



Abschlussbericht

10.03.2016

Aachen



OpVibFE

Simulation der Eigenspannungsreduzierung von Bauteilen durch Vibrationsentspannung

Dipl.-Ing. D. Witter

Dr.-Ing. R. Schelenz

Univ. Prof. Dr.-Ing. G. Jacobs



Gliederung

- Einleitung
- Simulation des Schweißprozesses
- Vibrationsanalyse
- Simulation des VSR – Verfahrens
- Vergleich VSR – Verfahren & Spannungsarmglühen
- Vibrationsentspannung eines Maschinenträgers

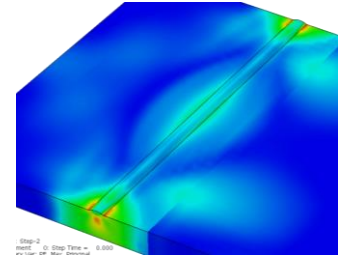
Einleitung

Definition: Eigenspannungen

Eigenspannungen: Spannungen in einem abgeschlossenen System auf das keine äußeren Lasten wirken¹

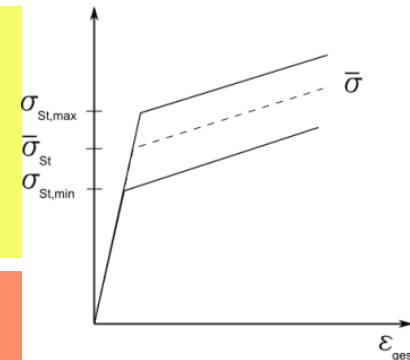
Eigenspannungen 1. Art ¹

- homogen über große Werkstoffbereiche z.B. bei **thermischen Eigenspannungen**
 - Beeinflussung des inneren Kräftegleichgewichts **bewirkt immer** eine makroskopische Maßänderung des Körpers
- Beschreibung der Eigenspannungen durch das Hookesche Gesetz



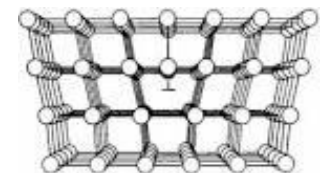
Eigenspannungen 2. Art ¹

- homogen über kleine Werkstoffbereiche (Körner) z.B. bei **Streckgrenzen-Anisotropie**
- Beeinflussung des inneren Kräftegleichgewichts **kann** eine makroskopische Maßänderung des Körpers **bewirken**



Eigenspannungen 3. Art ¹

- inhomogen über kleinste Werkstoffbereiche (mehrere Atomabstände) z.B. durch lokale Gitterbaufehler wie **Versetzungen** oder **eingebaute Fremdatome**
 - Beeinflussung des inneren Kräftegleichgewichts **bewirkt keine** makroskopische Maßänderung des Körpers
- Keine Beschreibung der Spannungen durch das Hookesche Gesetz

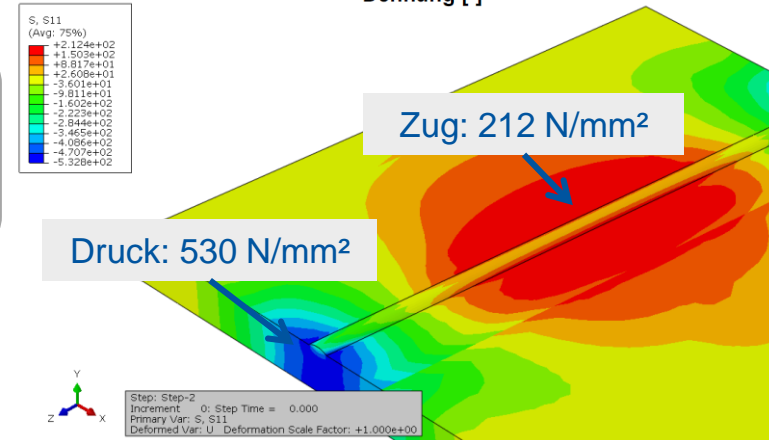
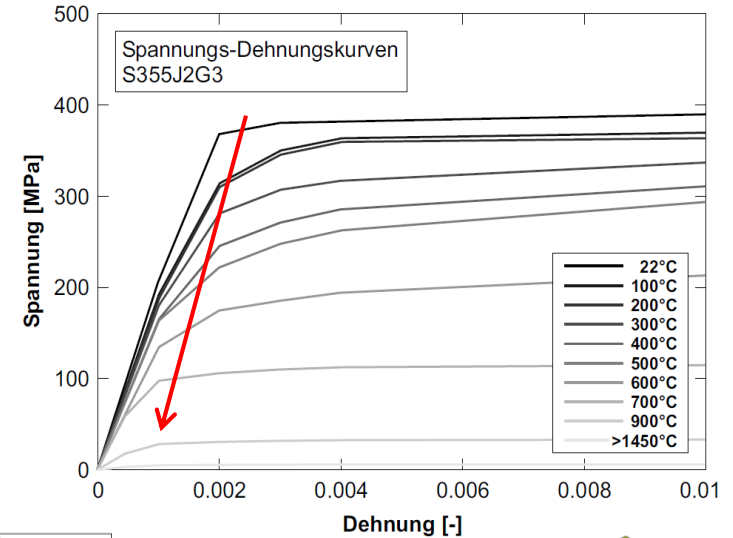
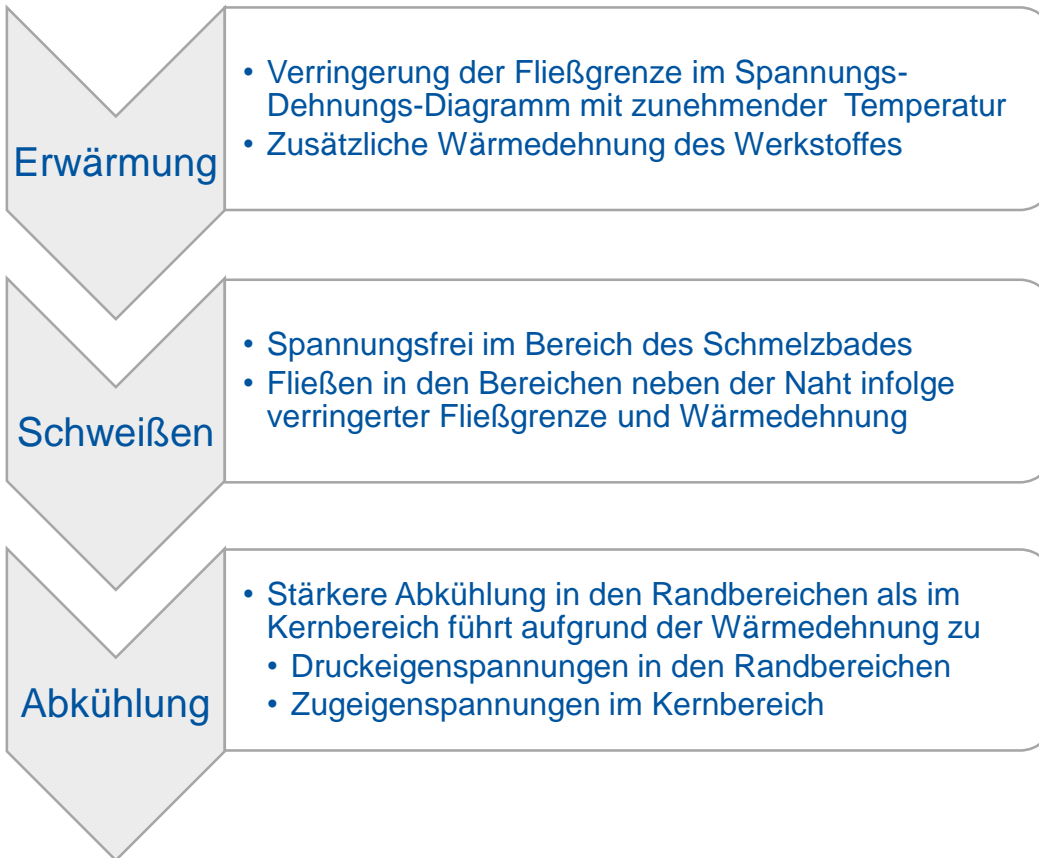


1) Wolfstieg U., Macherauch, E.: *Ursachen und Bewertung von Eigenspannungen* Chemie-Ing.-Techn. Nr. 45 (1973)

Einleitung

Entstehung thermischer Eigenspannungen

Mechanisches Werkstoffverhalten beim Schweißen



Einleitung

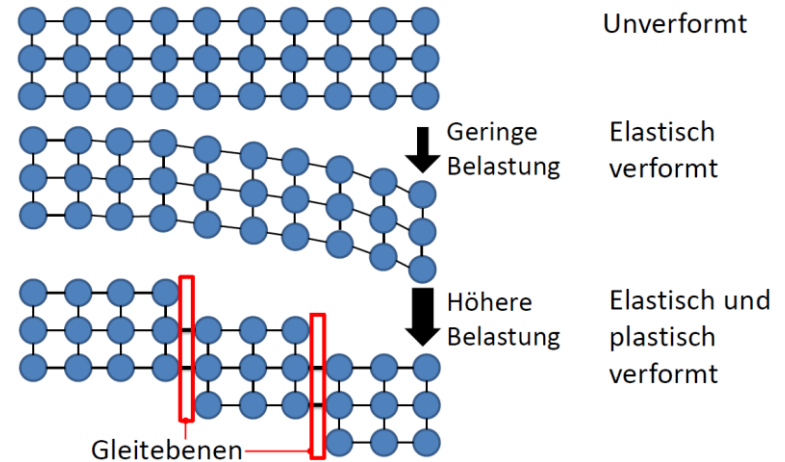
Reduzierung von Eigenspannungen

Prinzip der Relaxation

- Lokale Überschreitung der Streckgrenze
- Dadurch lokales plastisches Fließen des Werkstoffes
- Abbau von Eigenspannungen

Thermisch (Spannungsarmglühen)

- Verringerung der Streckgrenze durch erwärmen unterhalb der Rekristalisierungstemperatur
- Dadurch lokales fließen, dort wo Eigenspannungen sind
- entspannen des Werkstoffes
- Homogenes Abkühlen erforderlich



Mechanisch

- Gezielte Lasteinwirkung
- Lokale, plastische Deformation besonders in Bereichen mit vorhandenen Eigenspannungen
- dadurch lokale Entlastung des Werkstoffes

Beispiele:

Recken, Vibrationsentspannung (VSR), ect.

Einleitung

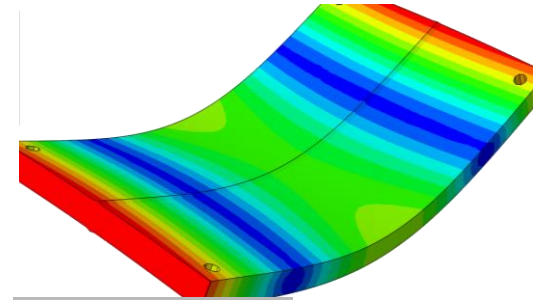
Ansatz des VSR-Verfahrens

Voraussetzungen

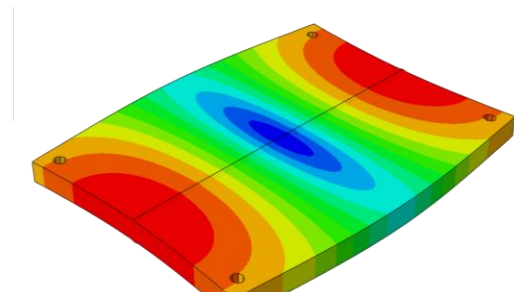
- Bei dynamischen Anregungen eines elastischen Systems verformt sich dieses frequenzabhängig.
- Träge, elastische Systeme weisen Eigenfrequenzen und Eigenformen (Eigenmoden) auf.
- Wird ein träges, elastisches System mit seiner Eigenfrequenz angeregt, verstärken sich die Schwingungen des Systems → Resonanz

Idee des Vibrationsentspannungsverfahrens¹:

- Lokale Überschreitung der Fließgrenze des Werkstoffes durch Biegeschwingungen in Bereichen mit hohen Eigenspannungen
- Dadurch plastisches Fließen des Werkstoffes
- Infolge dessen lokale Entspannung und Abbau von Eigenspannungen
- ➔ Biegemoden in Richtung der Schweißnaht sind hilfreich



1. Eigenmode



19. Eigenmode

1) Yang, Jung, Yancey – Finite Element Modeling of Vibration Stress Relief after Welding,“ in s Presented at the American Society of Materials, 2005.

Einleitung

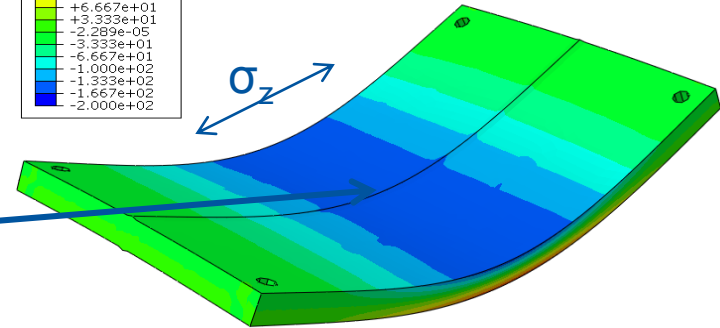
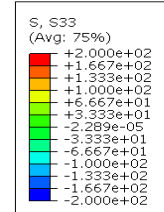
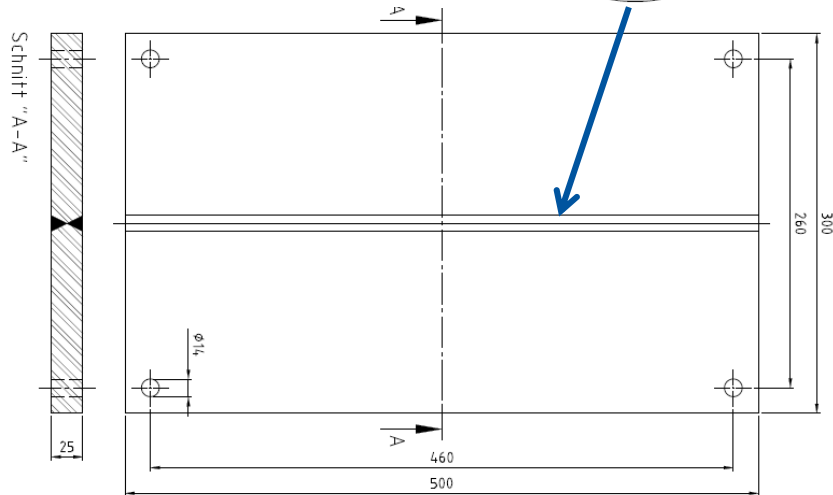
Biegemoden des Probekörpers

Geometrie des Probekörpers

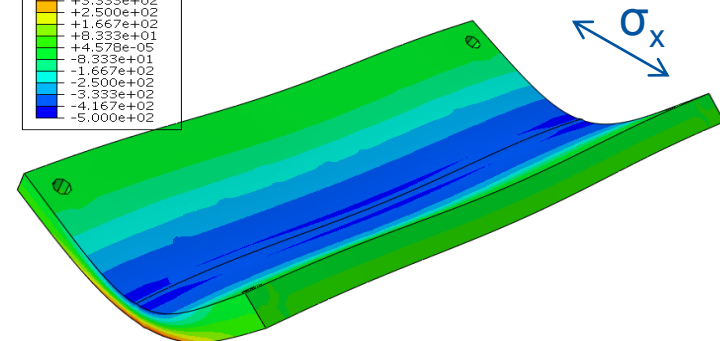
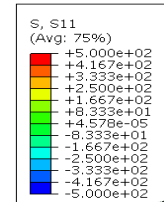
Größe: 500 mm x 300 mm x 25 mm

Masse: 29,4 kg

Detail "X"
(M 2 : 1)



1. Mode: Biegung quer zur Schweißnaht
 $f = 534 \text{ Hz}$, $\sigma_x \approx \sigma_y \approx 0$



5. Mode: Biegung in Richtung der Schweißnaht
 $f = 1479 \text{ Hz}$, $\sigma_y \approx \sigma_z \approx 0$

Biegemoden verursachen Beigespannungen in der Probe

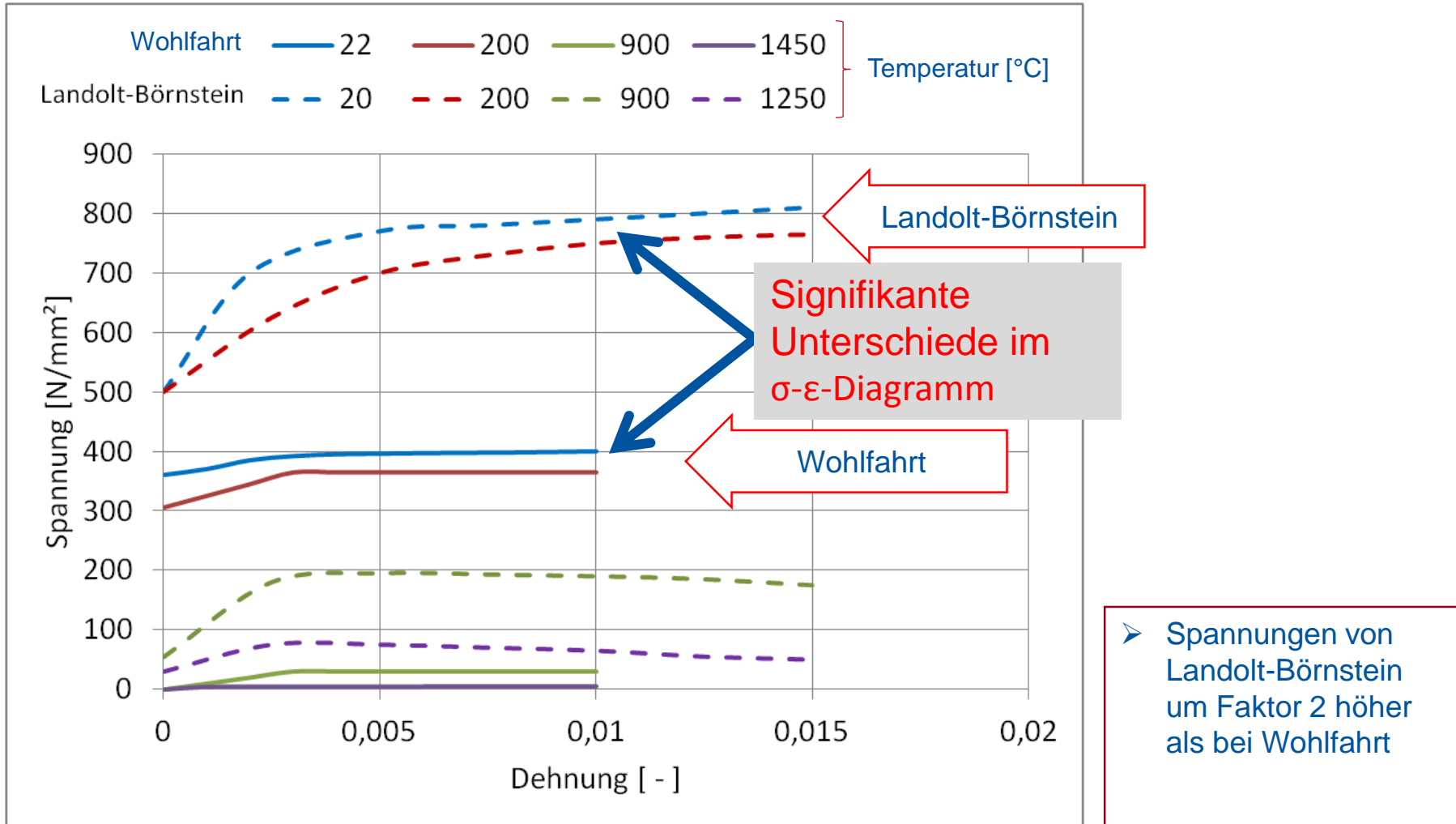


Gliederung

- Einleitung
- Simulation des Schweißprozesses
- Vibrationsanalyse
- Simulation des VSR – Verfahrens
- Vergleich VSR – Verfahren & Spannungsarmglühen
- Vibrationsentspannung eines Maschinenträgers

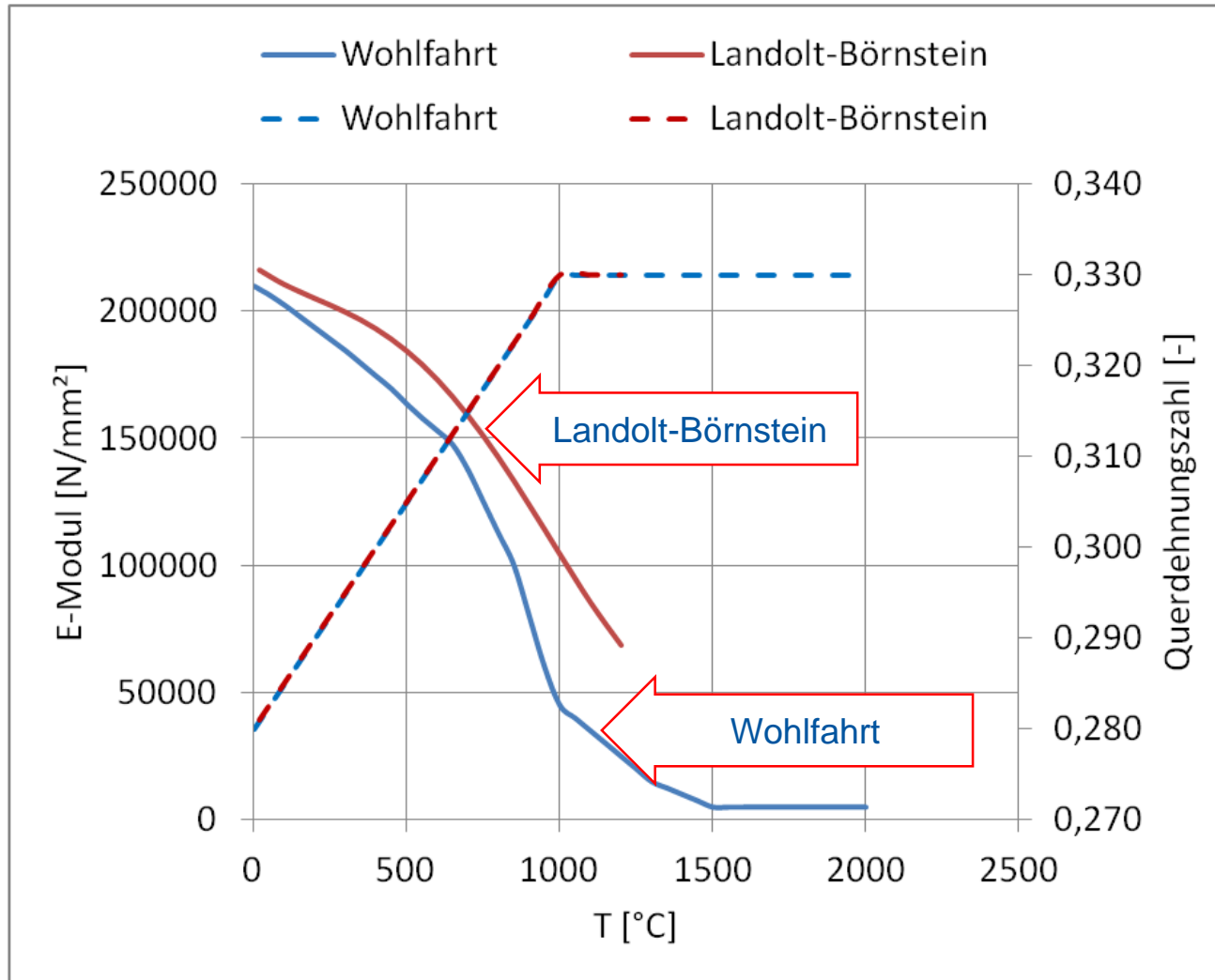
Simulation des Schweißprozesses

Werkstoffkennwerte S355 J2G3



Simulation des Schweißprozesses

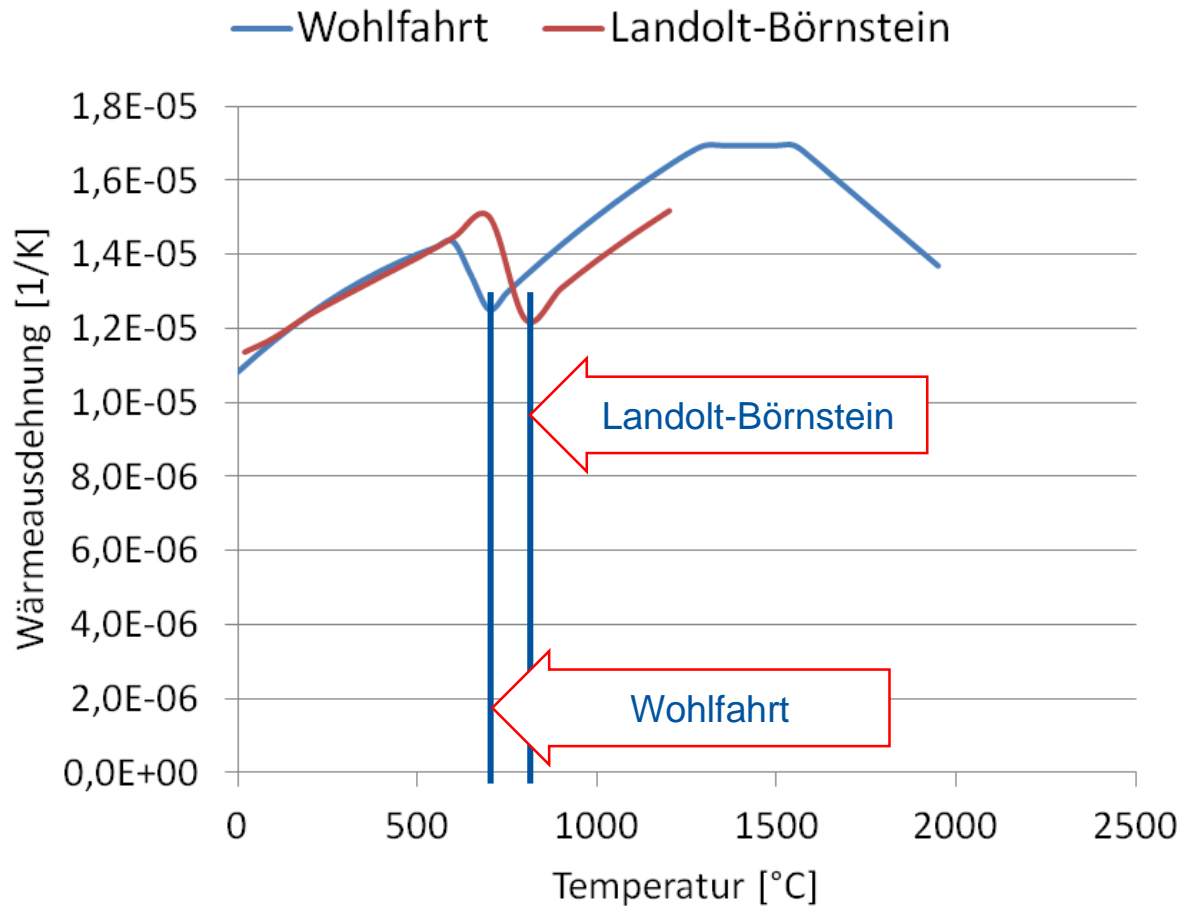
Werkstoffkennwerte S355 J2G3



- Wohlfahrt deckt den größeren Temperaturbereich ab
- E-Modul von Wohlfahrt ist geringer als bei Landolt-Börnstein

Simulation des Schweißprozesses

Werkstoffkennwerte S355 J2G3



- Gefügeumwandlung Ferrit + Perlit → Austenit erfolgt bei Wohlfahrt bereits bei ca. 720 °C

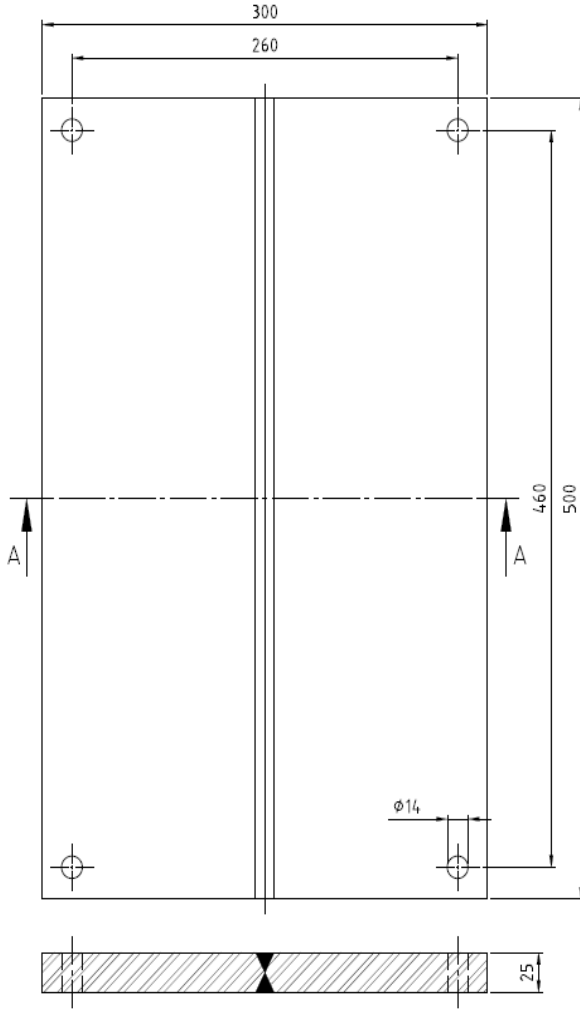
(800 °C bei Landolt-Börnstein)

- Signifikante Unterschiede der Werkstoffangaben je nach Autor
- Verwendung der Werkstoffkennwerte nach **Wohlfahrt** aufgrund
 - Größerer Temperaturbereich
 - Geringere plastische Kennwerte

Simulation des Schweißprozesses

Modellaufbau

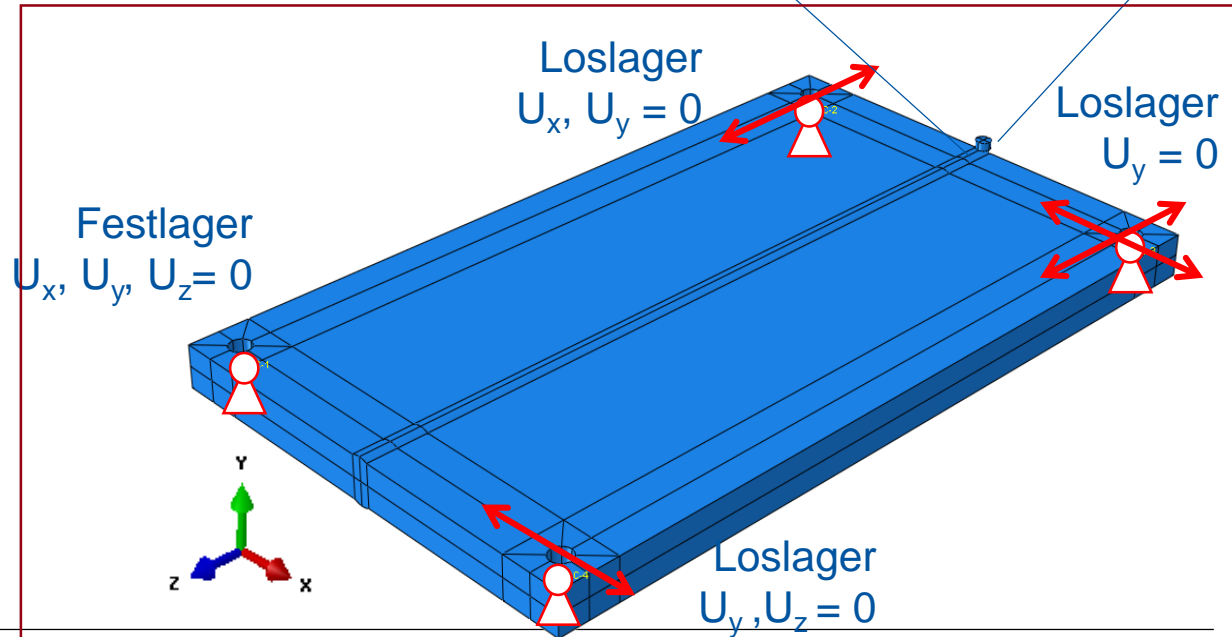
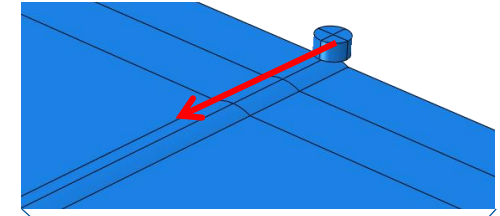
Geometrie (nach VSR-Zeichnung)



Randbedingungen

Die Probenplatte wird an den vier Bohrungen so fixiert, dass sie sich eben und spannungsfrei ausdehnen kann.

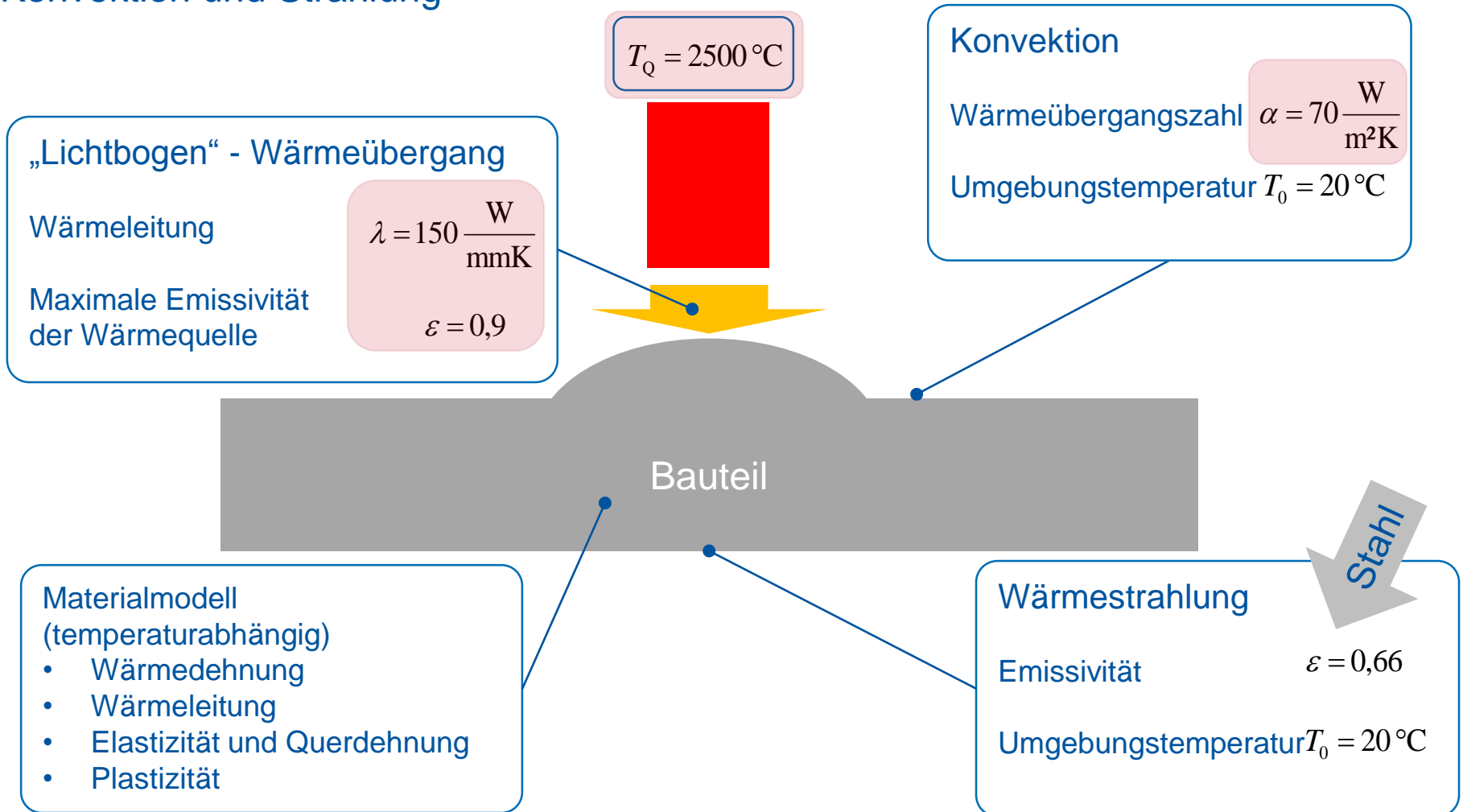
Temperatur Wärmequelle: **2500 °C**
Schweißgeschwindigkeit: **5 mm/s**



Simulation des Schweißprozesses

Modellaufbau

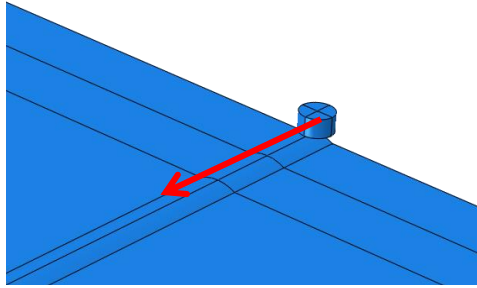
Konvektion und Strahlung



Simulation des Schweißprozesses

Modellaufbau

Thermische Belastung - Simulationsverlauf

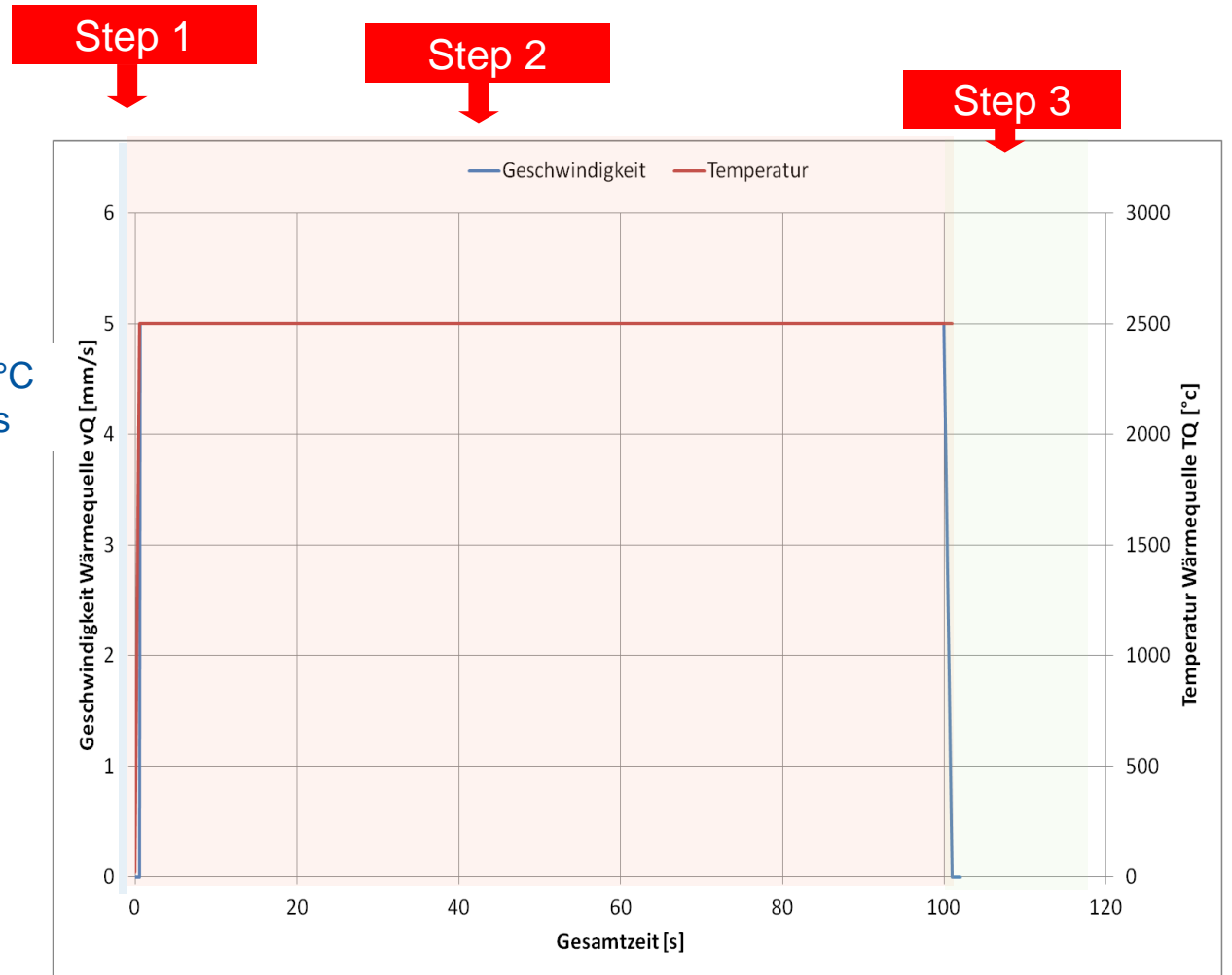


Temperatur Wärmequelle: 2500 °C
Schweißgeschwindigkeit: 5 mm/s

Step 1: Initialisierung
Erwärmen der Wärmequelle

Step 2: Schweißvorgang
Verschiebung der
Wärmequelle
Entlang der Schweißnaht

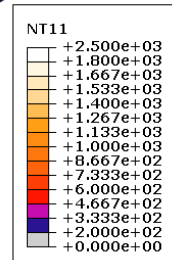
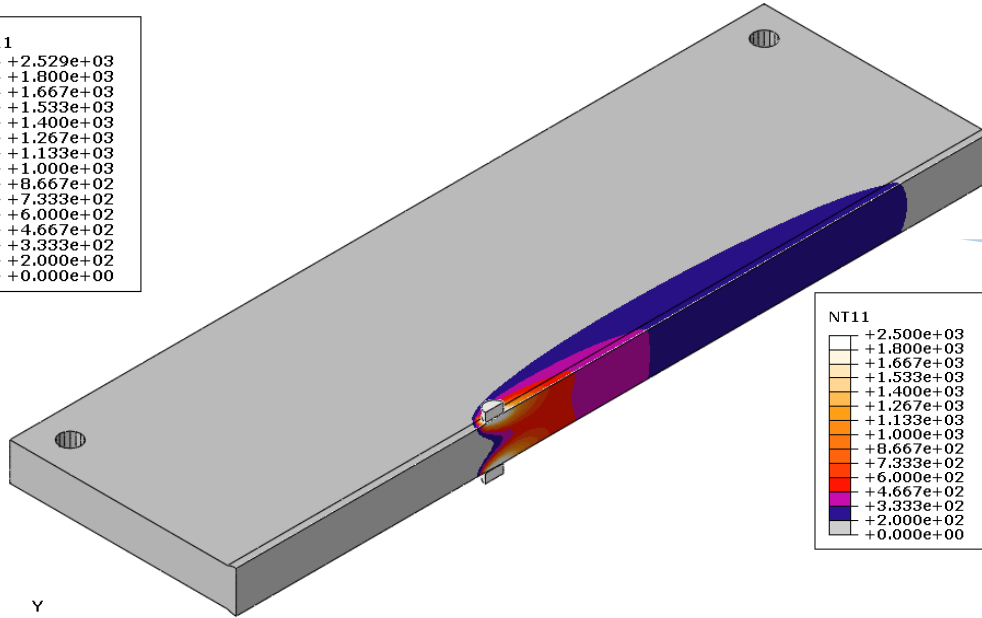
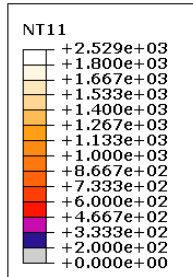
Step 3: Abkühlphase
Abkühlung des Bauteils
durch
Konvektion und Strahlung



Simulation des Schweißprozesses

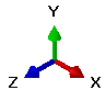
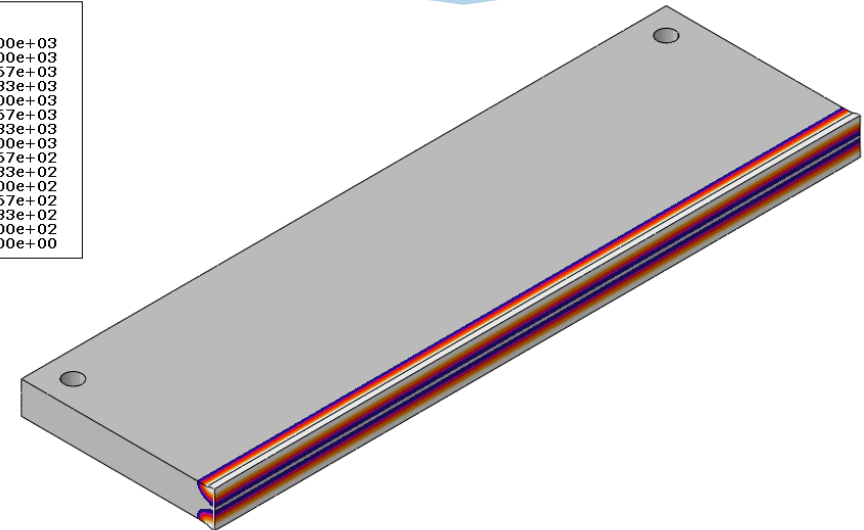
Ergebnisse

Zwei Varianten



Variante 2:

- „Linienschweißen“
- Ober- und Unterseite zeitgleich
- Direkter Wärmeeintrag durch thermische Randbedingung entlang der gesamten Schweißnaht



Step: Welding
Increment 565; Step Time = 82.27
Primary Var: NT11
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



Step: Easy-Welding
Increment 26; Step Time = 2.000
Primary Var: NT11
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

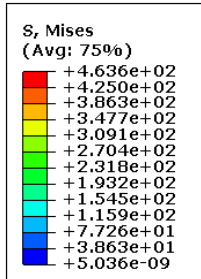
Variante 1:

- „Punktschweißen“
- Ober- und Unterseite zeitgleich
- Indirekter Wärmeeintrag durch thermischen Kontakt („Lichtbogen“)

Simulation des Schweißprozesses

Ergebnisse

Vergleichsspannung nach Mises – nach dem vollständigen Abkühlen ($T = 20\text{ °C}$)

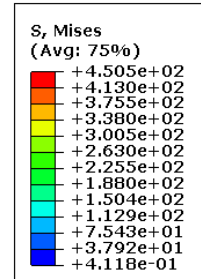
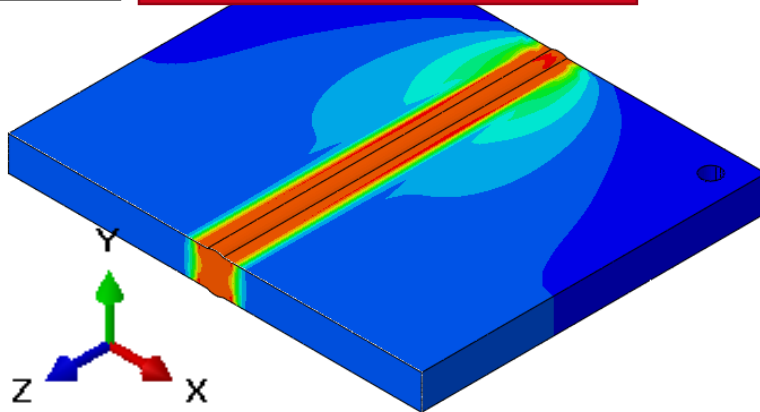


Variante 1

„Punktschweißen“

$t_{\text{sim}} \approx 3$ Tage

$S_{\text{max}} = 464\text{ N/mm}^2$

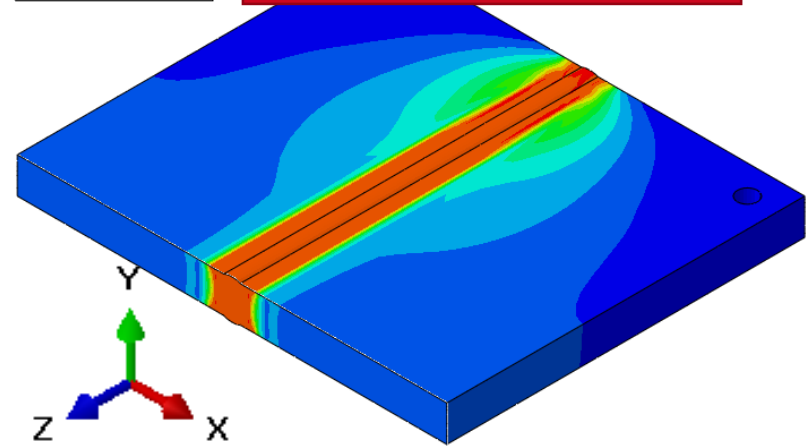


Variante 2

„Linienschweißen“

$t_{\text{sim}} \approx 3$ Stunden

$S_{\text{max}} = 451\text{ N/mm}^2$



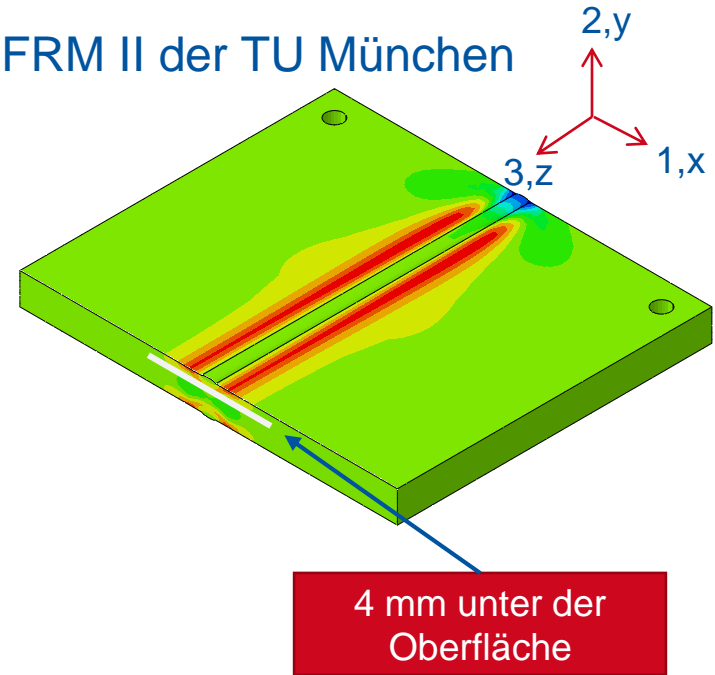
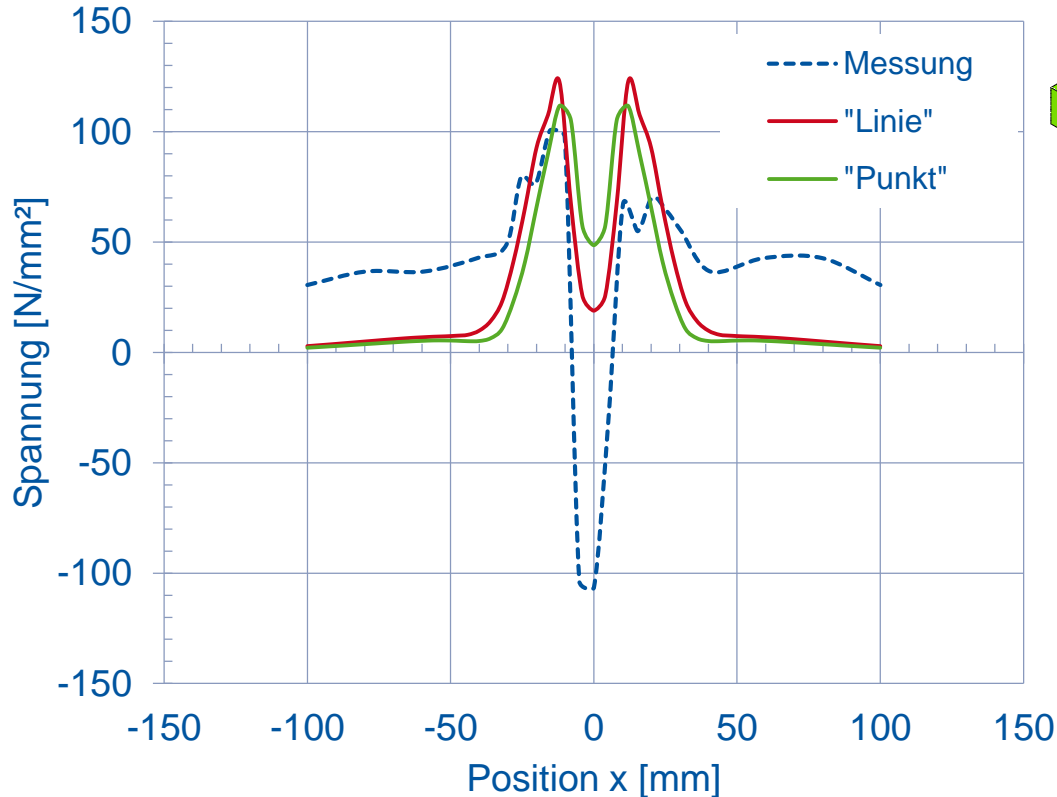
Die Vergleichsspannung ist nach dem Abkühlen hinsichtlich ihrer Verteilung und Ausprägung ähnlich

Simulation des Schweißprozesses

Ergebnisse

Vergleich der Simulation mit den Messungen am FRM II der TU München

Longitudinal-Spannung: S11



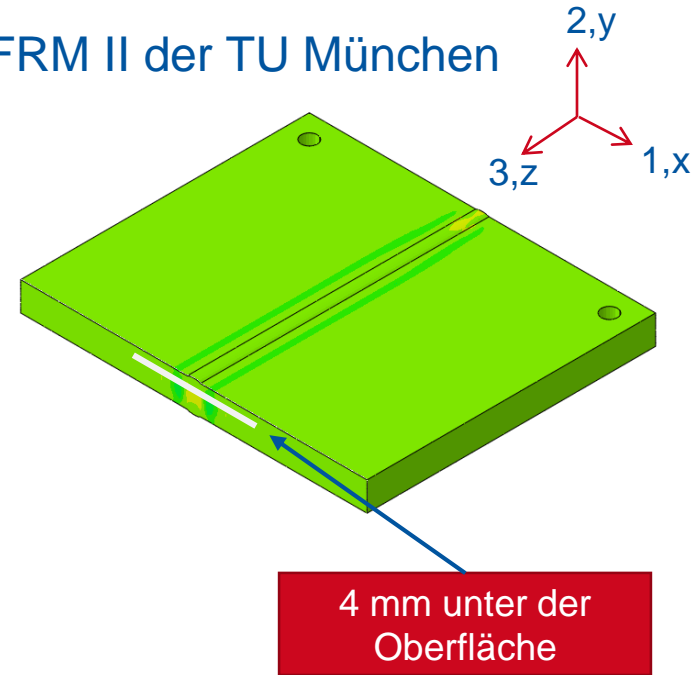
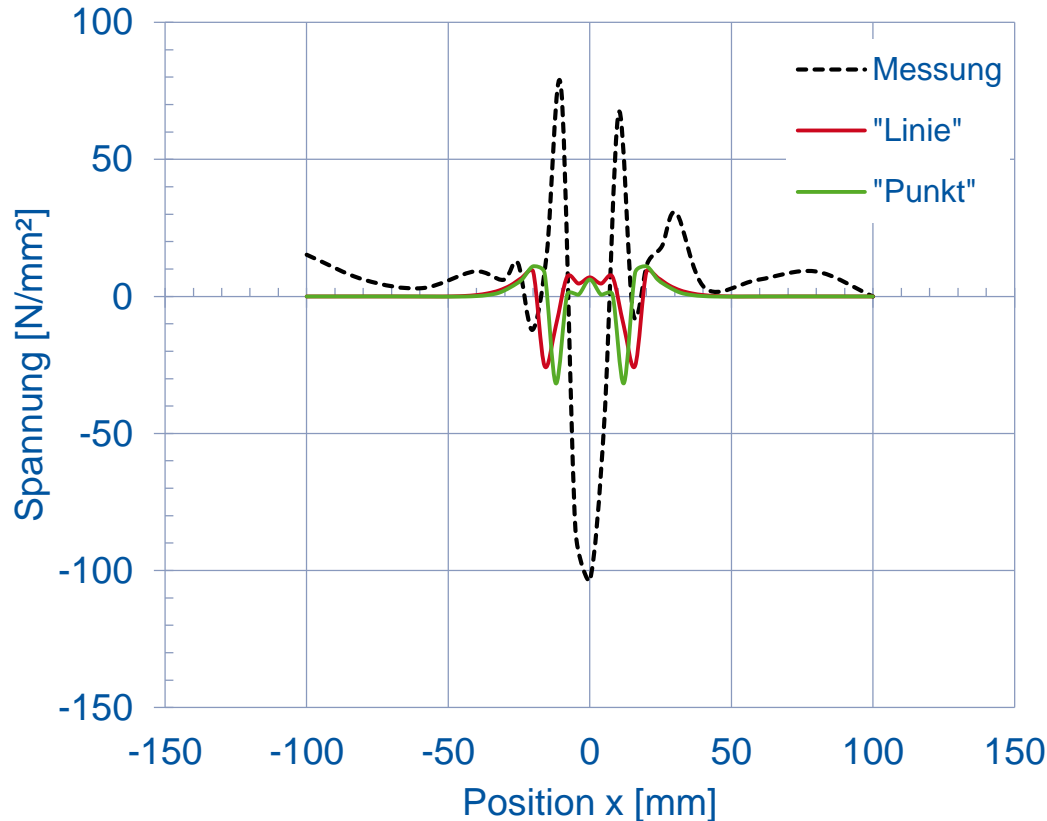
- Die Messungen weisen in der Nahtmitte signifikante Druckeigenstressungen auf
- Diese sind in der Simulation nicht zu erkennen
- Qualitativ sind die Ergebnisse jedoch ähnlich

Simulation des Schweißprozesses

Ergebnisse

Vergleich der Simulation mit den Messungen am FRM II der TU München

Normal-Spannung: S22



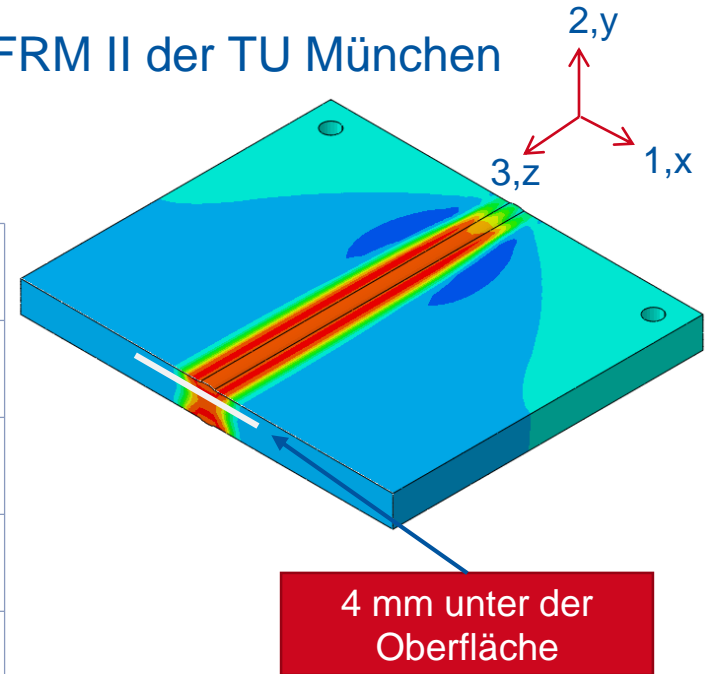
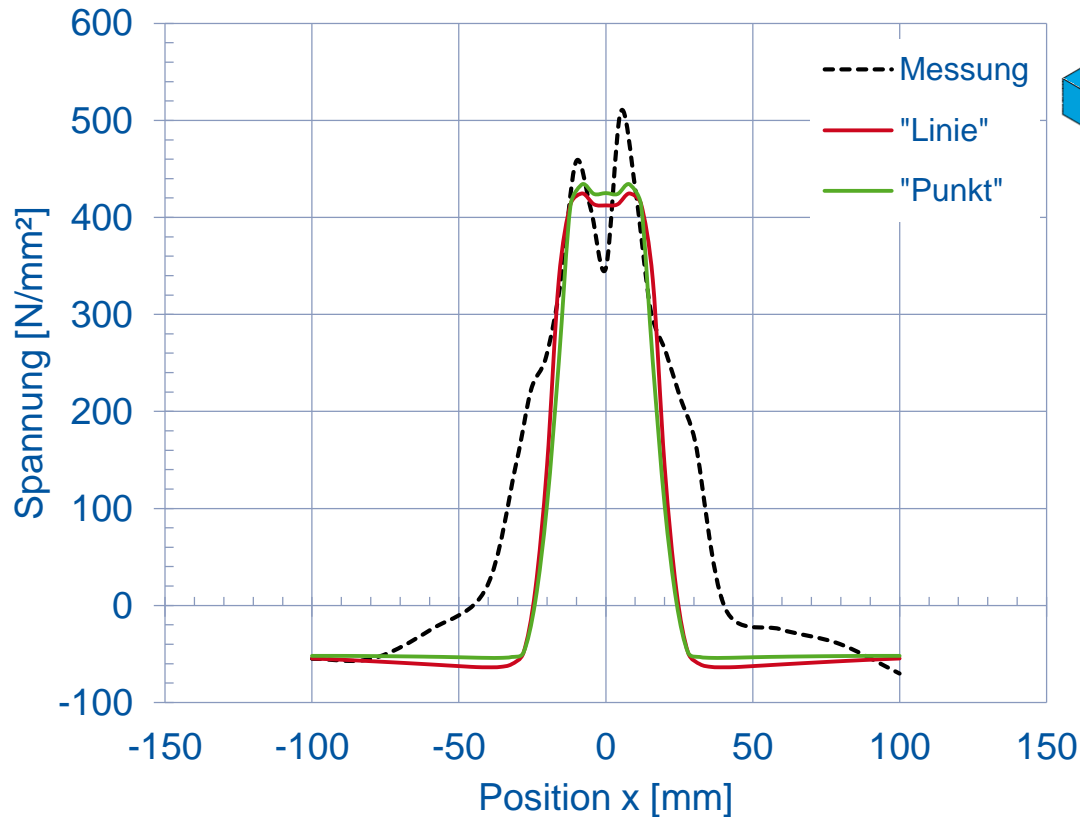
- Die Messungen weisen zur Nahtmitte hin deutlich höhere Zug- und Druckeigenspannungen auf, als die Simulationen.
- Qualitativ sind die Verläufe jedoch ähnlich

Simulation des Schweißprozesses

Ergebnisse

Vergleich der Simulation mit den Messungen am FRM II der TU München

Transversal-Spannung: S33



- In Richtung der Schweißnaht sind die Eigenspannungen deutlich höher, als in den anderen beiden Richtungen.
- Zudem stimmen die Spannungsverläufe von Messung und Simulation gut überein.

Simulation des Schweißprozesses

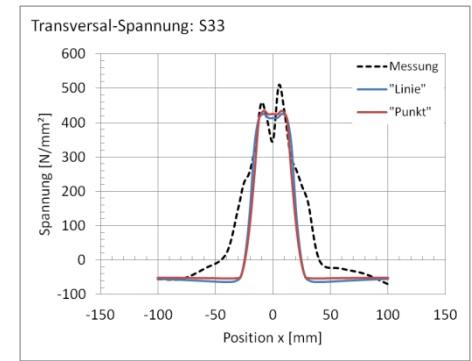
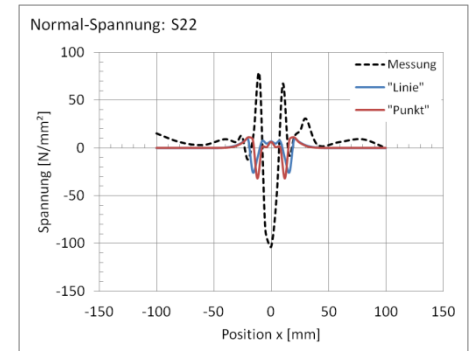
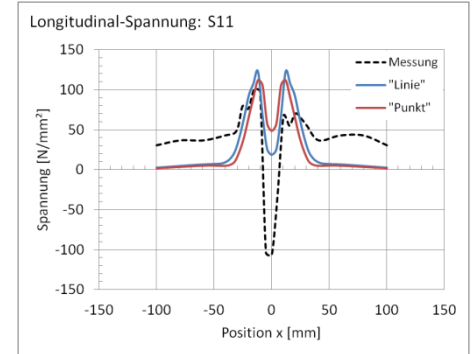
Ergebnisse

Fazit des Vergleichs von Simulation und Messung

- Die Abweichungen zwischen der vereinfachten Simulation „Linie“ und der Simulation „Punkt“ sind vergleichsweise gering
 - ➔ Das „Linien“-Modell ist hinreichend genau
- Quer- und senkrecht zur Nahtichtung stimmen die Eigenspannungen **qualitativ** gut überein.
- Im Bereich der Nahtmitte weisen die Simulationen jedoch erhebliche Abweichungen zu den Messergebnissen auf **ausgeprägte Druckeigenspannungen**
- In Nahtichtung passen die Spannungsverteilungen von Simulation und Messung gut zusammen

Mögliche Ursachen:

- Keine exakten Werkstoffkennwerte der Probenkörper verfügbar
- Abweichender Ablauf des realen Schweißprozesses (8 Lagen nacheinander mit Abkühlphasen geschweißt)
- Gefüge- und Phasenumwandlungen des Werkstoffes sind im Simulationsmodell unzureichend Berücksichtigt (Wohlfahrt)





Gliederung

- Einleitung
- Simulation des Schweißprozesses
- Vibrationsanalyse
- Simulation des VSR – Verfahrens
- Vergleich VSR – Verfahren & Spannungsarmglühen
- Vibrationsentspannung eines Maschinenträgers

Vibrationsanalyse

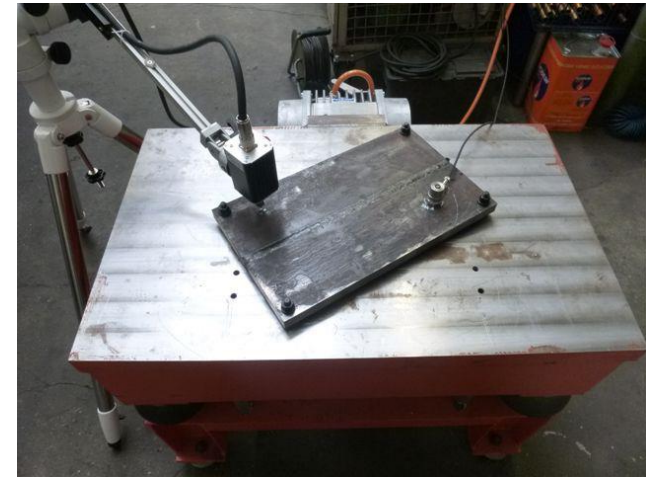
Frequenzanalyse - Versuchsanordnung

Ziel: Validierung des Versuchsaufbaus

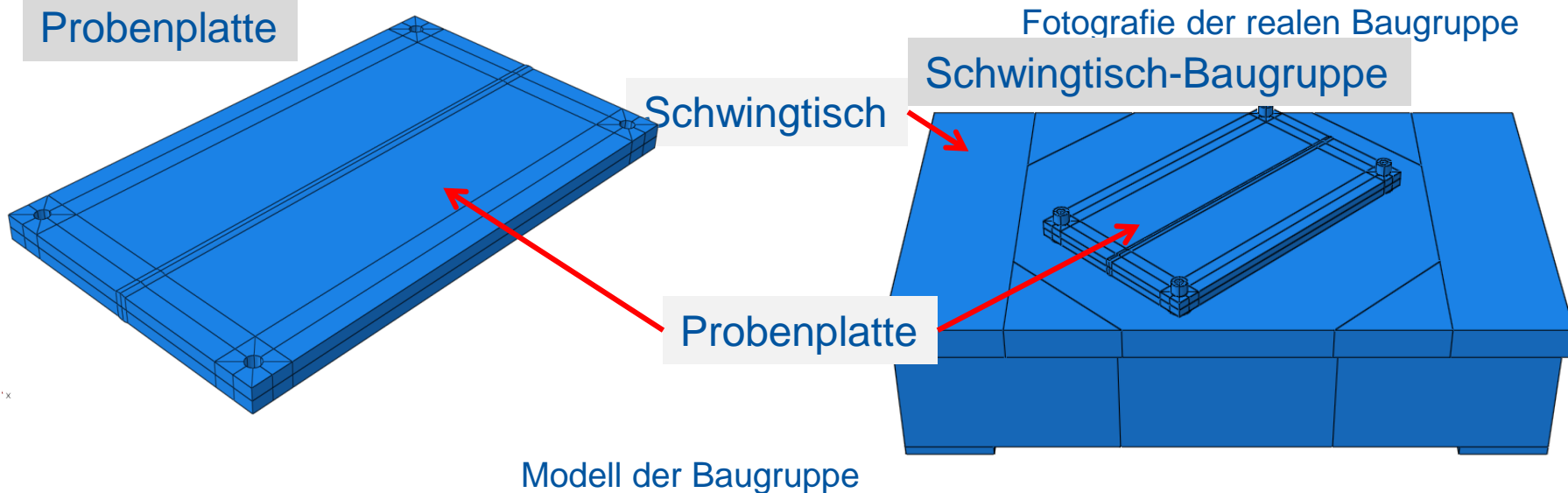
- Der Schwingtisch-Baugruppe mit montierter Probenplatte
- Der Probenplatte ohne Schwingtisch

Modellierung:

- Schwingtisch-Bauteil als homogenes Part modelliert
- Schwingtisch-Baugruppe besteht aus Schwingtisch, Probenplatte und vier Verbindungselementen



Fotografie der realen Baugruppe
Schwingtisch-Baugruppe

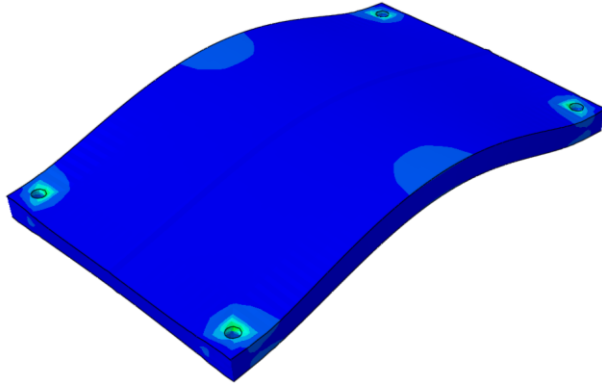


Modell der Baugruppe

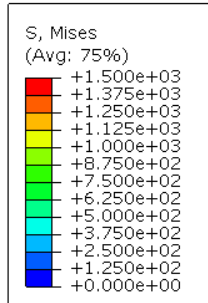
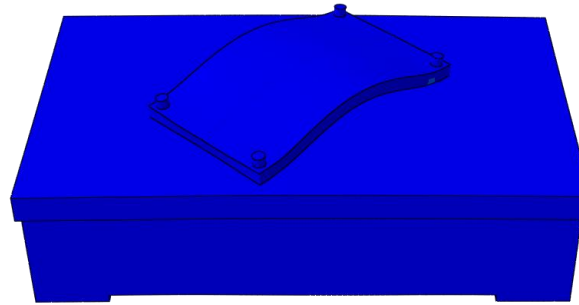
Vibrationsanalyse

Ergebnisse - Versuchsanordnung

Probenplatte



Schwingtisch-Baugruppe



Übersicht ähnlicher Eigenmoden beider Modelle: Schwingtisch-Baugruppe und Probenplatte

Eigenmode Platte	Eigenfrequenz Platte [Hz]	Eigenmode Baugruppe	Eigenfrequenz Baugruppe [Hz]
1	426,9	5	424,1
4	1467,7	51	1584,3
9	2165,0	83	2120,0

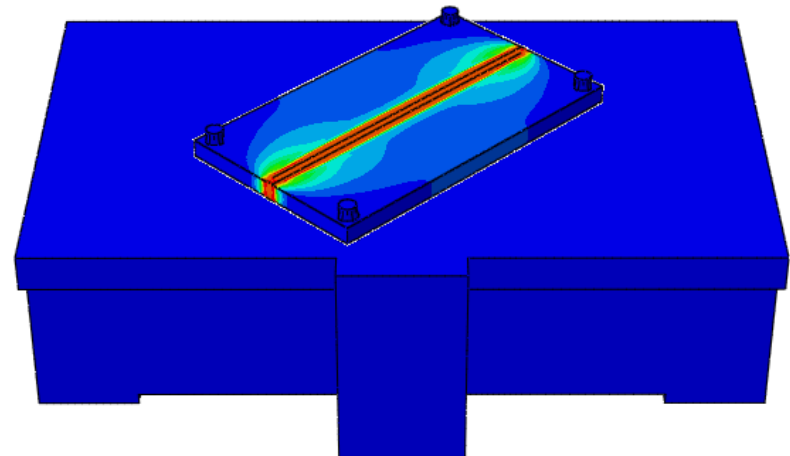
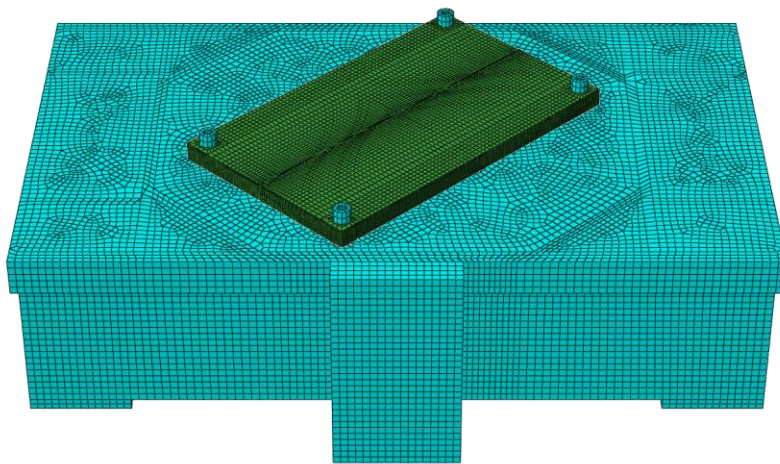
Erste relevante Biegemode liegt bei 424 Hz und damit deutlich über der maximalen Frequenz des Vibrators.

Der Versuchsaufbau muss so abgeändert werden, dass die Eigenfrequenzen reduziert werden.

Vibrationsanalyse - Einfluss Eigenspannungen

Modellaufbau

- Einbindung der Platte mit den zuvor simulierten Eigenspannungen aus dem Schweißprozess
- Befestigung am Schwingtisch durch vier Verbindungselemente
- Vernetzung mit insgesamt 100.462 Hexaeder-Elementen

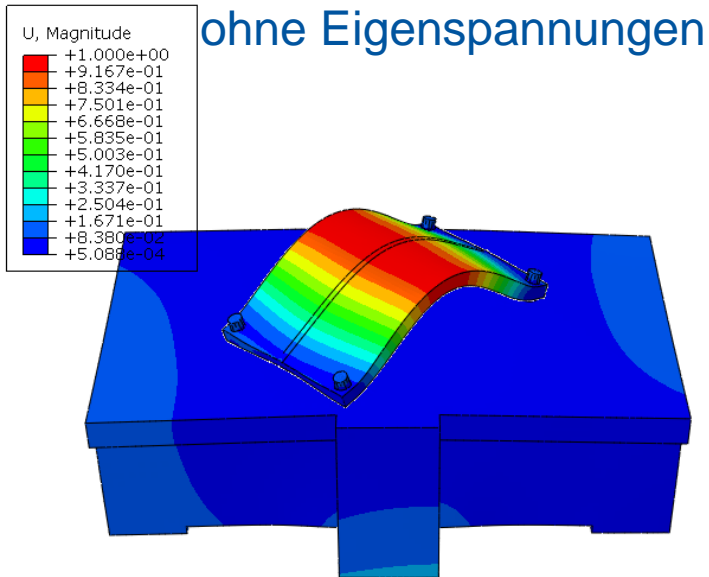


➔ Vergleich der Ergebnisse mit und ohne aufgeprägte Eigenspannungen

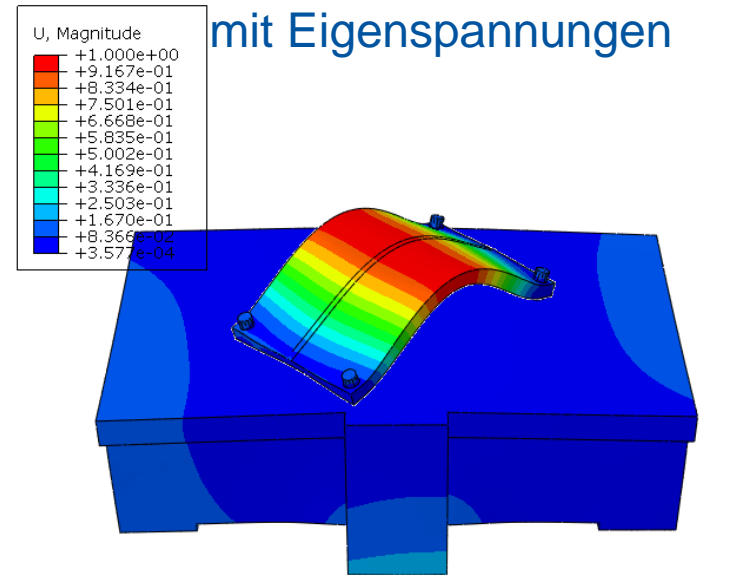
Vibrationsanalyse - Einfluss Eigenspannungen

Ergebnisse

Beispiel: 4. Eigenmode



Mode 4: $f = 437,02$ Hz
Wölbung der Platte quer zur Naht



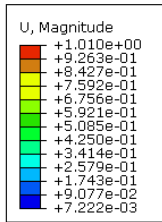
Mode 4: $f = 440,68$ Hz
Wölbung der Platte quer zur Naht

- Leichte Unterschiede in der 4. Eigenfrequenz aufgrund von Eigenspannungen feststellbar (3,66 Hz)
- Reduzierung der Eigenspannungen im Messbereich nahe dieser Frequenz möglich

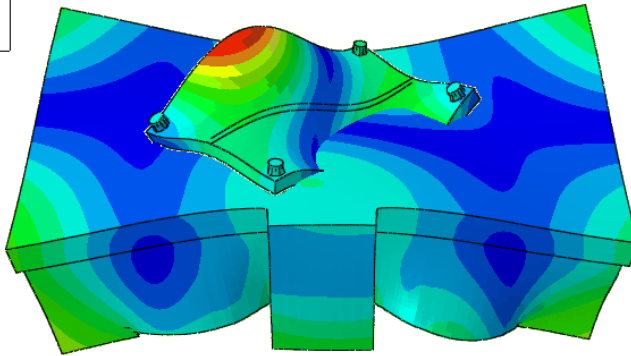
Vibrationsanalyse - Einfluss Eigenspannungen

Ergebnisse

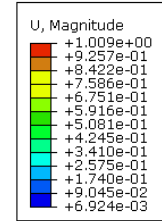
Beispiel: 15. Eigenmode



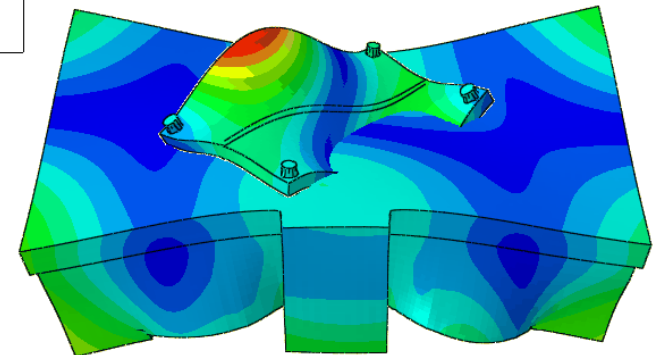
ohne Eigenspannungen



Mode 15: $f = 855.90$ Hz
Wölbung der Platte diagonal zur Naht



mit Eigenspannungen



Mode 15: $f = 856.16$ Hz
Wölbung der Platte diagonal zur Naht

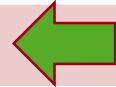
Keine signifikanten Unterschiede in der 15. Eigenfrequenz aufgrund von Eigenspannungen feststellbar

Vibrationsanalyse - Einfluss Eigenspannungen

Ergebnisse

Übersicht der relevanten (die Platte betreffenden) Eigenmoden

Eigenmode [Nr]	Frequenz (oE) [Hz]	Frequenz (mE) [Hz]	Differenz [Hz]
4	437,02	440,68	3,66
6	480,09	480,45	0,36
7	526,51	526,99	0,48
21	855,90	856,16	0,26



- Alle Nichtaufgeführten Moden haben keinen nennenswerten Effekt auf die Schweißnaht
- Höhere Moden zeigen keine größeren Unterschiede mehr

Fazit:

- Bei geringeren Eigenfrequenzen sind die Unterschiede am deutlichsten (bis 3 Hz, 4. Mode)
- Die Eigenmoden liegen jedoch deutlich über den Anregungsfrequenzen des Motors (bis ca. 125 Hz)
- ➔ Die Simulation eines Hochlaufs soll weiteren Aufschluss über die mögliche Anregung höherer Moden ergeben.
- ➔ Ggf. Reduzierung der Eigenfrequenzen durch Anbringung einer zusätzlichen Trägheitsmasse

Frequenzanalysen Probenplatte mit Schwingtisch

- Eigenmoden und Eigenfrequenzen der Probenplatte lassen sich durch den Schwingtisch auf die Probenplatte übertragen
- Erste relevante Eigenfrequenz liegt mit 426 Hz deutlich über der Anregungsfrequenz des Vibrators (100 Hz bei 6000 min⁻¹)
- Signifikante Anregungen der Platte sind somit nicht zu erwarten
- Somit kaum Energieeintrag in die Probenplatte zu erwarten
- Daher keine Reduktion von Eigenspannungen bei aktuellem Versuchsaufbau

Fazit für den Versuchsaufbau

- Änderung der Anordnung von Vibrator, Schwingtisch und Probenplatte
- Reduktion der Eigenfrequenzen des Versuchsaufbaus durch Massenträgheiten (Zusatzmassen)

Alternativer Versuchsaufbau

Zur Reduzierung der Eigenfrequenzen wird der Versuchsaufbau geändert:

1. Vertikale Befestigung über vorhandene Bohrungen in der Platte seitlich am Schwingtisch (Bild 1)
2. Wie 1. jedoch optional zusätzliche, träge Masse (weitere Probenplatte) an dem Vibrationskörper befestigt (Bild 2)
3. Wie 2. jedoch Erhöhung der trägen Masse durch weitere Probenplatte (Bild 3)

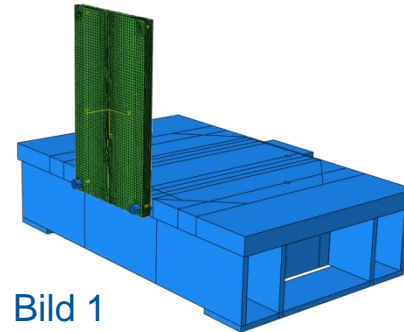


Bild 1

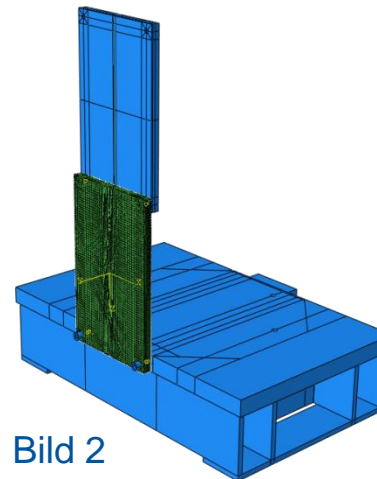


Bild 2

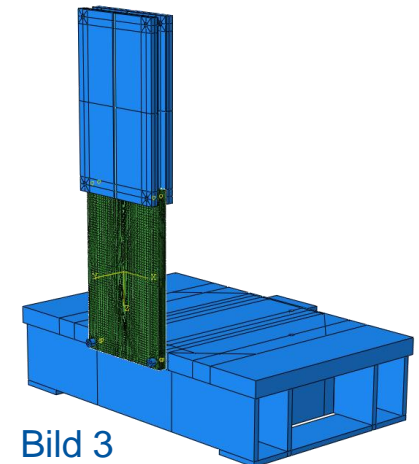


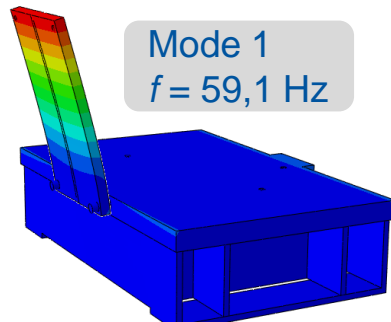
Bild 3

Vibrationsanalyse – alternativer Versuchsaufbau

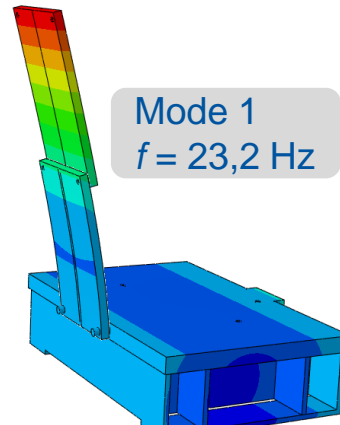
Ergebnisse

Ergebnisse der Frequenzanalysen für den alternativen Versuchsaufbau

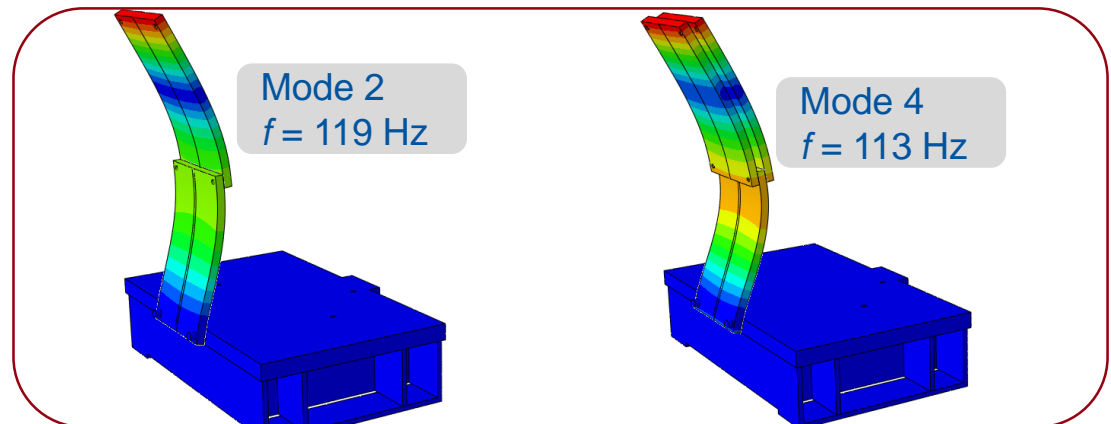
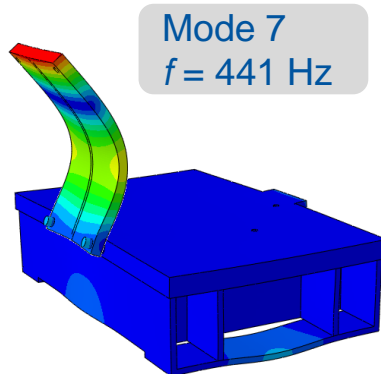
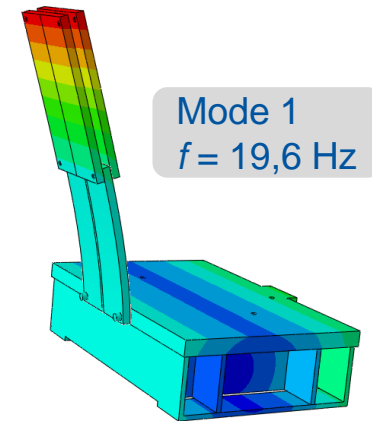
Variante 1



Variante 2



Variante 3



Vorschlag: Vibration im Bereich dieser Frequenzen



Gliederung

- Einleitung
- Simulation des Schweißprozesses
- Vibrationsanalyse
- Simulation des VSR – Verfahrens
- Vergleich VSR – Verfahren & Spannungsarmglühen
- Vibrationsentspannung eines Maschinenträgers

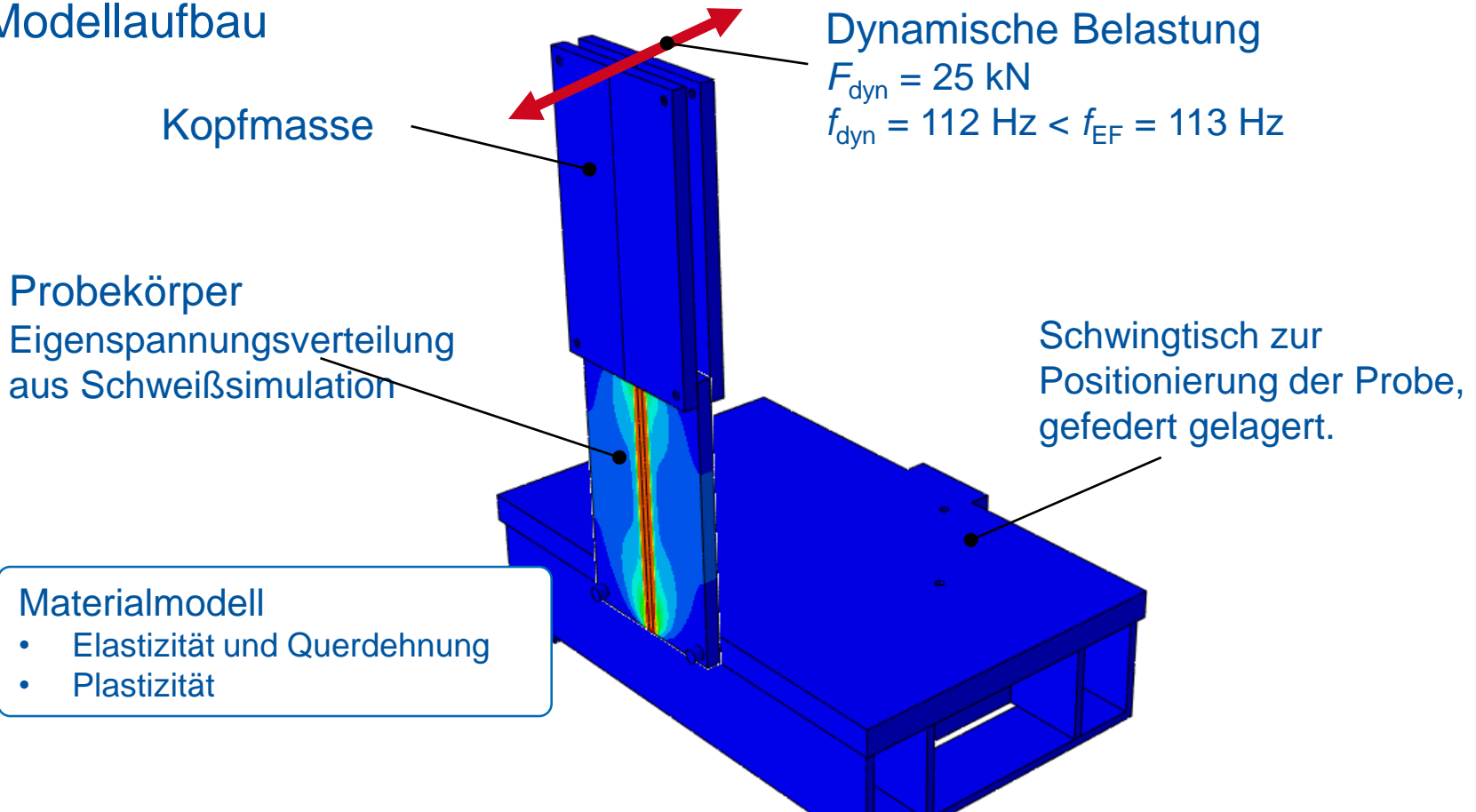
Simulation des VSR – Verfahrens Modellaufbau

- Der Motor ist in horizontaler Richtung mittig und in vertikaler Richtung bündig an der Oberkante des Schwingtisches angebracht
- Die Kontaktfläche entspricht der zu simulierenden Referenzfläche und hat die Maße 170 mm x 300 mm



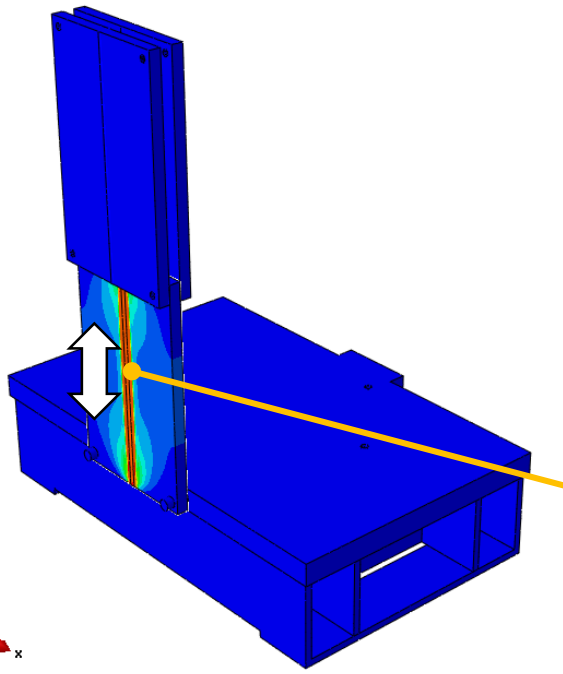
Simulation des VSR – Verfahrens Modellaufbau

Modellaufbau

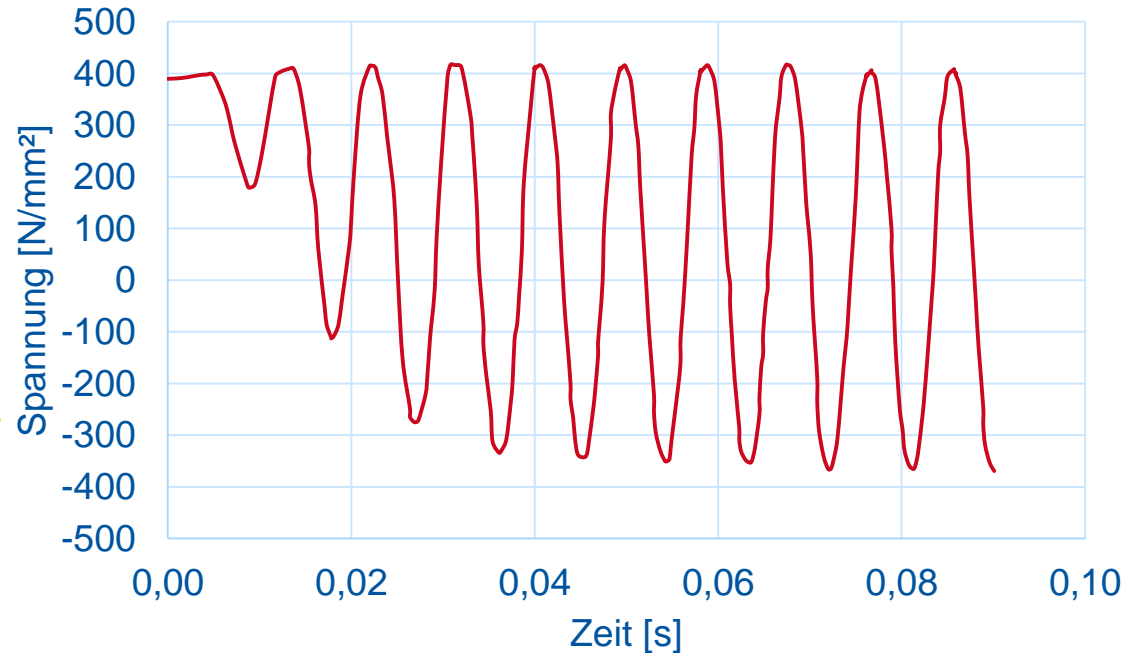


→ Dynamische Simulation im Zeitbereich mit Berücksichtigung der Plastizität

Simulation des VSR – Verfahrens Ergebnisse



Zeitverlauf S33 (longitudinal)

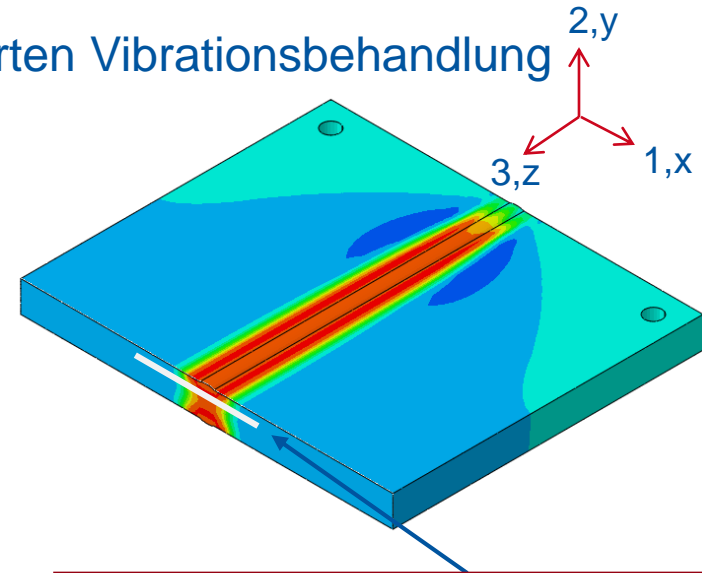
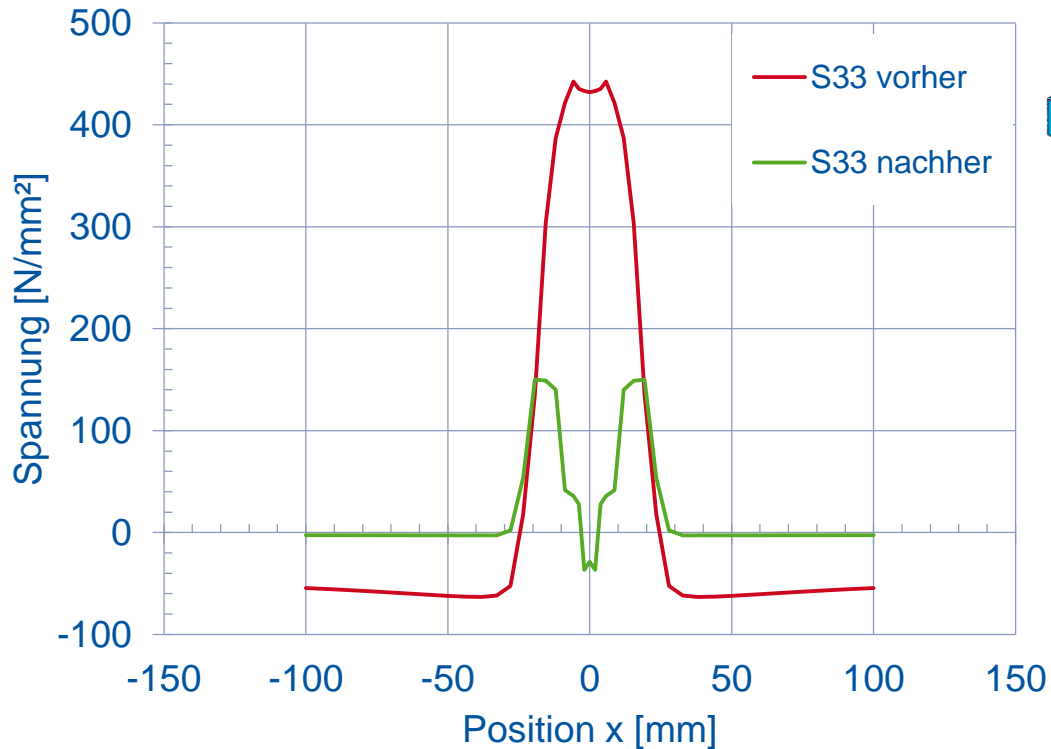


- Nahezu konstante Oberspannung im Bereich der Streckgrenze
- Deutlicher Abfall der Unterspannung in den ersten 4 Perioden, danach konstanter Verlauf
- ➔ Reduzierung der Mittelspannung unter 100 N/mm²

Simulation des VSR – Verfahrens Ergebnisse

Vergleich der Spannung vor und nach der simulierten Vibrationsbehandlung

Transversal-Spannung: S33



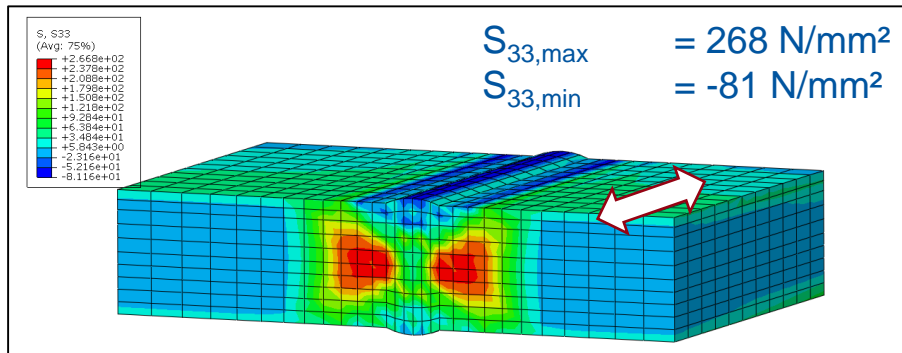
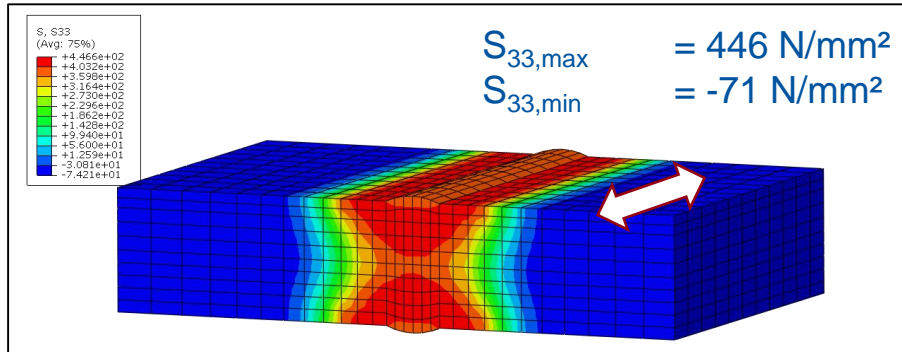
Messtrecke:
4 mm unter der Oberfläche

- Deutliche Reduzierung der Zugeigenspannungen neben der Naht
- Erzeugung geringer Druckeigenspannungen in der Nahtmitte (bis 40 N/mm²)

Die Vibrationsbehandlung verringert deutlich die Longitudinalspannungen

Simulation des VSR – Verfahrens Ergebnisse

Vergleich der Spannung vor und nach der simulierten Vibrationsbehandlung



- Deutliche Reduzierung der Zugeigenspannungen neben der Naht
- Erzeugung geringer Druckeigenspannungen in der Nahtmitte (bis 40 N/mm²)
- Erzeugung von Druckeigenspannungen an der Nahtoberfläche (bis 81 N/mm²)

Die Vibrationsbehandlung verringert deutlich die Longitudinalspannungen



Gliederung

- Einleitung
- Simulation des Schweißprozesses
- Vibrationsanalyse
- Simulation des VSR – Verfahrens
- Vergleich VSR – Verfahren & Spannungsarmglühen
- Vibrationsentspannung eines Maschinenträgers

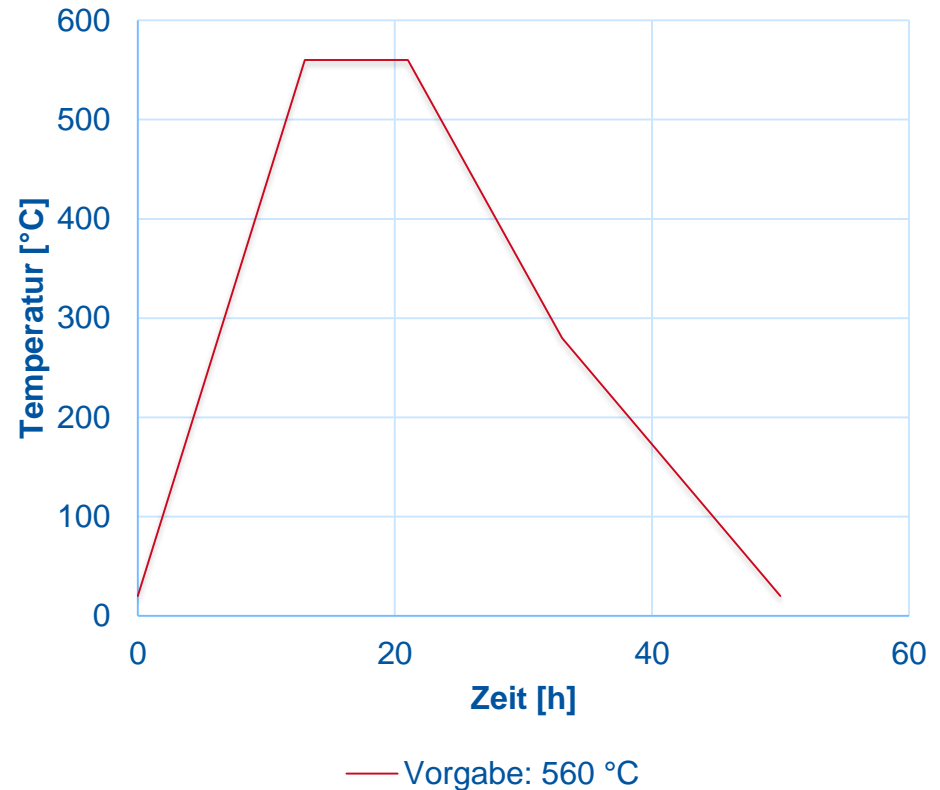
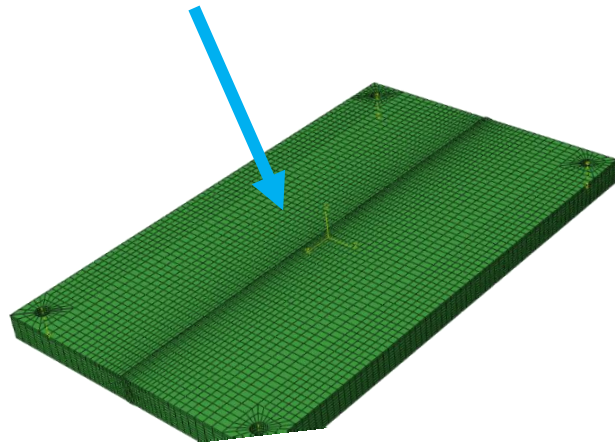
Vergleich VSR - Verfahren & Spannungsarmglühen

Modellaufbau

Simulation Spannungsarmglühen

Temperaturrandbedingung

- Vorgabe Spannungsarmglühen 560 °C, nach Glühprotokoll VSR
- Die Temperaturrandbedingungen wurde homogen für die gesamte Bauteiloberfläche vorgegeben.



Vergleich VSR - Verfahren & Spannungsarmglühen

Einfluss Werkstoffverfestigung

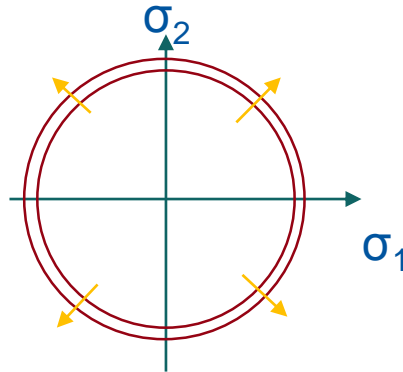
Metallische Werkstoffe können bei plastischer Deformation zur Verfestigung neigen. Je nach Werkstoff wird zwischen kinematischer und isotroper Verfestigung unterschieden.

isotrope Verfestigung:

Vergrößerung des Spannungstensors bei zyklischer Belastung gleichmäßig in alle Richtungen

Erhöhung von Druck- und Zugfließgrenze

Überwiegend spröde Werkstoffe¹

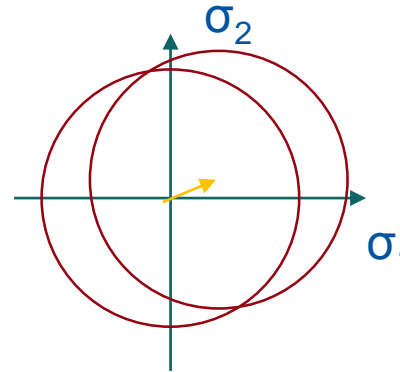


kinematische Verfestigung:

Verschiebung des Spannungstensors bei zyklischer Belastung in eine Richtung

Verschiebung von Druck- und Zugfließgrenze

Überwiegend duktile Werkstoffe¹



Für den verwendeten Werkstoff S355J2G3 wird im folgenden kinematisches Verfestigungsverhalten vorausgesetzt²

- 1) Rust, Wilhelm Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen. Kontakt, Geometrie, Material (Wiesbaden, 2011)
- 2) Die plastischen Werkstoffkennwerte wurden für kinematische Verfestigung linearisiert

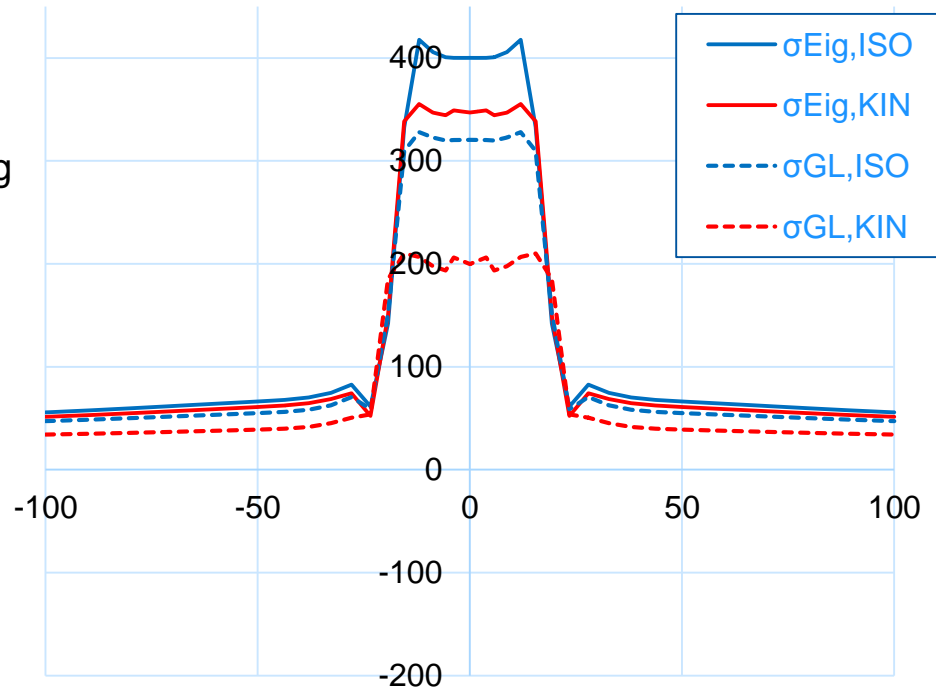
Vergleich VSR - Verfahren & Spannungsarmglühen

Einfluss Werkstoffverfestigung

Spannungsarmglühen Vergleich isotrope und kinematische Verfestigung

- Die Eigenspannungen liegen nach dem Schweißprozess bei isotroper Verfestigung bei über 400 N/mm².
- Für die kinematische Verfestigung werden lediglich 350 N/mm² erreicht.
- Für isotrope Verfestigung beträgt die Reduzierung der Eigenspannungen durch das simulierte Spannungsarmglühen ca. 80 N/mm²
- Für kinematische Verfestigung wird hingegen eine Reduzierung von 150 N/mm² erreicht.

Vergleichsspannung Mises



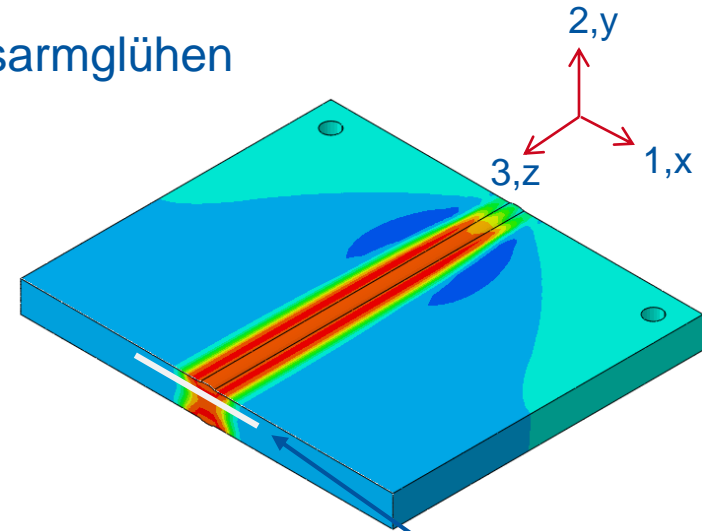
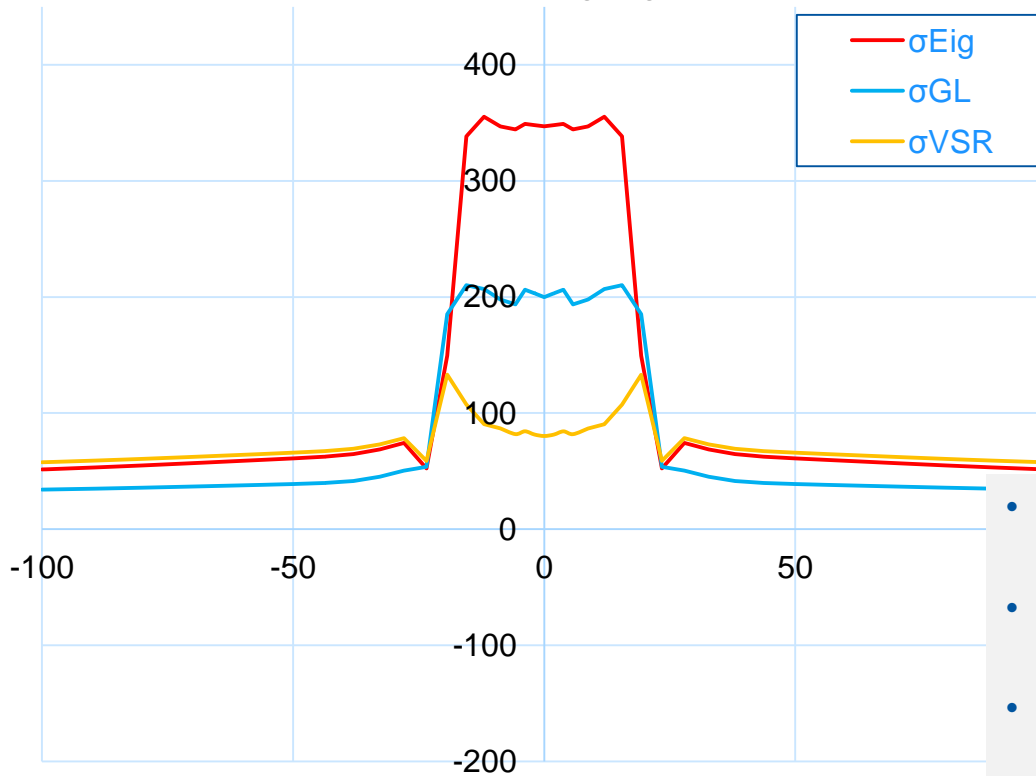
Eig: Eigenspannungen nach der Schweißsimulation (durchgehend)
GL: Spannungen nach der Glühsimulation (gestrichelt)
ISO: isotrope Verfestigung (blau)
KIN: kinematische Verfestigung (rot)

Vergleich VSR – Verfahren & Spannungsarmglühen

Ergebnisse

Vergleich des VSR-Verfahrens mit dem Spannungsarmglühen

Vergleichsspannung nach Mises für kinematische Verfestigung



Messtrecke:
4 mm unter der
Oberfläche

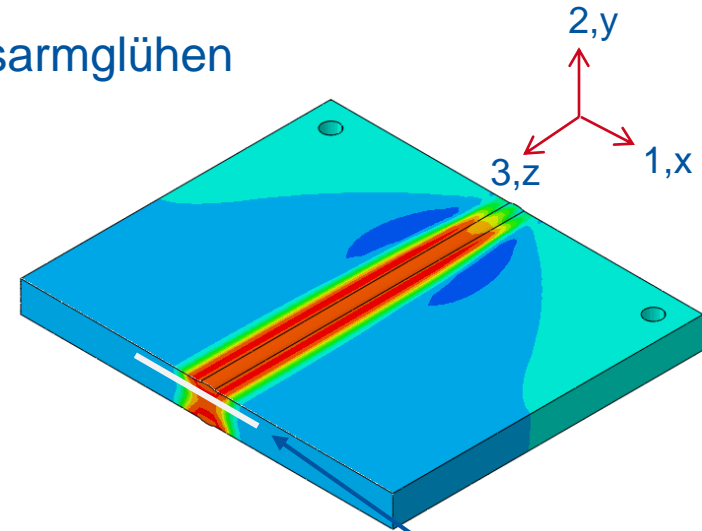
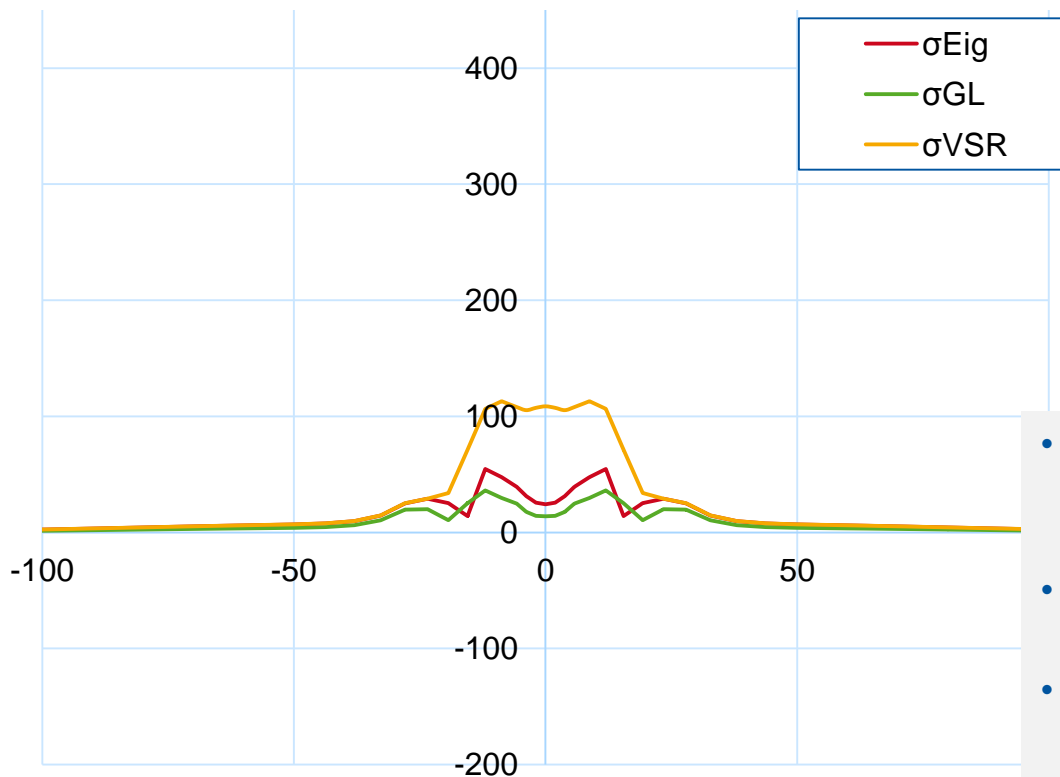
- VSR-Behandlung: Reduzierung der Vergleichsspannung auf 130 N/mm²
- Spannungsarmglühen: Reduzierung der Vergleichsspannung auf 210 N/mm²
- Der Effekt beim Spannungsarmglühen ist bei kinematischer Verfestigung deutlich geringer als beim VSR-Verfahren.

Vergleich VSR-Verfahren & Spannungsarmglühen

Ergebnisse

Vergleich des VSR-Verfahren mit dem Spannungsarmglühen

Spannungen quer zur Nahrichtung: σ_x



Messtrecke:
4 mm unter der
Oberfläche

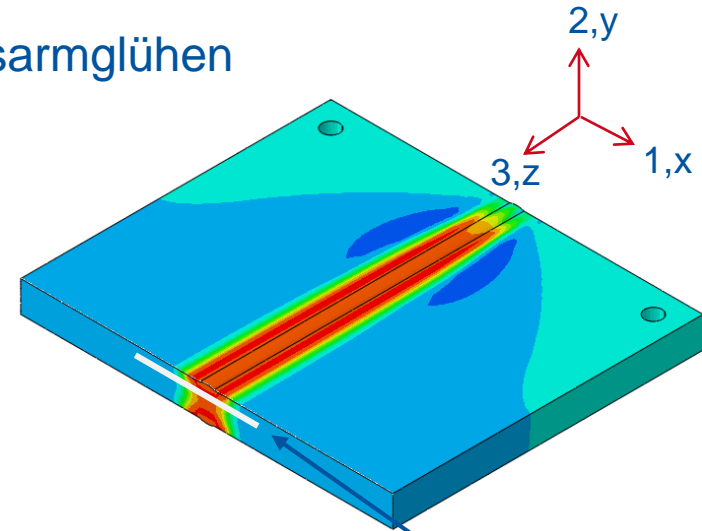
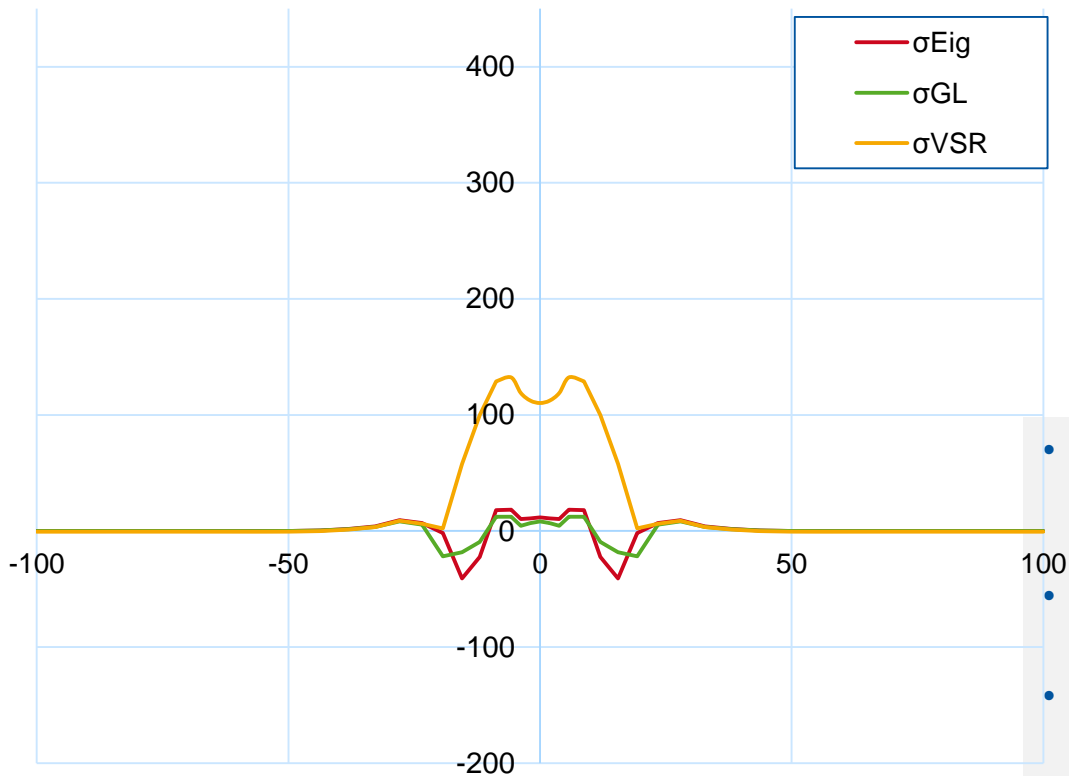
- Spannungsarmglühen: geringe Reduzierung der Zugspannung um ca. 10 N/mm²
- VSR-Verfahren: Erhöhung der Spannung auf ca. 100 N/mm²
- Quer zur Nahrichtung werden die Spannungen durch die VSR-Behandlung erhöht.

Vergleich VSR-Verfahren & Spannungsarmglühen

Ergebnisse

Vergleich des VSR-Verfahren mit dem Spannungsarmglühen

Senkrecht zur Naht: σ_y



Messtrecke:
4 mm unter der
Oberfläche

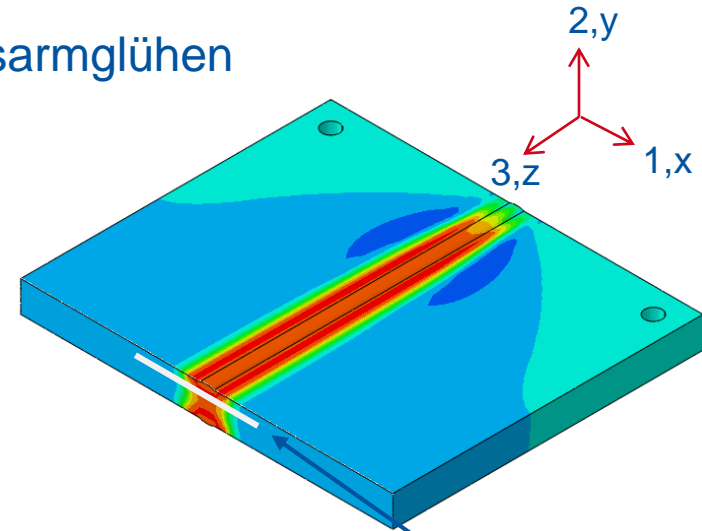
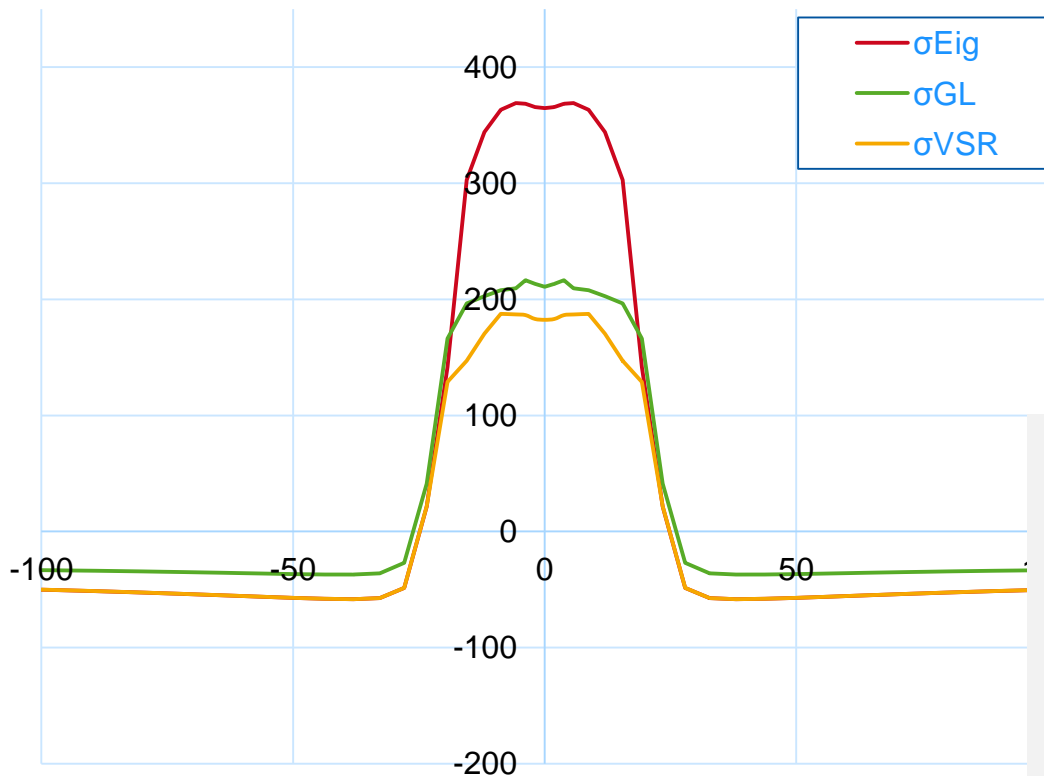
- Spannungsarmglühen: geringe Reduzierung der Druckspannung um ca. 15 N/mm²
- VSR-Verfahren: Erhöhung der Spannung auf ca. 130 N/mm² im Zugbereich
- Senkrecht zur Nahtichtung werden die Spannungen durch die VSR-Behandlung erhöht.

Vergleich VSR-Verfahren & Spannungsarmglühen

Ergebnisse

Vergleich des VSR-Verfahren mit dem Spannungsarmglühen

In Nahrichtung: σ_z



Messtrecke:
4 mm unter der
Oberfläche

- Deutliche Reduzierung der Spannungen in Nahrichtung bei beiden Verfahren.
- Spannungsarmglühen: Verringerung auf ca. 200 N/mm² im Zugbereich
- VSR-Verfahren: Verringerung auf ca. 190 N/mm² im Zugbereich

Vergleich kinematische und isotrope Verfestigung

- Kinematische Verfestigung des Werkstoffes führt zu einer Verschiebung des Spannungstensors und infolge dessen zu einer gleichsinnigen Verschiebung der Druck- und der Zugfließgrenze des Werkstoffes.
- Dieses plastische Werkstoffverhalten wird überwiegend für duktile Werkstoffe vorausgesetzt.
- Isotrope Verfestigung hingegen erhöht jeweils die Druck- und die Zugfließgrenze richtungsunabhängig.
- Isotrope Verfestigung wird für spröde Werkstoffe empfohlen.

- Der verwendete Werkstoff S355J2G3 verhält sich überwiegend duktil. Daher wird hierfür die kinematische Verfestigung für die Modellbildung verwendet.

- Die Ergebnisse zeigen, dass die Reduzierung der Eigenspannungen bei der Simulation des Spannungsarmglühen für die kinematische Verfestigung deutlich günstiger ausfällt als für isotrope Verfestigung.

Vergleich zwischen Spannungsarmglühen und Vibrationsbehandlung

- Beide Verfahren verringern den Eigenspannungszustand im Bereich der Naht deutlich.
- Bei der VSR-Behandlung nehmen die Zugspannungen quer und senkrecht zur Naht jedoch zu.
- In Nahtichtung ist die Reduzierung der Eigenspannungen für die VSR-Behandlung größer.
- Da die Vergleichsspannung beim VSR-Verfahren insgesamt abnimmt, ist die Erhöhung der Spannungskomponenten quer und senkrecht zur Naht auf eine Verdrehung des Spannungstensors zurückzuführen.
- Für das Spannungsarmglühen ergeben sich in allen Richtungen geringere Spannungskomponenten.
- Jedoch ist der Effekt hinsichtlich der Vergleichsspannung geringer als bei dem VSR-Verfahren.

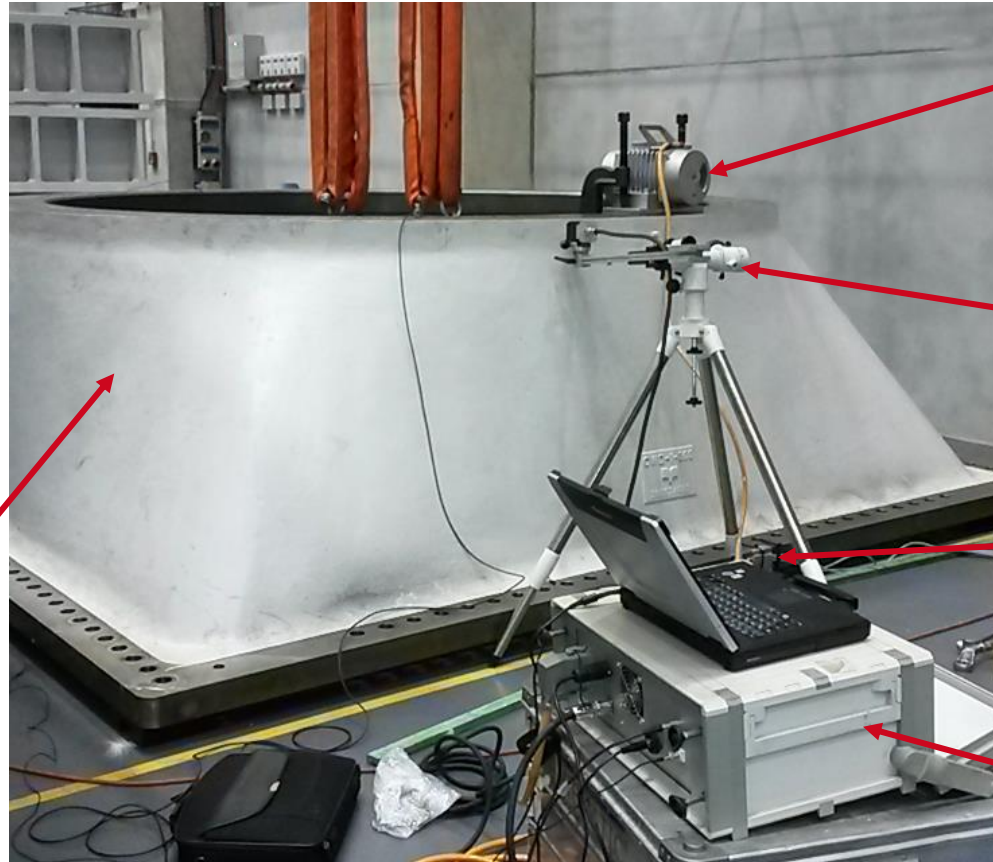


Gliederung

- Einleitung
- Simulation des Schweißprozesses
- Vibrationsanalyse
- Simulation des VSR – Verfahrens
- Vergleich VSR – Verfahren & Spannungsarmglühen
- Vibrationsentspannung eines Maschinenträgers

Vibrationsentspannung Maschinenträger

Versuchsaufbau



Maschinenträger
Gussteil, Masse ca. 15 to

Vibrator

Zur Anregung des Maschinenträgers durch rotierende, exzentrische Massen

Impulshammer

zur Ermittlung von Eigenfrequenzen

Dehnungsmessung

zur Ermittlung von Eigenfrequenzen

VIBMATIC 8000

Steuer- und Messsystem zur Vibrationsentspannung

Vibrationsentspannung Maschinenträger

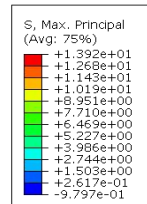
Frequenzanalyse

Relevante Eigenmoden des Maschinenträgers

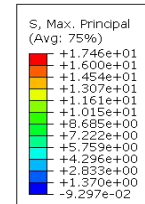
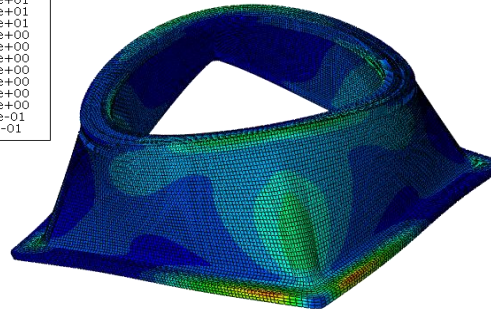
- Große Amplituden
- Eigenfrequenzen im Bereich der Anregungsfrequenz des Vibrators < 125 Hz

Aus den Frequenzanalysen ergeben sich mögliche Positionen zur Dehnungsmessung

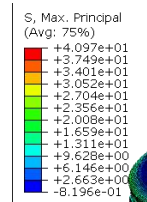
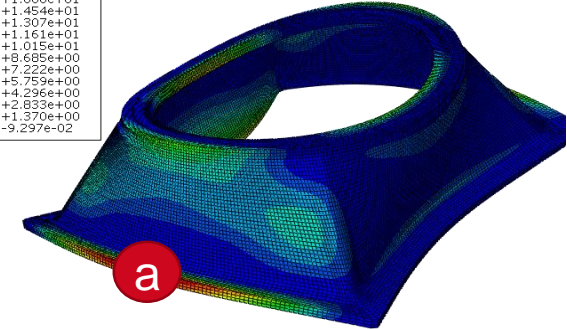
- a) Sockel
- b) Flansch



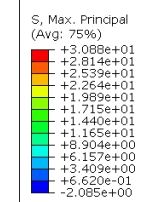
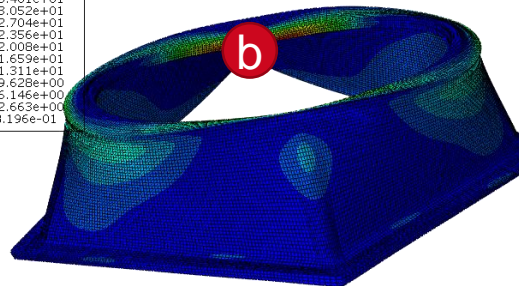
Mode 7 – 20,81 Hz



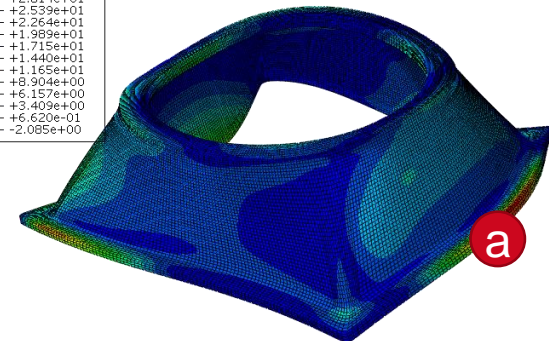
Mode 8 – 37,05 Hz



Mode 9 – 55,8 Hz

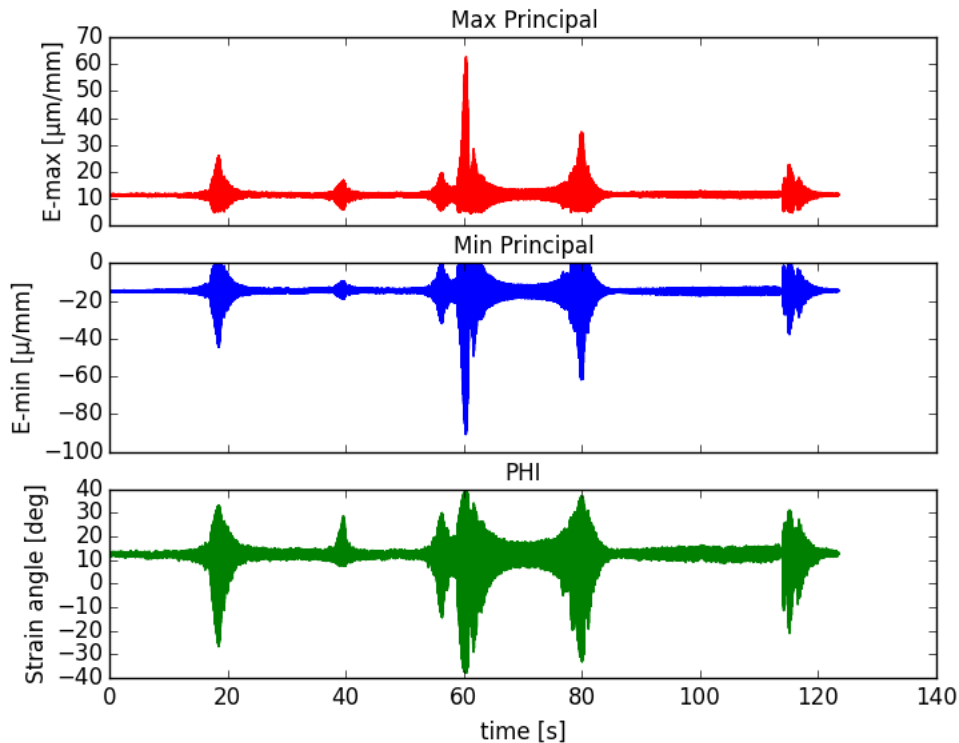


Mode 12 – 75,99 Hz



Vibrationsentspannung Maschinenträger

Ergebnisse Dehnungsmessung



Dehnungsmessstreifen am Sockel
des Maschinenträgers

Ergebnisse der Dehnungsmessungen am Sockel des Maschinenträgers

- Maximale Amplituden bis $-90 \mu\text{m}/\text{m}$ → Dehnung: $0,009 \%$ \ll Dehngrenze bei $0,2\%$
- Keine plastische Deformation messbar.

Jedoch kam es bei Vibrationen auf bei den gemessenen Eigenfrequenzen zu keiner schädlichen Resonanz des Bauteils.