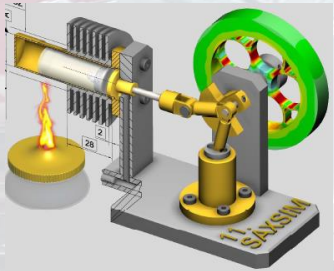
Additive Fertigung von beanspruchungsgerechten und komplexen Bauteilgeometrien mittels 3D – Plasma-Auftragschweißen – ein simulativer Beitrag zur Bauteilcharakterisierung



PD Dr.-Ing. habil. Khaled Alaluss

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Mayr

11. Anwendertreffen SAXSIM
Saxon Simulation Meeting
26. März 2019

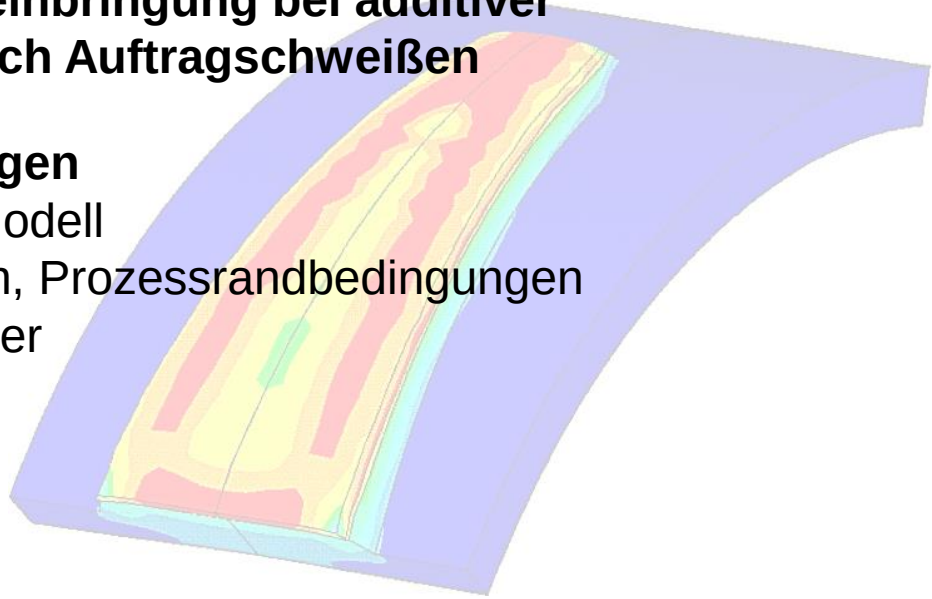
Technische Universität Chemnitz Zentrales Hörsaal- und Seminargebäude

SAXSIM.DE ANWENDERTREFFEN SIMULATION

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ · MTH · GMA-TEC e.V.

Gliederung

- **Additive Fertigung durch 3D – Auftragschweißen – Motivation – Technischer Hintergrund – Plasmaschweißen**
- **Probleme – Auswirkung der Wärmeeinbringung bei additiver Fertigung von Bauteilstrukturen durch Auftragschweißen**
- **Schweißverzug und -eigenspannungen**
  - Thermo-elastisch-plastisches FE-Modell
  - WZ – CAD-Modell – Werkstoffdaten, Prozessrandbedingungen
  - Wärmequellenmodell und -parameter
- **Simulationsergebnisse**
- **Zusammenfassung/Ausblick**



Additive Fertigung – Motivation – Technischer Hintergrund

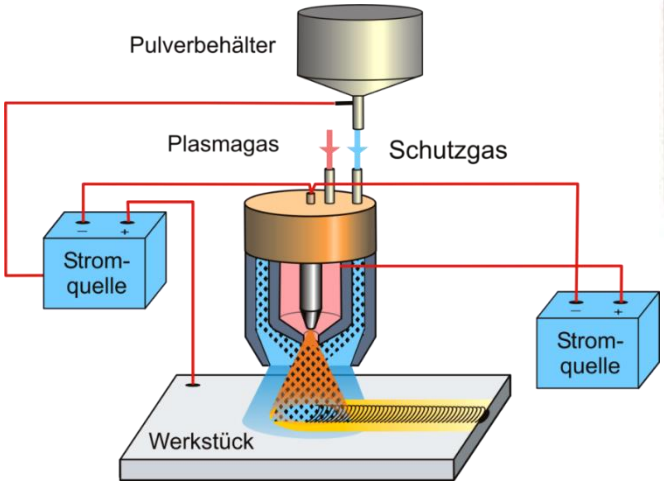
- Mögliche einsetzbare Auftragschweißverfahren

Schweiß-verfahren	Zusatz-werkoff	Abschmelz-leistung	Schichtdicke einlagig	Herzustellende Geometrien	Arbeitsweise
MSG MIG/MAG	Massivdraht rund oder flach, Fülldraht (Pulver)	8 – 9 kg/h	4 – 8 mm	Abhängig von Prozessparametern	mechanisierbar automatisierbar
Plasma	Massivdraht, Fülldraht, Pulver	1,5 – 20 kg/h	1 – 6 mm	endkonturnahe Flächengeometrien – möglich	mechanisierbar automatisierbar
Laserstrahl	Elektrode, Stab, Pulver	1 – 2 kg/h	0,1 – 2 mm	genaue, präzise Flächengeometrien	mechanisierbar, automatisierbar

Ziel: Entwicklung einer produktiven/kostengünstigen Verfahrenstechnik mittels additiver Fertigungstechnik – 3D Auftragschweißen von großflächigen komplexen Bauteilgeometrien

Plasma-Pulver-Auftragschweißen – Verfahrensprinzip/-vorteile

- Verfahrensvorteile:
  - Flexibilität hinsichtlich der Auftragswerkstoffe und Bauteilgeometrien
  - Gleichmäßige, reproduzierbare Auftragsqualität
  - Geringer Wärmeeintrag ins Bauteil
  - Schichtdicke, einlagig 1 – 6 mm

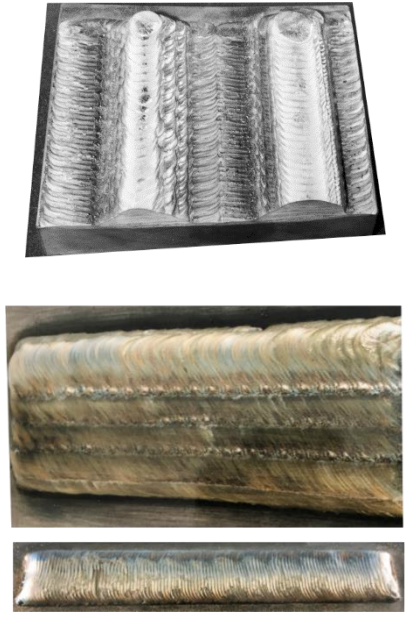


- Verfahrensvarianten:
  - Mikro-Plasma-Schweißen: 0,5 – 70 A (bis 0,7 kg/h)
  - Standard-Plasma-Schweißen: bis 250 A (1,5 – 7,0 kg/h)
  - …

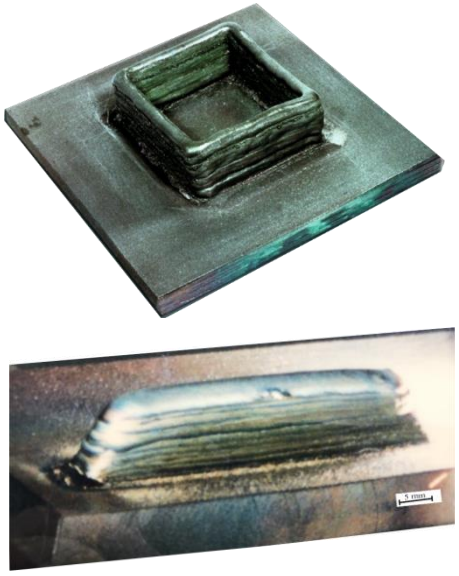
Quelle: ·www.ifmt.tu-chemnitz.de

Additive Fertigung – 3D – Plasma-Pulver-Auftragschweißen

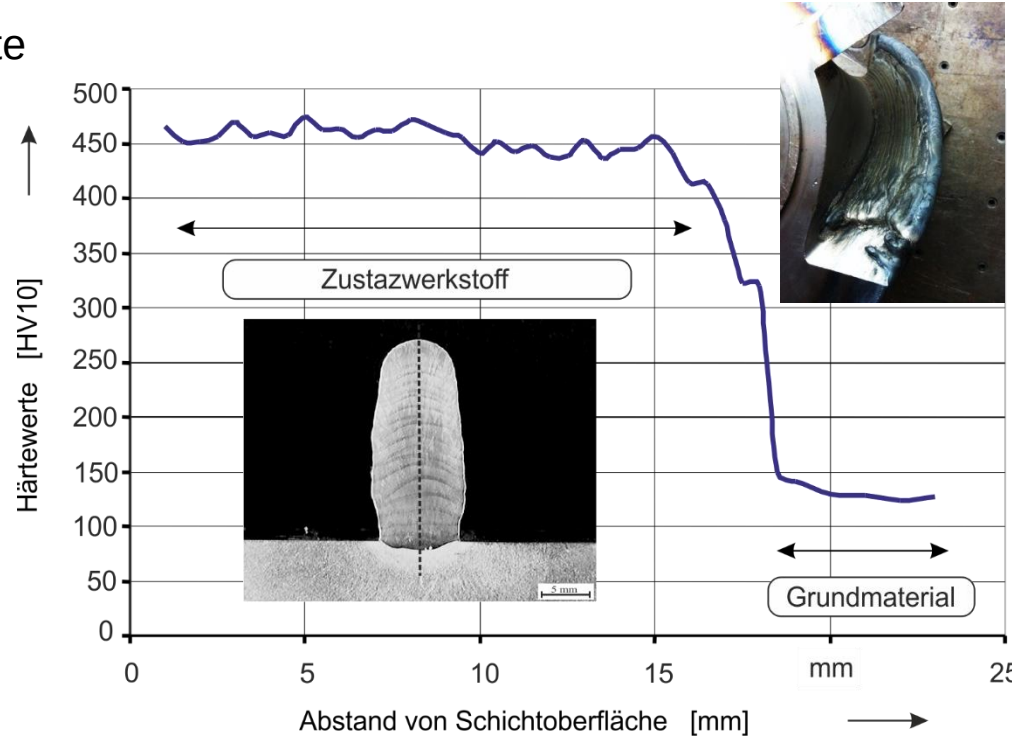
- Beispiele Plasma-pulver-auftraggeschweißte Bauteilkonturflächen



Pendelschweißen

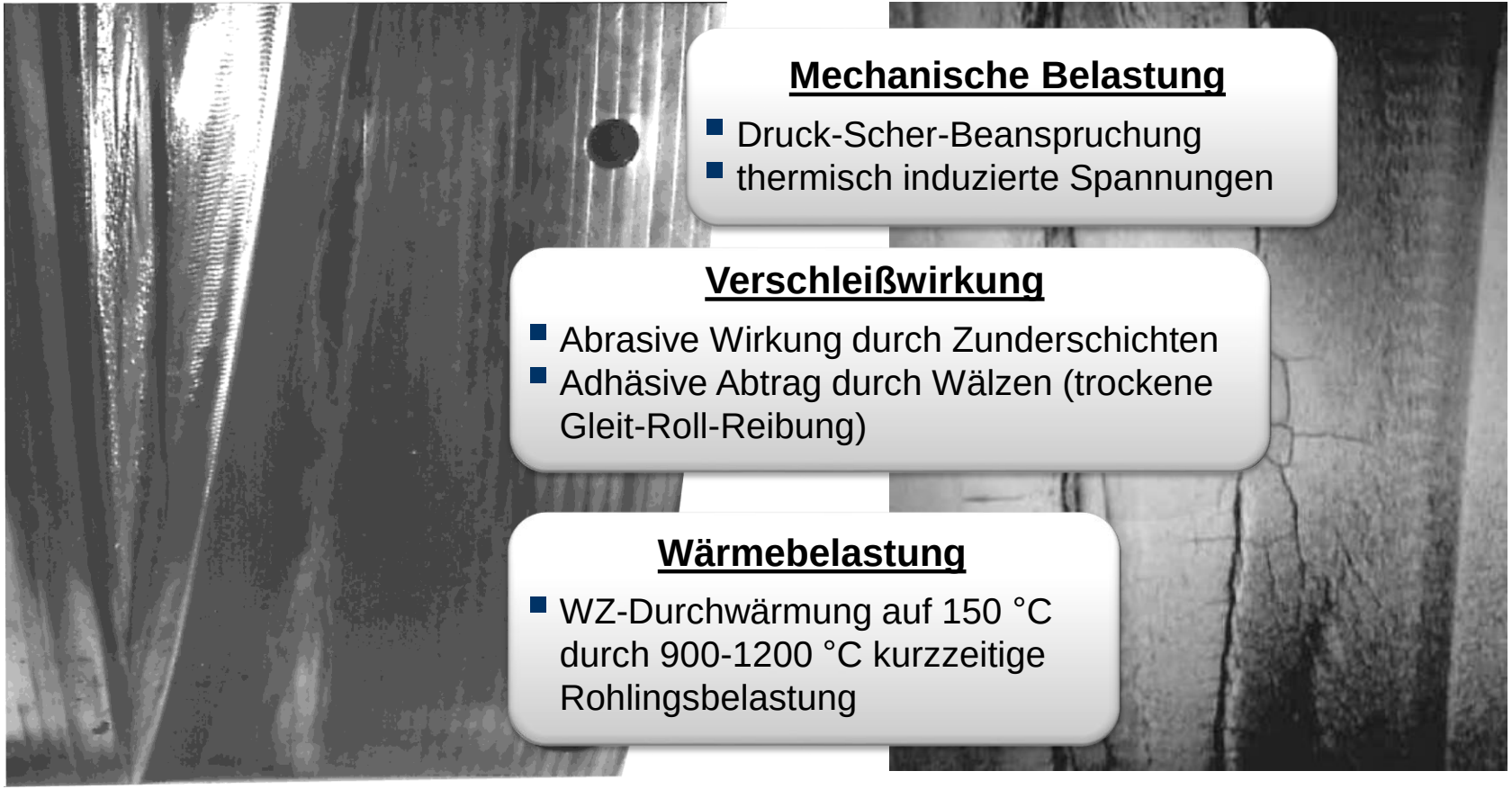


Linearschweißen



Linearschweißen - Härteprofile an geschweißten Schichtkonturen

Demonstrator-Bauteil – Querwalzwerkzeug komplexe Beanspruchungen und Verschleiß



Mechanische Belastung

- Druck-Scher-Beanspruchung
- thermisch induzierte Spannungen

Verschleißwirkung

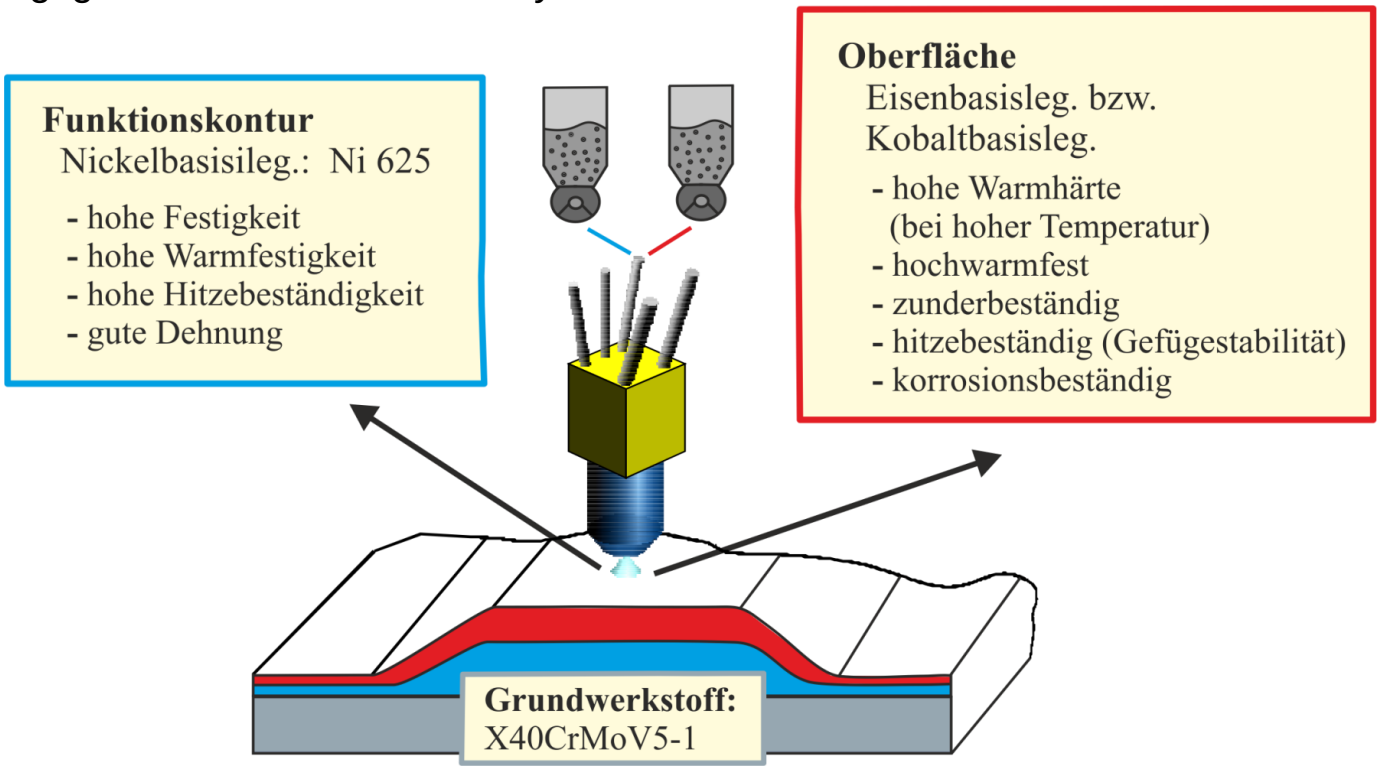
- Abrasive Wirkung durch Zunderschichten
- Adhäsive Abtrag durch Wälzen (trockene Gleit-Roll-Reibung)

Wärmebelastung

- WZ-Durchwärmung auf 150 °C durch 900-1200 °C kurzzeitige Rohlingsbelastung

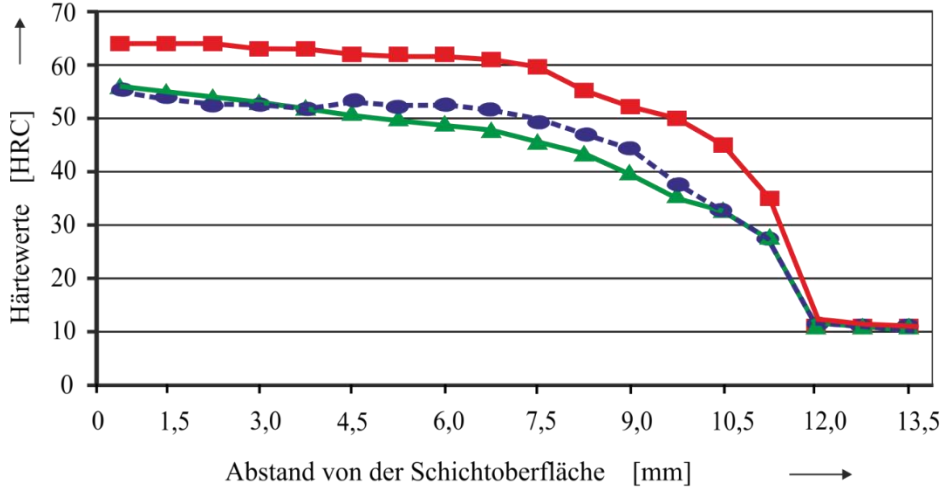
Beanspruchungsgerechtes Schichtaufbausystem – Demonstrator-Bauteil

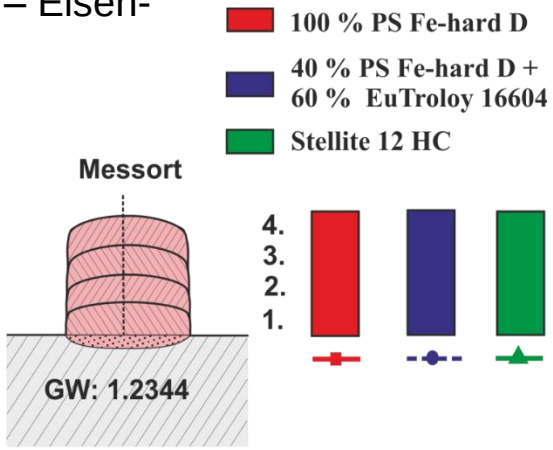
- Einsatz von unterschiedlichen Werkstofflegierungen für Herstellung eines beanspruchungsgerechten Schichtaufbausystems

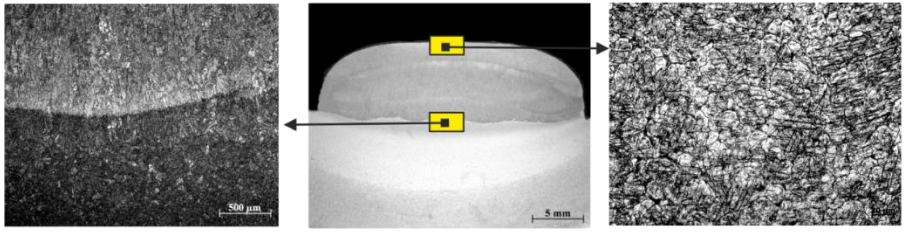


Charakterisierung – plasma-pulver-auftraggeschweißte Schichten

- Härteverlauf plasma-auftraggeschweißter Schichten – Eisen- und Kobaltbasislegierungen



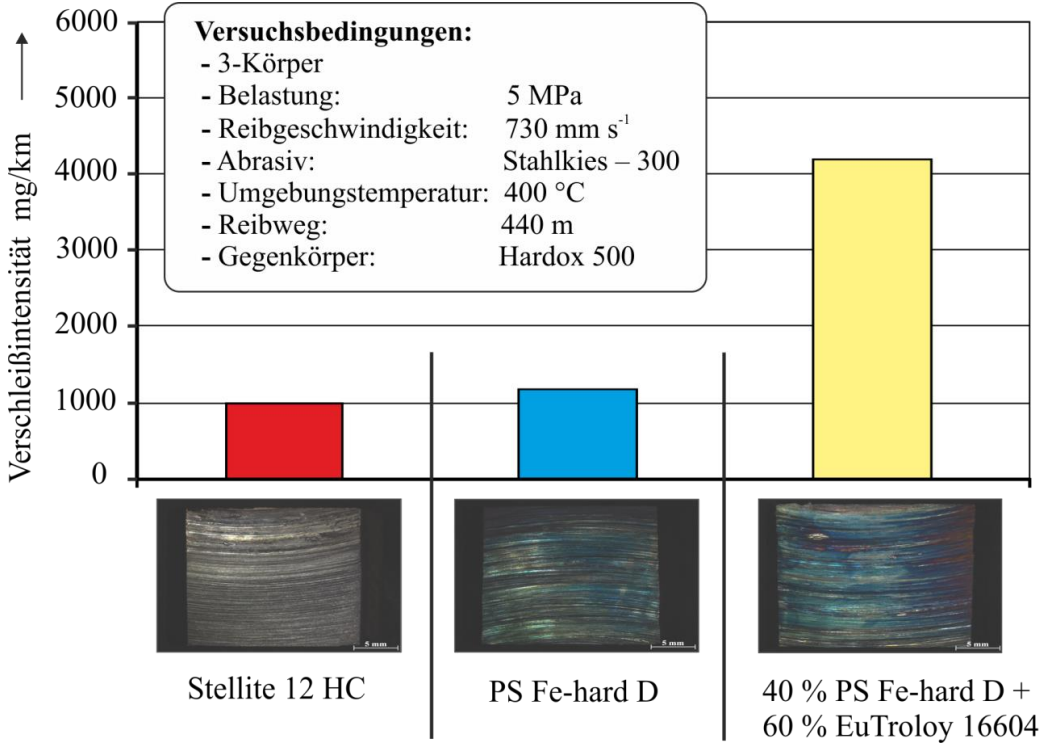




Gefügeaufbau:
Plasma-auftraggeschweißter Schichten – Eisenbasislegierung PS Fe-hard D

Charakterisierung – plasma-pulver-auftraggeschweißte Schichten

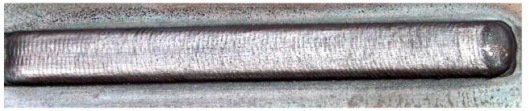
- Untersuchungsergebnisse – 3-Körper-Abrasiv-Gleitverschleiß an plasma-pulver-auftraggeschweißten Schichten

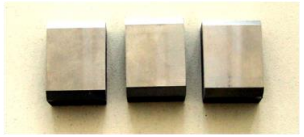


Plasma-auftraggeschweißte Pendelnähte

Prüfprobenabmessung [mm]:	**20 x 25**
GW:	**X40CrMoV5-1**
Probenabmessungen [mm]:	**20 x 150 x 250**
Nahtbreite: [mm]	**30**

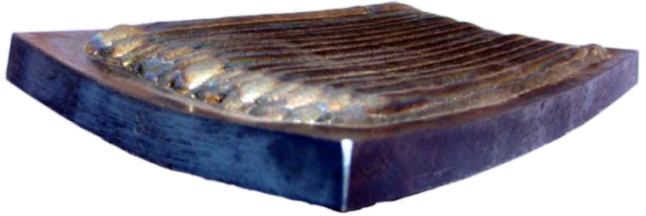
PS Fe-hard D





Simulation – Schweißverzug und -eigenspannung – Probleme/Lösungsansatz

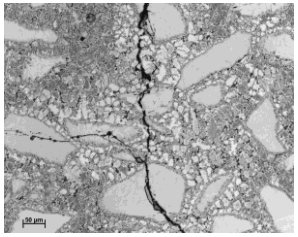
- Durch Aufbringen von Schweißprozessenergie entstehen Schrumpfungen – Verformungen / Eigenspannungen an Bauteilen aufgrund unterschiedlicher:
  - thermomechanischen Eigenschaften und
  - Bauteilabkühlbedingungen



- **Möglichkeiten für Verzug-/Spannungsminimierung**:
  - Bauteilkonstruktive Gestaltung,
  - Werkstofflicher Einsatz,
  - Fertigungsmöglichkeit:
    - Vorbereitungstechnolg. (Bauteilvorwärmen,-festeinspannen)
    - Ausführungstechnolg. (Optimierung der Prozessparameter, Abkühlbedingung, Schweißfolge)
    - Nachbehandlung (Wärmebehandlung

Aufbau eines thermomechanischen FE-Modells für:

- Ermittlung von Bauteiltemperaturfeldern
- Vorausbestimmung/Minimierung von Verzug und Eigenspannungen plasma-auftraggeschweißter Bauteile



Thermomechanisches FE-Modell

- Instationäre und nichtlineare Wärmebilanzgleichung – Vernachlässigung der Schmelzbadkonvektion

$$c\rho v_s \frac{\partial T}{\partial x} = \nabla(\lambda \nabla T) + Q_B$$

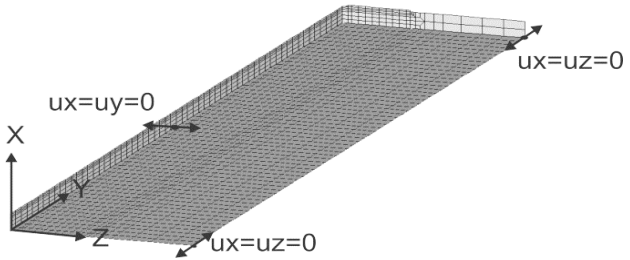
- **Ellipsoidwärmequelle – Goldakquelle**

- Wärmeübergang und -strahlung zur Umgebung (unterschiedlich für Auflage, Schmelzbadumgebung mit Gasströmung und Oberfläche zur Umgebung)

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0) + \varepsilon C_0 (T^4 - T_0^4)$$

- **Elastisch-plastische Deformationen:** $d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{el\ ij} + d\varepsilon_{pl\ ij} + d\varepsilon_{th\ ij} + d\varepsilon_{u\ ij} + d\varepsilon_{up\ ij}$
  - inkrementelle Gesamtdehnung
  - Fließgesetz nach von Mises
  - mechanische Randbedingungen

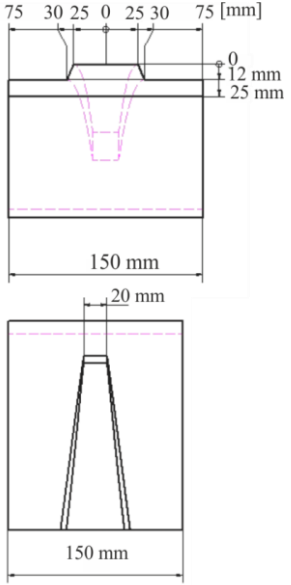
Mechanische Randbedingungen (Ausschluss von Starrkörperbewegungen)

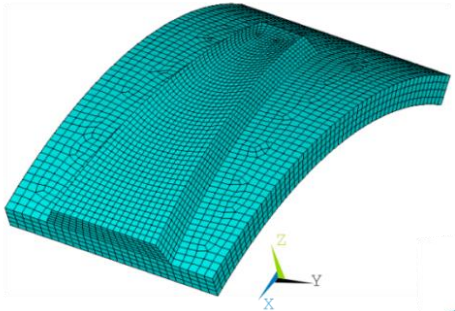


Struktursimulation – Modellierung
Bauteilgeometrie – Werkstoffdaten – Schweißprozessenergie

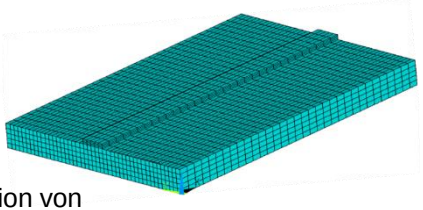
- Bauteilgeometrien:
  - 1. Segment des Rundbacken-Querwalzwerkzeugs
  - Bleche – Modellverifikation: 20 x 150 x 250 mm
- Werkstofflegierungen:
  - GW: Warmarbeitsstahl X40CrMoV5-1
  - ZW: Eisenbasisleg. (PS Fe-hard D) als Hartschicht und Nickelbasisleg. (Ni625) für Aufbau der WZ-Konturen
- Werkstoffdaten:
  - Dichte, Wärmekapazität,
  - Wärmeleit., Ausdehnungskoeffizient
  - Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl,
  - Fließ- und Verfestigungsverhalte (kinematisches Verfestigungsmodell – Fließgesetz).
- Schweißprozessenergie:
  - Schweißstrom, -spannung, -geschwindigkeit,
  - Prozessgase, Pendelgeschwindigkeit und Verweilzeit
  - Anzahl der Auftragschichten.

CAD-Werkzeugmodell





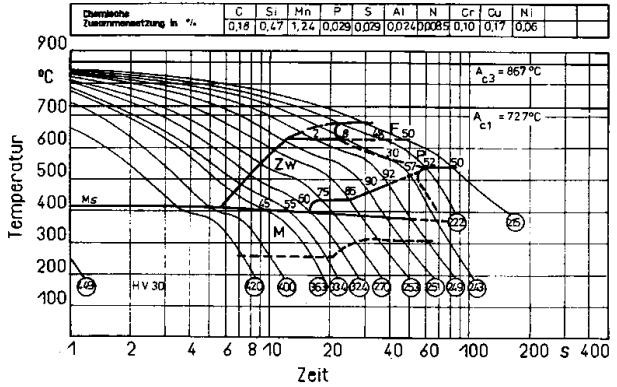
FE-Werkzeugmodell



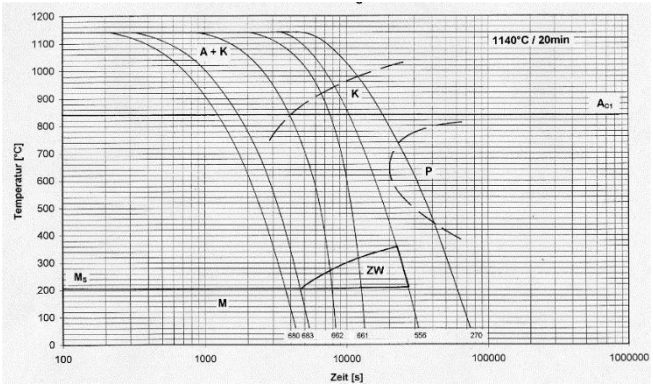
FE-Modell – Verifikation von Temperaturfeld/Spannungen

Material-Modellierung

- Erforderliche Materialdaten (je nach betrachtetem Problem):
  - Thermophysikalisch: Dichte, Wärmeleitzahl, -kapazität,
  - Mechanisch: E-Modul, Querkontraktionszahl, Wärmedehnzahl,
  - Fließspannung, Verfestigungskurve,
  - Metallurgisch: Phasenkinetik, ZTU-Schaubilder,
  - Rechnung ohne Phasenkinetik.



- Notwendig war:
  - temperatur- und phasenabhängige Daten (RT bis $T>T_m$)
  - ZTU-Diagramme für Schweißwärmezyklen



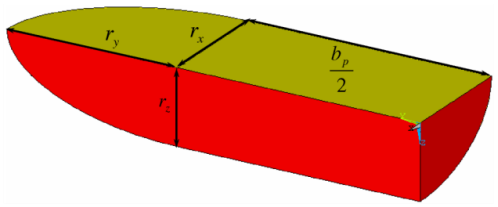
Modellierung – Schweißwärmequelle – Ellipsoidquellenmodell

- Ellipsoidwärmequelle – Goldakquelle:
  - Gaußverteilte Wärmestromdicht
  - Quellenparameter: Brennerleistung, Periodendauer
  - Pendelgeschwin., -bereite und Verweilzeit
  - Lokales Quellenkoordinatensystem

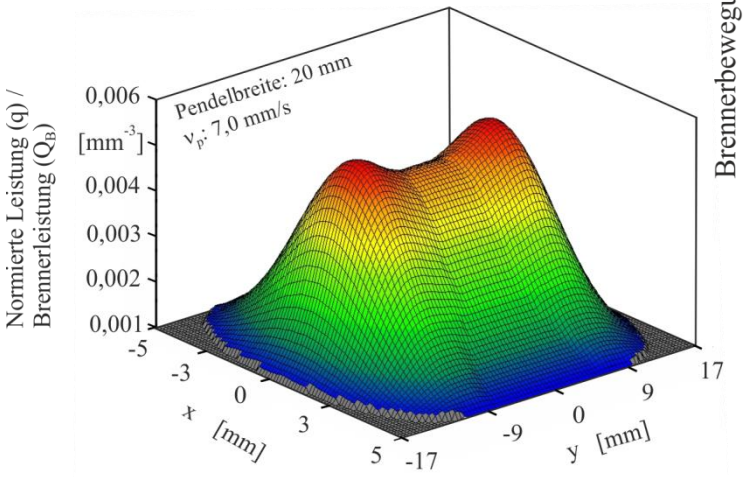
$$q(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}Q_B}{C\, r_x r_y r_z \sqrt{\pi^3}} \exp\left[-\frac{3x^2}{r_x^2} - \frac{3y^2}{r_y^2} - \frac{3z^2}{r_z^2} \right]$$

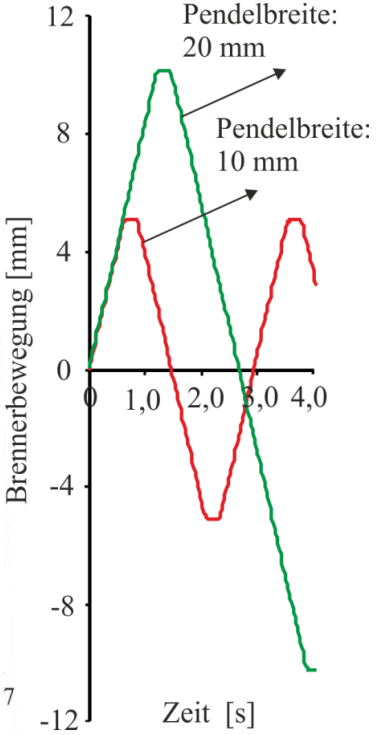
- Messung der Pendelbewegung idealisierte Kurve
- Bestimmung über eine Periode der Pendelbewegung
- als Gleichung programmiert

$$q(x,y,z) = \frac{1}{T_P} \int_0^{T_P} (x, y_P(t) - y, z)\, dt$$



Schweißgutvolumen durch Quellstärke

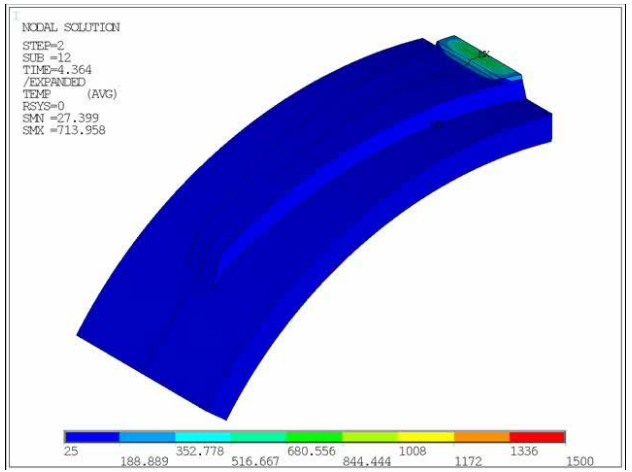


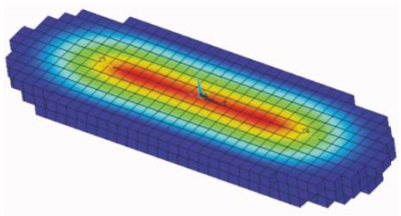


Ellipsoidwärmequelle – Quellstärkenverteilung

Simulationsergebnisse – Temperaturfeldverteilung
Verifikation des thermischen FE-Teilmodells

Temperaturfeldverteilung während der Schweißung zweier Auftragschichten

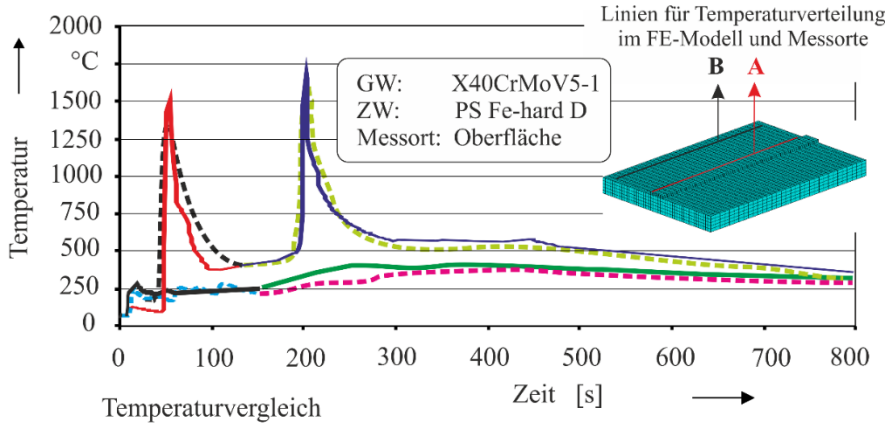




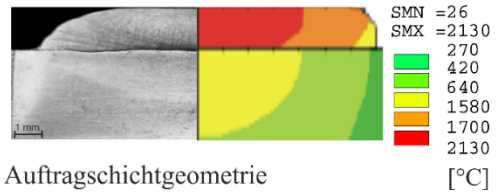
Wärmequellenmodell

	1. Pendellage		2. Pendellage	
	A = Schweiß-lagerand	B = GW	A = Schweiß-lagerand	B = GW
FE-Berechnung	—	—	—	—
Messung	···	···	···	···

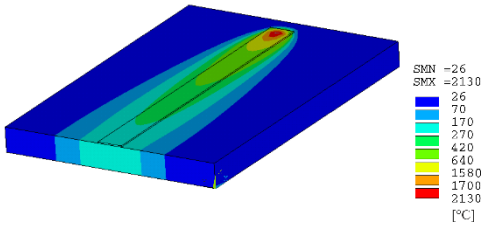
Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen (≤ 12 %)



Temperaturvergleich

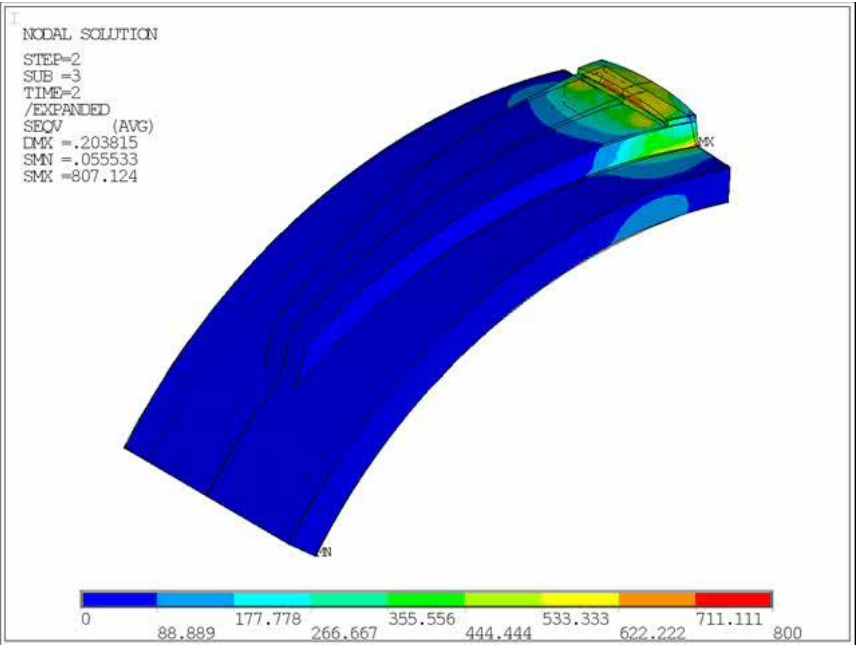


Auftragschichtgeometrie [°C]

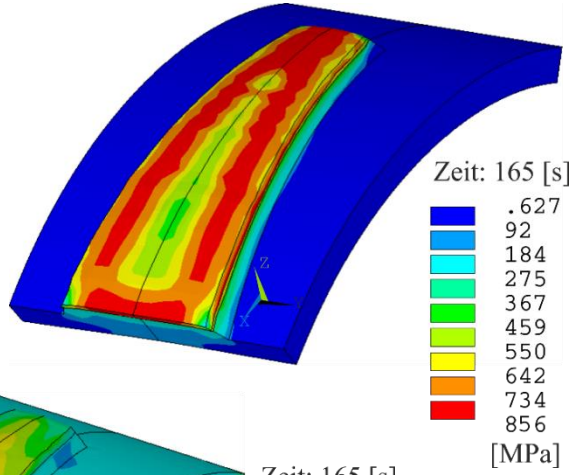


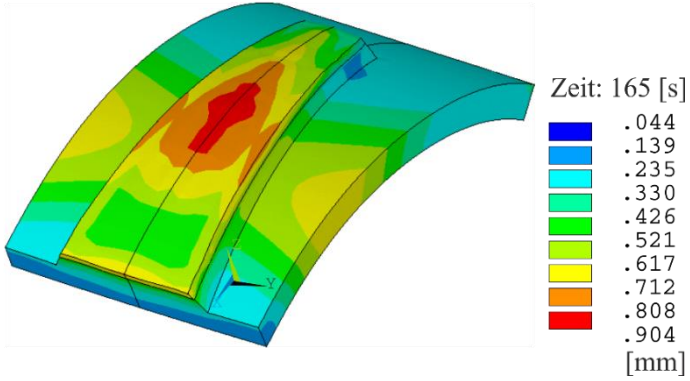
Simulationsergebnisse – Schweißverzug und -eigenspannungen

- Verteilung der Schweißeigenspannungen und -verformungen
  - GW: X40CrMoV5-1,
  - ZW: PS Fe-hard D
  - Anzahl der Schweißlagen: 4



Bauteilspannungen nach vollständiger Bauteilabkühlung

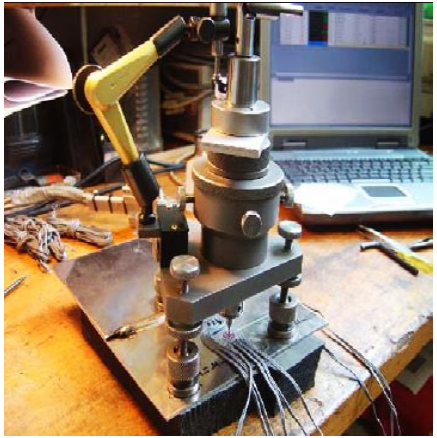


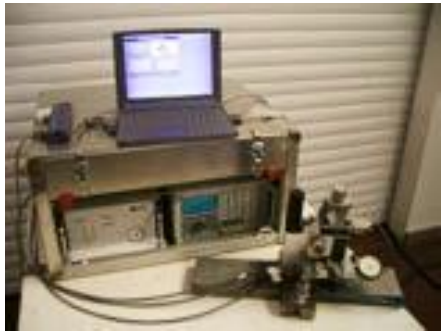


Verformungswerte senkrecht zur Bauteilebene nach vollständiger Bauteilabkühlung

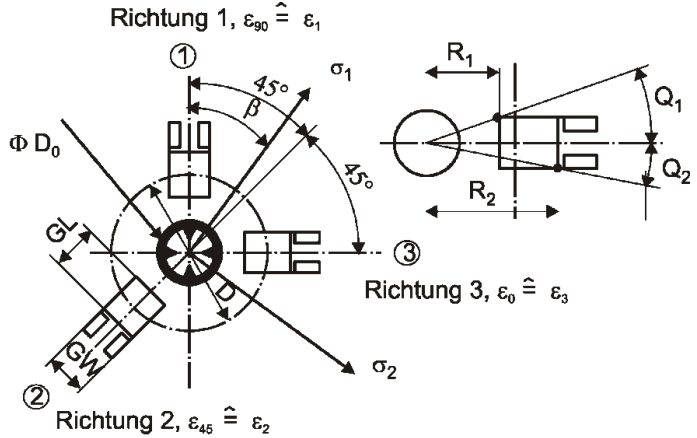
Experimente: Eigenspannungsmessung – Bohrlochmethode

- Eigenspannungsmessung an auftraggeschweißten Proben





Quelle: ·www.ifmt.tu-chemnitz.de



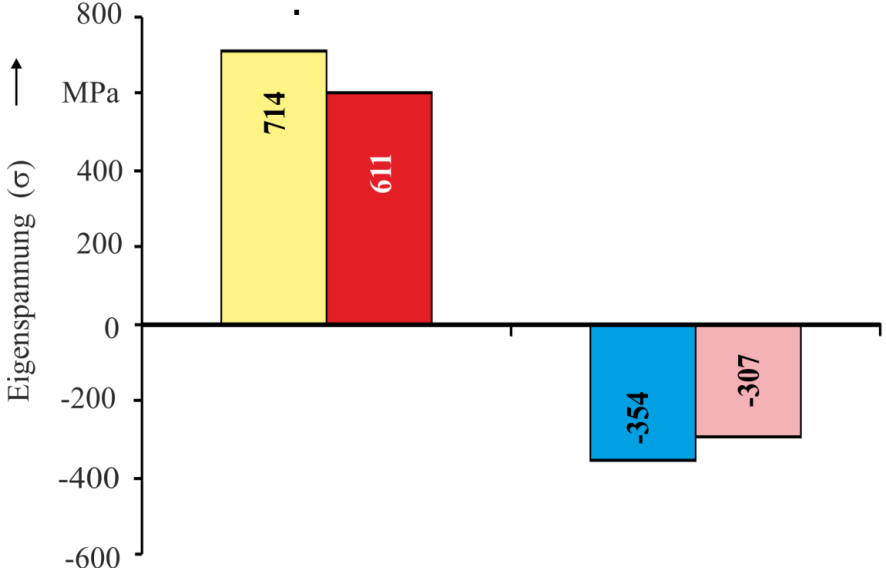
Richtungsbezeichnungen und geometrische Abmessungen der DMS-Bohrloch-Rosette

Eigenspannungs-analyse (Bohrvorrichtung, Kontrollsystem und Messverstärker, PC)

Auftraggeschweißte Probe

Simulationsergebnisse – Verifikation des mechanischen FE-Teilmodells

- Vergleich der berechneten mit den gemessenen Verformungs- und Spannungswerten (≤ 15 %)

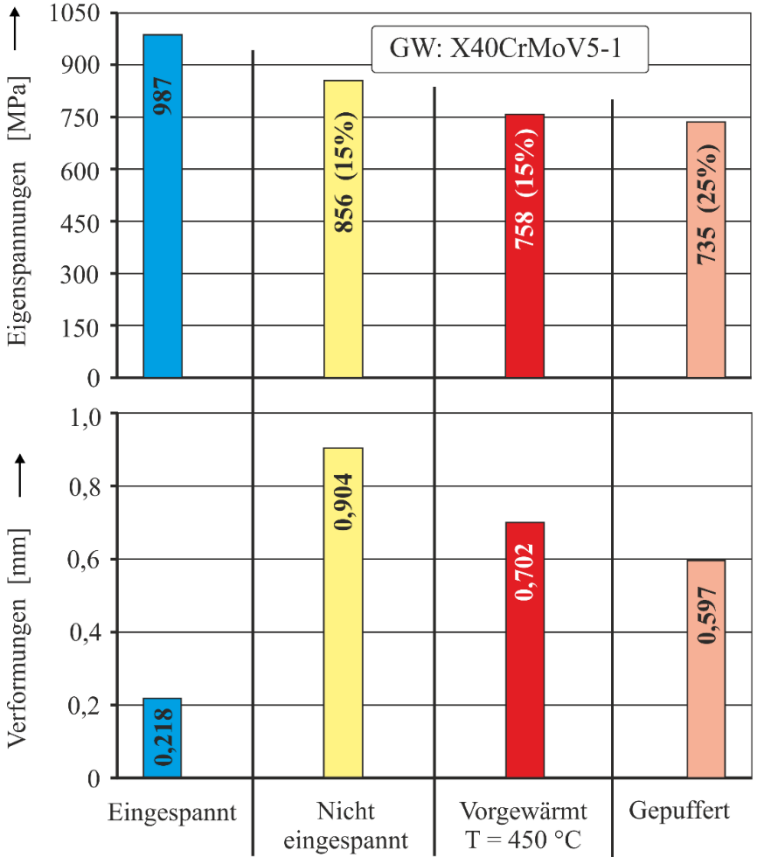


	FE-Berechnung	Messung
Längseigen-spannung		
Quereigen-spannung		

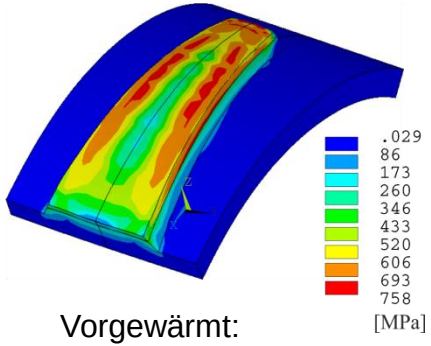
GW:	X40CrMoV5-1
ZW:	PS Fe-hard D
Pendellagenanzahl:	4
Probenabmessungen [mm]:	20 x 150 x 250
Messtiefe [mm]:	1,0
Messort:	Nahtoberfläche
Nahtbreite: [mm]	20

Pendellagen	FE-Berechnung		Messung	
	Durchbiegung	Bauteilwinkelverzug	Durchbiegung	Bauteilwinkelverzug
2	0,331	0,222	0,295	0,198
4	**0,575**	**0,619**	**0,514**	**0,551**

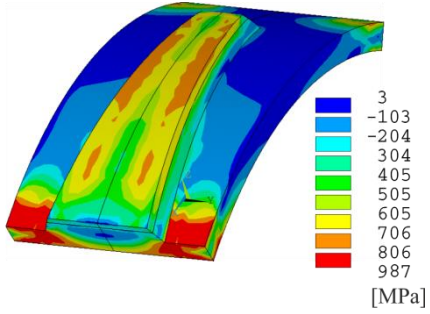
Werkstofflich-technologische Maßnahmen für Minimierung von Verzug/Eigenspannungen plasma-auftraggeschweißter Bauteile



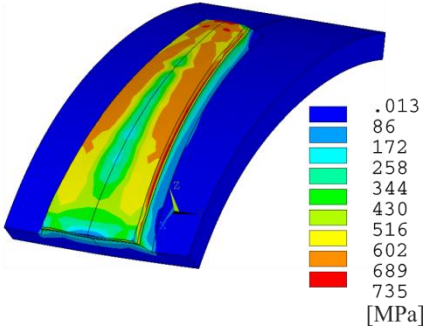
Zusatzwerkstoff
4-Pendelagen PS Fe-hard D
4-Pendelagen PS Fe-hard D
4-Pendelagen PS Fe-hard D
1-Pendellage Ni625 / 3-Pendellagen-PS Fe-hard D



Vorgewärmt:
T = 450 °C



Bauteil eingespannt



WZ-Konturen mit zähen Materialien aufgeschweißt

3D – Plasma - Auftragschweißen – Anwendungsbauteile

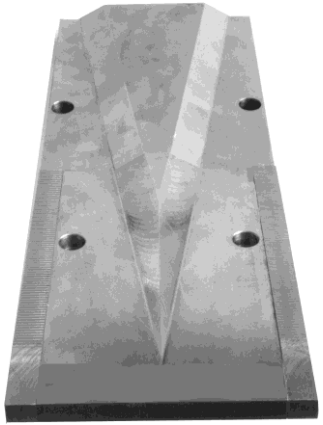
- Plasma-pulver-auftraggeschweißte WZ-Konturflächen

Prozesstechnologie – Durchführung

1. Segment eines Querwalzwerkzeugs

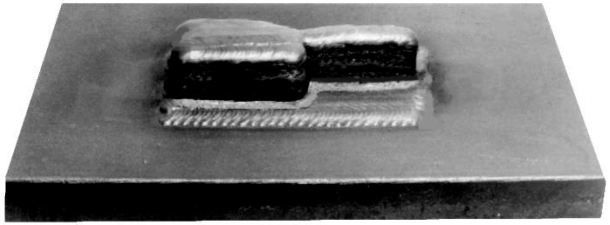
Nach Durchführung – Farbeindringprüfung

3D – Plasma - Auftragschweißen – Anwendungsbauteile

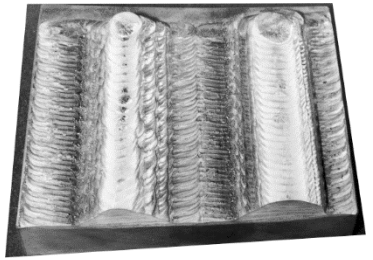


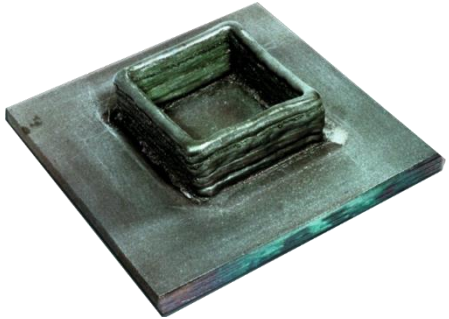
Funktionskonturen – Querwalzwerkzeug

Funktionsflächen – Druckgießwerkzeug



Funktionskonturen – Matrize/Stempel für Umformwerkzeugsatz





Verschiedene Bauteil-funktionskonturen

Zusammenfassung – Ausblick

- Unter Nutzung des additiven 3D Plasma-Auftragschweißens ist es möglich, komplexe Bauteilgeometrien mit vordefinierten thermomechanischen Eigenschaften herzustellen.
- Für Vorausbestimmung von Verformungen und Eigenspannungen plasma-auftraggeschweißter Bauteile wurde ein thermo-mechanisches FE-Modell erfolgreich aufgebaut und validiert.
- In Abhängigkeit von verwendeten Werkstofflegierungen entstehen an 3D – auftraggeschweißten Bauteilstrukturen komplexe Schrumpf-, und Umwandlungsspannungen im Bereich der Schweißkonturen und des Grundkörperwerkstoffe.
- Der Vergleich zwischen Berechnungen und Messungen (≤ 15%) zeigt dem Nachweis des praktischen Anwendungspotenziales des Simulationsmodells.
- Eine Minimierung der Verformungen/Eigenspannungen an plasma-auftraggeschweißten Bauteilen durch Bauteilvorwärmen, -festeinspannen, Aufbauen der Bauteilkonturen mit zähen Schichtlagen nachgewiesen.
- Eine Umsetzung der gewonnen Kenntnisse in die Praxis mittels Herstellung hoch beanspruchbarer Bauteilgeometrien mit definierten Schichteigenschaften – Werkzeugkonturen wurde erbracht.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

PD Dr.-Ing. habil. Khaled Alaluss
khaled.alaluss@mb.tu-chemnitz.de