



Herdweg 13, D-75045 Wössingen Lkr. Karlsruhe
E-Post: loose@tl-ing.de Web: www.tl-ing.de, www.loose.at
Mobil: +49 (0) 176 6126 8671 Tel: +49 (0) 7203 329 023 Fax: +49 (0) 7203 329 025

Grundlagen der Schweißsimulation und Wärmebehandlungssimulation Anwendungsmöglichkeit und Benefits

Dr.-Ing. Tobias Loose
20.10.2015

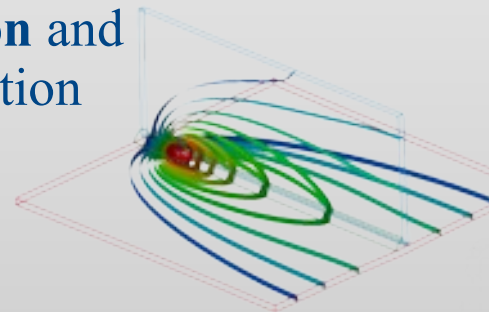
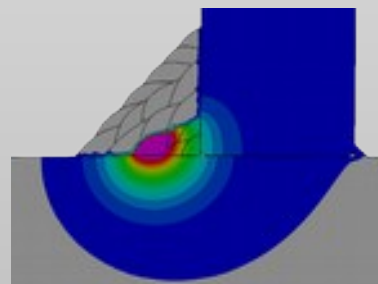
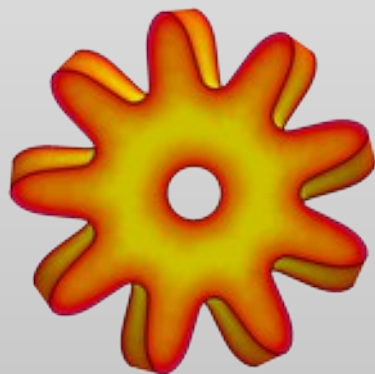




Numerical Simulation for Welding and Heat Treatment since 2004

- Consulting
- Training
- Support
- Software Development
- Software Distribution

for **Welding Simulation** and
Heat Treatment Simulation



www.WeldWare.eu

In **WeldWare®** steckt jahrzehntelange Erfahrung vereint in einer Software: Wärmeleitung beim Schweißen von Stahl - Gefügeveränderungen und Eigenschaften in der Wärmeinflusszone

www.SimWeld.eu

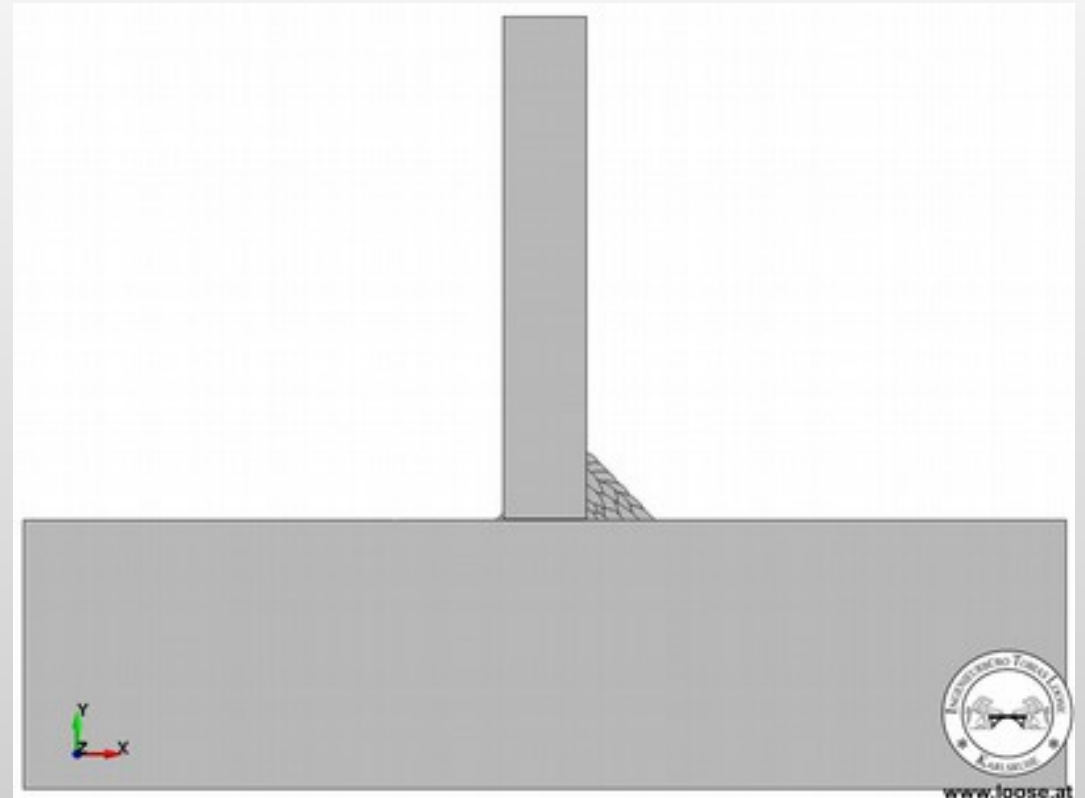
In **SimWeld** steckt langjährige Forschung und Entwicklung in der anwendungsnahe Schweißprozesssimulation vom

www.DynaWeld.eu

DynaWeld
Welding and Heat-Treatment with LS-DYNA
Distortion - Residual Stress - Microstructure

Internet:
DEeutsch: www.loose.at
ENglish: www.tl-ing.eu
ESpañol: www.loose.es

Was leistet die **Schweißsimulation**

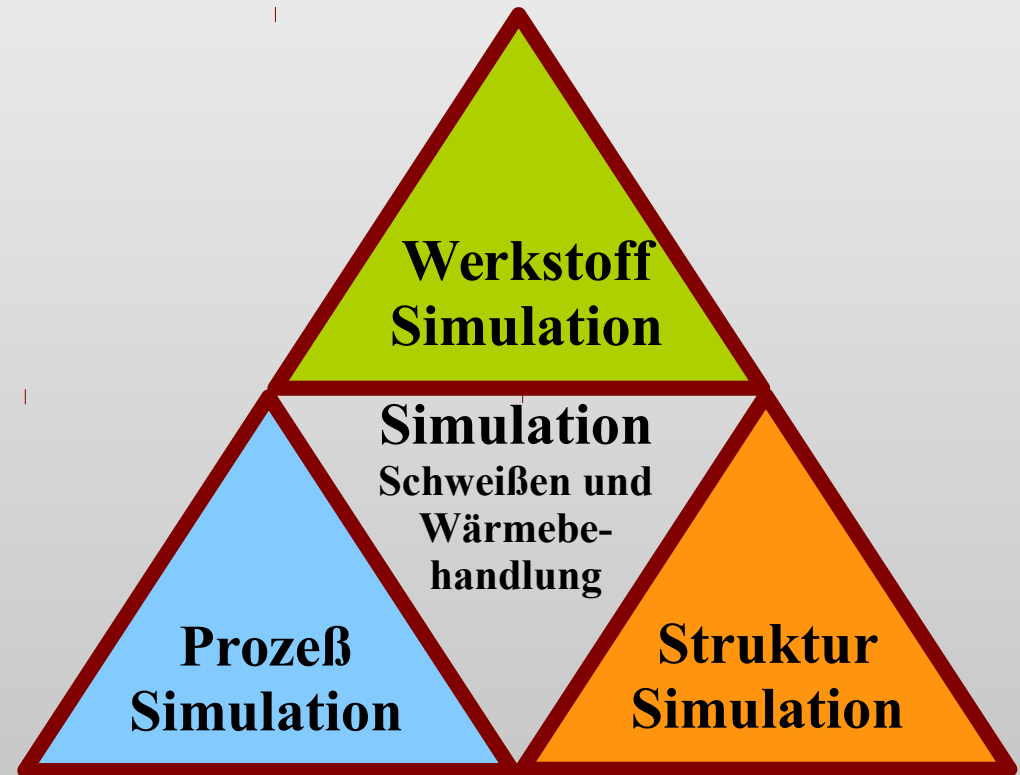


was leistet Schweißsimulation

Mit der Schweißsimulation wird die Zustandsänderung eines Bauteils während des thermischen Fügens berechnet.

Die Schweißsimulation gliedert sich in:

- **Werkstoffsimulation**
 - Gefüge
 - mechanische Kennwerte
- **Prozeßsimulation**
 - Schmelzbadausbildung
 - Wärmeeintrag
 - lokales Temperaturfeld
- **Struktursimulation**
 - Verzug
 - Eigenspannung
 - globales Temperaturfeld





was leistet Schweißsimulation

Die Schweißsimulation gliedert sich in die
Prozeßkettensimulation ein:

Umformen - Wärmebehandeln - Fügen
und dient damit der

Auslegung der Fertigung

Sie gliedert sich andererseits in die Festigkeitsberechnung ein
und dient damit der

Auslegung des Bauteils oder der Konstruktion





Benefits

- **Verzugskontrolle**
 - treten während der Fertigung bezüglich Zusammenbau kritische Verformungen auf?
- **Verzugkompensation**
 - Auslegung des Fertigungsprozesses, so daß nach Fertigung die Zielgeometrie erreicht wird.
 - Einsparung von Richtkosten und Ausschußproduktion
- **Prozeßauslegung**
 - Erzielung eines stabilen Fügeprozesses
 - Erzielung gewünschter Schmelzbadgeometrie
 - Vermeidung von Nahtfehlern (Einbrandkerben, ungenügende Durchschweißung)
 - Vermeidung schädigender Überhitzung
- **Qualitätssicherung**
 - Einstellung gewünschter mechanischer Eigenschaften im Nahtbereich
 - Überwachung von Prozeßparametern oder des Prozesse.
- **Festigkeitsauslegung**
 - Bestimmung der Grenztragfähigkeit oder des Tragverhaltens unter Gebrauchslast
- **Beantwortung einer Vielzahl von individuellen Fragestellungen**

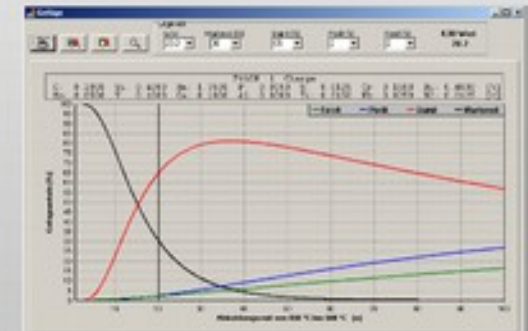
WeldWare®

Schweißtechnologisches
Beratungssystem



Mecklenburg-Vorpommern

In **WeldWare®** steckt jahrzehntelange
Erforschung vereint in einer Software:
Wärmeführung beim Schweißen von Stahl -
Gefügeumwandlungen und Eigenschaften
in der Wärmeeinflußzone



Werkstoffdaten

Gefüge - mechanische Kennwerte

dient...

- der Kalkulation der Wärmeführung vor Schweißbeginn an Stahl
- der Berechnung von Gefüge und mechanischen Kennwerten in der WEZ von Schweißnähten
- der Ermittlung notwendiger Vorwärmtemperaturen an realen Bauteilen

nutzt...

- Chargenübergreifende Regressionsgleichungen
- Gemessene Schweiß-ZTU-Schaubilder von der SLV Mecklenburg-Vorpommern GmbH
- Zugehörige Materialdaten

Gefügezusammensetzung berechnen



Analyse des Grundwerkstoffes zur Gefügeberechnung

Analyse

C	(≤ 0.18)	[%]	0.1800
Si	()	[%]	0.4000
Mn	(≤ 1.50)	[%]	0.7500
P	(≤ 0.04)	[%]	0.0200
S	(≤ 0.04)	[%]	0.0200
Cr	()	[%]	0.1000
Ni	()	[%]	0.0500
Mo	()	[%]	0.0200
V	()	[%]	0.0100
Cu	()	[%]	0.1700
Al	()	[%]	0.0200
Ti	()	[%]	0.0100
Nb	()	[%]	0.0200
N2	(≤ 0.009)	[%]	0.0045

S275JO
1.0143

Eingabe

Wähle
 Abkühlzeit Abkühlzeitbereich

kleinste Abkühlzeit (≥ 1) [s]: 1
 größte Abkühlzeit (≤ 300) [s]: 100
 Schrittweite (≥ 1) [s]: 10

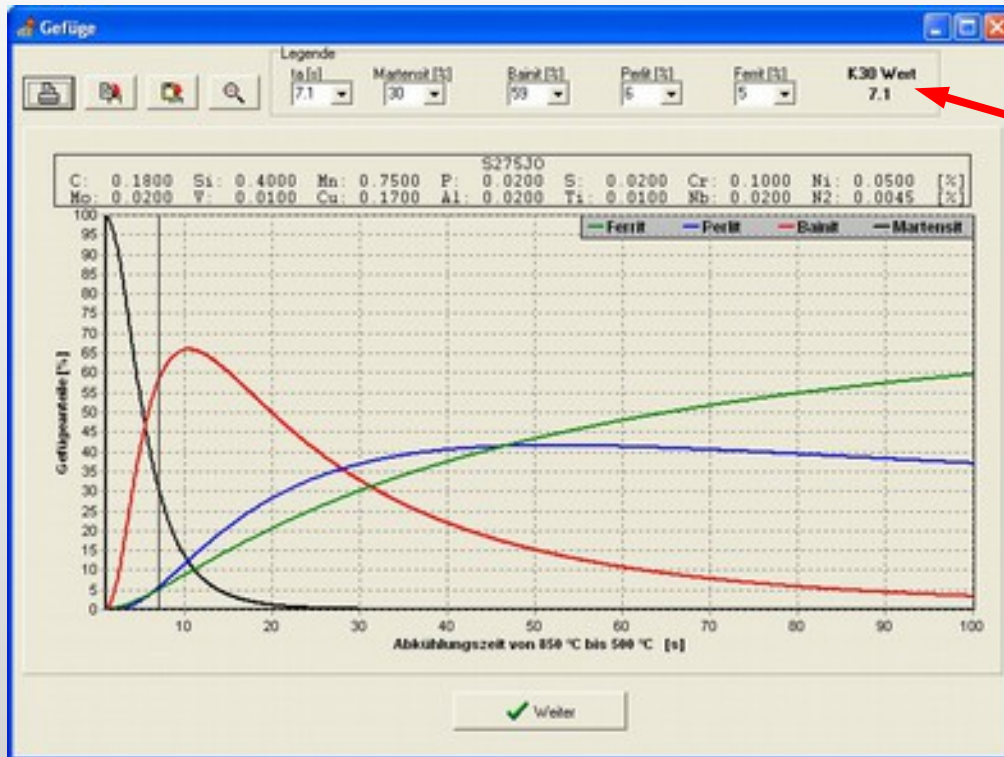
Berechnung

Abkühlzeitbereich

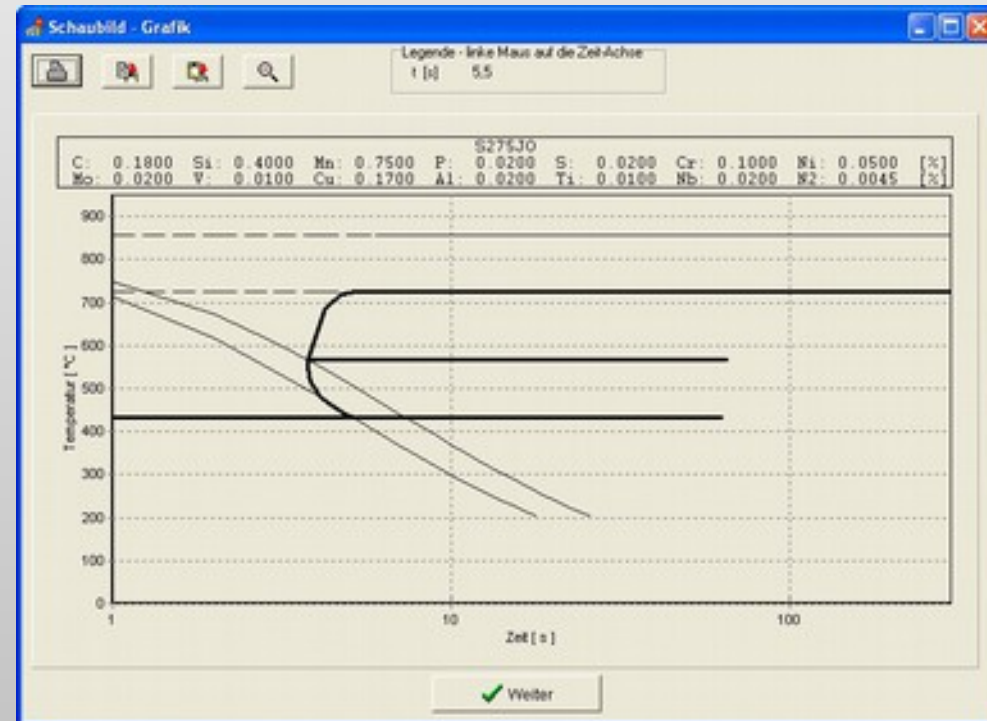
Zeit	MARTENSIT	ZWSTUFE	PERLIT	FERRIT
1	100	0	0	0
11	10	66	14	10
21	1	48	29	22
31	0	32	37	31
41	0	21	41	38
51	0	15	41	44
61	0	10	42	48

Vorausberechnung des Gefüges in der WEZ aufgrund der Stahlsorte und der chemischen Zusammensetzung

K30 Wert bestimmen und Schweiß-ZTU anzeigen

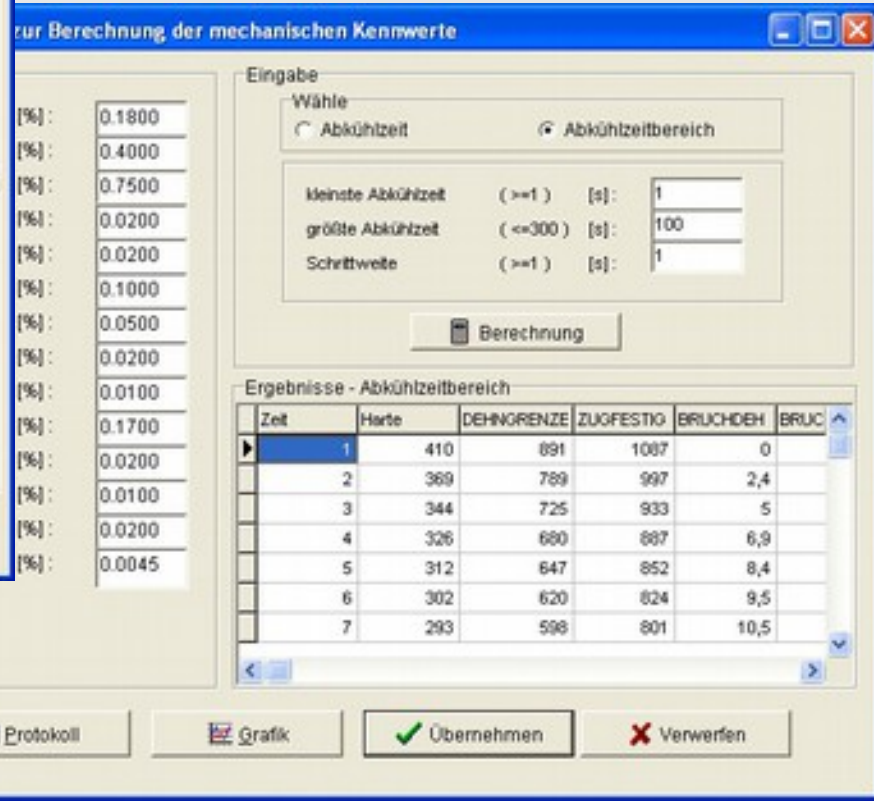
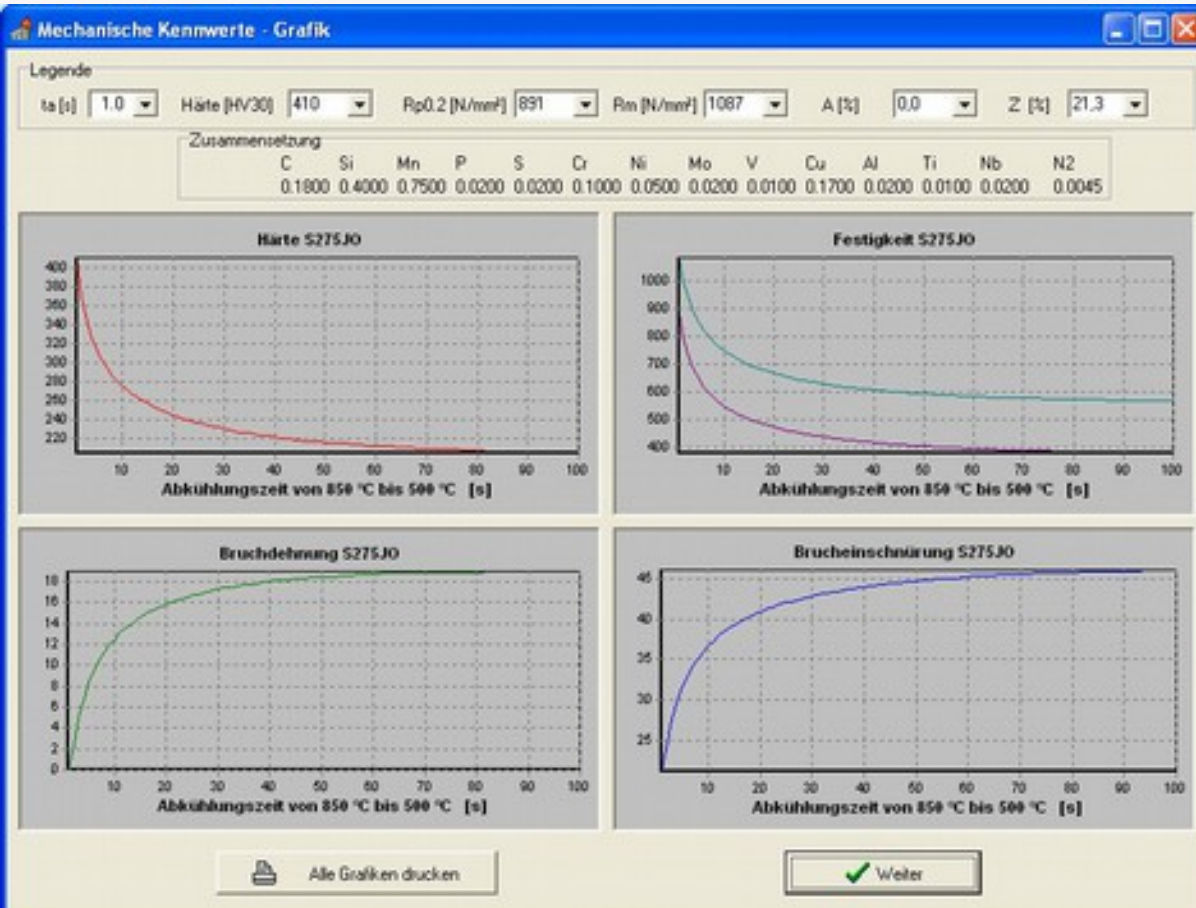


der K30-Wert kennzeichnet die $t_{8,5/5}$ Zeit bei der 30 % Martensit entstehen und gilt als Mindestwert der $t_{8,5/5}$ Zeit (Abkühlzeit) zur Vermeidung von Rissen infolge Martensit und Aufhärtung



Abschätzung der zu erwartenden mechanischen Kennwerte in der WEZ ...

- Härte
- Dehngrenze
- Zugfestigkeit
- Bruchdehnung
- Brucheinschnürung



... dient der Vermeidung technologischer Kerben im Vergleich zum ungeschweißten Grundwerkstoff

S275JO
1.0143

Vergleich S355J2+N (1.0577) und S355MC (1.0976)

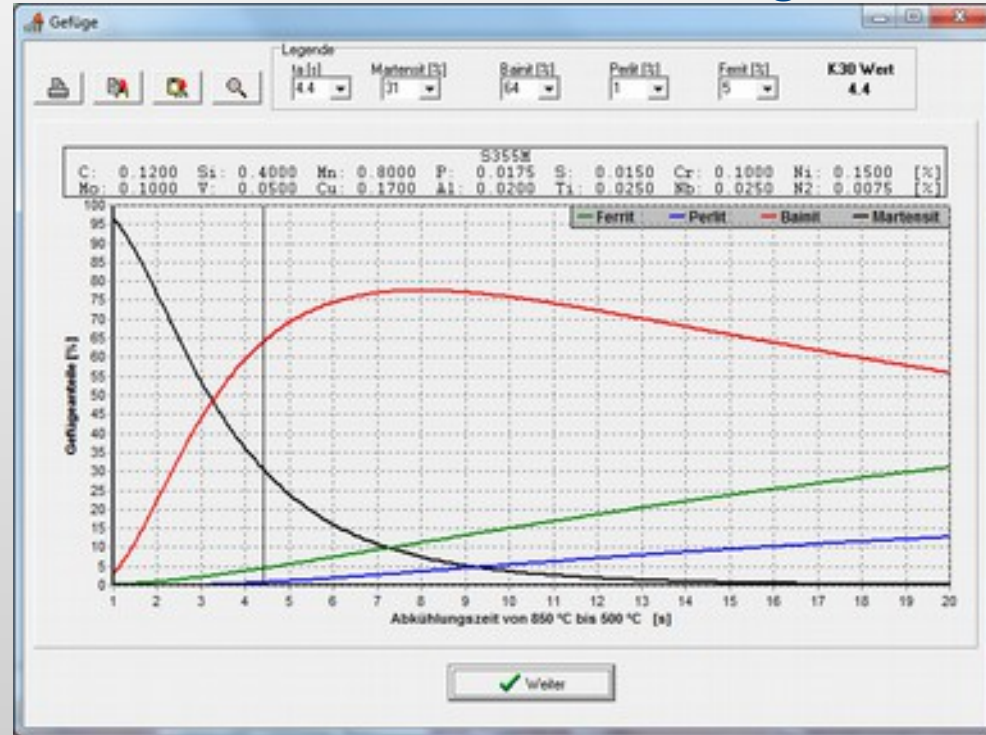
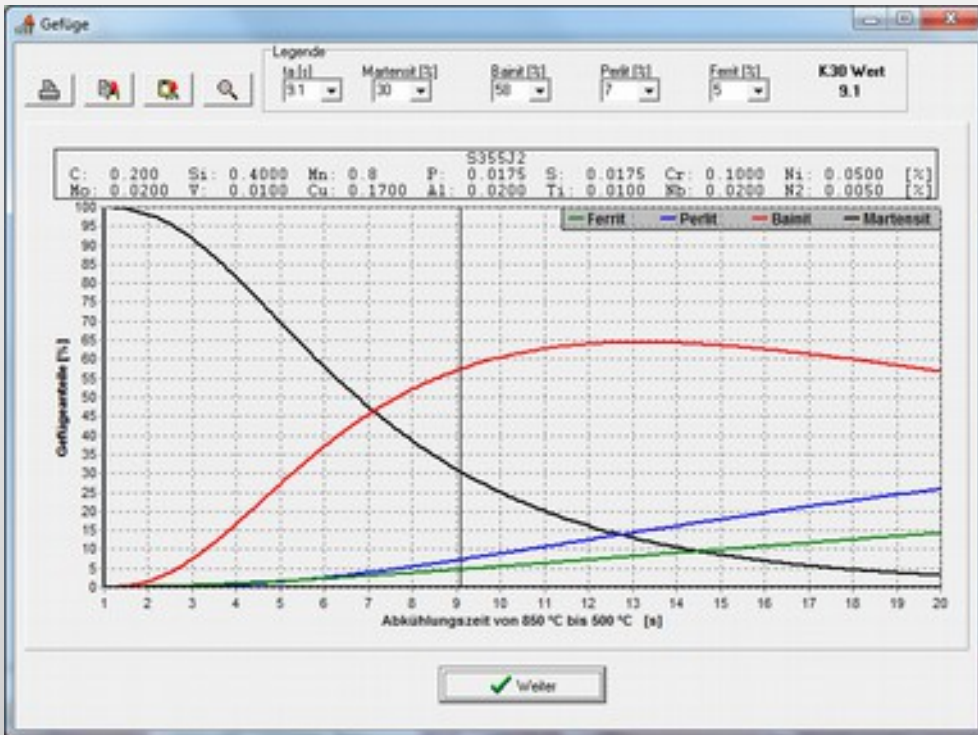
am Beispiel einer Schweißaufgabe mit einer $t_{8,5/5}$ Zeit von 5,9 s

S355J2+N (1.0577)

- 0,2 % Kohlenstoff, 0,8 % Mangan

S355MC (1.0976)

- 0,12 % Kohlenstoff, 0,8 % Mangan



$K_{30} = 9,1 \text{ s} > t_{8,5/5}$ Zeit von 5,9 s

Bruchdehnung : 10,2 % bei $t_{8,5/5} = 5,9 \text{ s}$

Härte: 318 HV30

$R_{p_{0,2}}$: 629 N/mm²

$K_{30} = 4,4 \text{ s} < t_{8,5/5}$ Zeit von 5,9 s

Bruchdehnung : 19,1 % bei $t_{8,5/5} = 5,9 \text{ s}$

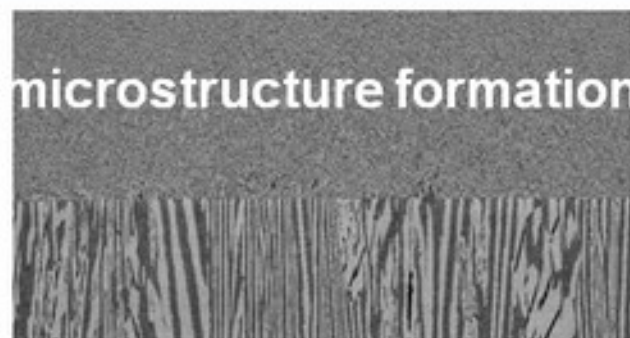
Härte: 281 HV30

$R_{p_{0,2}}$: 642 N/mm²

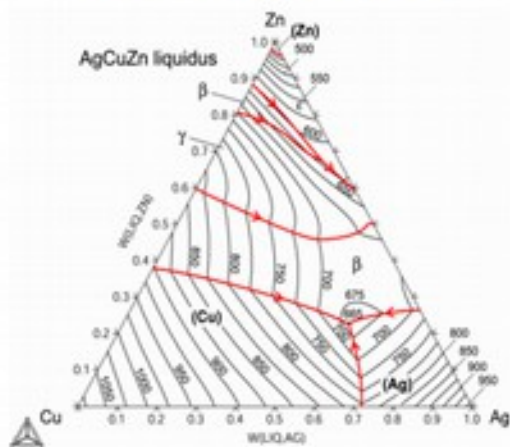


Simulation auf Mikroebene

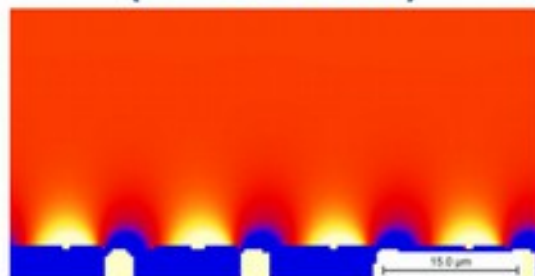
Erstarrung, Kornwachstum, Gefügeumwandlung



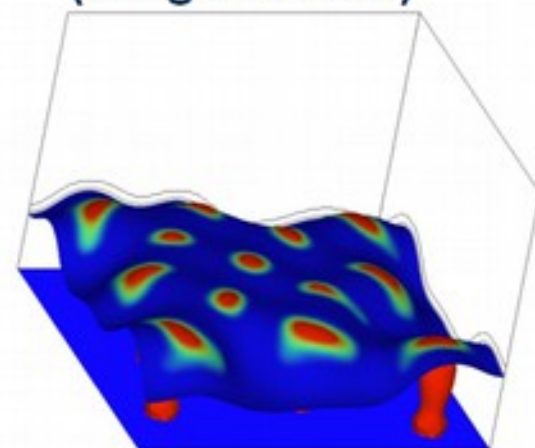
thermodynamics
(energy scale)



transport / diffusion
(time scale)



interfaces
(length scale)



TQ interface and
databases from TCS

diffusion solver

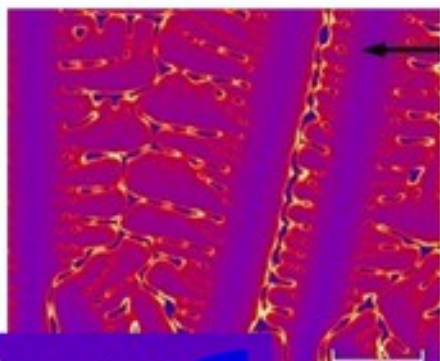
phase field method



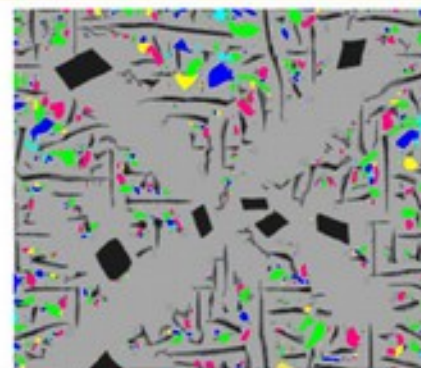
powered by technology



access



Steel
(e.g. stainless steel)

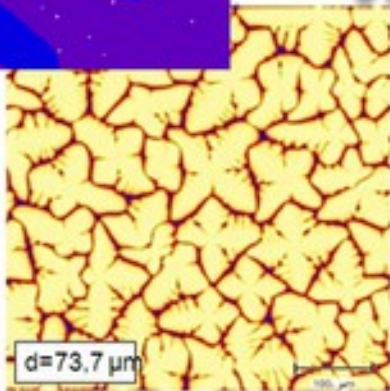


Al-alloys
(e.g. KS 1295)



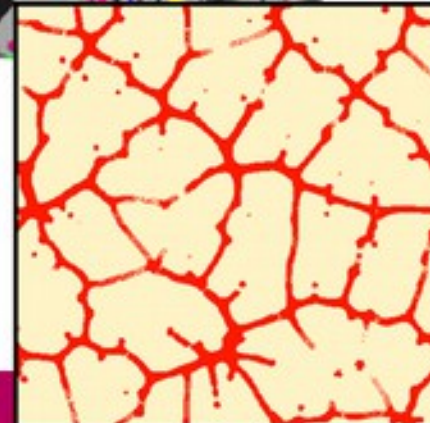
micress®

www.micress.de

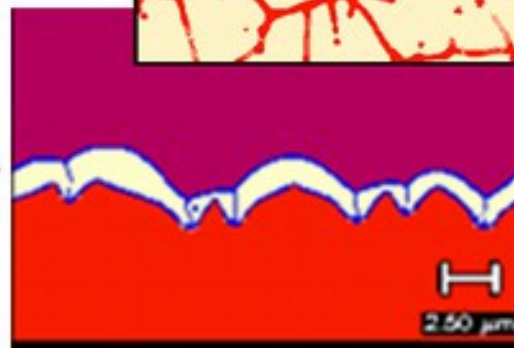


Superalloys
(e.g. IN 718)

d=73,7 μm



Solders
(e.g. SAC)



2.50 μm



powered by technology



access

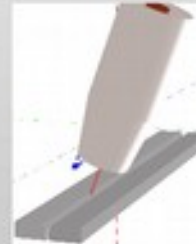


SimWeld



In **SimWeld** steckt langjährige Forschung und Entwicklung in der anwendungsnahen Schweißprozeßsimulation vom

Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH Aachen.



ISF
WELDING AND JOINING INSTITUTE
RWTH AACHEN
UNIVERSITY

Schmelzbadberechnung

Schweißparameterfindung (MSG)

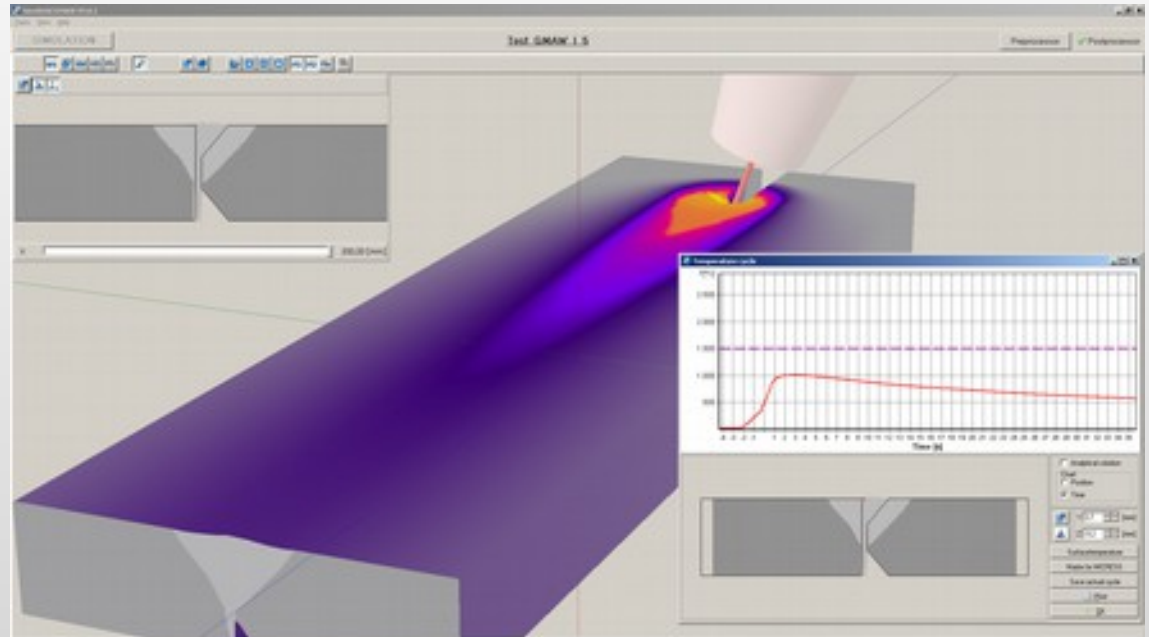
Berechnung der eingebrachten Energie

Eingabeparameter:

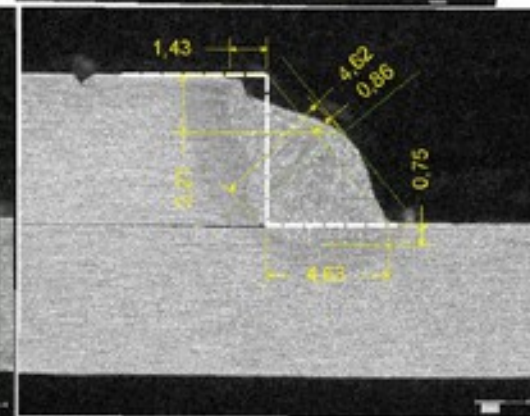
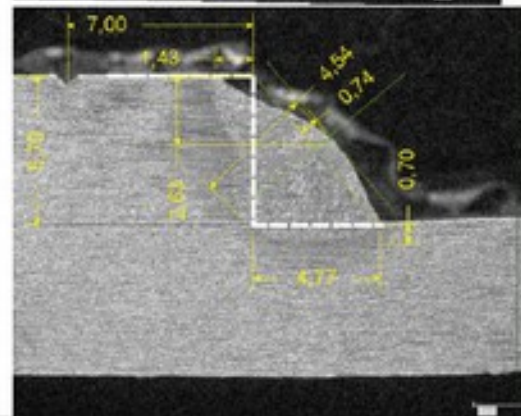
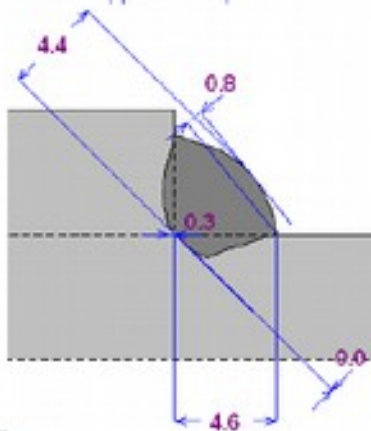
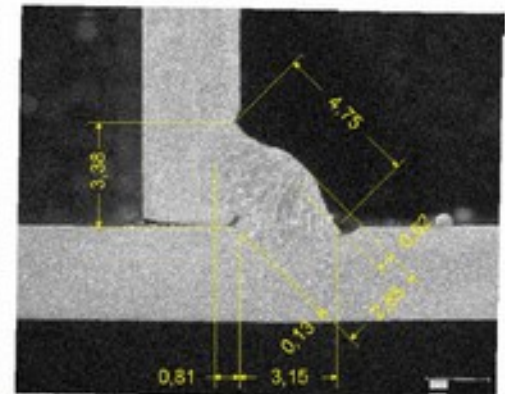
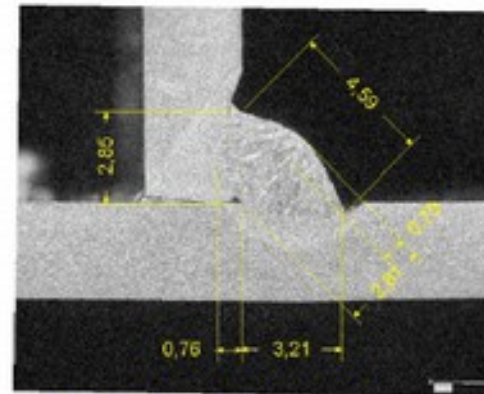
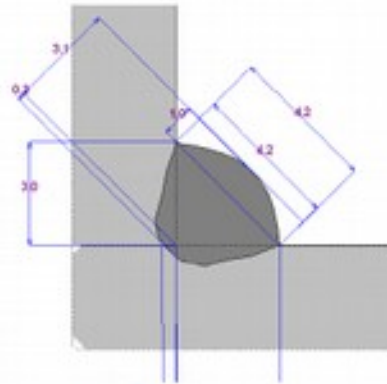
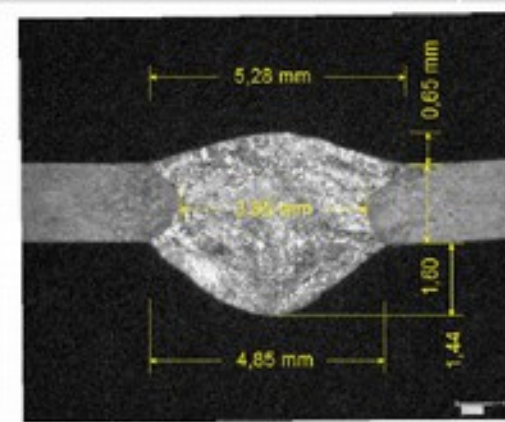
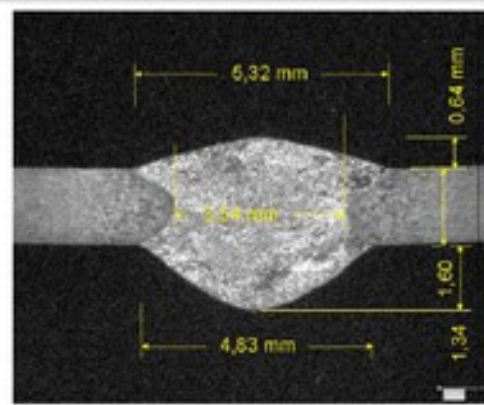
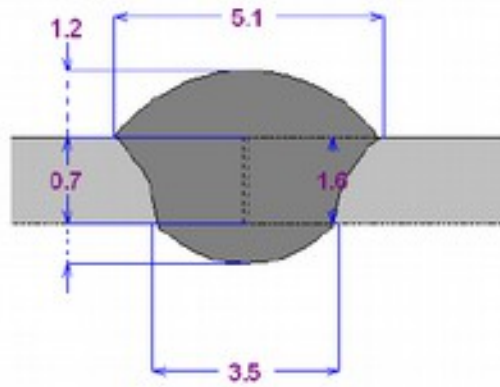
- Drahtvorschub
- Schutzgas
- Schweißgeschwindigkeit
- Stromstärke / Spannung
- Anstellwinkel
- Schweißposition und Bauteilgeometrie

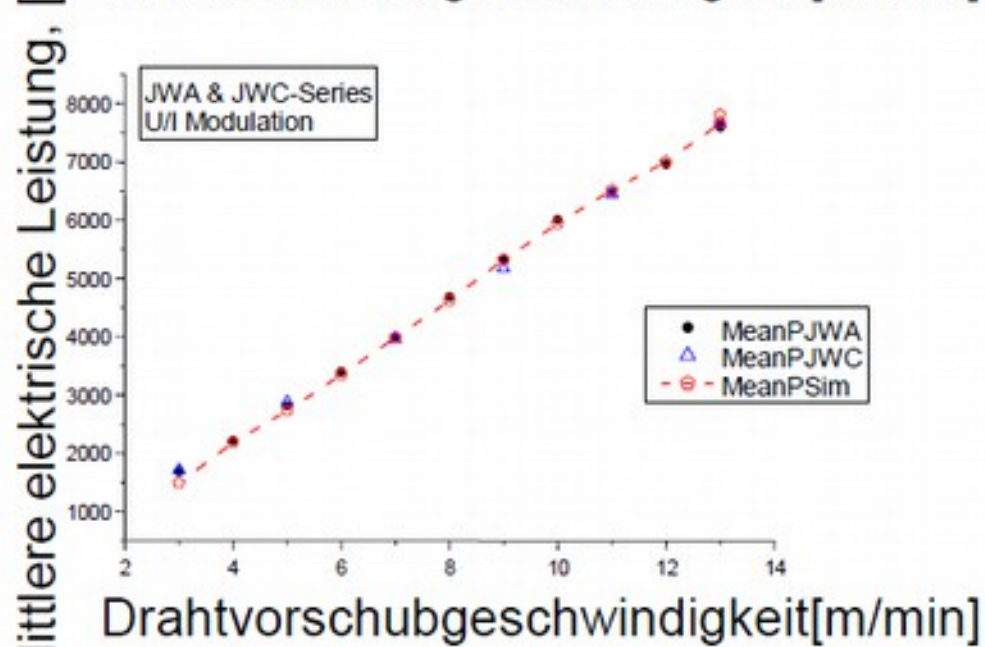
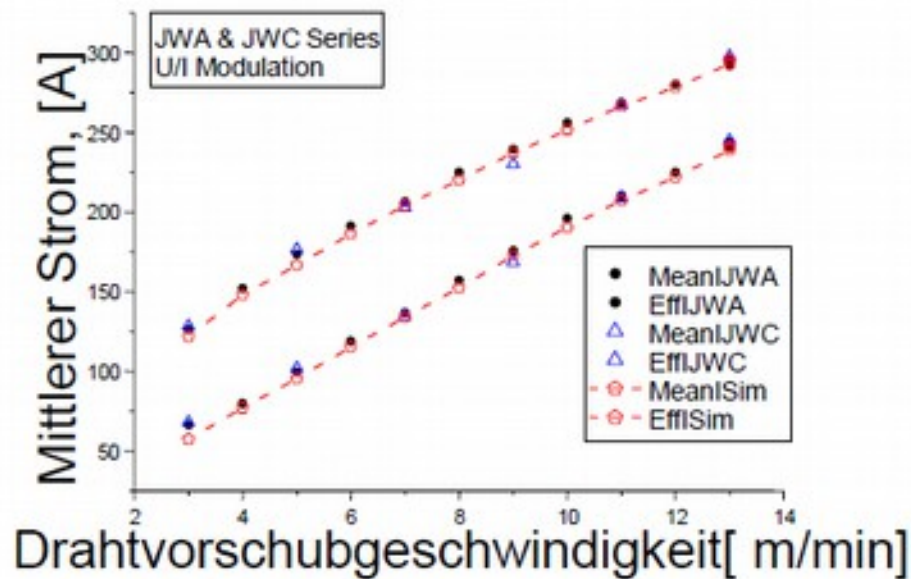
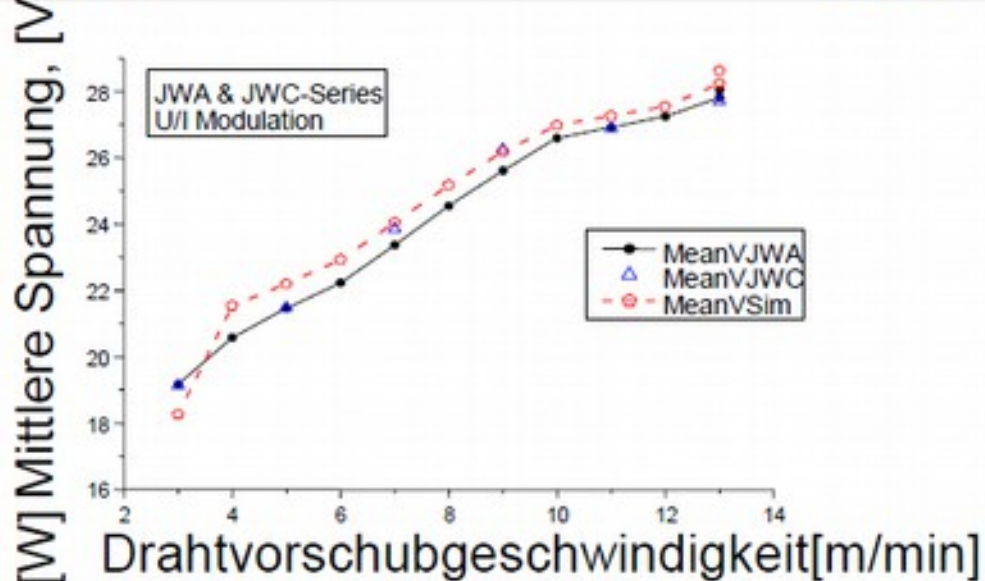
Ausgabeparameter:

- Nahtgeometrie
- Einbrand / Einbrandkerben
- Schweißbarkeit
- Temperaturverlauf und Tropfenablösung
- Kontrollgrößen: Schweißstrom, Spannung zwischen Bauteil und Brenner



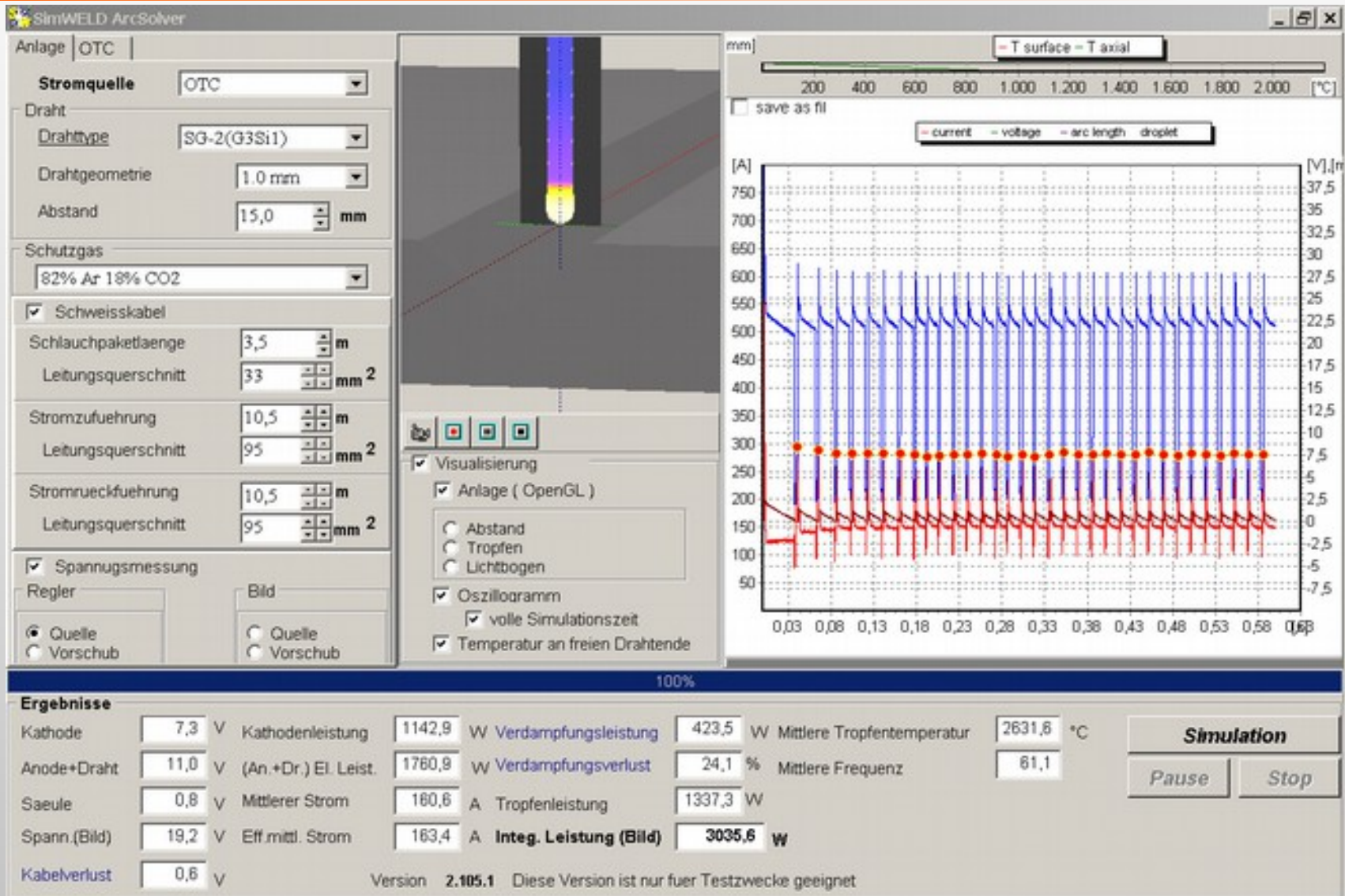
Berechnungszeit zwischen 0,5 und 2 Minuten



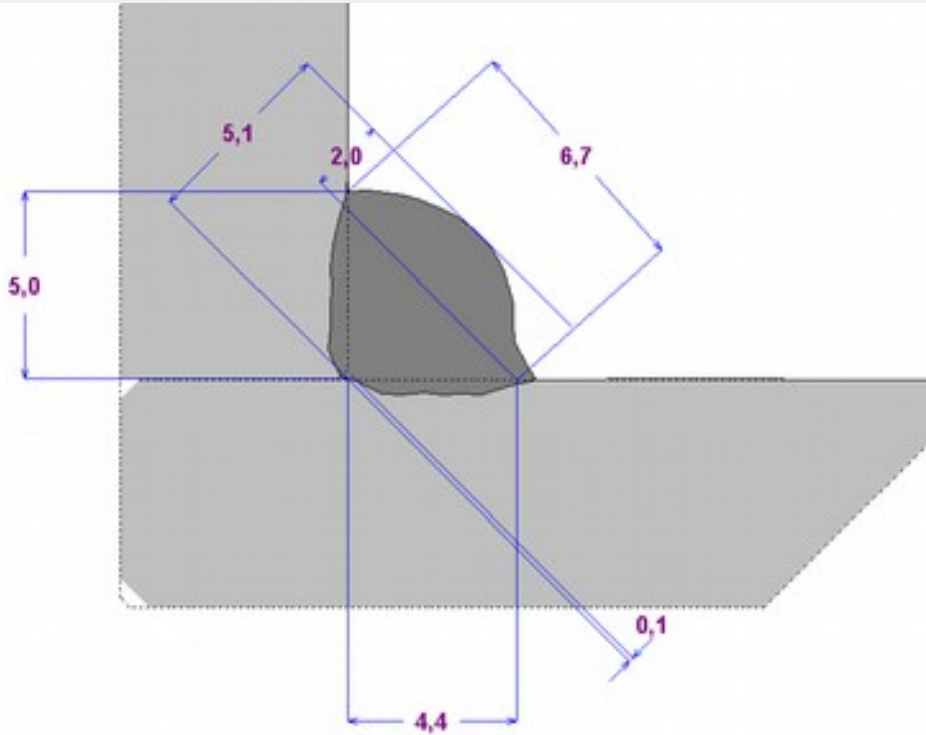


Grundwerkstoff	DC01
Blindschweißung	
Werkstückdicke	2,99mm
Schweißdraht	YM-28S / JIS-3312
Drahtdurchmesser	1,0mm
Schutzgas	Corgon18
Prozess Typ	U/I-Modulation
<i>Kontaktrohrabstand</i>	<i>15mm</i>

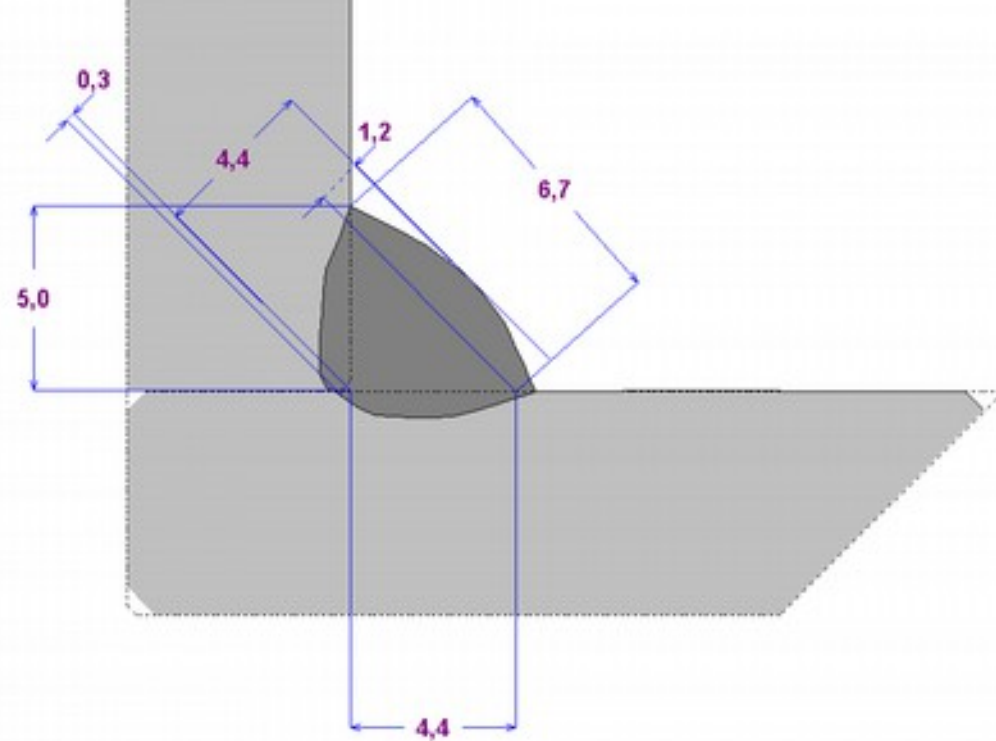
Lichtbogen, Tropfenablösung, Leistung



Kehlnaht

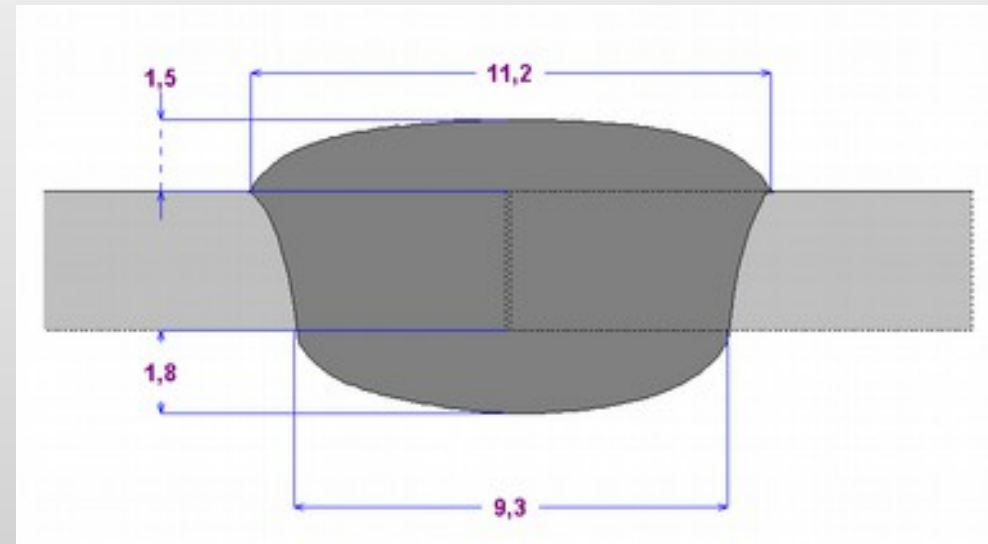
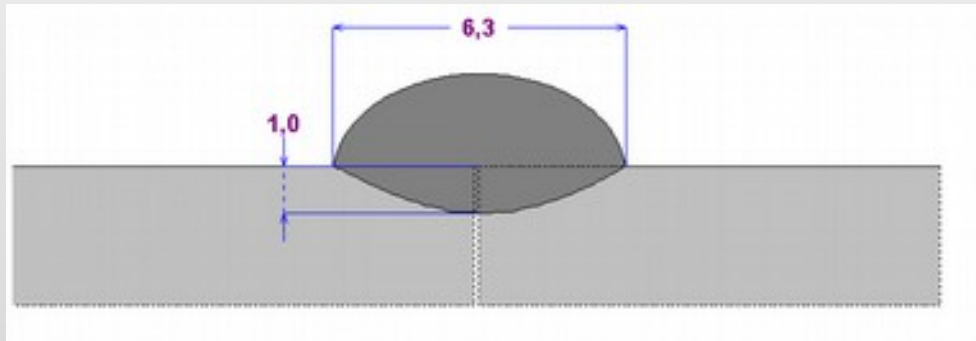


Schweißgeschwindigkeit: **25 cm/min**
Drahtvorschub: **6 m/min**



Schweißgeschwindigkeit: **50 cm/min**
Drahtvorschub: **10 m/min**

Stumpfnahht



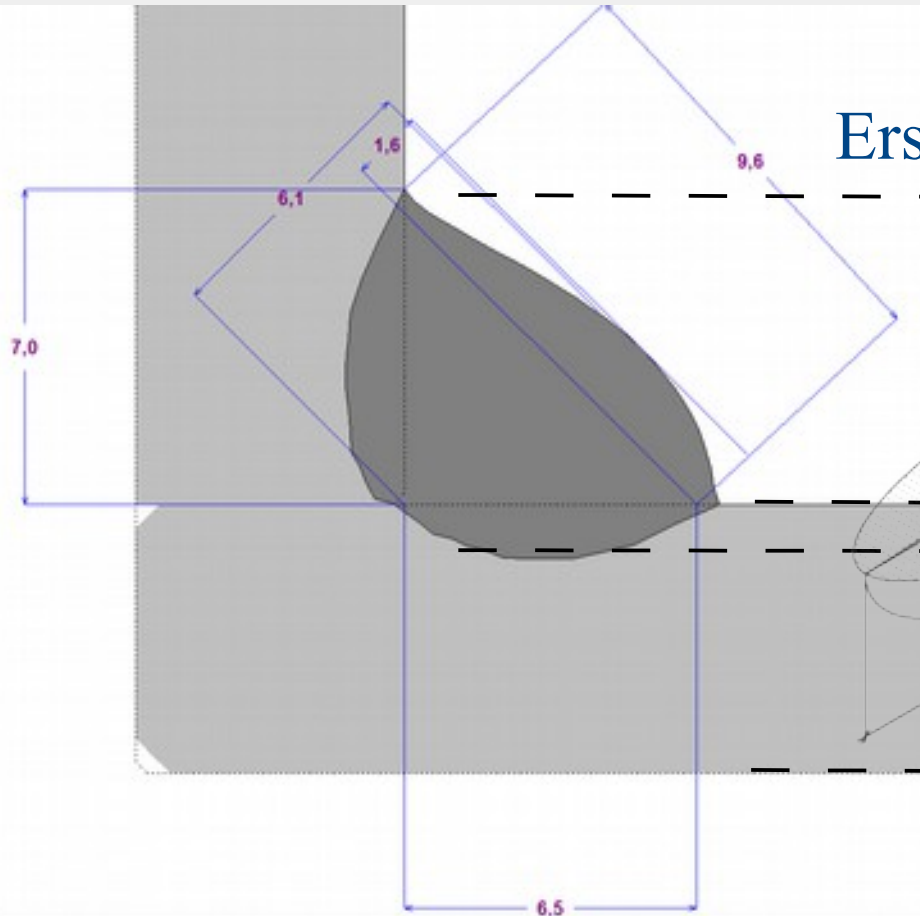
Schweißgeschwindigkeit: 50 cm/min
Drahtvorschub: 6 m/min

30 cm/min
10 m/min

Kopplung Prozeßsimulation – Struktursimulation

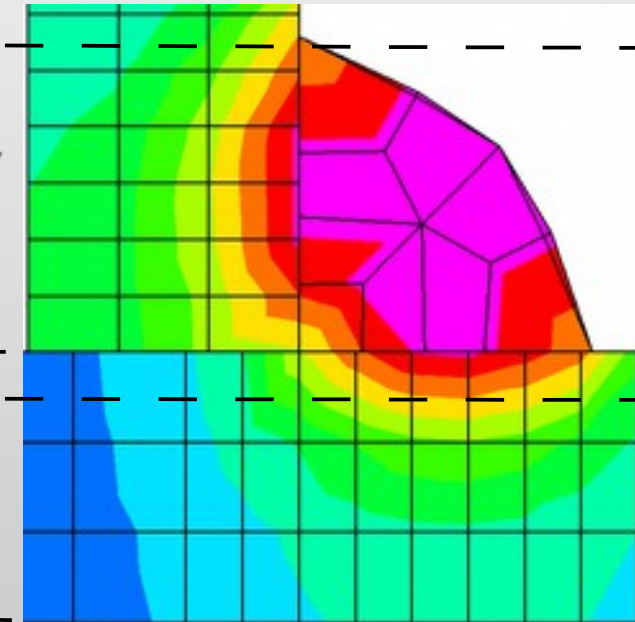
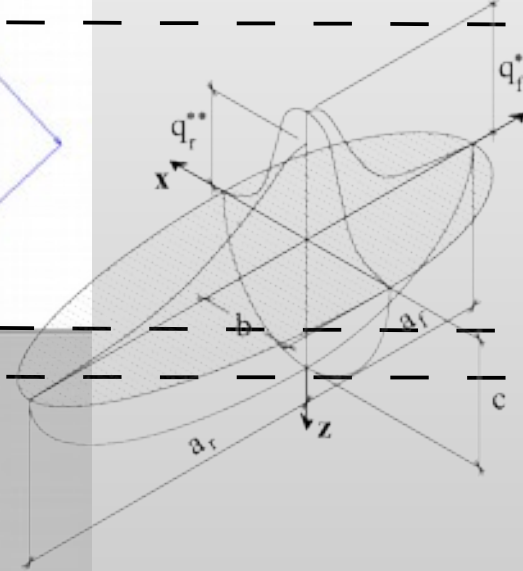
Transfer des berechneten Wärmeeintrages

SimWeld



LS-DYNA

Funktion der
äquivalenten
Ersatzwärmequelle



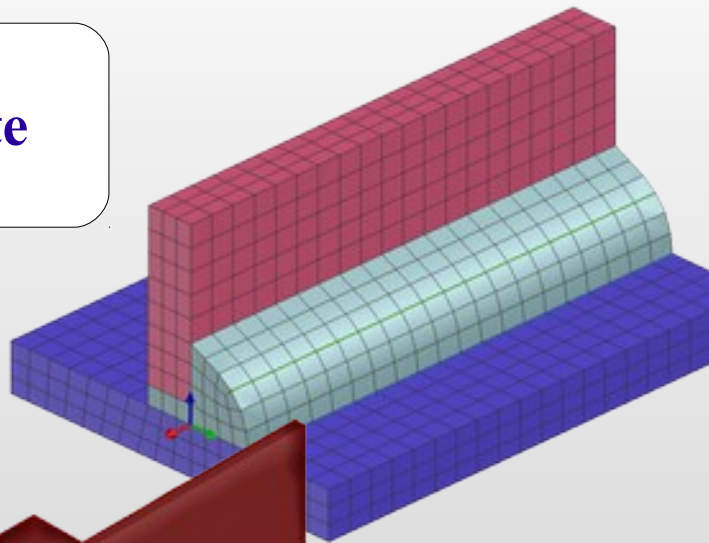
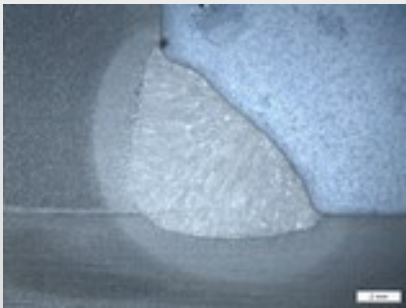


Schweißstruktursimulation

Eigenspannungen - Verzug - Temperatur
im gesamten Bauteil

Schweißstruktursimulation mit der Methode der Finiten Elemente

**Methode der
Finiten Elemente
FEM**



**Geometriebeschreibung
des Bauteils - CAD**

**Einteilung in Finte Elemente
Vernetzen**

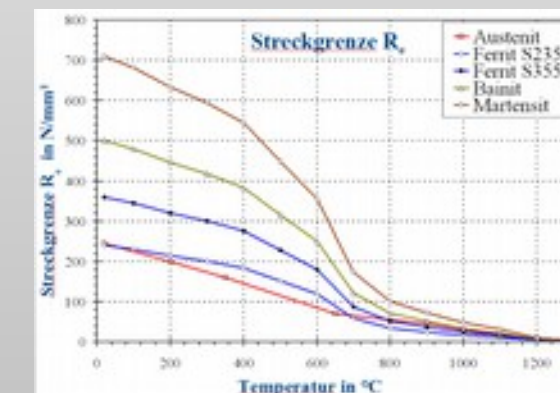
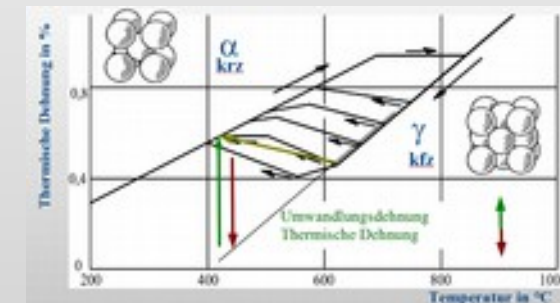
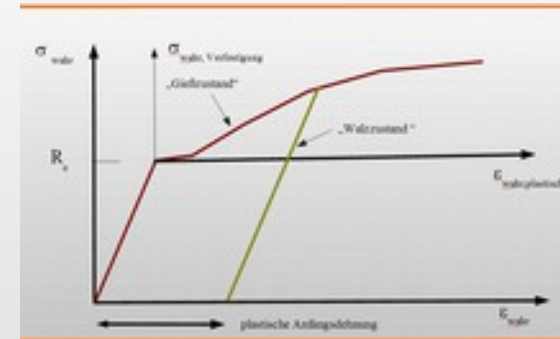
**Werkstoff
Materialeigenschaften**

**Schweißen
Definition der Ersatzwärmequelle**

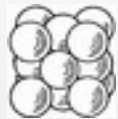
**Fertigungsprozeß
Materialzuweisung, Schweißfolge,
Spannvorrichtung, äußere Lasten**

Die wichtigsten Aspekte der Schweißstruktursimulation

- **Geometrie**
- **Material**
 - Temperaturabhängigkeit
 - Verfestigung
 - Rücksetzen der Verfestigung beim Aufschmelzen
 - Gefügeumwandlung
 - Umwandlungsdehnungen
 - gefügeabhängige Änderung der Materialkennwerte
- **Wärmequelle**
 - Geometrie und Wärmeeintragsfunktion
 - Bahn und Bahngeschwindigkeit
- **Mechanische Randbedingung**
 - Spannvorrichtung
 - Kontakt
- **Ergebnisgrößen**
 - Verformung
 - Eigenspannung und Dehnung
 - Gefügezusammensetzung und Härte



Gefügeumwandlung und Umwandlungseffekte



ferritisches Gefüge krz \rightarrow austinitisches Gefüge kfz
 Volumenänderung bei der Gefügeumwandlung

rechts:

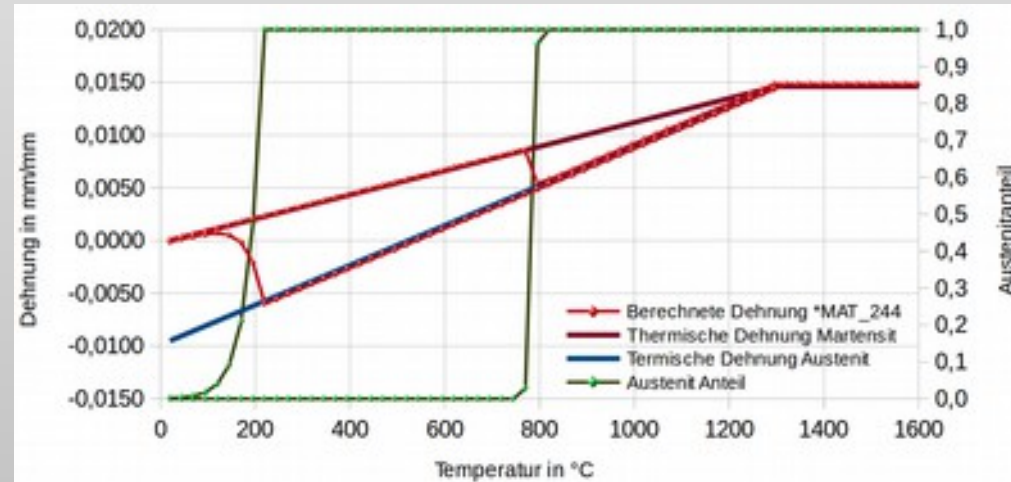
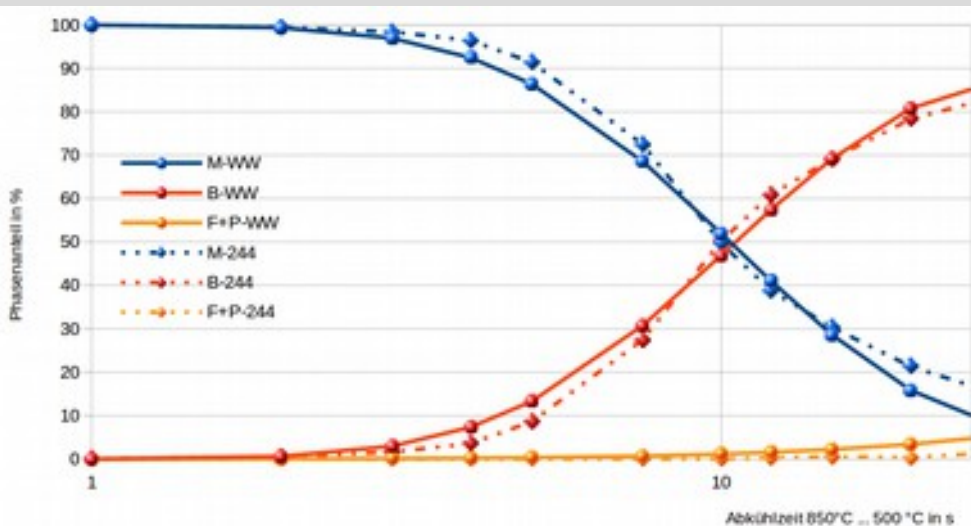
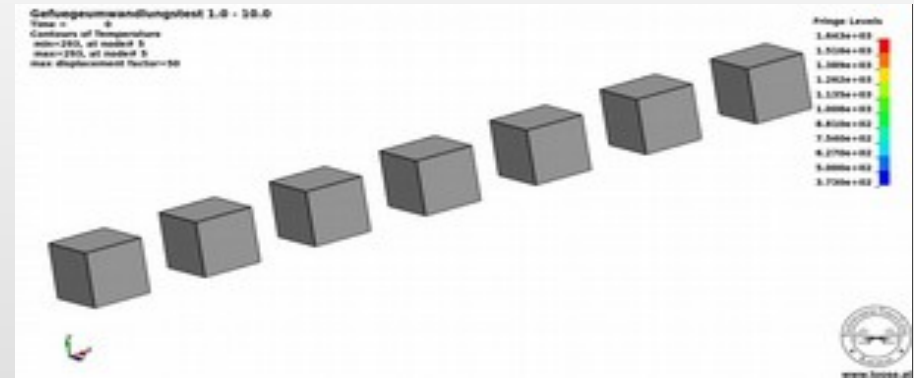
Animation thermische Dehnung und Umwandlungsdehnung beim Erwärmen und Abkühlen bei unterschiedlichen Abkühlraten (S355)

unten rechts:

Umwandlung Dilatation (1.4317)

unten links:

ATU-Diagramm S500 Abgleich Quelldaten und Simulation





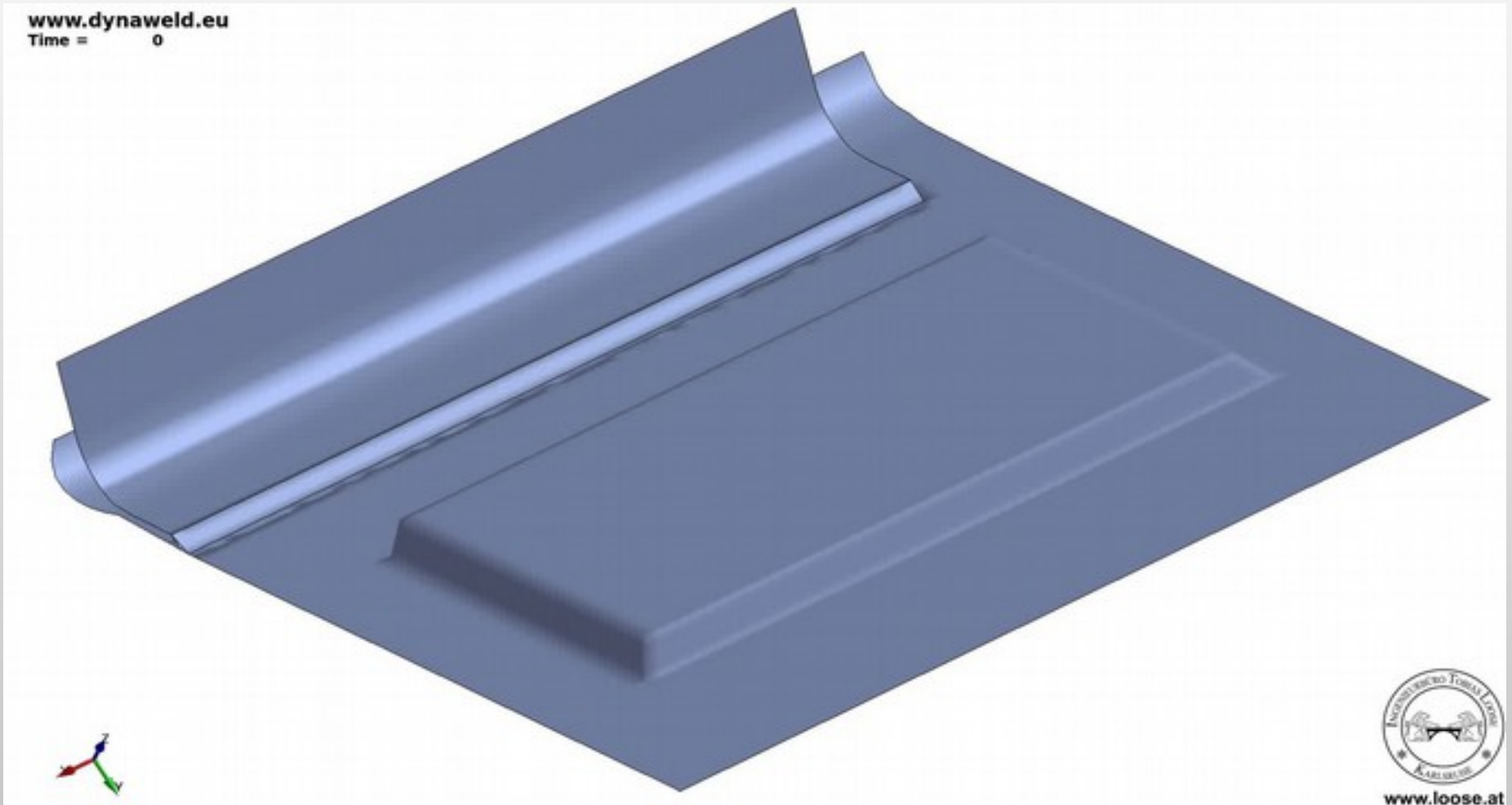
Verzugsberechnung

Verzug während des Schweißens

www.dynaweld.eu
Time = 0
max displacement factor=10



Verzug während des Schweißens

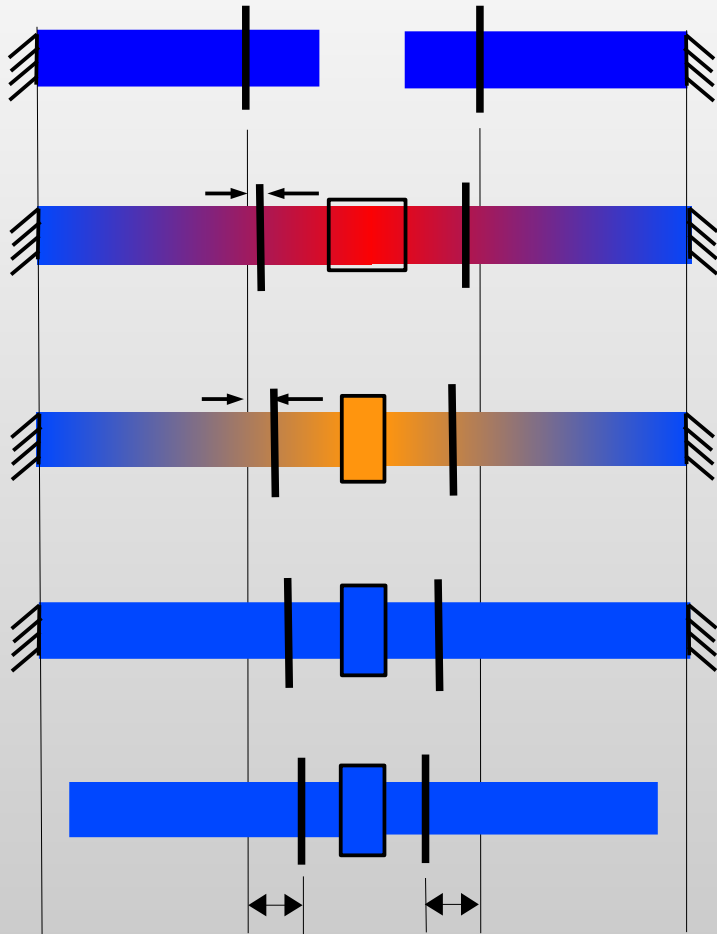




Die wichtigsten Mechanismen

- Erwärmung → Ausdehnen
- Abkühlen → Zusammenziehen
- Während eines Schweißzyklus treten immer gegenläufige Bewegungen auf (oben – unten, innen-außen)
- Weiche Bereiche werden von den Bewegungen der angrenzenden Bereiche gedehnt oder gestaucht, das „Eingestauchte Material“ verursacht den Verzug.
- „Warmumformung“ der weichen Bereiche: Einfrieren eines Verformungszustandes nach dem Erstarren
- Ausschlaggebend ist nicht das Zusammenziehen der Schmelze sondern die Bewegung der Bereiche neben der Naht
- Die maßgebende Größe ist die Bauteilsteifigkeit, diese ändert sich während des Schweißens ständig durch das Erstarren der Schweißraupen.

Querverzug



Ausgangszustand

Nebenbereiche dehnen sich aus

und stauchen den Nahtbereich wegen
Quereinspannung auf

Abkühlen mit Schrumpf erzeugt Verkürzung

oder bei verbleibender Einspannung
Eigenspannungen

Quellen:
ESI : How to model Weld Distortion with shell elements, 2009
Dissertation von Leggatt 1980

Beispiel Winkelverzug mehrlagiger Nähte

2D-Modell LS-DYNA - Simulationsmodell

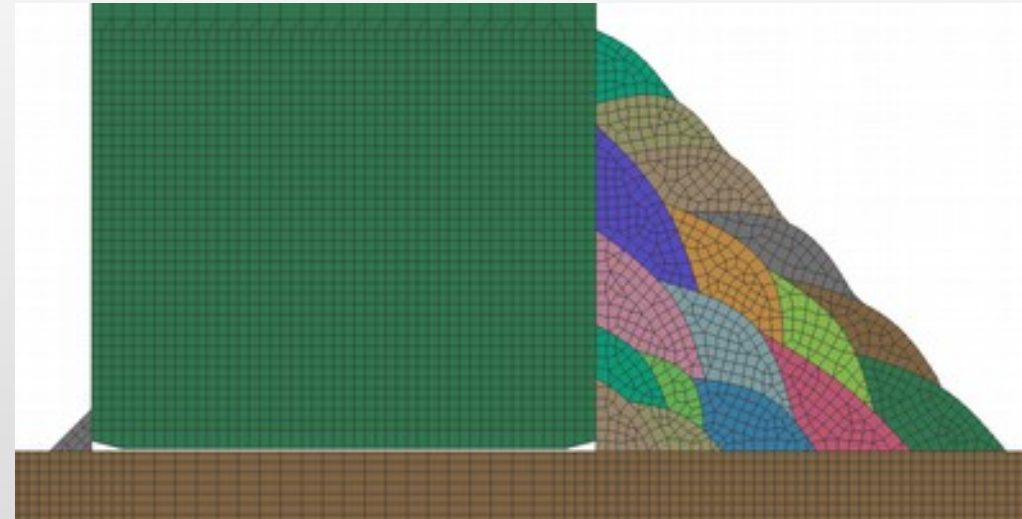
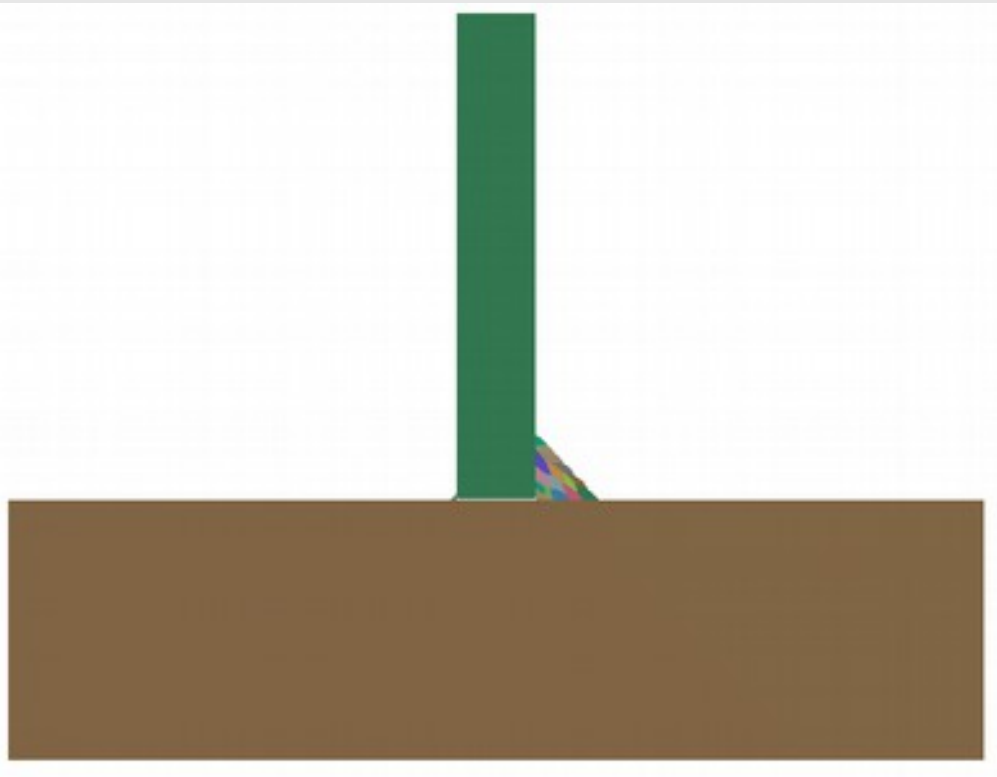
2D ebener Dehnungszustand

Platte: 300 x 80 mm

Steife: 150 x 24 mm

Kehlnaht: $a = 13$ mm

Material: 1.4301



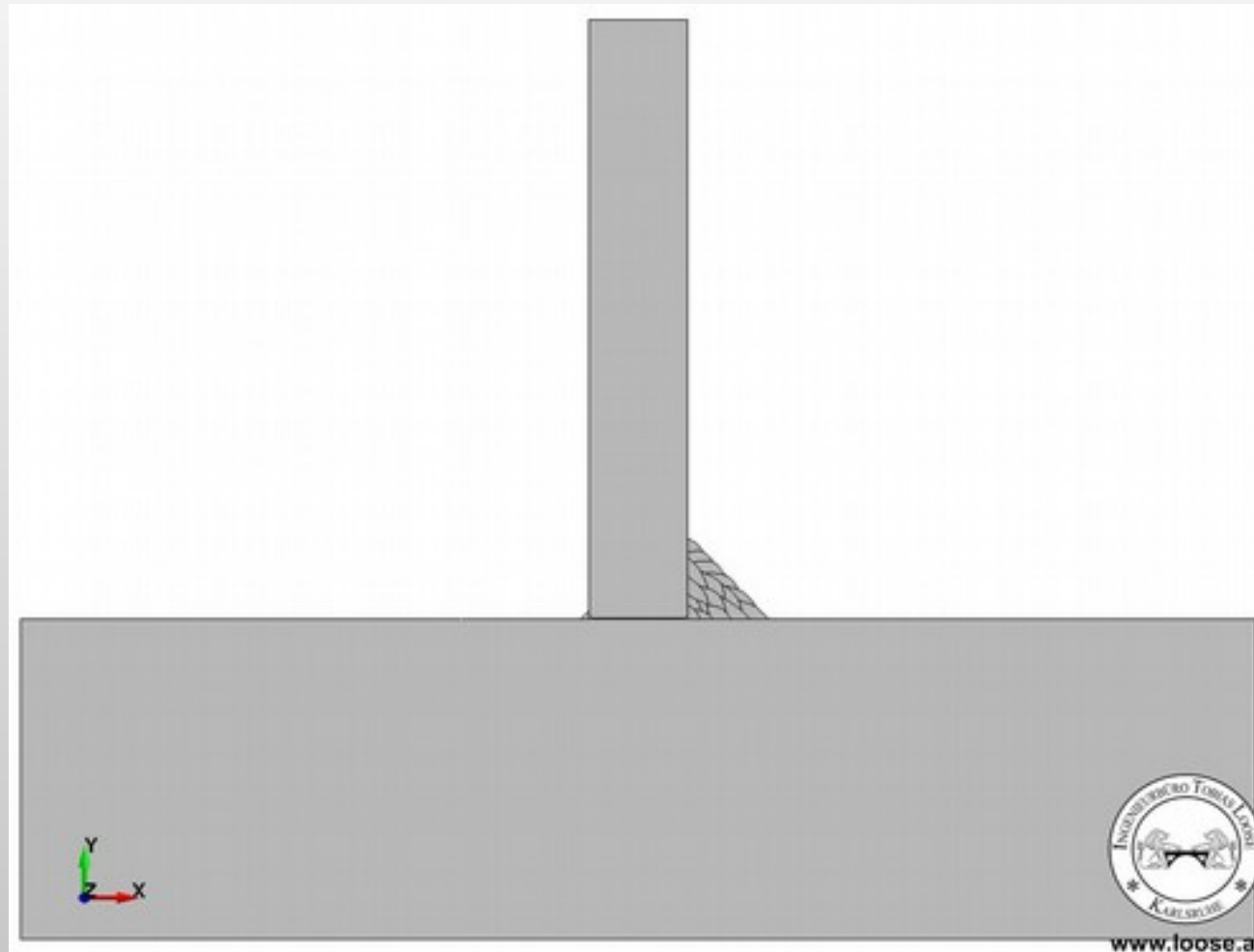
**Heftnaht $a = 1,4$ mm
mit Dehnungsversagen $K_{FAIL} = 0,25$ m/m**

**Anfangsspalt zwischen Steife und Platte:
0,1 mm**

**Die Plate ist mit Symmetrierand-
bedingungen an der linken und rechten
Seite gehalten.**

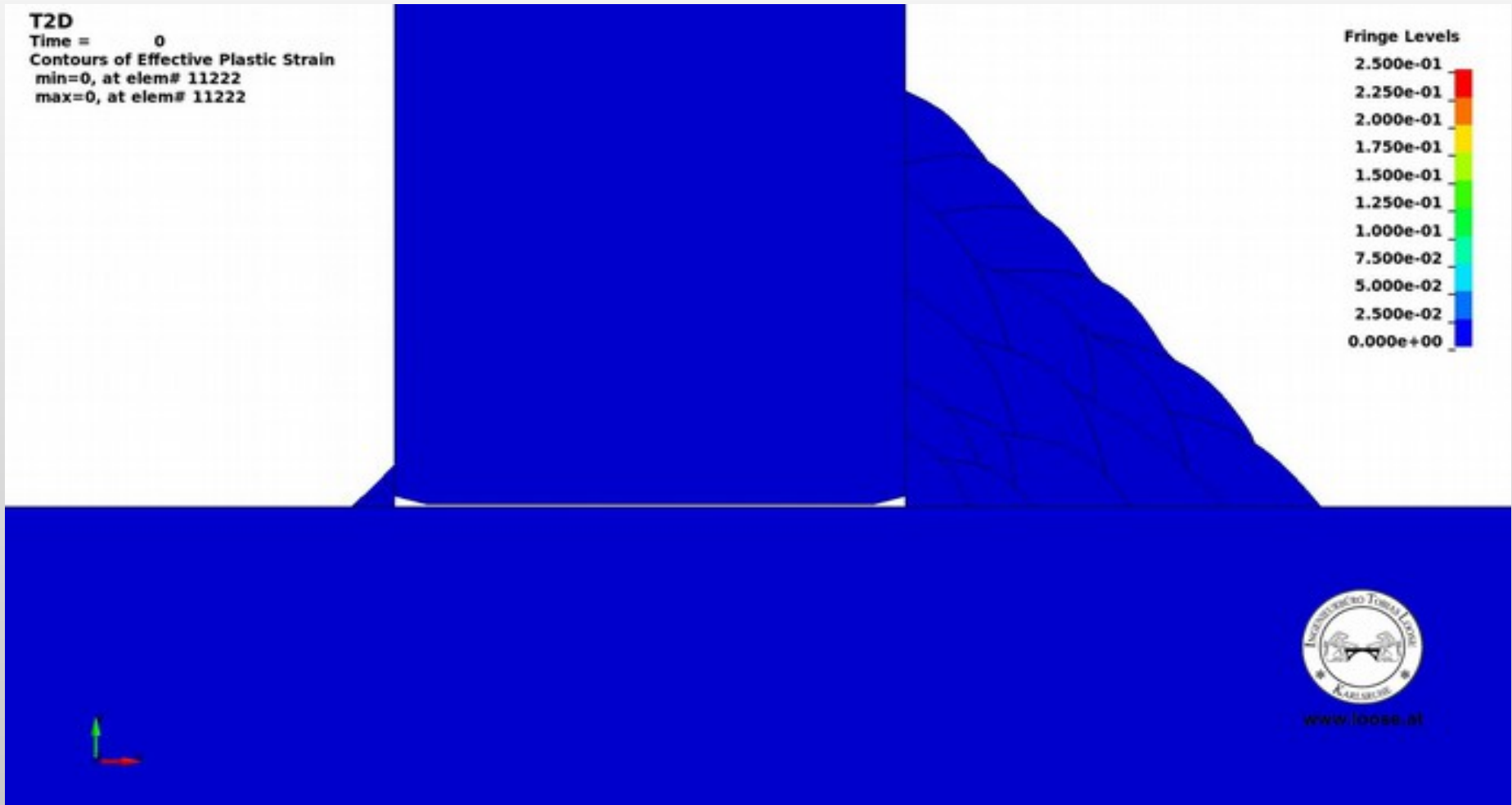
Beispiel Winkelverzug mehrlagiger Nähte

2D-Modell LS-DYNA - Temperaturfeld



Beispiel Winkelverzug mehrlagiger Nähte

2D-Modell LS-DYNA – plastische Dehnungen





Validierung

Validierung IIW Round Robin Versuch

- Platte mit den Abmessungen 270 x 200 x 30 mm³ mit V/U-förmiger Nut
- Austenitischer Nichtrostender Stahl (316LNSPH, $k_f = 275 \text{ MPa}$)
- 2 Lagen, Zuschweißen der Nut mit artgleichem Zusatzmaterial 316L
- TIG Schweißung mit $U = 9 \text{ V}$, $I = 155 \text{ A}$, $v = 0,67 \text{ mm/s}$

Vergleich Meßwerte und Berechnungsergebnis

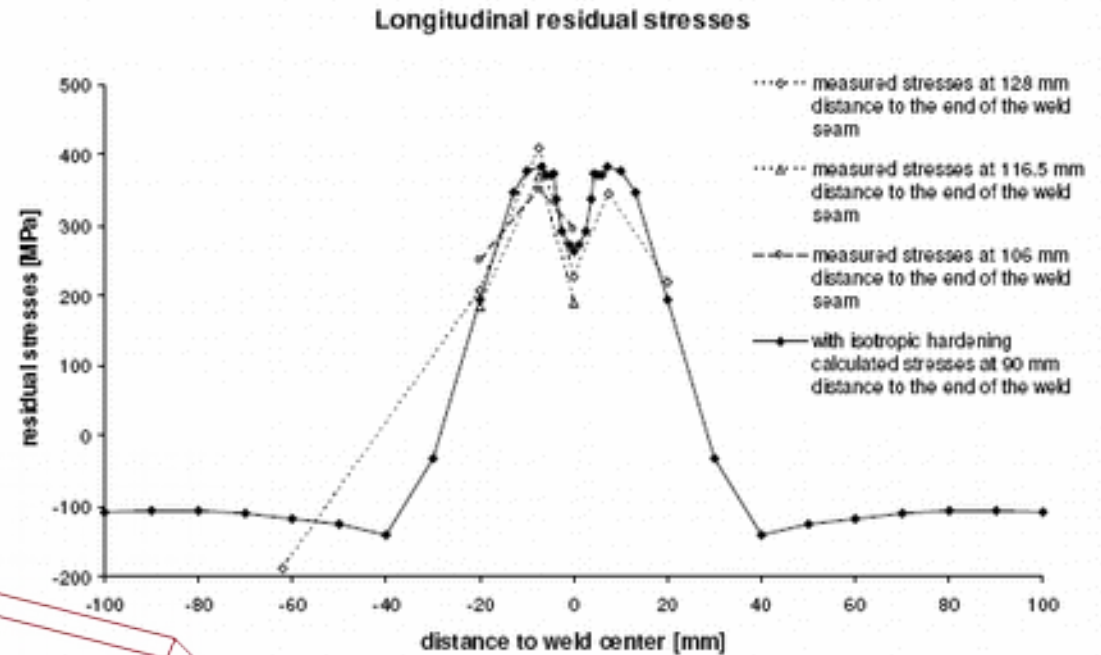
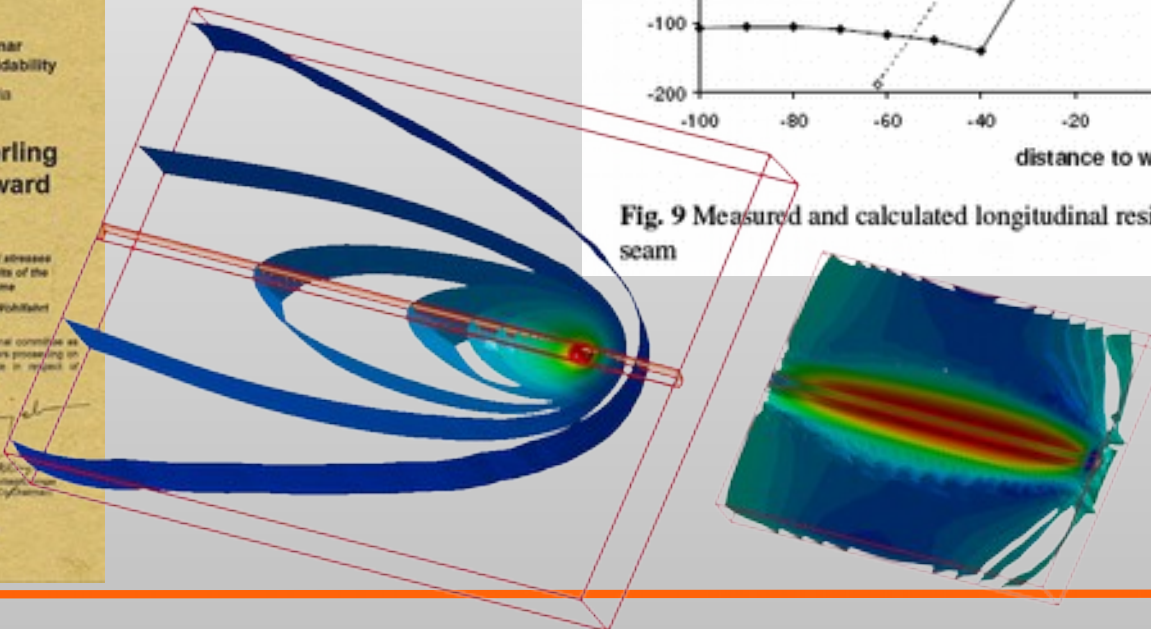


Fig. 9 Measured and calculated longitudinal residual stresses along a line transverse to the weld seam



Loose, T. ; Sakkittibutra, J. ; Wohlfahrt, H. :
 New 3D-Calculations of residual stresses
 consistent with measured results of the
 IIW Round Robin Programme.
 In: Cherjak, H. (Ed.) ; Enzinger, N. (Ed.) :
 Mathematical Modelling of Weld Phenomena Bd. 9,
 Verlag der Technischen Universität Graz, 2010

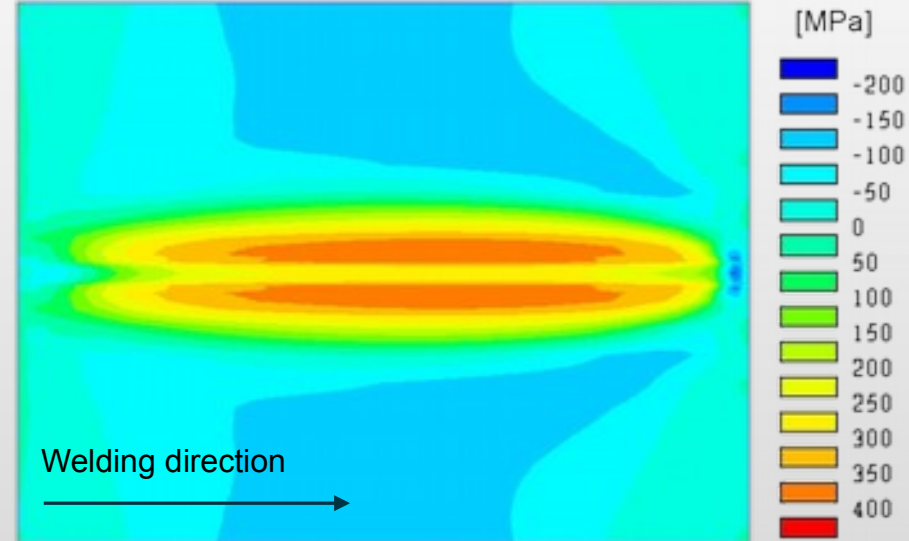
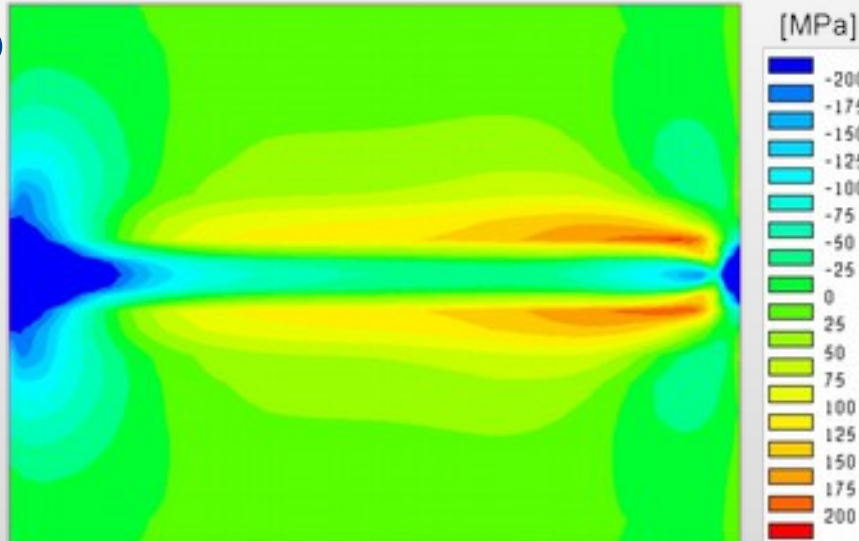
Validierung

IIW Round Robin Versuch

Quereigenspannung

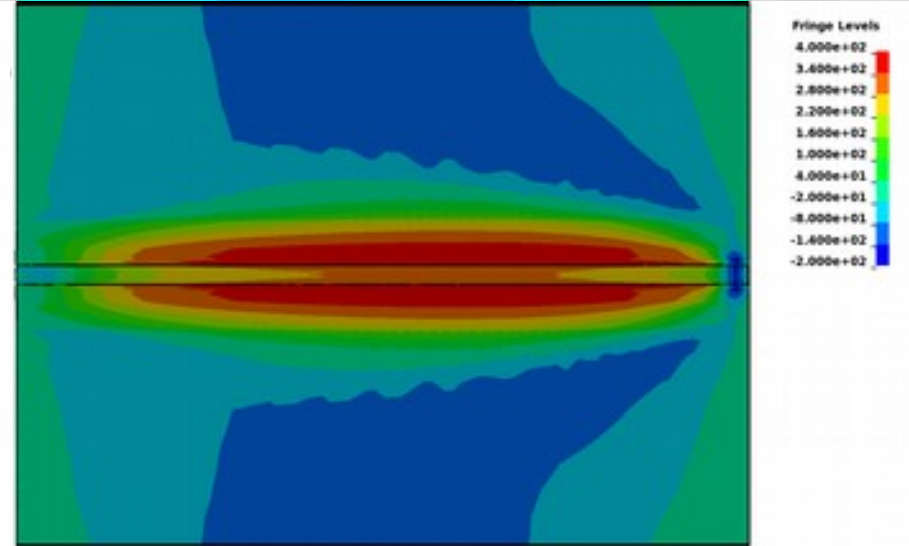
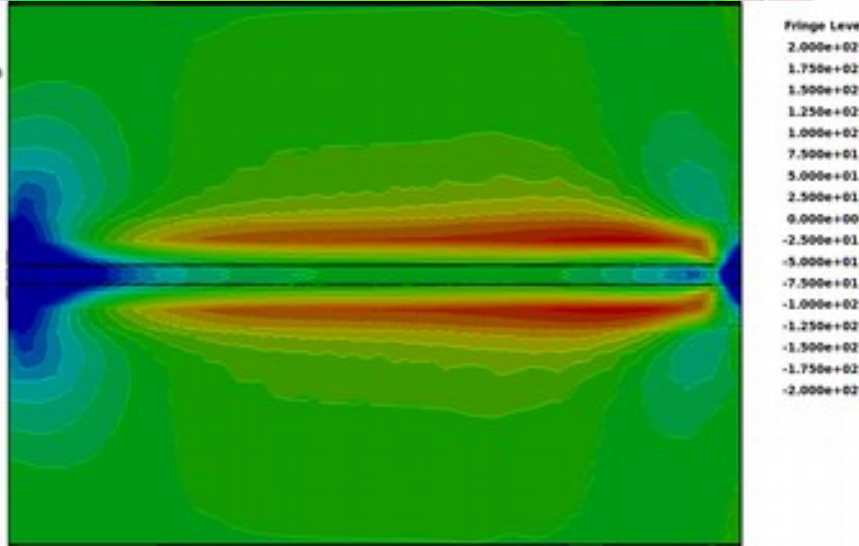
Längseigenspannung

SYSWELD

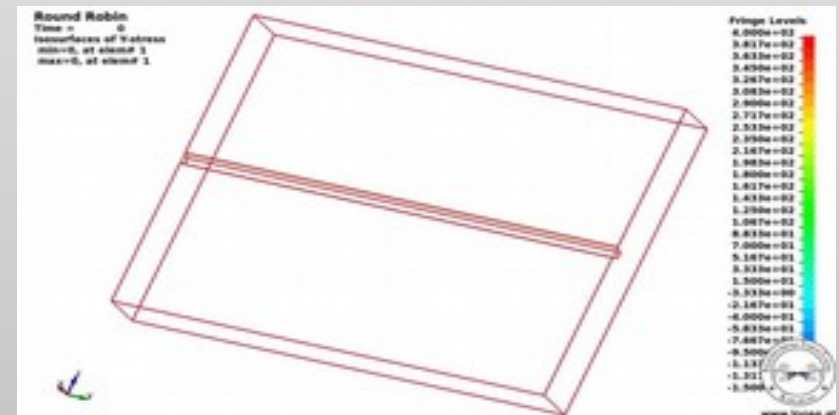
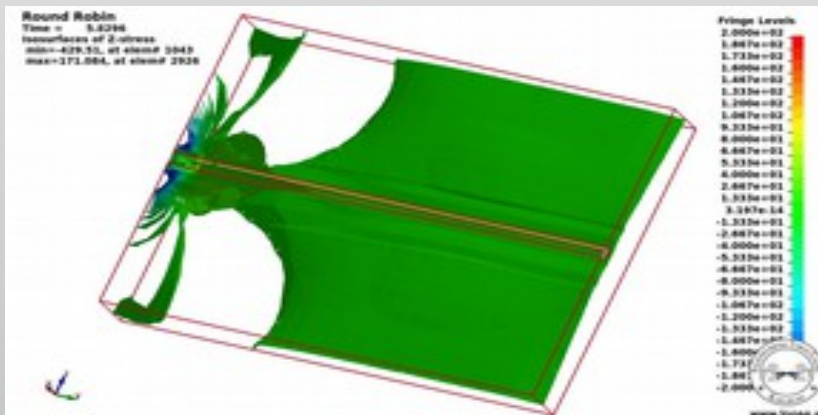
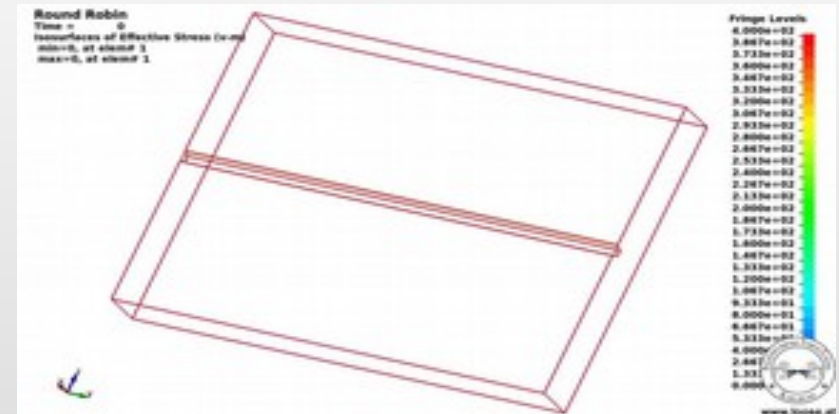
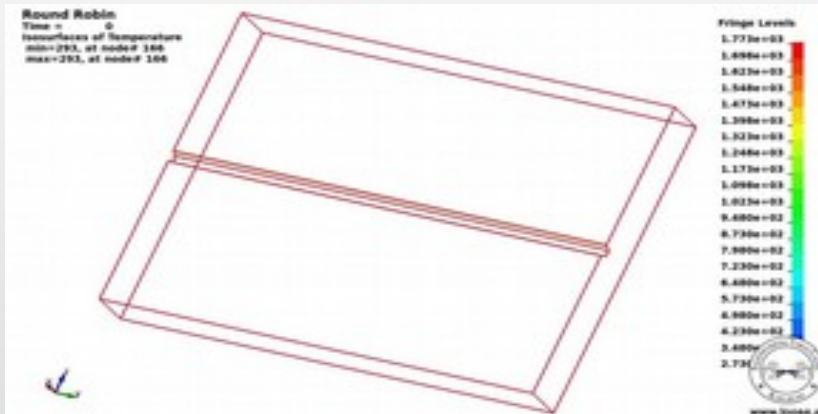


LS-DYNA

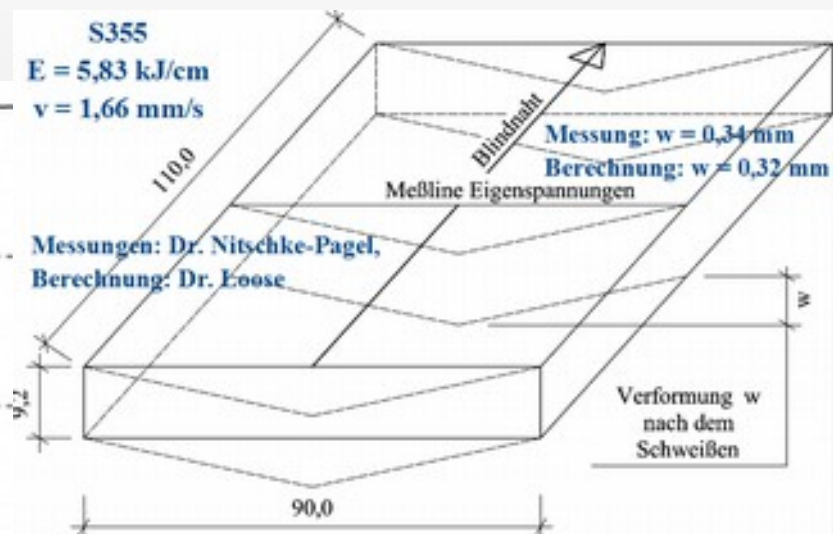
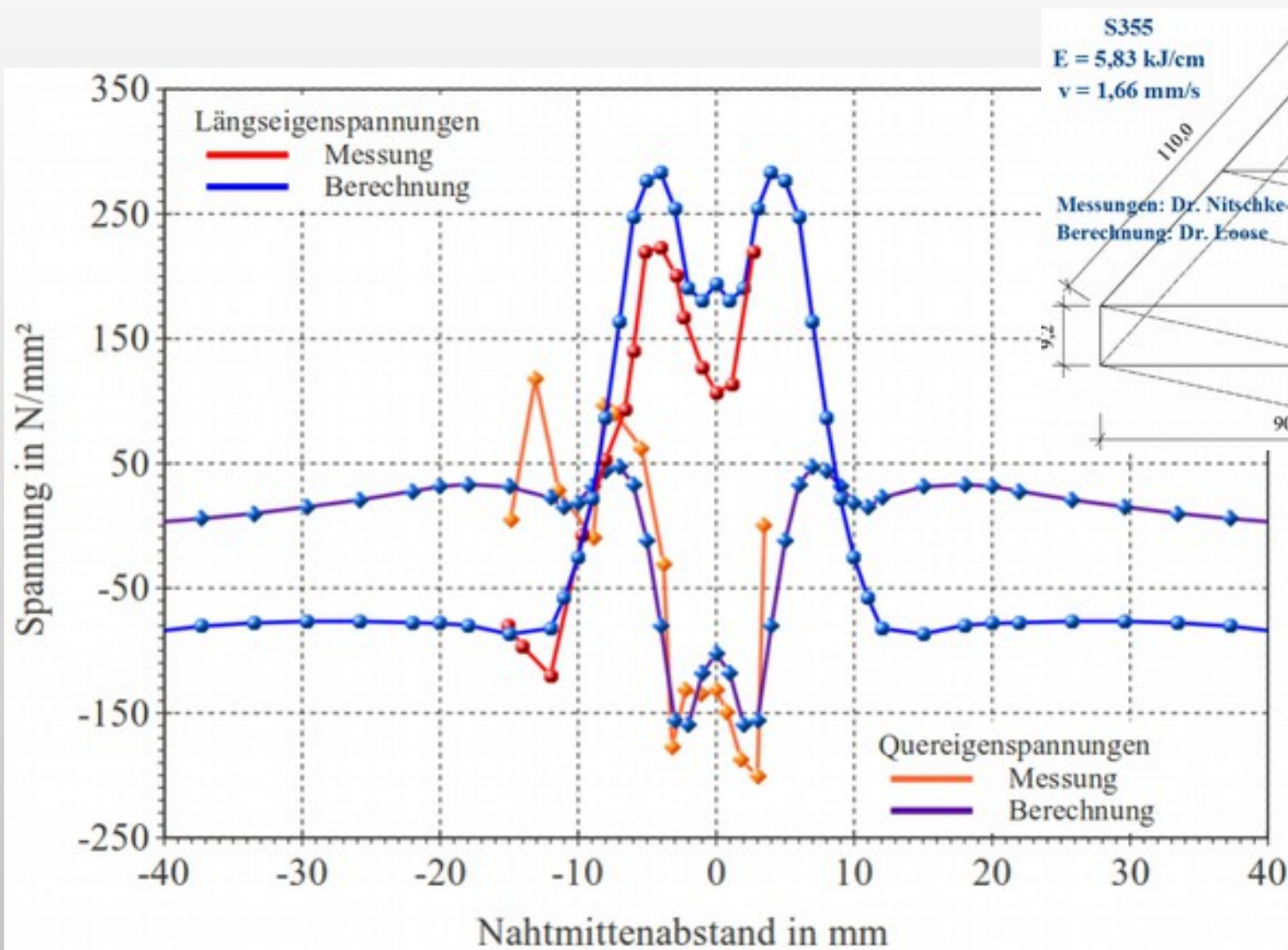
Round Robin
Time = 15000
Contours of Z-stress
min=-445.209, at elem# 286
max=352.951, at elem# 36458



Temperatur – Vergleichspannung Quereigenspannung- Längseigenspannung



Validierung Nitschke-Pagel Versuch

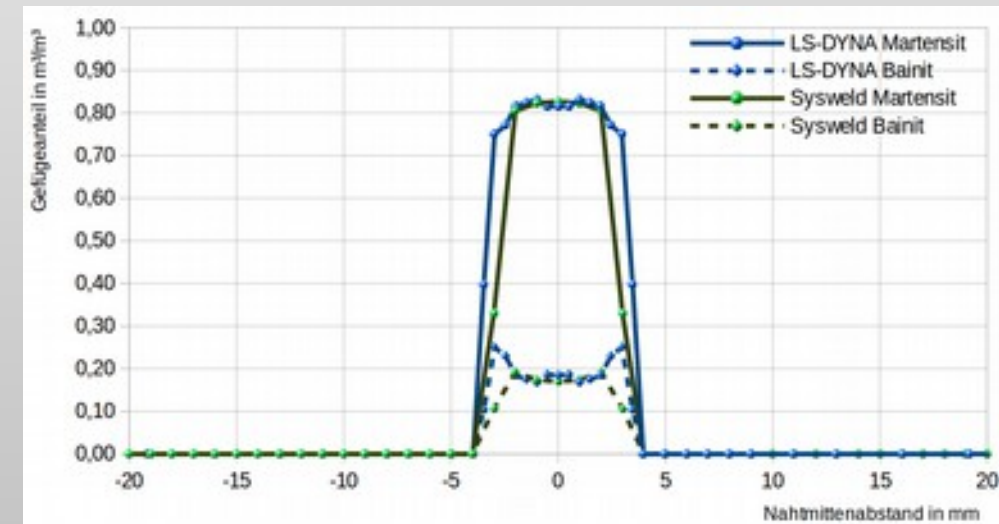
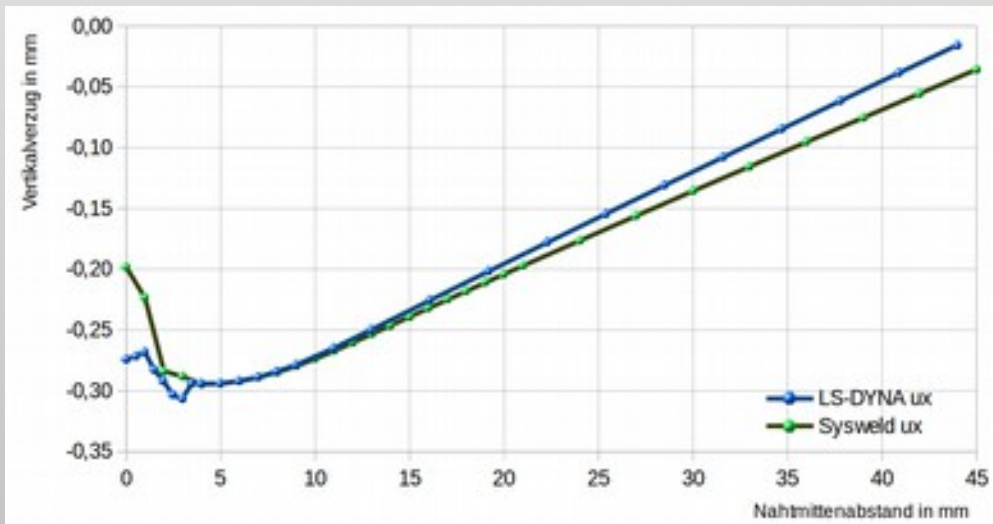
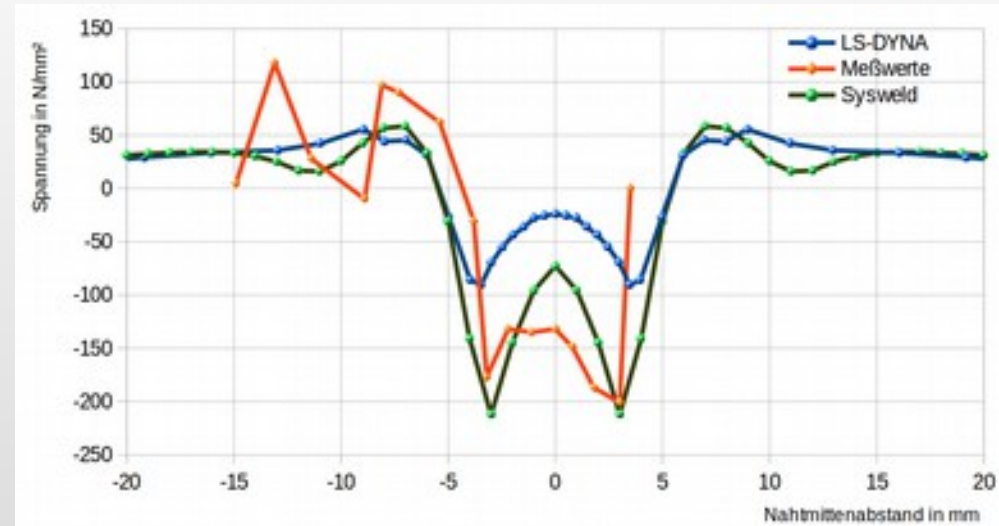
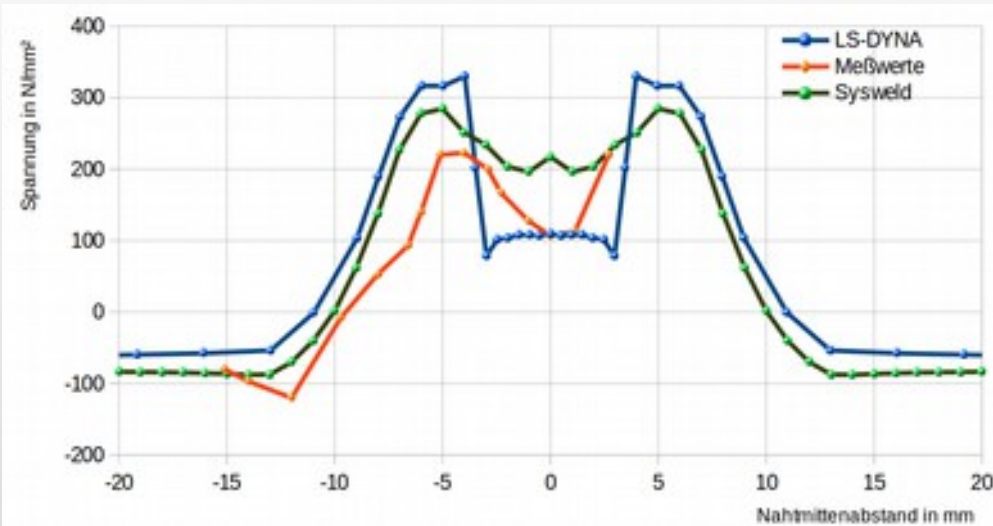


Verzug w :

Messung: 0,34 mm
 Sysweld: 0,32 mm
 LS-DYNA: 0,34 mm

Loose, T.: Einfluß des transienten Schweißvorganges auf Verzug, Eigenspannungen und Stabilitätsverhalten axial gedrückter Kreiszyinderschalen aus Stahl, Diss, Karlsruhe, 2008

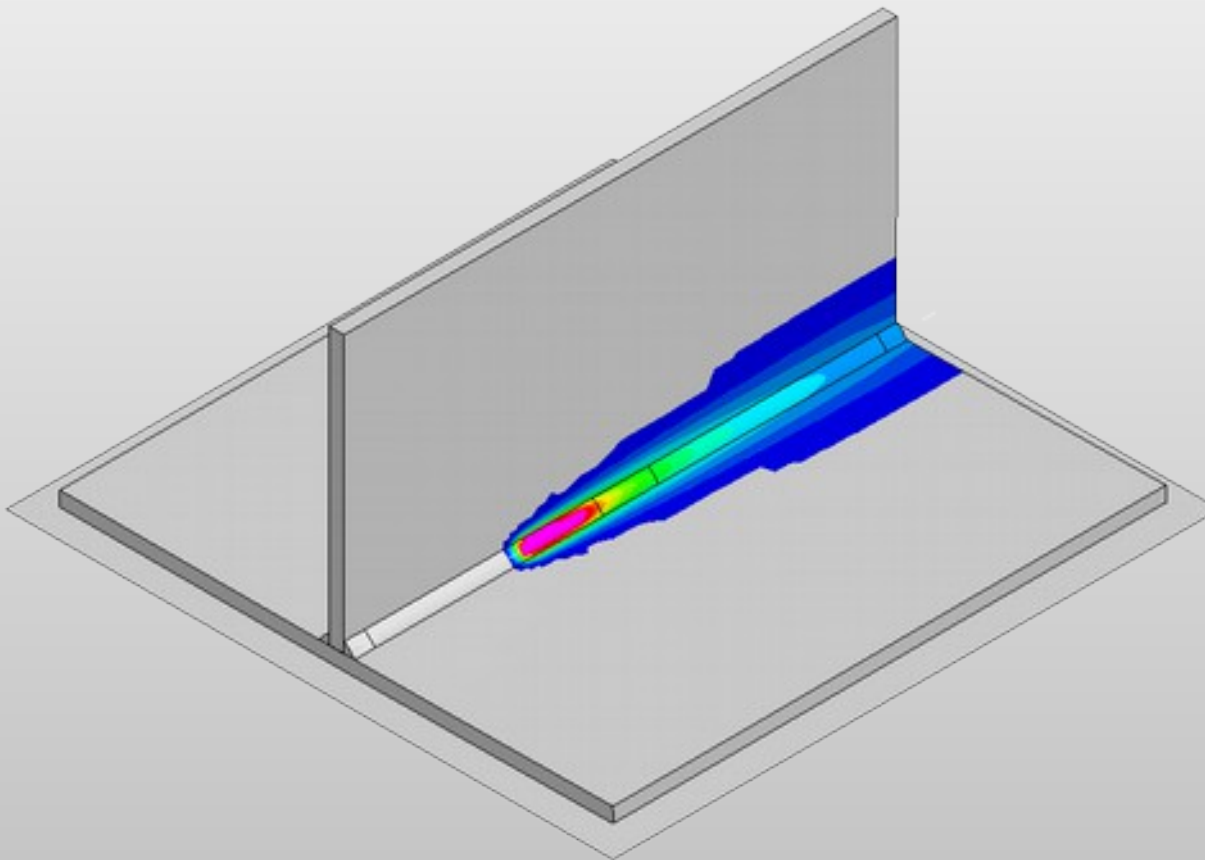
Validierung Nitschke-Pagel Versuch



SimWeld - DynaWeld - LS-DYNA

Benchmark Welding Distortion Analysis

Volvo T-Joint



Dr.-Ing. Tobias Loose

02.03.2015

Welding Task

- **Double sided T-Joint $a = 4$ mm**
- **Plate S355 thickness 8 mm**
- **3 Tacks double sided**
- **Travel speed 80 cm/min**
- **Current: 390 A**
- **Voltage: 30 V**

- **Start Time Tack 1: 0 s**
- **Start Time Tack 2: 20 s**
- **Start Time Weld 1: 1000 s**
- **Start Time Weld 2: 1023 s**
- **Weld 1 and Weld 2 have the same travel direction**



Foto: Volvo



Process Simulation with SimWeld

Input-Parameter SimWeld

Workpiece parameters (Ctrl + 1)

Geometry
EN ISO EN ISO 9692-1: 2003 (D)

Joint type **Square edges (3.1.1)**

width 40,00 [mm] height 1,00 [mm]
t1 8,00 [mm] t2 8,00 [mm]
b 0,00 [mm] c 1,00 [mm]
radius 1,00 [mm] e 1,00 [mm]
alpha 90,00 [°] beta 1,00 [°]

Left plate visible Right plate visible

Material
Plates S355

Position
Type Custom
across 45,00 [°] along 0,00 [°]

Process parameters (Ctrl + 2)

Process parameters
Welding speed 80,00 [cm/min]
Initial temperature 20,00 [°C]

Simulation Options
 Consider gap

Calculation length User defined
100,00 [mm]

Mesh density normal (1.0x)

Resources: medium
Accuracy: medium

OK Cancel

Torch parameters (Ctrl + 3)

Wire
Diameter 1.6 [mm]
Material SG-Fe
 Wire initial heating
Contact noz. l. 20 [°C]

Position
X 0,00 [mm]
Y 0,00 [mm]
L 20,00 [mm]
R 20,00 [mm]

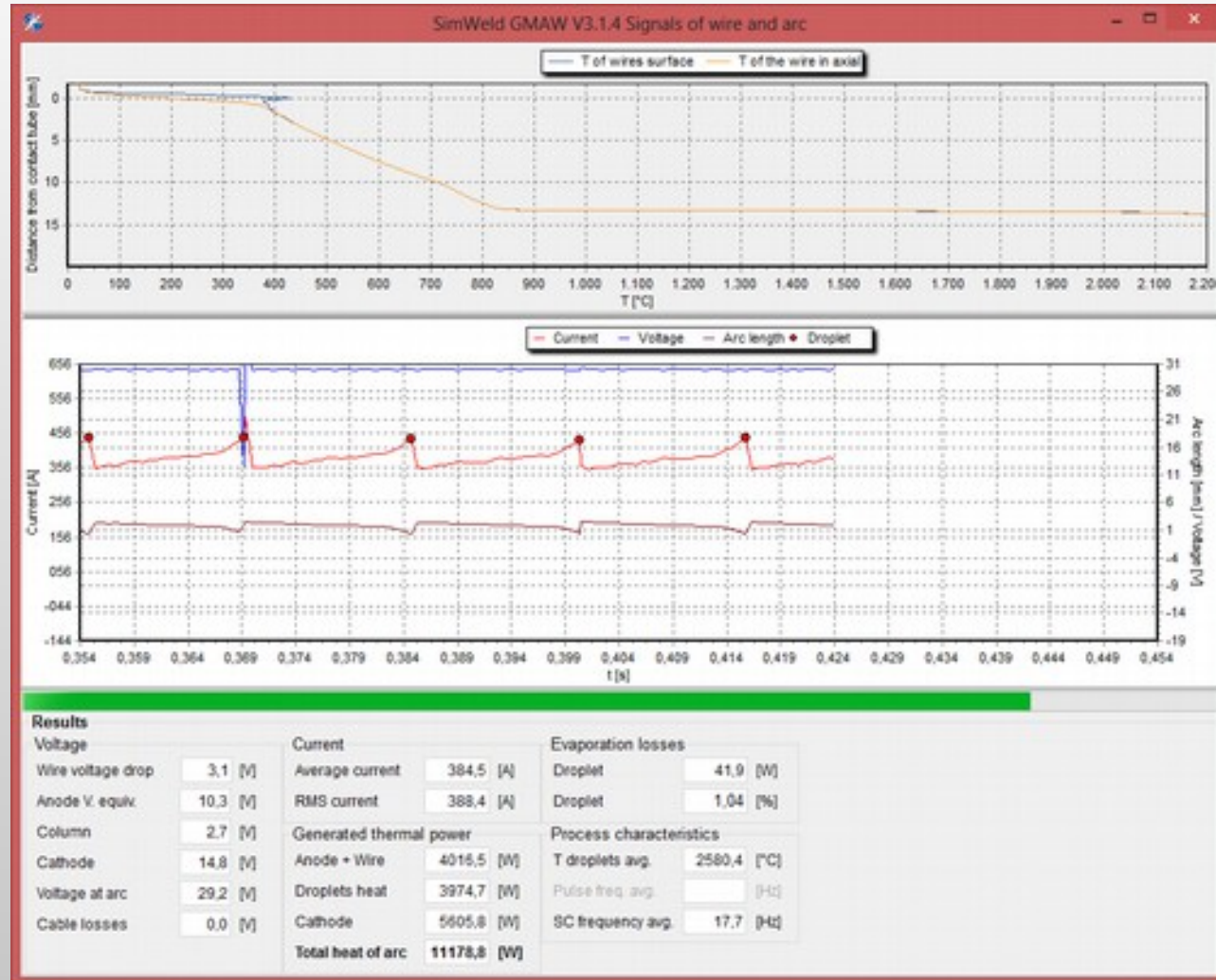
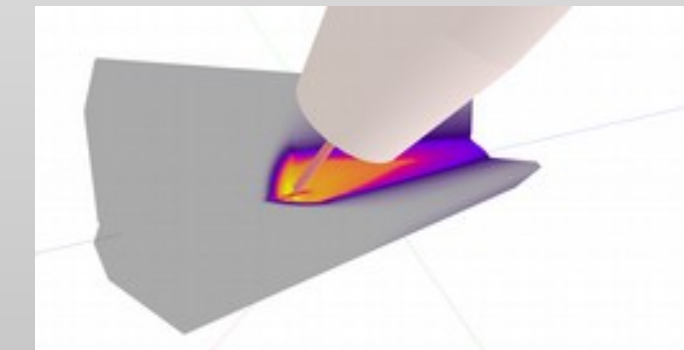
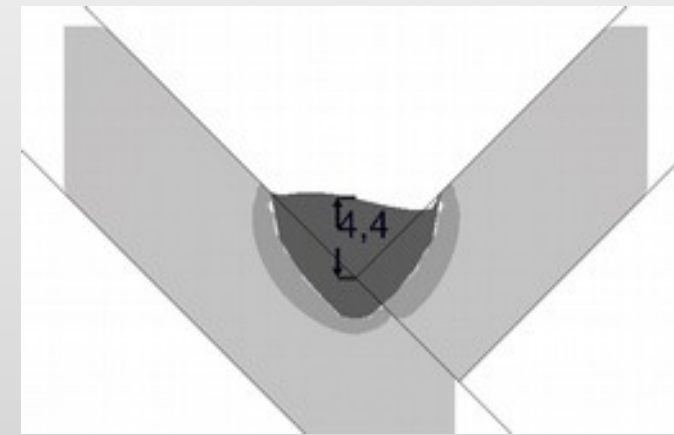
Angle
Along 0 [°]
Across 0 [°]

Equipment

Power source
Select... Custom
Process type Normal
Wire feed 7,0 [m/min]
Voltage 30,0 [V]
Choke 30,0 [%]

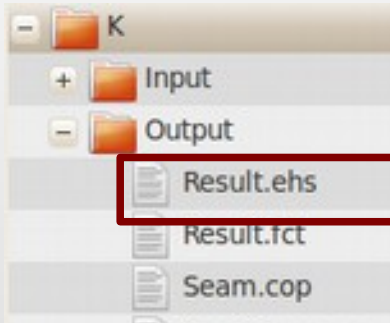
SimWeld Results

- $a = 4,4 \text{ mm}$
- $I = 390 \text{ A}$
- $V = 29,2 \text{ V}$



Equivalent Heat Source from SimWeld for the Welding Structure Analysis with LS-DYNA

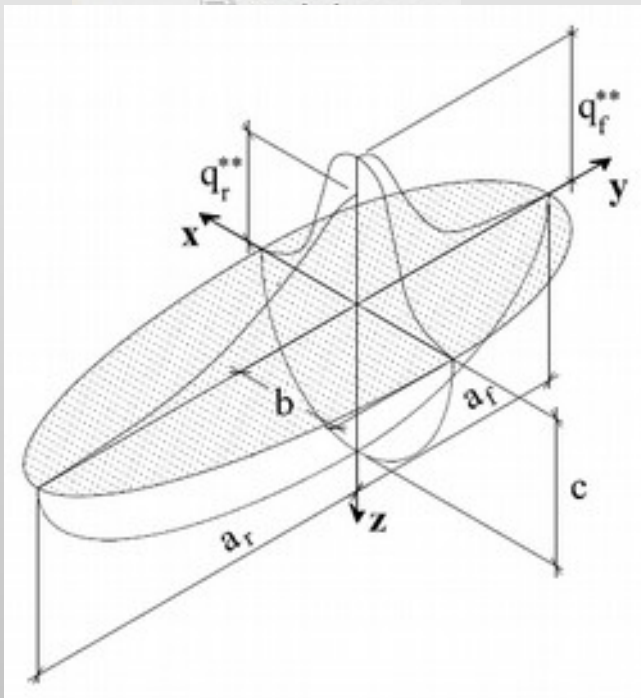
Result.ehs



```

3D double ellipsoid source
10142,58600 //Q (W)
6005,89110 //Qf (W)
4136,69530 //Qr (W)
375,36136 //q0_front (W/mm3)
7,87233 //q0_rear (W/mm3)
2,58247 //af_ (mm)
31,54304 //ar (mm)
4,67305 //b (mm)
6,65324 //c (mm)
3,30435 //x0 (mm)
3,30435 //z0 (mm)
45,00001 //ay (degree)
80,00000 //vy (cm/min)
    
```

q_f
 q_r



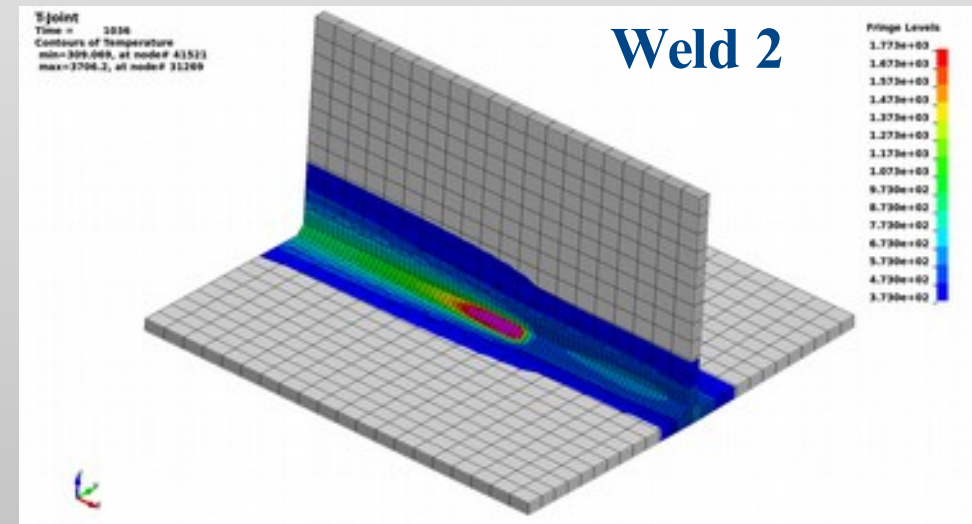
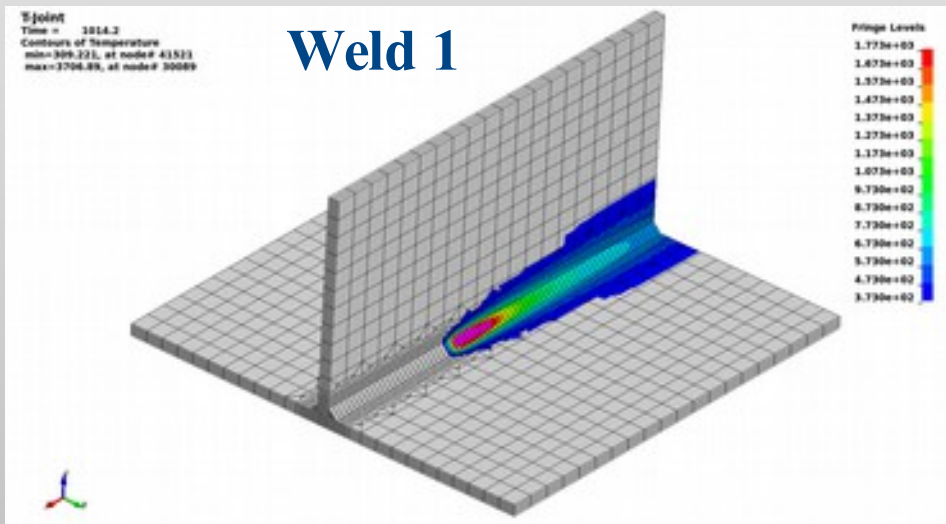
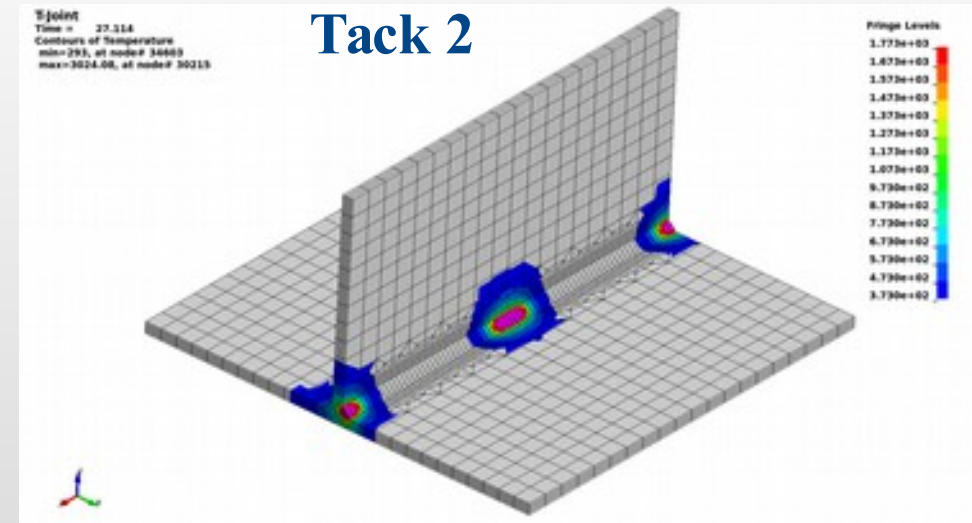
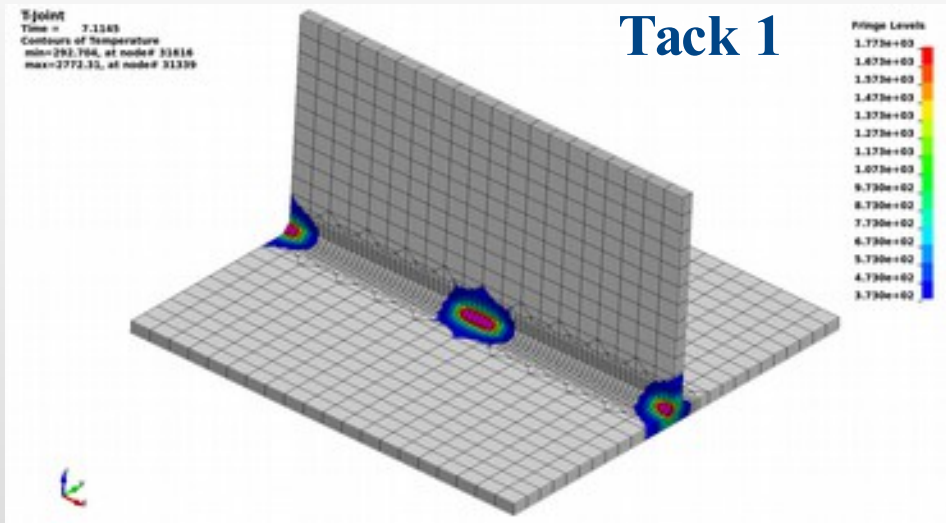
$$q_f^{**}(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}\Delta_f \cdot q}{a_f \cdot b \cdot c \cdot \pi \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{nx^2}{a_f^2}} \cdot e^{-\frac{ny^2}{b^2}} \cdot e^{-\frac{nz^2}{c^2}}$$

$$q_r^{**}(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}\Delta_r \cdot q}{a_r \cdot b \cdot c \cdot \pi \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{nx^2}{a_r^2}} \cdot e^{-\frac{ny^2}{b^2}} \cdot e^{-\frac{nz^2}{c^2}}$$

Check of heat input with LS-DYNA Logfile (tprint):

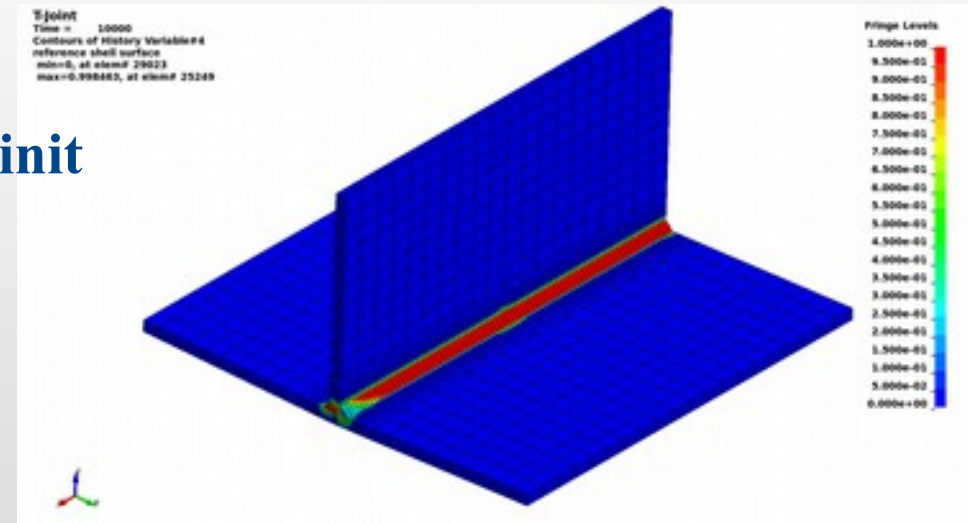
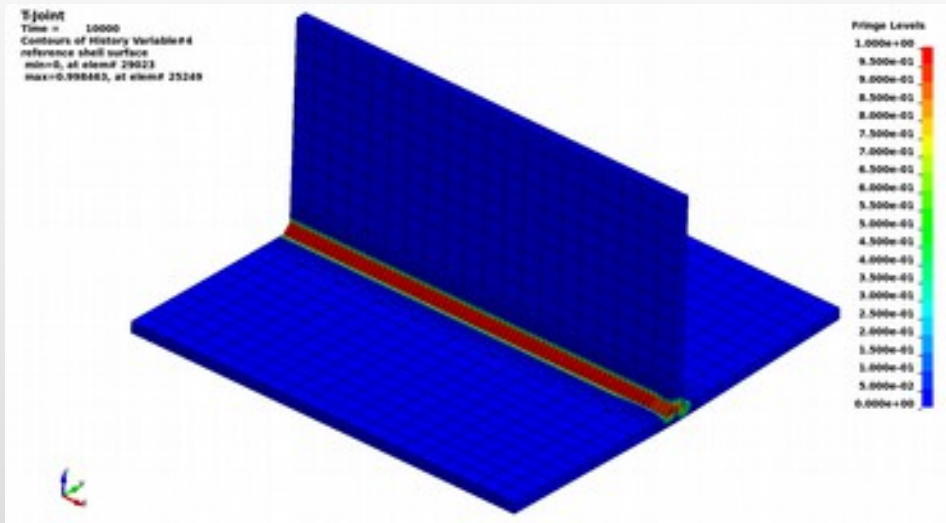
	Total Energy per Timestep		Effective Energy/Time		
Zeit in s	Heatinput in kW	Timestep in s	Heatinput in kW	Target in kW	Relativ in %
3,47	2,94	0,28	10,46	10,14	103%
7,6	2,95	0,28	10,45	10,14	103%

Temperature

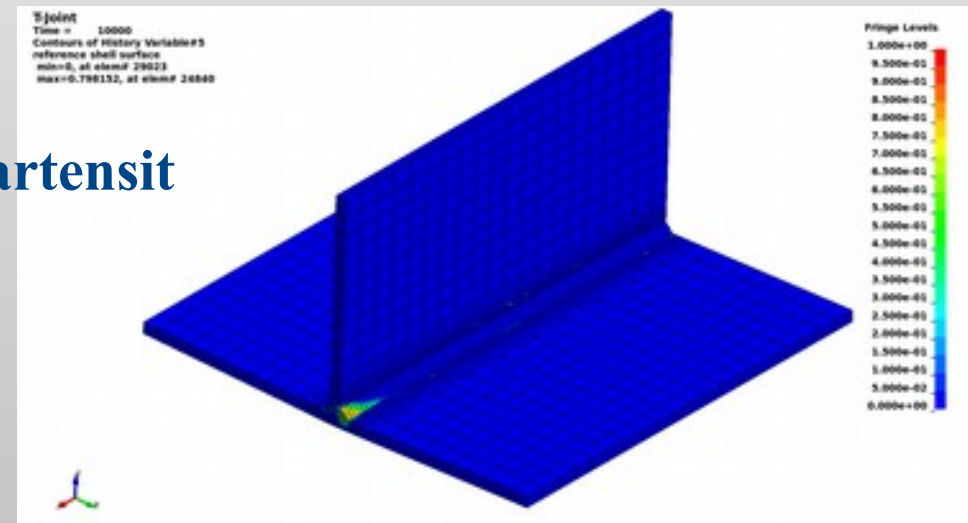
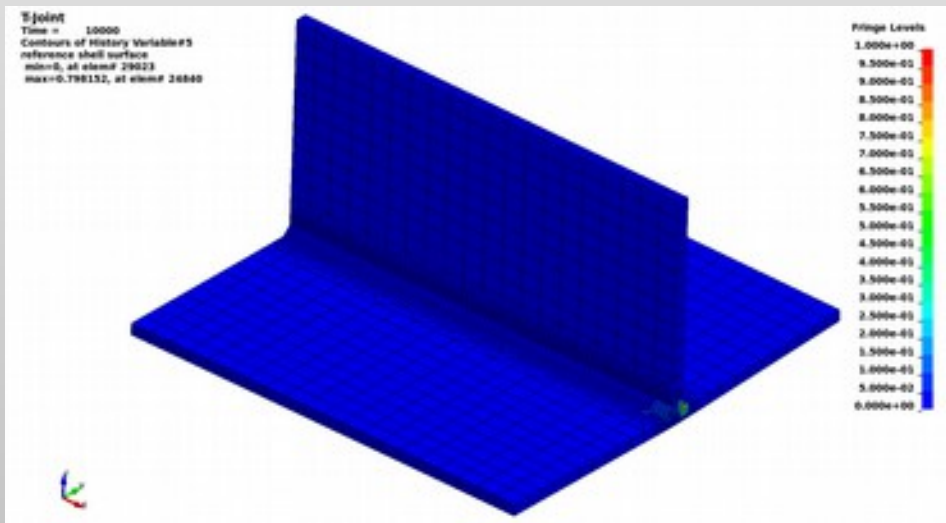


Microstructure

Bainit

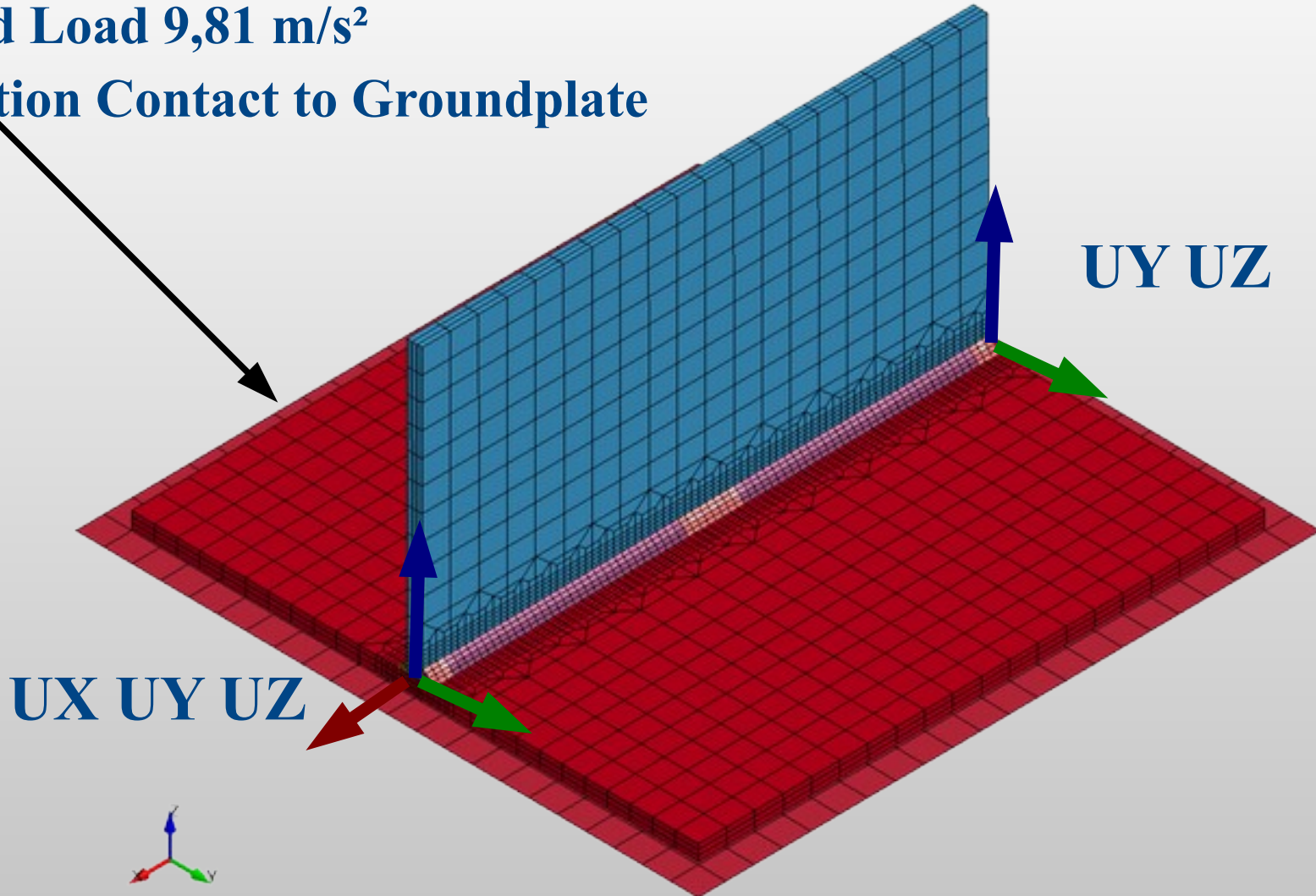


Martensit



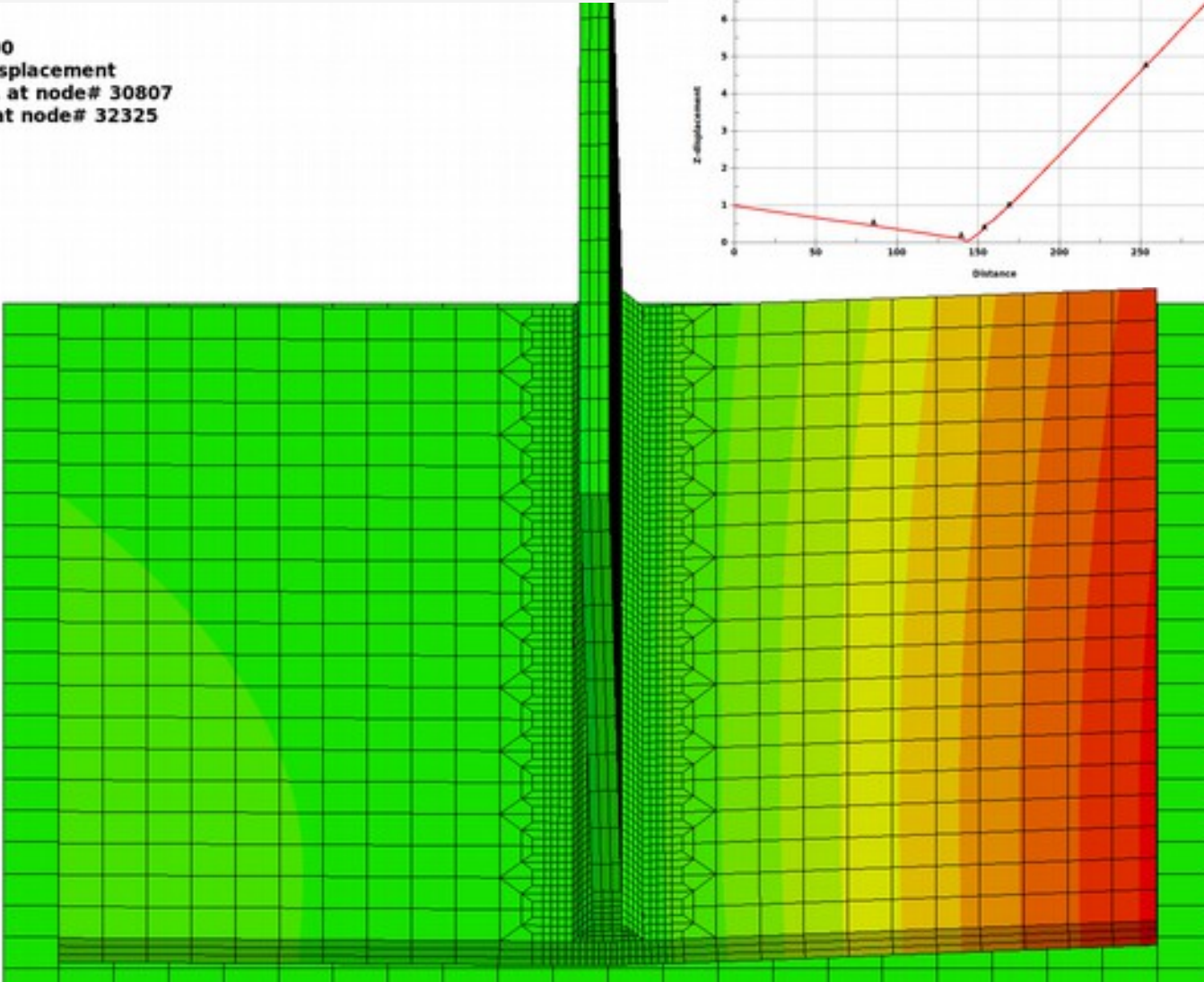
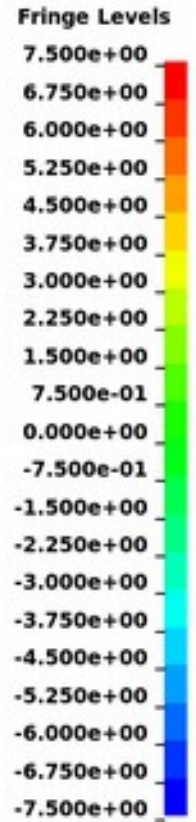
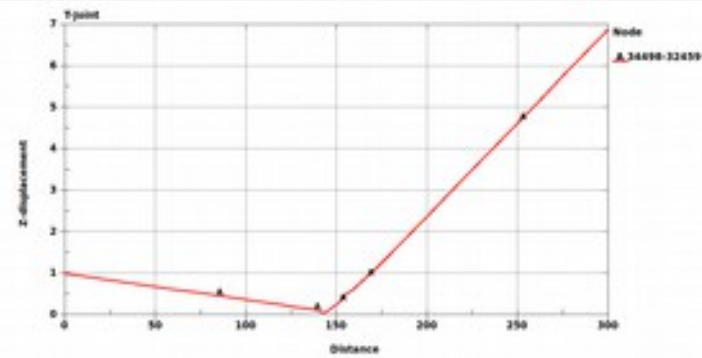
Boundary Condition

- **Dead Load $9,81 \text{ m/s}^2$**
- **Friction Contact to Groundplate**



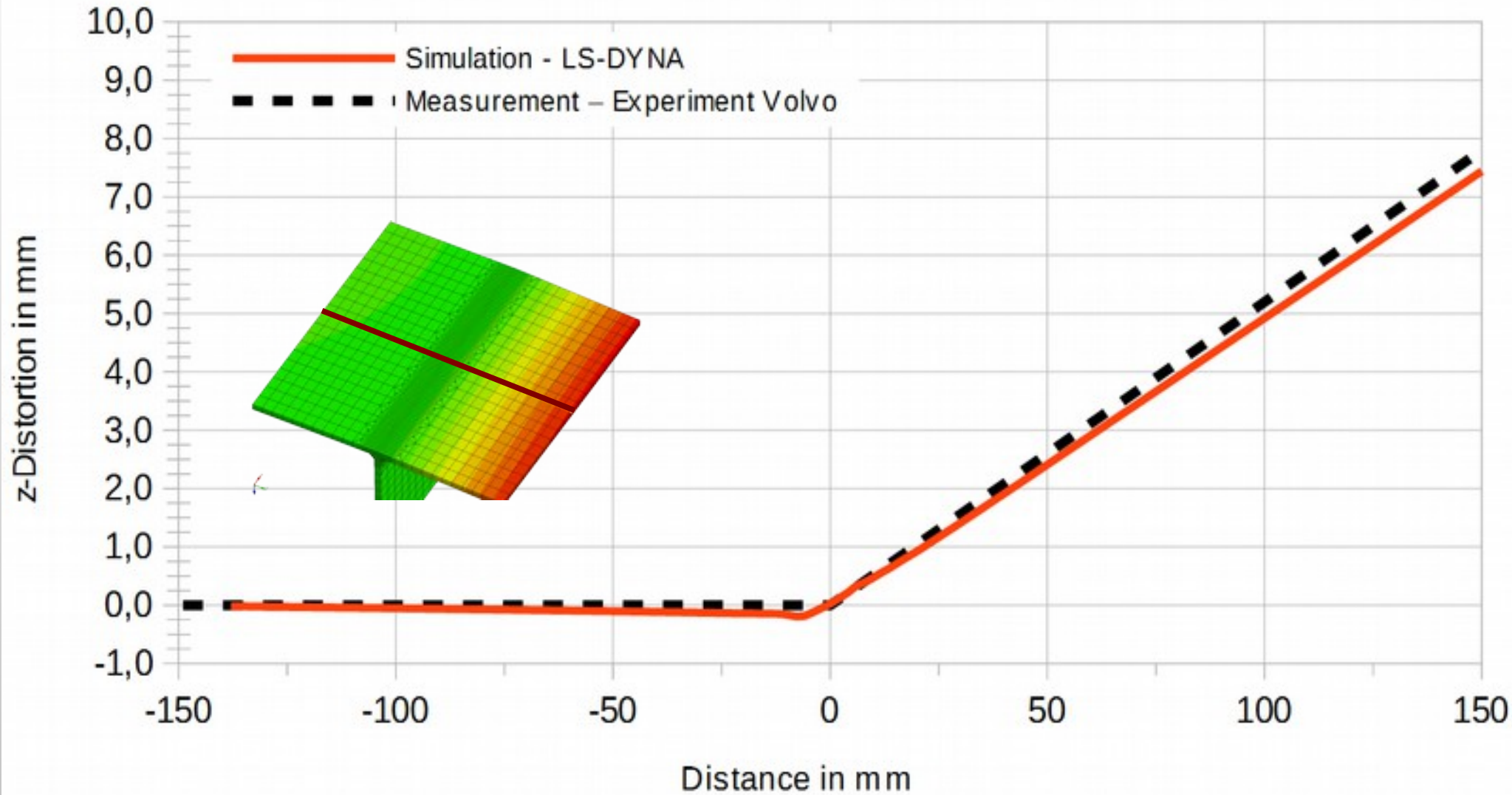
z-Distortion after Welding -7,5 .. 7,5 mm

T-joint
Time = 10000
Contours of Z-displacement
min=-0.218492, at node# 30807
max=6.97371, at node# 32325



z-Distortion along Evaluation Path

transformed to flat left side



Danke!

