

Numerische Simulation des HF- Längsnahtrohrschweißprozesses

Masterarbeit

Autor: Sebastian Wipfler, BSc

Betreuer

Dipl.-Ing. Mustafa Kicin

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Enzinger

Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik



Institutsvorstand

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.Priv.-Doz. Christof Sommitsch

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Technische Universität Graz, Austria



Graz, Mai 2015

This work was in the competence network for Joining JOIN4 + completed, funded by:



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt den Hochfrequenz Längsnaht Rohrschweißprozess von unlegierten Stahlrohren. Dieser automatisierte Prozess zeichnet sich durch sehr hohe Produktivität und hohe Qualität aus.

Für den realen Prozess werden Aussagen über die wichtigsten Schweißnahteigenschaften getroffen. Vordergründig sind hier das Temperaturfeld, der Verformungszustand und das Nahtaussehen von Bedeutung. Zusätzlich kann eine Aussage über die Einflüsse der verschiedenen Eingangsparameter wie Frequenz, Spannung, Leistung gemacht werden.

Der Prozess wird mit der finiten Elemente Methode modelliert und simuliert wobei im Vordergrund die physikalische Koppelung des Gesamtprozesses steht. Dafür werden die elektromagnetische, die thermische und die mechanische Berechnung parallel durchgeführt damit die stark temperaturabhängigen Materialeigenschaften berücksichtigt werden können. Das plastische Materialverhalten wird mit experimentell ermittelten Fließkurven beschrieben. Diese werden abhängig von Temperatur und Umformgeschwindigkeit in das finite Elemente Modell implementiert. Die temperaturabhängigen Materialeigenschaften werden mit JMatPro simuliert und implementiert. Durch die Koppelung und das umfangreiche Materialmodell kann der Prozess als Ganzes betrachtet werden.

Ziel der Arbeit ist es ein Gesamtmodell des Prozesses zu erstellen mit dem Parameteränderungen im Produktionsprozess nachvollzogen und deren Auswirkungen unabhängig vom Versuch abgeschätzt werden können. In der Arbeit wird auf einige Schwierigkeiten in der Simulation eingegangen und verschiedene Lösungsansätze vorgestellt.

Abstract

This Thesis investigates the high frequency tube welding process of carbon steel. It is a highly automated process which is characterized by very high productivity and high quality.

The aim of this work is to build a model to get information about the most important properties of the welding seam; which are the temperature field, the deformation state and the shape of the welding seam. Additionally a prediction of the effect of welding parameters like frequency, welding voltage and welding power on the welding process can be estimated.

The process is modelled and simulated with the finite element method focussing on the linking between the various physical phenomena of the process. Therefore the electromagnetic, thermal and mechanical simulation have to be executed simultaneously to consider the highly temperature dependant material properties.

The plasticity of the investigated material is implemented into the simulation process by experimental determined temperature and strain rate dependent flow curves. The temperature dependent material properties are estimated with JMatPro and implemented in the finite elements model.

The aim of the thesis is to build an overall model of the process to investigate change of parameters and the effects of the changings on the running production process without complex and expensive tests. In this work some problems with the simulation procedure occurred. They are discussed and various solving strategies are developed.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abkürzungsverzeichnis | 1 |
| 1 Einleitung | 3 |
| 1.1 Veranlassung und Ziel | 3 |
| 1.2 Vorgehensweise | 4 |
| 2 Literaturübersicht | 5 |
| 2.1 HF-Schweißprozess | 5 |
| 2.1.1 Aufbau | 6 |
| 2.1.2 Anwendung | 8 |
| 2.1.3 Induktive Erwärmung | 10 |
| 2.1.4 Thermische Interaktion | 15 |
| 2.1.5 Pressstumpfschweißen..... | 18 |
| 2.1.6 Ausrüstung..... | 19 |
| 2.2 Betriebsbereiche und Parameter..... | 22 |
| 2.2.1 Schweißgeschwindigkeit..... | 24 |
| 2.2.2 Schweißfrequenz | 25 |
| 2.2.3 Wärmeeinflusszone | 26 |
| 3 Numerische Simulation..... | 27 |
| 3.1 Eingabedaten | 30 |
| 3.1.1 Prozessdaten | 30 |
| 3.1.2 Materialdaten..... | 33 |
| 3.1.3 Randbedingungen..... | 38 |
| 3.1.4 Geometrie..... | 39 |
| 3.2 Elektromagnetische Simulation | 42 |
| 3.2.1 Mathematische Modelle | 42 |
| 3.2.2 Modell..... | 43 |
| 3.2.3 Randbedingungen..... | 46 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2.4 | Materialdaten | 48 |
| 3.3 | Thermomechanische Simulation | 49 |
| 3.3.1 | Mathematische Modelle | 49 |
| 3.3.2 | Modell..... | 49 |
| 3.3.3 | Randbedingungen..... | 51 |
| 3.3.4 | Materialdaten..... | 57 |
| 3.4 | Gekoppelte Simulation..... | 58 |
| 3.5 | Einheiten | 59 |
| 4 | Ergebnisse | 61 |
| 4.1 | Verifizierung der Modelle | 61 |
| 4.1.1 | elektromagnetische Berechnung | 61 |
| 4.1.2 | Thermomechanische Berechnung..... | 62 |
| 4.2 | Simulationsprozess | 65 |
| 4.2.1 | Entwicklungsstufendokumentation und Lösungsansätze | 65 |
| 4.2.2 | Auswertung | 72 |
| 4.3 | Parameterstudie | 76 |
| 4.3.1 | Variation der Presskraft..... | 77 |
| 4.3.2 | Variation der Stromdichte..... | 80 |
| 4.3.3 | Variation der Schweißgeschwindigkeit | 82 |
| 5 | Zusammenfassung und Erkenntnis..... | 84 |
| 6 | Ausblick..... | 85 |
| 7 | Abbildungsverzeichnis | 88 |
| 8 | Tabellenverzeichnis | 91 |
| 9 | Literaturverzeichnis | 92 |
| 10 | Anhang | 94 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------------|--|
| HF | Hochfrequenz |
| EMJH | Electromagnetic Joule Heating, Größe der durch Joul'sche Wärme erzeugten Energie |
| EMCD | Electromagnetic Current Density, Dichtefeld des im Werkstück induzierten Stromes |
| NT | Nodal Temperature, Knotentemperatur |
| f | Frequenz |
| λ , K | Wärmeleitfähigkeit |
| ε | Emissionskoeffizient |
| μ_r | relative Permeabilität |
| μ_0 | Vakuumpermeabilität |
| σ | Spannung, Boltzmannkonstante, elektrische Leitfähigkeit |
| ω | Kreisfrequenz |
| α | Wärmeausdehnungskoeffizient, |
| ρ | Dichte |
| c_p | spezifische Wärmekapazität |
| WEZ | Wärmeeinflusszone |
| FEM | Finite Elemente Methode |
| FE | Finite Elemente |
| J | Stromdichte |
| j | imaginäre Einheit |
| T | Temperatur |

| | |
|----------------|---|
| t | Zeit |
| q, \dot{q} | Energiedichte der Wärme, Wärmestromdichte |
| v | Geschwindigkeit |
| R ₀ | Gleichstromwiderstand |
| r | Rohrradius |
| H | magnetische Feldstärke |
| B | magnetische Flussdichte |
| W | Arbeit, Energie |
| P | Leistung |

1 Einleitung

1.1 Veranlassung und Ziel

Hochfrequenzschweißen (HF-Schweißen) wird für den Großteil der weltweit erzeugten geschweißten Rohre verwendet. Trotzdem handelt es sich dabei um einen wenig erforschten Prozess. Grund dafür ist vorwiegend, dass dieses Verfahren sehr fehlerverzeihend ist. Ein besseres Verständnis der physikalischen Vorgänge würde zu einer höheren Produktivität und einer besseren Qualität führen.

Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist die realitätsnahe Abbildung des Gesamtprozesses mit der Finiten Elemente Methode. Die numerische Simulation von Schweißprozessen spielt in der heutigen Zeit eine immer stärker werdende Rolle. Die Ergebnisvorhersage, Parameterfindung und -optimierung, die Reduzierung des praktischen Versuchsaufwandes sowie die Entwicklung eines tieferen Prozessverständnisses sind für die Forschung und Industrie wichtige Ziele. Das erstellte Simulationswerkzeug soll in der Lage sein, den Einfluss der Schweißparameter auf die Schweißverbindung darzustellen.

Das heißt der Einfluss von Parameteränderungen auf

- Temperaturverteilung
- Wärmeeinbringung
- Verschiebungen
- Dehnungen
- Eigenspannungen
- Verformungszustand

soll untersucht werden.

1.2 Vorgehensweise

Abbildung 1 zeigt die zeitliche und inhaltliche Abfolge der in der Arbeit behandelten Themen. Die Kapitelaufteilung weicht aus Gründen der Übersichtlichkeit leicht von den 4 dargestellten Sammelbegriffen ab.

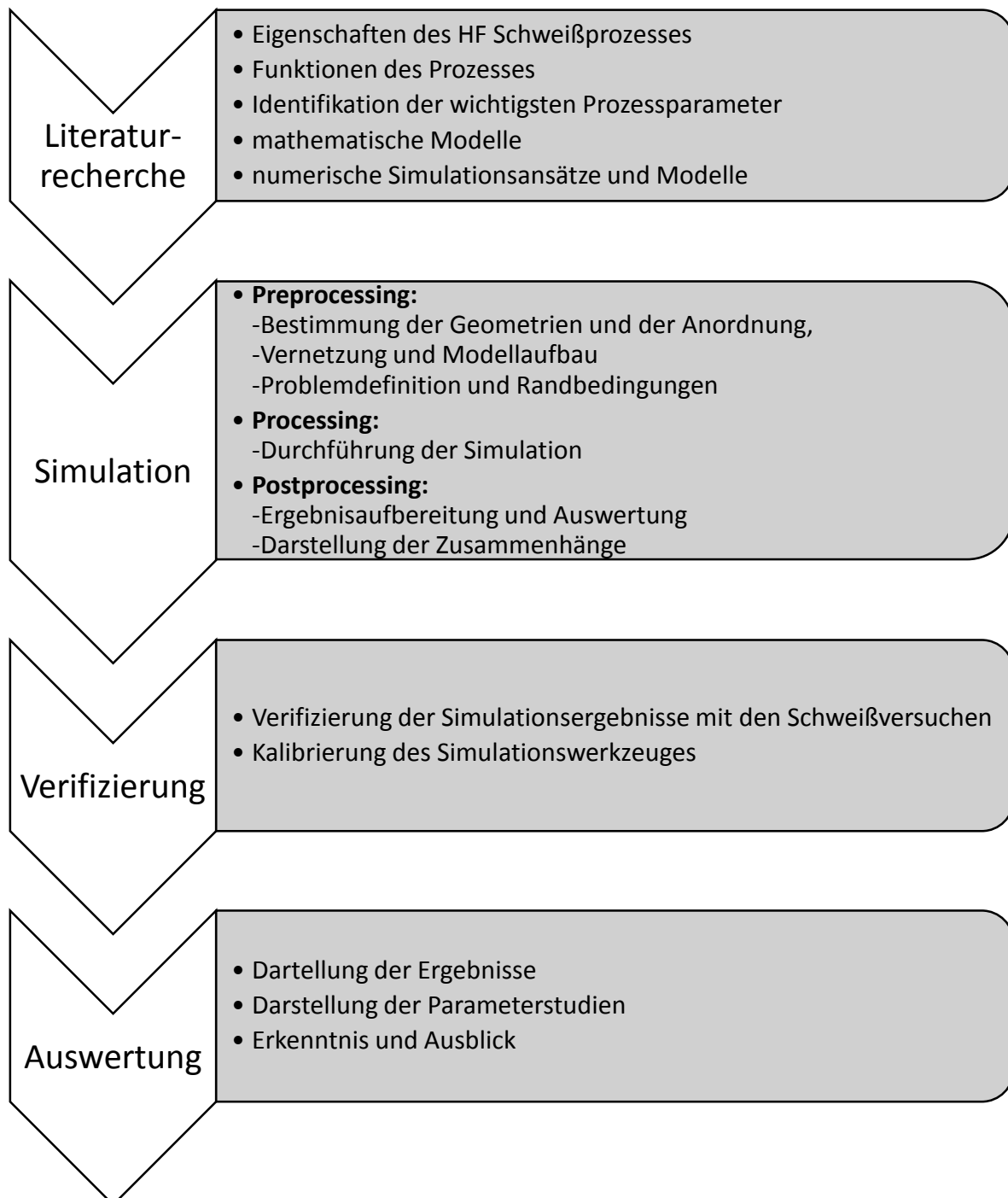


Abbildung 1: Vorgehensweise

2 Literaturübersicht

2.1 HF-Schweißprozess

Beim HF-Schweißen handelt es sich um einen Widerstandsschweißprozess der hochfrequente Ströme ausnutzt um die Schweißwärme an dem gewünschten Ort bereitzustellen. Die Wärme die durch den elektrischen Widerstand erzeugt wird führt zur Vereinigung des Materials an der Schweißstelle. Zusätzlich wird Stauchdruck über Schweißrollen aufgebracht. Beim betrachteten Prozess handelt es sich um das induktive Hochfrequenzschweißen. Dieses Verfahren wird vor allem für metallische Werkstoffe verwendet. Dabei wird die Schweißwärme durch induzierte Wirbelströme im Werkstück erzeugt. Die Wirbelströme werden von einer mit hochfrequentem Strom durchflossenen Spule erzeugt.

Das Verfahren wurde in den späten 1940er Jahren entwickelt um qualitativ hochwertige Stumpfnähte an Rohren herstellen zu können. Im Laufe der Jahrzehnte wurde das Verfahren weiterentwickelt und in den späten 1980er Jahren in der Industrie etabliert. Ein großer Fortschritt in der Verbesserung des Schweißverfahrens war die Einführung von statischen Umrichtern in den 1990er Jahren die die Vakuumröhren bei der Erzeugung von hochfrequentem Strom ersetzten. Aktuell werden Schweißstromquellen mit veränderbaren Parametern verwendet. Diese ermöglichen eine Vielzahl an Einstellmöglichkeiten und damit die Herstellung von verschiedenen Produkten an ein- und derselben Maschine. [1] (S. 456-462)

Jeder Parameter hat in gewisser Weise Einfluss auf das Aussehen und die Eigenschaften der Schweißnaht. Dies führt zu einem sehr sensiblen Prozess, der sich gleichzeitig durch die Vielzahl an Einstellmöglichkeiten für eine breite Palette an Materialien anpassen lässt. Wird der Prozess im richtigen Betriebsbereich geführt so kann die Schweißzone sehr genau auf die gewünschten Eigenschaften eingestellt werden. [2]

Die Zusammenhänge der Parameter werden von Hyun-Jung Kim und Sung-Kie Youn in [3] mit der finiten Elemente Methode simuliert. Die Simulation beinhaltet die Zusammenhänge der Stellgrößen auf Basis einer gekoppelten elektromechanischen- und thermischen Berechnung. Die Einflüsse der mechanischen Bearbeitung des Werkstückes blieben dabei unberücksichtigt. Eine ähnliche Vorgangsweise wählen auch Y. Han und E.L. Yu in ihrer Veröffentlichung. [4].

Auch in diesem Modell wird die mechanische Verformung nicht berücksichtigt. Die Simulationsergebnisse dienen dabei zu einer Vorhersage des Temperaturfeldes um das Gefüge in einer nachfolgenden physikalischen Gefügesimulation mit dem Gleeble Thermal Simulator nachzubilden und zu untersuchen.

2.1.1 Aufbau

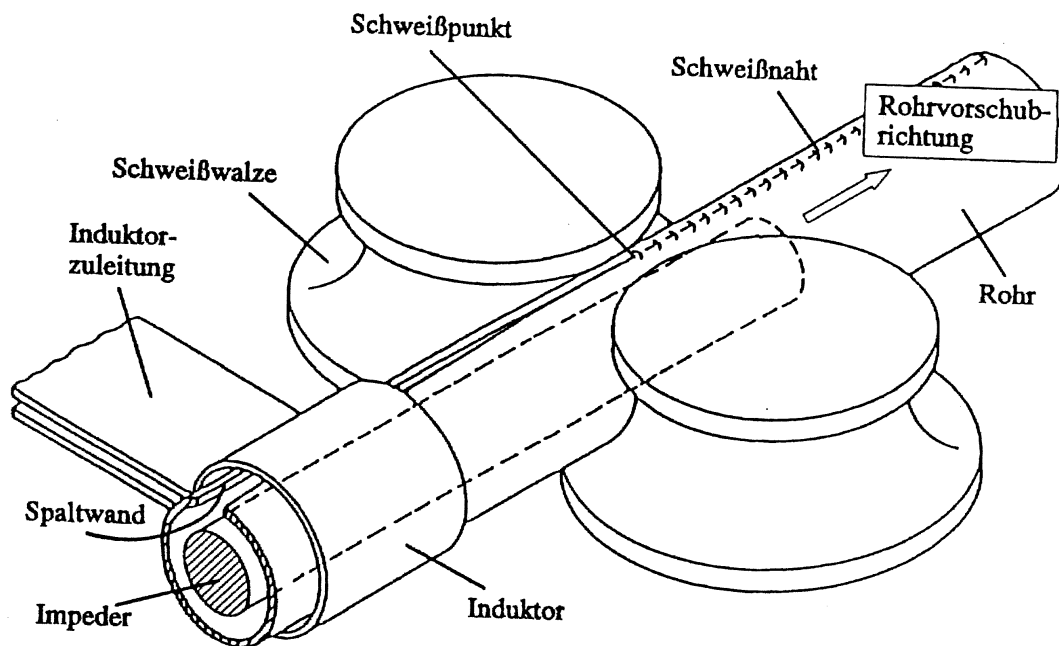
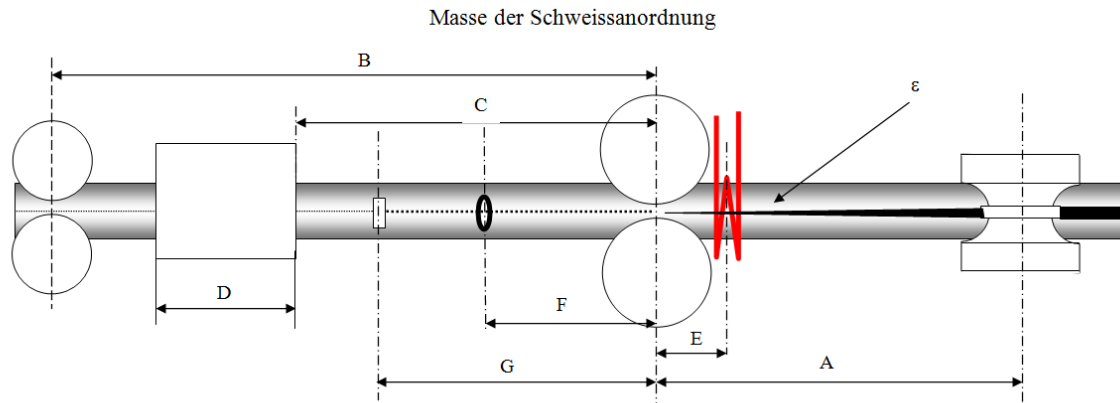


Abbildung 2: Prinzipskizze zum induktiven Längsnahtrohrschweißen (Fa. Jansen)

Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung des betrachteten Prozesses.

Im Vorfeld der Schweißung wird ein Blechstreifen in die dargestellte Rohrform gebogen. Der entstehende Bogen mit dem Spalt wird dann durch den Induktor geführt. Es folgt die Zone der induktiven Erwärmung zwischen Induktor und Schweißwalzen. In diesem Bereich wird das Rohr an den Spaltflanken durch den induzierten Strom stark erwärmt. Im Bereich des Schweißpunktes wird dann über die Schweißwalzen der Stauchdruck aufgebracht und die Verbindung hergestellt. Die Schweißwalzen müssen kontinuierlich gekühlt werden. Die Funktion des dargestellten Impeders spielt für die prinzipielle Funktion keine große Rolle. Seine Funktion wird in den folgenden Kapiteln noch beschrieben.



| | |
|--|-------------------------------------|
| Abstand letzter Rollensatz --> Schweißrollen | A = 750 |
| Abstand Schweißrolle --> erste Kalibrierrollen | B = 8500 |
| Freie Länge bis Beginn Kühlbad | C = 2000 |
| Länge Kühlbad | D = 2 x 3000 |
| Abstand Induktor --> Schweißrollen | E = 70 |
| Öffnungswinkel Schweißspalt | $\varepsilon = \text{ca. } 2^\circ$ |
| Abstand Schweißrollen --> Schaber innen | F = 550 |
| Abstand Schweißrollen --> Schaber außen | G = 700 |

Abbildung 3: schematischer Gesamtprozess mit Abmessungen (Fa. Jansen)

Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau des gesamten Prozesses. Im Abstand B zu den Schweißwalzen befinden sich die ersten Kalibrierrollen, Abstand C kennzeichnet den Beginn des Kühlbades. Die Maße F und G kennzeichnen die Positionen der Schaber die den Schweißwulst abtragen. E bemisst die Induktionsspule und ε gibt den Öffnungswinkel des Schweißspaltes an.

Grundsätzlich kennzeichnet sich der HF-Rohrschweißprozess durch eine große Bandbreite an Anwendungsmöglichkeiten. Die Schweißgeschwindigkeit liegt abhängig von Durchmesser und Wandstärke verhältnismäßig hoch zwischen 15m/min und 152m/min. Die Rohrgröße reicht von Injektionsnadeln bis zu Pipelines. [1], [5]

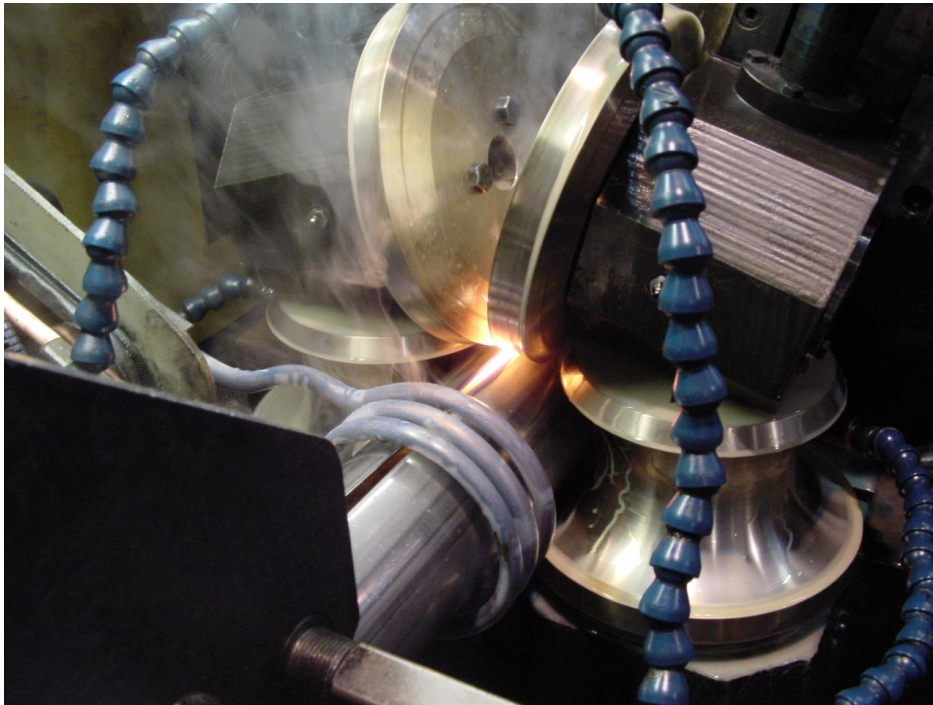


Abbildung 4: realer Prozess, Prozess mit Toprollen (Fa. Jansen)

Abbildung 4 zeigt den realen Prozess. Zu sehen sind alle Teile aus Abbildung 1 ohne Impeder. Zusätzlich sind noch die sogenannten Toprollen zu sehen die das Rohr direkt neben der Schweißnaht in Position halten. Kapitel 2.1.6.4 beschreibt die genaue Situation der Einformung in den Schweißwalzen.

2.1.2 Anwendung

HF-Schweißen deckt einen sehr großen Bereich an Werkstoffen ab. So können zum Beispiel unlegierter Stahl, niedriglegierter Stahl, Edelstahl, Aluminium, Kupfer, Messing und Titan verarbeitet werden. Ausnahmen bilden nur jene Materialien die schlechte Warmumformeigenschaften aufweisen. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung von häufig verwendeten Materialien, die typischen Abmessungen und die zugehörigen Schweißparameterbereiche.

Tabelle 1: Typische HF-Schweißparameter [1]

| Werkstoff | Aussendurchmesser [mm] | Wandstärke [mm] | Schweißgeschwindigkeit [m/min] | Leistung [kW] | Frequenz [kHz] |
|------------------------------|------------------------|-----------------|--------------------------------|---------------|----------------|
| niedriglegierter Stahl | 10 - 75 | 0,6 - 2 | 25 - 300 | 50 - 500 | 300 - 400 |
| unlegierter Stahl (<0,05% C) | 50 - 200 | 1,5 - 12,7 | 20 - 150 | 200 - 1000 | 200 - 400 |
| | 150 - 400 | 2 - 12,7 | 15 - 90 | 400 - 1200 | 150 - 300 |
| | 300 - 600 | 6 - 25 | 10 - 50 | 800 - 1200 | 100 - 200 |
| rostfreier Stahl | 10 - 75 | 0,6 - 2 | 10 - 90 | 50 - 300 | 250 - 300 |
| Aluminium | 10 - 38 | 0,3 - 1 | 40 - 150 | 50 - 150 | 400 - 800 |
| | 25 - 75 | 1 - 2 | 40 - 90 | 50 - 300 | 400 - 600 |
| Kupfer | 10 - 75 | 0,3 - 2 | 40 - 150 | 50 - 300 | 400 - 600 |

Der Prozess weist eine Vielzahl an Vorteilen gegenüber anderen Schweißverfahren auf. Natürlich gibt es ebenso Nachteile die vor allem auf den hohen Automatisierungsgrad zurückzuführen sind. [17]

Vorteile:

- Hohe Schweißgeschwindigkeiten möglich
- große Bandbreite an Durchmessern möglich
- keine Schutzatmosphäre nötig
- Schweißqualität ist relativ tolerant gegenüber Verschmutzung und Oxidschichten
- sehr kleine und gut kontrollierbare Wärmeeinflusszone
- sehr energieeffizient
- oftmals keine Wärmenachbehandlung nötig

Nachteile:

- nicht geeignet für kleine Stückzahlen
- schlecht geeignet für kleine Schweißgeschwindigkeiten
- kontinuierlicher Prozess wird vorausgesetzt (kein Start/Stopp möglich)
- Geometrisch auf die Rohrform eingeschränkt

Grenzen:

Die maximale Schweißgeschwindigkeit wird von mechanischen Limitationen in der Einförmigkeit, vom Transport und von der Schnittgeschwindigkeit der Schälmesser bestimmt. Ist die Wärmeleitfähigkeit des Materials besonders hoch können die Schweißflanken bei zu geringer Geschwindigkeit nicht auf der erforderlichen Schweißtemperatur gehalten werden.

[1]

2.1.3 Induktive Erwärmung

Bei der induktiven Erwärmung wird durch Wirbelströme im Werkstück Strom induziert. Dieser Strom erwärmt das leitende Werkstück durch ohmsche Verluste. Diese Wärme wird auch als Joule'sche Wärme bezeichnet und ist abhängig vom induzierten Strom und dem elektrischen Widerstand des Werkstückes.

Die elektromagnetischen Phänomene werden mit der Maxwell Gleichung beschrieben. Die Erzeugung der Wirbelströme erfolgt durch ein magnetisches Wechselfeld welches durch die mit hochfrequentem Wechselstrom durchflossene Spule erzeugt wird. Gleichung (1) zeigt die Maxwellgleichung zur Beschreibung der elektromagnetischen Phänomene:

$$\nabla^2 \vec{j} - j2\pi\mu\sigma\vec{j} = 0 \quad (1)$$

\vec{j} steht für den Stromdichtevektor, j ist die imaginäre Einheit, μ steht für die magnetische Permeabilität, σ ist die elektrische Konduktivität und ∇^2 ist der Laplace Operator.

Die Wärmeleitung im Rohr erfolgt nach der Wärmeleitungsgleichung.

$$K\nabla^2 T - \rho C_p \frac{dT}{dt} + q = 0 \quad (2)$$

K steht dabei für die Wärmeleitfähigkeit des Materials, T ist die Temperatur, ρ ist die Dichte, C_p steht für die spezifische Wärmekapazität und q berücksichtigt die durch die Joule'sche Wärme eingebrachte Energiedichte.

Die Energiedichte die zur Joule'sche Erwärmung des Rohres führt kann mit

$$q = \frac{|\vec{j}|^2}{\sigma} \quad (3)$$

beschrieben werden.

Um den Einfluss der Rohrgeschwindigkeit in das mathematische Modell einfügen zu können wird die Lagrange Betrachtung in ein Euler'sches Koordinatensystem übergeführt um die Variablen relativ zur Maschine zu betrachten. Damit kann dann die Geschwindigkeit v in die Berechnung einbezogen werden. Die Transformation folgt folgendem Zusammenhang: [2]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dT}{dy} \frac{dy}{dt} = v \frac{dT}{dy} \quad (4)$$

Bei der induktiven Erwärmung wird in der Regel nicht das gesamte Werkstück gleichmäßig erwärmt. Der induzierte Strom folgt abhängig von der Frequenz, dem elektrischen Widerstand und der elektromagnetischen Permeabilität verschiedenen Pfaden. Maßgebend für die Erwärmung beim HF-Schweißen sind der Skineneffekt, der für die induktive Erwärmung allgemein eine große Rolle spielt, und der Proximityeffekt, der speziell auf die Erwärmung der vorliegenden Rohre zu beachten ist. [6], [7]

Der induktiven Erwärmung bei metallischen Werkstoffen liegt die Magnetisierbarkeit zugrunde. Daher hat das Verhalten des Metalls in einem Magnetfeld einen signifikanten Einfluss auf den Erwärmungsprozess.

Der Prozess bietet im Vergleich zu anderen Erwärmungsmethoden einige Vorteile [6], [8]:

- schnelle Aufheizung
- örtlich präzise und wiederholbare Erhitzung
- hohe Lebensdauer der Maschine durch konzentrierte Aufheizung
- höhere Sicherheit gegenüber einer Erhitzung mit Flammen

2.1.3.1 Skineneffekt

Der Skineneffekt beschreibt eine Charakteristik die vor allem von der Frequenz des induzierten Stromes abhängig ist. Die im Werkstück induzierten Ströme fließen vorwiegend im Bereich der Oberfläche. Je höher die Frequenz, desto kleiner wird die Schicht in der die Ströme fließen. Es entstehen dadurch an der Oberfläche Bereiche mit sehr hohen Stromdichten bei gleichzeitig sehr niedriger Stromdichte im inneren des leitenden Werkstückes. Im Bereich der hohen Stromdichte wird das Material dadurch sehr stark erwärmt. Abbildung 5 zeigt die Zusammenhänge. Bild a zeigt die Stromverdrängung an die Oberfläche des Leiters. Der Wechselstrom fließt nur an der Oberfläche bis zur Eindringtiefe. Bild b zeigt den ähnlichen Effekt für das magnetische Feld. Auch hier wird das Feld im Leiter nach außen gedrängt.

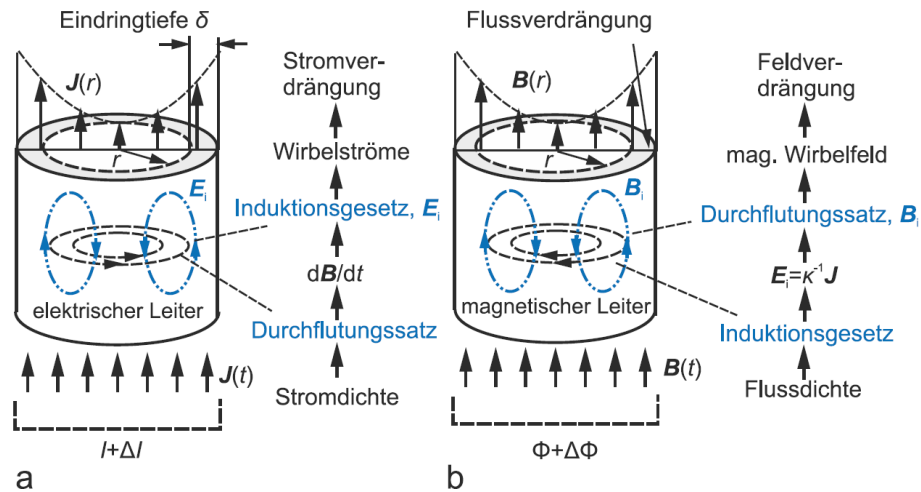


Abbildung 5: Skineffekt, (a) Stromverdrängung durch Wirbelströme (b) Feldverdrängung im magnetischen Leiter [15]

Betrachtet man die Maxwell Gleichung für elektromagnetische Phänomene (Gleichung (1)) so kann direkt auf den Einfluss des Skineffektes geschlossen werden.

Nach Küpfmüller [9] ergibt sich der Effektivwert der Stromdichte mit dem Effektivwert des Stromes im Leiter I , dem äußeren Radius des Leiters r_0 , dem aktuellen Abstand zur Mittellinie r , dem Gleichstromwiderstand R_0 und der Frequenz f zu:

$$J = |J| = \frac{I}{2\pi r_0} \sqrt{\omega \sigma \mu} \sqrt{\frac{R_0}{r}} e^{-\sqrt{\pi f \sigma \mu} (r_0 - r)} \quad (5)$$

Setzt man den Abstand von der Oberfläche x mit:

$$x = r_0 - r \quad (6)$$

so zeigt sich, dass die Stromdichte mit steigender Tiefe x nach einer Exponentialfunktion abnimmt. Hohe Stromdichtewerte treten demnach bei hohen Frequenzen ausschließlich an der Leiteroberfläche auf. Als Vergleichswerte werden in der Literatur das Eindringmaß und die äquivalente Schichtdicke definiert.

Das Eindringmaß δ beschreibt den Abstand von der Oberfläche des Leiters, bei dem die elektrische Feldstärke auf den mit Gleichung (5) und (6) beschriebenen charakteristischen e-ten Teil des Oberflächenwertes abgenommen hat. Das Eindringmaß ergibt sich zu: ([9], Gl. 29.50)

$$\delta \sim = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\pi f \sigma \mu} = \frac{2\rho}{\omega \mu} \quad (7)$$

Die äquivalente Schichtdicke δ definiert die Dicke eines Rohres bei Radius r_0 , das den gleichen Gleichstromwiderstand aufweist, wie das betrachtete Werkstück bei der gegebenen Frequenz. ([7], S.356)

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \mu}} \quad (8)$$

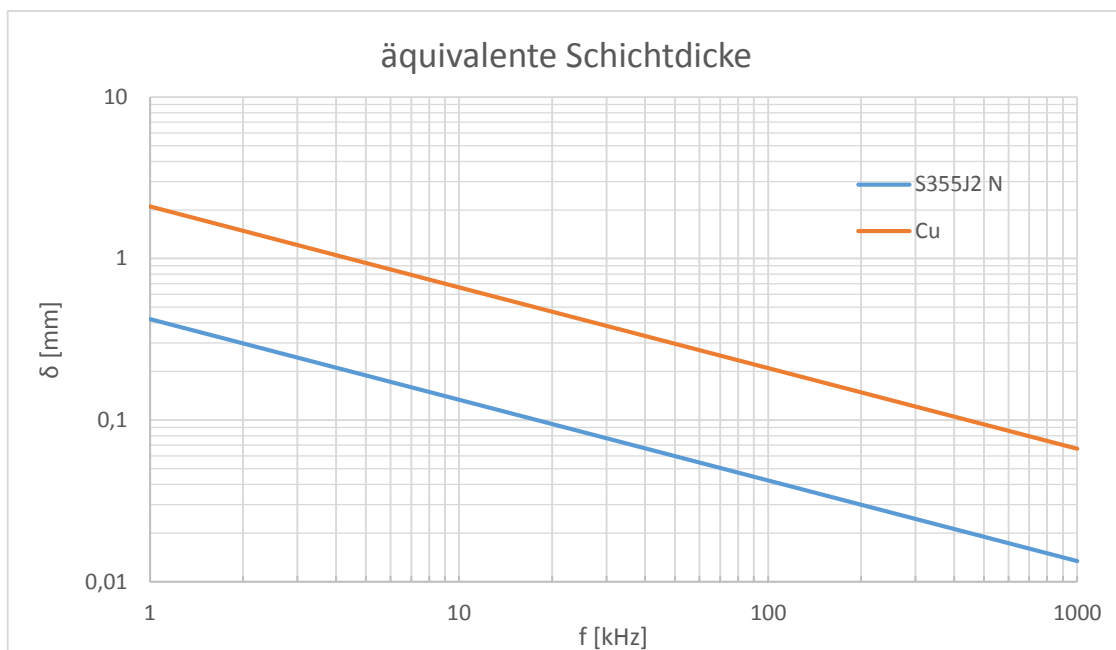


Abbildung 6: äquivalente Schichtdicke

Abbildung 6 zeigt die Abhängigkeit der Eindringtiefe von der Frequenz für verschiedene Metalle.

Mit der äquivalenten Schichtdicke und dem Eindringmaß kann die Stromverdrängung durch den Skineneffekt abgeschätzt und verglichen werden.

2.1.3.2 Proximity Effekt

Dieser Effekt bringt den Strom dazu sich entlang der Spaltflanken des Rohres zu konzentrieren. Dadurch findet ein Stromfluss über den Bereich des Schweißpunktes statt. Dieser Effekt wird vom Impeder noch verstärkt. [1]

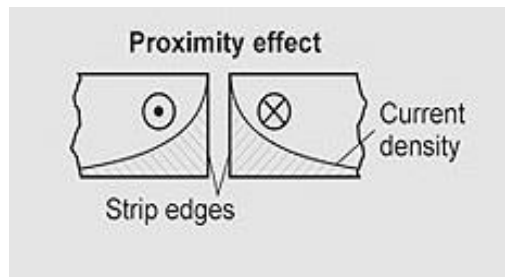


Abbildung 7: Proximity Effekt [10]

Abbildung 7 zeigt die Stromdichte in zwei angrenzenden Werkstückteilen. Die Stromrichtung zeigt dabei in die jeweils entgegengesetzte Richtung. Die Stromdichte ist dabei an den Spaltflanken am größten und sinkt mit zunehmendem Abstand.

2.1.3.3 Hystereseverluste

Unterhalb der Curie-Temperatur sorgt neben der Joule'schen Erwärmung ein zweiter Mechanismus, die Hystereseerwärmung, für eine zusätzliche Erwärmung des Werkstückes. [6]

Zurückzuführen ist dieser Vorgang auf die Ummagnetisierungsverluste. Ferromagnetische Stoffe können die beim Aufmagnetisieren zugeführte Energie beim Entmagnetisieren nicht vollständig zurückführen. Es entstehen Hystereseverluste die proportional zur Schleifenfläche sind und in Form von Wärme freigesetzt werden. Bis zum Erreichen der Curietemperatur bei der die magnetischen Effekte weitgehend verschwinden liefern diese Verluste einen Beitrag zur Erwärmung des Werkstückes. [9]

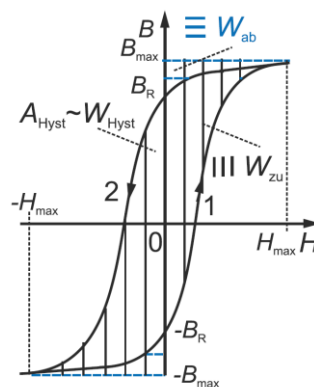


Abbildung 8: Hystereseschleife [9]

$$W_{Hyst} = V \int_{Hyst} \vec{H} d\vec{B} = VA_{Hyst} \quad (9)$$

Gleichung (9) zeigt die Hysteresearbeit W_{Hyst} für einen Umlauf. Sie ist abhängig von der Fläche in der Hystereseschleife.

Durch periodischen Umlauf mit der Frequenz f kann die Verlustleistung durch Hysterese mit

$$P_{Hyst} = fW_{Hyst} = \frac{W_{Hyst}}{T} \quad (10)$$

geschrieben werden. [11], (S. 451)

Für den untersuchten Prozess spielt die Erwärmung durch Hystereseverluste eine untergeordnete Rolle da die Verlustleistung im Bereich über der Curietemperatur im Vergleich zur ohmschen Verlustleistung durch den induzierten Strom gering ist und da das Rohr im untersuchten Bereich des Schweißpunktes Temperaturen über der Curietemperatur aufweist. [6]

2.1.4 Thermische Interaktion

Der thermische Energiehaushalt wird durch zwei grundlegende Prinzipien bestimmt. Primär wird die konzentriert an den Rohrflanken eingebrachte Wärme durch Wärmeleitung von den Flanken ins Bauteil geleitet. Die Interaktion mit der Umgebung erfolgt durch Konvektion und Strahlung. Durch diese beiden Mechanismen wird durch die hohen Bauteiltemperaturen Wärme an die Umgebung abgegeben.

2.1.4.1 Wärmeleitung und Konvektion

Wärmeleitung spielt im HF-Schweißprozess eine große Rolle da der Wärmeleitungskoeffizient des verwendeten Werkstoffes relativ groß ist. Der konzentrierte Wärmeeintrag kann daher nur durch eine hohe Energiedichte bewerkstelligt werden.

Die Beschreibung des Wärmestromes resultiert aus der Energiebilanz (erster Hauptsatz der Thermodynamik). Die Energiebilanz für ein Volumenelement lautet:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \dot{q} \quad (11)$$

Dabei wird der Wärmestrom \dot{q} mit den Materialwerten Dichte ρ und spezifischer Wärmekapazität c_p und der partiellen Ableitung der Temperatur T nach der Zeit beschrieben. In der Gleichung (11) stehen sich die innere Energie des Volumenelements auf der linken Seite und Wärmestromdichte auf der rechten Seite gegenüber.

Zur Verknüpfung der Wärmestromdichte mit dem Temperaturfeld wird der kinetische Ansatz nach Fourier verwendet.

$$\dot{q} = -\lambda \nabla T \quad (12)$$

In Gleichung (12) wird die Wärmestromdichte mit der Wärmeleitfähigkeit λ und dem Gradienten des Temperaturfeldes beschrieben. Aus der Koppelung der Bilanzgleichung (11) mit dem Fourier Ansatz (12) ergibt sich die Gleichung zur Berechnung des Temperaturfeldes.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \lambda \nabla T \quad (13)$$

Mit Gleichung (13) kann das Temperaturfeld beschrieben werden. [12], S.520

Als Konvektion wird der Wärmeübergang zwischen einer Wand oder einem Rohr und einem strömenden Fluid bezeichnet. Man unterscheidet freie Konvektion und erzwungene Konvektion. Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten dominiert die erzwungene Konvektion. Bei erzwungener Konvektion entsteht die Strömung durch einen äußeren Druckunterschied. Diese wird auch für den betrachteten Prozess angenommen. Die Konvektion wird mit einem konstanten \dot{q} als Wärmestrom über die Oberflächen des Werkstückes in der Berechnung berücksichtigt. [13], S.3

2.1.4.2 Strahlung

Der Wärmeübergang durch Strahlung unterscheidet sich grundsätzlich von den leitungsbasierten Wärmeübergängen. Wärmeleitung und Konvektion erfolgen durch freie Elektronen bzw. aufgrund von Wechselwirkungen zwischen benachbarten Molekülen. Es liegt stets eine Wärmeleitung über den Ort des Wärmeüberganges vor. Der Unterschied liegt im Abtransport der Energie. Beim Wärmeübergang durch Strahlung erfolgt der Wärmeübergang durch elektromagnetische Wellen. Strahlungsbasierte Wärmeübergänge erfolgen durch Fernwirkung zwischen Molekülen. Diese Form des Energietransportes ist in fast allen Wärmeübertragungsvorgängen vorhanden. Der Einfluss der Strahlung ist je nach Prozess unterschiedlich und reicht vom überwiegenden Anteil bis hin zu vernachlässigbaren Teilen der Gesamtwärmeübertragung. [14] (S. 147ff)

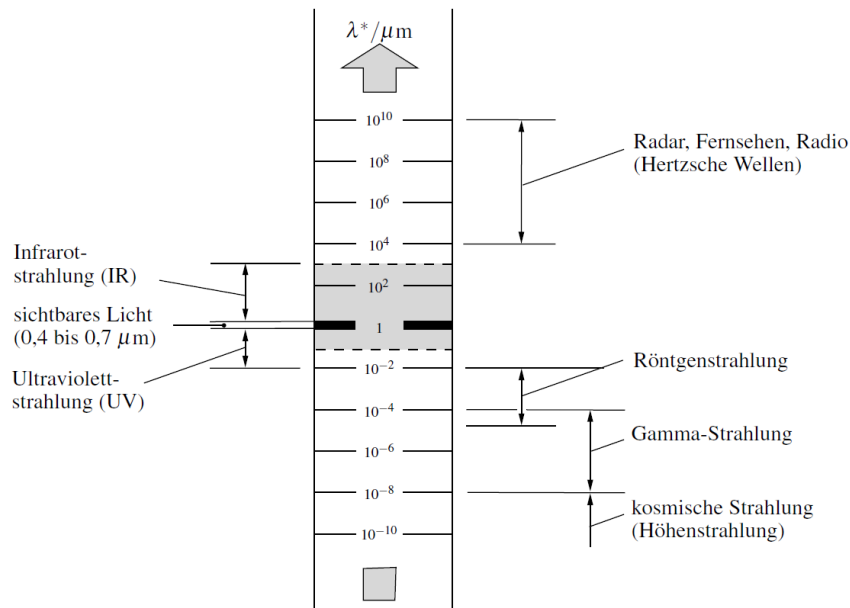


Abbildung 9 Bandbreite der Wärmestrahlung [14]:

Jeder Körper sendet Strahlen aus sobald seine Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt. Die Fähigkeit eines Körpers Strahlen auszusenden hängt von den Eigenschaften der Körpers ab. Ein sogenannter „schwarzer Körper“ absorbiert die auftreffende Strahlung vollständig und sendet bei jeder Temperatur Strahlen mit maximaler Intensität aus. Das Vermögen anderer Körper und damit auch technischer Körper Strahlen auszusenden wird mit dem Emissionsverhältnis ϵ angegeben. Das Emissionsverhältnis ist das Verhältnis der Strahlungsintensität eines Körpers bei einer bestimmten Temperatur zur Strahlungsintensität eines schwarzen Körpers bei gleicher Temperatur. [13]

Für technische Berechnung benötigt man den Wärmestrom \dot{q}_s der vom schwarzen Körper abgegeben wird. Dieser ergibt sich durch die Integration der Intensität $i_{\lambda,s}$ über das gesamte Wellenlängenband.

$$\dot{q}_s = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} i_{\lambda,s} \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (14)$$

σ ist die sogenannte Stefan-Boltzmann-Konstante die folgenden Wert aufweist:

$$\sigma = (5,6696 \pm 0,0075) \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K} \quad (15)$$

In der Praxis wird eine Strahlungskonstante C_s des schwarzen Körpers verwendet:

$$C_s = 10^8 \cdot \sigma = 5,67 \frac{W}{m^2K} \quad (16)$$

Für einen nicht schwarzen Körper gilt damit mit (10), (11) und dem Emissionskoeffizient: [15] (S. 270)

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot C_s \cdot \left(\frac{T}{100} - \frac{T_0}{100} \right)^4 \quad (17)$$

T und T_0 bezeichnen die Temperaturen der im Wärmeaustausch stehenden Medien. Im betrachteten Fall gilt T für die Temperatur des erwärmten Rohres und T_0 für die Temperatur der Umgebungsluft.

2.1.5 Pressstumpfschweißen

Der letzte Schritt in der Prozesskette ist das Stauchen der beiden Rohrflanken durch die eingebrachte Kraft der Schweißrollen. Dabei kommt es zu einer weiteren Erwärmung der durch Induktion erhitzten Rohrflanken durch Reibungswärme und Plastische Verformungsenergie.

2.1.5.1 Plastische Verformungsenergie

Die plastische Verformung im Werkstück führt zu einer Wärmeentwicklung die in der Berechnung berücksichtigt werden muss. Die Erhöhung des Wärmestromes folgt folgenden Zusammenhängen:

$$r^{pl} = \eta \sigma : \dot{\varepsilon}^{pl} \quad (18)$$

Dabei ist r^{pl} der Wärmefluss der zur thermischen Energiebilanz hinzugefügt wird. η ist eine Konstante die angibt welcher Anteil der Energie in Wärme umgesetzt wird. Der Wert beträgt zwischen 0 und 1. [16]

Die Temperaturerhöhung durch die plastische Verformung liefert nur einen kleinen Teil der benötigten Schweißtemperatur.

2.1.5.2 Kontaktenergie, Reibungswärme

Der auf die Rohrflanken konzentrierte Wärmeeintrag führt zu einer sehr hohen Temperatur im Bereich der Flanken. In diesem Bereich beginnt die plastische Verformung da die Fließspannung mit der Temperaturerhöhung sinkt. Die Fließkurven in Abbildung 24 zeigen eine deutliche Temperaturabhängigkeit. Es ist eine Aufstauchung des Materials beim Pressen

der Flanken zu erwarten. Dabei fließt das Material aus der Fuge in die Schweißwulst die sich an der Rohrrinnen- und Rohraußenseite bildet. Durch die hohen Temperaturen und die durch die Schweißwalzen eingebrachte Kraft wird in der Pressfuge eine feste Verbindung hergestellt. Dieser Teil des HF-Schweißprozesses ist gut mit dem Pressstumpfschweißen vergleichbar. Charakteristisch sind die örtliche Erwärmung der Fügezonen und die Pressung der beiden Flächen zur Herstellung einer Verbindung. Das Material wird dabei nicht flüssig sondern erreicht einen teigigen Zustand bei Temperaturen knapp unter dem Schmelzpunkt. Damit kann bei un- und niedriglegierten Stählen eine sehr homogene Verbindung hergestellt werden.

2.1.6 Ausrüstung

2.1.6.1 Stromversorgung

Abhängig von der Anwendung kann die Schweißstromfrequenz zwischen 100kHz und 700kHz variieren. Die Leistungen liegen zwischen 30kW und 1000kW. Um den hochfrequenten Strom und die Leistungen bereitstellen zu können werden Frequenzumrichter benötigt. Statische Umrichter erzeugen Frequenzen von 100kHz bis 400kHz. Vakuumröhren können Frequenzen bis zu 700kHz erzeugen. Durch die niedrigere Effizienz wird der Einsatz der Röhren wenn möglich vermieden. Das heißt es wird versucht den Prozess im niedrigeren Frequenzbereich zu führen und einen statischen Umrichter einzusetzen.

2.1.6.2 Induktionsspule

Induktionsspulen bestehen aus wassergekühlten Kupferleitern. Sie besitzen üblicherweise zwischen einer und drei Windungen. Spulen mit nur einer Windung sind als flache Induktoren, wie in Abbildung 2 dargestellt, ausgeführt. Der Innendurchmesser wird so klein als möglich ausgeführt um die Verluste bei der elektromagnetischen Induktion möglichst gering zu halten.

2.1.6.3 Impeder

Für den Schweißprozess sehr wichtig sind die Eigenschaften des Impeders. So wirken sich Material, Abmessungen und Position dieses Bauteils sehr stark auf die Schweißqualität aus.

Die Grundfunktion des Impeders ist die Erhöhung der Impedanz des Rohres. Er ist meist als einfacher Stab aus ferromagnetischem Material ausgeführt. Dieses Material erhöht die Induktivität in seiner Umgebung. Bei hohen Frequenzen ist die Induktivität der bestimmende Faktor für den Stromfluss.

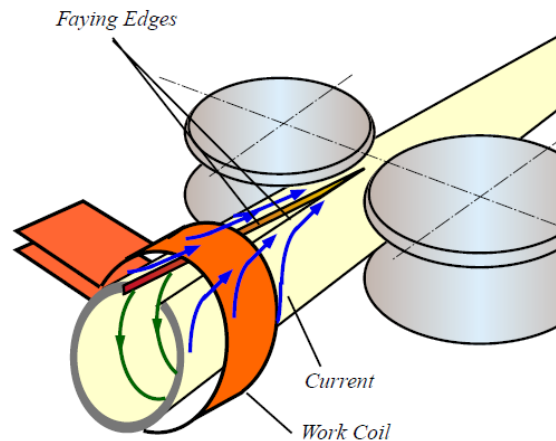


Abbildung 10: Prozess ohne Impeder

In Abbildung 10 ist der HF-Schweißprozess ohne Impeder dargestellt. Für die Schweißung ist es wichtig den Strom entlang des Flankenkeils zu führen (blau eingezeichneter Strompfad). Der grün eingezeichnete Strompfad stellt den ungünstigen Strompfad dar welcher sich über die Innenseite des Rohres schließt. Deshalb ist es wichtig die Impedanz der inneren Oberfläche des Rohres zu Erhöhen und somit den Strom entlang der Kanten zum Schweißpunkt zu zwingen.

Abbildung 11 zeigt die möglichen Strompfade für den besten und den ungünstigsten Fall. Links fließt der gesamte Strom über die Spaltkanten. Der Stromkreis schließt sich über die äußere Oberfläche des Rohres. Dies stellt den günstigsten Fall der Stromführung dar. Die Erwärmung erfolgt entlang des Spaltes und im Schweißpunkt. Rechts ist der ungünstigste Fall der Stromführung dargestellt. Der Stromkreis schließt sich dabei über die Rohrinneinnenseite. Die Erwärmung findet quer zum Spalt über den gesamten Rohrquerschnitt statt. Im realen Prozess treten beide Strompfade gleichzeitig auf. Durch Variation der Parameter und Einsatz der Impeder können jedoch die Fehlstrompfade minimiert werden. [2],[17]

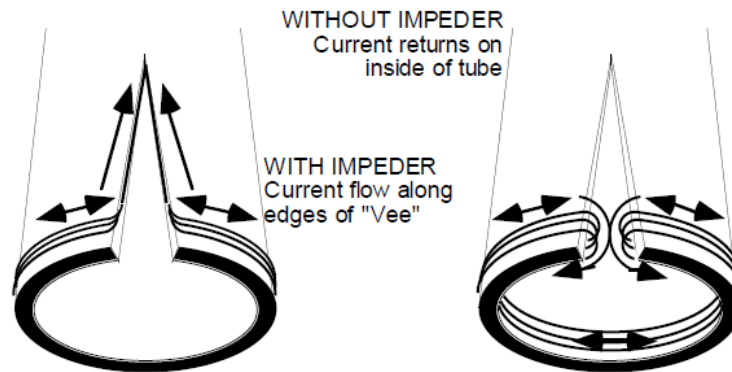


Abbildung 11: Strompfade mit und ohne Impeder [17]

2.1.6.4 Schweißwalzen

Die Aufgabe der Schweißwalzen besteht darin, das vorgeformte Blech in die fertige Rohrform zu bringen und die Schweißverbindung durch Aufbringung der Stauchkraft herzustellen. Die Walzen werden mit Wasser gekühlt um die Standzeit zu erhöhen. Die Anordnung ist abhängig von der verwendeten Maschine. Meist werden zusätzlich zu den seitlichen Walzen noch Toprollen eingesetzt die sicherstellen dass das Rohr beim Schweißprozess die Form hält.

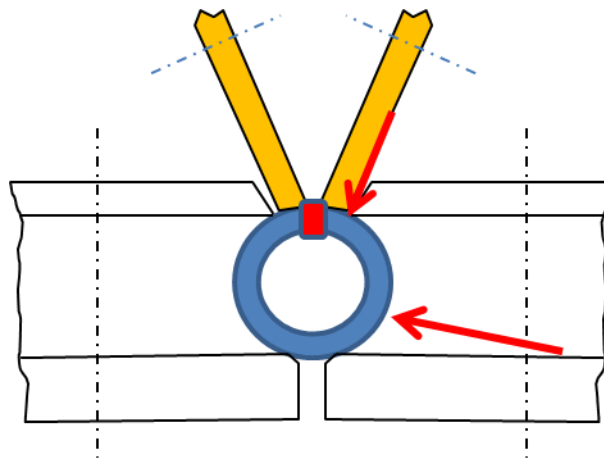


Abbildung 12: Schweißwalzen und Toprollen (Fa. Jansen)

2.2 Betriebsbereiche und Parameter

Nach Scott [21] ergeben sich abhängig der Parameter zwei Betriebsbereiche für den Hochfrequenz Rohrschweißprozess. Die Bereiche unterscheiden sich grundsätzlich durch Schweißgeschwindigkeit und Schweißfrequenz.

Electric Power Mode

In diesem Betriebsbereich wird die Charakteristik des Schweißprozesses durch den elektrischen Skineneffekt bestimmt. Der Electric Power Mode reagiert im Vergleich zum Thermal Mode sehr sensibel auf Parameteränderungen.

Thermal Mode

Im Thermal Mode wird das Verhalten des Prozesses von der Wärmeleitung im Werkstück kontrolliert. In diesem Bereich liegt der anzustrebende Betriebspunkt. Der Prozess zeichnet sich durch folgende Punkte aus:

- kleinste Wärmeeinflusszone
- niedrigste Schweißleistungsaufnahme
- gute Stabilität bei Parameteränderung
- niedrigster magnetischer Verlust im Impeder

Liegt der Betriebspunkt über der kritischen Geschwindigkeit der jeweiligen Betriebsfrequenz, so befindet sich der Prozess im Electric Power Mode. Respektive gilt für eine Geschwindigkeit unter der kritischen Kurve der Betriebsfrequenz der Thermal Mode. Die kritische Geschwindigkeit wird beschrieben durch:

$$v_{krit} = \pi^2 \mu \sigma \varepsilon f y_0 = \pi^2 \mu \sigma \varepsilon f D \quad (19)$$

y_0 ist die für die Wärmeleitung wirksame Länge des sich verengenden Spaltes. Diese kann grob mit dem Rohraußendurchmesser D gleichgesetzt werden. ε ist ein Materialwert der sich wie folgt zusammensetzt:

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (20)$$

ε wird in der Literatur auch als Temperaturleitfähigkeit a bezeichnet.

Die kritische Frequenz wird durch Gleichung (21) beschrieben. Sie ergibt sich durch umformen aus Gleichung (19).

$$f_{krit} = \frac{v_0}{\pi^2 \varepsilon \gamma_0 \mu \sigma} = \frac{v_0}{\pi^2 \varepsilon D \mu \sigma} \quad (21)$$

Dabei kann wie bei der Definition der kritischen Schweißgeschwindigkeit die Länge der effektiven Erwärmung (γ_0) grob mit dem Rohraußendurchmesser gleichgesetzt werden. v_0 bezeichnet die Schweißgeschwindigkeit. [2]

Abbildung 13 zeigt die kritische Schweißfrequenz in Abhängigkeit zur Schweißgeschwindigkeit für verschiedene Rohrdurchmesser. Liegt der Betriebspunkt über der kritischen Frequenz so befindet sich der Prozess im Thermal Mode. Für Betriebspunkte unter der kritischen Frequenz gilt der Electric Power Mode. Am Beispiel des Rohres mit 100mm Außendurchmesser sind die Bereiche im Diagramm beschriftet. Für die anderen Kurven gilt dieselbe Einteilung.

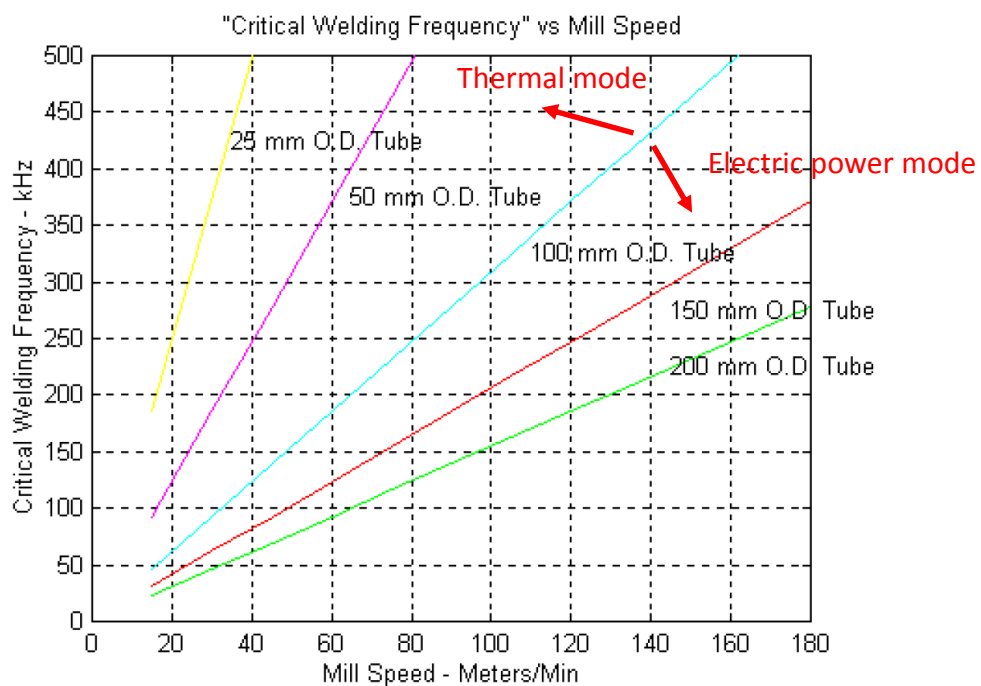


Abbildung 13: kritische Schweißfrequenz über Schweißgeschwindigkeit [2]

Abbildung 14 stellt die kritische Schweißgeschwindigkeit für verschiedene Rohrdurchmesser in Abhängigkeit der Frequenz dar. Am Beispiel der Frequenz von 200 kHz sind die Bereiche im Diagramm beschriftet.

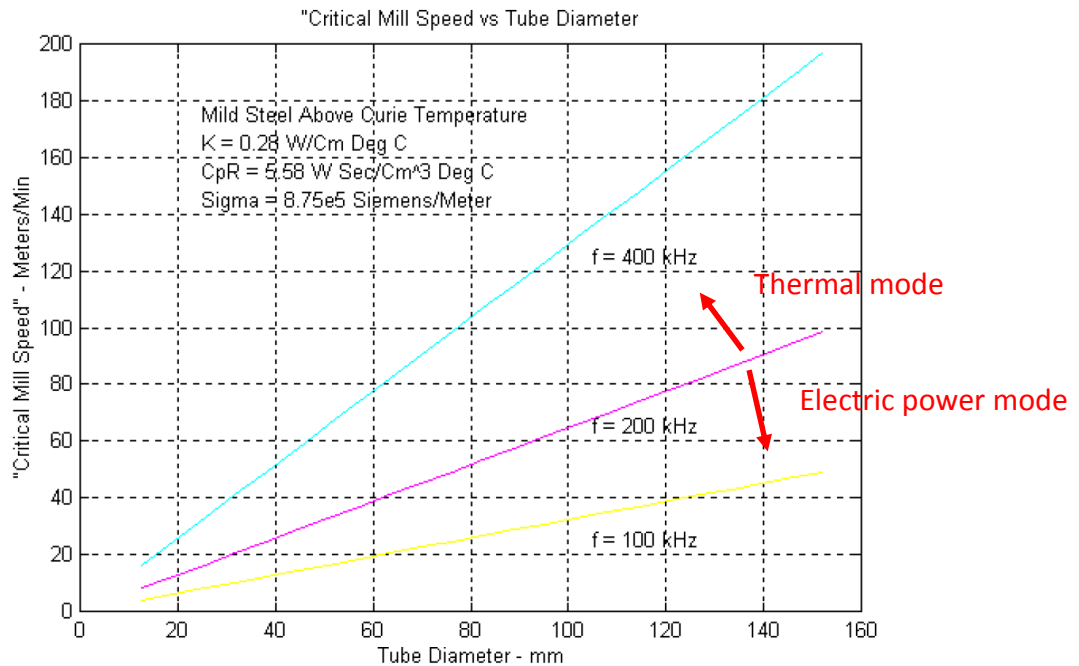


Abbildung 14: kritische Schweißgeschwindigkeit über Rohrdurchmesser [2]

2.2.1 Schweißgeschwindigkeit

Die Vorschubgeschwindigkeit des Rohres variiert zwischen 9 und 300 m/min abhängig von Material, Durchmesser und Wandstärke.

Tabelle 2 zeigt gängige Maximalwerte und Minimalwerte mit dazugehörigen typischen Geometriedaten.

Tabelle 2: Einsatzbereiche [1]

| Rohrdurchmesser [mm] | Wandstärke [mm] | Vorschubgeschwindigkeit [m/min] |
|----------------------|-----------------|---------------------------------|
| 610 (24'') | 22,9 (0,9'') | 9,1 |
| 25,4 (1'') | 2,3 (0,09'') | 304 |

Die Schweißgeschwindigkeit hat großen Einfluss auf die plastische Verformung. Das untersuchte Material besitzt eine stark von der Verformungsgeschwindigkeit abhängige Verfestigung. Eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit erzeugt zwangsläufig eine schnellere Stauchung des Materials in der Schweißzone. Zusammen mit der Spaltgeometrie ist die Schweißgeschwindigkeit damit ein entscheidender Parameter für die Verformungsgeschwindigkeit des Materials.

Der Einfluss auf das Temperaturfeld ergibt sich durch den Zusammenhang der Geschwindigkeit mit der Aufheizzeit. Die durch elektromagnetische Induktion erzeugte Erwärmung wird durch Wärmeleitung in das Werkstück transportiert. Erhöht sich die Schweißgeschwindigkeit so verkürzt sich die Verweilzeit des Materials in der Zone zwischen Spule und Beginn der Schweißnaht. Je kürzer die Verweilzeit desto weniger Zeit bleibt für den Wärmeeintrag und den Wärmetransport. Die Maximaltemperatur sinkt dadurch und der Temperaturgradient in Spaltnähe wird höher.

2.2.2 Schweißfrequenz

Die Änderung der Frequenz des elektrischen Stromes in der Erregerspule ändert in gleicher Weise das induzierte Magnetfeld im Werkstück. Abbildung 15 zeigt den Einfluss der Frequenz auf die Temperatur und die Wärmeeinflusszone.

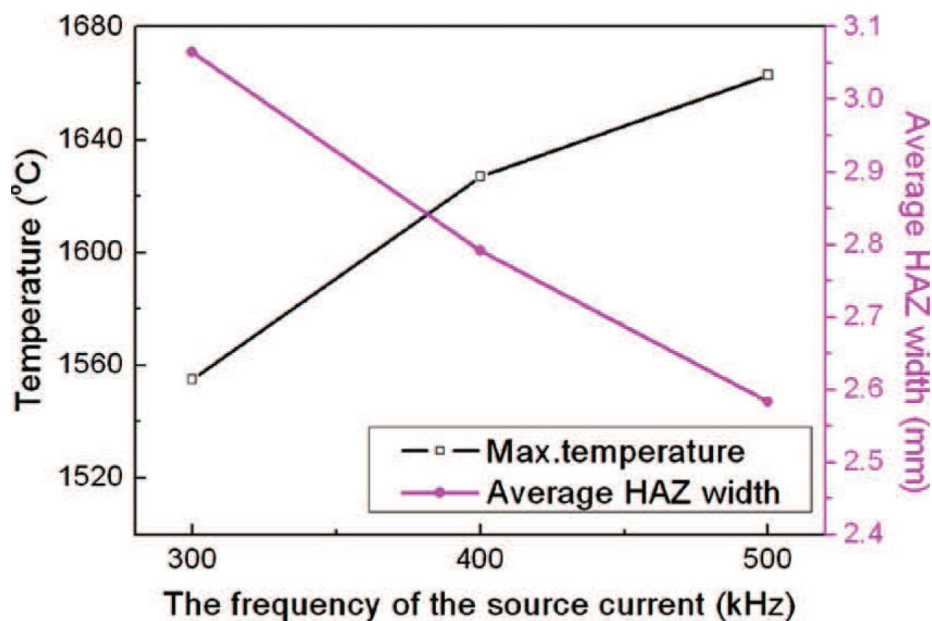


Abbildung 15: Breite der Wärmeeinflusszone (HAZ) und Temperatur über Frequenz [14]

Da die durch den Skineneffekt beschriebene Eindringtiefe umgekehrt proportional zur Quadratwurzel der Frequenz ist, steigt die Stromdichte an der Oberfläche des Rohres und die Temperatur steigt. Die Wärmeeinflusszone sinkt bei gleichbleibender Schweißgeschwindigkeit aufgrund des konzentrierteren Wärmeeintrages.

2.2.3 Wärmeeinflusszone

Die Wärmeeinflusszone kann nach Scott ([2]) für die beiden signifikanten Betriebsbereiche abgeschätzt werden. Gleichung (22) zeigt die Breite der Zone für Schweißfrequenzen über der kritischen Frequenz (Thermal Mode):

$$b_{WEZ} \cong \sqrt{\frac{\pi y_0 \varepsilon}{v_0}} \quad (22)$$

Für den Electric Power Mode gilt folgende Abschätzung:

$$b_{WEZ} \cong \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (23)$$

Wie aus Gleichung (23) ersichtlich sinkt die Breite der Wärmeeinflusszone bei einer Erhöhung der Frequenz. Vergleicht man Gleichung (22) und (23) so ist ersichtlich, dass die Breite der Wärmeeinflusszone nur im Betrieb unter der kritischen Frequenz durch die Schweißfrequenz beeinflusst wird (Electric Power Mode). Befindet sich der Betriebspunkt darüber, so ist die Wärmeeinflusszone nicht mehr von der Frequenz abhängig (Thermal Mode). Zusätzlich ist die Zone in diesem Bereich immer größer als im Bereich unter der kritischen Frequenz. Besonders zu beachten ist, dass der Schweißprozess in einem Betrieb unter der kritischen Frequenz eine um bis zu 80% höhere Leistungsaufnahme aufweist. [2]

3 Numerische Simulation

Für die numerische Simulation wird ABAQUS verwendet. Dies ist eine Finite Elemente Software die für den komplexen Prozess des HF-Rohrschweißens geeignet ist. Sie bietet sowohl die Möglichkeit einer elektromagnetischen Berechnung als auch die Möglichkeit einer thermomechanischen Berechnung des Vorganges. Für den HF-Rohrschweißprozess ist es notwendig alle physikalischen Vorgänge eng zu koppeln, da einerseits die Materialeigenschaften stark temperaturabhängig sind und andererseits die einzelnen Vorgänge stark vom Verformungszustand und der Schweißgeschwindigkeit abhängig sind. So sind die elektromagnetische Induktion und der Wärmeübergang stark von der Rohrgeschwindigkeit abhängig. Die plastische Verformung im Grundmaterial und in der Schweißzone beeinflusst das Temperaturfeld.

Aufgrund oben genannter Abhängigkeit werden die Berechnungen sequentiell gekoppelt. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse der elektromagnetischen und thermomechanischen Rechnung bei jedem Zeitschritt ausgetauscht werden um den Prozess möglichst realitätsnah abbilden zu können und den Einfluss aller Prozessgrößen zu berücksichtigen. Für die Berücksichtigung der temperaturabhängigen Materialdaten ist diese enge Koppelung ebenfalls unumgänglich.

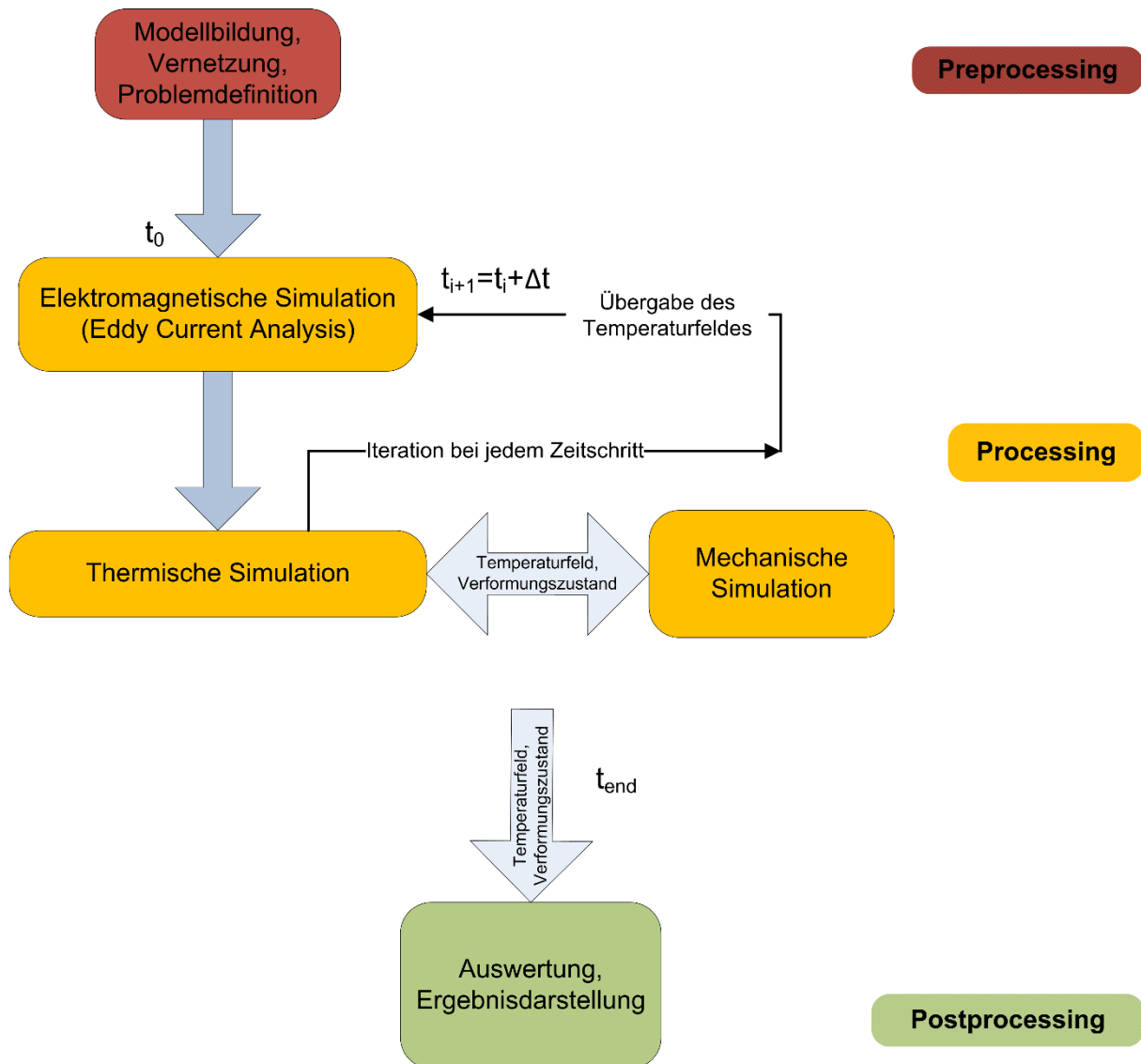


Abbildung 16: Fließschema der Simulation

Abbildung 16 zeigt den Simulationsprozess. Im Preprocessing wird das finite Elemente Modell erstellt und alle Randbedingungen und Lasten sowie die Materialeigenschaften definiert. Im vorliegenden Fall muss besonders darauf geachtet werden, dass die Modelle für die elektromagnetische, thermische und mechanische Simulation so aufgebaut sind, dass die Ergebnisse austauschbar sind. Im Processing findet dann die eigentliche Berechnung statt. Die Verknüpfung der einzelnen Berechnungsschritte ist in Abbildung 16 dargestellt. Als erster Schritt wird die elektromagnetische Berechnung durchgeführt. Diese liefert für das Werkstück die erzeugte Leistung durch Joule'sche Erwärmung. Die Ergebnisse werden in die thermomechanische Berechnung übernommen. Dabei wird die Wärmeleitung gekoppelt mit der mechanischen Berechnung für einen Zeitschritt durchgeführt. Dadurch kann auch die Wärmegenerierung durch plastische Verformung und die Wärmegenerierung in der

Schweißzone durch Reibung berücksichtigt werden. Die thermomechanische Berechnung liefert eine Temperaturverteilung die für die elektromagnetische Berechnung berücksichtigt werden muss. Daher wird der Gesamtprozess als Schleife modelliert in der abwechselnd die elektromagnetische und die thermomechanische Berechnung durchgeführt werden. Das Temperaturfeld für die stark temperaturabhängigen Materialeigenschaften wird auf die elektromagnetische Berechnung übertragen. Die Koppelung der beiden Berechnungsschritte erfolgt abhängig vom gewünschten Zeitschritt und der Änderung des Temperaturfeldes. Ist die Temperaturrate groß so wird die Koppelung bei kleineren Zeitschritten durchgeführt. Ist die Änderung der Temperatur im Vergleich zum letzten Zeitschritt klein so kann die Koppelung nach größeren Zeitschritten durchgeführt werden. Damit kann die Rechenzeit bei gleichbleibender Ergebnisgenauigkeit stark verringert werden.

Die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erfolgt im Postprocessing. Es können Aussagen über Verformungszustand, Temperaturfeld, Spannungen und Dehnungen dargestellt werden.

Die Ergebnisse werden mittels Vergleich mit dem realen Prozess validiert. Bei Bedarf kann der Simulationsprozess mit Eingabewerten kalibriert werden. Diese Kalibrierung ist nur dann sinnvoll wenn zuvor die Validierung eine gute Übereinstimmung mit dem Realprozess ergeben hat.

3.1 Eingabedaten

3.1.1 Prozessdaten

Der simulierte Prozess soll den realen Prozess eines Rohrschweißprozesses mit einer Rohrgeometrie von 25x3 mm darstellen. Die Prozessdaten und das Rohrmaterial werden von der Firma Jansen AG zur Verfügung gestellt. Die verwendeten Parameter wurden in der Produktion für ein Rohr mit einer Geometrie von 22x2,95 mm verwendet aus dem auch die Makrobilder erstellt wurden. Diese Daten können auf die Berechnung übertragen werden wengleich sich der Verformungszustand aus der Simulation aufgrund der leicht abweichenden Geometrien nicht zur Gänze mit den untersuchten Schliffbildern deckt. Die Materialdaten des verwendeten Bandes decken sich mit den verwendeten Daten in der Simulation.

Tabelle 3: Abhängigkeiten der Parameter

| | | Temperatur | Verformungs- rate | Verformung |
|------------------------------------|----------------------------|------------|----------------------|------------|
| Material- eigenschaften | spezifische Wärmekapazität | ++ | - | - |
| | magnetische Permeabilität | ++ | - | - |
| | elektrische Leitfähigkeit | ++ | - | - |
| | thermische Leitfähigkeit | ++ | - | - |
| | Fließkurven | ++ | + | + |
| | Dichte | ++ | - | - |
| Prozess- größen | Schweißgeschwindigkeit | + | ++ | - |
| | Stauchkraft | + | - | ++ |
| | Schweißleistung | ++ | - | + |
| | WEZ | ++ | + | ++ |

(++.....sehr starker Zusammenhang, +.....starker Zusammenhang, -.....geringer Zusammenhang)

In den folgenden Abbildungen sind die Prozessparameter des simulierten Prozesses dargestellt und beschrieben. Die Werte sind über die Schweißlänge aufgetragen. Allen Diagrammen gemeinsam sind sprungartige Abfälle in den aufgezeichneten Parametern. Diese Unregelmäßigkeiten stellen Maschinenstillstände dar bei denen Wartungsarbeiten aufgrund von Verschleiß durchgeführt werden. Dazu zählen der Austausch von Innen- und Aussenhobel,

Impederwechsel und der Austausch von Fasen-Wendeplatten. Bei rund 6500m gibt es einen signifikanten Sprung in Leistung, Frequenz und Spannung. Diese geplante Parameteranpassung wurde nach einem Impederwechsel durchgeführt.

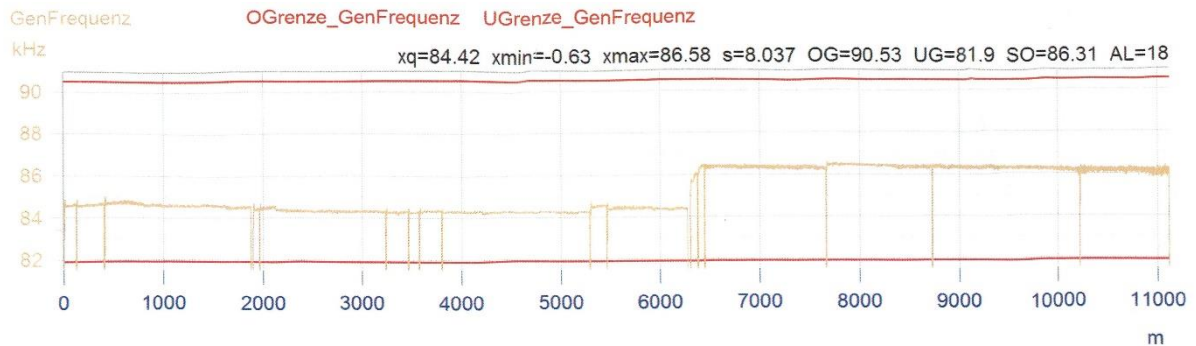


Abbildung 17: Generatorfrequenz (Fa. Jansen)

Die Generatorfrequenz für den betrachteten Prozess ist für den HF-Prozess relativ niedrig. Diese Einstellung führt zu den gewünschten Verbindungseigenschaften. In diesem Fall werden diese Eigenschaften durch die niedrige Frequenz erreicht, da sich dadurch wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben eine breite Wärmeeinflusszone entwickelt. Die breite Wärmeeinflusszone führt zu sanften Stauchlinien und in weiterer Folge zu den geforderten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften. Die Frequenz bleibt wie aus Abbildung 17 ersichtlich bis auf die Leistungsanpassung bei rund 6500m nahezu konstant.

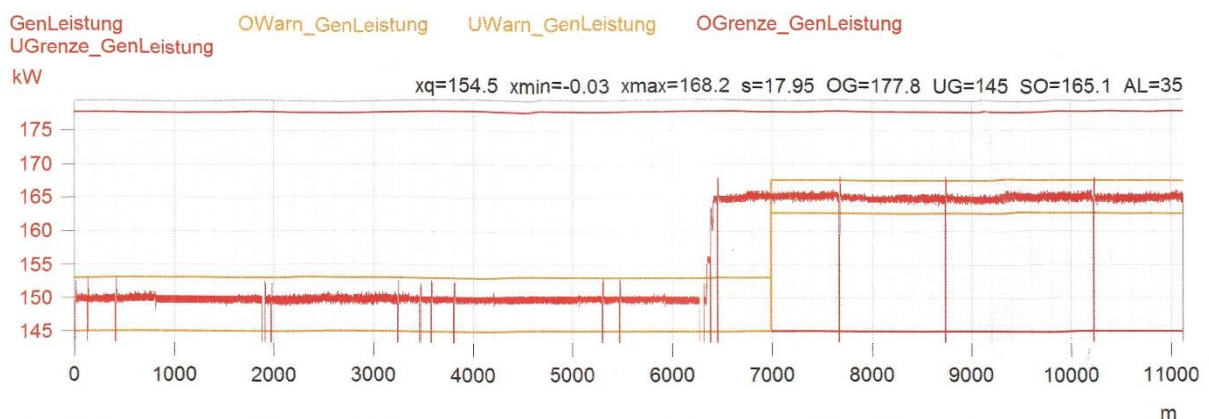


Abbildung 18: Generatorleistung (Fa. Jansen)

In Abbildung 18 sieht man den Verlauf der Generatorleistung über den Prozessfortschritt. Die Leistungsanpassung bei rund 6500m ist deutlich zu erkennen.

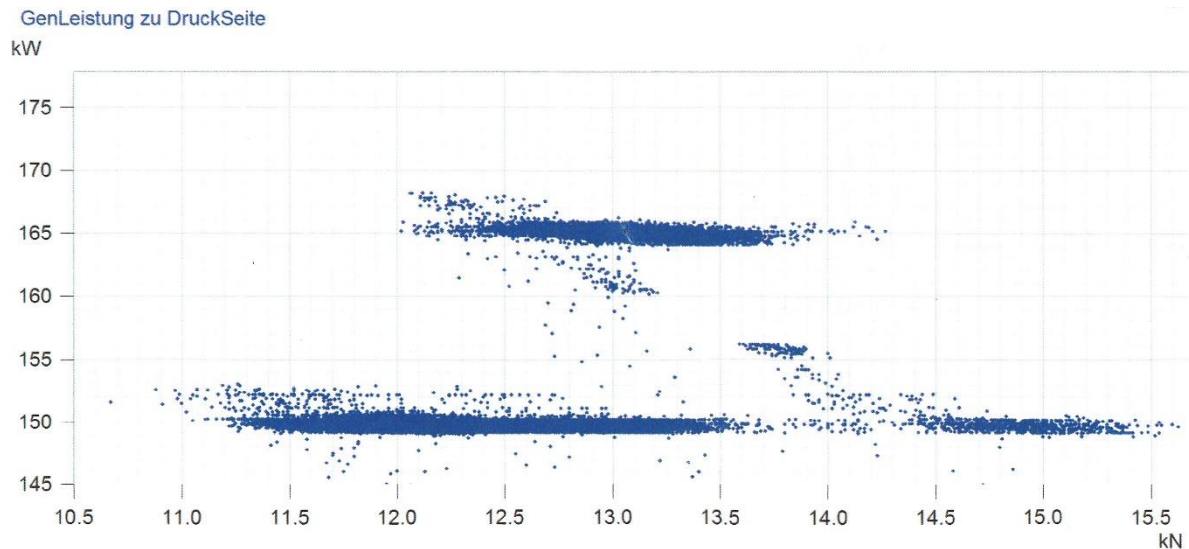


Abbildung 19: Generatorleistung über Anpresskraft (Fa. Jansen)

Abbildung 19 zeigt den Zusammenhang zwischen Generatorleistung und Stauchkraft. Die Punktwolke im Bereich der 165kW entsteht nach dem Wechsel des Impeders. Dieser neue Impeder besitzt andere elektromagnetische Eigenschaften wodurch eine Anpassung der Maschinenparameter notwendig ist. Im niedrigeren Leistungsniveau ist eine große Streuung der Stauchkraft zu erkennen. Der genaue Grund für diese Schwankung ist aus den vorhandenen Unterlagen nicht ersichtlich.

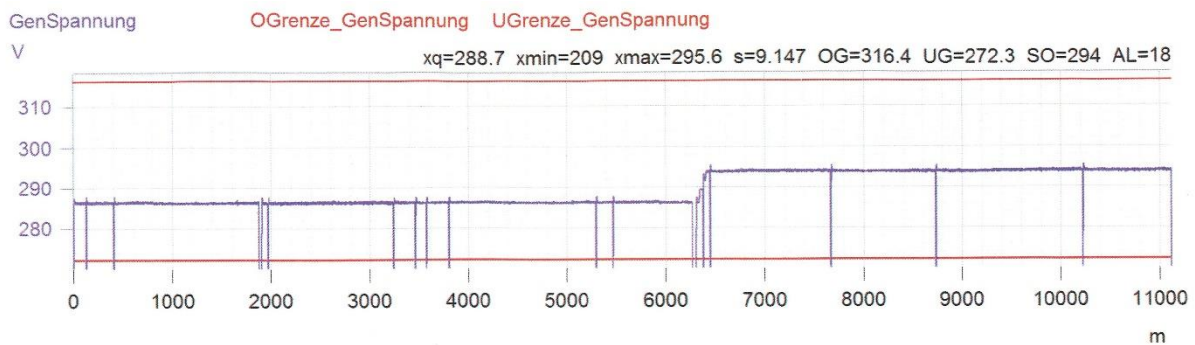


Abbildung 20: Generatorspannung (Fa. Jansen)

Die Generatorspannung (Abbildung 20) bleibt in den beiden Betriebsbereichen vor und nach dem Impederwechsel konstant. Die Leistungsregelung erfolgt üblicherweise über die Variation der Stromstärke. Die Schweißgeschwindigkeit ist in Abbildung 21 ersichtlich. Sie bleibt auch nach der Parameteränderung bei 6500m gleich.

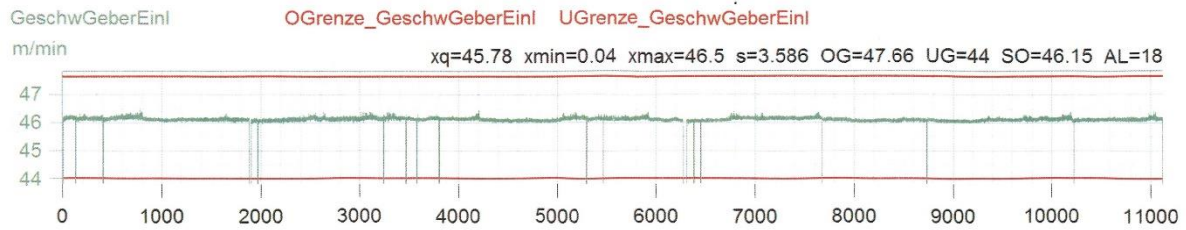


Abbildung 21: Schweißgeschwindigkeit (Fa. Jansen)

Den stärksten Regelbedarf besitzt die Kraftregelung auf die Schweißwalzen. Durch den hochdynamischen Scwweißprozess muss die Kraft ständig nachgeregelt werden. Dies resultiert in einem relativ stark schwankenden Kraftverlauf. Der Kraftverlauf ist in Abbildung 22 dargestellt.

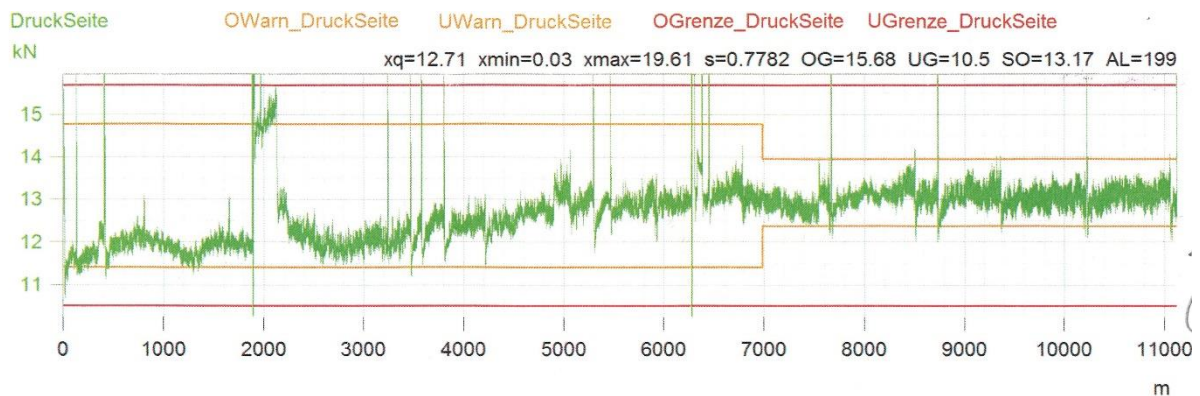


Abbildung 22: Kraft auf Schweißwalzen (Fa. Jansen)

3.1.2 Materialdaten

Die Simulation wird mit einem niedriglegierten Stahl mit der Bezeichnung S355J2+N durchgeführt. Die chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 4 ersichtlich.

Tabelle 4: chemische Zusammensetzung S355

| Chemische Zusammensetzung (Gew %) | |
|-----------------------------------|----------|
| Stahlsorte | S355J2+N |
| C | 0,14 |
| Si | 0,21 |
| Mn | 1,39 |
| P | 0,011 |
| S | 0,006 |
| Al | 0,035 |
| Nb | 0,02 |
| N | 0,0036 |
| sonstige | 0,0792 |

Die erforderlichen Materialdaten wurden mit dem kommerziellen Programm JMatPro abgeschätzt. Mit dieser Software können Phasenänderungen und Temperaturabhängigkeiten der Materialeigenschaften simuliert werden. Als Eingabewerte sind die chemische Zusammensetzung und die Korngröße des Materials notwendig. Abbildung 23 zeigt eine Mikroaufnahme des verwendeten Rohrmaterials.

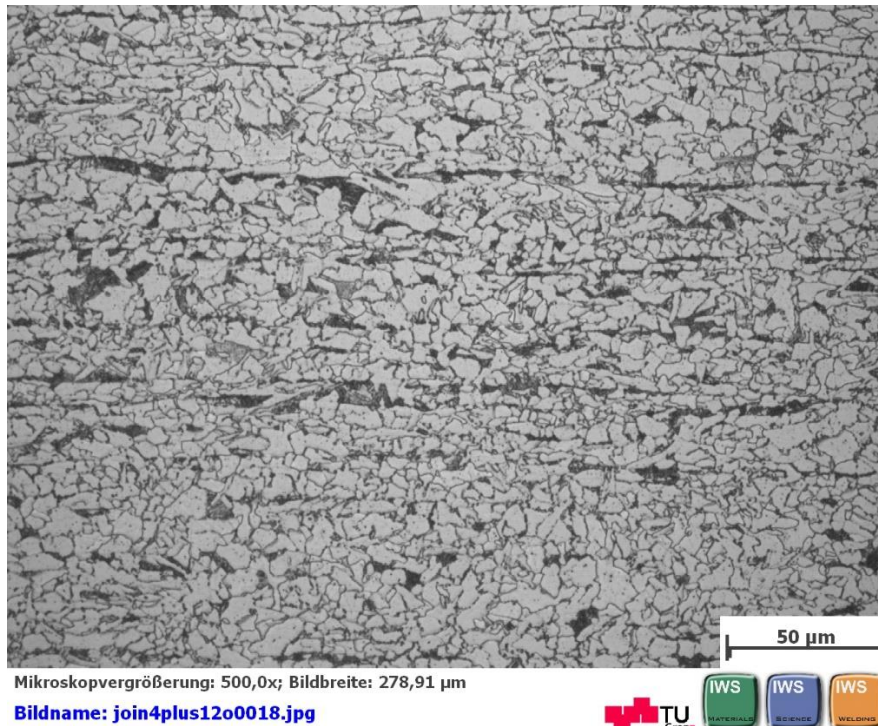


Abbildung 23: Schliffbild zur Korngrößenbestimmung

Tabelle 5: Korngrößen

| Abb. | ASTM Nr. | Unit | dm Korn | Korn/mm ² |
|------|----------|------|---------|----------------------|
| 23 | 10 | µm | 0,011 | 8192 |

Tabelle 5 zeigt einen Auszug aus der Korngrößenbestimmung. Die Korngröße nach ASTM wird mit 10 angegeben. Dies ist in dieser Skala der kleinste Wert und somit das feinste Korn.

Das Deformationsverhalten des Werkstoffes wird mit empirischen Fließkurven beschrieben. Diese wurden für verschiedene Temperaturen und zwei unterschiedliche Dehnraten ermittelt. Ein Auszug der Kurven ist in Abbildung 24 dargestellt. Die Kurven werden jeweils bis zu einer Dehnung von 1,4 dargestellt. Dieser Wert übersteigt den gemessenen Wert bei den meisten Diagrammen. Die Grenze der Messwerte liegt bei einer Dehnung von rund 0,1. Darüber hinaus werden die Werte mit der Ramberg-Osgood Beziehung beschrieben. Die vollständigen Fließkurven sind im Anhang dargestellt.

Die Ramberg-Osgood Beziehung ist ein empirisches Modell, das den nicht linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung herstellt. Sie wird vor allem für Metalle verwendet die sich mit plastischer Verformung verfestigen. Um die gemessene Kurve für höhere Umformgrade mittels der Ramberg-Osgood Beziehung zu erweitern werden aus den Messwerten jeweils die Parameter K und n ermittelt. [18]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (24)$$

Wichtig für das Verständnis der dargestellten Fließkurven ist, dass die Kurven wahre Dehnung und wahre Spannung zeigen. Außerdem beginnen die Fließkurven sinngemäß im plastischen Bereich des Materials. Die vorangegangene elastische Verformung ist in den Kurven nicht sichtbar.

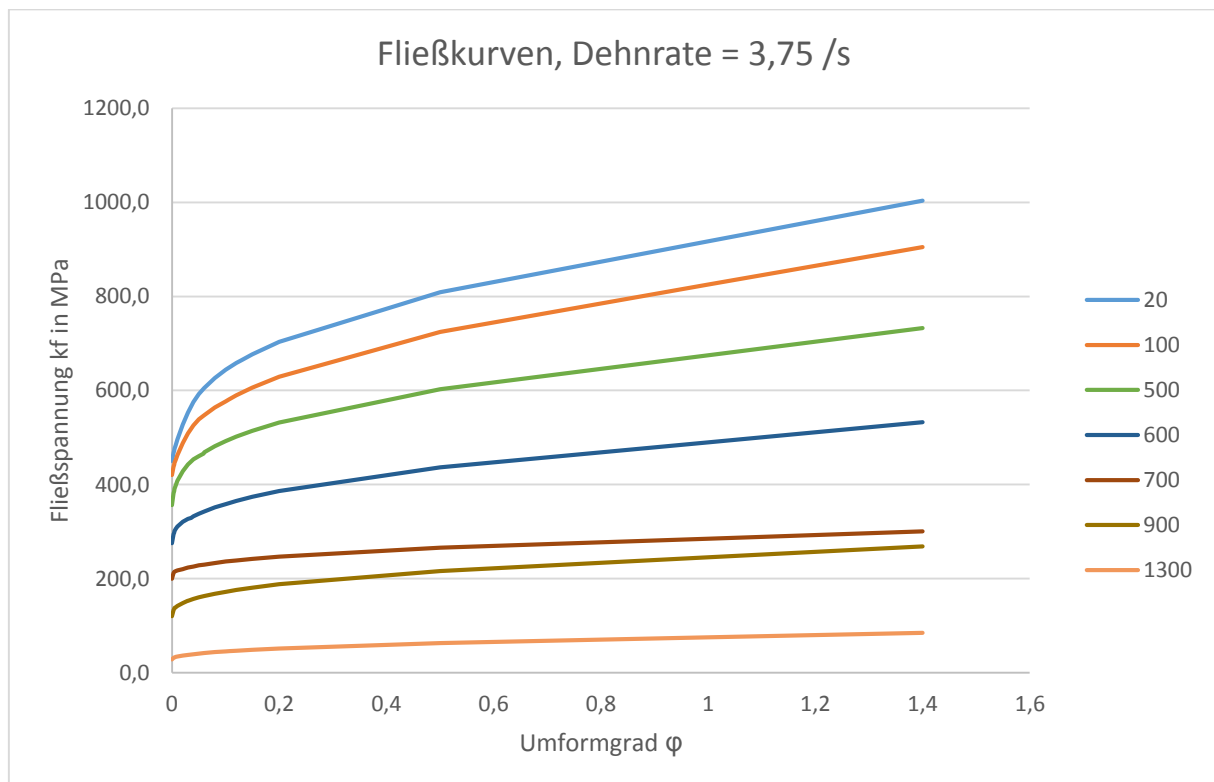


Abbildung 24: Auszug aus den Fließkurven

Aus den Kurven ist die Temperaturabhängigkeit des Fließverhaltens ersichtlich. Der E-Modul des Materials ist ebenfalls stark temperaturabhängig. Der Zusammenhang ist in Abbildung 25 dargestellt.

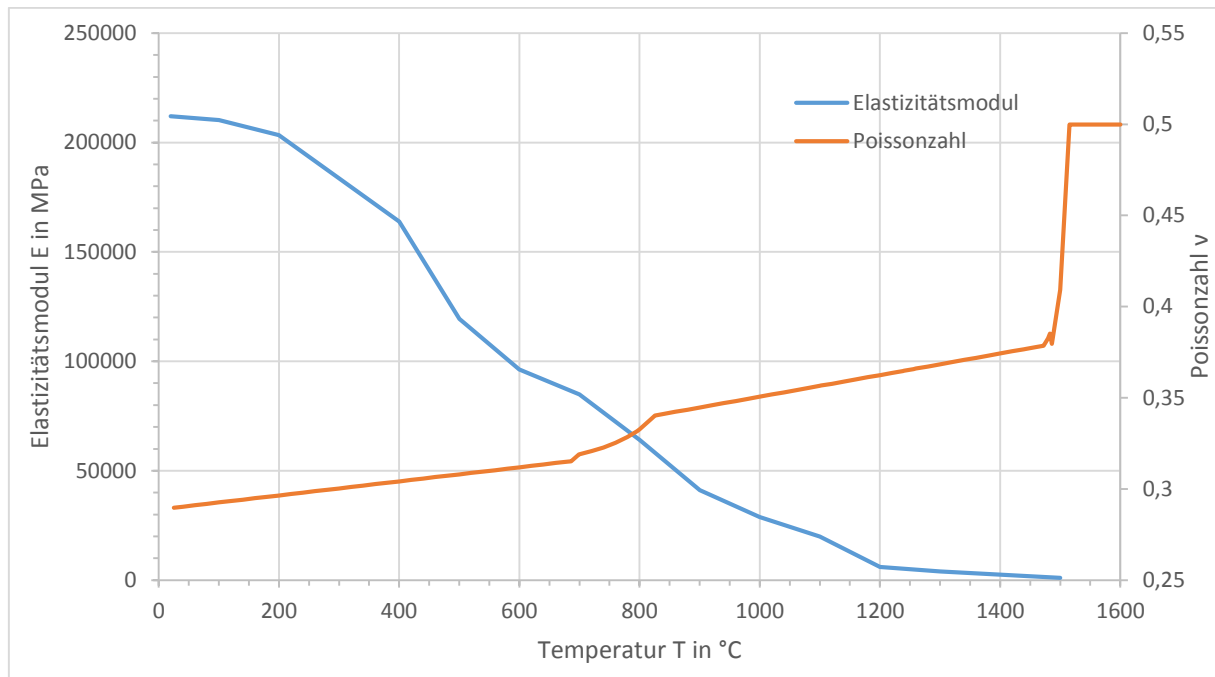


Abbildung 25: temperaturabhängiger E-Modul und Poissonzahl

Neben den elastischen und plastischen Eigenschaften sind für die thermomechanische Berechnung folgende Materialdaten notwendig:

- Wärmeleitfähigkeit
- spezifische Wärmekapazität
- Dichte

Diese Materialdaten sind in Abbildung 26 und Abbildung 27 zusammengefasst. Die spezifische Wärmekapazität besitzt zwei charakteristische Spitzen. Diese befinden sich im Bereich der Gefügeumwandlung und berücksichtigen die dafür benötigte Energie. Zur Überprüfung der Werte ist für die spezifische Wärmekapazität eine geglättete Kurve aus der Literatur eingefügt. Sie dient der Überprüfung der Plausibilität der abgeschätzten Werte. Diese Kurve wird nach einem empirischen Zusammenhang ermittelt. (vgl. [19])

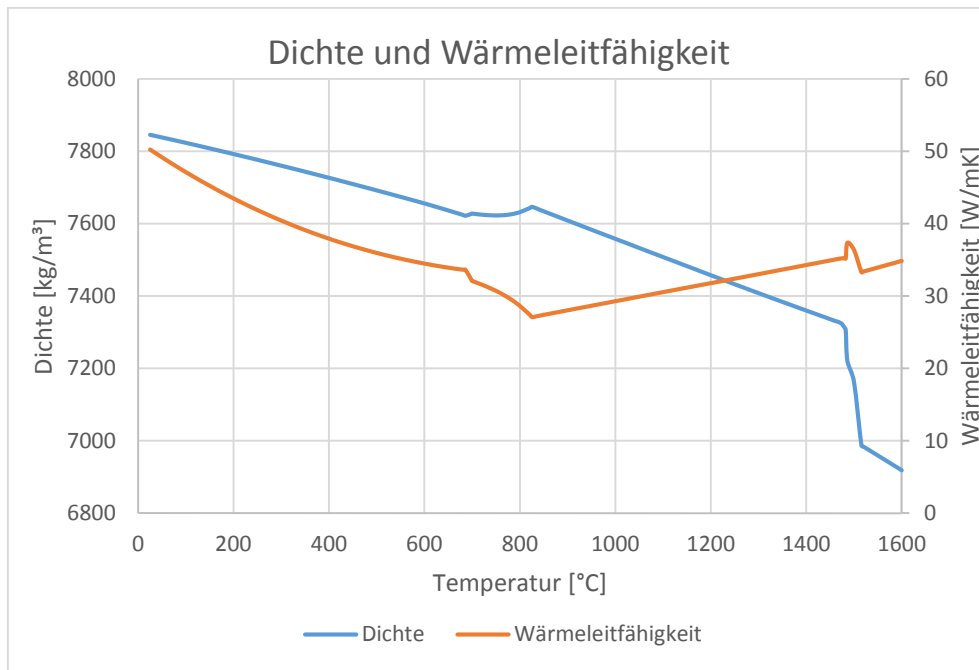


Abbildung 26: Dichte und Wärmeleitfähigkeit

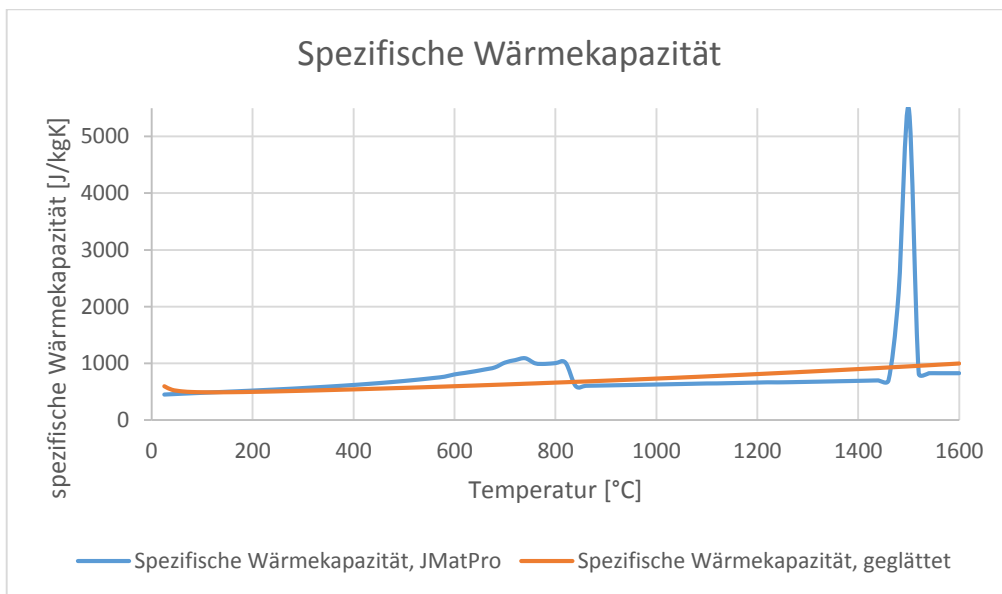


Abbildung 27: spezifische Wärmekapazität

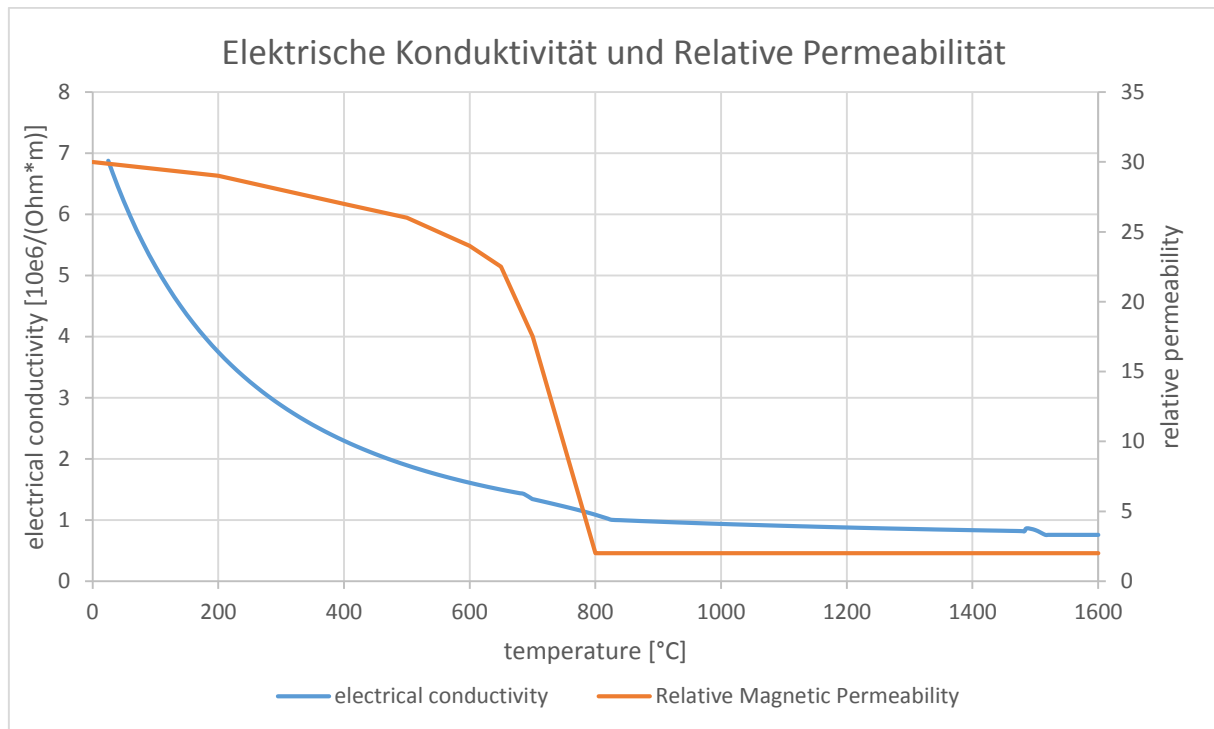


Abbildung 28: Elektrische Leitfähigkeit und relative magnetische Permeabilität

Abbildung 28 zeigt die für die elektromagnetische Berechnung benötigten Materialdaten.

Die relative Permeabilität weist einen signifikanten Abfall zwischen 600°C und 800°C auf. Bei rund 770°C wird die sogenannte Curie-Temperatur erreicht. Beim Erreichen dieser Temperatur hat der Werkstoff die ferromagnetischen Eigenschaften vollständig verloren und ist oberhalb dieser Temperatur nur noch paramagnetisch. Ähnliches gilt auch für die elektrische Leitfähigkeit. Bis zur Curie Temperatur sinkt die Leitfähigkeit stetig. Danach bleibt der Wert konstant auf einem sehr niedrigen Niveau. In der finiten Elemente Simulation werden beide Materialwerte temperaturabhängig berücksichtigt.

3.1.3 Randbedingungen

Der HF-Schweißprozess ist in hohem Maße vom Energiehaushalt im Werkstück abhängig. Für eine qualitativ hochwertige Schweißnaht müssen die Spaltflanken des Rohres auf eine bestimmte Temperatur erwärmt werden. Ebenso muss im Schweißpunkt eine definierte Temperatur erzeugt werden. Um mögliche Umwandlungen oder Spannungen im Grundmaterial zu vermeiden muss sichergestellt werden dass die Wärmeeinflusszone möglichst klein bleibt. Dies wird einerseits durch die induktive Erwärmung und andererseits

durch Wärmeabfuhr durch Konvektion und Strahlung gewährleistet. Für die Simulation wichtig sind hierbei folgende Komponenten:

- Wärmeabgabe durch Konvektion an die Umgebung
- Wärmeabgabe durch Strahlung an die Umgebung

Für die Konvektion wird an der Rohrrinnenseite und Rohraussenseite ein Wärmeübergangskoeffizient α definiert. Der gewählte konstante Wert wird aus empirischen Zusammenhängen ermittelt. Für den Prozess wird ein konstanter Wärmestrom von $17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ verwendet. Die entsprechenden Literaturstellen für die Abschätzung des empirischen Wertes sind im Anhang unter „Ermittlung der Wärmeübergangszahl“ aufgeführt.

Für die Strahlung wird der Emissionsgrad ϵ mit 0,8 als konstant festgelegt. Dieser in der Realität hochgradig temperaturabhängige Wert ist sehr schwer zu ermitteln und wird deshalb in der Simulation konstant gehalten. Die Temperatur an der Rohrrinnenseite wird mit 80°C abgeschätzt. An der Rohraußenseite werden 25°C definiert.

3.1.4 Geometrie

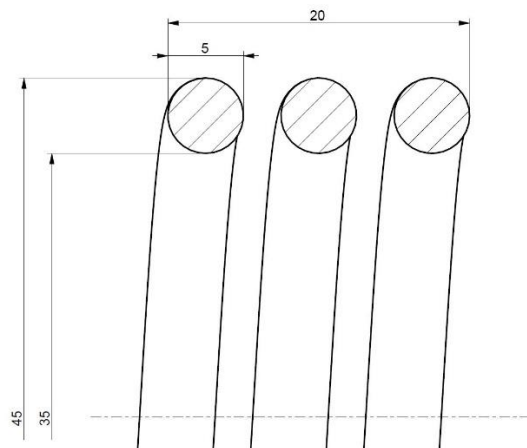


Abbildung 29: Geometrie der Induktionsspule(Wettstein)

Die induktive Erwärmung wird berührungslos über eine Kupferspule mit 3 Windungen eingeleitet.

Die Schweißrollen wurden wie in Abbildung 12 dargestellt konstruiert.

In Abbildung 3 sind die grundlegenden Abmessungen der Schweißanordnung dargestellt. Diese Abmessungen wurden auch für die Modellbildung berücksichtigt. Wichtig dabei ist die richtige Berücksichtigung des Abstandes zwischen Induktor und Schweißwalzen sowie die richtige Modellierung des Öffnungswinkels des Schweißspalts. Mit dem Winkel und dem Abstand zwischen letzten Rollensatz und Schweißrollen ist die Geometrie des Schweißspaltes definiert.

Für den betrachteten Prozess wurden zur Validierung der Ergebnisse aus Rohrproben Querschliffbilder erstellt. Diese dienen dazu den realen Prozess abzubilden. Vor allem die plastische Verformung kann mit Rohrproben überprüft werden. Die Bilder der untersuchten Rohrprobe sind im Anhang dargestellt. Dabei wurden dem Rohr bei den Positionen 1 bis 3 Schliffproben entnommen. (siehe Abbildung 30 bis Abbildung 35). Die sichtbaren Pfeile auf den dargestellten Rohrproben zeigen die Blickrichtung auf die erzeugten Makroschliffbilder. Position 1 liegt dabei vor der Schweißlinse und zeigt daher den Schweißspalt vor der Pressung. Position 2 liegt direkt nach der Schweißlinse. Hier ist plastische Verformung und die Schweißwulst gut sichtbar. Position 3 liegt bereits nach dem Innen- und Außenhobel. Das heißt das überflüssige Material wurde bereits mit den Schabern entfernt. Die Schweißzone hat hier ihre finale Form. Abbildung 36 zeigt ein Schliffbild eines größeren Rohres. Man kann erkennen dass die Ausbildung der Schweißzone auch bei diesem Durchmesser sehr ähnlich ist. Der qualitative Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Makrobildern ist daher möglich.



Abbildung 30: Rohr 22x2,95, S460HC, Position 1 und 2



Abbildung 31: Rohr 22x2,95, S460HC, Position 2 und Übergangsmarkierung



Abbildung 32: Rohr 22x2,95, S460HC, Übergangsmarkierung und Position 3



Abbildung 33: Rohr 22x2,95, S460HC, Schliffbild Position 2



Abbildung 34: Rohr 22x2,95, S460HC, Schliffbild Position 3



Abbildung 35: Rohr 22x2,95, S460HC, Schliffbild Position 1



Abbildung 36: Rohr 33x3, S355, Makroschliff

3.2 Elektromagnetische Simulation

3.2.1 Mathematische Modelle

Für die elektromagnetische Berechnung muss das elektrische und magnetische Feld gekoppelt berechnet werden.

Die elektrischen und magnetischen Felder werden durch die Maxwell Gleichungen beschrieben. Die verwendete Formulierung basiert auf der Annahme niedriger Frequenzen. Diese Annahme trifft zu wenn die Wellenlänge der elektromagnetischen Wellen groß im Vergleich zur charakteristischen Länge des betrachteten Prozessen ist. [16]

Die Wellenlänge ergibt sich zu:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{165 \times 10^3} = 1818,2 \text{ m} \quad (25)$$

Dabei ist c die Lichtgeschwindigkeit und f die Erregerfrequenz der elektromagnetischen Wellen. Mit $c=3 \times 10^8$ m/s und $f=165$ kHz ergibt sich eine Wellenlänge die weitaus größer als die charakteristischen Abmessungen der Bauteile für die eine Anregung durch das elektromagnetische Feld berechnet wird. Die verwendete Formulierung der niedrigen Frequenzen lässt eine Vereinfachung des ampèreschen Gesetzes zu, wonach der Korrekturterm für den Verschiebungsstrom vernachlässigt werden kann.

Die Analyse wird als sogenannte „time harmonic analysis“ durchgeführt. Dabei wird durch die harmonische Anregung durch den hochfrequenten Strom ein harmonisches elektromagnetisches Feld erzeugt. Die Frequenz der Anregung bestimmt damit die Frequenz der elektromagnetischen Wellen.

Für die Beschreibung der physikalischen Effekte wird das sogenannte Vektorpotential \vec{A} eingeführt sodass

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (26)$$

wird. Die Anregung des magnetischen Feldes erfolgt durch einen harmonisch oszillierenden Strom \vec{J} in der Erregerspule der mit der Frequenz ω und der Amplitude J_0 beschrieben werden kann.

$$\vec{J} = \vec{J}_0 e^{i\omega t} \quad (27)$$

Das Erregerfeld ergibt sich sinngemäß zu einem ähnlichen Feld dass mit der Erregerfrequenz und der Amplitude A_0 beschrieben wird.

$$\vec{A} = \vec{A}_0 e^{i\omega t} \quad (28)$$

Die Maxwell Gleichung für elektromagnetische Phänomene lautet

$$\text{rot}\vec{H} = \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (29)$$

wobei der letzte Term den Verschiebungsstrom darstellt. Mit dem oben genannten Modell der niedrigen Frequenzen wird dieser Term vernachlässigt. Durch einsetzen von (27) und (28) in Formel (29) ergibt sich mit den Zusammenhängen $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$ und $\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$ folgende Form für die Maxwell-Gleichung: [16]

$$\nabla \times (\mu^{-1} \cdot \nabla \times \vec{A}) + i\omega\sigma \cdot \vec{A}_0 = \vec{J}_0 \quad (30)$$

Maxwell Gleichung für Analyse

Bei dem betrachteten Prozess handelt es sich um einen hochdynamischen Vorgang. Induzierte elektrische Felder können in zwei Teile aufgeteilt werden. Den Anteil des wechselnden magnetischen Flusses (Induktionsgesetz) sowie den Anteil des bewegten Leiters im Magnetfeld. Der Anteil des magnetischen Wechselfeldes ist bereits in der obigen Formulierung (30) berücksichtigt. Um die Bewegung des Konduktors abzubilden muss die Gleichung noch erweitert werden. Der Anteil des bewegten Leiters im Magnetfeld modifiziert die Gleichung (30) wie folgt [16]:

$$\nabla \times (\mu^{-1} \cdot \nabla \times \vec{A}) + i\omega\sigma \cdot \vec{A}_0 - \sigma \cdot \vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_0 \quad (31)$$

3.2.2 Modell

Das elektromagnetische Modell unterscheidet sich prinzipiell von den thermischen und mechanischen Modellen. Für die elektromagnetische Berechnung ist es essentiell dass der gesamte vom Magnetfeld durchdrungene Raum modelliert wird. Das heißt es müssen sowohl Teile die am mechanischen Prozess beteiligt und unbeteiligt sind, als auch Medien die den Prozess umgeben, modelliert werden. Für den HF – Prozess werden dabei der Impeder, die Induktionsspule, der Luftspalt und die umgebende Luft zusätzlich modelliert.

Bei der Modellierung kann die Symmetrie des Prozesses ausgenutzt werden. Dies bringt entscheidende Vorteile. Es kann damit die Anzahl der Freiheitsgrade einerseits durch die Verringerung der Knotenanzahl und andererseits durch anbringen von Symmetriebedingungen reduziert werden. Abbildung 37 zeigt das Gesamtmodell für die elektromagnetische Berechnung.

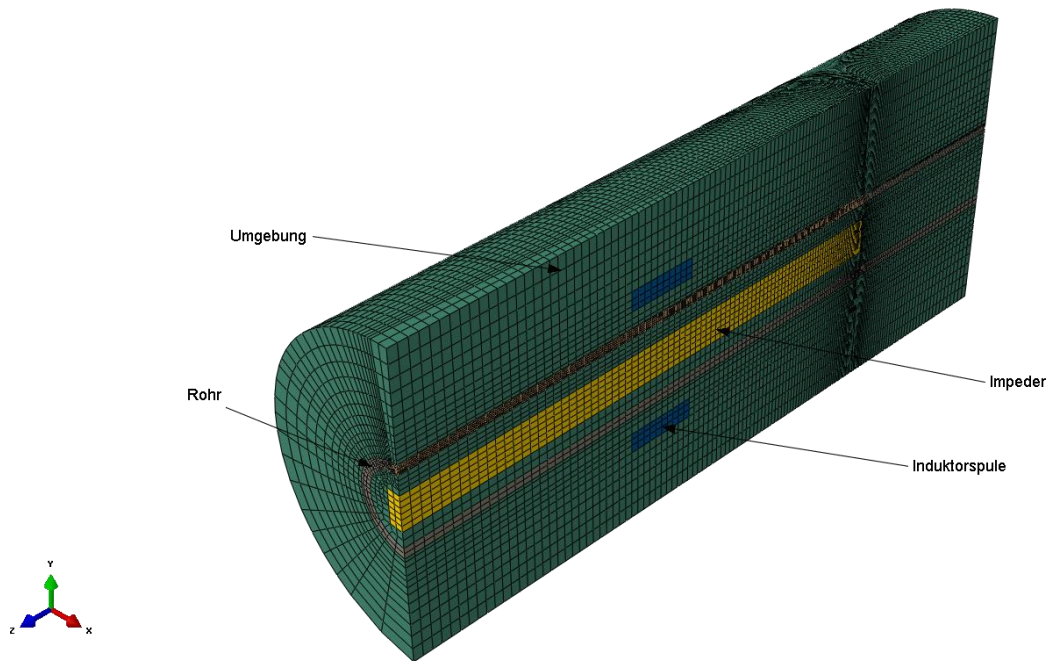


Abbildung 37: elektromagnetisches Modell

Für die Modellierung des Magnetfeldes ist die Netzfeinheit nicht von großer Bedeutung. Für die Berechnung der Stromdichte und der daraus resultierenden Erwärmung hat die richtige Wahl der Elementgröße jedoch einen entscheidenden Einfluss. So muss im speziellen darauf geachtet werden, dass die Elementqualität im Bereich großer Gradienten besonders gut ist. Außerdem muss das Rohr hinsichtlich der elektrischen Effekte wie Skineneffekt und Proximity Effekt im Spaltbereich und an der äußeren Rohroberfläche besonders fein vernetzt werden. Die Gesamtgröße des Modells sollte auf Grund der Randbedingungen so groß wie möglich sein. Da die Rechendauer bei großen Modellen stark ansteigt ist die Modellgröße jedoch begrenzt. Das dargestellte Modell stellt einen Kompromiss zwischen den beiden Aspekten dar.

Die Elementanzahl ergibt sich aus dem genannten Kompromiss zu der in Tabelle 6 dargestellten Zahl. Die maximale Elementkantenlänge liegt im Bereich der Randbedingungen im Außenbereich. Die Elemente mit der minimalen Kantenlänge liegen im Bereich der größten Gradienten im Spaltbereich.

Tabelle 6: Elemente, elektromagnetische Simulation

| | Elementtyp | Anzahl | | min. Kantenlänge | max. Kantenlänge |
|------------------|-------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|
| | | Elemente | Knoten | | |
| Rohr | Hex 8 | 29100 | 35000 | 0,3 mm | 3 mm |
| Umgebung | Hex8/Penta6 | 68800 | 79900 | 0,2 mm | 10 mm |
| Luftspalt | Hex8/Penta6 | 2100 | 3600 | 0,2 mm | 3 mm |
| Spule | Hex8 | 990 | 1500 | 0,5 mm | 2 mm |
| Impeder | Hex8 | 1200 | 2100 | 0,2 mm | 3 mm |
| Summe | | 102190 | 122100 | | |

Abbildung 38 zeigt das finite Elemente Modell ohne das umgebende Medium. Es ist lediglich der Luftspalt zu sehen der die beiden Rohrflanken vor der Schweißung trennt. Der Luftspalt endet in der Schweißzone.

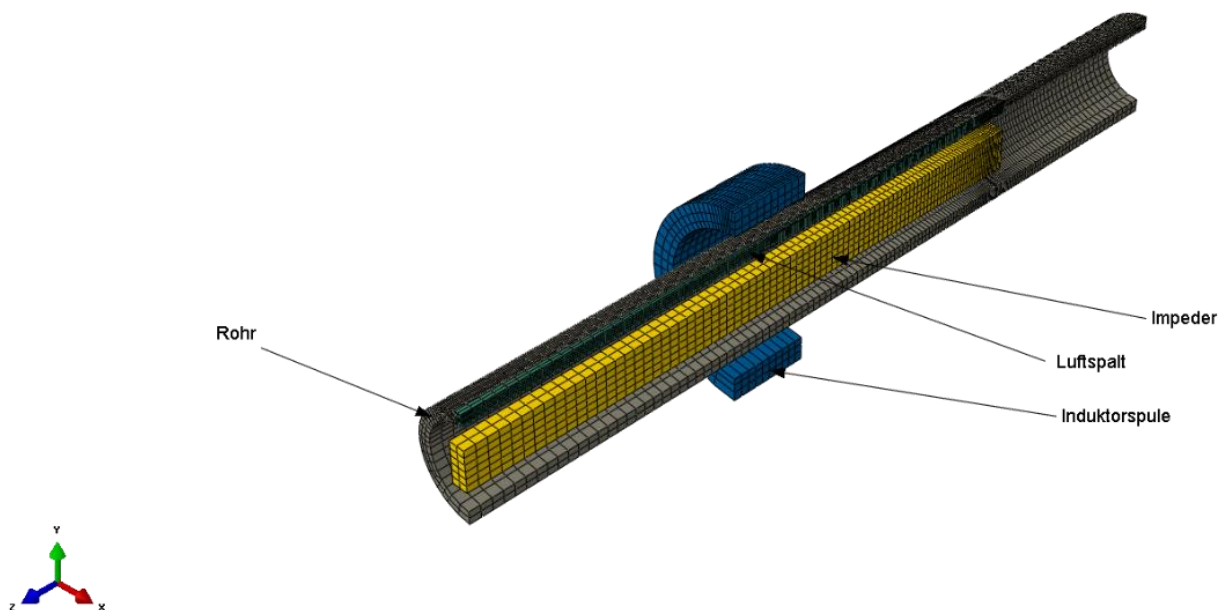


Abbildung 38: elektromagnetisches Modell ohne umgebendes Medium

Für die Randbedingungen müssen zusätzlich sogenannte Surfaces definiert werden. Dabei werden die Oberflächen der 3D- Elemente zusammengefasst um die Rand- und Symmetriebedingungen auf das Modell aufbringen zu können. Abbildung 39 zeigt diese Oberflächen am elektromagnetischen Modell. Die blaue Fläche dient zur Definition der Symmetriebedingungen. Die gelbe und rote Fläche dienen zur Definition der Modellberandung.

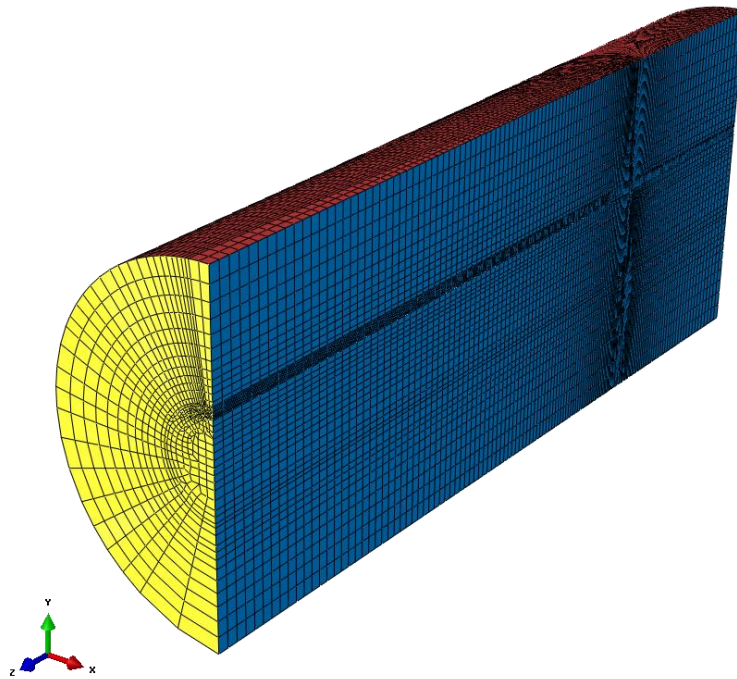


Abbildung 39: Oberflächen für Randbedingungen

3.2.3 Randbedingungen

Als Randbedingung für die elektromagnetische Rechnung wird die sogenannte Dirichlet Bedingung verwendet. Dabei werden Funktionswerte für den Rand vorgegeben. An den Rändern des betrachteten Raumes wird das Vektorpotential \vec{A} zu Null gesetzt. In der FE-Berechnung wird dann $\vec{A} \times \vec{n}$ für die repräsentative Oberfläche berechnet. Diese Bedingung gilt sowohl im Fernfeld als Randbedingung als auch in der Symmetrieebene als Symmetriebedingung. (vgl. [20], Kap. 7.1).

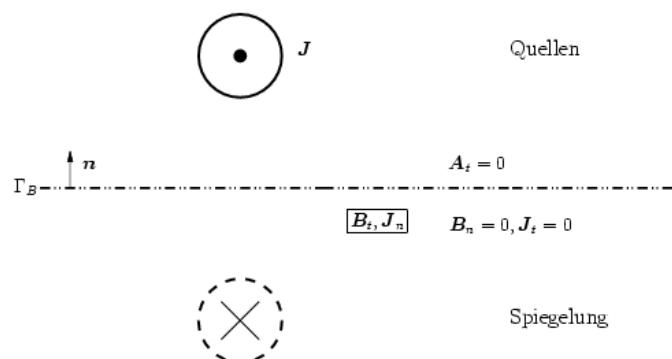


Abbildung 40: antimetrische Spiegelung durch homogene Dirichlet Bedingung [20]

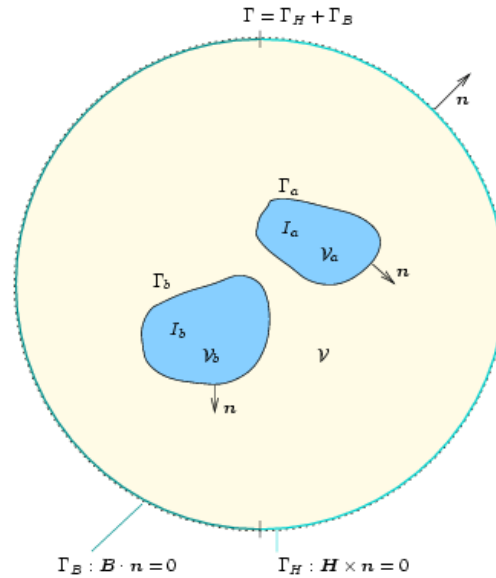


Abbildung 41: Simulationsbereich und Ränder bei Berechnung des mag. Vektorpotenzials[11]

Wie in Abbildung 41 dargestellt wird die Randbedingung für die Ränder der Simulation festgelegt. Es gilt für Γ_B :

$$\vec{n} \times \vec{A} = 0 \quad (32)$$

Die Bewegung des Rohres wird durch die Angabe des Betrages der Geschwindigkeit und dem Richtungskosinus des Geschwindigkeitsvektors definiert. Die Rohrgeschwindigkeit ergibt sich aus den realen Prozessdaten.

Die Temperaturverteilung im Werkstück wird aus der gekoppelten thermomechanischen Rechnung übernommen. Für diese Koppelung wird ein Zeitschritt definiert bei dem das Magnetfeld neu berechnet wird. Die Berechnung ändert sich dahingehend, dass sich die Stromdichte die die Erwärmung erzeugt mit der Temperatur ändert.

Die Einbringung der Energie für die induktive Erwärmung erfolgt wie in der Prozessbeschreibung beschrieben über eine stromdurchflossene Spule. In der Simulation wird dafür in den Spulenelementen eine Stromdichte definiert. [16]

Da für den Strom in der Spule keine Prozessdaten zur Verfügung stehen wird die Stromdichte abgeschätzt. Diese Abschätzung erfolgt mit der mittleren Leistung des Generators und der Generatorspannung. Zusätzlich wird die Größenordnung der gewählten Stromstärke mit

Literaturwerten kontrolliert. Abbildung 42 zeigt eine Kurve die zur Überprüfung der gewählten Parameter herangezogen wird.

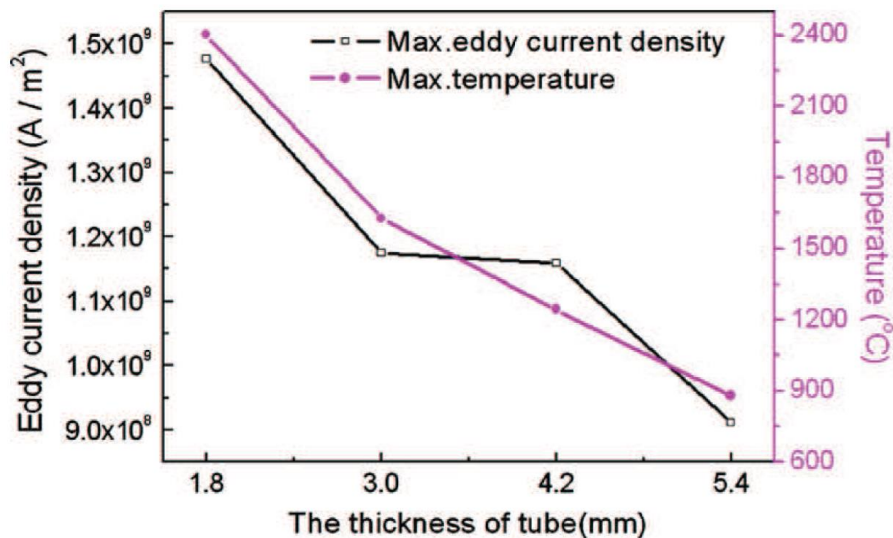


Abbildung 42: induzierter Strom und maximale Temperatur, (Schweißgeschwindigkeit 18m/min) [14]

Die Bewegung des Werkstückes in Schweißrichtung muss wie aus dem mathematischen Modell ersichtlich nicht nur in der thermomechanischen Berechnung berücksichtigt werden sondern ebenso in der elektromagnetischen Simulation. Damit wird sichergestellt, dass die induzierte Energie im Werkstück unter Berücksichtigung der Vorschubgeschwindigkeit berechnet wird.

3.2.4 Materialdaten

Wie aus dem mathematischen Modell (3.2.1) hervorgeht sind für die elektromagnetische Berechnung folgende Materialeigenschaften notwendig:

- elektrische Leitfähigkeit, σ
- relative magnetische Permeabilität, μ_r

Beide sind stark von der Temperatur abhängig. Die Abhängigkeit wird mit JMatPro simuliert und ist in Abbildung 28 dargestellt.

Für die Materialwerte wird isotropes Verhalten angenommen. Die Tensoren für Leitfähigkeit und Permeabilität (siehe (30) und (31)) werden richtungsunabhängig. (33) zeigt den Aufbau der isotropen Tensoren am Beispiel der elektrischen Leitfähigkeit.

$$\boldsymbol{\sigma} = \sigma \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (33)$$

Zur Berücksichtigung der Hysterese müssen passende BH-Kurven in das Modell implementiert werden. Da die Einführung dieser Kurven Ungenauigkeiten in das System bringt, die schwer abzuschätzen sind, und weil bei Temperaturen über der Curie-Temperatur die Hystereseverluste ohnehin zu vernachlässigen sind, wird der Einfluss der Hysterese in der Simulation nicht berücksichtigt. (vgl. [6])

3.3 Thermomechanische Simulation

3.3.1 Mathematische Modelle

Der verwendete Gleichungslöser verwendet eine exakte Implementierung des gekoppelten Systems. Das heißt dass die Gleichungen gekoppelt gelöst werden. In der folgenden Matrix sind die Gleichungen dargestellt:

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{uT} \\ K_{Tu} & K_{TT} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_u \\ R_T \end{Bmatrix} \quad (34)$$

Dabei sind Δu und ΔT die jeweilige Korrekturen der Verschiebung und der Temperatur. K_{ij} sind die Untermatrizen der gesamten gekoppelten Jacobi Matrix und R_u beziehungsweise R_T sind die mechanischen- und thermischen Fehlervektoren. Um dieses System zu lösen müssen die mechanischen- und die thermischen Gleichungen gleichzeitig gelöst werden. Zusätzlich erzeugt die exakte Implementierung eine unsymmetrische Matrix. Dafür ist ein besonderes Lösungsschema vorgesehen. [16]

3.3.2 Modell

Das thermomechanische Modell unterscheidet sich grundsätzlich vom elektromagnetischen Modell. Für diese Simulation ist die Modellierung der Umgebung nicht notwendig. Das Kraftfeld und das Temperaturfeld breiten sich nur im Werkstück aus. Die Interaktion mit der Umgebung wird mit Randbedingungen modelliert.

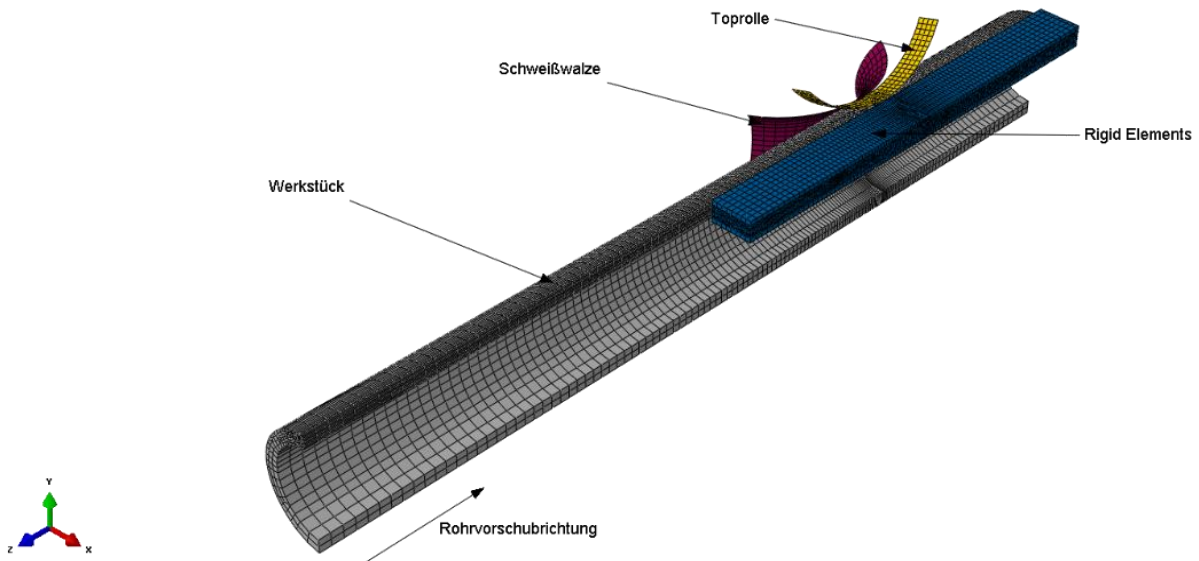


Abbildung 43: Thermomechanisches Modell

Der Wärmetransport wird über Randbedingungen an den Werkstückoberflächen simuliert. Die Kräfteinleitung erfolgt über die gekühlte Schweißwalze. Durch die Toprolle wird eine Pressung in Umfangrichtung realisiert.

Der „Rigid Elements“ Block hat eine besondere Bedeutung im Modell. Er ersetzt die Symmetrieebene im Berechnungsmodell. Der Block wird im Weiteren auch als Symmetrieblock bezeichnet. In der Regel wird ein symmetrisches Modell mit einer analytischen Ebene simuliert und entsprechende Randbedingungen aufgebracht. Da die Berechnung der Wärmegenerierung durch Reibung im Kontakt aber nur mit 3D – Kontinuums-elementen simuliert werden kann wird hier diese Variante verwendet. Die Höhe des Blocks ist dabei etwas größer als die Wandstärke des Rohres gewählt um Konvergenzprobleme in der Kontaktberechnung zu vermeiden. Um ein symmetrisches Modell zu gewährleisten wird dabei die Steifigkeit der Elemente stark überhöht angesetzt um die Symmetriebedingung anzunähern. Eine Definition einer „unendlichen“ Steifigkeit für den Symmetrieblock ist aufgrund der numerischen Elementdefinition nicht möglich. Der Block bewegt sich in Schweißrichtung mit der Schweißgeschwindigkeit. Dadurch kann die Pressung der Spaltflanken gut angenähert werden ohne auf die thermischen Effekte im Kontakt verzichten zu müssen.

Das Modell besteht aus insgesamt rund 45000 Elementen. Die Aufteilung ist in Tabelle 7 ersichtlich. Die Übertragung der Ergebnisse der induktiven Erwärmung aus der elektromagnetischen Rechnung erfordert ein speziell angepasstes Netz im Bereich der

größten Temperatur- und Verschiebungsgradienten. Das Rohr nimmt den größten Teil des Modelles ein. Es wird versucht die Schweißrollen möglichst grob zu vernetzen um Freiheitsgrade und damit Rechenzeit einzusparen.

Tabelle 7: Elemente, thermomechanische Simulation

| | Elementtyp | Anzahl | | min. Kantenlänge | max. Kantenlänge |
|---------------------|------------|--------------|--------------|---------------------|---------------------|
| | | Elemente | Knoten | | |
| Rohr | Hex8 | 29100 | 35000 | 0,3 mm | 3 mm |
| Schweißrolle | Hex8 | 2640 | 3450 | 0,5 mm | 3 mm |
| Toprolle | Hex8 | 760 | 1170 | 0,8 mm | 1,6 mm |
| Rigidplane | Hex8 | 12000 | 14580 | 0,3mm | 1,8 mm |
| Summe | | 44500 | 54200 | | |

3.3.3 Randbedingungen

Als mechanische Randbedingung werden die Knoten an den Rohrenden fixiert. Diese Annahme kommt der Realität sehr nahe. Auf eine übliche 3 Punkt Lagerung wird dabei verzichtet da dies aufgrund der hohen Verformungsraten und dem plastischen Materialverhalten zu hohen lokalen Deformationen führt und das Ergebnis dadurch verfälscht wird. Alle Knoten an den Endflächen des Rohres werden somit in allen Freiheitsgraden, bis auf die Translation in Schweißrichtung (z-Achse), gesperrt.

Die Freiheitsgrade der Knoten von Schweißwalze und Toprolle sind jeweils an einen Referenzknoten gekoppelt. Die Randbedingungen werden dann auf diesen Knoten aufgebracht. Für die Schweißwalze wird dabei lediglich eine Bewegung in Kraftrichtung und eine Rotation um die eigene Achse zugelassen. Für die Toprolle wird nur die Rotation zugelassen. Wird die Simulation unter Vernachlässigung der Reibung durchgeführt, so werden auch die rotatorischen Freiheitsgrade gesperrt.

Für die Symmetriebedingungen sind Randbedingungen an den Rohrflanken und dem Symmetrieblock (siehe Abbildung 43) anzubringen. Für die Rohrflanken wird der Wärmestrom zu null gesetzt. Für die Rigid Elements werden die Freiheitsgrade in x und y gesperrt. Für den

Freiheitsgrad in z-Richtung wird die Rohrgeschwindigkeit vorgegeben um ein Rutschen im Kontakt zu vermeiden.

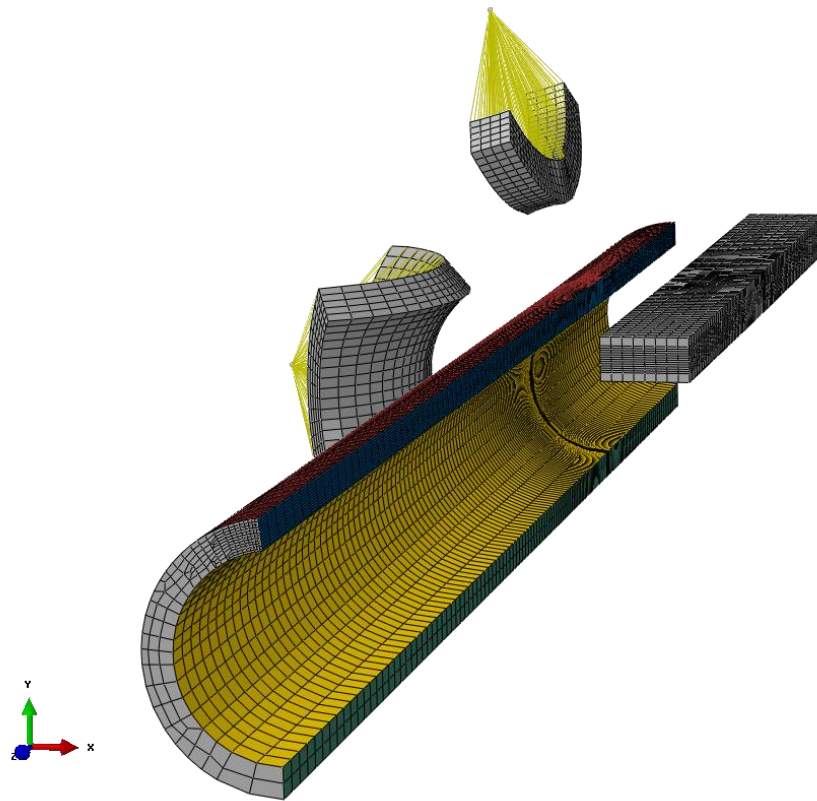


Abbildung 44: Randbedingungen, Explosionsdarstellung

Abbildung 44 zeigt das Modell mit den für die Randbedingungen wichtigen Elementen. An der Rohrinne- und Rohraussenseite wird ein Wärmeübergang definiert. (gelbe und rote Oberfläche)

$$\dot{q} = -\alpha(T - T_u) \quad (35)$$

Gleichung (35) zeigt den Zusammenhang für den konvektiven Wärmeübergang. Der Wärmeübergangskoeffizient α bestimmt mit der Temperaturdifferenz den Wärmestrom.

Die Strahlung wird ebenfalls an beiden Oberflächen berücksichtigt.

$$\dot{q} = \sigma\epsilon[(T - T_0)^4 - (T_u - T_0)^4] \quad (36)$$

Gleichung (36) zeigt den in der Simulation implementierten Zusammenhang für die Strahlung. T_0 steht darin für den Wert des absoluten Nullpunktes in der verwendeten Temperaturskala. Es wird die Celsius Skala verwendet. Damit ergibt sich der Wert zu $-273,5^\circ\text{C}$. T_u steht für die Umgebungstemperatur.

An den beiden Rollenmodellen sind sogenannte „Rigids“ sichtbar. Abbildung 44 zeigt die beiden Elemente (gelb dargestellt) welche jeweils die Knoten der Schweißrolle und Toprolle zu einem Referenzknoten zusammenführen. Sie führen zu einer starren Verbindung des Referenzknotens mit den Knoten der Rollen. Die Verschiebungsrandbedingungen werden nun auf den Referenzknoten gesetzt und auf die Rollen übertragen. Wird zwischen Rohr und Rollen die Reibung vernachlässigt so können alle 6 Freiheitsgrade (3 translatorisch und 3 rotatorisch) gesperrt werden. Wird die Reibung berücksichtigt bleibt der rotatorische Freiheitsgrad der die Rollendrehung zulässt nicht gesperrt. Für die Toprolle wird zur leichteren Definition der Randbedingungen ein eigenes Koordinatensystem definiert bei dem die globale x-Achse in die Rollenachse gedreht wird. Dieses Koordinatensystem ist in Abbildung 45 zusammen mit dem globalen Koordinatensystem dargestellt.

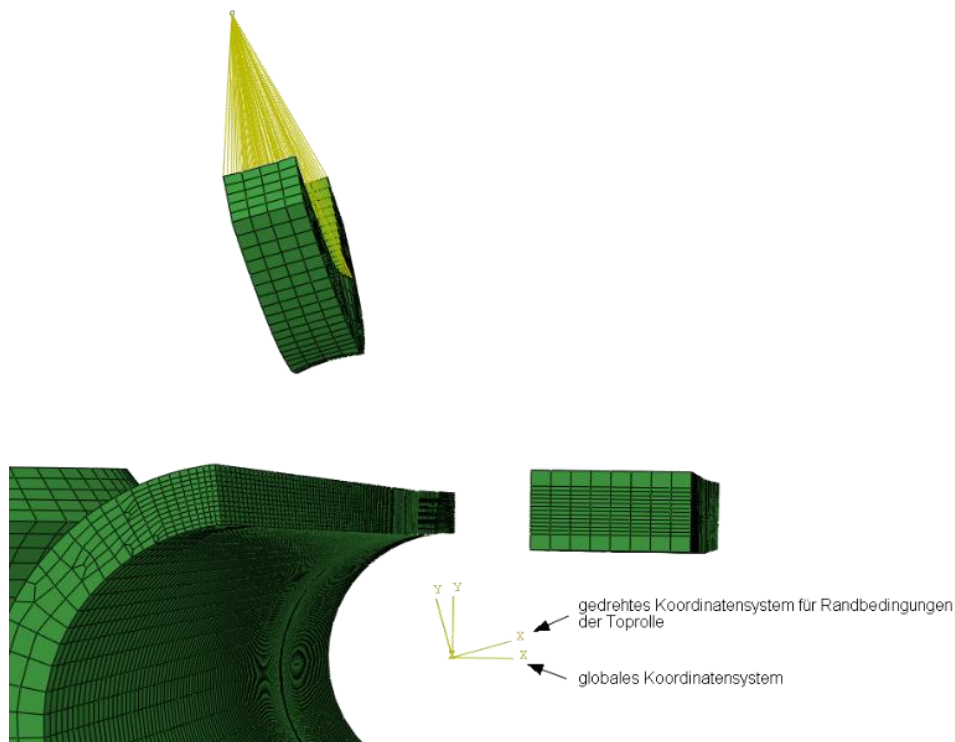


Abbildung 45: Koordinatensysteme

Das Rohr wird wie zu Beginn des Kapitels beschrieben an den Endflächen in x und y Richtung eingespannt. In Abbildung 44 ist ein Ende des Rohres sichtbar (graue Stirnfläche).

Der Rigid Elements Block (siehe Abbildung 43) wird ebenfalls in x und y- Richtung festgehalten. In z-Richtung bewegt sich der Block mit Rohrgeschwindigkeit.

Als Symmetriebedingung wird der Freiheitsgrad der Knoten auf der Trennfuge (grüne Fläche) gesperrt. Damit ist die Symmetrie des Modells erfüllt.

Stauchkraft

Die Stauchkraft wird über die Schweißwalzen eingebracht. Um die Konvergenz der stark nichtlinearen Berechnung zu verbessern wird die Kraft mit einer zeitabhängigen Kurve gesteuert. Nichtlinearitäten wie Kontakt oder große Verformungen führen zu Konvergenzproblemen die durch allmähliche Krafteinleitung zum Teil beseitigt werden können. Abbildung 46 stellt die Stauchdruckkurve über die Zeit dar. Der resultierende Stauchdruck ergibt sich aus dem Multiplikator und dem Maximalwert der Stauchkraft. Nach 0,1 s ist demnach die angestrebte Stauchkraft eingeleitet. Diese bleibt dann für die restliche Prozessdauer konstant.

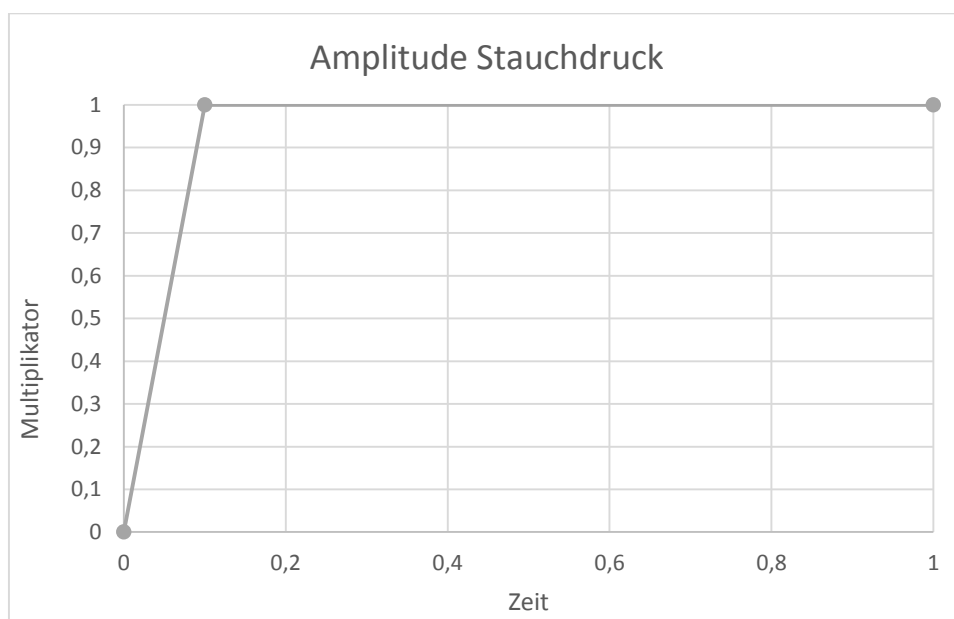


Abbildung 46: Verlauf des Stauchdrucks über die Zeit

Mechanische Kontaktdefinition

Der mechanische Kontakt beinhaltet alle physikalischen Vorgänge die mit einer Kraftübertragung einhergehen. So werden in dieser Definition Parameter für die Normalkraftübertragung und die Reibung eingestellt.

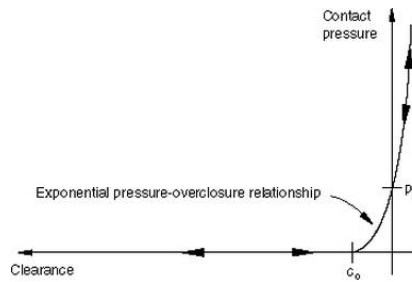


Abbildung 47: mechanischer Kontakt "Weicher Kontakt" [5]

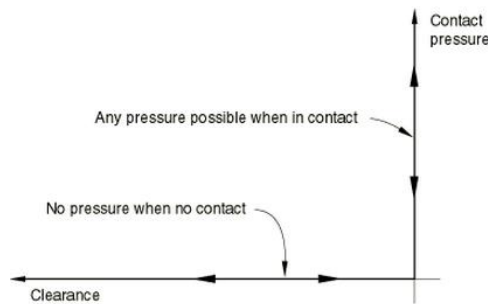


Abbildung 48: mechanischer Kontakt "Harter Kontakt" [5]

Für die betrachtete Simulation wurde ein harter Kontakt gewählt. Dieses Modell spiegelt am besten die realen Kontaktbedingungen wider.

Reibung

Die Reibung im mechanischen Kontakt wird durch ein klassisches Coulomb Reibmodell berücksichtigt. Dazu wird ein konstanter Reibwert μ definiert.

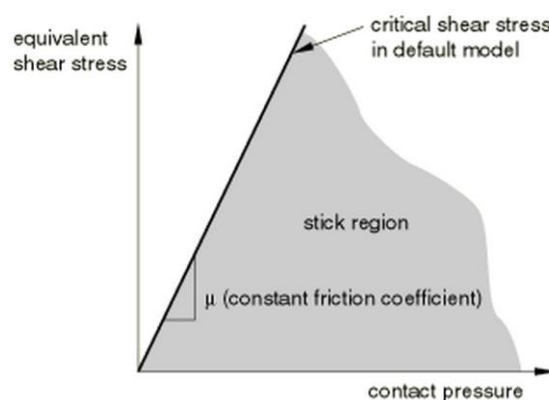


Abbildung 49: Coulomb'sches Reibmodell [16]

Abbildung 49 zeigt das verwendete Reibgesetz. Im Kontakt sind sehr hohe Reibspannungen zu erwarten da sehr große Verformungen auftreten. Daher ist es zweckmäßig die Schubspannung zu limitieren da das klassische Coulomb-Gesetz in diesem Fall versagen würde. Abbildung 50 zeigt die verwendete Definition für die kritische Schubspannung. Für die vorliegenden

Simulationsergebnisse wurde τ_{max} mit $\sigma_y/\sqrt{3}$ definiert wobei σ_y mit 28 MPa die gemessene Dehngrenze des verwendeten S355J2G3 bei 1300°C darstellt.

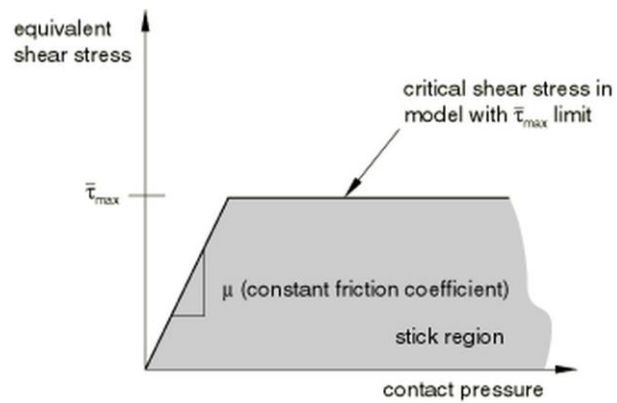


Abbildung 50: kritische Schubspannung im Kontakt [5]

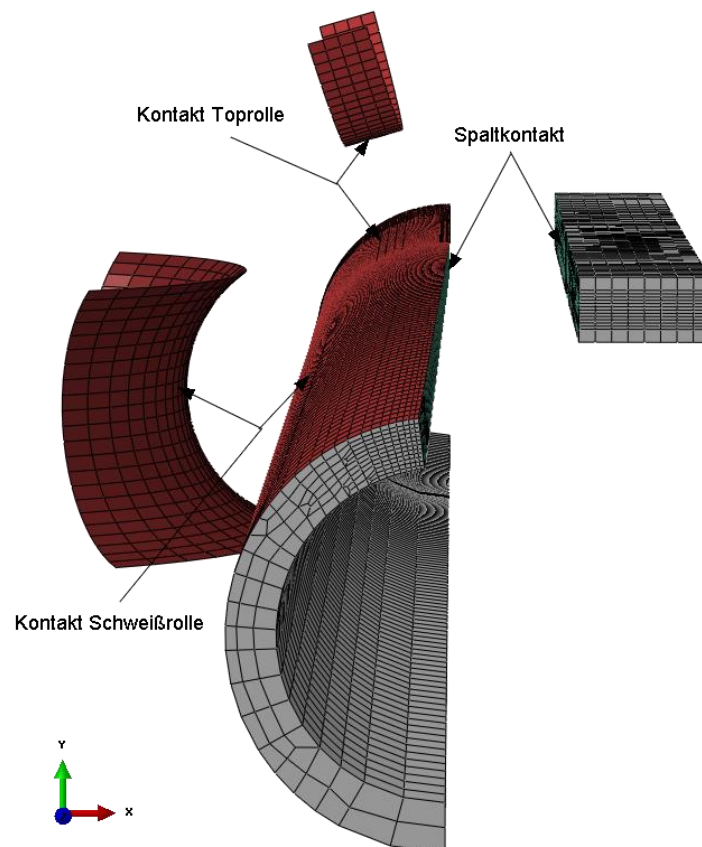


Abbildung 51: Kontakte (Explosionsdarstellung)

Thermische Kontaktdefinition

Für die thermische Berechnung ist vor allem die Wärmegenerierung durch Reibung im Kontakt wichtig. Der Wärmefluss über den in Kontakt stehenden Bereich des Spaltes kann aufgrund der Symmetrie vernachlässigt werden.

$$P_{fr} = \tau \dot{\gamma} \quad (37)$$

Der Zusammenhang (37) zeigt die Implementierung der Wärmegenerierung im Kontakt in der Simulation. Dabei ist P_{fr} der Anteil der Energie der durch Reibung im Kontakt in Wärme umgewandelt wird. Die Reibspannung τ und die Gleitgeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ ergeben diesen dissipierten Energiebeitrag. Zur Validierung des Modells kann der Anteil der an die Kontaktpartner abgegebenen Energie durch den Wirkungsgrad η und den Faktor f variiert werden. q_A und q_B stellen dabei den Wärmestrom in die beiden Kontaktflächen dar.

$$q_A = f\eta P_{fr} \quad \text{und} \quad q_B = (1 - f)\eta P_{fr} \quad (38)$$

3.3.4 Materialdaten

Die physikalischen Eigenschaften des Werkstoffes können in Abaqus vollständig temperaturabhängig definiert werden. Das plastische Verhalten des Werkstoffes kann ebenfalls vollständig implementiert werden. Die Fließkurven können sowohl temperaturabhängig als auch dehnratenabhängig berücksichtigt werden. Ein Auszug aus den verwendeten Fließkurven ist in Kapitel 3.1.2 abgebildet. Die vollständigen Kurven befinden sich im Anhang.

Für die Beschreibung des plastischen Verhaltens sind technische Dehnungen wenig aussagekräftig. Es werden wahre Dehnungen und Spannungen verwendet. Die Bedeutung der plastischen Dehnung im Zusammenhang zur technischen Dehnung ist in Abbildung 52 zu sehen. Erst bei Erreichen der Streckgrenze beginnt die bleibende Verformung des Bauteils und damit die plastische Dehnung.

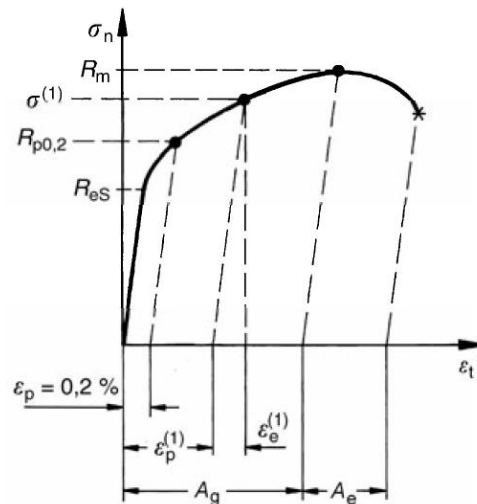


Abbildung 52: Spannungs - Dehnungs Diagramm (schematisch)

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (39)$$

$$\varepsilon_{ln}^{pl} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) - \frac{\sigma_{nom}}{E} \quad (40)$$

Gleichung (39) und Gleichung (40) zeigen die mathematischen Zusammenhänge. ε_{ln}^{pl} wird auch als logarithmische Dehnung, Umformgrad oder Hencky Dehnung bezeichnet. In den in dieser Arbeit abgebildeten Fließkurven wird immer die Fließspannung über dem Umformgrad dargestellt. [21]

3.4 Gekoppelte Simulation

Wie in Abbildung 16 dargestellt werden die Ergebnisse der einzelnen Berechnungsschritte nach bestimmten Zeitschritten ausgetauscht. Konkret wird für die elektromagnetische Berechnung das Temperaturfeld aus der thermomechanischen Berechnung für die Anpassung der Materialeigenschaften verwendet. Umgekehrt resultiert die Erwärmung in der thermomechanischen Berechnung unter anderem aus der induzierten Energie im Werkstück. Die Änderung des induzierten Stromdichtefeldes über die Zeit ist dabei viel geringer als die mechanische Verformung und Ausbreitung des Temperaturfeldes über die Zeit. Aus diesem Grund wird die elektromagnetische Berechnung weniger stark gekoppelt als die thermische-

und mechanische Berechnung. Ein weiterer Grund ist die relativ lange Berechnungsdauer für das elektromagnetische Modell da dieses mehr Freiheitsgrade besitzt als das thermomechanische Modell. Da sich nach einer bestimmten Zeit ein nahezu konstantes Temperaturfeld einstellt ist diese Art der Koppelung durchaus effektiv.

Der Zeitschritt für die thermomechanische Koppelung wird vom Simulationsprogramm automatisch gewählt. Dieser ist abhängig vom Konvergenzverhalten des vorangegangenen Zeitschrittes. Die elektrothermische Koppelung erfolgt nach fixen Zeitschritten.

3.5 Einheiten

Die Einheiten der Simulationsmodelle müssen konsistent sein. Der Solver an sich schränkt die Wahl der Einheiten nicht ein. Das verwendete Einheitensystem muss entsprechend des Ergebnisaustausches der gekoppelten Simulation sinnvoll gewählt werden. Aufgrund der Größe der untersuchten Geometrie und der Größenordnungen der auftretenden Kräfte und Verformungen wird das in Tabelle 8 grün markierte System verwendet.

Tabelle 8: Einheitensystem

| Größe | SI | mm-t-s | mm-g-ms | mm-kg-s |
|----------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Länge | m | mm | mm | mm |
| Kraft | N | N | N | mN |
| Masse | kg | t (10^3 kg) | g | kg |
| Zeit | s | s | ms | s |
| Spannung | Pa(N/m ²) | MPa(N/mm ²) | MPa(N/mm ²) | kPa(mN/mm ²) |
| Energie | J | mJ(10^{-3} J) | mJ(10^{-3} J) | μ J (10^{-6} J) |
| Dichte | kg/m ³ | t/mm ³ | g/mm ³ | kg/mm ³ |

Die in den diversen Diagrammen im Anhang dargestellten temperaturabhängigen Materialdaten müssen natürlich teilweise an das Einheitensystem angepasst werden.

Tabelle 9: verwendete Einheiten

| Größe | mm-t-s |
|---------------------------|-------------------------|
| elektr. Stromstärke | A |
| Temperatur | K |
| Beschleunigung | mm/s ² |
| Frequenz | Hz=1/s |
| Geschwindigkeit | mm/s |
| Leistung | mW |
| spez. Wärmekapazität | mJ/(t*K) |
| Wärmeleitfähigkeit | mW/(mm*K) |
| Wärmeübergangskoeffizient | mW/(mm ² *K) |
| Spannung | mV |
| Widerstand | mΩ |
| mag. Permeabilität | mH/mm=mΩ*s/mm |
| elektr. Konduktivität | 1/(mΩ*mm) |

Neben den Basiseinheiten werden auch die in Tabelle 9 dargestellten Einheiten benötigt. Alle dargestellten Ergebnisse sind, wenn nicht anders angegeben, im beschriebenen Einheitensystem angegeben.

4 Ergebnisse

4.1 Verifizierung der Modelle

4.1.1 elektromagnetische Berechnung

Die Validierung der elektromagnetischen Berechnung erweist sich als relativ schwierig da dafür sehr umfangreiche Messdaten erforderlich wären die für den betrachteten Prozess nicht vorhanden sind. Man muss sich daher auf entsprechende Literatur beziehen die ähnliche Prozesse betrachtet. Zu achten ist dabei auf die unterschiedlichen Simulationsmodelle. Ein Vergleich ist nur bei ähnlichen Geometrien und Rohrgeschwindigkeiten zulässig da die physikalischen Effekte sehr von Rohrdurchmesser und der Schweißgeschwindigkeit abhängen und dadurch eine andere Stromdichte und Temperatur zu erwarten ist.

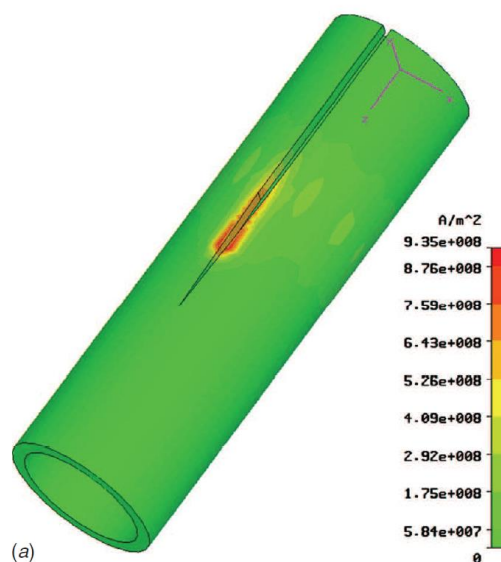


Abbildung 53: Stromdichtefeld [14]

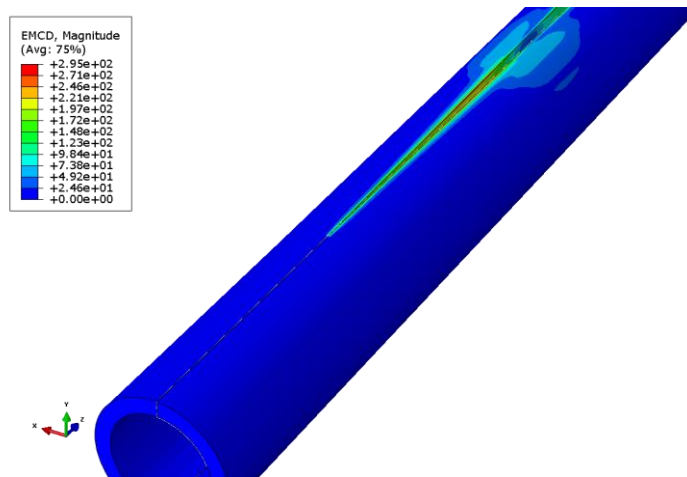


Abbildung 54: Stromdichtefeld aus der Simulation

Abbildung 53 zeigt ein Beispiel der Stromdichteverteilung an einem Rohr. Vergleicht man diese Verteilung mit Abbildung 54 aus der vorliegenden Simulation erkennt man ein ähnliches Feld. Wichtig ist, dass die größte Stromdichte nicht direkt im Schweißpunkt auftritt sondern zwischen Induktionsspule und Schweißwalzen. Die Unterschiede in der Verteilung (vor allem an der Rohroberfläche) liegen an der Verwendung von unterschiedlichen Parametern wie Rohrdurchmesser, Material und Schweißleistung. Ein quantitativer Vergleich der beiden Felder ist daher nicht zulässig. Für einen qualitativen Vergleich sind die Ergebnisse aber durchaus aussagekräftig.

4.1.2 Thermomechanische Berechnung

Bevor der Gesamtprozess dargestellt wird, müssen die einzelnen Simulationsschritte validiert werden. Für die thermomechanische Berechnung können die Ergebnisse direkt mit einem Schlibbild aus einer Rohrprobe verglichen werden. Abbildung 55 zeigt ein Schlibbild eines Rohres mit den Abmessungen 22 x 2,95 mm. Bei dem Material handelt es sich um Baustahl mit ähnlichen Materialeigenschaften. Es ist daher möglich die qualitative Schweißnahtausbildung zu vergleichen und prinzipiell zu bewerten. In der hellen Zone im Bereich der Schweißnaht findet der Stauchvorgang statt. Die Ausbildung der Stauchzone ist dabei bei unlegierten Stählen und gleichen Schweißparametern sehr ähnlich.



Abbildung 55: Makroschliffbild der Rohrprobe

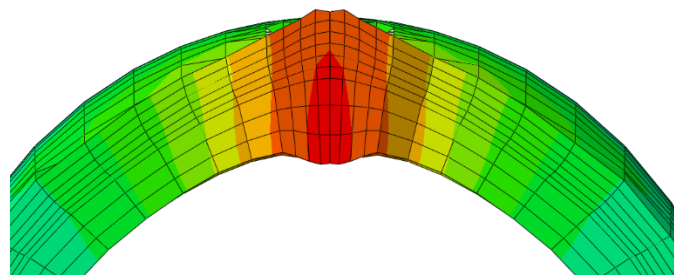


Abbildung 56: Ausschnitt aus der Schweißzone, $f=165\text{kHz}$, Temperaturfeld

Abbildung 56 zeigt im Vergleich dazu ein vereinfachtes Modell der Schweißnaht zur Validierung der Schweißzone. Der Vergleich zeigt eine Ausbildung der Schweißnaht die der Realität entspricht. Eine Legende und Ergebnisbeschreibung ist im Bild absichtlich nicht dargestellt da ein Ergebnisvergleich am stark vereinfachten Modell nicht zulässig wäre. Es dient ausschließlich zur Validierung des verwendeten Simulationsprozesses. Dafür wurden insbesondere thermische Einflüsse wie Strahlung und Konvektion vernachlässigt. Auf die Koppelung mit der elektromagnetischen Berechnung wurde ebenso verzichtet. Um die plastische Verformung trotzdem abbilden zu können wurde ein Temperaturfeld in der Schweißzone vorgegeben und die Stauchkraft im Vergleich zum Realprozess leicht erhöht. Die Skalierung des Ergebnisbildes wurde leicht erhöht um die Stauchung deutlich zu machen. Die etwas breitere Stauchzone resultiert aus einem weniger konzentrierten Wärmeeintrag durch Vernachlässigung der Randbedingungen. Neben der Deformation muss auch die Wärmeeinflusszone verifiziert werden. Dafür müssen wieder Vergleichsdaten aus der Literatur herangezogen werden.

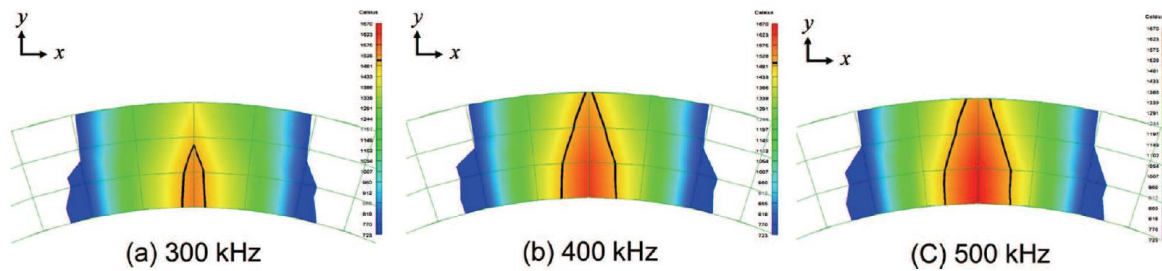


Abbildung 57: Wärmeeinflusszone bei verschiedenen Schweißfrequenzen [14]

Abbildung 57 zeigt verschiedene Wärmeeinflusszonen in Abhängigkeit von der Schweißfrequenz. Im Vergleich zu Abbildung 56 ist ersichtlich, dass neben der Wulstbildung auch die Wärmeeinflusszone qualitativ übereinstimmt. Die schwarze sich nach oben hin verjüngende Markierung in Abbildung 57 zeigt die Schmelzlinien. Die unterschiedlichen Frequenzen haben dabei einen großen Einfluss auf die Erwärmung in der Schweißnaht. Hohe Frequenzen führen zu einer konzentrierten Erwärmung und einer möglichen durchgehenden Aufschmelzung. Niedrigere Frequenzen ergeben eine breite Wärmeeinflusszone ohne vollständige Aufschmelzung.

4.2 Simulationsprozess

Die in Abbildung 16 dargestellte gekoppelte Simulation konnte in der vorliegenden Arbeit nicht in dieser Weise durchgeführt werden. Es mussten aus verschiedensten Gründen Vereinfachungen gemacht werden. Die auftretenden Probleme sind in den folgenden Kapiteln im Zuge einer Dokumentation beschrieben. Auf Basis der ermittelten Ergebnisse konnten Lösungswege gesucht werden und in den Simulationsprozess übernommen werden. Für die Beschreibung der Fehler wurde der Gesamtprozess in folgende 3 Teilprozesse aufgeteilt um die Fehler besser zuordnen zu können:

- Induktion

Diesem Punkt sind alle Fehler zugeordnet die im Zuge der elektrischen Induktion und den dazugehörigen physikalischen Effekten auftreten. Typische Fehlerquellen sind Materialdaten, Randbedingungen und Netzabhängigkeiten. Dieser Teilprozess befindet sich im Bereich der elektromagnetischen Berechnung.

- Erwärmung

Dazu zählen Fehler die bei der Erwärmung des Materials durch joul'sche Verluste auftreten. Im Wesentlichen sind dies Fehler die auf Randbedingungen und Materialwerte zurückzuführen sind. Der Teilprozess der Erwärmung ist Teil der thermomechanischen Simulation.

- Stauchung

Die Fehler in dieser Kategorie entstehen während dem Stauchprozess. Hier kommt es aufgrund der Verwendung des impliziten Gleichungslösers zu den gravierendsten Fehlern. Diese sind zum Großteil nur mit Modellvereinfachungen zu beheben. Die Stauchung ist Teil der thermomechanischen Simulation.

Wie die folgende Dokumentation zeigt ergeben sich aus den erhobenen Schwierigkeiten im Simulationsprozess notwendige Modellvereinfachungen und Anpassungen der Simulationsvorgänge.

4.2.1 Entwicklungsstufendokumentation und Lösungsansätze

In Tabelle 10 sind die durchgeführten Entwicklungsstufen dargestellt. Im Folgenden werden diese Punkte näher erklärt.

Tabelle 10: Entwicklungsstufen(RB..Randbedingungen, MD...Materialdefinition)

| Simulation sprozess | Teilprozess | Nr. | Fehlerkategorie | Fehlerursache | Beschreibung | Lösung | Effekt |
|-------------------------------|-------------------------|-----|----------------------------|---------------------------------|--|--|-------------------------------|
| elektromagnetische Simulation | Induktion | 1 | Ergebnis nicht plausibel | unzulängliche Prozessdaten | Aus den Prozessdaten kann der reale Energieeintrag in den Schweißprozess nur schwer ermittelt werden. | Iterative Anpassung des Energieeintrages | plausibles Stromdichtefeld |
| | | 2 | Konvergenz | Materialeigenschaften | Der sehr geringe Wert der elektrischen Leitfähigkeit der Luft führt zu numerischen Fehlermeldungen. | Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit der Luft | Prozess konvergiert |
| | | 3 | Berechnung | stark verzerrte Elemente | Stark von der optimalen Hexaederform abweichende Elemente im Bereich des Luftspaltes führen zu Fehlern in der Berechnung | Anpassung der Vernetzung im Luftspalt | Berechnung startet |
| | | 4 | MD | B-H Kurven | Aufgrund der Implementierung der B-H Kurven kommt es zu "Hot Spots" im Spaltbereich | konstanten Wert verwenden und validieren | homogener Verlauf |
| thermomechanische Simulation | Induktion/ Erwärmung | 5 | Übergabe des Energiefeldes | Netzabweichungen | Bei der Übergabe der Werte in die Thermomechanische Simulation treten Fehler auf | Anpassung der Vernetzung der beiden Modelle | Werte können übergeben werden |
| | Erwärmung | 6 | RB | Strahlung | Wärmeabfuhr durch Strahlung führt zu nicht plausiblen Temperaturfeldern | Validierung der Definitionen | Plausibles Temperaturfeld |
| | | 7 | RB | Konvektion | Wärmeabfuhr durch Konvektion führt zu nicht plausiblen Temperaturfeldern | Validierung der Definitionen | Plausibles Temperaturfeld |
| | | 8 | Ergebnis nicht plausibel | unzulängliche Prozessdaten | Aus den Prozessdaten kann der reale Energieeintrag nur schwer ermittelt werden. | Iterative Anpassung des Energieeintrages | plausibles Temperaturfeld |
| | Stauchung | 9 | MD | Fließkurven implementierung | Sprünge in den experimentellen Kurven | Glätten der Kurven | MD OK |
| | | 10 | Kontakt | hohe Kontaktkraft | hohe Kontaktpressung führt zu langsamer Konvergenz | Kontaktstelle verbreitern | schnellere Konvergenz |
| | | 11 | Kontakt | Linienkontakt bei Schweißrollen | Der Kontakt zwischen Schweißwalze und Rohr gleicht einem Linienkontakt und damit zu Konvergenzproblemen | Kontaktstelle verbreitern | Prozess konvergiert |
| | | 12 | Kontakt | Kontaktstöße | Durch die hohen Prozessgeschwindigkeiten kommt es zu Kontaktstößen zu Beginn der Simulation | Kontakt in eigenem Schritt anlegen | Kontaktstöße entfallen |
| | | 13 | Konvergenz | starke Verformung | Die starke Verformung im Bereich des Schweißwulstes und die hohen Verformungsraten führen zu Konvergenzproblemen. | Gleichungslöser ändern, Modell abstrahieren | plausible Teilergebnisse |

Entwicklungsstufe 1:

Der Simulation liegen die in Abbildung 17 bis Abbildung 22 und im Anhang dargestellten Daten zugrunde. Aus diesen Daten kann nicht direkt auf die Leistung geschlossen werden die der elektromagnetischen Erwärmung zugeführt wird. Dies könnte nur mit einer experimentellen Messung an den Induktionsspulen bewerkstelligt werden. Für die Simulation wird davon ausgegangen, dass die Generatorleistung aus Abbildung 18 den Strom für die Induktionsspulen zur Verfügung stellt. Daraus ergibt sich ein Stromdichtefeld das mit jenen aus der Literatur verglichen werden kann.

Da diese Werte schlecht übereinstimmen wird versucht durch iterative Anpassung des Energieeintrages das Ergebnis so an die Werte in der Literatur anzupassen, dass eine spätere Validierung des Temperaturfeldes möglich wird. Einflüsse anderer Parameter wie

Materialeigenschaften, Abmessungen, Randbedingungen usw. auf die Temperatur konnten vorher durch verschiedene Testläufe ausgeschlossen werden.

Die Anpassung des Energieeintrages wird für die Verifizierung der Modelle bereits durchgeführt. Abbildung 53 und Abbildung 54 zeigen den Vergleich der Ergebnisse aus Literatur und Simulation. Diese qualitativ gut übereinstimmenden Felder können nun in einer weiteren Entwicklungsstufe zur Validierung des Temperaturfeldes (Entwicklungsstufe Nummer 8) verwendet werden.

Entwicklungsstufen 2-4:

Diese Probleme konnten durch Anpassung der Vernetzung und geringen Parameteränderungen behoben werden. Die unter Nummer 4 angeführten B-H Kurven wurden entfernt und durch eine konstante magnetische Permeabilität ersetzt. Da die B-H Kurven nur aus der Literatur entnommen werden konnten ist diese Modelländerung durchaus gerechtfertigt. Der Einfluss der nichtlinearen Kurven ist vor allem bei Hystereseeffekten von Bedeutung welche in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Entwicklungsstufe 5:

Bei der Übergabe von Ergebniswerten muss sehr genau darauf geachtet werden, dass die verwendeten Netze bestimmte Kriterien erfüllen. So muss beispielsweise sehr genau darauf geachtet werden, dass die Elemente des Rohres im elektromagnetischen und thermomechanischen Modell den gleichen Raum einnehmen. Dies ist besonders im Modellaufbau eine große Herausforderung.

Entwicklungsstufen 6-7:

Die Randbedingungen für den Wärmeaustausch mit der Umgebung sind der Literatur entnommen. Bei diesen Werten sind nur leichte Anpassungen notwendig um eine plausible Wärmeabfuhr darzustellen. Eine Validierung ist aufgrund des geringen Einflusses der Parameter auf die Ergebnisse nicht notwendig.

Entwicklungsstufe 8:

Das Temperaturfeld muss zusammen mit dem Stromdichtefeld betrachtet werden. Durch Anpassung der Leistung (wie in Entwicklungsstufe 1 beschrieben) kann ein Stromdichtefeld

erreicht werden das weitgehend mit dem erwarteten Stromdichtefeld übereinstimmt. Dieser induzierte Strom erzeugt ein plausibles Temperaturfeld das nur mehr leicht vom erwarteten Feld abweicht. Diese Abweichung kann nun durch eine wiederholte Validierung des Energieeintrages minimiert werden.

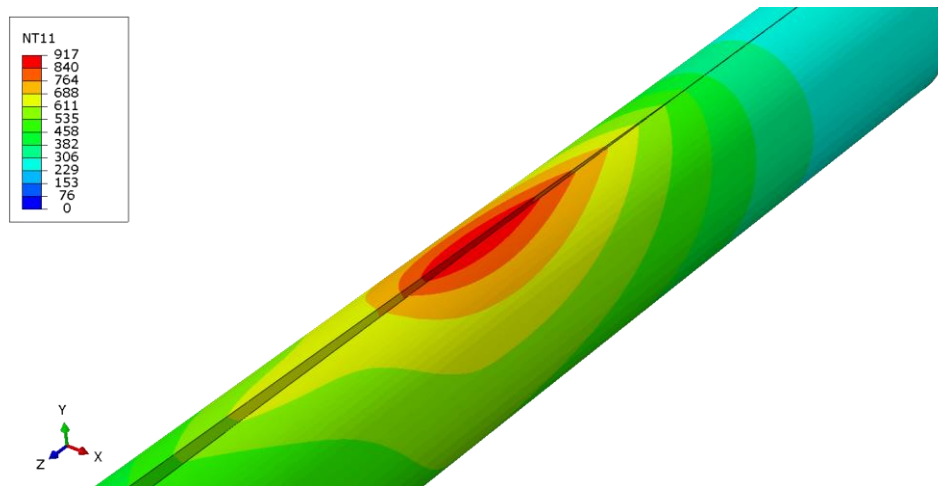


Abbildung 58: Temperaturfeld, Maximaltemperatur 917°C

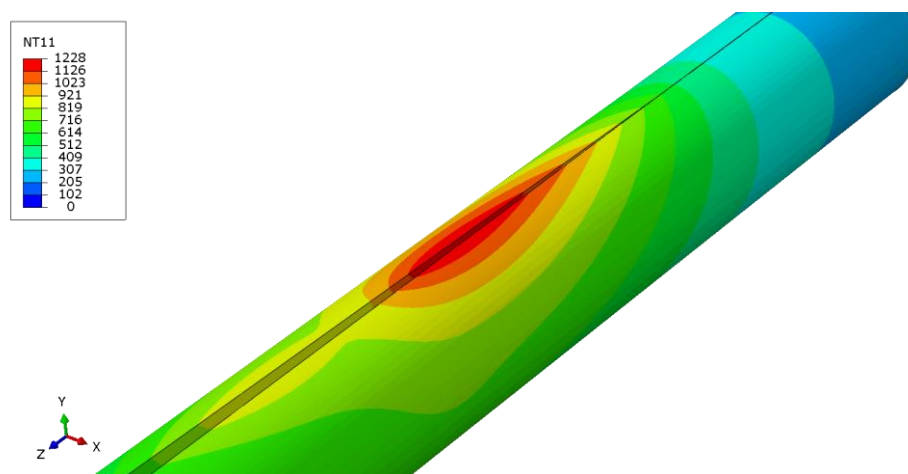


Abbildung 59: Temperaturfeld, Maximaltemperatur 1228°C

Abbildung 58 zeigt ein Temperaturfeld mit einer Maximaltemperatur die unter der erwarteten Temperatur liegt. Die Maximaltemperatur im Spalt sollte knapp unter der Schmelztemperatur liegen. Abbildung 59 zeigt ein Temperaturfeld mit angepasstem Energieeintrag. Konkret wird der Energieeintrag um rund 20% erhöht. Durch Messungen im realen Prozess kann der Energieeintrag damit iterativ geändert werden bis das simulierte Temperaturfeld auch quantitativ mit dem realen Feld übereinstimmt.

Entwicklungsstufe 9:

Die Fließkurven werden experimentell ermittelt. Um einen stabilen Simulationsprozess zu gewährleisten müssen die Kurven bestimmten Kriterien entsprechen. Dazu müssen einige Messwerte geringfügig angepasst werden.

Entwicklungsstufen 10-12:

Kontakte führen in Simulationen mit der finiten Elemente Methode zu hohen Nichtlinearitäten. Hohe Kontaktkräfte und Linienkontakte führen zu sehr schlechter Konvergenz. Kontaktstöße verringern den Zeitschritt soweit, dass eine Ergebnisfindung in überschaubarer Zeit nicht möglich ist. Daher muss der Kontakt stark vereinfacht werden. Konkret wird der Linienkontakt durch Abflachen der Schweißwalzen im Kontaktbereich in einen Flächenkontakt übergeführt. Dies ist in Abbildung 60 ersichtlich. Die Kontaktkraft wird durch schrittweise Anhebung der Kraft über die Zeit minimiert. Zu Beginn der Simulation wird der Kontakt mit einer sehr geringen Kraft an das Rohr angelegt. Damit entfallen Kontaktstöße in der Simulation.

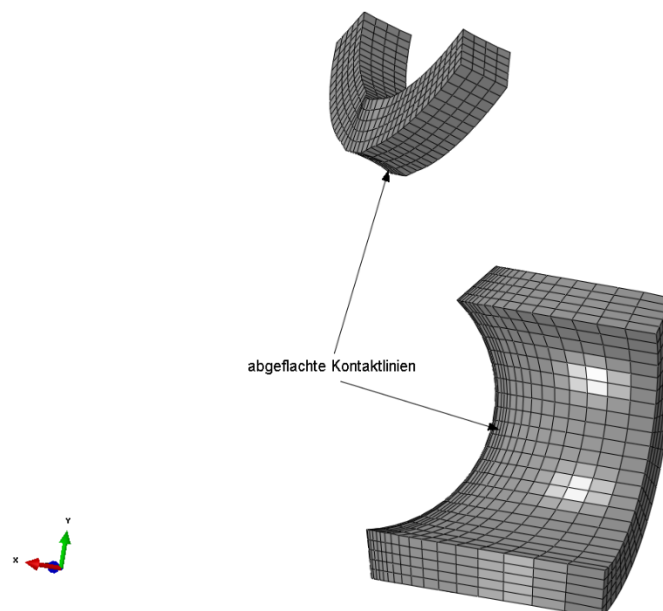


Abbildung 60: Kontaktflächen an den Rollen

Entwicklungsstufe 13:

Die beschriebenen Konvergenzprobleme können nicht behoben werden und führen zur Notwendigkeit das Modell zu abstrahieren oder/und ein anderes Lösungsverfahren zu wählen.

Ein anderes Lösungsverfahren bedeutet in diesem Zusammenhang den Einsatz eines expliziten Verfahrens. Explizite Verfahren sind für große Verformungen und hochdynamische Vorgänge besser geeignet als die verwendete implizite Methode. Für die vorliegende Arbeit kann auf diese Möglichkeit im Zuge der vollständig gekoppelten Simulation nicht zurückgegriffen werden da ein expliziter Löser sehr hohe Rechenleistung erfordert die im Rahmen dieser Arbeit nicht verfügbar ist.

Um die Simulation für das explizite Verfahren zugänglich zu machen bzw. die Konvergenzprobleme des impliziten Verfahrens zu vermeiden wird versucht den Berechnungsvorgang zu abstrahieren.

Abbildung 61 zeigt ein Fließschema der angepassten Simulation. Die größte Veränderung im Vergleich zum ursprünglichen Fließschema in Abbildung 16 ist, dass die komplette physikalische Koppelung durch einzelne Teilschritte ersetzt wird. Die elektromagnetische- und thermische Berechnung sind nach wie vor gekoppelt. Die temperaturabhängigen Materialdaten werden daher weiterhin berücksichtigt. Die mechanische Berechnung erfolgt jedoch im neuen Schema unabhängig von der thermischen Berechnung. Damit können Konvergenzprobleme die aufgrund des hohen Energieeintrages entstehen vermieden werden.

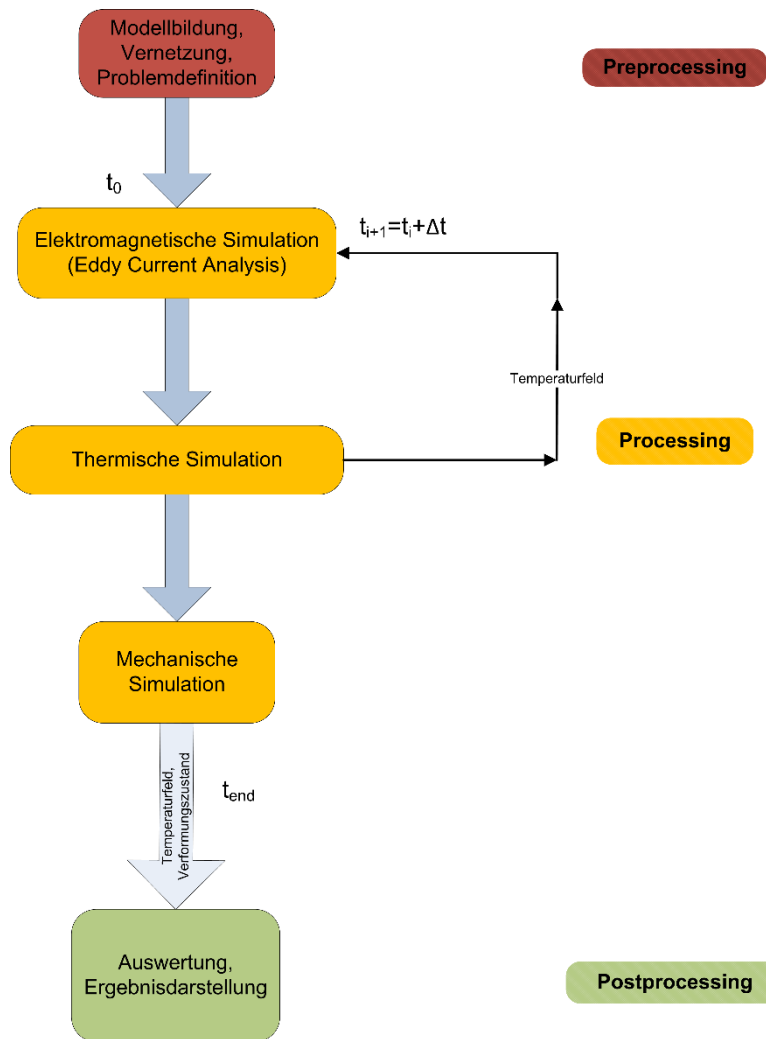


Abbildung 61: angepasste Simulation

Eine weitere Vereinfachung ergibt sich aus den hohen Verformungsgeschwindigkeiten. Die transiente Berechnung führt zu hohen Stauchgeschwindigkeiten. Diese können mit dem implizierten Gleichungslöser nicht berechnet werden. Daher wird die Stauchung statisch simuliert. Diese Abstrahierung führt dazu, dass der Einfluss der Rohrgeschwindigkeit auf die Stauchung nicht abgebildet werden kann. Die Rohrgeschwindigkeit fließt nur mehr in der Aufheizzeit der induktiven Erwärmung ein.

Alternativ wäre wie oben erwähnt die Lösung mit einem expliziten Lösungsverfahren möglich. Im Zuge der Arbeit wird versucht das Modell mit diesem Verfahren zu lösen. Für die zur Verfügung stehende Rechenleistung ist ein sehr hoher Mass-Scaling-Factor notwendig. Die explizite Lösung erfordert ein dynamisches Verhalten welches bei sehr hohem Mass-Scaling zu stark verfälschten Ergebnissen führen kann. Zusätzlich ist die erforderliche Stauchkraft nur mehr schwer abschätzbar. Das explizite Verfahren wird daher im Zuge dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

4.2.2 Auswertung

Die in Abbildung 61 dargestellte Simulation liefert nun die ersten Ergebnisse die als Basis für eine Parameterstudie verwendet werden können. In Tabelle 11 sind die verwendeten Parameter in der Zeile „Rechnung Nr. 1“ dargestellt. Die gesamten dargestellten Ergebnisse werden bei einer Frequenz von 165kHz berechnet. Nachfolgend sind die dazugehörigen Ergebnisbilder dargestellt und beschrieben.

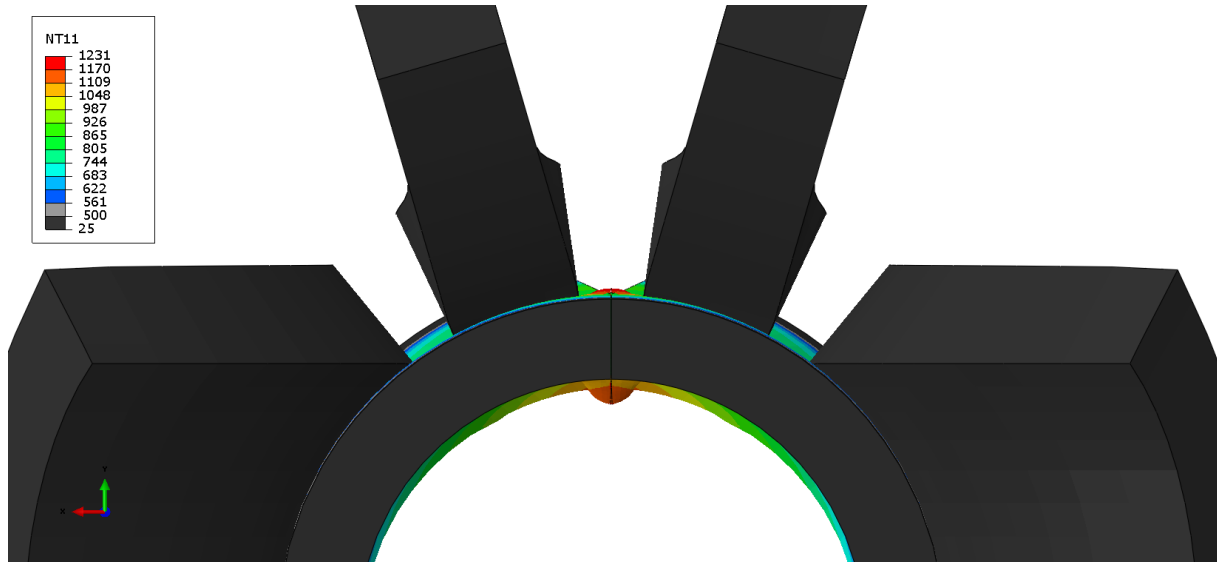


Abbildung 62: Übersicht Gesamtmodell, (gespiegelt)

Abbildung 62 zeigt eine Modellübersicht in der Frontalansicht in Blickrichtung gegen die Schweißrichtung. Dargestellt ist das Temperaturfeld mit den mechanischen Verformungen. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit sind die Ergebnisse gespiegelt. Das bedeutet, dass die Berechnung mit dem zuvor beschriebenen Modell stattfindet und erst in der Auswertung das Modell mit den jeweiligen Ergebnissen um die y-z- Ebene gespiegelt werden. Gut zu sehen ist schon in der Übersicht die Aufstauchung des Materials in der Schweißzone. Zur Ergebnisdarstellung wird durch den Stoßpunkt eine x-y- Schnittebene gelegt, die für alle dargestellten Schnittbilder verwendet wird. Die Schnittebene und die Blickrichtung für die Schnittbilder sind in Abbildung 63 dargestellt.

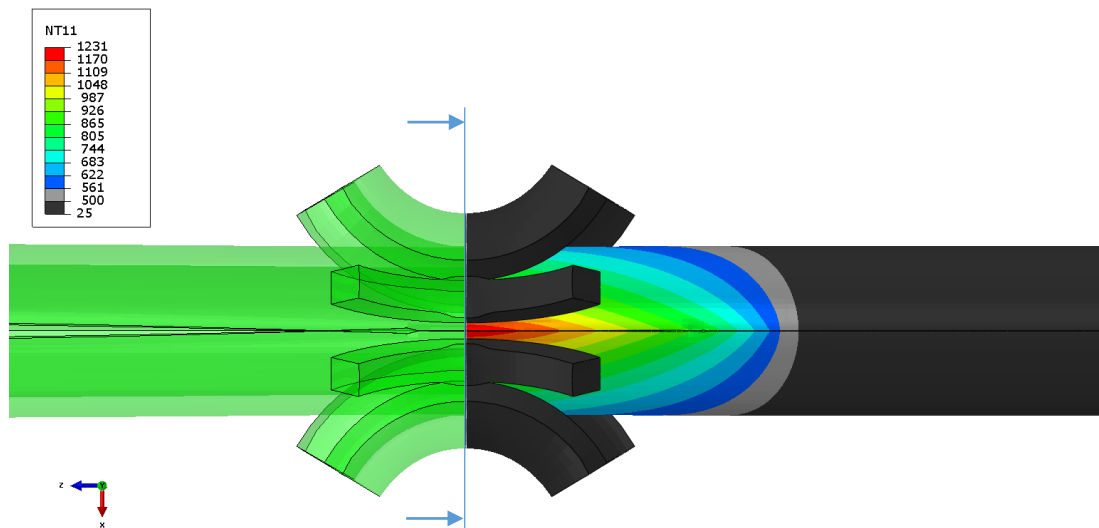


Abbildung 63: Übersicht Modell, Schnittebene durch Schweißpunkt

Abbildung 64 zeigt das Temperaturfeld in der Schnittebene durch den Schweißpunkt. Gleichzeitig ist die Stauchung dargestellt. Die erwartete Stauchzone ist gut ersichtlich.

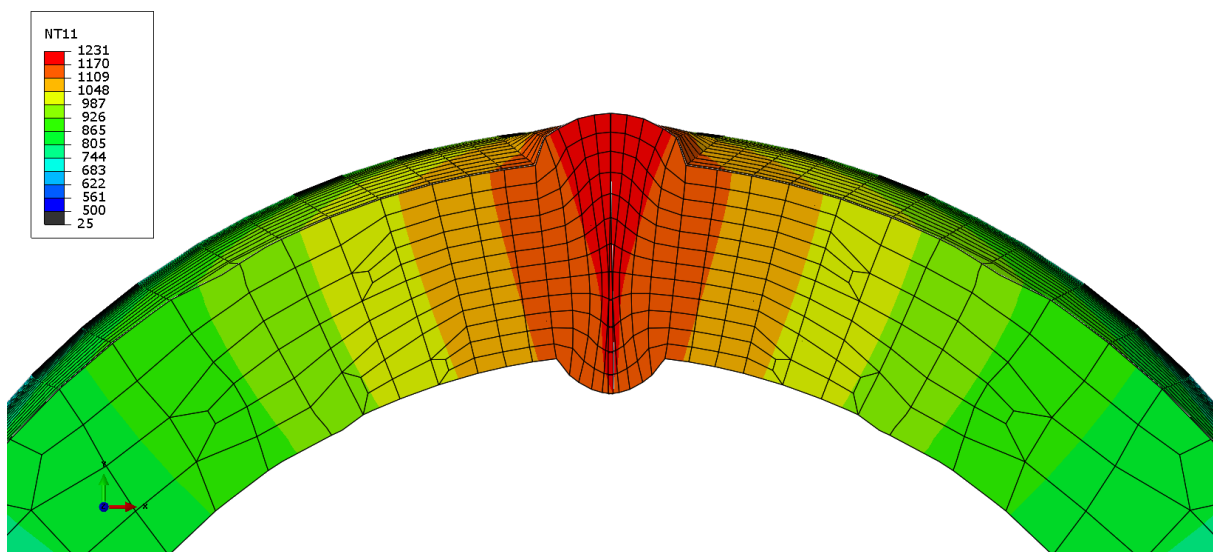


Abbildung 64: Temperaturfeld Stauchzone, verformter Zustand

Das verwendete Materialmodell liefert plausible Ergebnisse. Durch eine Kalibrierung des Materialmodelles mit Messwerten aus dem Prozess würde man die Realität sehr genau abbilden. In Kombination mit Abbildung 65 kann man den Stauchprozess nun genauer betrachten. Wie erwartet wird das Material beim Stauchprozess zu den Rohroberflächen hin verdrängt. Der höchste Wert der plastischen Dehnung tritt dabei im Bereich der Wulstradien und im Kontakt in der Mitte der Stauchzone auf. Die äußersten Bereiche des Wulstes an den Rohroberflächen sind sehr gering belastet da diese am Stauchvorgang nur wenig beteiligt sind.

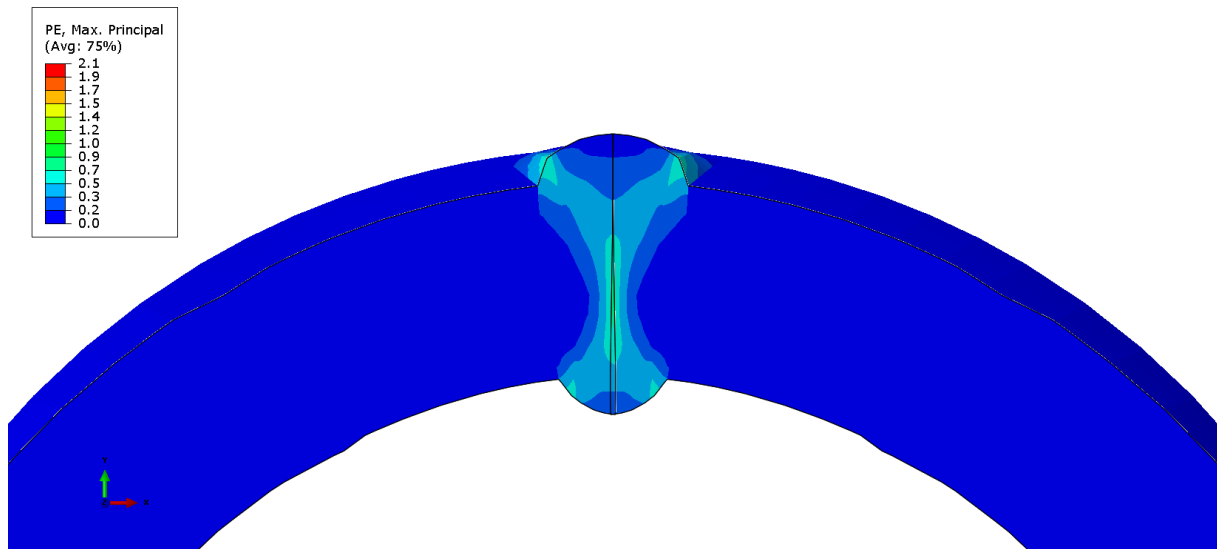


Abbildung 65: Plastische Verformungen in der Stauchzone

Die starke örtliche Stauchung kann mit Abbildung 66 nun gut nachvollzogen werden. Im Bereich des Schweißwulstes herrschen die höchsten Temperaturen. Da die Fließkurven des verwendeten Materials eine sehr starke Temperaturabhängigkeit aufweisen beginnt unmittelbar an den induktiv erwärmten Rohrflanken die Aufstauchung. Die zugehörigen induktiven Effekte sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

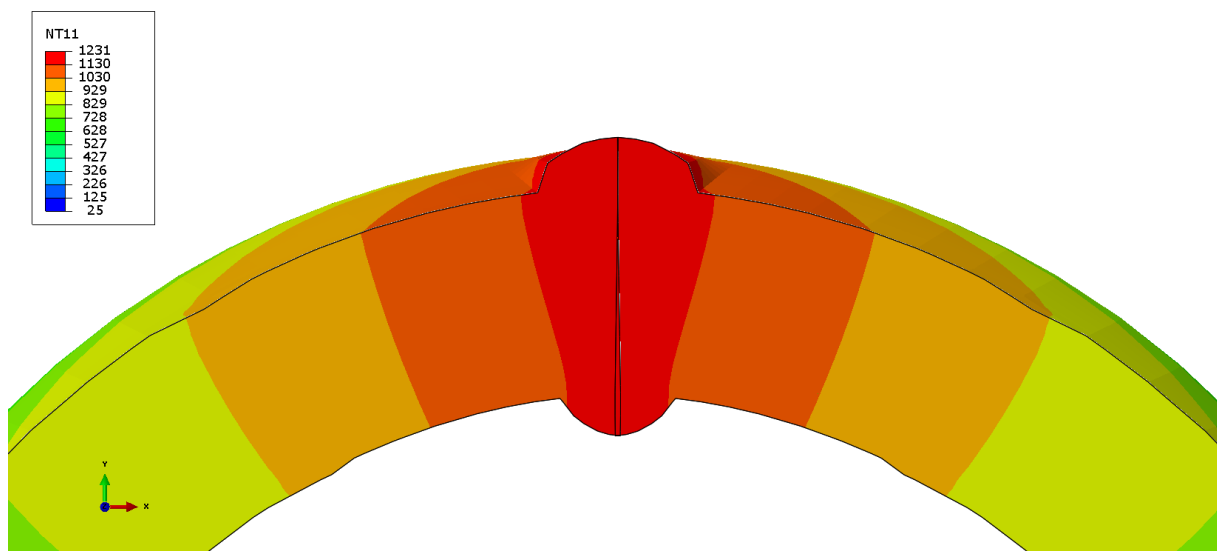


Abbildung 66: Temperaturfeld, Schnittebene im Schweißpunkt

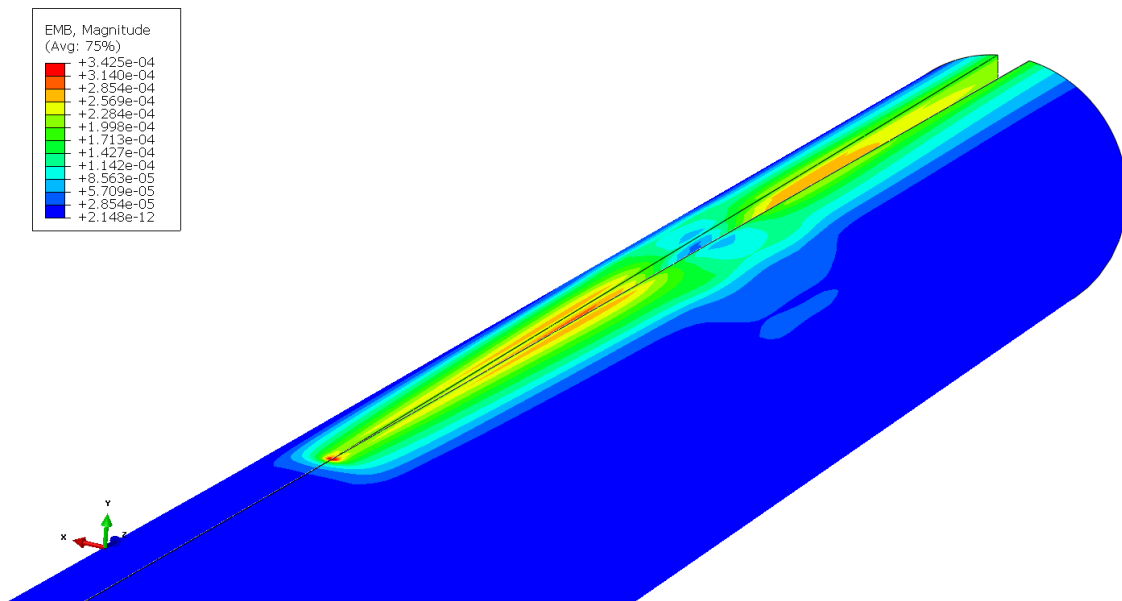


Abbildung 67: B-Feld aus der elektromagnetischen Simulation

Die elektromagnetische Simulation liefert die erforderlichen Eingabewerte für die thermische Berechnung. Das dargestellte B-Feld induziert den erforderlichen Strom für die Joule'sche Erwärmung. Dieses Stromdichtefeld ist in Abbildung 68 dargestellt. Skin-Effekt und Proximity-Effekt zwingen dabei den Strom auf die gewünschten Pfade entlang des Spaltes.

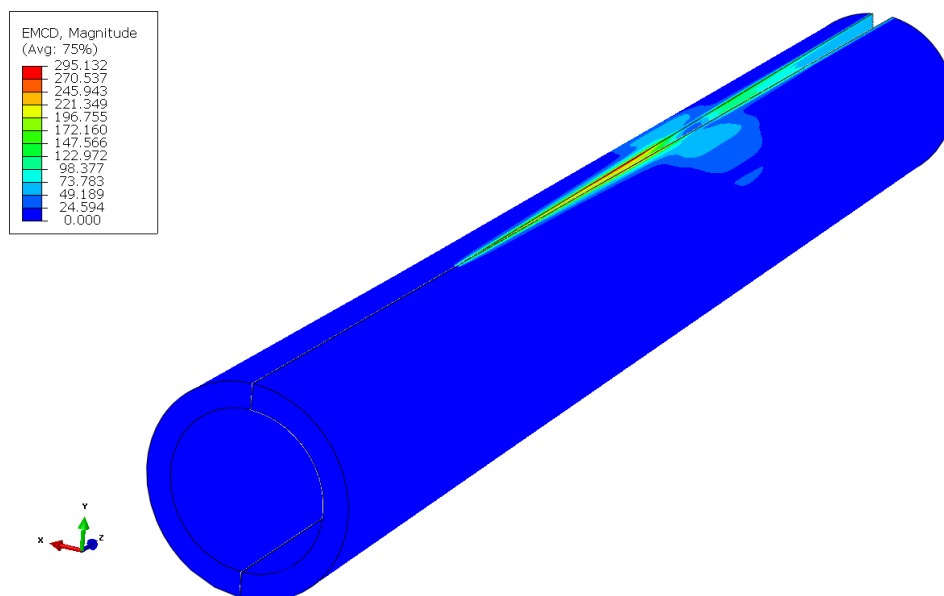


Abbildung 68: Stromdichtefeld aus der elektromagnetischen Simulation

Ausgehend von dieser Basis kann nun begonnen werden Parameteränderungen durchzuführen. Der folgende Abschnitt zeigt Beispiele für Veränderungen und deren Auswirkung auf den Schweißprozess.

4.3 Parameterstudie

Für die Testläufe am Modell werden die Eingabeparameter verändert. Zu Beginn werden die Parameter aus den praktischen Versuchen übernommen (Basis). Mit diesen Einstellungen werden das Modell und der gesamte Simulationsprozess kalibriert. Um den Einfluss der einzelnen Parameter darzustellen wurden diese verändert und deren Wirkung dokumentiert. Aufgrund der Komplexität des gesamten Simulationsprozesses ist die Variation der Parameter nur in einem kleinen Bereich sinnvoll. Für große Änderungen wäre eine Anpassung der Simulation notwendig. In der Praxis ist die Parametervariation nur im Betriebsfenster notwendig wodurch eine breite Änderung der Werte wenig zielführend wäre.

Tabelle 11: Parameterstudie (max. Stromdichte, Presskraft, Geschwindigkeit)

| | | Parameter | | | | | |
|---------------------|----------|--|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|
| | | max. Stromdichte [A/mm²] | Änderung in % | Presskraft [N] | Änderung in % | Geschwindigkeit [m/min] | Änderung in % |
| Rechnung Nr. | 1 | 295,1 | | 15000 | | 45 | Basis |
| | 2 | 295,1 | | 15750 | +5 | 45 | |
| | 3 | 295,1 | | 14250 | -5 | 45 | |
| | 4 | 309,9 | +5 | 15000 | | 45 | |
| | 5 | 280,3 | -5 | 15000 | | 45 | |
| | 6 | 295,1 | | 15000 | | 40,5 | -10 |
| | 7 | 295,1 | | 15000 | | 49,5 | +10 |

Tabelle 11 zeigt die Variation der Parameter. Die Frequenz beträgt für alle Berechnungen 165kHz. Rechnung 1 zeigt die Basisparameter für die Simulation. Um den Einfluss der einzelnen Parameter zu untersuchen, wird ausgehend von den Basiswerten jeweils einer der drei Werte verändert. In Rechnung 2 und 3 wird die Kraft geringfügig geändert. In Rechnung 4 und 5 wird die zugeführte Induktionsenergie verändert. In Rechnung 6 und 7 wird die Schweißgeschwindigkeit geändert. Die anderen beiden Parameter bleiben jeweils am Basiswert. Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Rechnungen miteinander verglichen. Für die Variation von Schweißgeschwindigkeit und maximaler Stromdichte wird jeweils nur das Temperaturfeld verglichen. Die nachfolgende mechanische Berechnung wird aufgrund des großen Berechnungsaufwandes nicht durchgeführt. Eine vollständige Berechnung wie in Abbildung 61 dargestellt wird somit nur für die Basis und die Rechnungen 1 und 2 durchgeführt. Für die restlichen Parameteränderungen endet die Berechnung nach der thermischen Simulation.

4.3.1 Variation der Presskraft

Der Vergleich der Verschiebungen macht den Materialfluss in der Stauchzone deutlich.

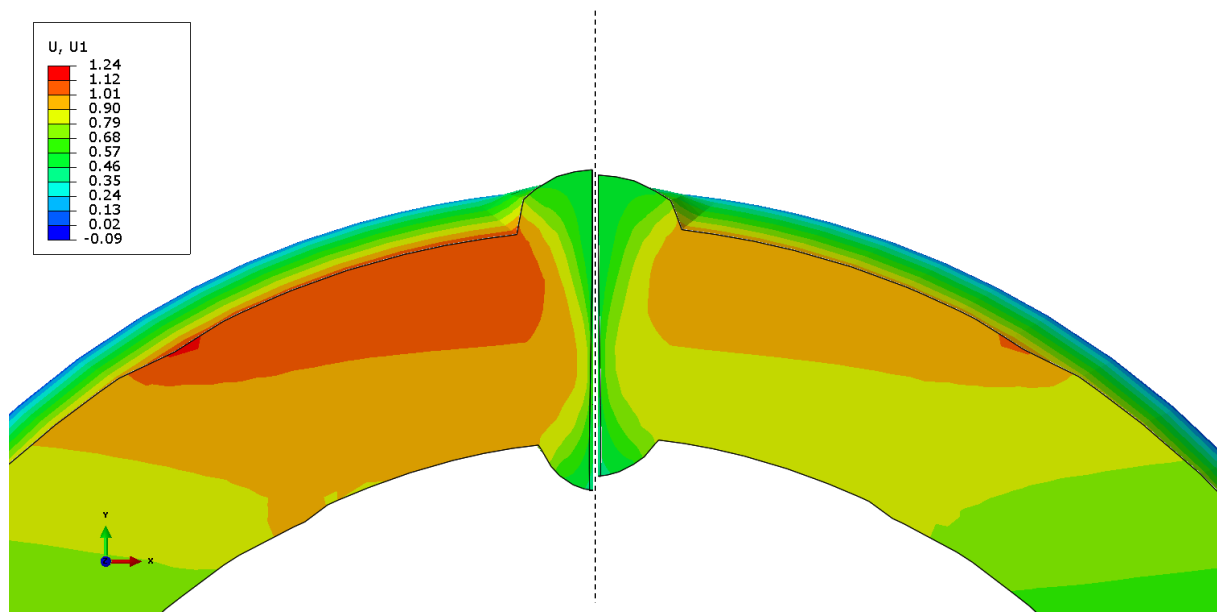


Abbildung 69: Verschiebung in x-Richtung, Vergleich, links: Rechnung 2, rechts: Rechnung 3

Abbildung 69 zeigt den Materialfluss in x - Richtung. Dabei fällt auf, dass die Stauchung zur Rohraußenseite hin überwiegt.

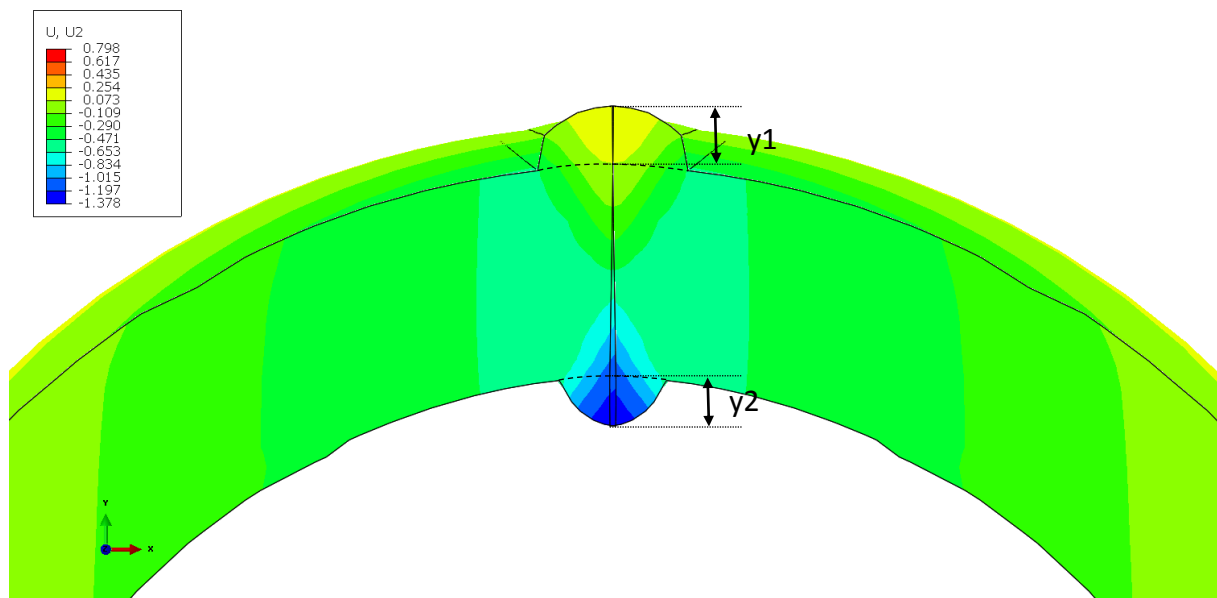


Abbildung 70: Bemaßung der Vergleiche

Die in Abbildung 70 ersichtliche, leicht überlappende Trennlinie, in der Mitte der Schweißung, entsteht einerseits durch die minimale Verschiebung des Gesamtmodells im Bezug auf das Koordinatensystem. Dadurch erzeugt die Spiegelung der Ergebnisse kleine

Durchdringungen. Andererseits erzeugt der Kontaktalgorithmus leichte Durchdringungen der simulierten symmetrischen Rohrhälfte mit den starren Elementen. Diese Durchdringungen könnten durch Anpassungen im Modell eventuell eliminiert werden. Abbildung 71 vergleicht die Verschiebungen in y – Richtung bei Variation der Presskraft. Deutlich zu sehen ist der Einfluss der Presskraft auf die Ausbildung des Schweißwulstes. An der Rohrinneenseite sowie an der Rohraußenseite kann eine Veränderung festgestellt werden. Tabelle 12 zeigt die in Abbildung 70 dargestellten Abmessungen der beiden Rechnungen mit der Basisvariante im Vergleich. Der Einfluss der Presskraft auf die Größe der Schweißwulst ist sehr groß. Geringe Änderungen der Kraft führen zu sehr unterschiedlichen Ausbildungen der Schweißnaht.

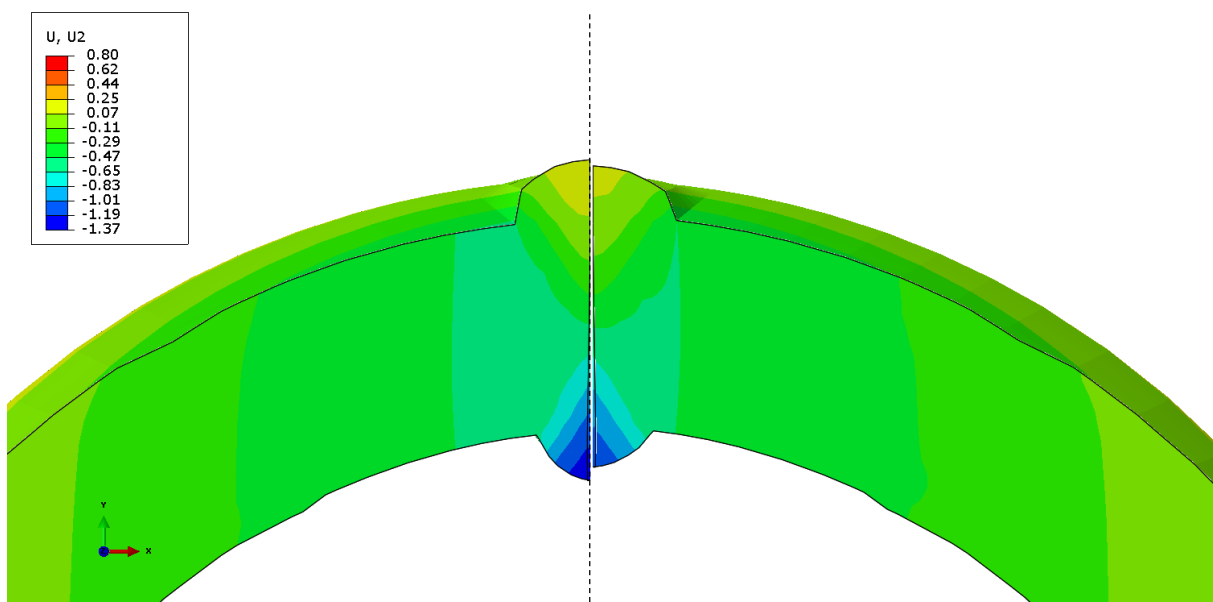


Abbildung 71: Verschiebung in y -Richtung, Vergleich, links: Rechnung 2, rechts: Rechnung 3

Tabelle 12: Vergleich der Aufstauchung

| Stauchkraft | y1 | y2 |
|------------------------|----------|----------|
| Basis +5% (Rechnung 2) | 0,740 mm | 0,794 mm |
| Basis (Rechnung 1) | 0,667 mm | 0,727 mm |
| Basis -5% (Rechnung 3) | 0,595 mm | 0,662 mm |

Im nachfolgenden Diagramm sind die Abmessungen der Aufstauchung grafisch dargestellt. Der Verlauf der Kurven deutet auf einen linearen Zusammenhang in diesem Parameterfenster hin.

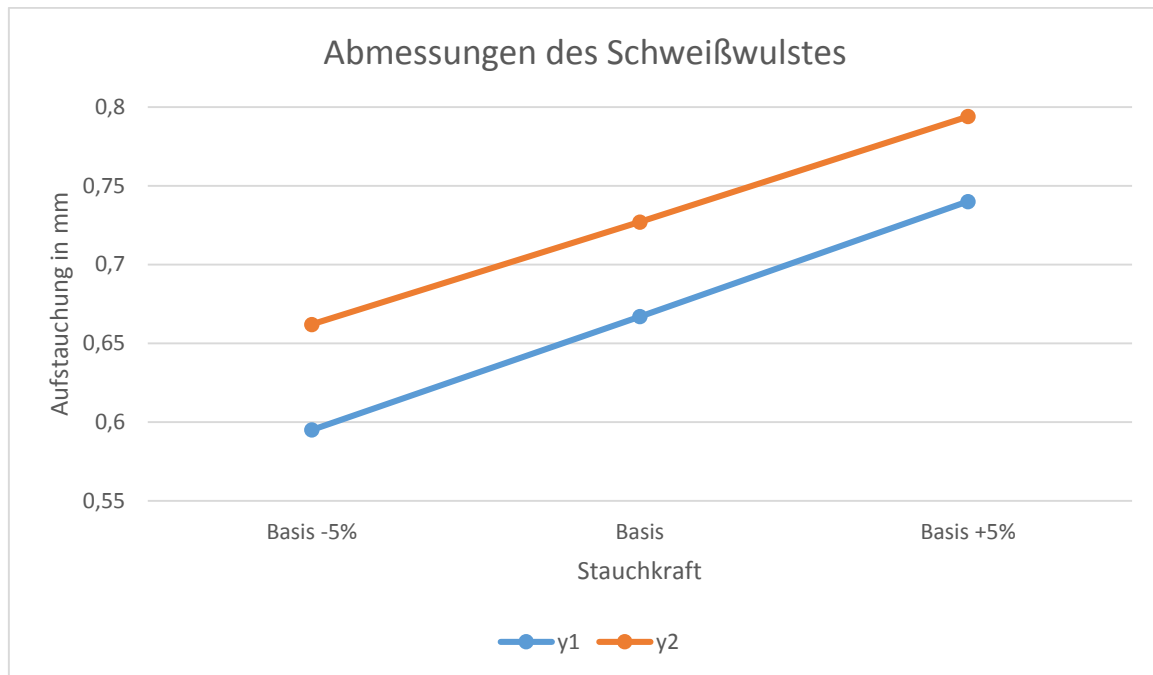


Abbildung 72: Auswertung Stauchkraft

4.3.2 Variation der Stromdichte

Wie zu Beginn des Kapitels beschrieben, werden für die Änderung der Stromdichte die Temperaturfelder verglichen. Die Stromdichte im Werkstück kann durch die Veränderung der Materialdaten und den Energieeintrag variiert werden. In der dargestellten Variation wird der Energieeintrag so verändert, dass die induzierte Stromdichte die in Tabelle 11 dargestellten Werte annimmt. Zur besseren Darstellung wird dabei die Ausbreitung in Rohrlängsrichtung der 1000°C Isotherme bemaßt. Zusätzlich wird jeweils die maximale Temperatur dargestellt.

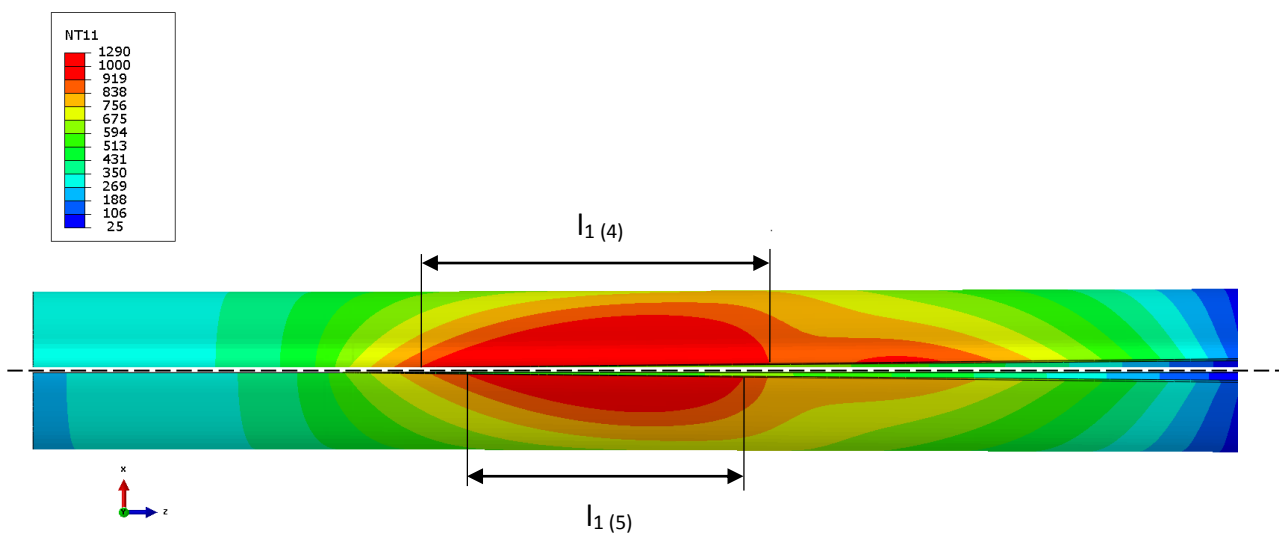


Abbildung 73: Temperaturfeld Vergleich, oben: Rechnung 4, unten Rechnung 5

Die Änderung der induzierten Stromdichte hat einen großen Einfluss auf die Ausbildung des Temperaturfeldes. Es ändert sich nicht nur die Maximaltemperatur sondern auch die Form des Feldes.

Tabelle 13: Maximaltemperaturen und Längen der Isothermen bei Stromdichtevariation

| | max. Stromdichte | max. Temperatur | Länge l_1 |
|------------------------|------------------|-----------------|-------------|
| Basis +5% (Rechnung 4) | 309,9 A/mm | 1290°C | 56 mm |
| Basis (Rechnung 1) | 295,1 A/mm | 1231 °C | 50 mm |
| Basis -5% (Rechnung 5) | 280,3 A/mm | 1164 °C | 45 mm |

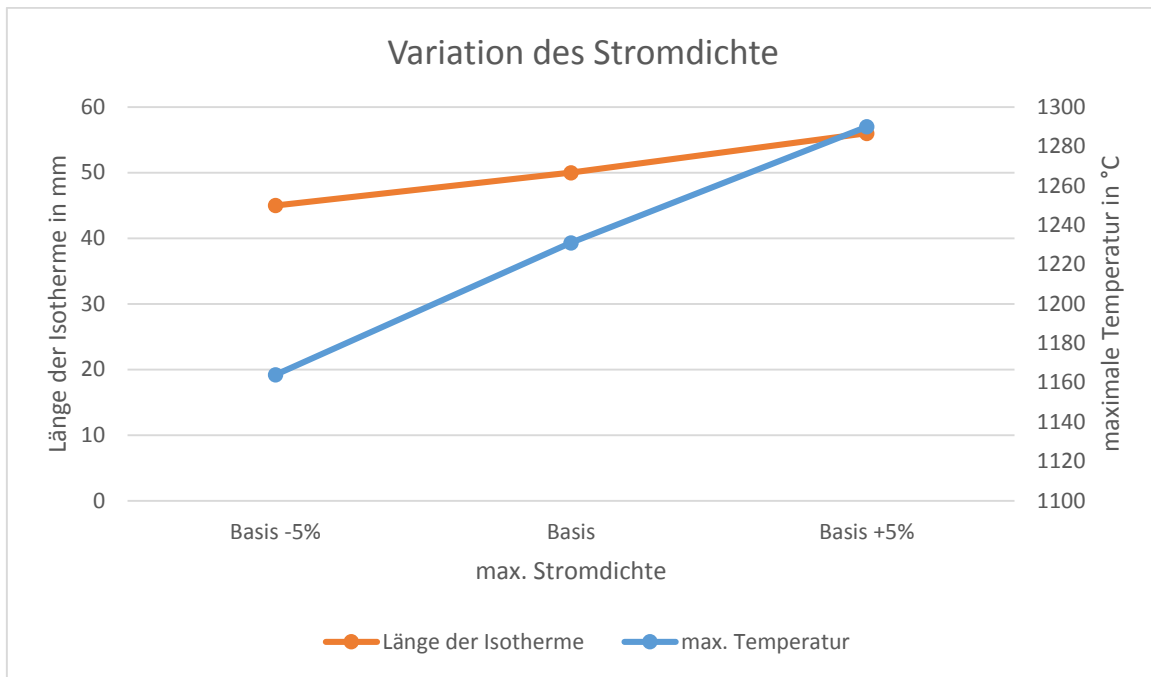


Abbildung 74: Variation der Stromdichte

4.3.3 Variation der Schweißgeschwindigkeit

Die Variation der Schweißgeschwindigkeit führt dazu, dass das Rohr unterschiedlich lang in der Induktionszone verweilt. Bei niedriger Geschwindigkeit kann durch die längere Verweildauer mehr Energie eingebracht werden. Bei höherer Geschwindigkeit ist ein niedrigerer Energieeintrag durch Induktion in das Werkstück zu erwarten.

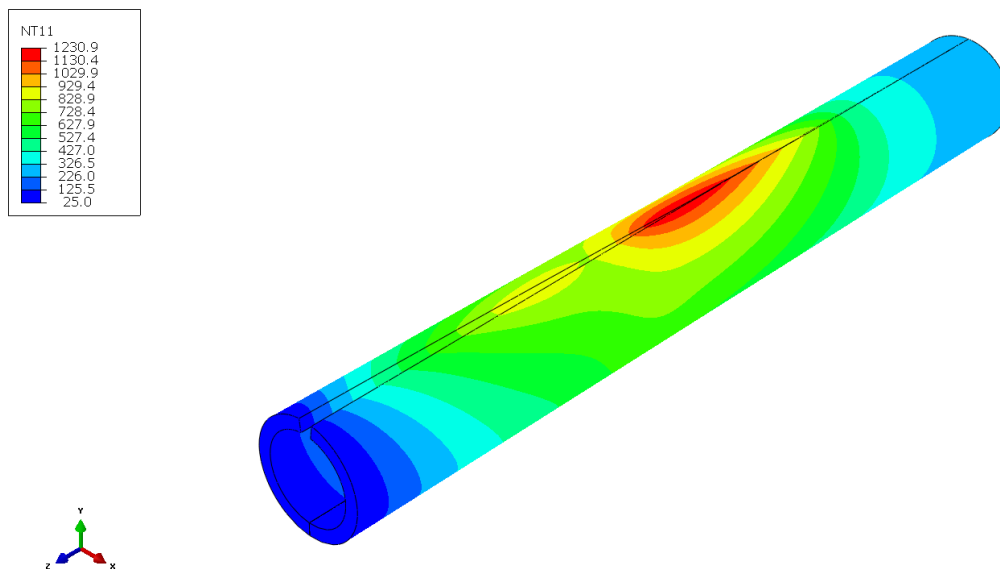


Abbildung 75: Temperaturfeld aus der thermomechanischen Berechnung, Rechnung 6

Abbildung 75 und Abbildung 76 bilden die Änderung der Geschwindigkeit ab. Die geringe Parameteränderung führt zu keinen signifikanten Veränderungen des Temperaturfeldes. Tabelle 14 zeigt den Vergleich der Ausdehnung in Längsrichtung der 1200°C Isotherme auf dem Werkstück bei den verschiedenen Geschwindigkeiten. Der Vergleich zeigt, dass die Geschwindigkeitsänderung im betrachteten Parameterfenster keine signifikante Auswirkung auf die induktive Erwärmung hat. Die Maximaltemperatur in der Schweißzone ändert sich nur minimal und die Änderung der Ausdehnung der Isotherme bewegt sich im Millimeterbereich.

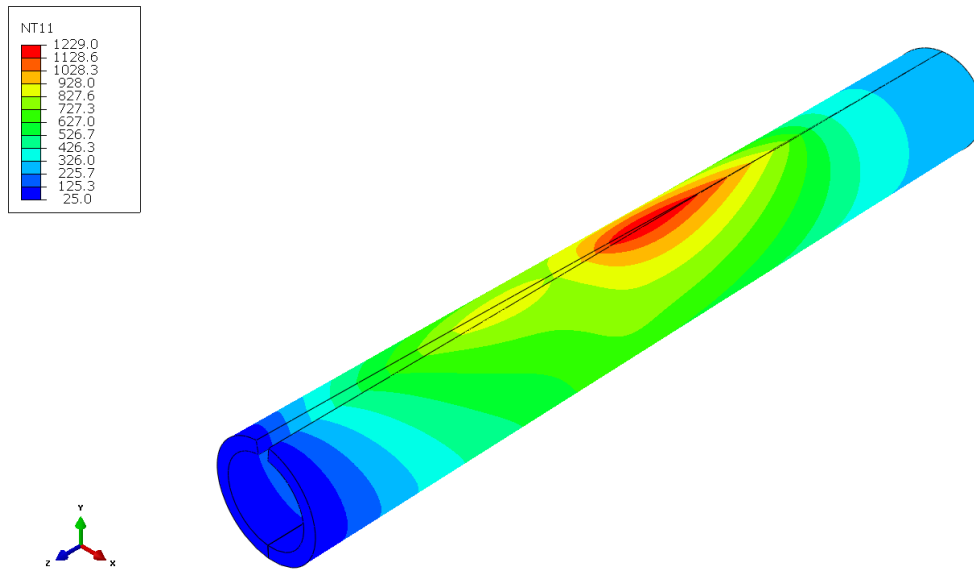
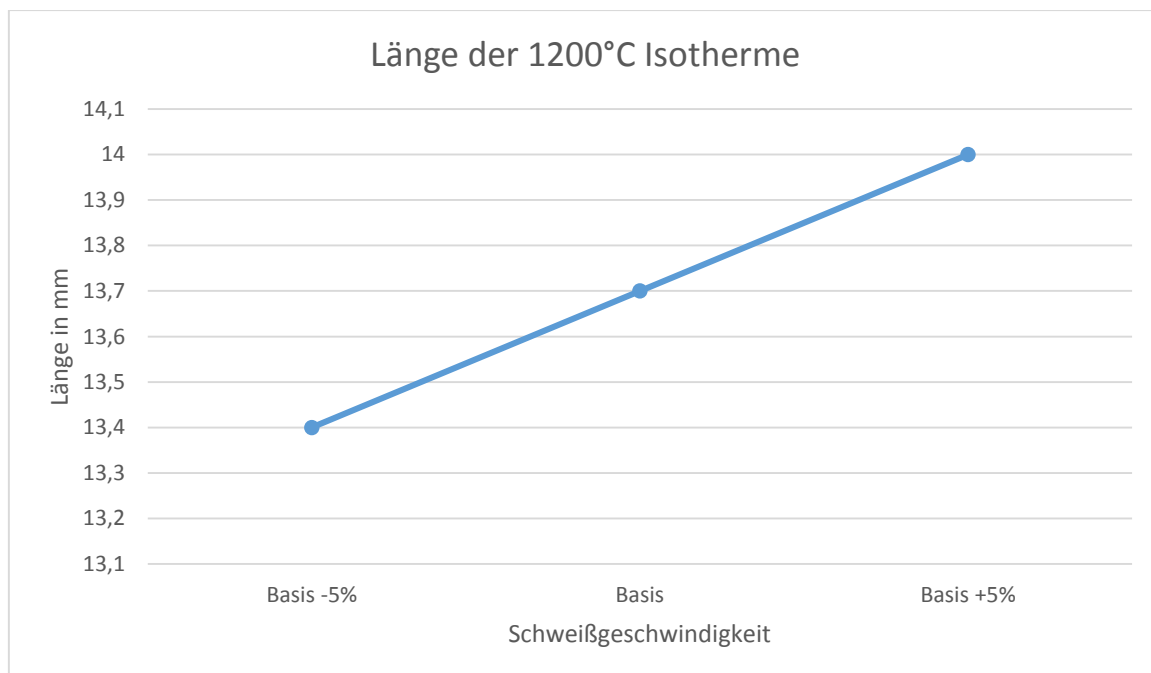


Abbildung 76: Temperaturfeld aus der thermomechanischen Berechnung, Rechnung 7

Tabelle 14: Ausbreitung in z-Richtung der 1200°C Isotherme

| | Geschwindigkeit | Länge l_1 | max. Temperatur |
|-------------------------|-----------------|-------------|-----------------|
| Basis +10% (Rechnung 6) | 40,5 m/min | 14 mm | 1231°C |
| Basis (Rechnung 1) | 45 m/min | 13,7 mm | 1230°C |
| Basis -10% (Rechnung 7) | 49,5 m/min | 13,4 mm | 1229°C |



5 Zusammenfassung und Erkenntnis

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Modells mit dem die physikalischen Vorgänge des Hochfrequenz Rohrschweißprozesses abgebildet werden können. Die Verifizierung des Modells und insbesondere die Parameterstudien zeigen, dass das erarbeitete Modell gute Näherungen an den realen Prozess liefert. Durch die sehr komplexen physikalischen Zusammenhänge benötigt die gesamte Simulation relativ viel Rechenleistung. Dadurch sind der Detailierung und Validierung des Modells, je nach verfügbarer Infrastruktur, Grenzen gesetzt. Die eingebrachten Modellanpassungen führen zu einem Simulationsprozess der einen Kompromiss zwischen akzeptablem Berechnungsaufwand und einer guten Abbildung des realen Schweißvorganges darstellt.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass der untersuchte Schweißprozess vollständig nachvollzogen werden kann. Allerdings sind für die Überprüfung der Ergebnisse noch weitere umfangreiche Validierungsmaßnahmen notwendig. Konkret sollten vor allem der Energieeintrag in das Werkstück und die Ausbildung der Wärmeeinflusszone genauer betrachtet und durch Messungen überprüft werden.

Die Parameterstudie gibt Aufschluss über die Sensibilität der Schweißung auf Änderungen der Prozessparameter. Es zeigt sich zum Beispiel, dass Geschwindigkeitsänderungen einen viel geringeren Einfluss auf die Schweißung haben, als Änderungen der Stauchkraft. Daraus kann man auf die besonders sensiblen Parameter schließen.

6 Ausblick

Grundsätzlich stellt die vorliegende Simulation ein adäquates Modell zur Abschätzung des Temperaturfeldes und des Nahtaussehens beim Hochfrequenzschweißen dar. Außerdem können Einflüsse von Parameteränderungen studiert werden. Die Arbeit stellt jedoch kein „komplettes“ Modell dar. Alleine durch die Vergrößerung des Modells und höhere Rechenleistung könnte ein viel detaillierteres Abbild der Realität erzeugt werden. Für die vorliegende Simulation seien hier nur einige Vorschläge zur Weiterentwicklung der Simulation erwähnt:

Kalibrieren der Simulation

Mit der finiten Elemente Simulation wird versucht die realen physikalischen Vorgänge möglichst genau abzubilden. Es ist natürlich nicht möglich alle Effekte in ein überschaubares Modell zu integrieren. Wichtig ist es, den Prozess so darzustellen, dass die quantitative Reaktion auf verschiedene Parameteränderungen mit der Realität übereinstimmt. Dies kann nur erreicht werden wenn die Simulation mit dem realen Prozess verglichen wird und mögliche Abweichungen durch Anpassungen im Simulationsprozess ausgeglichen werden. Für den vorliegenden Prozess wäre es wichtig vor allem das reale Temperaturfeld und die Stauchzone genau zu untersuchen.

Parameteranpassung für verschieden Maschinenkonfigurationen

Um das vorliegende Werkzeug für verschiedene Maschinenkonfigurationen einsetzen zu können, müssen die Änderungen in Geometrie und Betriebsparametern in das Modell übergeführt werden. Damit könnte man verschiedene Rohrdurchmesser und Wandstärken in eine Parameterstudie aufnehmen und deren Einfluss bewerten.

Impederkühlung miteinbeziehen

Die Impederkühlung ist ein wichtiger Aspekt im Wärmehaushalt des HF-Schweißprozesses. In dieser Arbeit wurde die Impederkühlung nicht berücksichtigt. Die Wärmeabfuhr an der Rohrinneinnenseite wurde wie an der Rohraußenseite mit Wärmeleitung berücksichtigt. Die Temperaturverteilung im Impeder könnte durch eine Simulation der Kühlung abgebildet werden.

Einformvorgang berücksichtigen

Der gesamte Einformvorgang des Blechs kann durch ein Erweitern des Modelles hinzugefügt werden. Dabei können insbesondere Spannungszustände aus der Umformung berücksichtigt werden, die Einfluss auf das resultierende Spannungsfeld nach der Schweißung haben. Für diese Erweiterung wären jedoch sehr große Rechenleistungen notwendig, da das Modell wesentlich umfangreicher wäre.

Gesamtkoppelung vervollständigen

In Anlehnung an die in der Arbeit vorgestellte physikalische Koppelung des Prozesses kann durch Anwendung geeigneter Berechnungsverfahren und Bereitstellung der erforderlichen Rechenleistung die angestrebte Koppelung durchgeführt werden. Dafür geeignet sind insbesondere Verknüpfungen zwischen impliziten Verfahren für die elektrothermische Koppelung und expliziten Verfahren für den Stauchprozess. Dadurch können auch die Einflüsse der Rohrgeschwindigkeit auf die Temperaturrechnung mitberücksichtigt werden.

Umwandlungsverhalten untersuchen

In der vorliegenden Arbeit wird die Abkühlung des Materials nach der Schweißzone nicht untersucht. Durch Implementierung eines benutzerdefinierten Materialmodells könnten passende ZTU oder SZTU Kurven berücksichtigt werden und direkt auf die Gefügezusammensetzung geschlossen werden. Für einzelne interessante Punkte im Bauteil könnte diese Untersuchung auch mit den Temperaturverläufen von einzelnen Knotenpunkten erzielt werden indem die simulierten Abkühlkurven mit dem SZTU-Schaubild verglichen werden.

Materialfluss untersuchen

Das Fließverhalten in der Schweißnaht kann mit sogenannten Tracer-Partikeln untersucht werden. Dabei kann der Materialtransport dargestellt werden um Aussagen über die Entstehung der Schweißwulst treffen zu können.

Simulationssoftware

Im Bereich der finiten Elemente Methode gibt es eine Fülle von verschiedenen Programmpaketen die auf unterschiedlichste Anwendungen spezialisiert sind. Eine umfassende Studie der angebotenen Softwarelösungen könnte Programme aufzeigen die

besser geeignet sind den vorliegenden Prozess zu untersuchen. Als Beispiel wäre hier die Software „LS-Dyna“ zu nennen. Diese bietet die Möglichkeit der physikalischen Koppelung mit einem expliziten Gleichungslöser.

7 Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Vorgehensweise | 4 |
| Abbildung 2: Prinzipskizze zum induktiven Längsnahtrohrschweißen (Fa. Jansen) | 6 |
| Abbildung 3: schematischer Gesamtprozess mit Abmessungen (Fa. Jansen) | 7 |
| Abbildung 4: realer Prozess, Prozess mit Toprollen (Fa. Jansen)..... | 8 |
| Abbildung 5: Skineffekt, (a) Stromverdrängung durch Wirbelströme (b) Feldverdrängung im magnetischen Leiter [15] | 12 |
| Abbildung 6: äquivalente Schichtdicke | 13 |
| Abbildung 7: Proximity Effekt [10]..... | 14 |
| Abbildung 8: Hystereseschleife [9]..... | 14 |
| Abbildung 9 Bandbreite der Wärmestrahlung [14]: | 17 |
| Abbildung 10: Prozess ohne Impeder | 20 |
| Abbildung 11: Strompfade mit und ohne Impeder [17] | 21 |
| Abbildung 12: Schweißwalzen und Toprollen (Fa. Jansen) | 21 |
| Abbildung 13: kritische Schweißfrequenz über Schweißgeschwindigkeit [2] | 23 |
| Abbildung 14: kritische Schweißgeschwindigkeit über Rohrdurchmesser [2]..... | 24 |
| Abbildung 15: Breite der Wärmeeinflusszone (HAZ) und Temperatur über Frequenz [14].... | 25 |
| Abbildung 16: Fließschema der Simulation..... | 28 |
| Abbildung 17: Generatorfrequenz (Fa. Jansen) | 31 |
| Abbildung 18: Generatorleistung (Fa. Jansen)..... | 31 |
| Abbildung 19: Generatorleistung über Anpresskraft (Fa. Jansen)..... | 32 |
| Abbildung 20: Generatorspannung (Fa. Jansen) | 32 |
| Abbildung 21: Schweißgeschwindigkeit (Fa. Jansen) | 33 |
| Abbildung 22: Kraft auf Schweißwalzen (Fa. Jansen)..... | 33 |
| Abbildung 23: Schliffbild zur Korngrößenbestimmung | 34 |
| Abbildung 24: Auszug aus den Fließkurven | 35 |
| Abbildung 25: temperaturabhängiger E-Modul und Poissonzahl..... | 36 |
| Abbildung 26: Dichte und Wärmeleitfähigkeit..... | 37 |
| Abbildung 27: spezifische Wärmekapazität | 37 |
| Abbildung 28: Elektrische Leitfähigkeit und relative magnetische Permeabilität | 38 |
| Abbildung 29: Geometrie der Induktionsspule(Wettstein) | 39 |
| Abbildung 30: Rohr 22x2,95, S460HC, Position 1 und 2 | 40 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 31: Rohr 22x2,95, S460HC, Position 2 und Übergangsmarkierung | 40 |
| Abbildung 32: Rohr 22x2,95, S460HC, Übergangsmarkierung und Postition 3 | 41 |
| Abbildung 33: Rohr 22x2,95, S460HC, Schliffbild Position 2..... | 41 |
| Abbildung 34: Rohr 22x2,95, S460HC, Schliffbild Position 3..... | 41 |
| Abbildung 35: Rohr 22x2,95, S460HC, Schliffbild Position 1..... | 41 |
| Abbildung 36: Rohr 33x3, S355, Makroschliff | 41 |
| Abbildung 37: elektromagnetisches Modell | 44 |
| Abbildung 38: elektromagnetisches Modell ohne umgebendes Medium | 45 |
| Abbildung 39: Oberflächen für Randbedingungen | 46 |
| Abbildung 40: antimetrische Spiegelung durch homogene Dirichlet Bedingung [20] | 46 |
| Abbildung 41: Simulationsbereich und Ränder bei Berechnung des mag. Vektorpotenzials[11] | 47 |
| Abbildung 42: induzierter Strom und maximale Temperatur, (Schweißgeschwindigkeit 18m/min) [14] | 48 |
| Abbildung 43: Thermomechanisches Modell..... | 50 |
| Abbildung 44: Randbedingungen, Explosionsdarstellung..... | 52 |
| Abbildung 45: Koordiantensysteme | 53 |
| Abbildung 46: Verlauf des Stauchdrucks über die Zeit | 54 |
| Abbildung 47: mechanischer Kontakt "Weicher Kontakt" [5]..... | 55 |
| Abbildung 48:mechanischer Kontakt "Harter Kontakt" [5] | 55 |
| Abbildung 49: Coulomb'sches Reibmodell [16] | 55 |
| Abbildung 50: kritische Schubspannung im Kontakt [5] | 56 |
| Abbildung 51: Kontakte (Explosionsdarstellung) | 56 |
| Abbildung 52: Spannungs - Dehnungs Diagramm (schematisch) | 58 |
| Abbildung 53: Stromdichtefeld [14]..... | 61 |
| Abbildung 54: Stromdichtefeld aus der Simulation | 62 |
| Abbildung 55: Makroschliffbild der Rohrprobe | 63 |
| Abbildung 56: Ausschnitt aus der Schweißzone, f=165kHz, Temperaturfeld..... | 63 |
| Abbildung 57: Wärmeeinflusszone bei verschiedenen Schweißfrequenzen [14] | 64 |
| Abbildung 58: Temperaturfeld, Maximaltemperatur 917°C..... | 68 |
| Abbildung 59: Temperaturfeld, Maximaltemperatur 1228°C..... | 68 |
| Abbildung 60: Kontaktflächen an den Rollen..... | 69 |
| Abbildung 61: angepasste Simulation | 71 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 62: Übersicht Gesamtmodell, (gespiegelt) | 72 |
| Abbildung 63: Übersicht Modell, Schnittebene durch Schweißpunkt | 73 |
| Abbildung 64: Temperaturfeld Stauchzone, verformter Zustand..... | 73 |
| Abbildung 65: Plastische Verformungen in der Stauchzone..... | 74 |
| Abbildung 66: Teperaturfeld, Schnittebene im Schweißpunkt..... | 74 |
| Abbildung 67: B-Feld aus der elektromagnetischen Simulation | 75 |
| Abbildung 68: Stromdichtefeld aus der elektromagnetischen Simulation | 75 |
| Abbildung 69: Verschiebung in x-Richtung, Vergleich, links: Rechnung 2, rechts: Rechnung 3..... | 77 |
| Abbildung 70: Bemaßung der Vergleiche..... | 77 |
| Abbildung 71: Verschiebung in y-Richtung, Vergleich, links: Rechnung 2, rechts: Rechnung 3 | 78 |
| Abbildung 72: Auswertung Stauchkraft | 79 |
| Abbildung 73: Temperaturfeld Vergleich, oben: Rechnung 4, unten Rechnung 5 | 80 |
| Abbildung 74: Variation der Stromdichte | 81 |
| Abbildung 75: Temperaturfeld aus der thermomechanischen Berechnung, Rechnung 6 | 82 |
| Abbildung 76: Temperaturfeld aus der thermomechanischen Berechnung, Rechnung 7 | 83 |

8 Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Typische HF-Schweißparameter [1]..... | 9 |
| Tabelle 2: Einsatzbereiche [1] | 24 |
| Tabelle 3: Abhängigkeiten der Parameter | 30 |
| Tabelle 4: chemische Zusammensetzung S355..... | 33 |
| Tabelle 5: Korngrößen | 34 |
| Tabelle 6: Elemente, elektromagnetische Simulation | 45 |
| Tabelle 7: Elemente, thermomechanische Simulation | 51 |
| Tabelle 8: Einheitensystem | 59 |
| Tabelle 9: verwendete Einheiten | 60 |
| Tabelle 10: Entwicklungsstufen(RB..Randbedingungen, MD...Materialdefinition) | 66 |
| Tabelle 11: Parameterstudie (max. Stromdichte, Presskraft, Geschwindigkeit) | 76 |
| Tabelle 12: Vergleich der Aufstauchung | 78 |
| Tabelle 13: Maximaltemperaturen und Längen der Isothermen bei Stromdichtevariation ... | 80 |
| Tabelle 14: Ausbreitung in z-Richtung der 1200°C Isotherme | 83 |

9 Literaturverzeichnis

- [1] Lienert, T.J., 2011, "Welding fundamentals and processes".
- [2] Scott, P. F., and Smith, W., 1996, "Key Parameters of High Frequency Welding," Tube International, 15pp. 147-152.
- [3] Kim, H., und Youn, S., 2008, "Three Dimensional Analysis of High Frequency Induction Welding of Steel Pipes with Impeder," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 130(3) pp. 0310051-0310057.
- [4] Han, Y., und Yu, E. L., 2012, "Numerical Analysis of a High-Frequency Induction Welded Pipe," Welding Journal, 91(10) pp. 270s-277s.
- [5] Fahrenwaldt, H. J., und Schuler, V., 2012, "Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung".
- [6] Ambrell, L., 2014, "About Induction Heating" 2014(08/2014) .
- [7] Hering, E., Stohrer, M., und Martin, R., 2009, "Taschenbuch der Mathematik und Physik" Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [8] Dughiero, F., Forzan, M., Garbin, M., 2011, No.5, "A 3D Numerical FEM Model for the Simulation of Induction Welding of Tubes" COMPEL - the International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 30(5) pp. 1570-1581.
- [9] Küpfmüller, K., Mathis, W., and Reibiger, A., 2013, "Theoretische Elektrotechnik: Eine Einführung" Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [10] Loebbe, H., 2014, "The Effect of Frequency in Welding Thick-Walled HFI Pipes" 2014(11/2014).
- [11] Paul, S., und Paul, R., 2012, "Grundlagen Der Elektrotechnik Und Elektronik 2: Elektromagnetische Felder Und Ihre Anwendungen".
- [12] Verein Deutscher Ingenieure, und Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013, "VDI-Wärmeatlas," Springer Vieweg, Berlin [u.a.].
- [13] Böckh, P., und Wetzel, T., 2014, "Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis," Springer, Berlin.
- [14] Herwig, H., und Moschallski, A., 2014, "Wärmeübertragung: Physikalische Grundlagen - Illustrierende Beispiele - Übungsaufgaben mit Musterlösungen" Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [15] Langeheinecke, K., Jany, P., Thieleke, G., 2013, "Thermodynamik für Ingenieure: Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium" Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [16] Dassault Systems, 2014, "ABAQUS 6.13 Documentation".
- [17] Wright, J., 1997, "Principles of High Frequency Induction Tube Welding" Electronic Heating Equipment, Inc.

- [18] Ramberg, W., and Osgood, W.R., 1943, "Description of stress-strain curves by three parameters" National advisory committee for aeronautics.
- [19] Spittel, M., and Spittel, T., 2009, "Introduction and Definitions" Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [20] Harlander, C., 2002, "Numerische Berechnung Von Induktivitäten in Dreidimensionalen Verdrahtungsstrukturen".
- [21] Bargel, H., 1980, "Werkstoffkunde" VDI-Verl, Düsseldorf.
- [22] Bowler, J. R., und Theodoulidis, T. P., 2005, "Eddy Currents Induced in a Conducting Rod of Finite Length by a Coaxial Encircling Coil" Journal of Physics D: Applied Physics, 38(16) pp. 2861-2868.
- [23] Grote, K., und Feldhusen, J., 2011, "Dubbel: Taschenbuch Für Den Maschinenbau," .
- [24] Han, Y., Yu, E., Fan, Y., 2010, "Effects of opening angle on temperature distribution of HFIW pipe" 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, ICEEE2010, November 7, 2010 - November 9, Anonymous IEEE Computer Society, Henan, China, pp. IEEE Consumer Electronics Society; Henan Polytechnic University; Huazhong Normal University.
- [25] Spittel, M., und Spittel, T., 2009, "Metal Forming Data - Ferrous Alloys - Deformation Behaviour" Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

10 Anhang

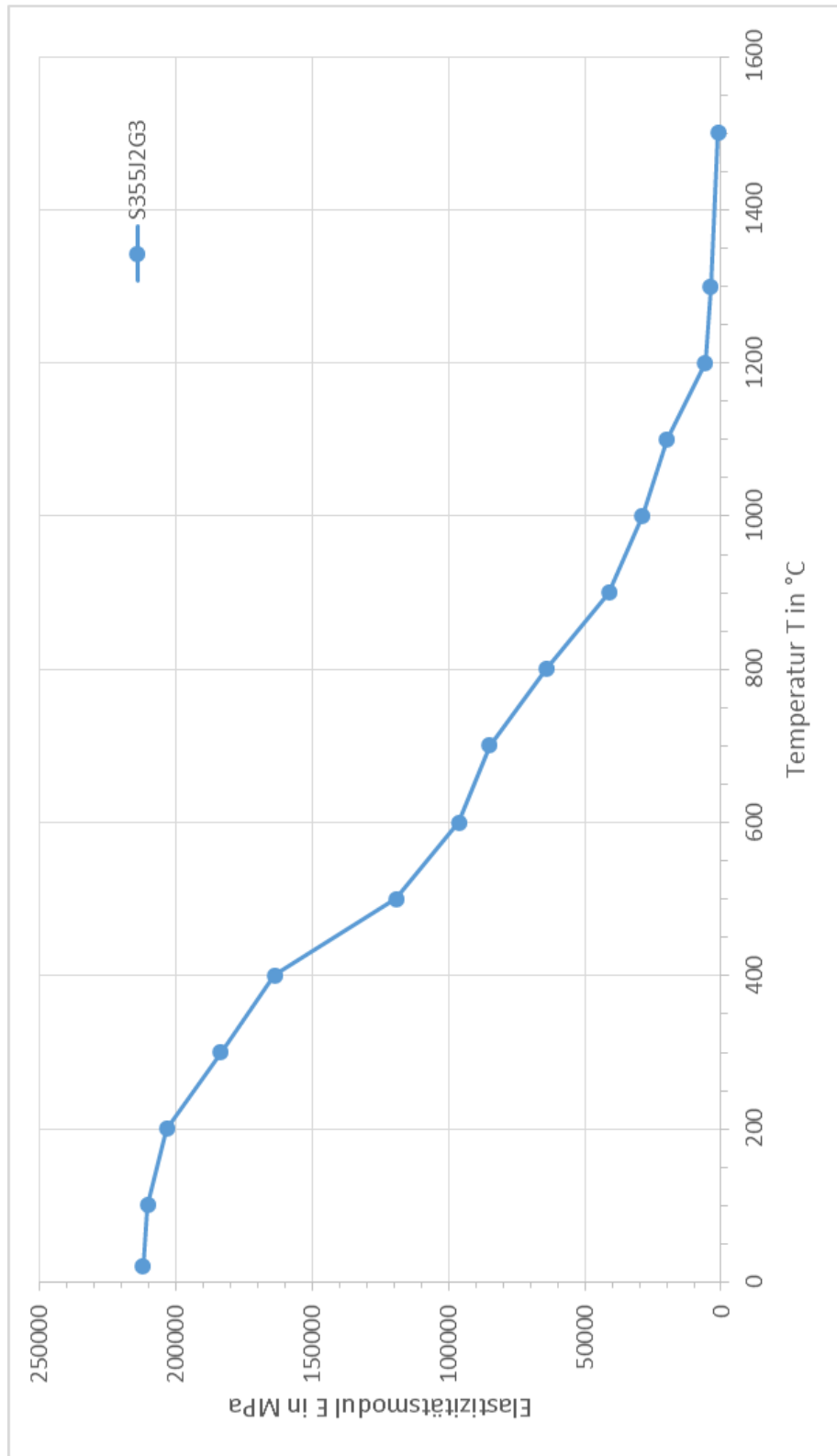
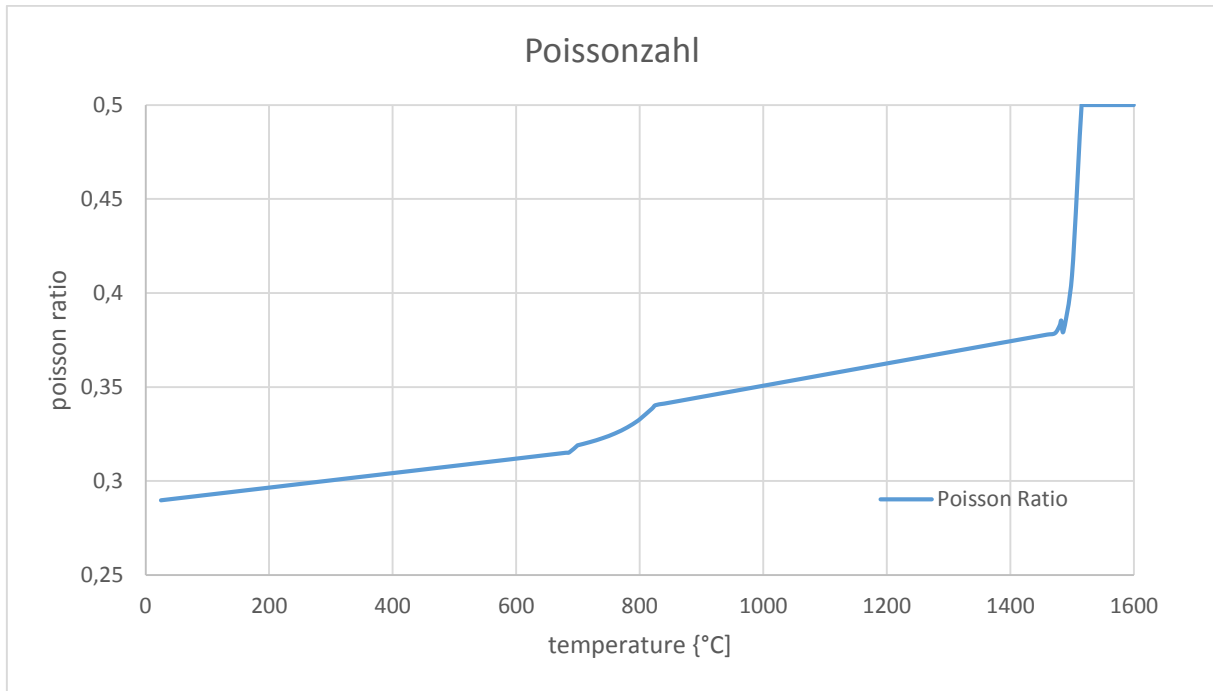


Abbildung A 1: temperaturabhängiger E-Modul



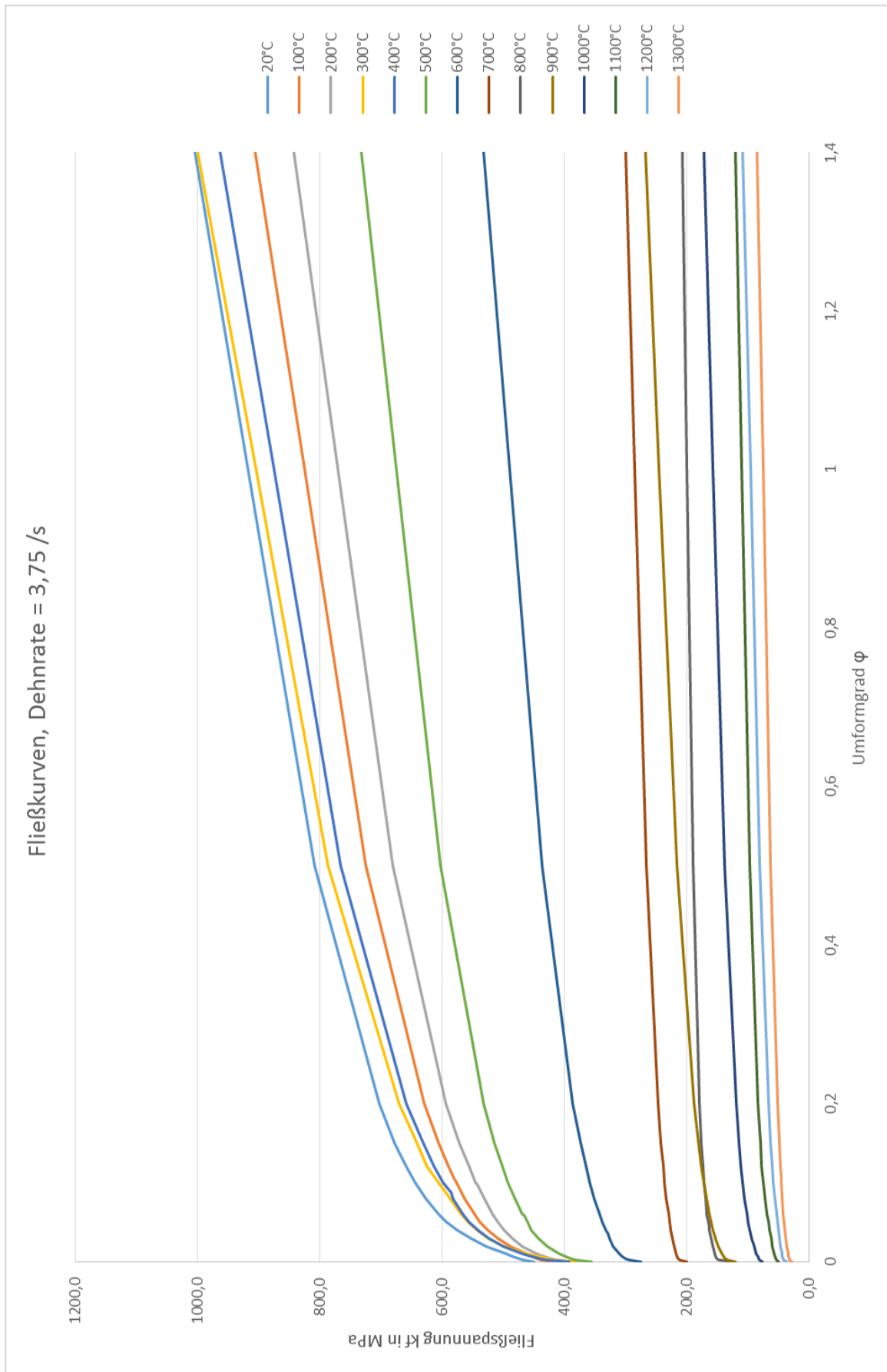


Abbildung A 2: Fließkurven, Dehnrate = 3,75 /s

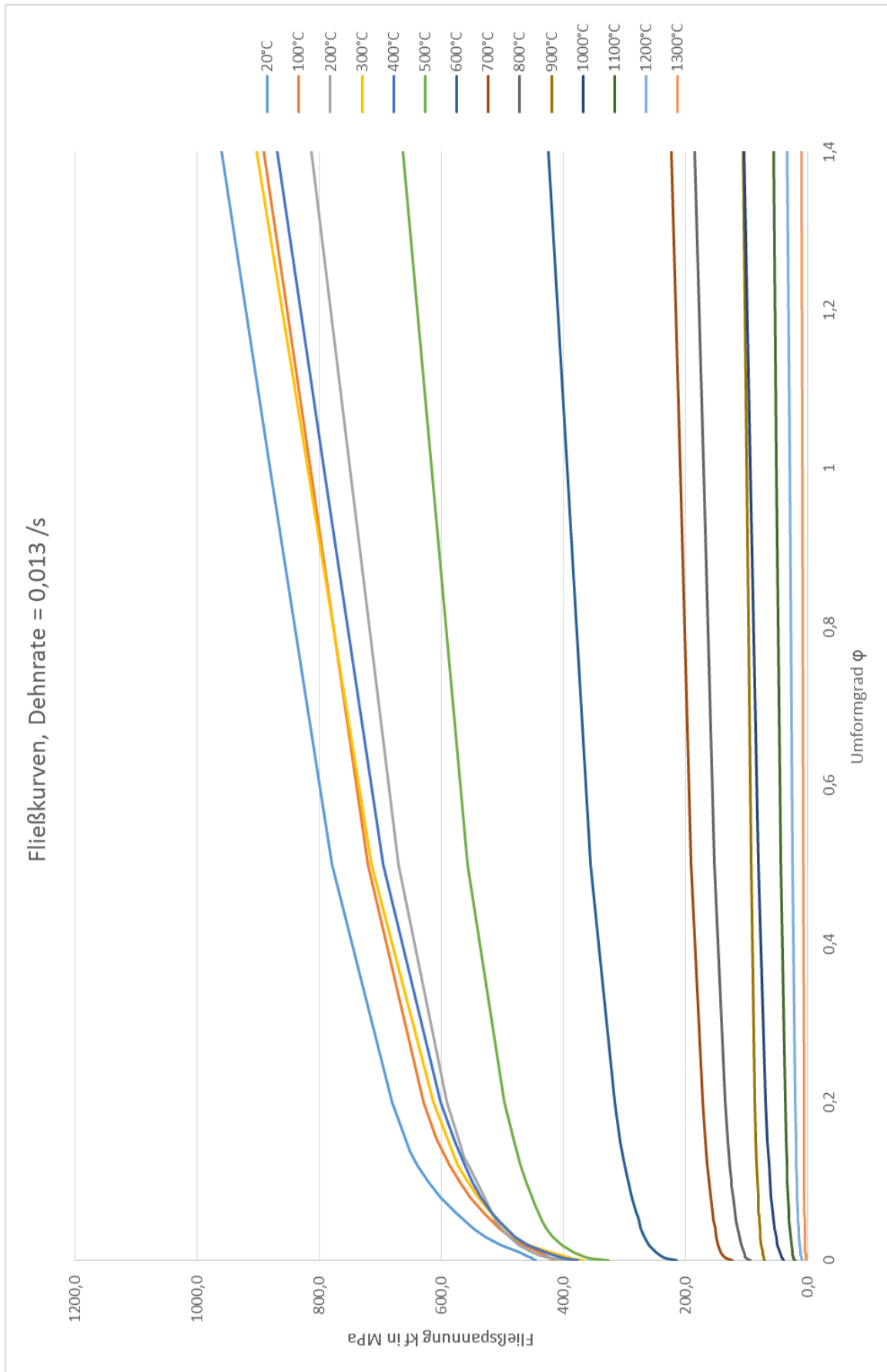


Abbildung A 3: Fließkurven, Dehnrate = 0,013 /s

Ermittlung der Wärmeübergangszahl Rohr/Luft (film coefficient)

| Eingaben | |
|-----------------|-------------------------------|
| Geschwindigkeit | v 45 m/min 0,75 m/s |
| char. Länge | D 25 mm 0,025 m |
| Luftdruck | p 0,9625 bar 96250 Pa |
| Umgebungstemp. | T_U 80 °C 353,15 K |
| Gaskonstante | R 287 J/(kg*K) |
| Luftdichte | ρ 0,949641 kg/m³ |
| dyn. Viskosität | η 17,1 μPa*s 0,0000171 Pa*s |
| kin. Viskosität | ν 1,8E-05 |
| Re-Zahl | Re 1096,491 laminare Strömung |
| Rohrtemperatur | T_Rohr 1100 °C |

| | |
|--------------------|---------------------|
| Wärmeübergangszahl | α 17,33903 W/(m²*K) |
| ABAQUS | 0,017339 |

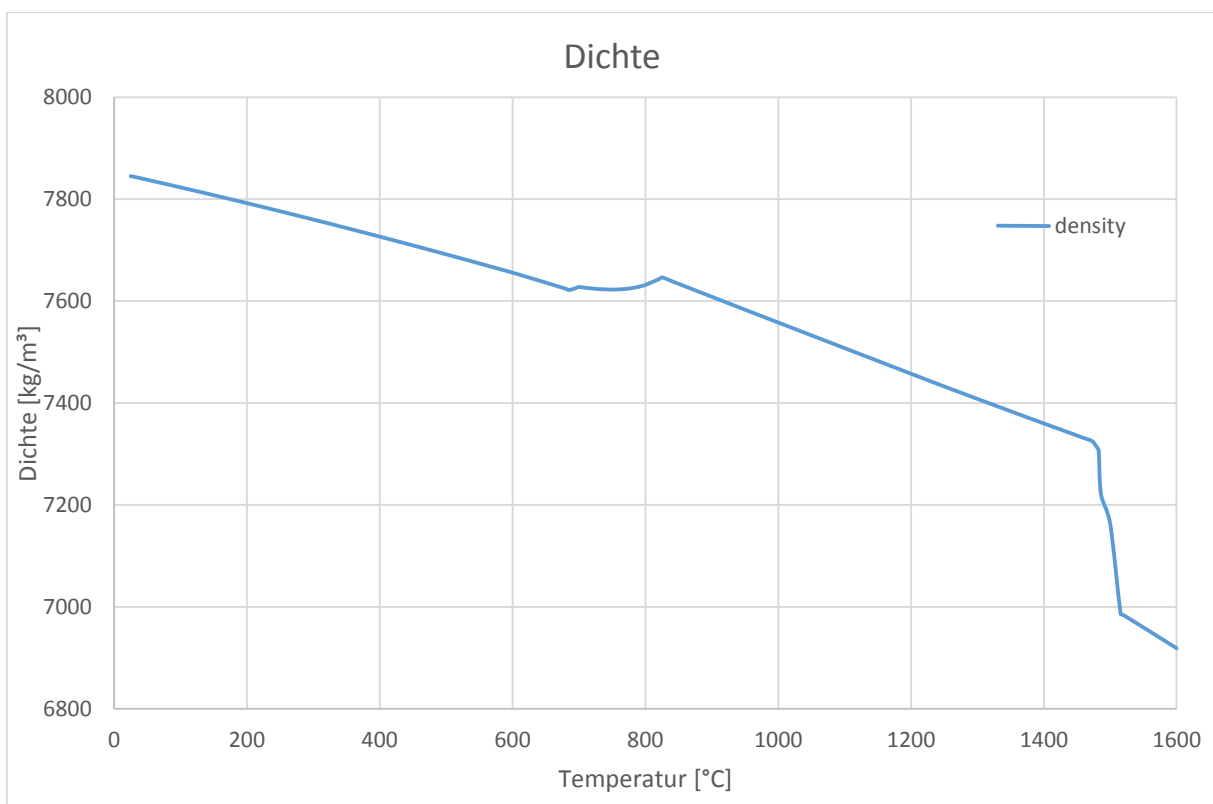
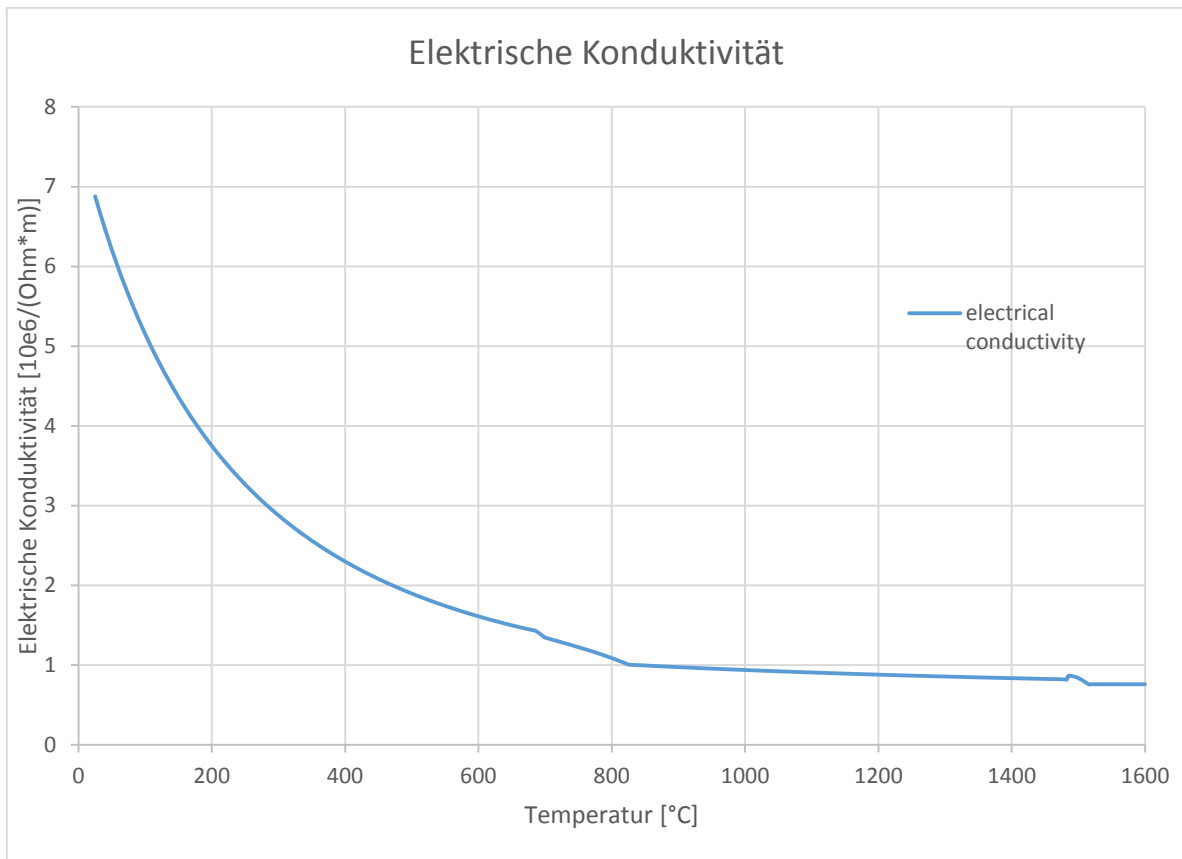
Radiation

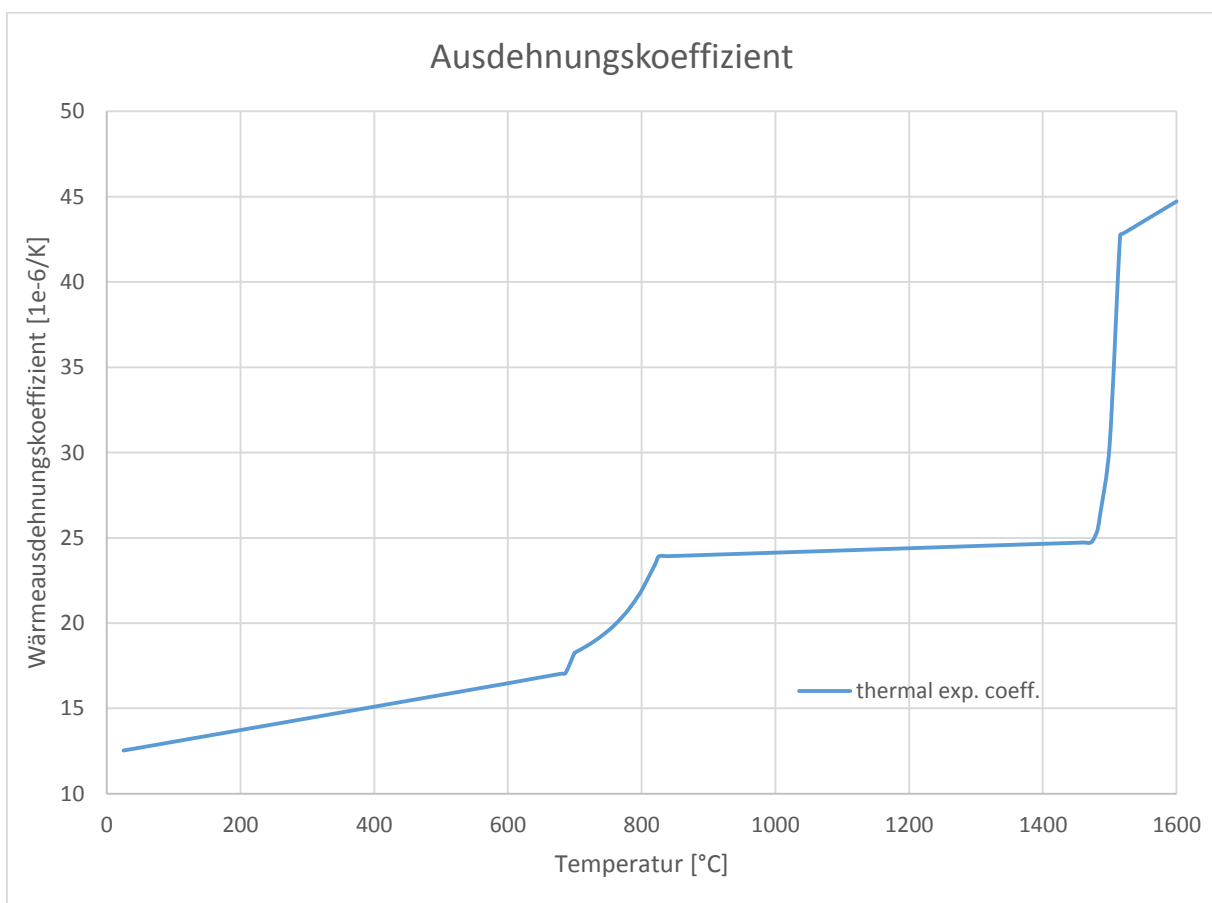
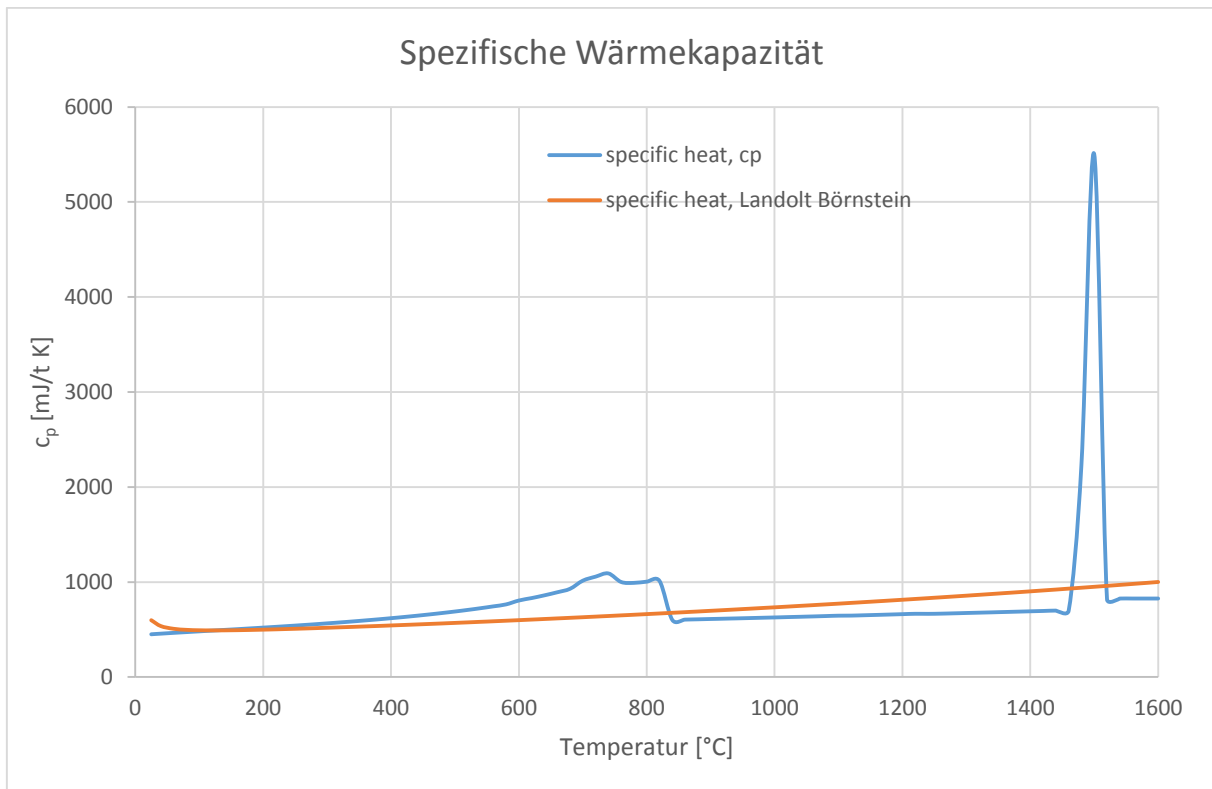
| | |
|---------------------|-------|
| Umgebungstemperatur | 25 °C |
| Emissionsgrad | 0,8 |

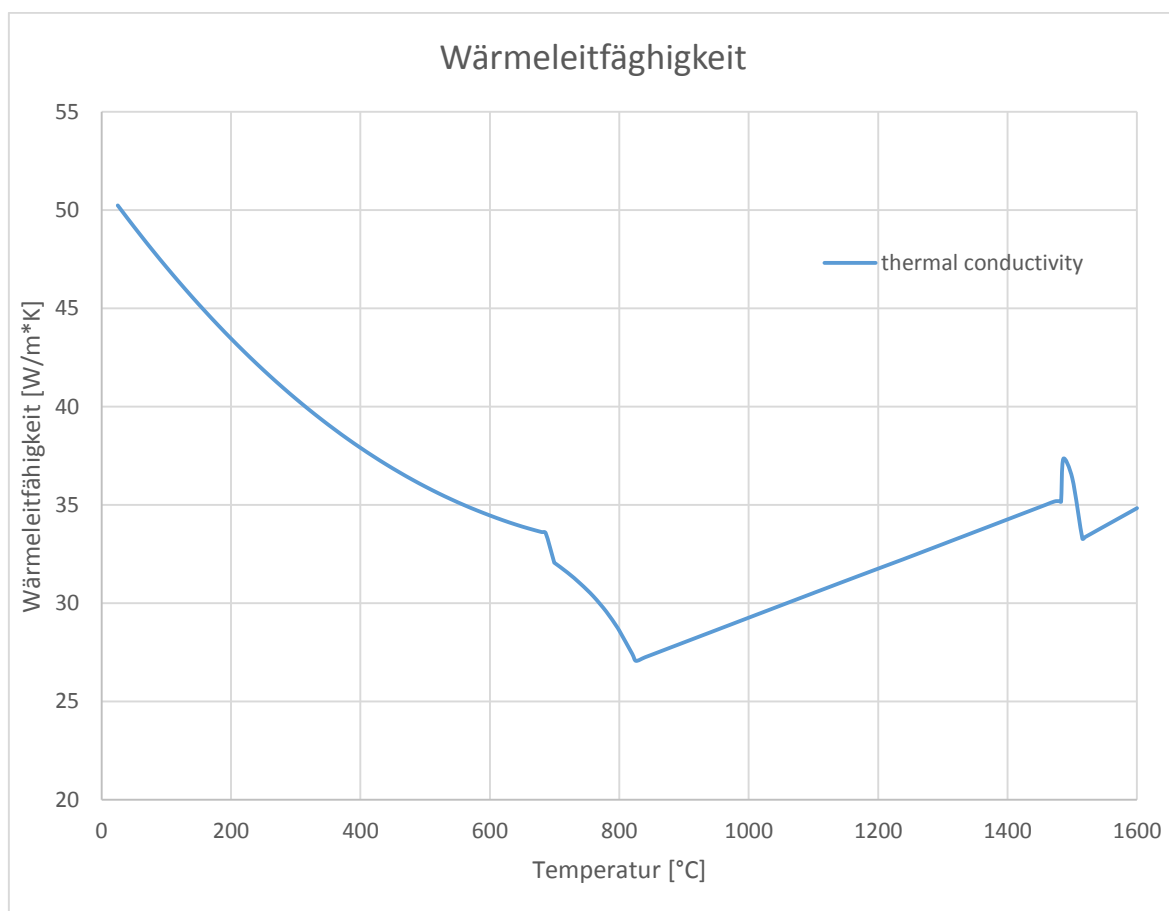
Quelle: Böckh, P.: Wärmeübertragung Grundlagen, Seite 208ff und VDI Wärmeatlas Ka4

| Umwelttemperatur [1] | Luft an Rohren | Umwelttemperatur [1] |
|----------------------|---|-----------------------------|
| | Luft an Rohr mit Aluminiumverkleidung | ruhende Luft |
| | Luft an Rohr mit verzinktem Blech | ruhende Luft |
| | Luft an Rohr mit stark oxidiertem Blech | ruhende Luft |
| | Luft an vertikalem Rohr im Gebäude [2] | laminare freie Konvektion |
| | Luft an vertikalem Rohr im Gebäude [1][2] | turbulente freie Konvektion |
| | Luft an horizontalem Rohr im Gebäude [1] | laminarer Luftstrom |
| | Luft an horizontalem Rohr im Gebäude [1] | turbulenter Luftstrom |
| | Luft an horizontal u. vertikalem Rohr außerhalb von Gebäuden [1][2] | laminarer Luftstrom |
| | Luft an quer angestromten Rohr [1] | laminarer Luftstrom |
| | Luft an quer angestromten Rohr [1] | turbulenter Luftstrom |
| | Luft an horizontal u. vertikalem Rohr außerhalb von Gebäuden [2] | turbulenter Luftstrom |

Quelle http://www.schweizer-fn.de/stoff/wuebergang_gase/wuebergang_gase.php
 accessed: 11.04.2014







Inputfile Templates:

Elektromagnetische Berechnung (*.inp Datei)

```

*NODE, nset=n_all Knotendefinition
*ELEMENT,TYPE=EMC3D6,ELSET=air_zwischen Elementdefinition
*ELEMENT,TYPE=EMC3D6,ELSET=Luftspalt Elementdefinition
. alle Elemente im Set definieren
. weitere Elemente
*SURFACE, NAME = surf_back, TYPE = ELEMENT Surfacedefinitionen
*SURFACE, NAME = surf_front, TYPE = ELEMENT Surfacedefinitionen
. weitere Surfacedefinitionen
*ORIENTATION, NAME=CYL, DEFINITION=COORDINATES, SYSTEM=CYLINDRICAL zylindrisches
Koordinatensystem für den Spulenstrom
*Elset, elset=e_all zusätzliche Setdefinitionen
*SOLID SECTION, elset=air_innen, material=air Properties
.
. weitere Properties
*MATERIAL, NAME=tube
*DENSITY temperaturabhängige Dichte
*ELECTRICAL CONDUCTIVITY temperaturabhängige elektrische Leitfähigkeit
*MAGNETIC PERMEABILITY, nonlinear, type=isotropic
*NONLINEAR BH, dir=1 magnetische Permeabilität als BH Kurve
*CONDUCTIVITY temperaturabhängige thermische Leitfähigkeit
*SPECIFIC HEAT spezifische Wärme
.
. weitere Materialien
*AMPLITUDE, NAME =ramp_down Amplituden für Geschwindigkeit und Strom
*INITIAL CONDITION, type=temperature Temperaturanfangsbedingung
*Physical CONSTANTS, stefan boltzmann=5.67e-11, absolute zero=-273.15 Verschiebung der
Temperaturskala auf °C
*STEP, name=electromagnetics, inc=1000 Start der Lastfalldefinition
*Electromagnetic, low frequency, time harmonic Lastfalldefinition
*CO-SIMULATION, name=cosim, program=multiphysics Initiierung der gekoppelten
Simulation
*CO-SIMULATION REGION, type=volume, export Ergebnisaustausch für gekoppelte
Simulation
*CO-SIMULATION REGION, type=volume, import Ergebnisaustausch für gekoppelte
Simulation
*MOTION, ELEMENT, Translation, amplitude=velocity Bewegung des Rohres im elektrischen
Feld
*D EM Potential Randbedingungen und Symmetriebedingungen
*DECurrent, real, op=new Stromdefinition in der Spule
*Output, field, name=output_2
*Element Output, elset=tube Ergebnisoutput
*Restart, write, frequency=9999 Restart File
*End Step Ende der Lastfalldefinition

```

Thermomechanische Berechnung (*.inp Datei)

```

*NODE, nset=n_all Knotendefinition
*ELEMENT, TYPE=C3D8T, ELSET=rolle Elementdefinition
*ELEMENT, TYPE=C3D8T, ELSET=toprolle Elementdefinition
. weitere Elemente
*COUPLING, REF NODE=456643, CONSTRAINT NAME=coupkin_1, SURFACE=coupkin_surf_1
Rigid Elements
*KINEMATIC Eigenschaft der Rigid Elements
*SURFACE, NAME=surf_back, TYPE=ELEMENT Surfacedefinition
*SURFACE, NAME=surf_front, TYPE=ELEMENT Surfacedefinition
. weitere Surfacedefinitionen
*TRANSFORM, TYPE=R, NSET=refnode_toprolle Drehung des Koordinatensystems (Toprolle)
*ELSET, ELSET=tube Elementsetdefinition
*ELSET, ELSET=e_all Elementsetdefinition
. weitere Elementsetdefinitionen
*NSET, NSET=refnode_toprolle Knotensetdefinition
*NSET, NSET=rb_front Knotensetdefinition
. weitere Knotensetdefinitionen
*SURFACE INTERACTION, NAME=int_spalt Einleitung der Kontaktdefinition
*SURFACE BEHAVIOR Allgemeine Kontakteigenschaften
*FRICTION Reibungsdefinition
*GAP HEAT GENERATION Wärmeentwicklung durch Reibung im Kontakt
. weitere Kontaktdefinitionen
*CONTACT PAIR, INTERACTION=int_spalt .... Definition der kontaktierten Flächen
. weitere Kontaktpaare
*AMPLITUDE, NAME=presskraft, DEFINITION= TABULAR Definition der Amplituden
*ORIENTATION, NAME=CYL, DEFINITION=COORDINATES, SYSTEM=CYLINDRICAL Definition des gedrehten Koordinatensystems
*SOLID SECTION, elset=e_tube_plastic, material=tube Propertyzuweisung
*SOLID section, ELSET=rollen, material=roll Propertyzuweisung
. weitere Properties
*MATERIAL, NAME=tube Materialdefinition
*DAMPING, beta=1 Materialdämpfungsfaktor
*DENSITY temperaturabhängige Dichte
*SPECIFIC HEAT temperaturabhängige spezifische Wärme
*INELASTIC HEAT FRACTION Faktor für Wärmegenerierung durch palstische Verformung
*ELASTIC, type=isotropic temperaturabhängiger E-Modul und Poissonzahl
*PLASTIC, rate=0 temperaturabhängige Fließkurve bei Dehnrate 0
*PLASTIC, rate=3.75 temperaturabhängige Fließkurve bei Dehnrate 3.75
*MATERIAL, NAME=roll Materialdefinition
*DENSITY
*Specific Heat
600
*Conductivity
40
*ELASTIC, type=Isotropic
210000, 0.3
. weitere Materialdefinitionen

```

*Physical Constants, stefan boltzmann=5.67e-11, absolute zero=-273.15 *Verschiebung der Temperaturskala auf °C*

*Initial Conditions, type=temperature *Temperaturanfangsbedingung*

*STEP, name=temp_disp, inc=500000 *Start der Lastfalldefinition*

*Coupled Temperature-Displacement, DELTMX=1000, Stabilize *Lastfalldefinition*

*Controls, Parameters=Field, Field=Global *numerische Parameter*

*CO-SIMULATION, name=cosim, program=multiphysics *Initiierung der gekoppelten Simulation*

*CO-SIMULATION REGION, type=volume, import *Ergebnisaustausch für gekoppelte Simulation*

*CO-SIMULATION REGION, type=volume, export *Ergebnisaustausch für gekoppelte Simulation*

*Cload, op=new, amplitude=presskraft *Einbringung der Presskraft*

*Boundary, op=new *mechanische Randbedingungen (Einspannung)*

*Boundary, type=velocity, OP=new *Definition der Schweißgeschwindigkeit*

*SRADIATE, OP=NEW *Randbedingungen und Symmetriebedingungen*

*SFILM, OP=NEW *Randbedingungen und Symmetriebedingungen*

*DSFLUX, OP=NEW *Randbedingungen und Symmetriebedingungen*

*Output, field, name=output_1, time intervall=0.0001

*Node Output, variable=preselect *Ergebnisoutput*

*Element Output, variable=preselect, elset=tube *Ergebnisoutput*

*Contact Output, variable=preselect *Ergebnisoutput*

*Output, history, name=output_2, time intervall=0.0001

*Node Output, nset=n_all, variable=preselect *Ergebnisoutput*

*Restart, write, overlay *Restart File*

*End Step *Ende der Lastfalldefinition*

Konfigurationsdatei der Koppelung (*.xml Datei)

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<CoupledMultiphysicsSimulation>
  <template_em_std_fixed>
    <EM_Job>electromagnetic_v4</EM_Job>
    <HeatTransfer_Job>thermomech_v4_rigidplane_solid</HeatTransfer_Job>
    <constantDt>0.05</constantDt>
    <duration>0.09</duration>
  </template_em_std_fixed>
</CoupledMultiphysicsSimulation>
```

In den dargestellten Templates sind verwendeten Dateien für die Berechnung stark vereinfacht dargestellt. Die einzelnen mit * beginnenden Befehle enthalten sinngemäß die gesamten Informationen über Modell und Randbedingungen die in der Arbeit beschrieben sind. Die Anordnung der Parameter innerhalb dieser Befehle findet man in der ABAQUS Documentation. Zum Start der Berechnung werden das thermomechanische und das elektromagnetische Template (befüllt mit den Modellinformationen und Berechnungsparametern) gleichzeitig gestartet und mit den Informationen für den Ergebnisaustausch und der Konfigurationsdatei miteinander verknüpft. Dadurch entsteht die beschriebene Koppelung der beiden Simulationen.

Tabelle A 1: Bilderprotokoll

| DIM - Bilderprotokoll | | | | | |
|------------------------------|-------|----------------------|---------------------------------------|----------------------------|----------------|
| Datum: 3. 9.14 | | Projektbezeichng. | Jahr | Laborkennng. | ab: Bildnummer |
| | | join4plus2_7_ | 14 | d | 1607 |
| Nr.: | Dev. | Device Parameter | Schliffbezeichnung, Bildposition etc. | Vers. 1.0 Ke/ März 2014 | |
| 1607 | Makro | 42,00mm | S460; Pos 2 | | |
| 1608 | Makro | 42,00mm | S460; Pos 3 | | |
| 1609 | Makro | 42,00mm | S460; Pos 1 | | |
| 1610 | Makro | 55,00mm | S355; | | |
| 1604 | Makro | 152,00mm | Rohr S460; Position1_I | | |
| 1605 | Makro | 152,00mm | Rohr S460; Position2_I | | |
| 1606 | Makro | 211,00mm | Rohr S460; Position3_I | | |