

Partiell induktiv vorgewärmte Aushalsungen an dickwandigen Rohren zur Schweißfugenvorbereitung

– Von der FEM-Simulation bis zur Realisierung

Prof. Dr.-Ing. K. Koppe, kosolid engineering
Hilliger gmbH Sonderformstückbau

1 Einleitung

1. 1. T-Stücke im Rohrleitungs- und Apparatebau

Im Rohrleitungs- und Apparatebau werden T-Stücke mit Abzweigungen gleichen und ungleichen Durchmessers eingesetzt. Sie dienen der Aufteilung und Zusammenführung von Volumenströmen, im Apparatebau der Zu- und Abführung von Volumenströmen. T-Stücke mit Abzweigungen gleichen Durchmessers sind in ihrer festigkeitsmäßigen Auslegung mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet.

Die Anwendung analytischer Methoden ist nicht praktikabel. Eine Option für die Behandlung der Problematik stellt die numerische Analyse dar, wobei die Modellbildung auf Grund der komplexen geometrischen Situation, der werkstofflichen Zustände durch Umformen oder Schweißen im Durchdringungsbereich hohe Anforderungen stellt.

Gleicher Auslastungsgrad in Folge der Ausschnittschwächung hat eine globale Verstärkung des T-Stückes und angepasster Anschlussstücke zur Folge. T-Stücke für höhere Innendrücke werden aus verstärkten Rohren bzw. Schmiedestücken [1] und aufgeschweißten/eingesetzten Stutzen hergestellt. Der Übergang vom Rohr zum Stutzen wird innen und außen betont kerbarm gestaltet.

T-Stücke des Apparatebaus werden aus einem Rohr oder Blech gefertigt. Sie werden aus zwei Rohrabschnitten gleicher und unterschiedlicher Wanddicke, deren Durchdringungsbe- reiche angepasst sind, über eine sich im Raum verändernde Schweißnaht (HV-Naht mit Kehle → HV-Stumpfnaht) gefügt. Die Schweißnähte sind in der Regel hochwertig ausgeführt, oberflächenbearbeitet und 100%ig geprüft.

Eine andere Möglichkeit [1] besteht darin, das T-Stück durch eine Aushalsung zu fertigen. Der Grundkörper erhält zunächst einen Ausschnitt mit kleinerem Durchmesser als das Stutzenrohr. Durch diese Öffnung wird ein Werkzeugkörper von innen nach außen gezogen, wobei der Lochrand kragenförmig nach außen gebogen wird. Nach Begradigung des Stutzenansatzes kann das Stutzenrohr angesetzt werden.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, ein T-Stück aus zwei plastisch geformten Halbschalen zu fertigen. Die Verformungen können sowohl kalt als auch warm durchgeführt werden, wobei einige werkstoffspezifische Besonderheiten bei thermomechanisch vorbehandelten Materialien und Eigenschaftsänderungen bei hochlegierten Stählen zu beachten sind [1].

Die Aushalsung ist ein typisches Apparateelement mit allerdings ambivalenten Eigenschaften: strömungsmäßig günstig, kerbarm, spanlose Fertigung, schweißtechnisch optimal, jedoch andererseits Eigenschaftsänderungen und Querschnittsverlust in Folge des lokal hohen plastischen Verformungsgrades. Die festigkeitsmäßige Auslegung und die Einsatzgrenzen werden aus den genannten Gründen und speziell im sicherheitsrelevanten Bereich recht restriktiv behandelt [2]. Jedoch ist der Vorteil einer Aushalsung ersichtlich, da vergleichsweise gegenüber eines aufgesetzten Stutzens ein Spannungsabbau erfolgt und andererseits der Ort der Spannungskonzentration und die Schweißnaht räumlich voneinander getrennt werden (Bild 1).

Vergleich der Lage der Spannungsspitzen an T-Stücke

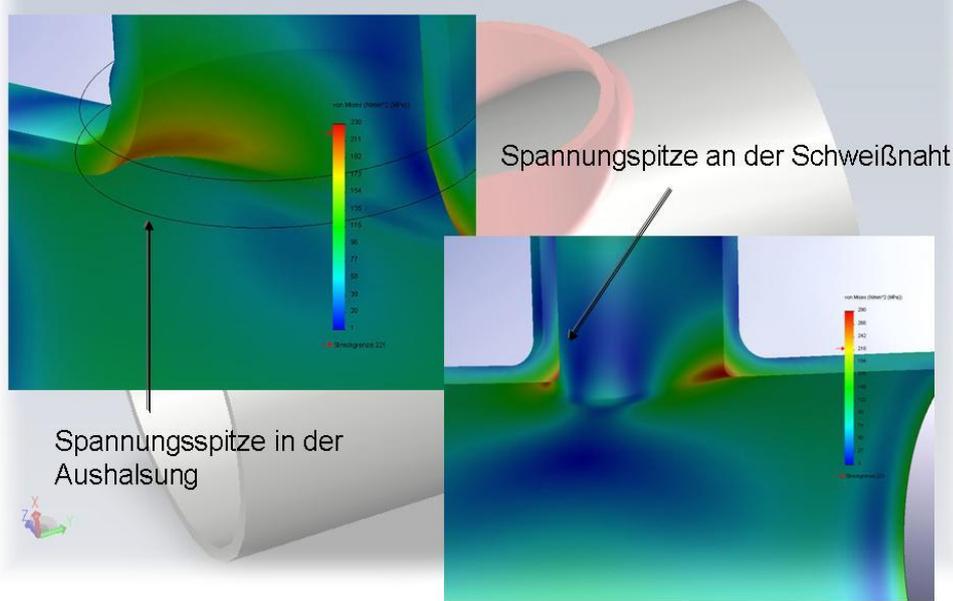


Bild 1 Vergleich der Lage der Spannungsspitzen zur Schweißnaht an eingeschweißten Stützen und am T- Stoß mit ausgehalsten Stützen

Der Kerbfreiheit und den schweiß-, sowie prüftechnischen Vorteilen einer Aushalsung stehen jedoch werkstoffliche Veränderungen durch einen Warmumformprozess gegenüber. Die mögliche Überhitzung und Kornstreckung beim Umformen ist von der Temperaturführung und dem Umformgrad unter den jeweils örtlich vorhandenen Temperaturen abhängig. Daher ist eine anschließende Schweißnaht am ausgehalsten Stützen bei bereits vorhandenem Grobkorn gefährdet. Diese Unsicherheit führte zu immer weiter überhöhten Wanddicken, Verstärkungen und unsicheren Beurteilungen.

1.2 T- Stücke an Aluminiumstrangpressprofilen

Die Strangpressprofile für Spaceframe-Karosserien bestehen aus einer AlMgSi-Legierung, die eine komplexe Temperaturführung erfordert – von der Homogenisierung des Vormaterials bis zur Warmauslagerung der Profile.

Eine Spaceframe-Karosserie besteht beispielsweise aus einem tragenden Gerüst sehr leichter Aluminium-Strangpressprofile, auf die das Karosserieblech montiert wird. Dabei müssen die Profile unterschiedliche, teilweise konträre Anforderungen erfüllen. Einerseits sollen sie sehr leicht sein, um das Fahrzeuggewicht niedrig zu halten. Andererseits müssen sie aber auch sehr fest sein und sich trotzdem rissfrei stauchen lassen, um die Fahrzeuginsassen bei einem Unfall bestmöglich zu schützen.

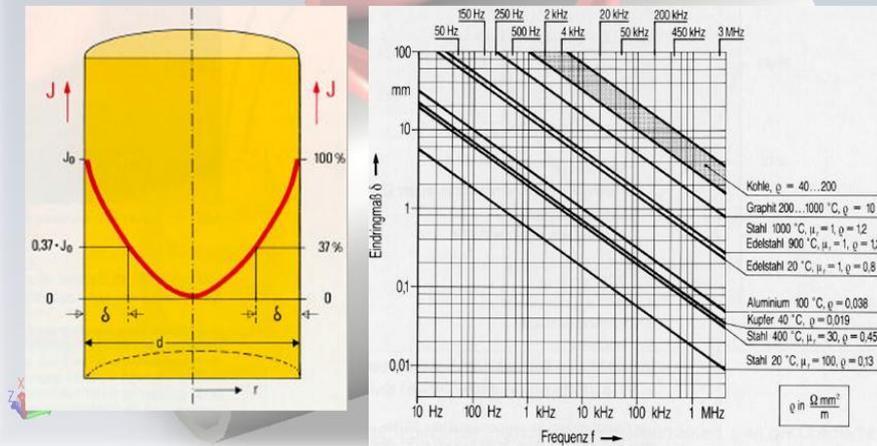
Schwingungstechnisch ist der Einsatz von Kehlnahtanschlüssen an Aluminiumhohlprofilen eine kritische Gestaltung für Rahmenecken bzw. Querstrebenverbindungen.

Viele Betriebsfestigkeitsuntersuchungen zeigen diese Schwachstellen auf. Um jedoch wie oben beschrieben eine Aushalsung zu fertigen, bei der die Spannungsspitzen vom Ort der Schweißnaht entfernt sind sind werkstoffliche Umformeigenschaften zu beachten.

Hierzu ist eine kalte Ausformung einer Aushalsung rissfrei unmöglich. Daher kommt nur eine Warmumformung in Frage. Diese hat aber zur Folge, dass beim Verlassen eines kleinen Temperaturfensters eine Entfestigung, wenn nicht sogar ein Anschmelzen vollzogen wird. Hierzu ist ebenfalls eine präzise Temperaturführung notwendig.

Wirkprinzip der Induktionserwärmung

Stromdichte und Frequenz bestimmen die Eindringtiefe



6

Bild 3 Wirkprinzip der Induktionserwärmung

Daraus ergeben sich für eine Anwendung zur Vorwärmung von Aushaltungen viele Vorteile, jedoch auch Nachteile in der Wirtschaftlichkeit hinsichtlich der investiven Aufwendungen (Bild 4).

Vor- und Nachteile der Induktionserwärmung

- Direkte Erwärmung des Rohrquerschnittes, Wärmeverteilung von Außen nach Innen günstiger, da innere Erwärmung mitstattfindet.
 - Keine überhitzten Zonen der Wärmeeinleitung, die bei Erwärmung mit Gas auftreten
 - Energetisch effektiver und billiger als Gas
 - Feine Regelung der Temperatur durch elektronische Steuerung mit gekoppelten Thermoelement
 - Aufwendige Gastransporte und Lagerungen entfallen
-
- Hohe Investitionskosten
 - Enges Parameterfenster nur mit Simulation zu ermitteln
 - Eine Induktionsspule ist für jeweils eine Paarung von Durchmesser, Grundrohr, Durchmesser Abzweig und Wanddicke ; ändert sich ein Parameter ist eine neue Spule notwendig.

7

Bild 4 Vor- und Nachteile der Induktionserwärmung

3. Partiiell vorgewärmte Aushaltungen an dickwandigen Rohren und die Simulation

des Umformprozesses

Die Herstellung dickwandiger Rohraushaltungen erfolgt hauptsächlich durch aufwendige Umformwerkzeuge in großen Pressen und energetisch aufwendigen Erwärmung von Halbschalen. Da die Werkzeugkosten sehr groß sind, sind Kleinserien, wie sie im Anlagenbau oft benötigt werden, unwirtschaftlich. Die weiteren Möglichkeiten Aushaltung zu fertigen zeigt Bild 5.

Bild 5 Umformtechniken zur Herstellung von Rohraushaltungen an dickwandigen Rohren



Die Warmumformung von geschweißten und nahtlosen Rohren mittels partieller Erwärmung wird durch viele Einflußgrößen beeinflusst. Die Werkzeugkonstruktion, Kräfteermittlung und Wärmeführung sind nur mit hohem experimentellen Aufwand zu bewältigen, daher wurde die numerische Simulation des Umformprozesses in der Abkühlphase angestrebt.

Zuerst erfolgt eine induktive Erwärmung in einem gezielten Bereich um den Ausschnitt. Er darf nicht zu groß werden, da das Rohr nach der Aushaltung unrund wird, jedoch auch nicht zu klein, da die Warmumformung durch die niedrigen Umformkräfte im hohen Temperaturbereich der Warmfließkurven geprägt ist. Es kommt sonst zu ansteigenden Umformkräften bis zur Leistungsgrenze der Hydraulik. Nach dem Erwärmen erfolgt die Aushaltung mit einem Werkzeug (Bild 6)

Prinzip des Aushalsens mit partieller induktiver Erwärmung

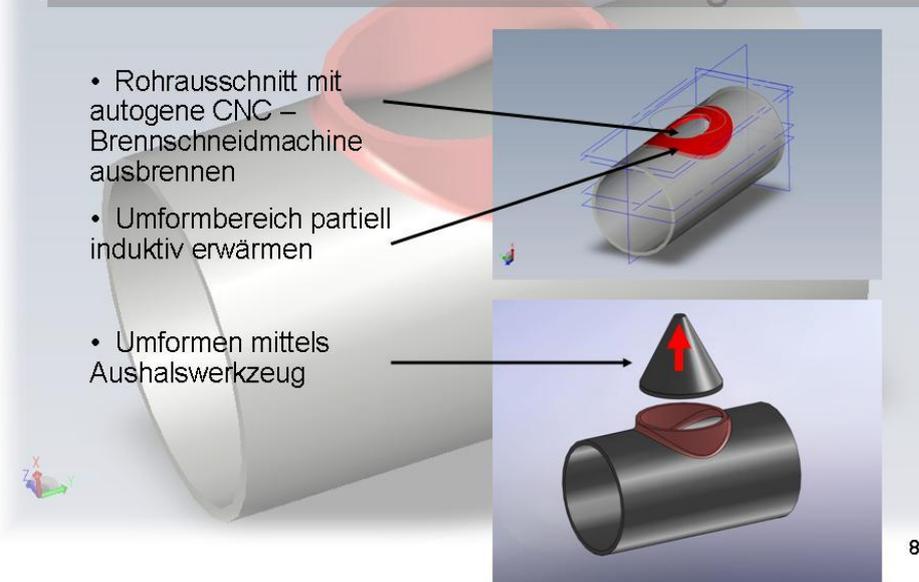


Bild 6 Prinzip des Aushalsens mit partieller induktiver Erwärmung

Hierzu war Bedingung den Ausschnitt für die Aushalsung wiederholbar auf CNC-Schneidmaschinen zu realisieren und somit reproduzierbare Verhältnisse zu erzielen. Die Schnittkurven sind in einem CNC-Programm parametrisch verankert und können somit variabel für unterschiedliche Blechdicken und Ausschnitte genutzt werden.

Die Vorgehensweise zur Modellbildung einer numerischen Simulation (Bild 7 - 9) führte zu einer Dimensionierung für den Bau der Aushalssondermaschine, zur Dimensionierung der Induktionsanlage und zur Werkzeuggestaltung.

Mit dieser Methode konnte die angestrebte Wärmeführung zum Umformen so geführt werden, dass der Temperaturbereich bis 950°C nicht überschritten wird (Bild 10).

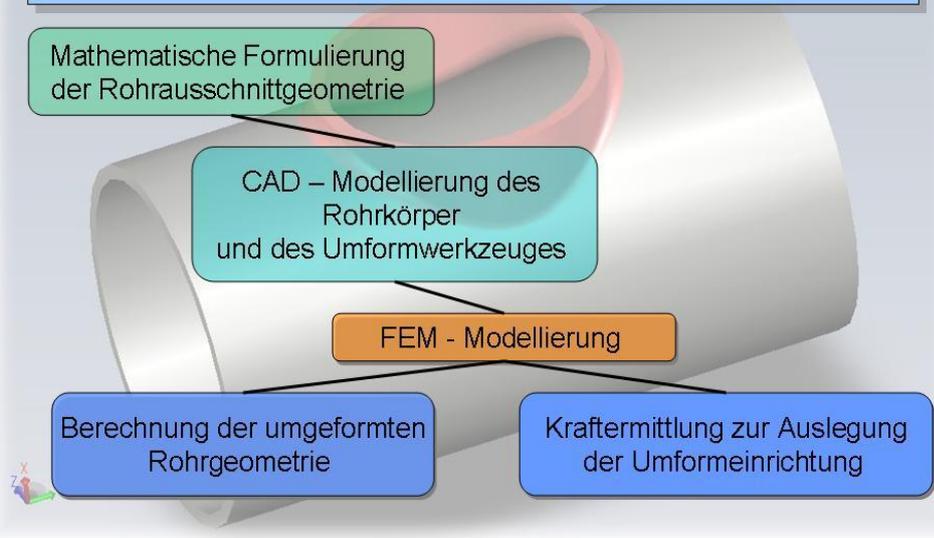
Mit Hilfe einer Auswertung des Kraftwegverlaufes in der Simulation kann die Werkzeugform optimiert werden (Bild 11)

Die realisierten Rohraushalsungen zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den theoretisch ermittelten Ergebnissen aus der FEM- Simulation (Bild 12)

Die zerstörende Prüfung und metallografischen Untersuchungen der Schweißverbindungen und des umgeformten Grundrohrs zeigen konstant gute Ergebnisse (Bild 13 - 16).

Fazit : für mehr als 30 Anwendungen konnte die gute Übereinstimmung der Simulation in der Arbeitsvorbereitung mit realisierten Teilen nachgewiesen werden.

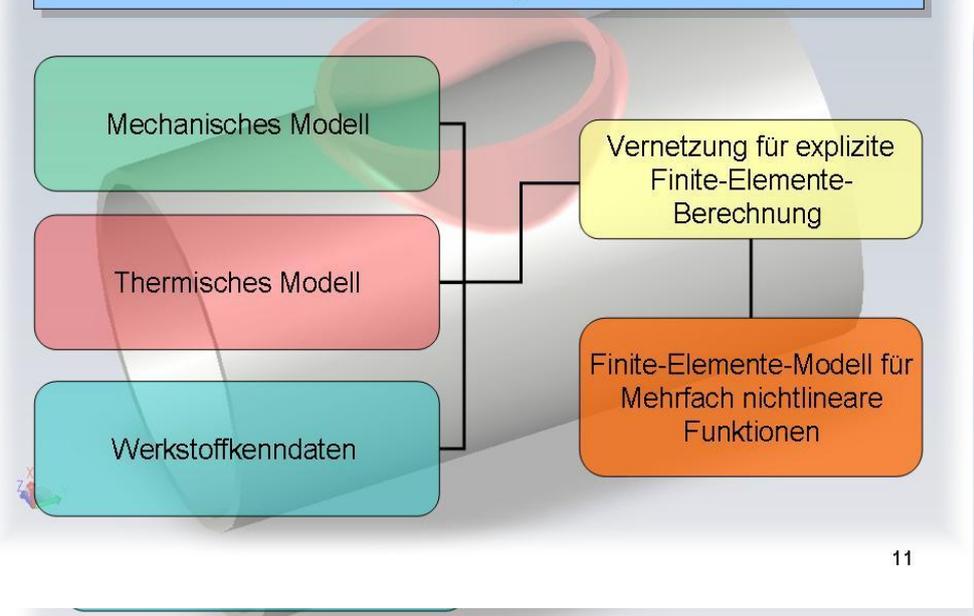
Simulation des Warmumformprozesses



9

Bild 7 Prinzipieller Aufbau der Simulation und Ziele

FEM - Modellierung des Warmumformprozesses

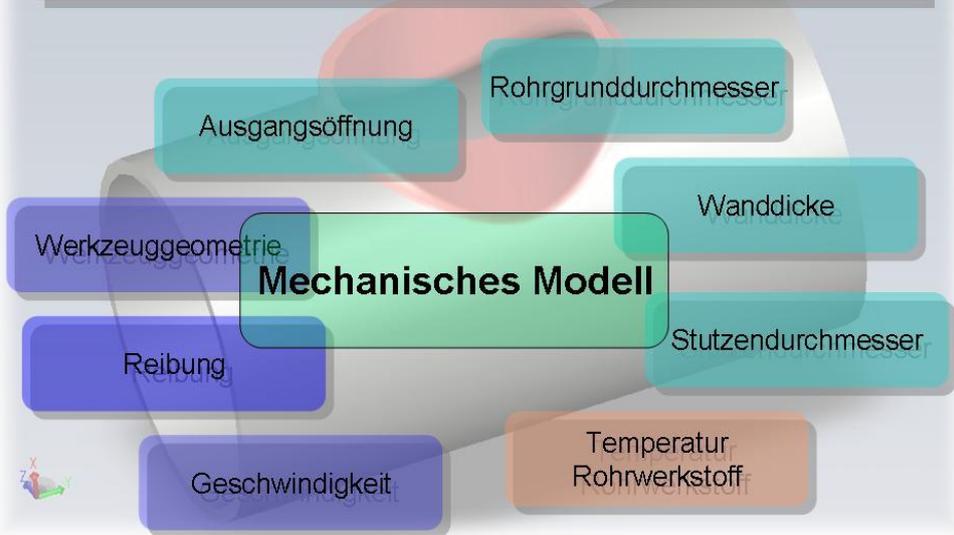


11

11

Bild 8 Modelle zur expliziten FEM-Berechnung

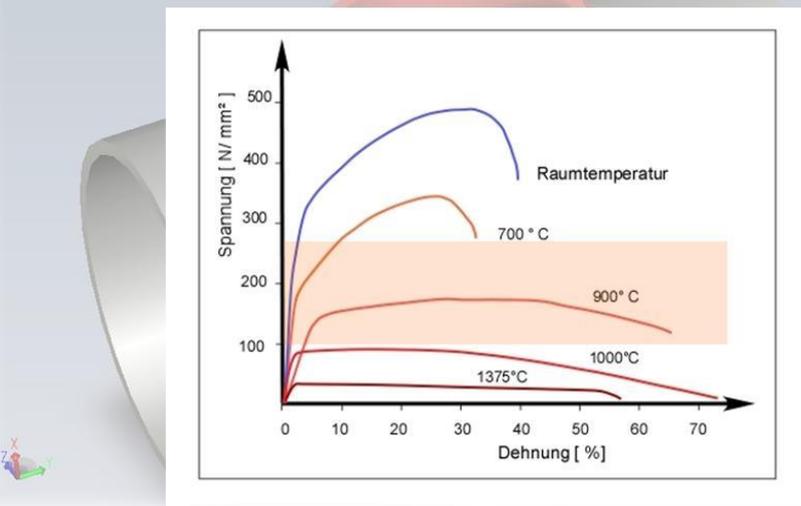
FEM - Modellierung des Warmumformprozesses



12

Bild 9 Erfasste Einflußgrößen auf das mechanische FEM-Modell

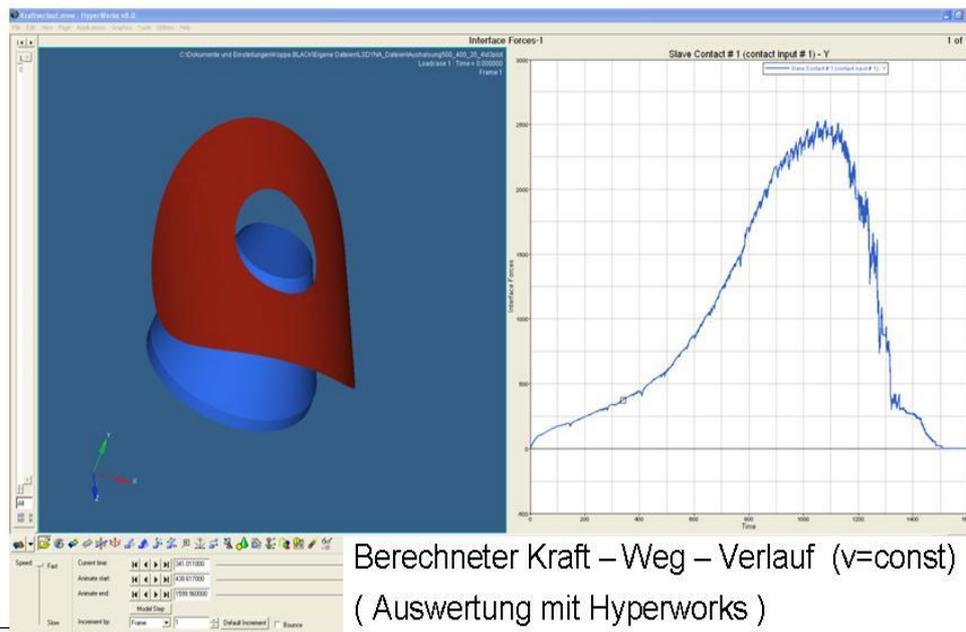
Temperaturbereich zur Warmaushaltung



17

Bild 10 Spannungsdehnungsverlauf und Temperaturbereich zur Warmumformung

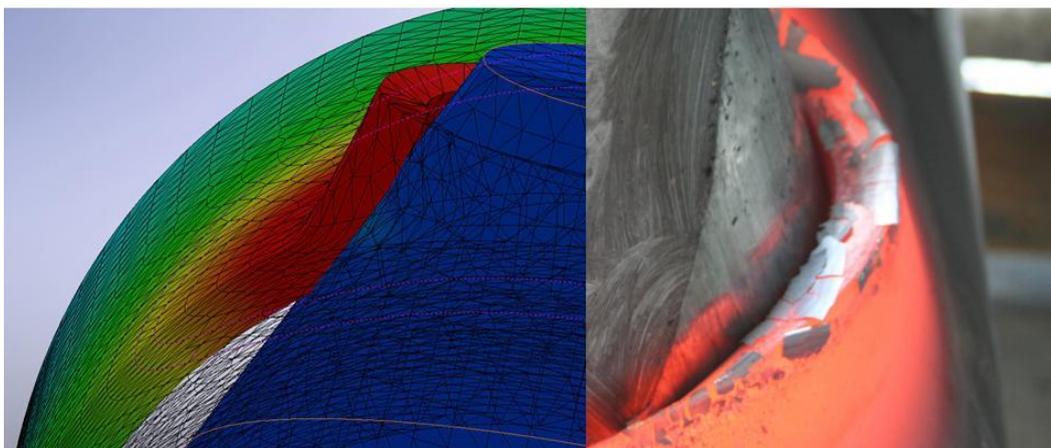
Kraftermittlung und Werkzeugformdimensionierung



18

Bild 11 Kraftermittlung des Aushalsvorgangs zur Werkzeugdimensionierung

Beispiele Rohraushalsungen



Simulation

reale Aushalsung

25

Bild 12 Vergleich der Simulation zur realen Aushalsung

Beispiele Rohraushalsungen



26

Bild 13 Aushalsung nach dem Umformvorgang

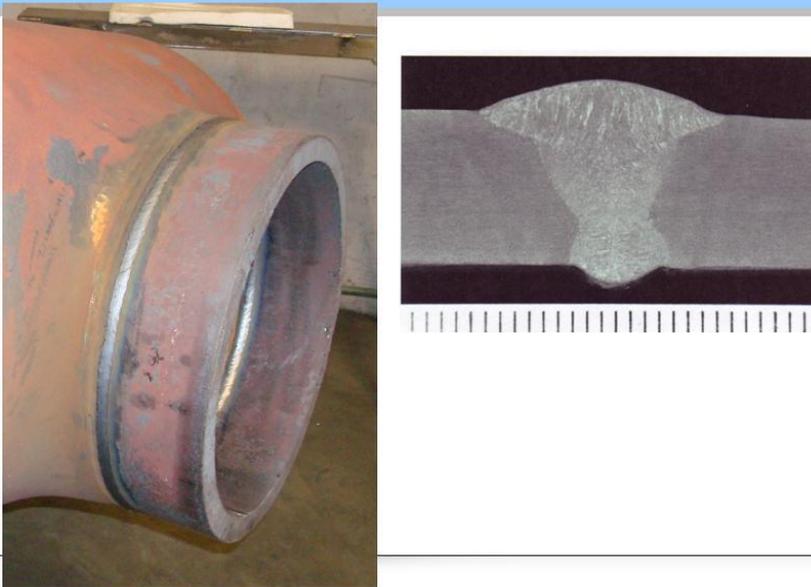
Beispiele Rohraushalsungen



29

Bild 14 Fugenvorbereitung an der Aushalsung

Beispiele Rohraushalsungen



30

Bild 15 Schweißverbindung mit Stutzen

Prüfung realisierter Aushalsungen



32

Bild 16 Zeilig- ferritisches Gefüge im umgeformten Bereich

Vorteile der Simulation der Aushalsung

- Minimierung des Versuchsaufwandes
- Exakter Rohrausschnitt durch mathematische dreidimensionale Kurvenbeschreibung
- Minimierung der Umformkräfte durch virtuellen Test der Werkzeuggeometrie
- Bestimmung eines werkstoffgerechten Warmumformprozesses
- Machbarkeitsstudien extremer Rohrdimensionen (kleines Grund- und Abzweigrohr bei großer Wanddicke)

36

Bild 17 Vorteile der Simulation des Umformprozesses

Tabelle realisierter Rohraushalsungen

Grundrohr	Stutzenrohr	Wanddicke
288	273	26
343	219	30
508	273	40
645	508	25
914	219	20
1030	406	50
800	600	40

Bild 18 Realisierte Rohraushalsungen



Beispiel Dm 800 auf 560