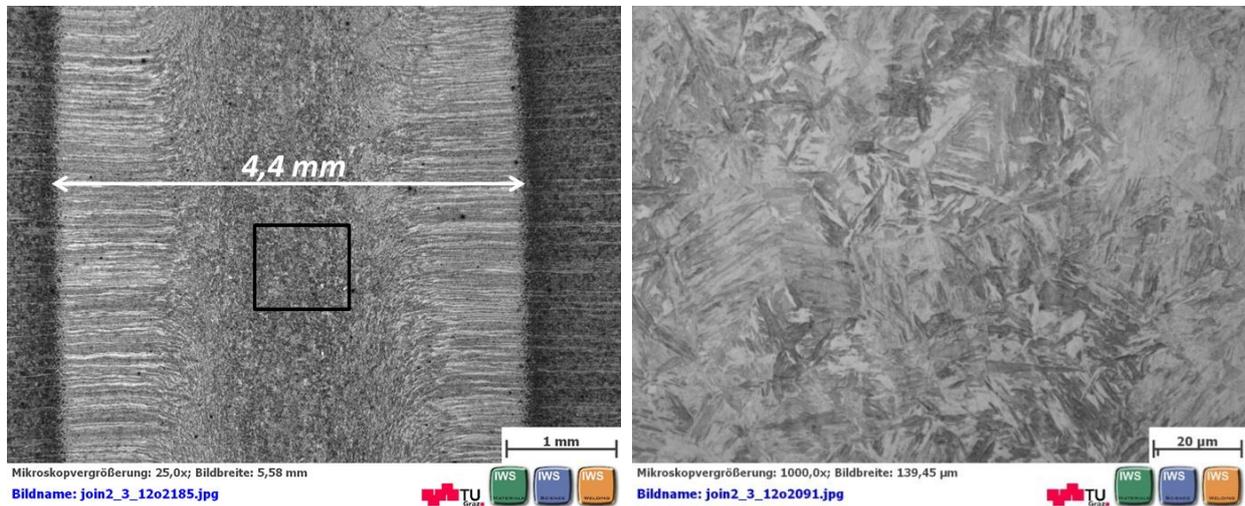


Abbildung 10: Lichtmikroskopische Aufnahme der Schweißverbindung (links) und der Schweißnahtmitte (rechts)

4. Einfluss der Schweißparameter auf die Qualität der Schweißverbindung

Um bei dem neuentwickelten linearen Reibschweißen von Kettengliedern die Innovationszeit und die Entwicklungskosten zu reduzieren und dennoch reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten wurde die Methode der statistischen Versuchsplanung (auch DOE = Design of Experiments) verwendet.

Die wichtigsten Aufgaben dabei waren den Einfluss der Schweißparameter auf die Qualität der Schweißverbindung systematisch zu untersuchen, sowie eine optimale Parametereinstellung für einen stabilen Prozess zu definieren.

Für diese Untersuchung wurden, wie in der Schweißprozesssimulation, geschmiedete Kettenhalbglieder aus 30CrNiMo8 auf der RSM1 linearreibgeschweißt und anschließend detaillierten metallographischen licht-, rasterelektronenmikroskopischen und EBSD Untersuchungen zur Charakterisierung der Verbindungsqualität unterzogen. Dabei wurden der Schweißgrat, die statischen Festigkeitseigenschaften der Verbindungen und die Reibzeit, quantifiziert und mit der Statistiksoftware Minitab 16 ausgewertet [16], [17], [18].

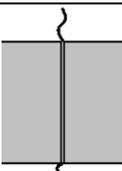
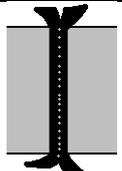
4.1 Einfluss der Schweißparameter auf den Schweißgrat

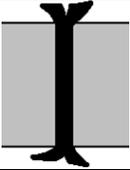
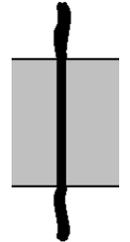
Während der Sichtprüfung wurde erkannt dass sich der Schweißgrat bei verschiedenen Parametereinstellungen unterschiedlich ausbildet. Um diesen Zusammenhang näher zu untersuchen wurde der Schweißgrat in vier Kategorien unterteilt, siehe Tabelle 1. Zur Einteilung wurden drei Merkmale herangezogen. Diese Merkmale werden über folgende Fragen zugeordnet:

1. Ist genügend Schweißgrat entstanden?
2. Ist der Schweißgrat über der gesamten Querschnittsfläche ausgebildet?
3. Sind die Schweißgratenden miteinander verbunden oder klaffen sie auseinander?

Bei der Schweißgratkategorie A entsteht kein genügender Schweißgrat, was die anderen beiden Merkmale ebenfalls ausschließt. Bei Schweißgrat B ist genügend Schweißgrat durch den Reibprozess entstanden, jedoch wird nicht die gesamte Querschnittsfläche bedeckt, und die Gratenden sind nicht verbunden. Bei Schweißgrat C sind die zwei ersten Merkmale erfüllt, die Gratenden sind jedoch noch nicht verbunden. Die Schweißgratkategorie D erfüllt alle drei Merkmale.

Tabelle 1: Definierte Schweißgratkategorien

Schweißgrattyp	Makroaufnahme	Grafik	Grat entstanden	Grat über ganze Fläche	Gratenden verbunden
A			-	-	-
B			+	-	-

C					
D					

Anhand von statistischen Tests (Hypothesentest, F-Test; t-Test) wird analysiert, ob sich eine Veränderung der Schweißparameter entscheidend auf die Zielgröße, den Schweißgrat, auswirkt. Die oben genannten statistischen Tests werden von der Statistiksoftware Minitab 16 durchgeführt und liefern folgende, in der Abbildung 11 grafisch dargestellten, Ergebnisse:

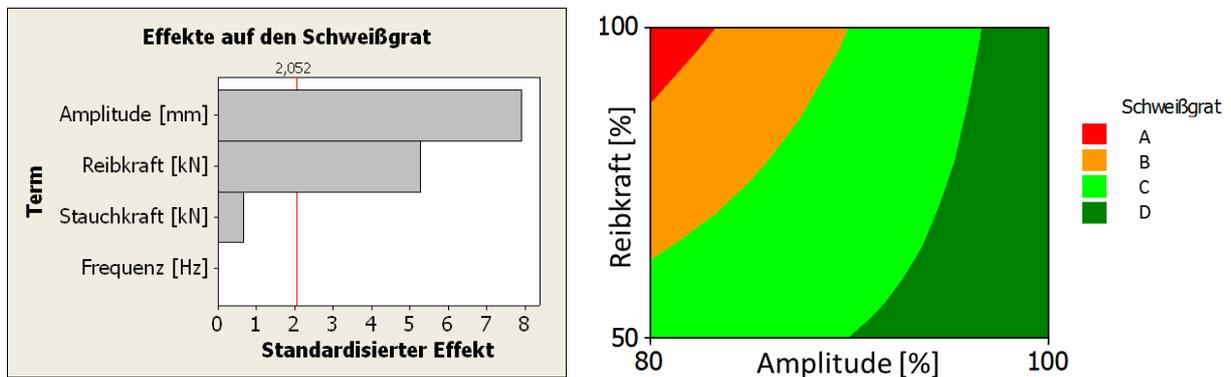


Abbildung 11: Pareto-Diagramm der Effekte der Schweißparameter auf den Schweißgrat (links), Konturdiagramm der Schweißgratverteilung über die Amplitude und Reibkraft (rechts)

Im Pareto-Diagramm, siehe Abbildung 11 links, werden die absoluten Werte der Effekte der wichtigsten Schweißparameter ohne deren Wechselwirkungen als Balken gegeneinander aufgetragen. Die senkrechte Linie an der Stelle 2,052 kennzeichnet das theoretische Quantil der t-Verteilung. D.h. alle Schweißparameter deren Werte größer als dieser Referenzwert liegen, haben einen signifikanten Einfluss auf die Ausbildung des Schweißgrates.

Es ist zu erkennen, dass die Amplitude und Reibkraft den größten Effekt auf die Schweißgratausbildung haben. Dabei sieht man auch, dass eine Veränderung der Stauchkraft oder der Frequenz zu keiner wesentlichen Änderung des Schweißgrats führt.

Das Konturdiagramm in der Abbildung 11 rechts, zeigt die ermittelte Schweißgratverteilung in Abhängigkeit der wichtigsten Schweißparameter (Amplitude und Reibkraft) bei einem konstanten Wert der Stauchkraft.

Im diesem Konturdiagramm ist zu sehen, dass die Schweißgratkategorie A bei geringen Werten der Amplitude und hohen Werten der Reibkraft erreicht werden. Zu sehen ist auch, dass die Schweißgratkategorie D bei hohen Werten der Amplitude über einen größeren Wertebereiche der Reibkraft erreicht werden.

4.2 Einfluss der Schweißparameter auf die Zugfestigkeit der Schweißverbindung

Aus dem Pareto-Diagramm in Abbildung 12 links sieht man das die Amplitude und die Reibkraft den größten Einfluss auf die Zugfestigkeit der Verbindung haben.

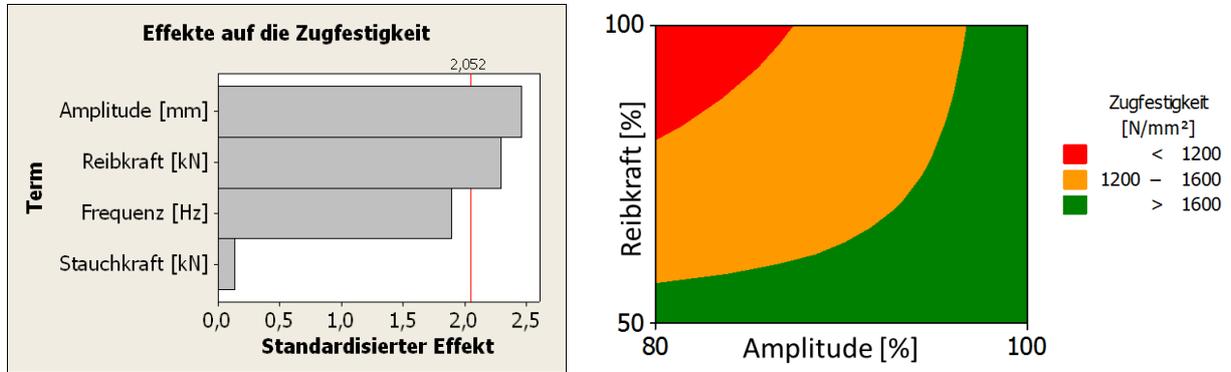


Abbildung 12: Pareto-Diagramm der Effekte der Schweißparameter auf die Zugfestigkeit (links), Konturdiagramm der Zugfestigkeitsverteilung über die Amplitude und Reibkraft (rechts)

Das Konturdiagramm, siehe Abbildung 12 rechts, zeigt die ermittelte Zugfestigkeitsverteilung in Abhängigkeit der wichtigsten Schweißparameter (Amplitude und Reibkraft) bei einem konstanten Wert der Frequenz.

Es ist zu sehen dass bei einer kleinen Amplitude und einer hohen Reibkraft geringere Zugfestigkeitswerte (unter 1200 N/mm²) erreicht werden. Höhere Zugfestigkeitswerte können über einen größeren Bereich der Amplitude mit einer geringen Reibkraft und bei einer großen Amplitude über einen großen Bereich der Reibkraft erreicht werden.

4.3 Einfluss der Schweißparameter auf die Reibzeit

Aus dem Paretodiagramm in Abbildung 13 links ist zu erkennen, dass die Amplitude und die Frequenz den größten Einfluss auf die Reibzeit haben.

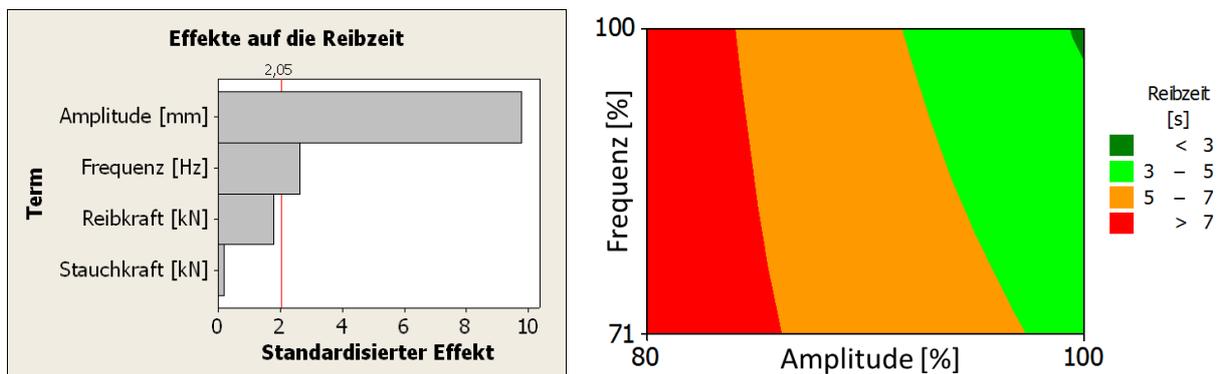


Abbildung 13: Pareto-Diagramm der Effekte der Schweißparameter auf die Reibzeit (links), Konturdiagramm der Reibzeitverteilung über die Amplitude und Frequenz (rechts)

Abbildung 13 rechts zeigt die ermittelte Reibzeitverteilung in Abhängigkeit von der Amplitude und der Frequenz bei einem konstanten Wert der Reibkraft. In dieser Abbildung ist sehr gut zu sehen dass die kürzesten Reibzeiten (unter 3 Sekunden) bei

hoher Amplitude und hoher Frequenz zu erwarten sind. Dementsprechend führt eine Verringerung der Amplitude, in diesem Prozessbereich, zur Erhöhung der Reibzeit.

4.4 Definition der optimalen Parametereinstellung für die Serienproduktion

Durch die systematische Auswertung der Ergebnisse der statistischen Versuchsplanung [5] konnte die optimale Parametereinstellung für das lineare Reibschweißen von Kettengliedern bestimmt werden. Dieser Parametersatz wurde im Rahmen des abschließenden Teils der statistischen Versuchsplanung, dem Bestätigungsversuch, 15 mal verschweißt.

Abbildung 14 und Tabelle 2 zeigen die Ergebnisse dieses Versuchs. Dabei erreicht die Zugfestigkeit Werte zwischen 1681 MPa und 1790 MPa wobei die Standardabweichung bei 29,5 MPa bzw. bei nur 1,7% liegt. Die Reibzeit für diese Versuche bewegt sich zwischen 2,2 und 2,4 Sekunden bei einer Standardabweichung von 0,05 Sekunden was 2,1% entspricht. Alle 15 Versuche hatten dabei die Schweißgratqualität D.

Die Standardabweichungen bewegen sich in einem sehr guten Wertebereich und die zuvor ermittelte Parametereinstellung kann für eine robuste Serienproduktion empfohlen werden.

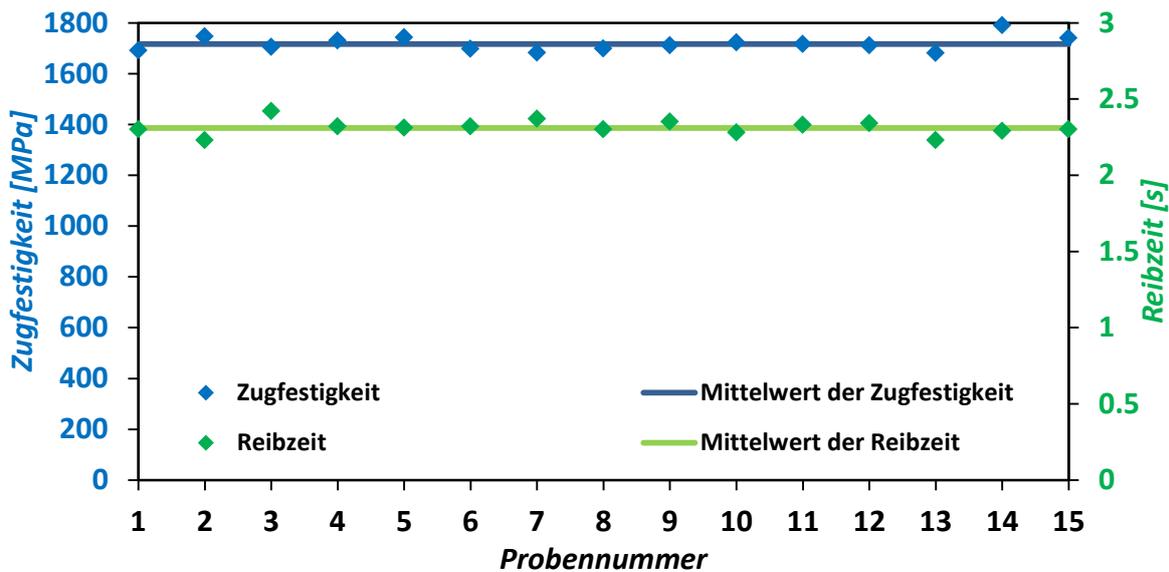


Abbildung 14: Ermittelte Zugfestigkeit und Reibzeit für 15 Proben der optimalen Parametereinstellung

Tabelle 2: Auswertung der Ergebnisse für die optimale Parametereinstellung

Zielgröße	Mittelwert	Standardabweichung	s [%]	Min.	Max.	Grat
Zugfestigkeit [MPa]	1716	29.5	1.7	1681	1790	D
Reibzeit [s]	2.3	0.05	2.1	2.2	2.4	

5. Einsatz der linear reibgeschweißten Förderkette im Zementbecherwerk

Förderketten müssen, neben einer hohen Zugfestigkeit, vor allem höchste Verschleißbeständigkeit und Lebensdauer aufweisen, da sie mit hartem, abrasivem Fördergut in Berührung kommen. Bei der Förderkette wird diese Eigenschaft durch hohe Oberflächenhärten von über 800 HV erreicht. Um in zwei- und mehrsträngigen Förderanlagen eingesetzt werden zu können, müssen Förderketten engste Stranglängen- und Paartoleranzen aufweisen.

Bei dem konventionell eingesetzten Abbrennstumpfschweißen können exakt gleich lange Kettenpaare, welche für die Fördertechnik essentiell sind, nur durch Kalibrierung (recken auf Maß) und paarweise Sortierung hergestellt werden.

Durch den wegkontrollierten Prozess im Falle des linearen Reibschweißens kann die Schweißverbindung auf eine genaue Kettenteilungstoleranz abgestimmt, und somit diese aufwendigen Fertigungsschritte eingespart werden.

Mit dem, durch die statistische Versuchsplanung ermittelten optimalen Schweißparametersatz wurde ein Förderkettenpaar von 8,3m Länge hergestellt. Dieses linear reibgeschweißte Förderkettenpaar wurde im 1. Quartal 2012 in einem Zementumlaufbecherwerk (siehe Abbildung 15) eingebaut. Bis heute hält es dort den höchsten Beanspruchungen (Förderleistung 120 t/h bei einer Fördergeschwindigkeit von 1,32 m/sec) problemlos stand.

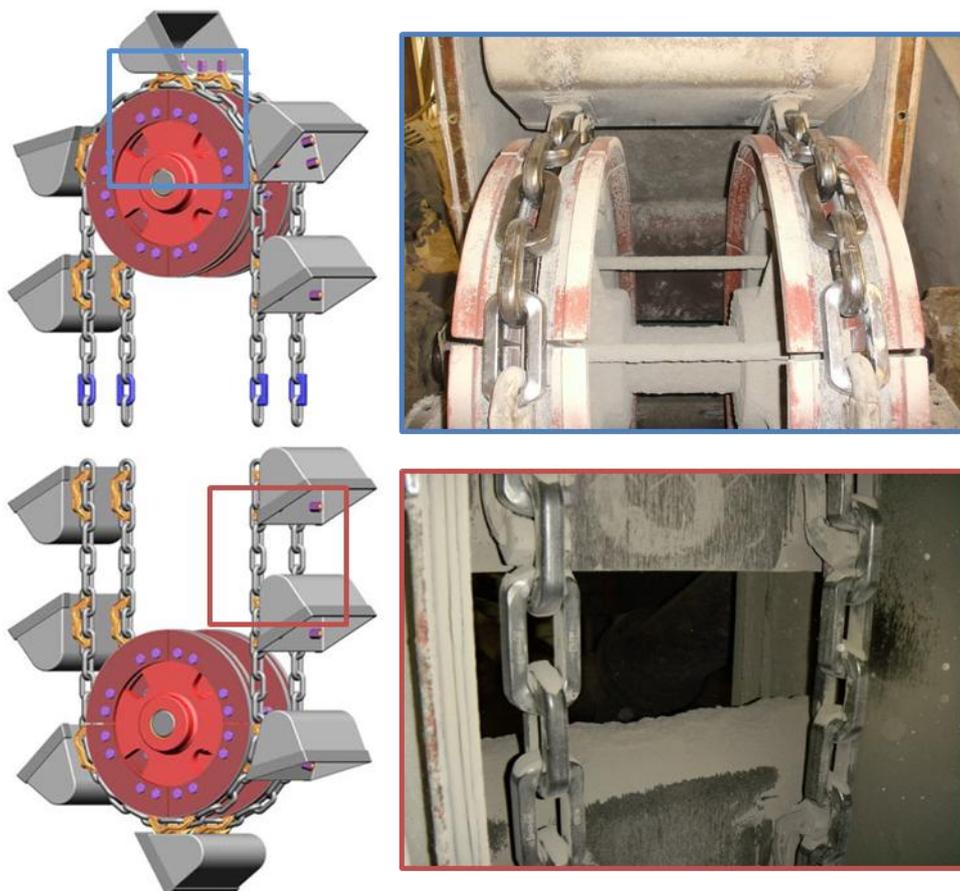


Abbildung 15: Linear reibgeschweißte Förderkette im Einsatz

6. Schlussfolgerungen

In der dargestellten Arbeit wurde gezeigt dass sich das lineare Reibschweißen sehr gut für das Verbinden von Ketten eignet. Für die Untersuchung und Entwicklung des Prozesses wurde von pewag Engineering und dem Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik der TU Graz eine linear Reibschweißanlage für Kettenglieder entwickelt.

Durch die Anwendung der 3D Finite Elemente Simulationen mit DEFORM konnte umfangreiches Wissen über das lineare Reibschweißen generiert werden. Die Lösung des inversen Wärmeleitungsproblems hat die Wärmezufuhr in der Reibfläche als essentielle Eingabegröße für die FE Simulation zugänglich gemacht. Durch die thermo-mechanisch gekoppelte Simulation konnte die Temperaturentwicklung und die Verformung studiert werden. Das thermo-metallurgische Model diente zur Modellierung der Gefügeentwicklung und der Vorhersage der Schweißnahtbreite nach dem Schweißen.

Die statistische Versuchsplanung ermöglichte den Einfluss der Schweißparameter untereinander sowie auf die mechanischen Eigenschaften, Reibzeit und Gratausbildung systematisch zu untersuchen und damit Grundlegende Zusammenhänge zu verstehen. Daneben lieferte es die im Hinblick auf die Eigenschaften der Schweißverbindung und die Reibzeit die optimale Parametereinstellung die sich als sehr robust erwies.

Die Umsetzbarkeit des Verfahrens wurde auch nachgewiesen. Die gesammelten Ergebnisse aus der Schweißprozesssimulation und der statistischen Versuchsplanung mündeten in der Produktion eines 8,3m langen Kettenpaares das derzeit erfolgreich in einem Zementbecherwerk unter realen Bedingungen eingesetzt wird.

7. Literaturverzeichnis

[1]: K.Mucic, F.Fuchs, N.Enzinger: Linear Friction Welding of High Strength Chains, 9th International Conference on Trends in Welding Research, 04.-08.06.2012, Chicago, USA. In Press.

[2]: F.Fuchs, P.Tasic, N.Enzinger: Innovatives Schweißverfahren für hochfeste Hebe- und Förderketten, Schweiß- und Prüftechnik, Sonderband Dezember 2009.

[3]: K.Mucic, F.Fuchs, N.Enzinger: Process optimization for linear friction welding of high strength chains, 8th European Conference on Joining Technology, 24.-26.05.2012, Pula, Croatia. Proceedings of EUROJOIN 8, 157-166.

[4]: R. Turner, et al.: Linear friction welding of Ti–6Al–4V: Modelling and validation, Acta Materialia, 59 (2011) 3792-3803.

[5]: H.Cerjak, Ä.Pengg, F.Fuchs: Verfahren zur Herstellung geschweißter Rund- und Profilketten, Patent: EP2219803B1, Veröffentlichungsdatum: 24.08.2011.

[6]: M.M. Shtrikman: Linear friction welding, Welding International Vol.24, No.7 (2010) 563-569.

- [7]: Y. Ichiyama, S. Kodama: Flash-Butt Welding of High Strength Steels (2007), Nippon Steel Technical Report.
- [8]: P. Wanjara, M. Jahazi: Linear friction welding of Ti-6Al-4V: Processing, microstructure, and mechanical-property inter-relationships. Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 36A (2005) 2149-2164.
- [9]: L. Fratini, et al.: Investigations on the linear friction welding process through numerical simulations and experiments, Materials & Design, 40 (2012) 285-291.
- [10]: E. Dalgaard, et al.: Linear friction welding of a near- β titanium alloy, Acta Materialia, 60 (2012) 770-780.
- [11]: A. Vairis, M. Frost: Modelling the linear friction welding of titanium blocks. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing 292 (2000) 8-17.
- [12]: A. Vairis, M. Frost: High frequency linear friction welding of a titanium alloy, Wear, 1998, 217, 1, 117-131.
- [13]: K. Mucic, J. Lopera, F. Fuchs, N. Enzinger: Linear friction welding of high strength chains: modelling and validation, 10th International Seminar Numerical Analysis of Weldability, 24.-26.09.2012, Seggau, Austria. In Press.
- [14]: M. Maalekian, E. Kozeschnik, H.P. Brantner, H. Cerjak: Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars, Acta Materialia 56 (2008) 2843-2855.
- [15]: J. Lopera, K. Mucic, F. Fuchs, N. Enzinger: Numerical simulation of linear friction welded chain links, Diplomarbeit, Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, TU Graz, 23.05.2012.
- [16]: K. Mucic, J. Löffelmann, F. Fuchs, N. Enzinger: Linear Friction Welding of High Strength Chains, 2nd IIW European South-American School of Welding and Correlated Processes, 11.-13.9.2012, Wels, Austria.
- [17]: J. Löffelmann, K. Mucic, F. Fuchs, N. Enzinger: Systematische Untersuchung der Schweißparameter beim linearen Reibschweißen, Diplomarbeit, Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, TU Graz, 19.06.2012.
- [18]: K. Mucic, F. Fuchs, N. Enzinger: Lineares Reibschweißen von Kettengliedern, pewag-group Kongress, Kapfenberg am 05.05.2011.

EDV Wissen:

Technische Anwendungsprogramme für die Schweißprozesssimulation:

- ABAQUS 11.2
- DEFORM-3D
- SYSWELD 2011.0

Technische Anwendungsprogramme für die Berechnung von Materialeigenschaften:

- JMatPro 6.2.1
- MatCalc 5.50

Technische Anwendungsprogramme im Qualitätsmanagement:

- Minitab 16
- Matlab2012a (künstliche Neuronale Netze)

Weiterbildung:

[Nov. 2010]	GSI SLV München, Lehrgang: Reibschweißen I-Grundlagenschulung
[Mär. 2011]	Ingenieurbüro für Schweißsimulation und Wärmebehandlungssimulation Dr. Tobias Loose: Schweißprozesssimulation mit SYSWELD
[Mär. 2012]	GSI SLV München, Lehrgang: Reibschweißen III- Prüfen und Bewerten von Reibschweißverbindungen

Sprachen:

- Bosnisch/Kroatisch/Serbisch
- Deutsch
- Englisch

Außeruniversitäres Engagement:

[Okt. 2003 – Okt. 2009]	IAESTE LC Graz, Vorstandsmitglied für Finanzen
[Okt. 2003 – Okt. 2009]	HochschülerInnenschaft TU Graz, Sachbearbeiter Referat für ausländische Studierende
[Okt. 2003 – Okt. 2009]	Schauspielhaus Graz, Schauspielstatist in zahlreichen Vorstellungen (z.B. Das weite Land, Janis Joplin, Lulu)



Graz, 30.10.2012

Unterschrift