

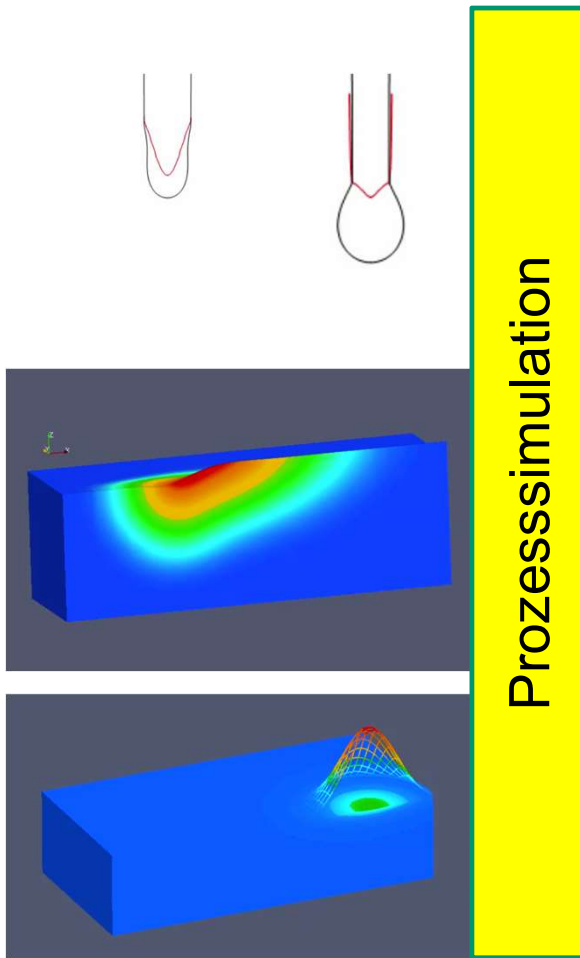
**17. Oktober 2017, Aachen
Infotag Schweißsimulation**

**Ersatzwärmequellen für die Struktursimulation:
Prozesssimulation mit SimWeld**

O. Mokrov

Inhalt

- Ersatzwärmequelle für die Schweißsimulation
- Äquivalente Wärmequelle für das Strahl- und Lichtbogenschweißen
- Äquivalente Wärmequelle nach Goldak
- Äquivalente Wärmequelle MR10
- Simulationsbeispiele
- Simulation des Schweißprozesses mit *SimWeld*
- Berechnung einer äquivalenten Wärmequelle mit *SimWeld*
- Demonstration des Programmes *SimWeld*



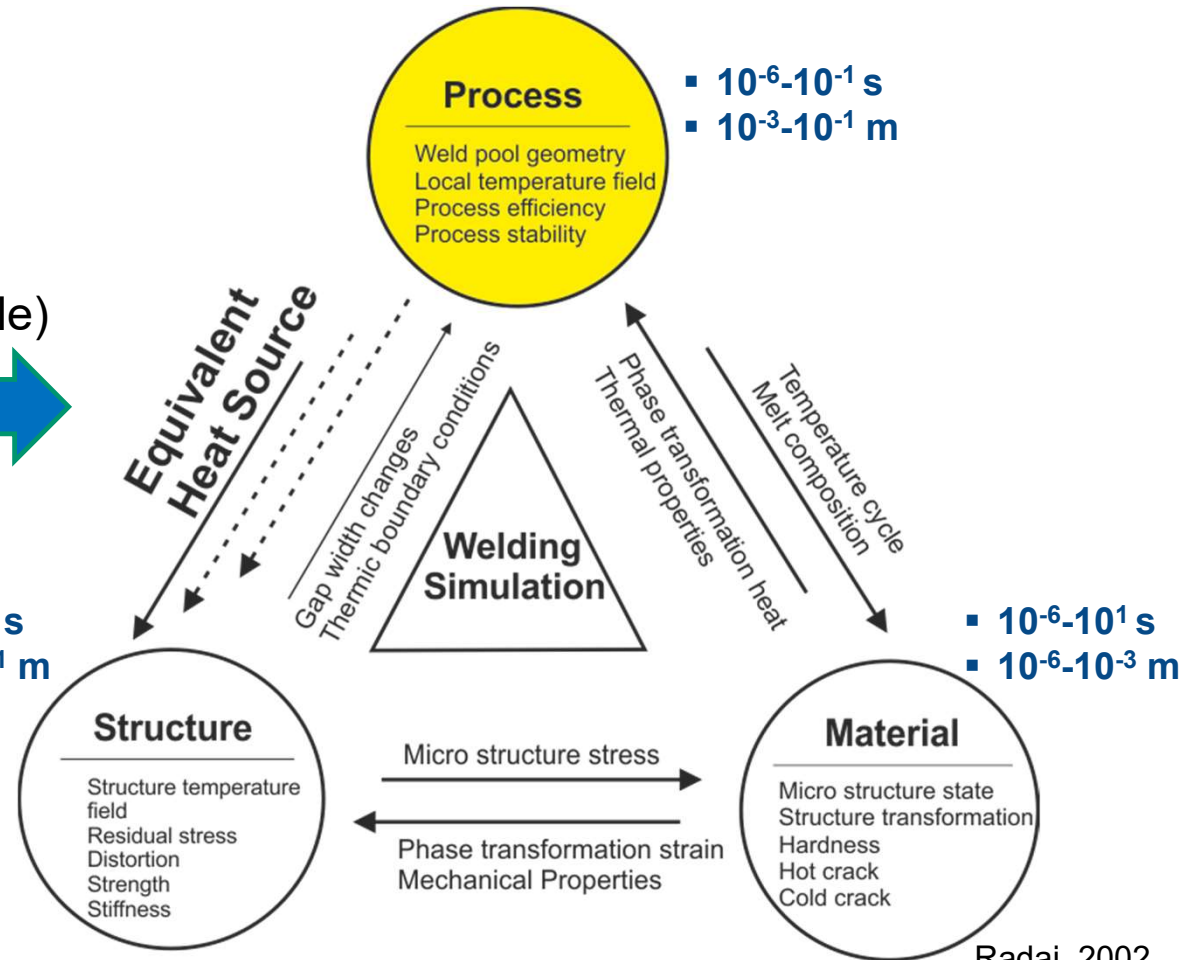
Prozesssimulation

Äquivalente
Wärmequelle
(Ersatzwärmequelle)



ÄWQ

- 10^{-2} - 10^2 s
- 10^{-2} - 10^1 m



Radaj, 2002

Wärmetransfer

Fourier Wärmeleitungs Gleichung: Änderung der Temperatur (T) als eine Folge der Wärmeleitung und

der Wirkung einer Quelle

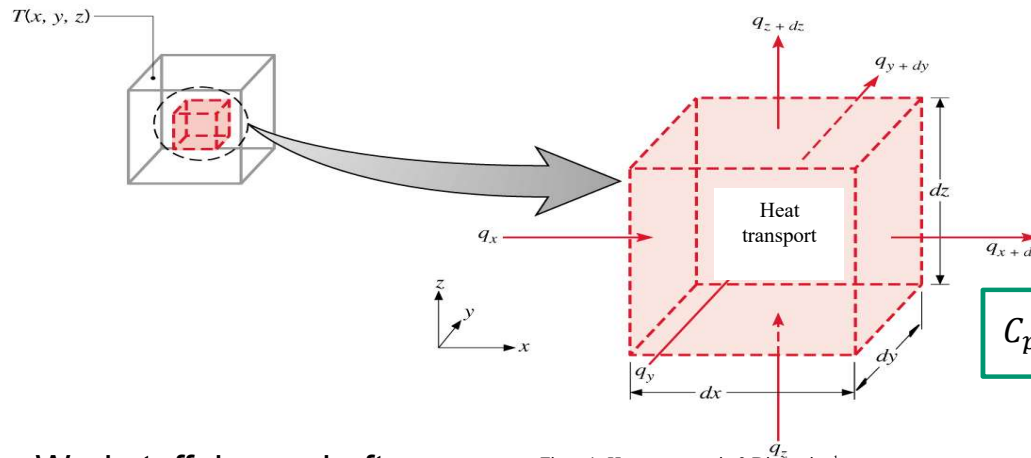


Figure1. Heat transport in 3 Dimension!

$$C_p \rho \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(k(T) \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k(T) \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k(T) \frac{\delta T}{\delta z} \right) + q(x, y, z, t)$$

Werkstoffeigenschaften

- C_p , Wärmekapazität (heat capacity [J/kg.K])
- $k(T)$, Wärmeleitfähigkeit (thermal conductivity [J/m.K.s])
- ρ , Dichte (density [kg/m³])

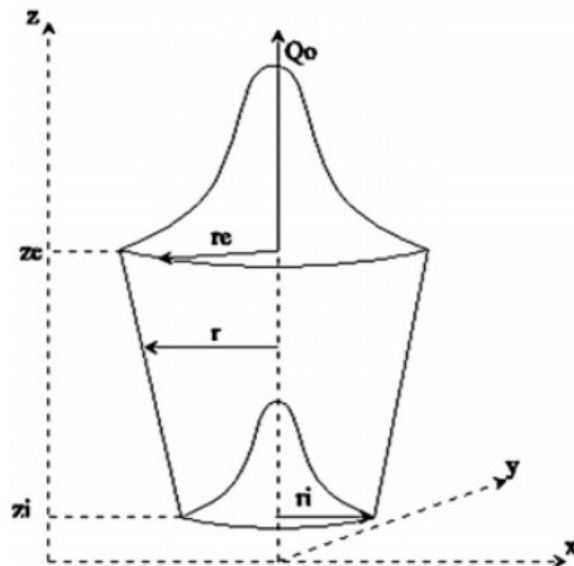
Parameter

- q , Wärme (thermal energy [J/m³.s])
- t , Zeit (time [s])

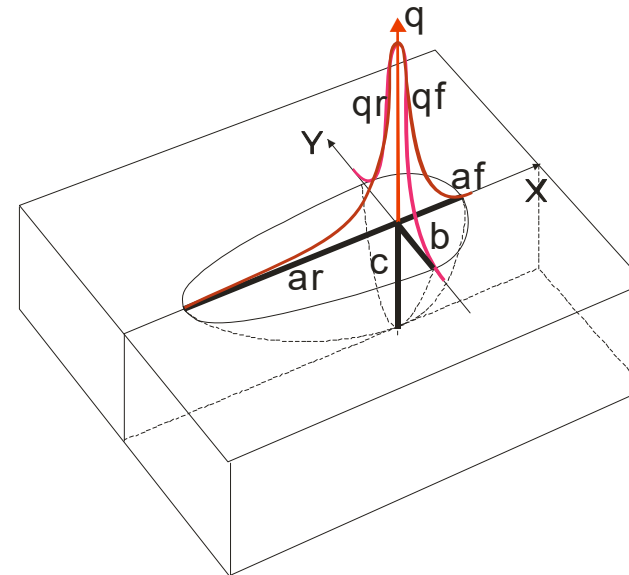
Ergebnis der Berechnung: zeitliche Änderung des Temperaturfeldes = Wärmefluss (Wärmetransfer)

Äquivalente Wärmequelle für das Strahl- und Lichtbogenschweißen

Vorlagegleichungen der Wärmeeinbringungsverteilung



ÄWQ für Strahlverfahren
Konisches Gaussches Modell²



ÄWQ für das
Lichtbogenschweißen
ÄWQ nach Goldak¹

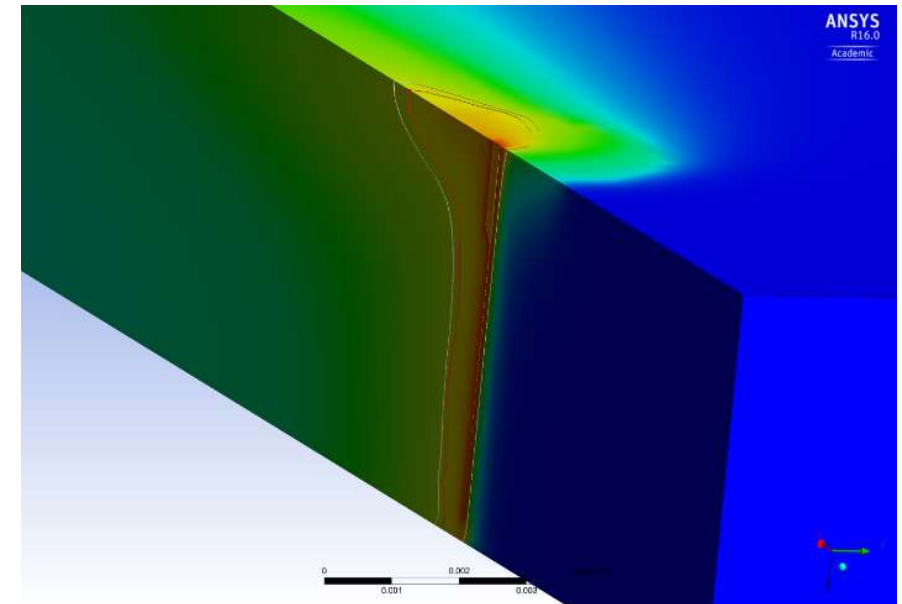
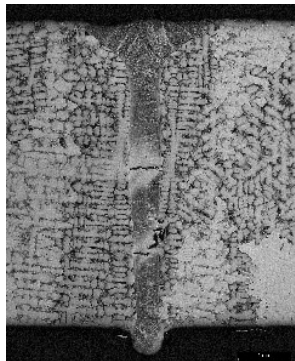
Beispiel einer Definition(Entwicklung) der ÄWQ für das Strahlschweißen

Die Schritte der Definition einer ÄWQ

1. Auswahl einer passenden Vorlagegleichung, bzw. einer zusammenwirkende Kombination
2. Berechnung der eingebrachten Leistung
3. Kalibrierung durch Vergleich zwischen dem Versuch und der Simulation für die Schweißnahtschliffe

(und Temperaturzeitverlauf)

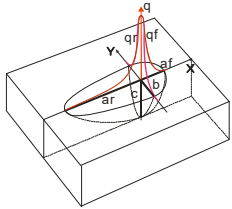
Iteratives Verfahren



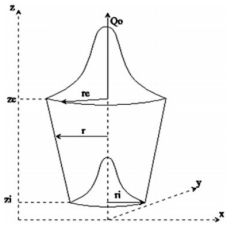
Beispiel einer Definition(Entwicklung) der ÄWQ für das Strahlschweißen

ÄWQ

- Nach Goldak $\approx 25\%$

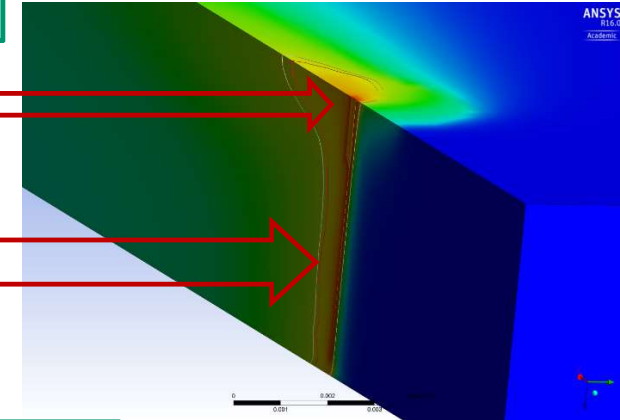
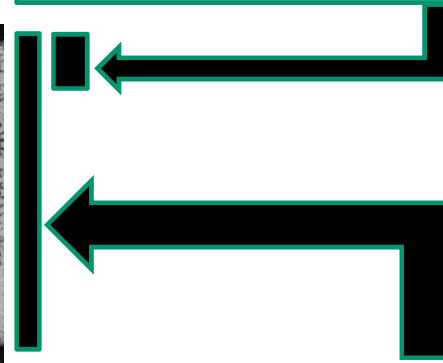


- Konische ÄWQ $\approx 75\%$



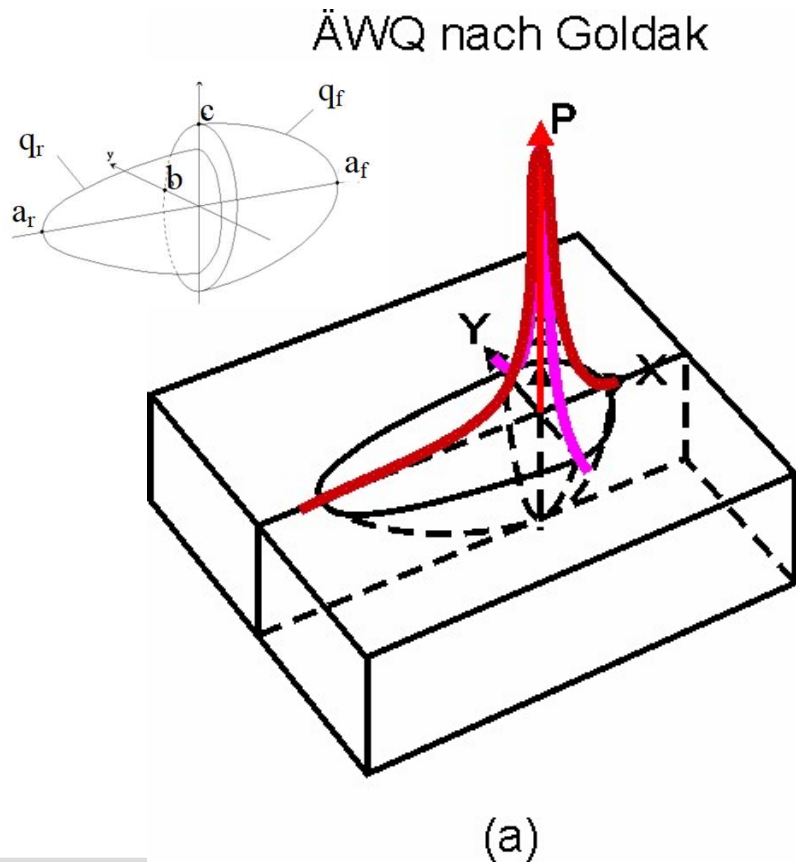
$$q_G(x, y, z) = \gamma^* (1 - EBP) \frac{Q^* 6\sqrt{3}}{\pi\sqrt{\pi}R_G^3} *$$

$$\exp\left(-3\left(\frac{x-x_0}{R_G}\right)^2 - 3\left(\frac{y}{R_G}\right)^2 - 3\left(\frac{z}{R_G}\right)^2\right)$$

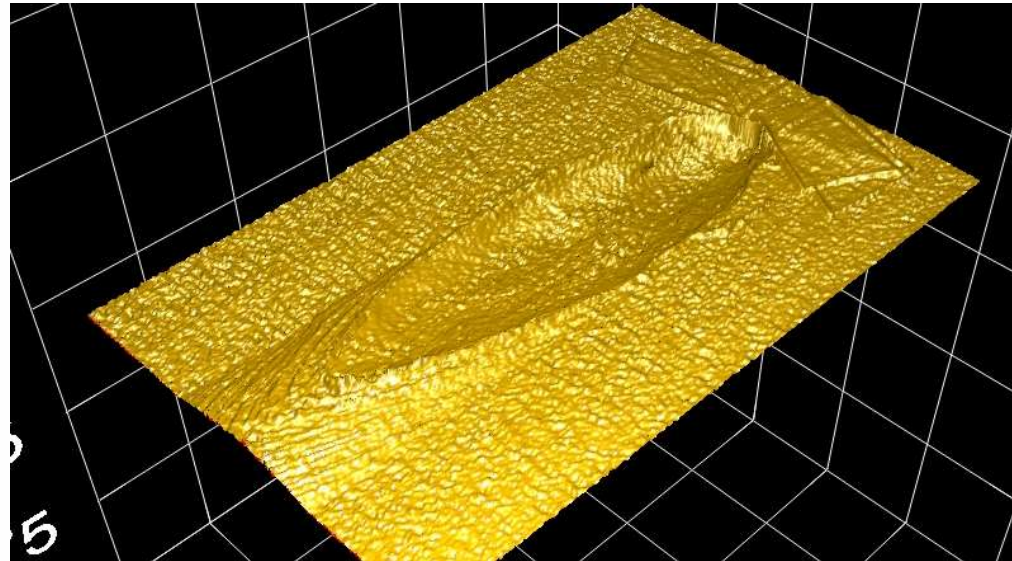


$$q_B(x, y, z) = \gamma^* EBP \frac{Q^* 3}{\pi H R_0^2} \exp\left(-3\left(\frac{x-x_0}{R_0}\right)^2\right) \exp\left(-3\left(\frac{y}{R_0}\right)^2\right) * \\ (1 + 0.5 * (0.5 * H - z) / H) * \text{Step}(H - z)$$

ÄWQ nach Goldak



- Volumenquelle
- Wärmeverteilung gaussförmig, weil der Schweißprozess als eine Aneinanderreihung von statistischen Prozessen verstanden wird
- Unterschiedliche Parameter in der vorderen und hinteren Hälfte
- Relativ gute Übereinstimmung bei geringen Schweißströmen



■ ÄWQ nach Goldak

■ forward

$$q_f(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-3\frac{(x+v(\tau-t))^2}{a_f^2}\right) \exp\left(-3\frac{y^2}{b^2}\right) \exp\left(-3\frac{z^2}{c^2}\right)$$

■ rear

$$q_r(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-3\frac{(x+v(\tau-t))^2}{a_r^2}\right) \exp\left(-3\frac{y^2}{b^2}\right) \exp\left(-3\frac{z^2}{c^2}\right)$$

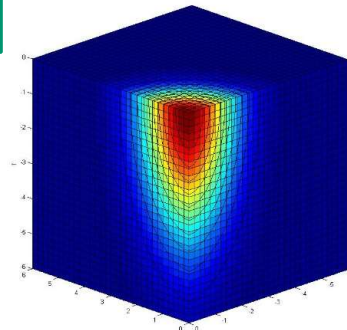
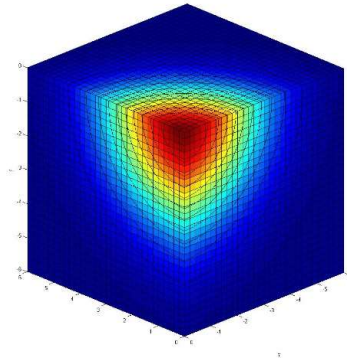
$$c = 3; \quad k_x = \frac{c}{a_x^2}; \quad k_y = \frac{c}{b_y^2}; \quad k_z = \frac{c}{c_z^2}; \quad d = (a_x \cdot b_y \cdot c_z) \pi^{1.5};$$

$$KG = \frac{2c^{1.5}}{d}$$

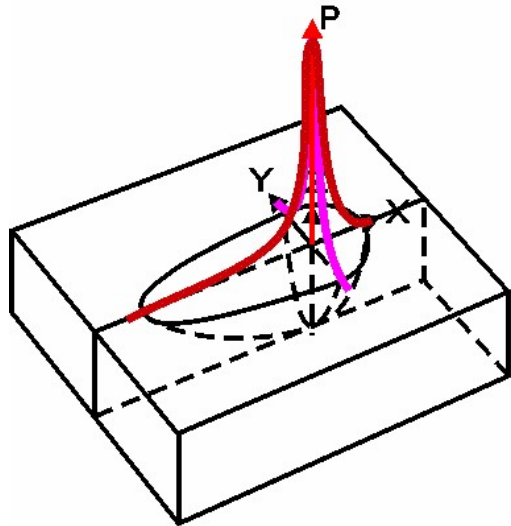
$$f_{Gol}(x,y,z,t) = KG \exp\left(-\left((x_0 + v(\tau-t))^2 k_x + y^2 k_y + z^2 k_z\right)\right)$$

■ R^2 für äquivalente Verteilung

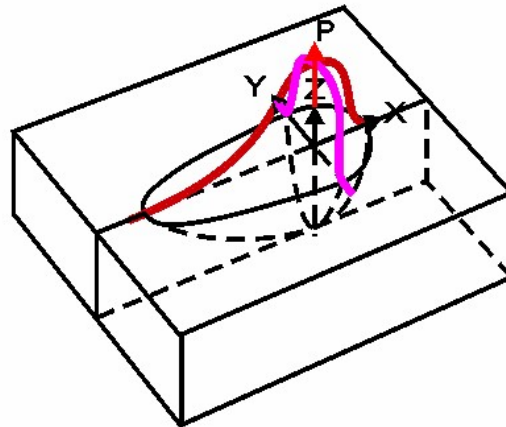
$$f_{Gol}(x,y,z,t) = KG \exp\left(-\left(kR^2\right)\right)$$



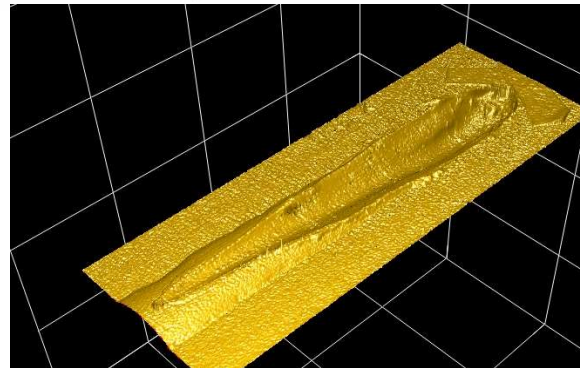
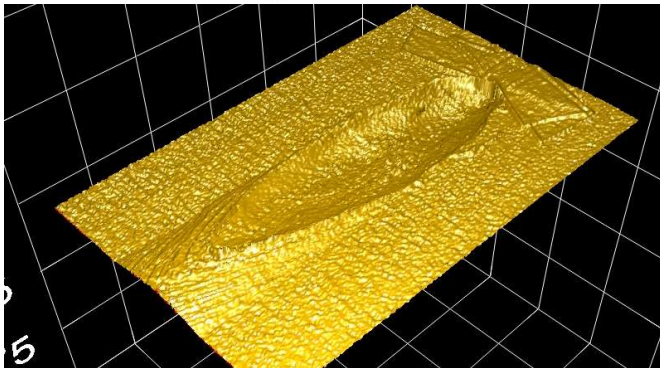
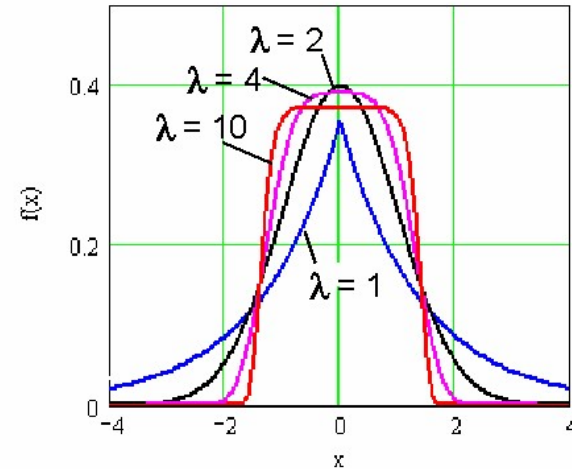
ÄWQ nach Goldak



modifizierte ÄWQ



1D-Verteilungsfunktion für verschiedene Formparameter



$$f(x) = \alpha \exp \left(- \left(\frac{|x - \theta_0|}{\sqrt{2\theta_1}} \right)^\lambda \right)$$

■ ÄWQ nach Goldak

■ forward

$$q_f(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-3 \frac{(x+v(\tau-t))^2}{a_f^2}\right) \exp\left(-3 \frac{y^2}{b^2}\right) \exp\left(-3 \frac{z^2}{c^2}\right)$$

■ rear

$$q_r(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-3 \frac{(x+v(\tau-t))^2}{a_r^2}\right) \exp\left(-3 \frac{y^2}{b^2}\right) \exp\left(-3 \frac{z^2}{c^2}\right)$$

$$c = 3; \quad k_x = \frac{c}{a_x^2}; \quad k_y = \frac{c}{b_y^2}; \quad k_z = \frac{c}{c_z^2}; \quad d = (a_x \cdot b_y \cdot c_z) \pi^{1.5};$$

$$KG = \frac{2c^{1.5}}{d}$$

$$f_{Gol}(x,y,z,t) = KG \exp\left(-\left((x_0 + v(\tau-t))^2 k_x + y^2 k_y + z^2 k_z\right)\right)$$

■ R^2 für äquivalente Verteilung

$$f_{Gol}(x,y,z,t) = KG \exp\left(-\left(kR^2\right)\right)$$

Modification Phase 1 (without Reinforcement)

■ ÄWQ nach Goldak

$$f_{Gol}(x, y, z, t) = KG \exp(- (kR^2))$$

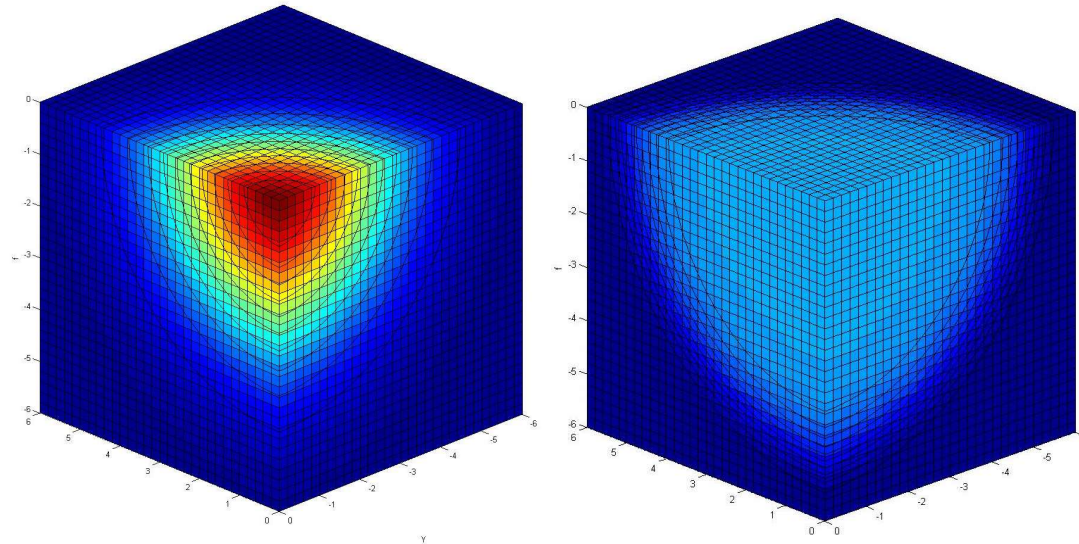
$$k_x = \frac{c}{a_x^2}; \quad k_y = \frac{c}{b_y^2}; \quad k_z = \frac{c}{c_z^2}; \quad d = (a_x \cdot b_y \cdot c_z) \pi^{1.5}; \quad c = 3; \quad KG = \frac{2c^{1.5}}{d}$$

■ modifizierte ÄWQ MR¹⁰

$$f_{MR10}(x, y, z, t) = KM \exp(- (kR^2)^5)$$

$$c = 2; \quad KM = 1,5035 \frac{2c^{1.5}}{d}$$

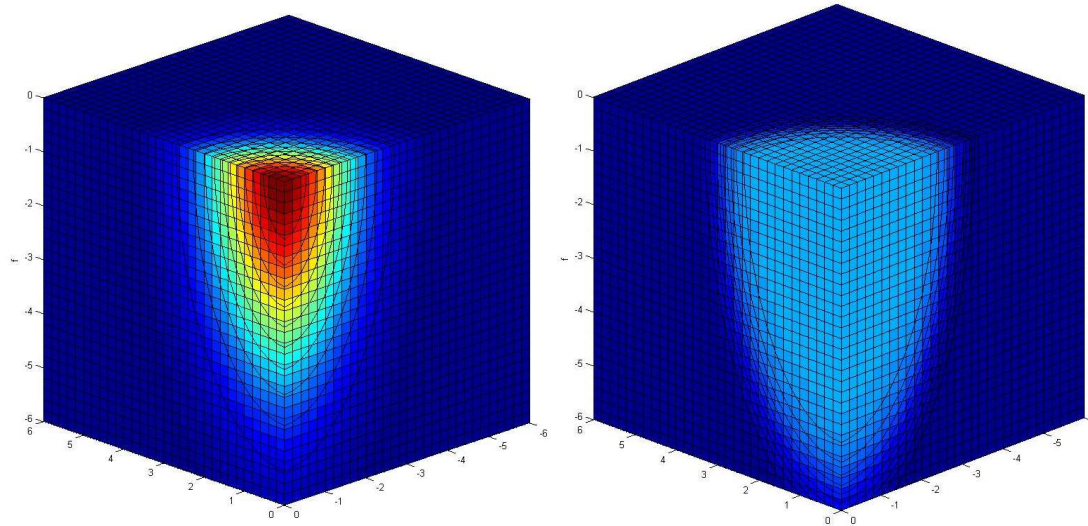
$$(- (kR^2)^5) = -k^5 R^{10}$$



$$f_{Gol}(x, y, z, t) = KG \exp\left(-\left(kR^2\right)\right) \quad f_{MR10}(x, y, z, t) = KM \exp\left(-\left(kR^2\right)^5\right)$$

$$r_x = r_y = r_z = 5; \quad c = 3; \quad k_x = \frac{c}{r_x^2}; \quad k_y = \frac{c}{r_y^2}; \quad k_z = \frac{c}{r_z^2};$$

$$d = (r_x \cdot r_y \cdot r_z) \pi^{1.5}; \quad KG = \frac{2c^{1.5}}{d}; \quad KM = 1.5035 \frac{2c^{1.5}}{d};$$

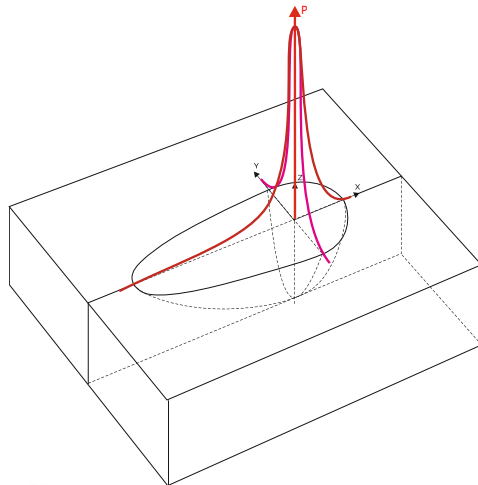


$$f_{Gol}(x, y, z, t) = KG \exp\left(-\left(kR^2\right)\right) \quad f_{MR10}(x, y, z, t) = KM \exp\left(-\left(kR^2\right)^5\right)$$

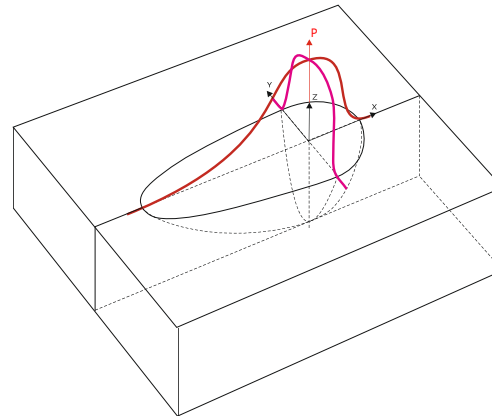
$$r_x = r_y = 3; r_z = 6; \quad c = 3; \quad k_x = \frac{c}{r_x^2}; k_y = \frac{c}{r_y^2}; k_z = \frac{c}{r_z^2};$$

$$d = (r_x \cdot r_y \cdot r_z) \pi^{1.5}; \quad KG = \frac{2c^{1.5}}{d}; \quad KM = 1,5035 \frac{2c^{1.5}}{d};$$

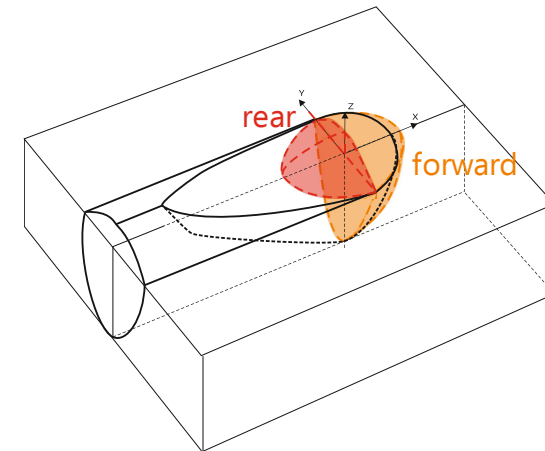
Modification Phase 2 (with Reinforcement)



ÄWQ nach Goldak



Phase 1

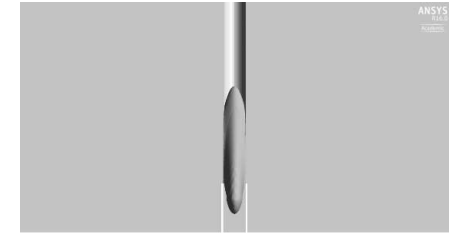
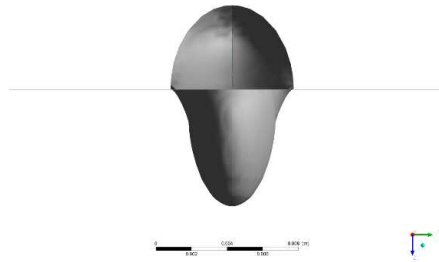


Phase 2

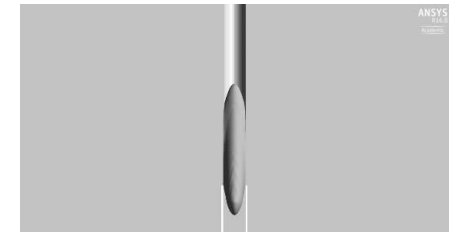
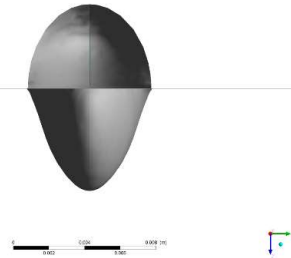
- Forward part → in Plate (if $(x_0 + v(\tau - t) < 0)$) ONLY
- Rear part → in Reinforcement (if $(x_0 + v(\tau - t) > 0)$) ONLY

475 A, 30 V, 80 cm/min

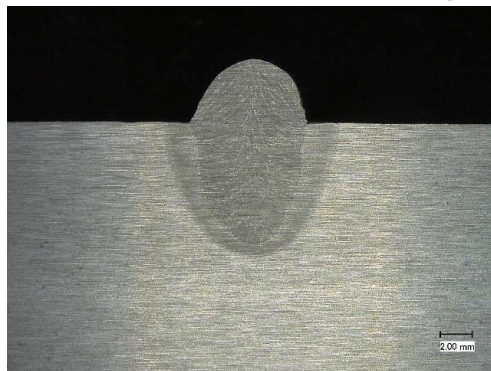
MR10



GoldakMR2



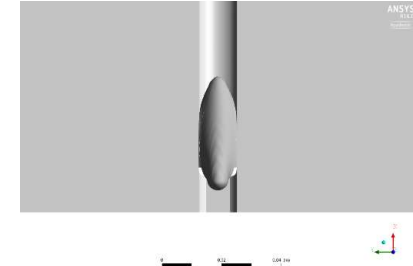
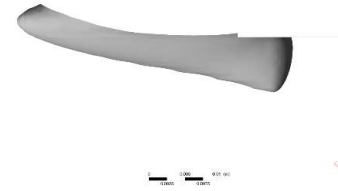
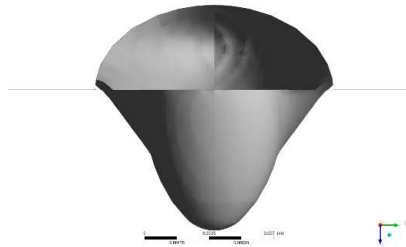
Exp.



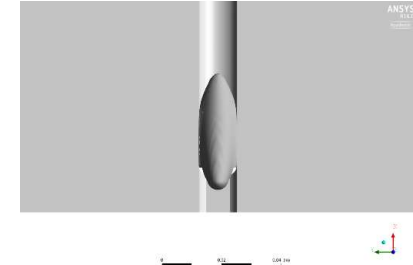
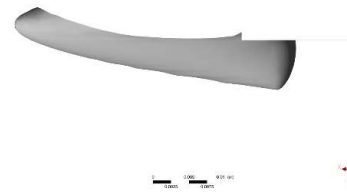
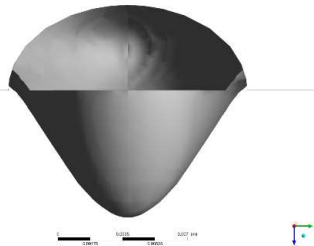
Liquidus-z (MÄWQ) [mm]: 8,01
Liquidus-z (Goldak) [mm]: 7,15
Liquidus-z (Exp.) [mm]: 8,13

475 A, 32 V, 40 cm/min

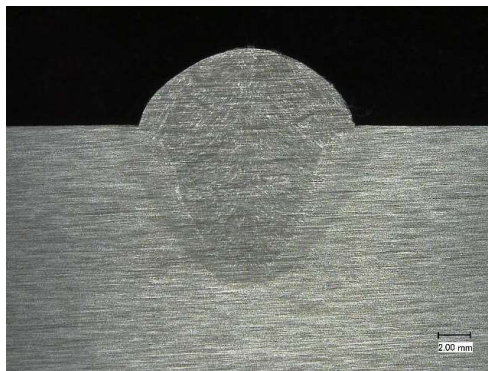
MR10



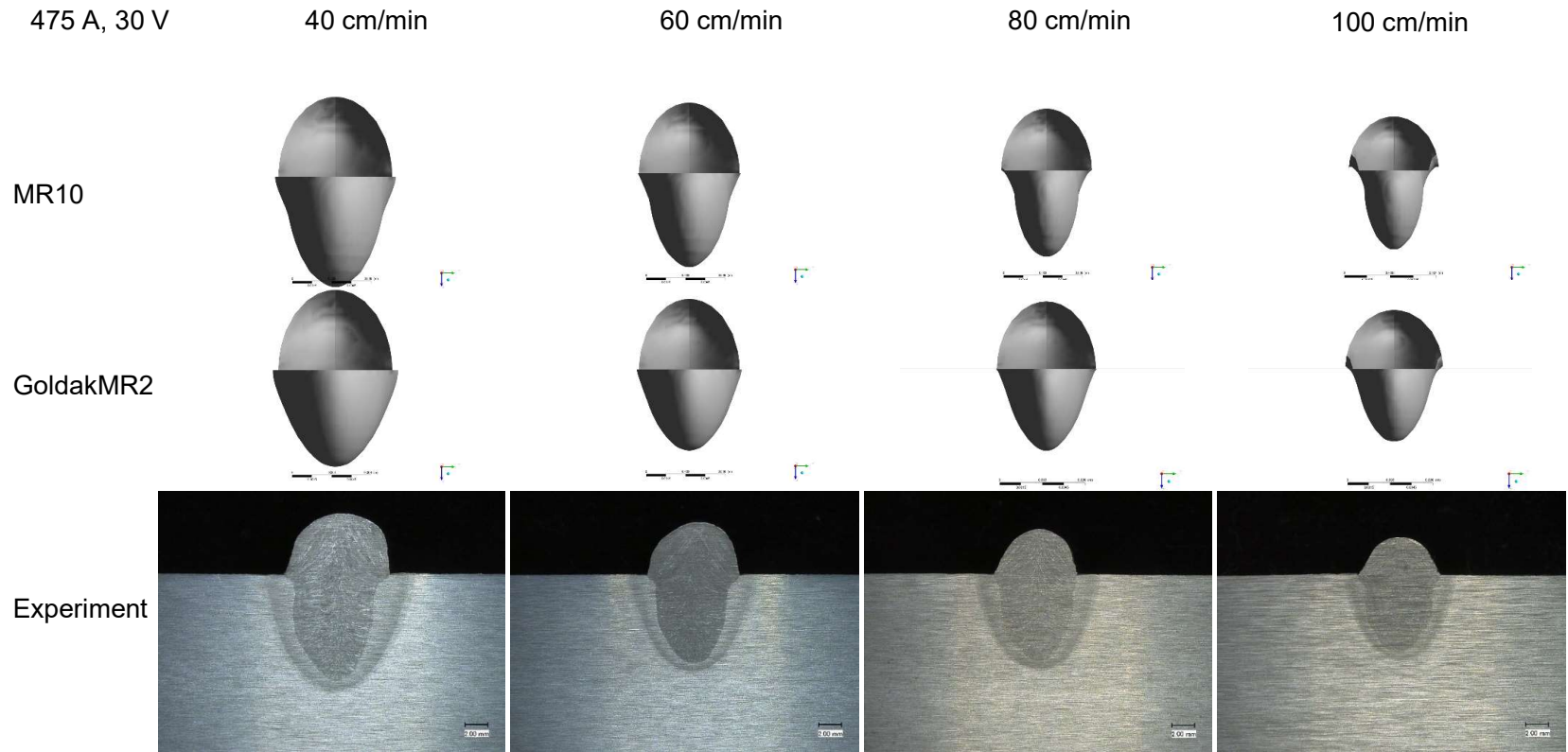
GoldakMR2



Exp.



Liquidus-z (MÄWQ) [mm]: 8,86
Liquidus-z (Goldak) [mm]: 8,37
Liquidus-z (Exp.) [mm]: 8,4



475 A; 30 V; 40, 60, 80, 100 cm/min

475 A, 32 V

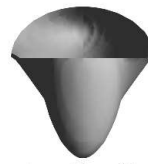
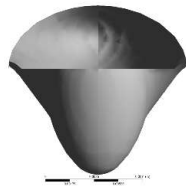
40 cm/min

60 cm/min

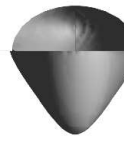
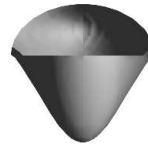
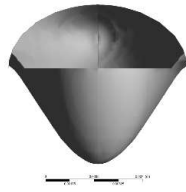
80 cm/min

100 cm/min

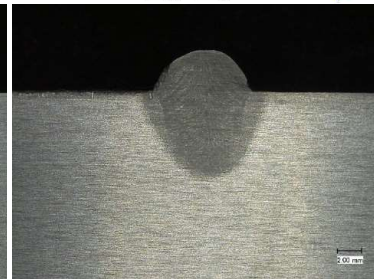
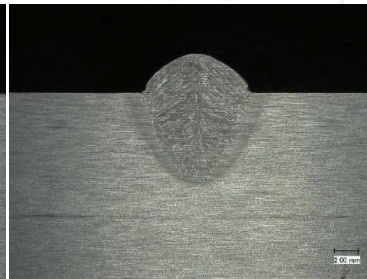
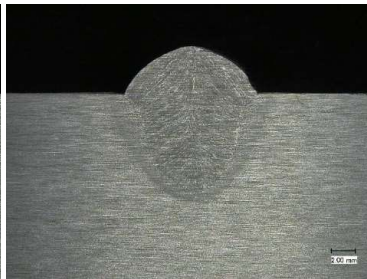
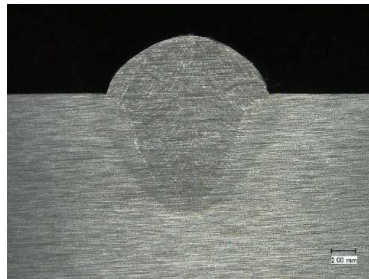
MR10



GoldakMR2



Experiment



475 A; 32 V; 40, 60, 80, 100 cm/min

475 A, 34 V

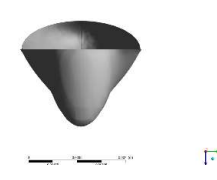
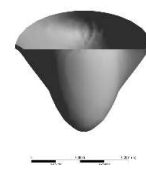
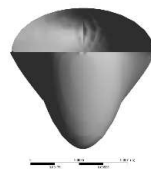
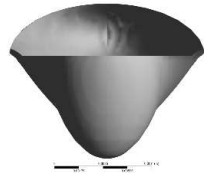
40 cm/min

60 cm/min

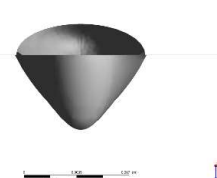
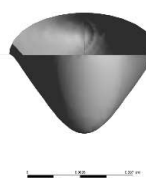
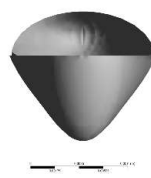
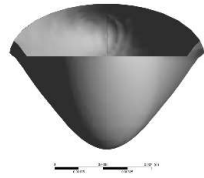
80 cm/min

100 cm/min

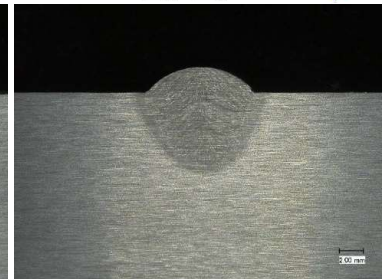
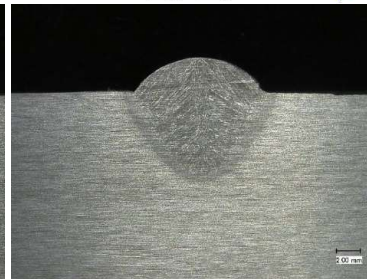
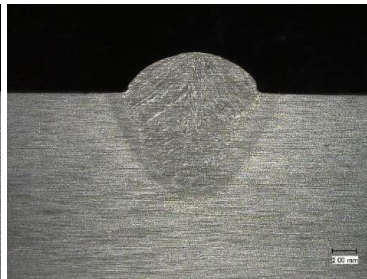
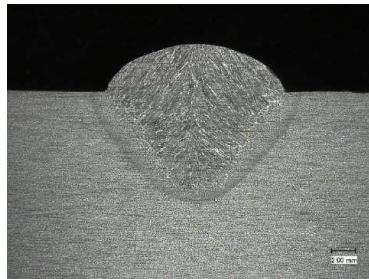
MR10



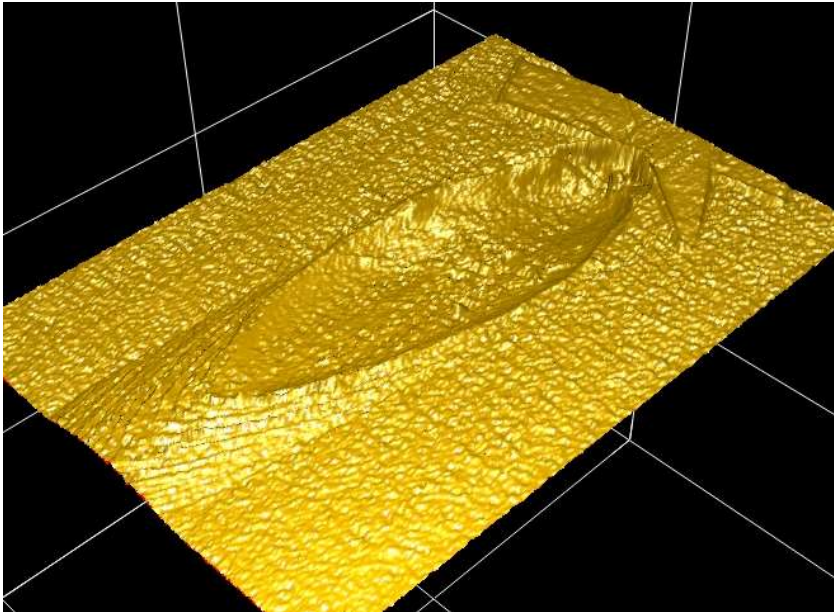
GoldakMR2



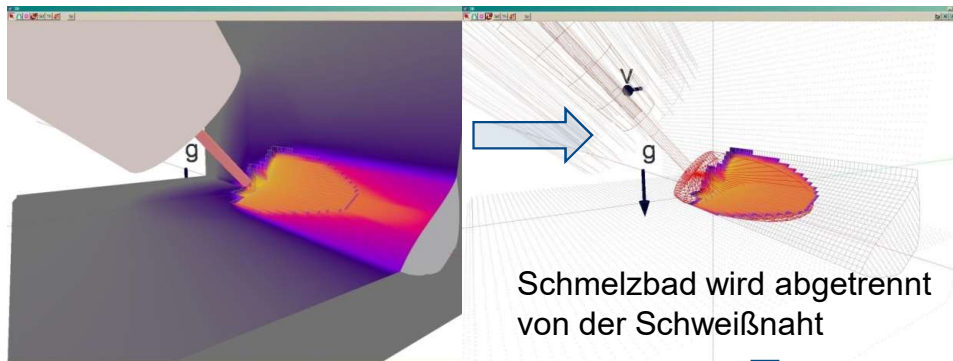
Experiment



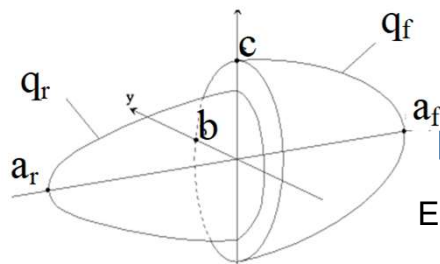
475 A; 34 V; 40, 60, 80, 100 cm/min



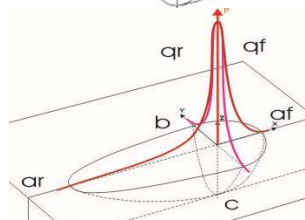
- Simulation der Wärmeströme
- Simulation der Schweißbadform
- Entwicklung von Algorithmen für die geometrische Beschreibung der Schmelzbadgrenze
- Automatische Erzeugung einer ÄWQ nach Goldak oder MR10



SimWeld Simulation



Erzeugung von äquivalenten Ellipsoiden



Definition der Energieparameter
Definition der Verteilungsparameter
Erzeugung der Subroutine

Wärmequellen Funktion für DYNAWELD und SYSWELD sind automatisch mit SimWeld generiert.

```

22.14 Mathematische Funktionen - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
#OPERATOREN
#-----
#Subtrahieren und negatives Vorzeichen
-
#Addieren
+
#Multiplizieren
*
#Dividieren
/
#Rest einer nicht aufgehenden Division
%
#Bitweises Nicht. Nur bei Integer.
~
#Logisches Nicht. Nicht bei Stringoperationen.
!
#Bitorientiertes Und
&
#Bitorientiertes ausschließliches Oder
^
#Bitorientiertes inklusives Oder
|
#Arithmetischer Links- und Rechts-Shift. Nur für Integer.
<< >>
#Alle nachfolgenden Operatoren geben eine Boolesche 1
#zurück, wenn die Bedingung stimmt, ansonsten 0. Gilt für
#Strings, Integers und Kommazahlen.
#Weniger als
<
#größer als
>
#kleiner gleich
<=
<
38      XO = 0.0 ; [mm]
39      YO = 0.0 ; [mm]
40      ZO = 0.0 ; [mm]
41      VY = 5.00000 ; [mm/sec]
42      AY = 48.46824 ; [degree]
43      C
    
```

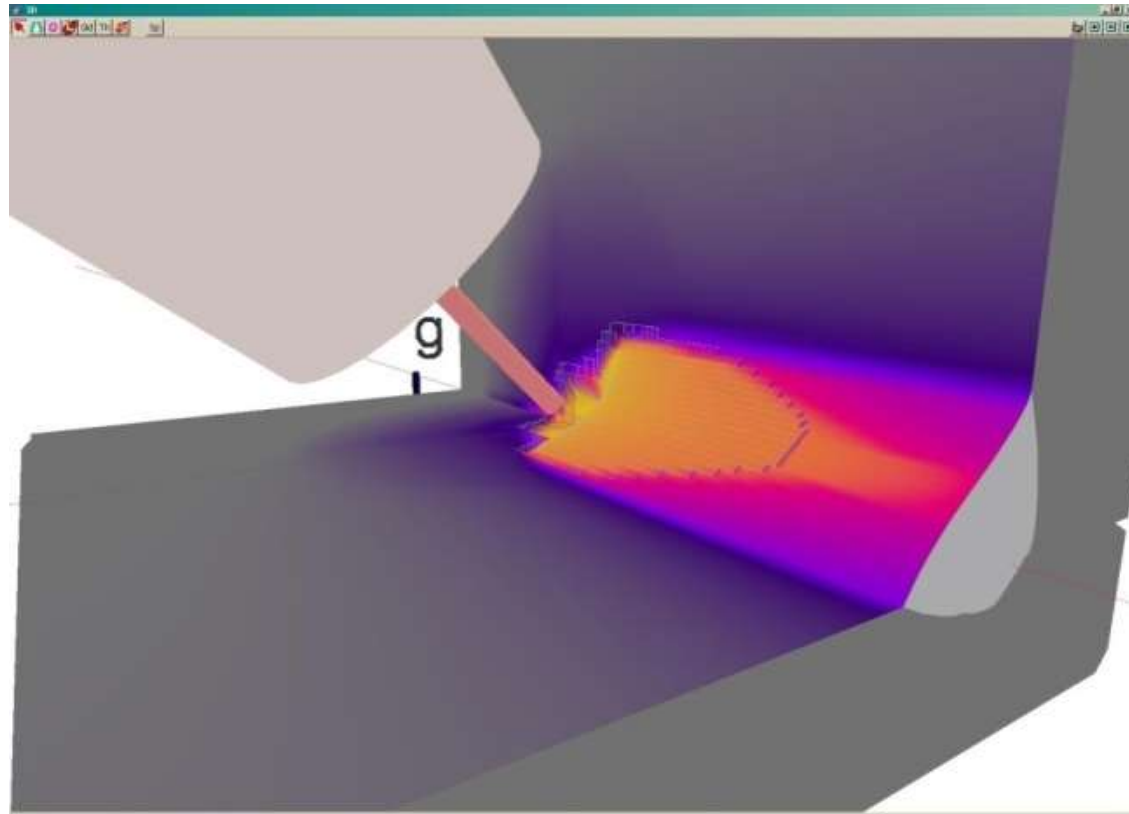
generated in SimWeld
2.5.8
10 13:35:33
ld simulation:
line, no reference line. It is
auss point treated and time

**DynaWELD
C Subroutine**

**SYSWELD
Fortran Subroutine**

Computation of the absorbed power

Demonstration des Programmes *SimWeld*



Zusammenfassung und Ausblick

1. Für die Simulation eines Temperaturfeldes bei der Struktursimulation wird eine äquivalente Wärmequelle verwendet
2. Die meistverbreiteten ÄWQ sind konische für das Strahlschweißen und nach Goldak für das Lichtbogenschweißen
3. Überprüfung und Kalibrierung durch Vergleich zwischen dem Versuch und der Simulation für die Schweißnahtschliffe und Temperaturzeitverlauf ist üblicherweise notwendig
4. ÄWQ MR10 bringt bessere Übereinstimmung der Simulationsergebnisse beim Schweißen mit hoher Intensität der Wärmeeinbringung
5. Das Programm **SimWeld** ist für die Prozesssimulation des MSG-Schweißens entwickelt und erlaubt die große Zahl der Versuche durch Simulationen zu ersetzen
6. Eines der Ergebnisse vom **SimWeld** ist eine automatische Generation einer ÄWQ für die weitere Verwendung bei der Struktursimulation
7. Prozesssimulation des Laserschweißens in **SimWeld** befindet sich in der Entwicklung



ISF - Welding and Joining Institute
RWTH Aachen University
Pontstraße 49
52062 Aachen

Tel.: +49 (0)241 80-93870
Fax: +49 (0)241 80-92170
E-Mail: office@isf.rwth-aachen.de
www.isf.rwth-aachen.de

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!