



## Zwischenbericht

14.08.2015

Aachen



## OpVibFE

Simulation der Eigenspannungsreduzierung von Bauteilen durch Vibrationsentspannung

Dipl.-Ing. D. Witter

Dr.-Ing. R. Schelenz

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



## Gliederung

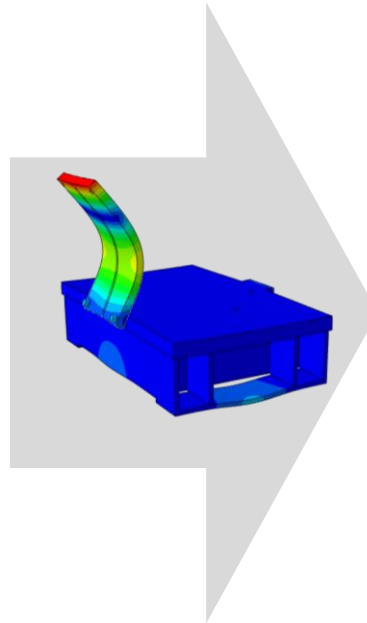
- Modellaufbau
- Einfluss Werkstoffverfestigung
- Vergleich VSR-Verfahren & Spannungsarmglühen
- Zusammenfassung

# Modellaufbau

## Vorgehensweise

### Schritt 1: Frequenzanalyse

- Ermittlung von Eigenfrequenzen und Eigenmoden
- Festlegung der Richtung und der Frequenz für die Vibration  
(dynamische Belastung)

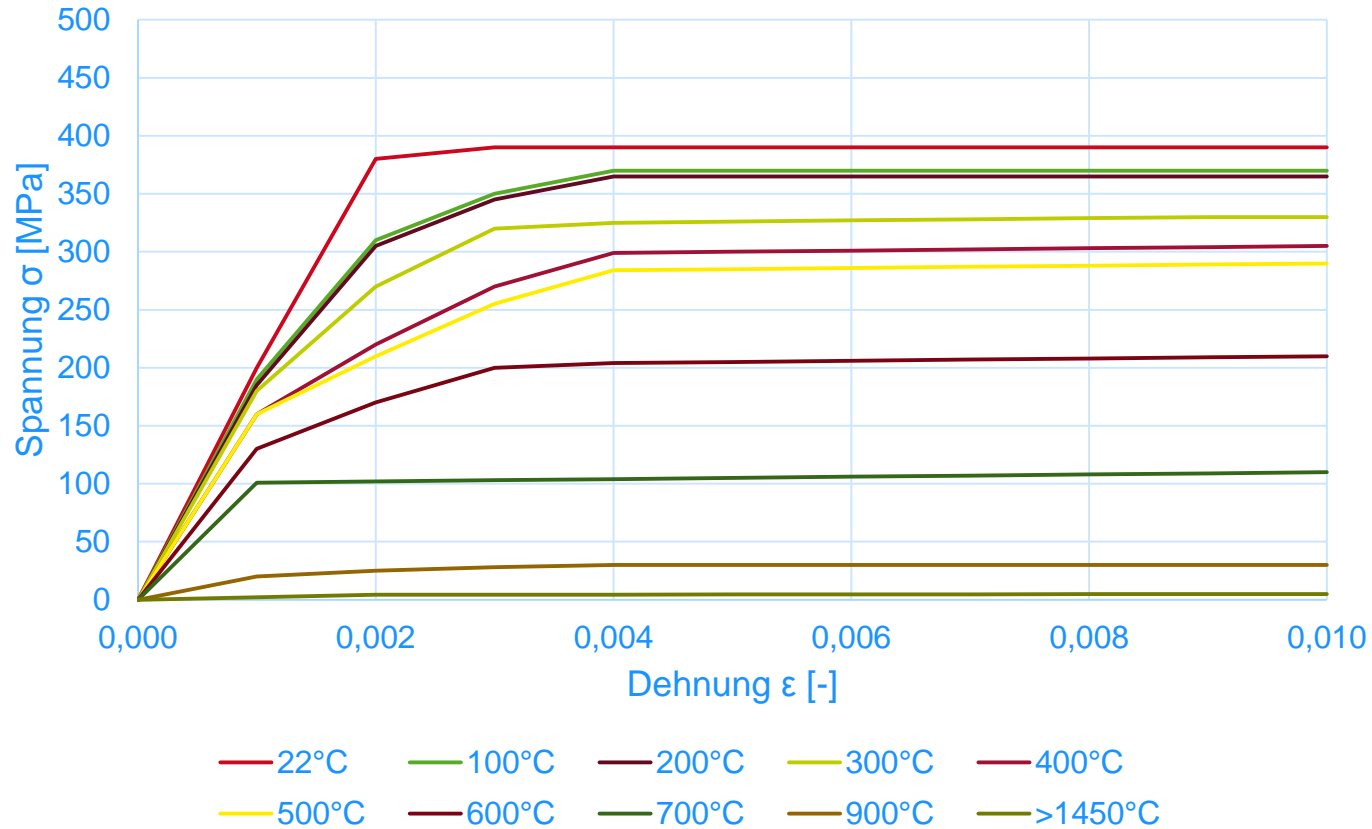


### Schritt 2: Vibrationssimulation

- Dynamische Belastung des Bauteils nahe der zuvor ermittelten Eigenfrequenzen
- Dadurch hoher Energieeintrag in das Bauteil
- Erzeugung mechanischer Beanspruchung durch Deformation des Bauteils
- Plastische Deformation in Bereichen hoher Eigenspannungen

Überlagerung vorhandener Eigenspannungen und aufgeprägter plastischer Deformation führt lokal zum Eigenspannungsabbau

Werkstoff: S355J2G3<sup>1,2</sup>

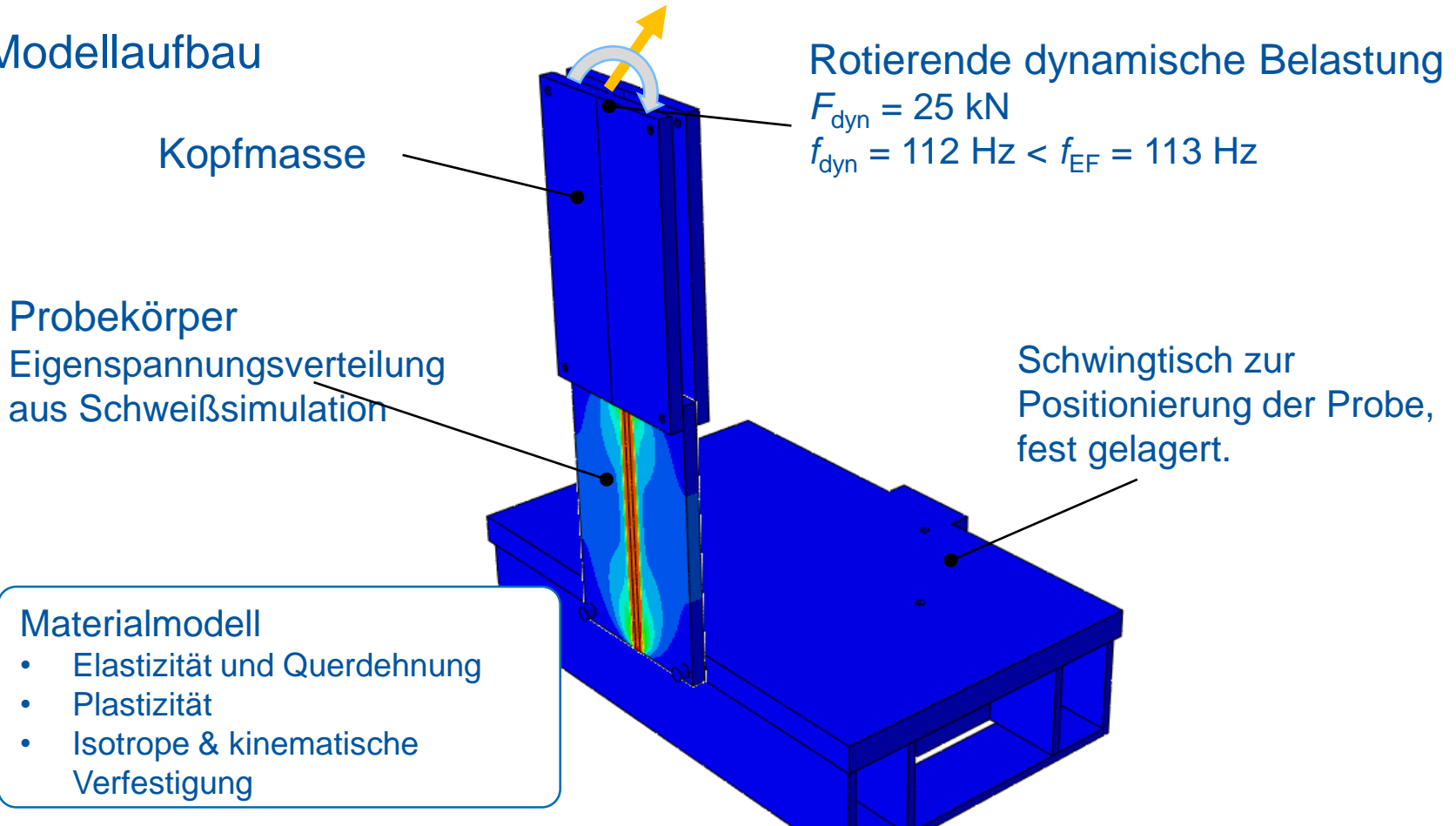


- 1) Alle Werkstoffkennwerte nach Wohlfahrt, H. – Simulation der Vorgänge im Schmelzbad beim Laserstrahlschweißen zur Voraussage von Nahtausbildung, Gefüge, Verzug und Schweißseignissen – Entwicklung des Materialmodells – TU Braunschweig
- 2) Berücksichtigung der temperaturabhängigen Wärmekapazität, Wärmedehnung und Querdehnung nach 1)

# Modellaufbau

## Vibrationsmodell

### Modellaufbau

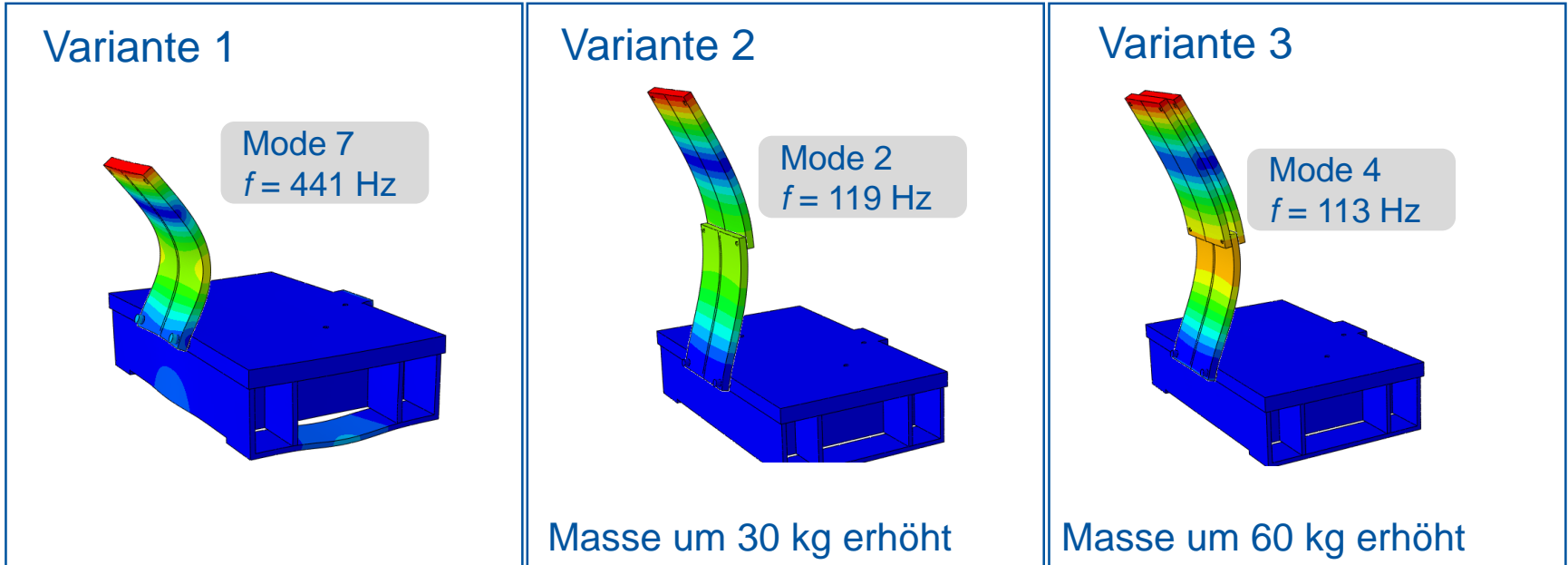


→ Dynamische Simulation im Zeitbereich mit Berücksichtigung der Plastizität

# Modellaufbau

## Schritt 1: Frequenzanalyse

- Ergebnisse der Frequenzanalysen für den Versuchsaufbau



### Voraussetzungen:

- ✓ Eigenfrequenz mit Biegemode der Probenplatte liegt im Frequenzbereich des Vibrators:  $f_{\text{Vibrator}} = 0 - 125 \text{ Hz}$
- ✓ Biegemode verursacht Zug-/Druckspannungen im Bereich hoher Eigenspannungen

### Auswahl: Variante 3

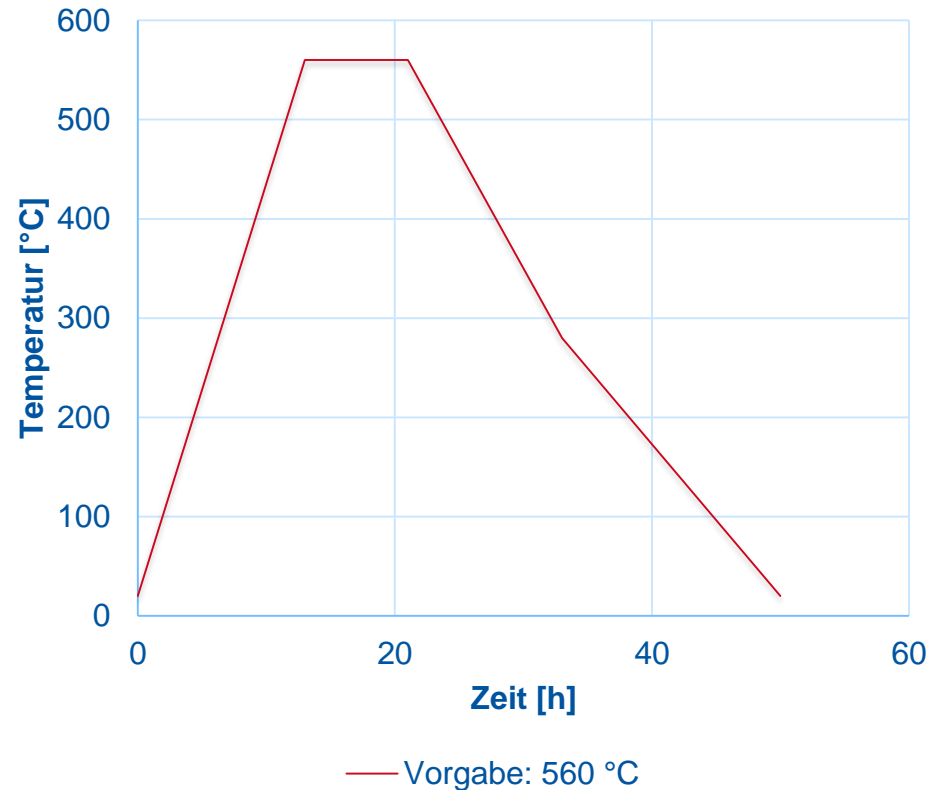
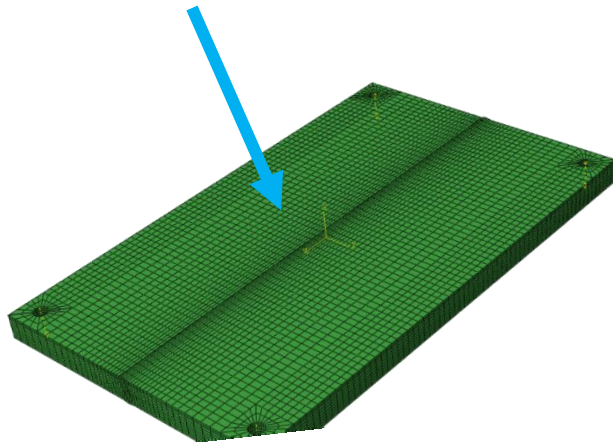
- ✓ Größte Biegung
- ✓ Geringste Eigenfrequenz
- ➔ **Sehr gut für die Vibrationsbehandlung geeignet**

# Modellaufbau

## Simulation Spannungsarmglühen

### Temperaturrandbedingung

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





## Gliederung

- Modellaufbau
- Einfluss Werkstoffverfestigung
- Vergleich VSR-Verfahren & Spannungsarmglühen
- Zusammenfassung



# Einfluss Werkstoffverfestigung

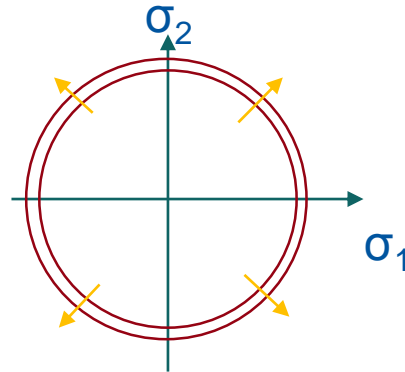
Metallische Werkstoffe können bei plastischer Deformation zur Verfestigung neigen. Je nach Werkstoff wird zwischen kinematischer und isotroper Verfestigung unterschieden.

## isotrope Verfestigung:

Vergrößerung des Spannungstensors bei zyklischer Belastung gleichmäßig in alle Richtungen

Erhöhung von Druck- und Zugfließgrenze

Überwiegend spröde Werkstoffe<sup>1</sup>

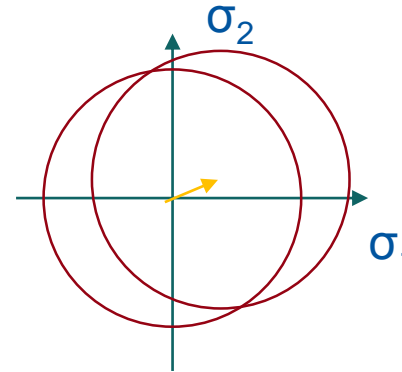


## kinematische Verfestigung:

Verschiebung des Spannungstensors bei zyklischer Belastung in eine Richtung

Verschiebung von Druck- und Zugfließgrenze

Überwiegend duktile Werkstoffe<sup>1</sup>



Für den verwendeten Werkstoff S355J2G3 wird im folgenden kinematisches Verfestigungsverhalten vorausgesetzt<sup>2</sup>

1) Rust, Wilhelm Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen. Kontakt, Geometrie, Material (Wiesbaden, 2011)

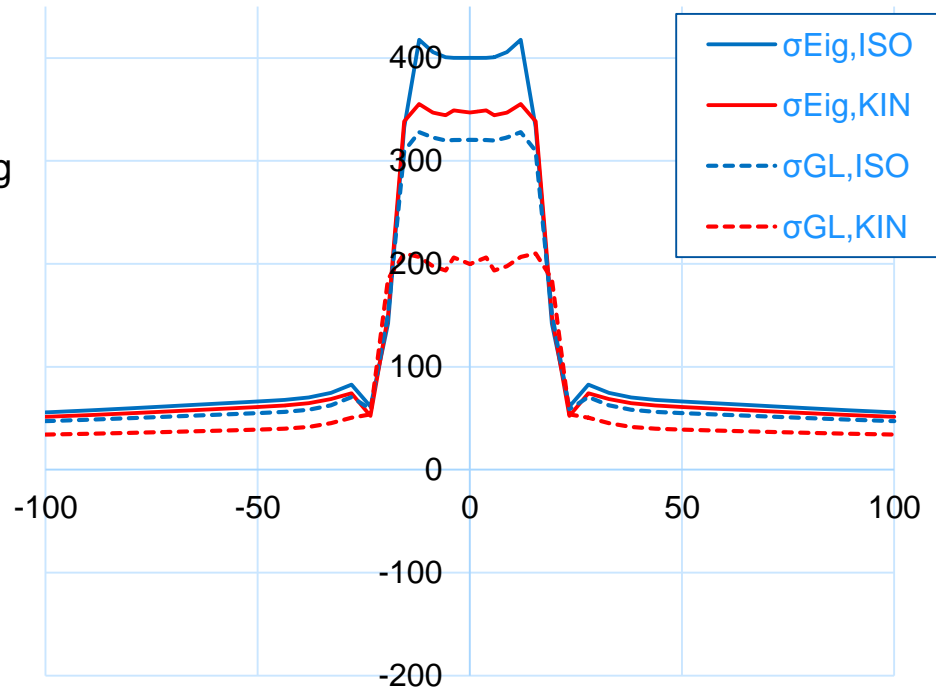
2) Die plastischen Werkstoffkennwerte wurden für kinematische Verfestigung linearisiert

# Einfluss Werkstoffverfestigung Spannungsarmglühen

## Spannungsarmglühen Vergleich isotrope und kinematische Verfestigung

- Die Eigenspannungen liegen nach dem Schweißprozess bei isotroper Verfestigung bei über 400 N/mm<sup>2</sup>.
- Für die kinematische Verfestigung werden lediglich 350 N/mm<sup>2</sup> erreicht.
- Für isotrope Verfestigung beträgt die Reduzierung der Eigenspannungen durch das simulierte Spannungsarmglühen ca. 80 N/mm<sup>2</sup>
- Für kinematische Verfestigung wird hingegen eine Reduzierung von 150 N/mm<sup>2</sup> erreicht.

Vergleichsspannung Mises



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



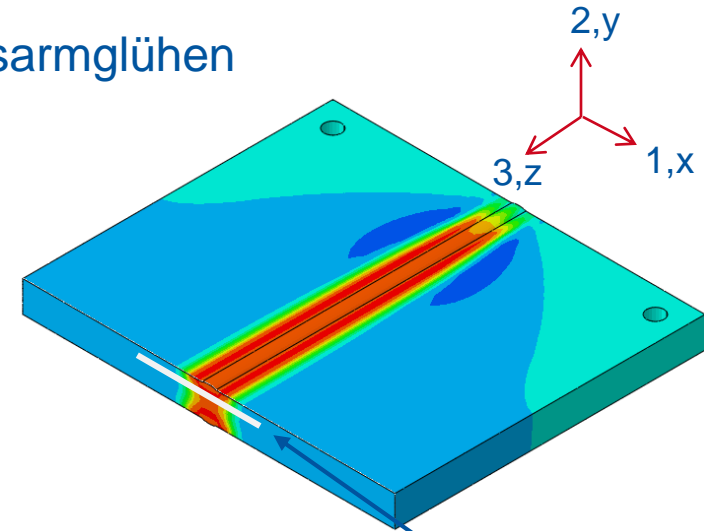
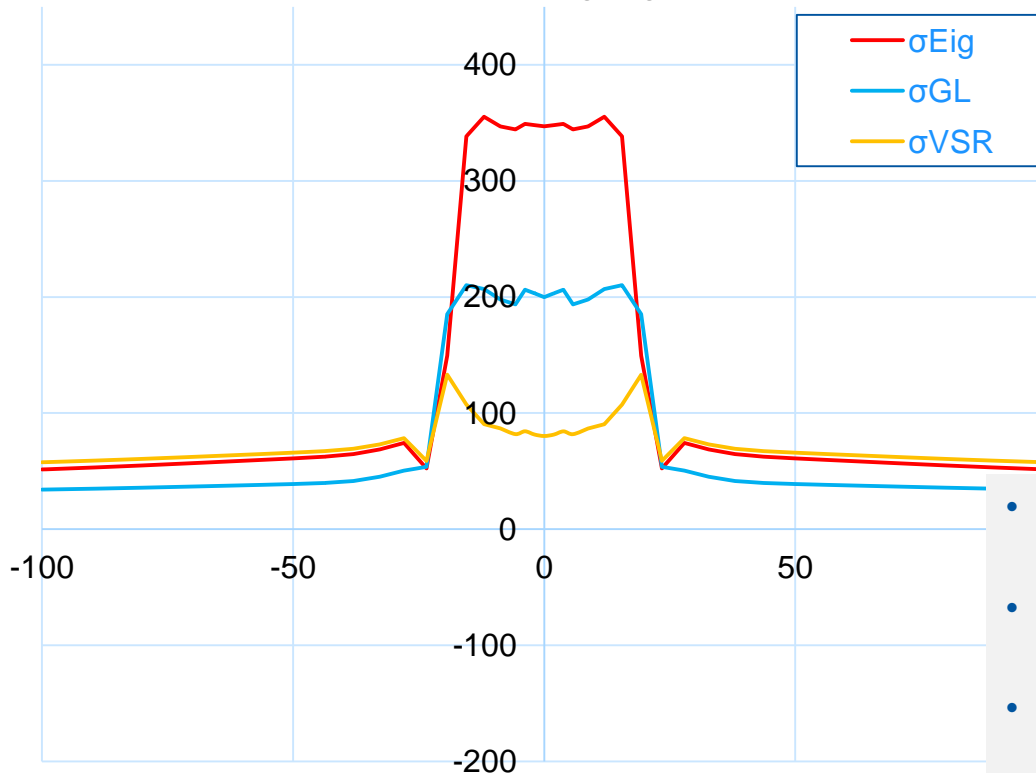
## Gliederung

- Modellaufbau
- Einfluss Werkstoffverfestigung
- Vergleich VSR-Verfahren & Spannungsarmglühen
- Zusammenfassung

# Vergleich VSR-Verfahren & Spannungsarmglühen

## Vergleich des VSR-Verfahren mit dem Spannungsarmglühen

Vergleichsspannung nach Mises für kinematische Verfestigung



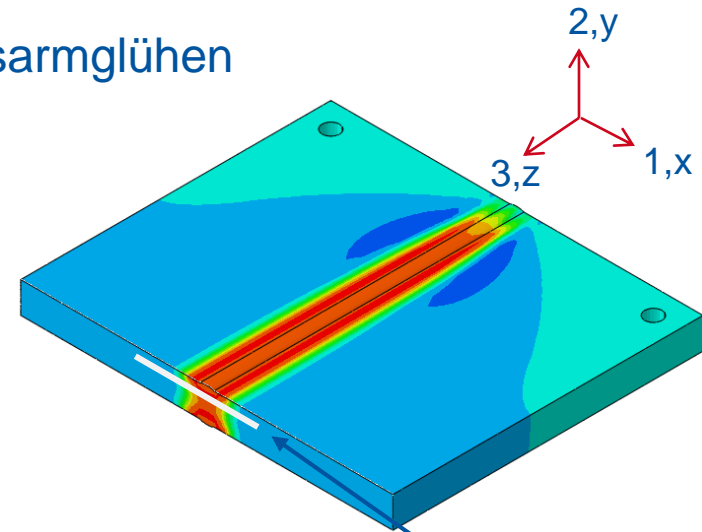
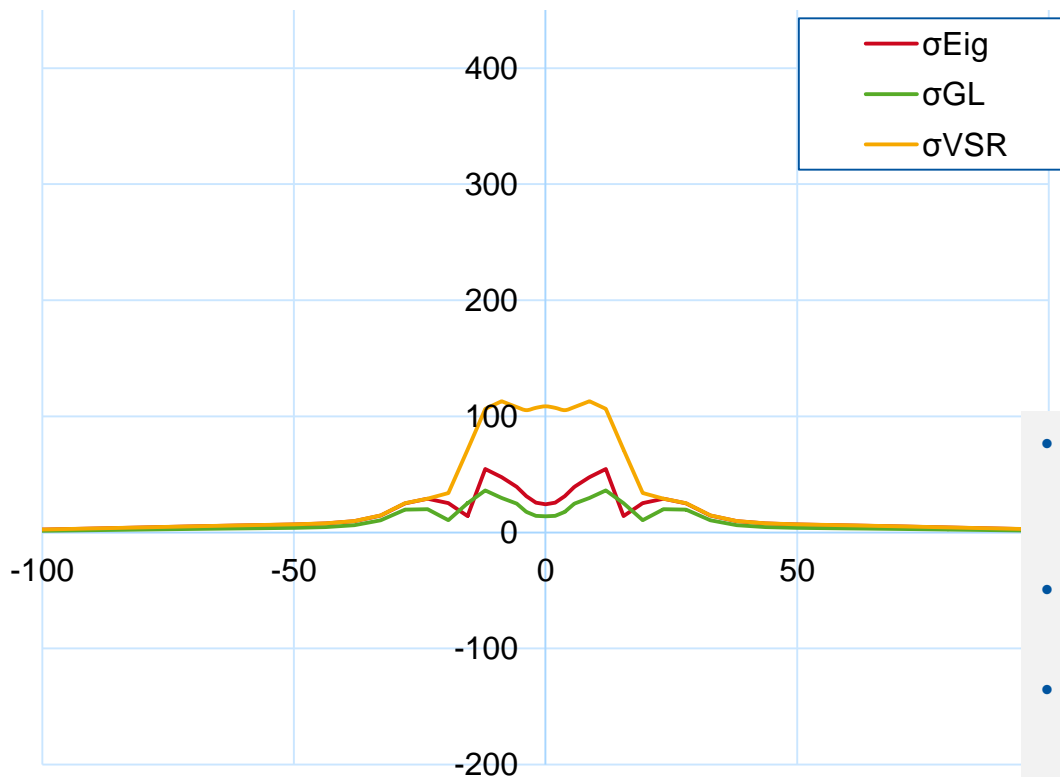
Messtrecke:  
4 mm unter der  
Oberfläche

- VSR-Behandlung: Reduzierung der Vergleichsspannung auf 130 N/mm<sup>2</sup>
- Spannungsarmglühen: Reduzierung der Vergleichsspannung auf 210 N/mm<sup>2</sup>
- Der Effekt beim Spannungsarmglühen ist bei kinematischer Verfestigung deutlich geringer als beim VSR-Verfahren.

# Vergleich VSR-Verfahren & Spannungsarmglühen

## Vergleich des VSR-Verfahren mit dem Spannungsarmglühen

Spannungen quer zur Nahrichtung:  $\sigma_x$



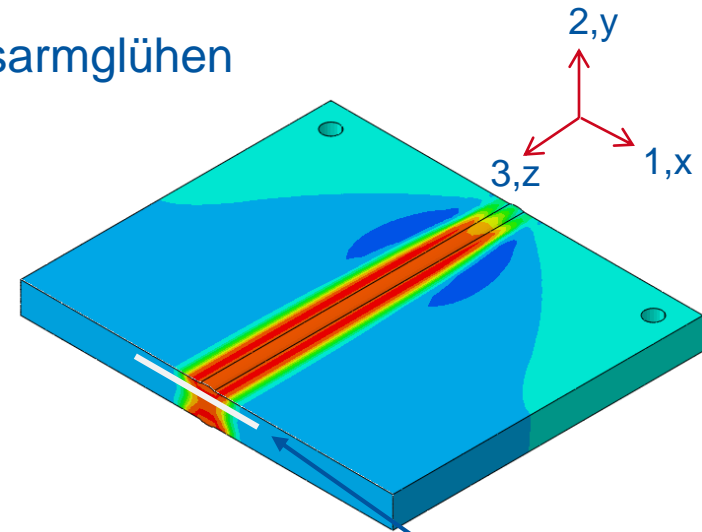
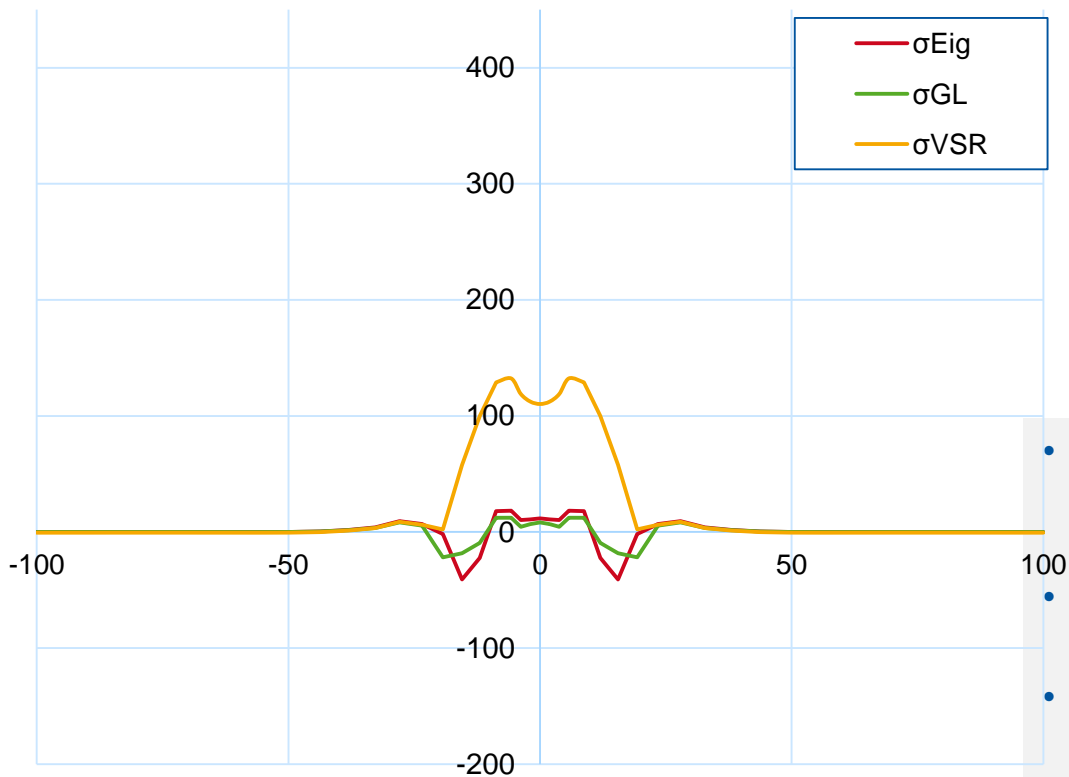
Messtrecke:  
4 mm unter der  
Oberfläche

- Spannungsarmglühen: geringe Reduzierung der Zugspannung um ca. 10 N/mm<sup>2</sup>
- VSR-Verfahren: Erhöhung der Spannung auf ca. 100 N/mm<sup>2</sup>
- Quer zur Nahrichtung werden die Spannungen durch die VSR-Behandlung erhöht.

# Vergleich VSR-Verfahren & Spannungsarmglühen

## Vergleich des VSR-Verfahren mit dem Spannungsarmglühen

Senkrecht zur Naht:  $\sigma_y$



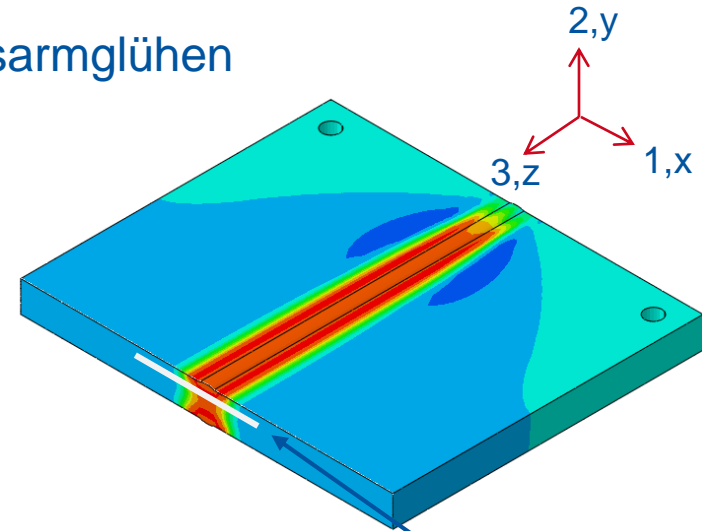
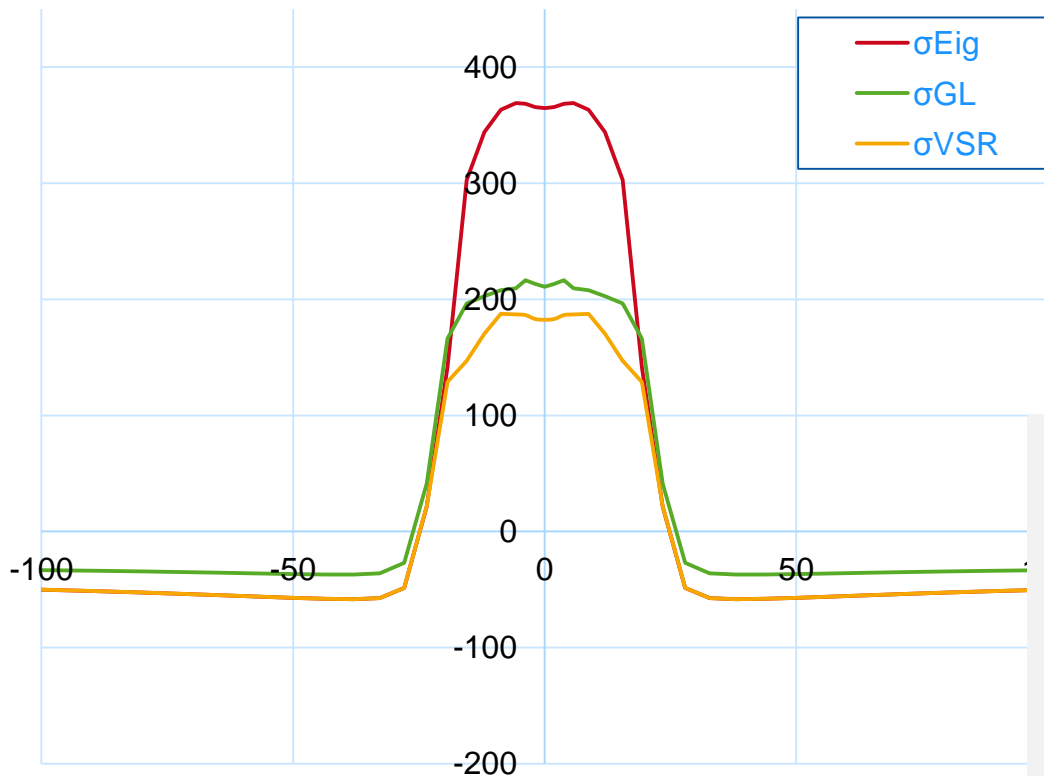
Messtrecke:  
4 mm unter der  
Oberfläche

- Spannungsarmglühen: geringe Reduzierung der Druckspannung um ca. 15 N/mm<sup>2</sup>
- VSR-Verfahren: Erhöhung der Spannung auf ca. 130 N/mm<sup>2</sup> im Zugbereich
- Senkrecht zur Nahtichtung werden die Spannungen durch die VSR-Behandlung erhöht.

# Vergleich VSR-Verfahren & Spannungsarmglühen

## Vergleich des VSR-Verfahrens mit dem Spannungsarmglühen

In Nahrichtung:  $\sigma_z$



Messtrecke:  
4 mm unter der  
Oberfläche

- Deutliche Reduzierung der Spannungen in Nahrichtung bei beiden Verfahren.
- Spannungsarmglühen: Verringerung auf ca. 200 N/mm<sup>2</sup> im Zugbereich
- VSR-Verfahren: Verringerung auf ca. 190 N/mm<sup>2</sup> im Zugbereich



## Gliederung

- Modellaufbau
- Einfluss Werkstoffverfestigung
- Vergleich VSR-Verfahren & Spannungsarmglühen
- Zusammenfassung



## 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 Spannungsarmglühens 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.