

---

# SIMULTANE LASER-WÄRMEBEHANDLUNG BEIM LASERSTRAHLSCHWEISSEN

Vorarbeiten zum Projekt HyOp

---



Aachen, 7. Februar 2023

Martin Dahmen

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik

Fon: 0241 8906 307

[martin.dahmen@ilt.fraunhofer.de](mailto:martin.dahmen@ilt.fraunhofer.de)

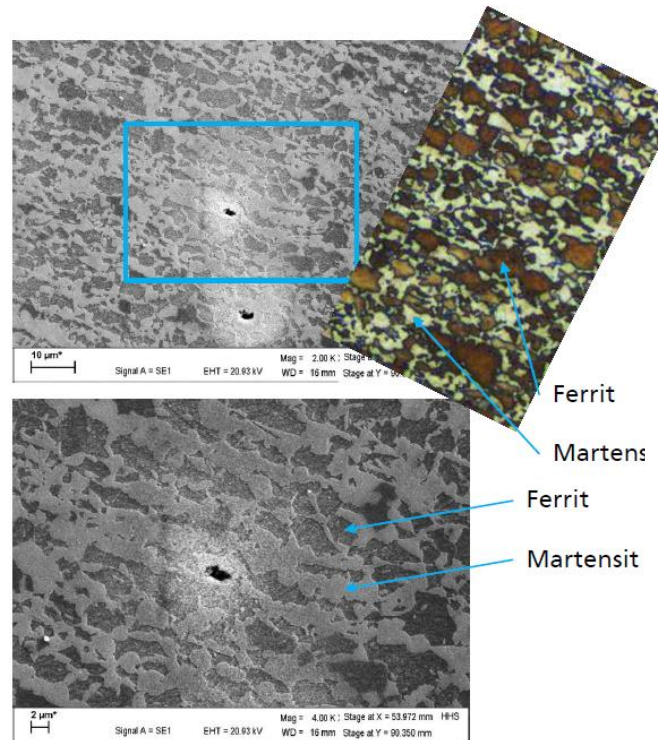
# Inhalt

- Zielsetzung
- Versuchsaufbau
- Strahlparameter
- Versuchsplan
- Versuchsauswertung
- Ergebnisse
  - Sichtprüfung/Makroschliffe
  - Gefügeanalyse
  - Härtemessung
- Zusammenfassung und weitere Schritte

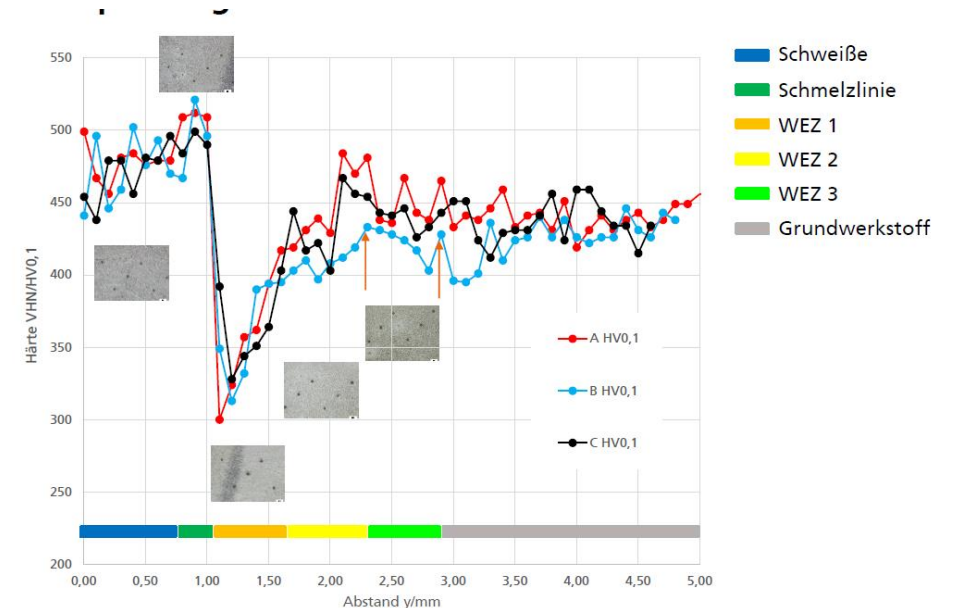
# Zielsetzung

## Versuchsziel(e)

- Unterdrückung der Härtespitze an der Schmelzlinie (neigt zu lokaler Versprödung)
- Verminderung der Härte in der Schweißnaht
- Anhebung der Härte in der Anlasszone
- Ausgeglichenes Härteprofil quer über die Schweißzone
- Wiederherstellung des ferritisch-martensitischen Gefüges



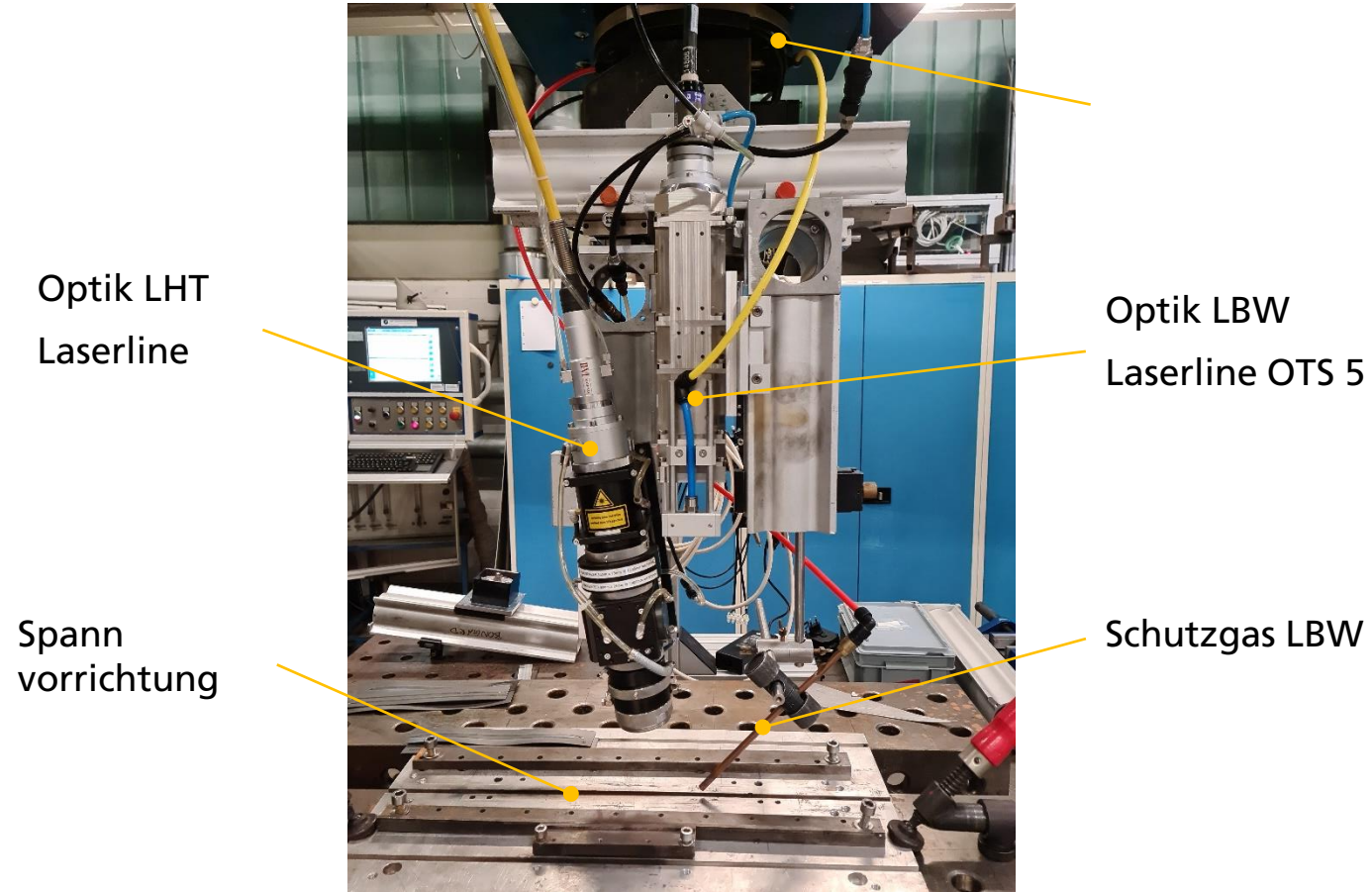
Gefüge Grundwerkstoff  
1.0944 (DP980, DOCOL 1000)



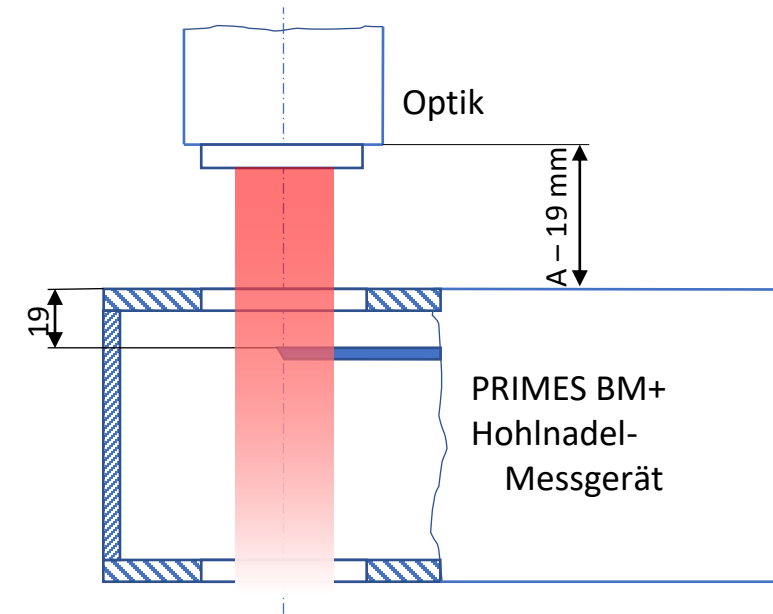
Kleinlasthärtemessung an DP1180 (Beispiel)

# Versuchsaufbau

## Kombinierte Optiken



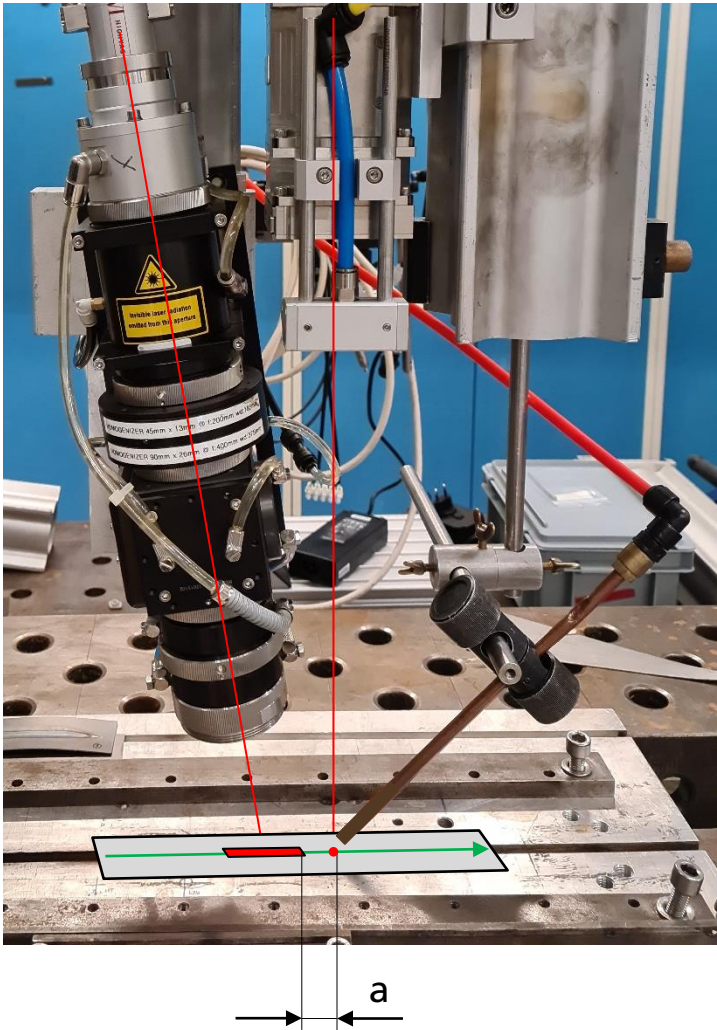
## Strahlvermessung



### Strahldaten

- Strahlabmessungen im Fokus  $28,5 \times 7,5 \text{ mm}^2$
- $z_R > 80 \text{ mm}$
- Schrägstellung  $\theta \in [15;20]^\circ$
- Effektive Fokusslänge  $L_f \in [29,5;30,3]$

# Versuchsaufbau



Bewegte Optik, ruhendes Werkstück

Halbzeug:           Blech 1.0944 (zwei Chargen)

Abmessungen  $250 \times 50 \times 1,5$  bzw.  
 $250 \times 50 \times 0,9 \text{ mm}^3$

1 Schweißnaht je Blech

Abstand a: Schweißfokus bis Anfang WBH-Spot

Anstellung WBH-Optik:  $20^\circ$

Anstellung Schweißoptik:  $0^\circ$

Schutzgas Schweißen: Ar 4.6 10 l/min

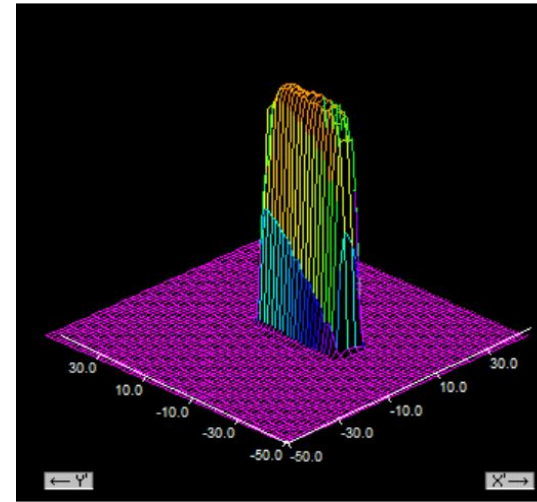
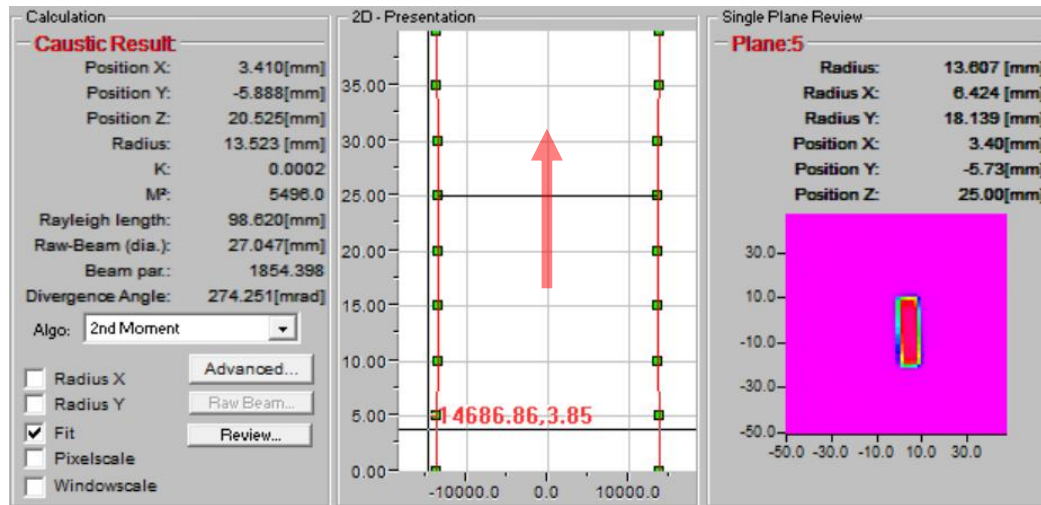
Fokuslage Schweißen: +2 mm

Vorschub: 4 m/min

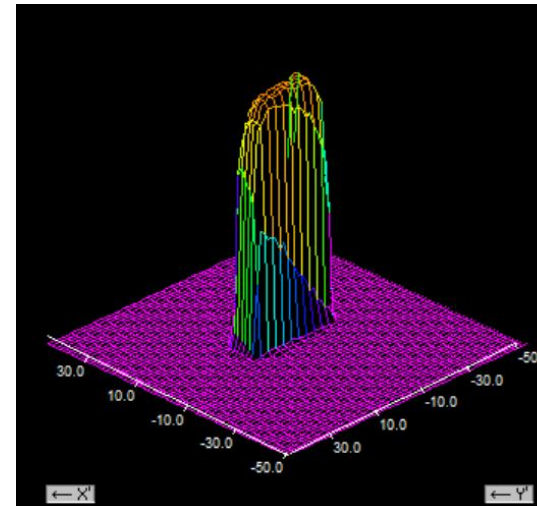
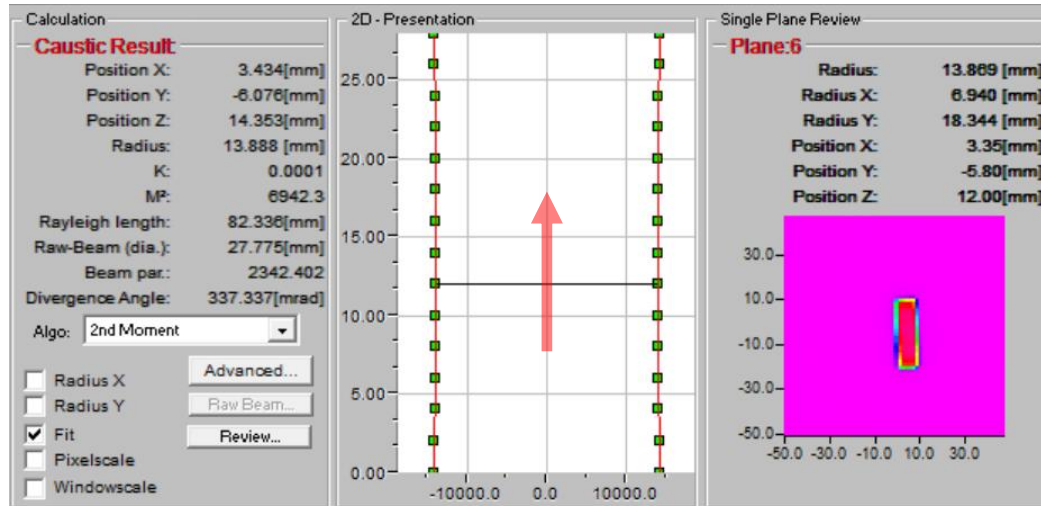
# Strahlquellen und Optiken

	Diodenlaser Laserline LDF 12000-100	Scheibenlaser Trumpf Trudisk 12002
Wellenlänge $\lambda$ /nm	960 . . . 1080	1030
Nennleistung $P_{Lmax}$ /kW	12	12
Minimalleistung $P_{Lmin}$ /kW	0	0,240
SPP/mm·mrad	100	8
Strahlformung	Laserline Testoptik	OTS 5
Faserdurchmesser $d_f$ /μm	1000 (rund)	200 (rund)
Kollimator $f_K$ /mm		158
Brennweite	133 mm (eff.)	200
Fokusbereich	29,5 × 7,5 mm <sup>2</sup>	506 μm
Arbeitsabstand $A$ /mm	175	430

# Strahldiagnose



- Grobmessung  
 Messleistung 1200 W  
 Schrittweite 5 mm  
 Messlänge 40 mm
- Scharfe Abbildung bei 20 – 25 mm



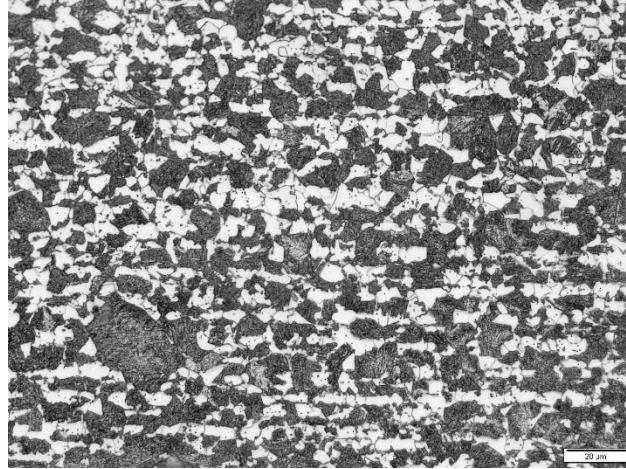
- Feinmessung  
 Schrittweite 2 mm  
 Messlänge 28 mm
- Scharfe Abbildung bei 12 mm
  - Nullpunkt = 10 mm aus Grobmessung
  - $A = (197 - 10 - 12) \text{ mm} = 175 \text{ mm}$

# Werkstoffe

1.0944

d = 0,9 mm

Warmband



Martensitisch-perlitisch, ferritisch

Mittlere Korngröße (F) 6  $\mu\text{m}$

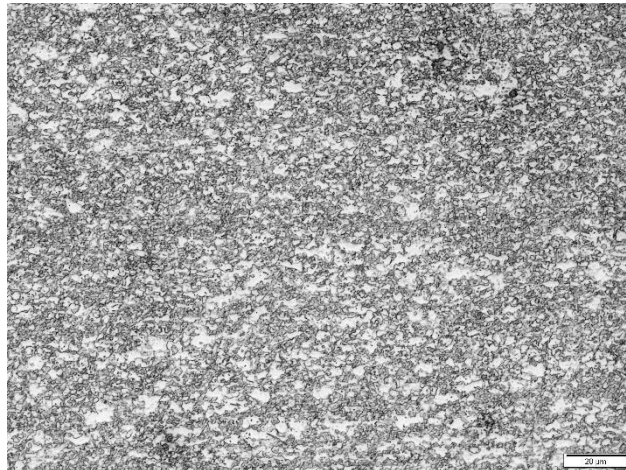
Ausgeprägte Zeilen mit Phasentrennung

Ausgeprägte Zeilenstruktur

1.0944

d = 1,5 mm

Kaltbandband, verzinkt



Martensitisch ferritisch

Mittlere Korngröße (F) 4,5  $\mu\text{m}$

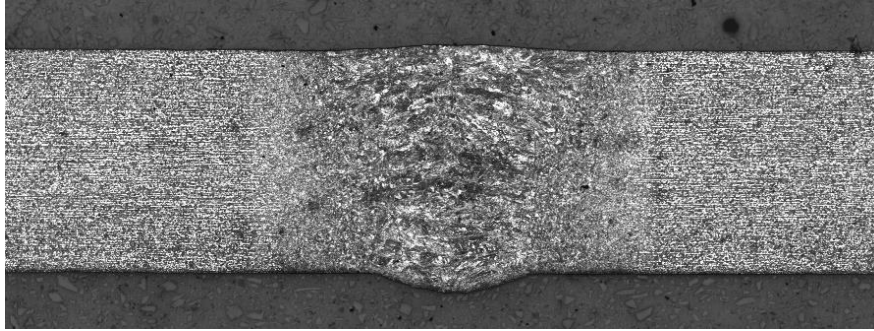
Feindisperse Phasenmischung mit größeren F-Körnern

Homogenisiertes Gefüge

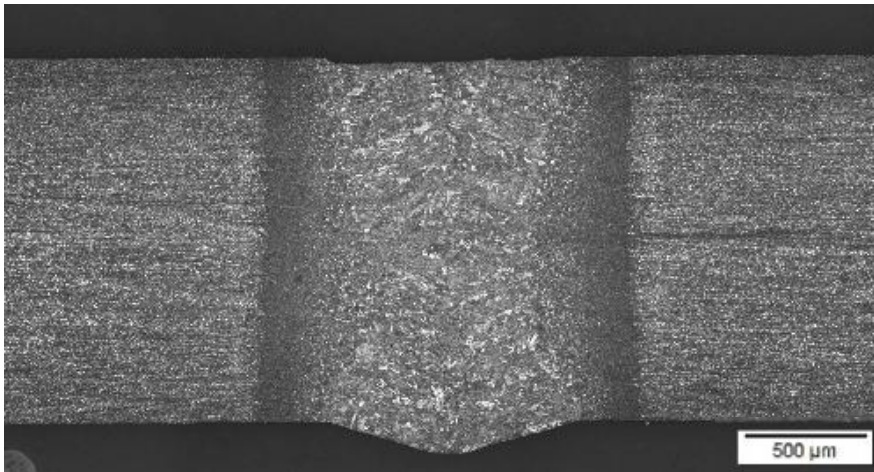


# Makroschliffe: Schweißnähte ohne Wärmebehandlung

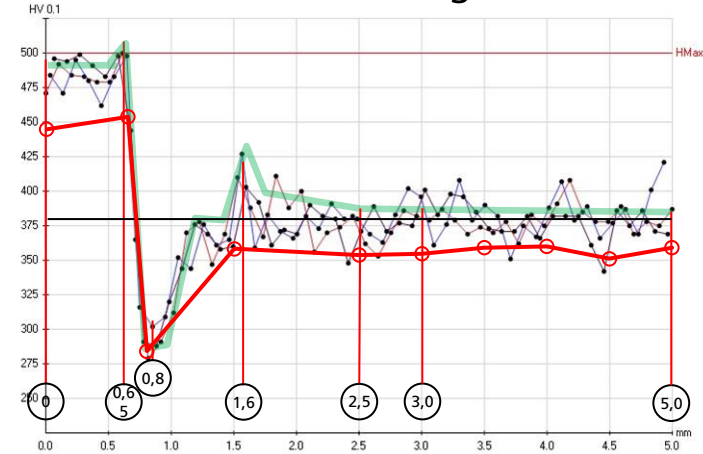
#1  
d = 0,9 mm



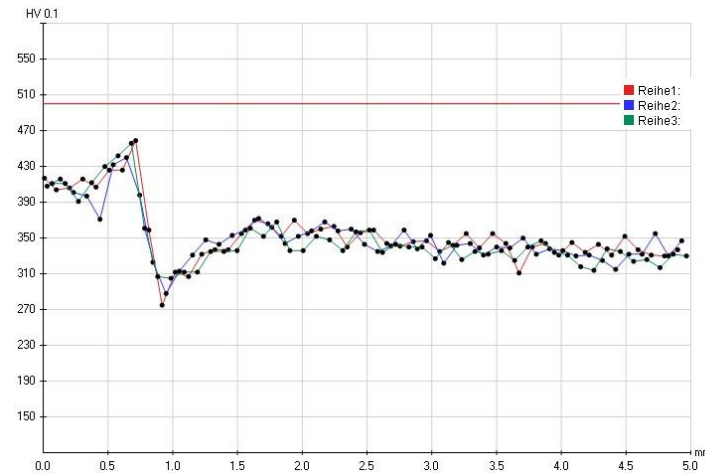
#11  
d = 1,5 mm



Feinmessung HV0,1



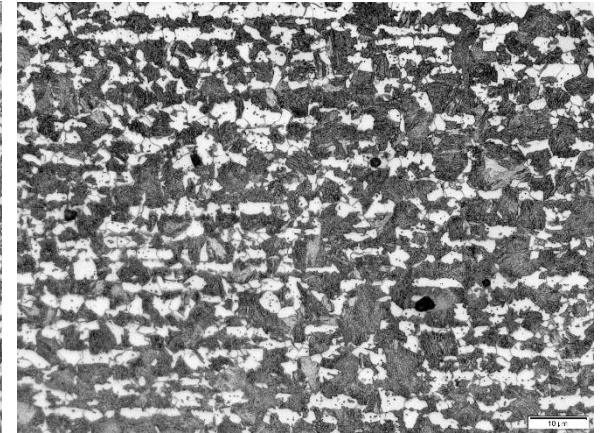
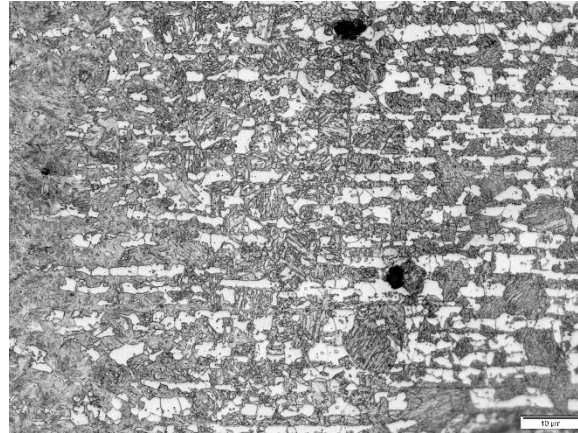
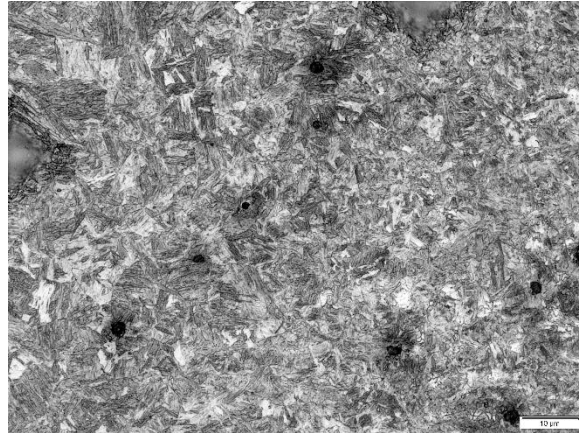
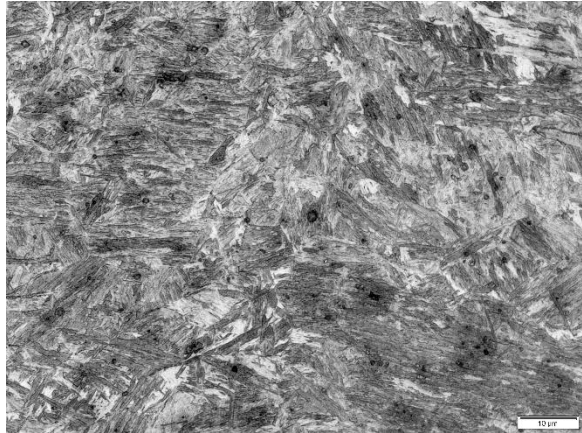
Position	Härte
Schweiße	485 HV0,1
Schmelzlinie	500 HV0,1
Anlasszone	285 HV0,1
Rückhärtezone	410 HV0,1
Grundwerkstoff	380 HV0,1



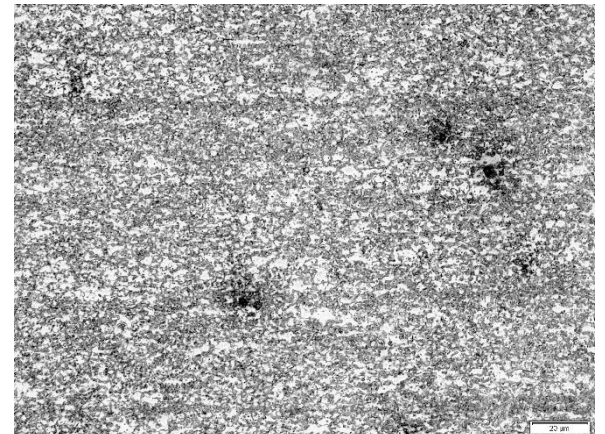
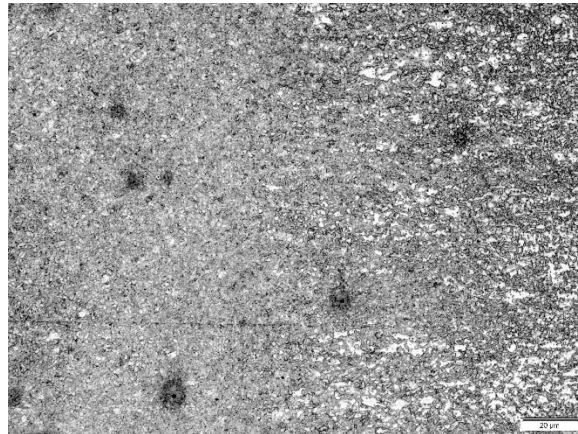
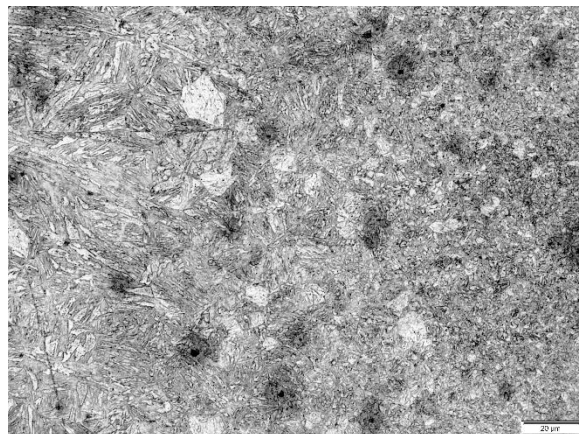
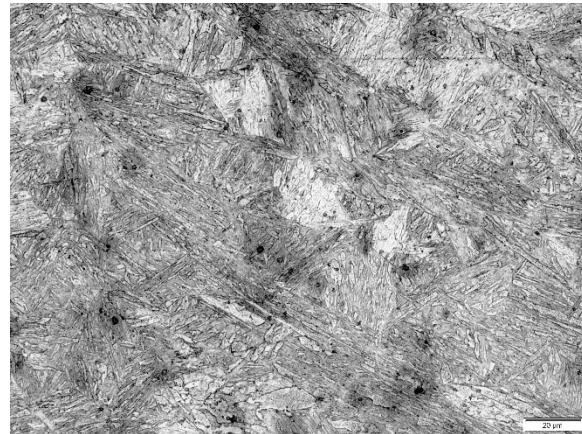
Position	Härte
Schweiße	415 HV0,1
Schmelzlinie	460 HV0,1
Anlasszone	282 HV0,1
Rückhärtezone	370 HV0,1
Grundwerkstoff	340 HV0,1

# Gefüge ohne Wärmebehandlung

#1



#11



Schweißnahtmitte

Schmelzlinie

Anlasszone

Rückhärtezone

# Parameter Vorversuch 1

## Strahlquellen:

- LBW: Trudisk 12002
- LHT: LDF 12000-100

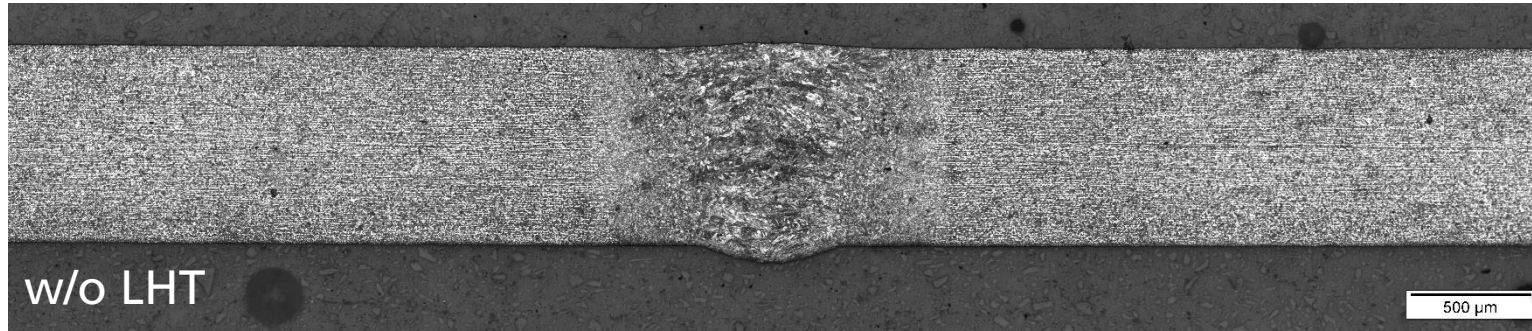
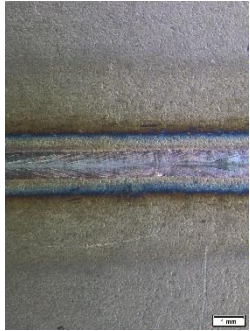
## Parameter:

- $v_s = 4 \text{ m/min}$ ,  $\Delta z = 2 \text{ mm}$ , Schutzgas Ar 4.6, 15 l/min,  $d_f = 506 \text{ }\mu\text{m}$
- $A_f \approx 30 \times 7,5 \text{ mm}^2$ , Abstand Strahlachsen 45 mm
- Werkstoff: 1.0944, Warmband unbeschichtet,  $d = 0,9 \text{ mm}$

#	Mat.	d/mm	$P_L(\text{LBW})/\text{W}$	$P_L(\text{LHT})/\text{kW}$	simultan	a/mm	
1	1.0944	0,9	1200	0	1	33	Blech Warmband, unbeschichtet
2	1.0944	0,9	1200	1235	1	33	
3	1.0944	0,9	1200	1800	1	33	
4	1.0944	0,9	1200	2400	1	33	
5	1.0944	0,9	1200	3000	1	33	
6	1.0944	0,9	1200	3600	1	33	
7	1.0944	0,9	1200	3600	0	33	LHT kalte Schweißnaht
8	1.0944	0,9	1200	1200	0	33	LHT kalte Schweißnaht
9	1.0944	0,9	1200	2400	0	33	LHT kalte Schweißnaht

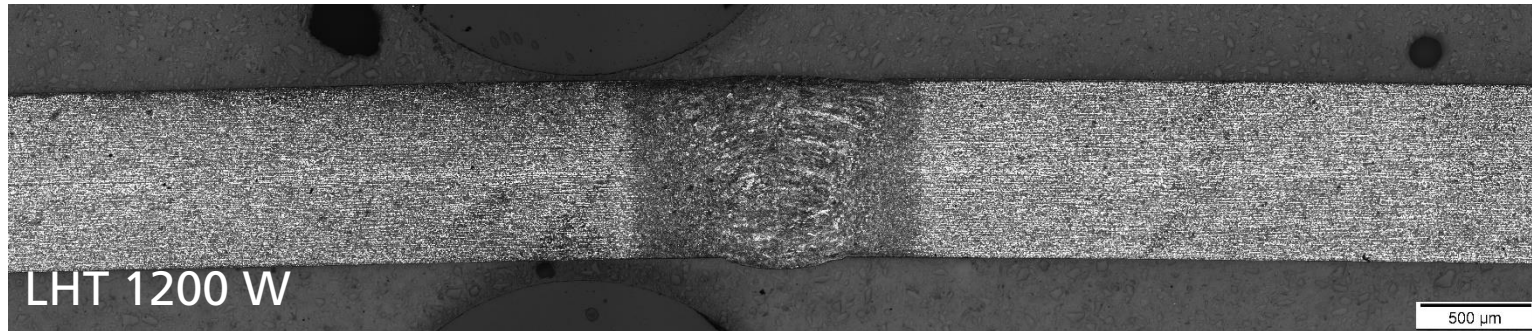
# Wärmebehandlung 30 mm nachlaufend, Starttemperatur ca. 800°C

#1

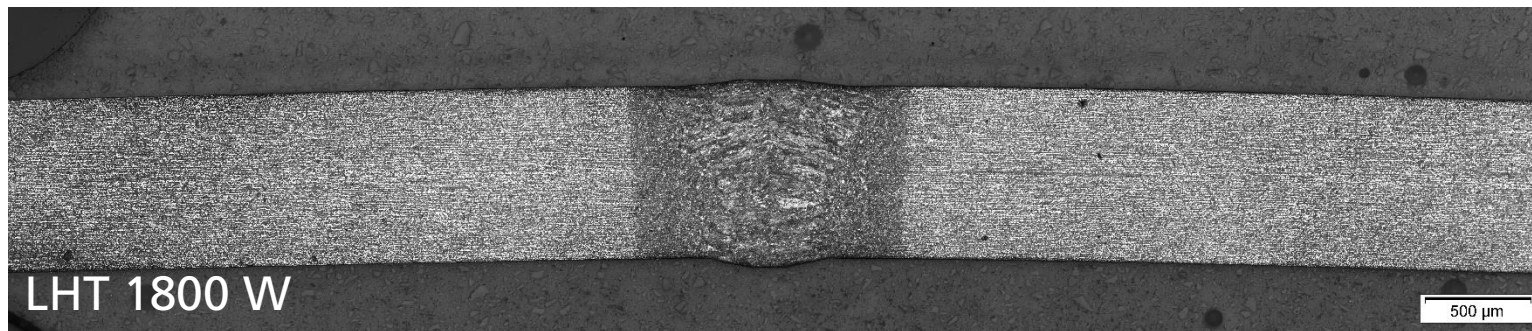


Simultane  
Bearbeitung

#2

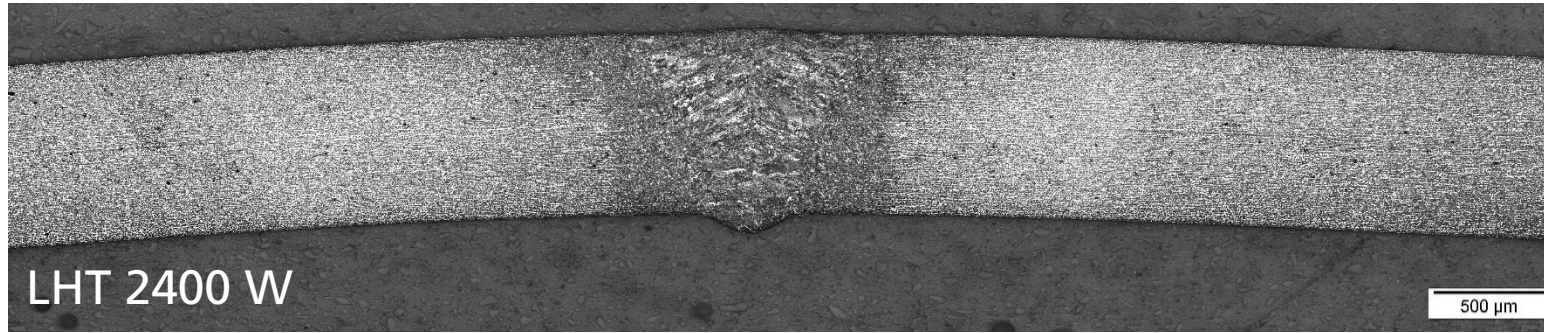
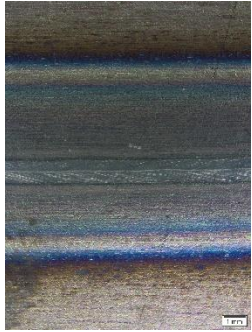


#3



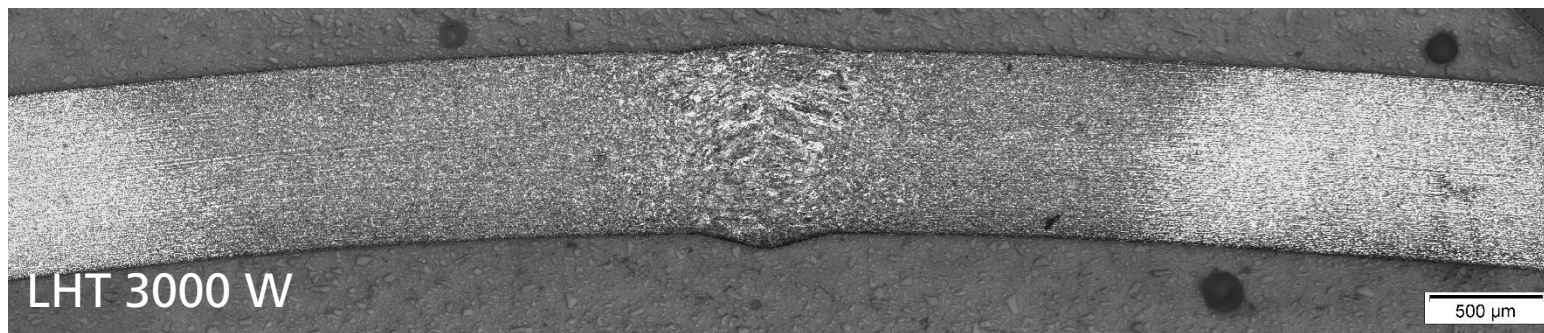
# Wärmebehandlung 30 mm nachlaufend, Starttemperatur ca. 800°C

#4

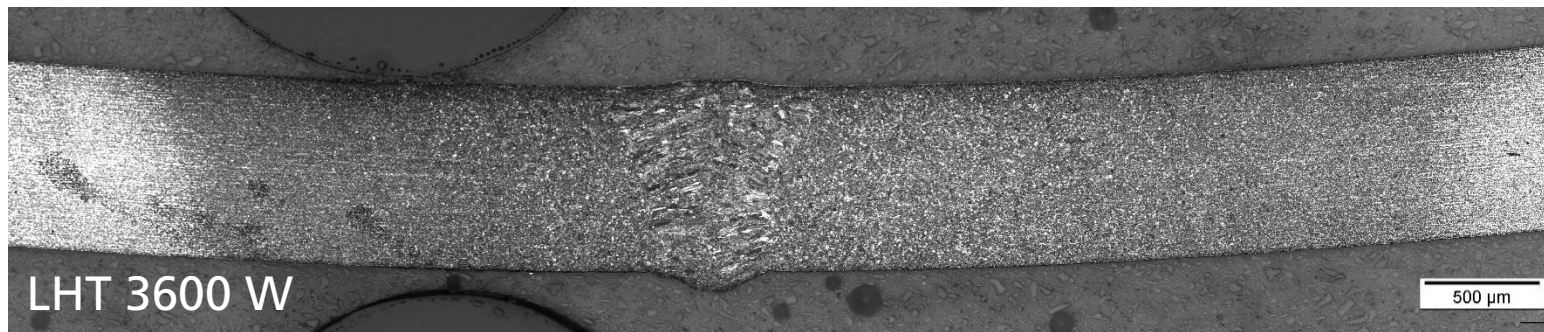


Simultane  
Bearbeitung

#5

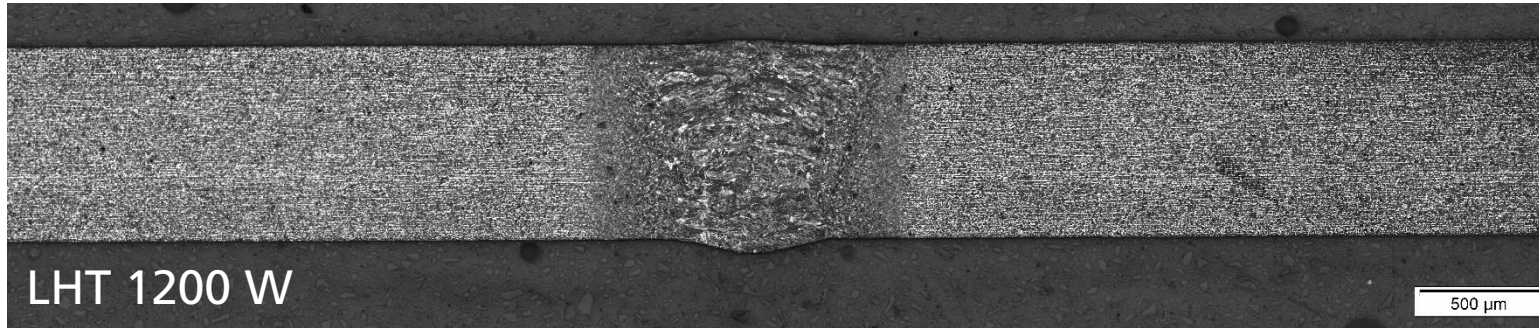


#6

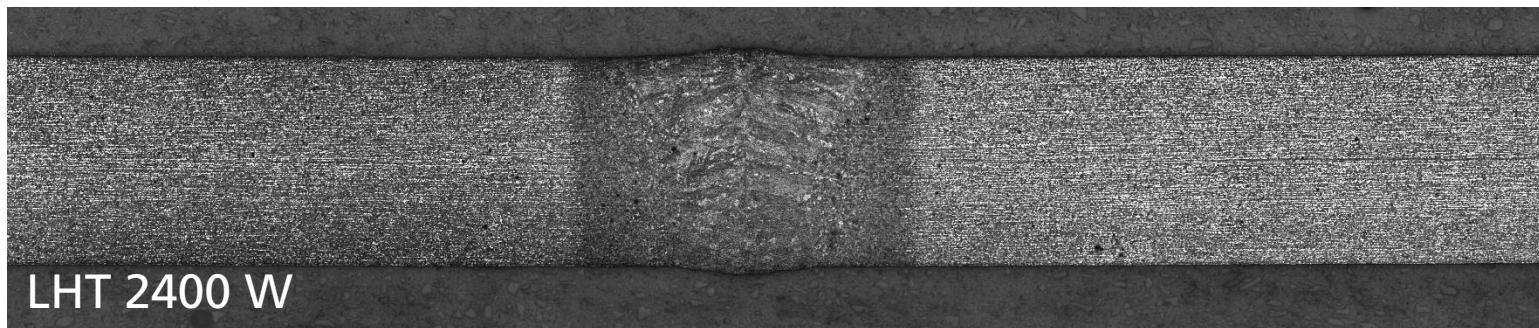


# LHT der kalten Schweißnaht, Starttemperatur 20°C

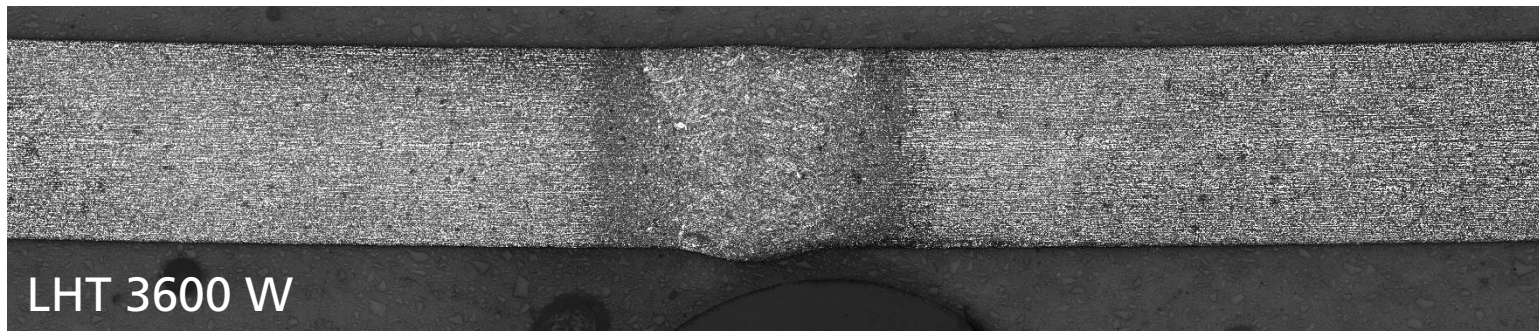
#8



#9



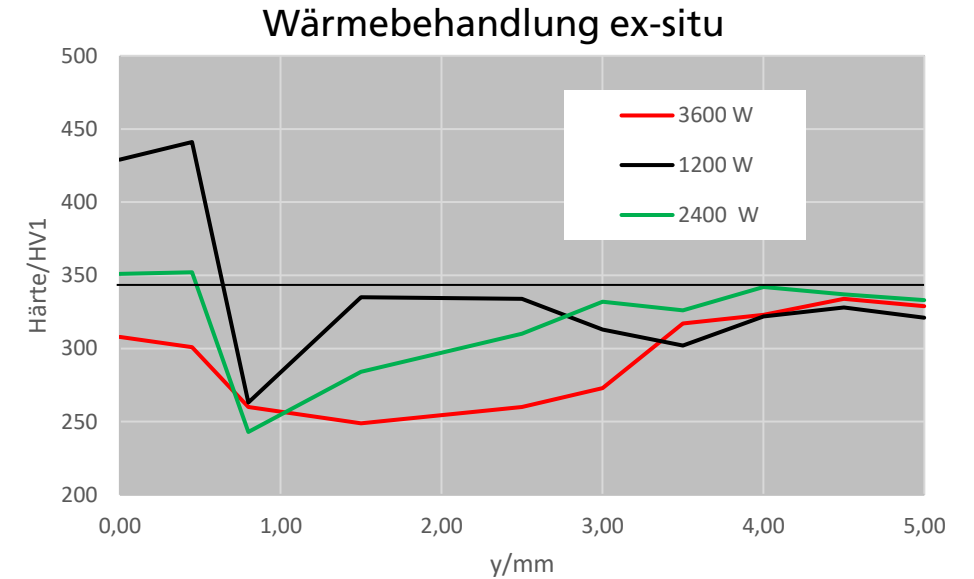
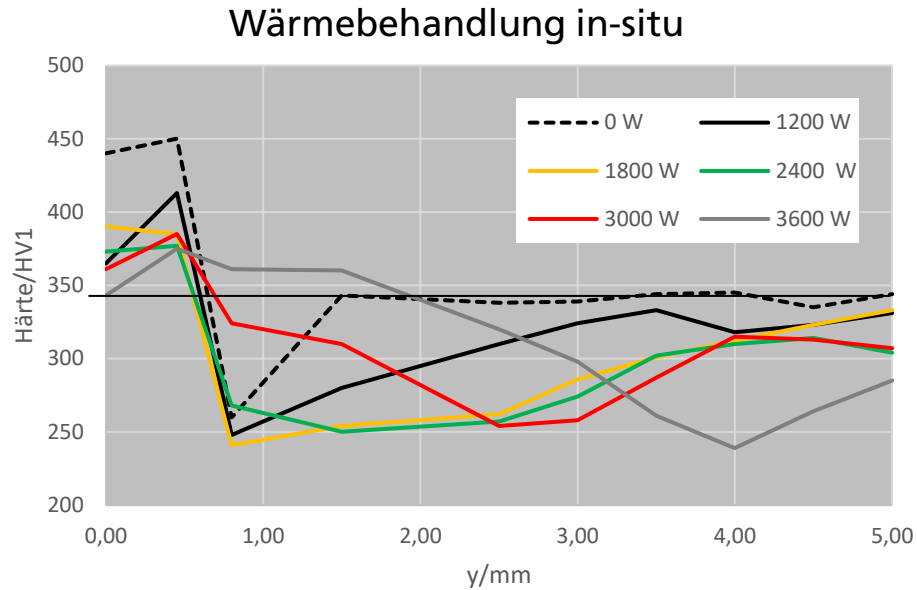
#7



Sequentielle  
Bearbeitung

# Ergebnisse der Kleinlast-Härtemessung

Verfahren: Vickers  
 Prüflast 9,81 N (HV1)  
 Werkstoff: 1.0944  
 Dicke:  $d = 0,9 \text{ mm}$   
 Abstand:  $a = 30 \text{ mm}$

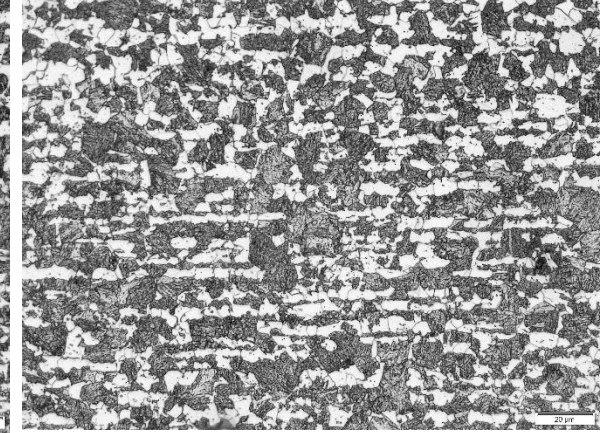


Schweiße: Verringerung der Härte um 50 - 80 HV1  
 Schmelzlinie: Verringerung der Härte um 40 – 70 HV1 bis 2400 W  
 Wiederanstieg ab 3000 W  
 Anlasszone: keine Änderung der Härte bis 2400 W, Steigerung ab 3000 W, Verlagerung bei steigender WBH-Leistung

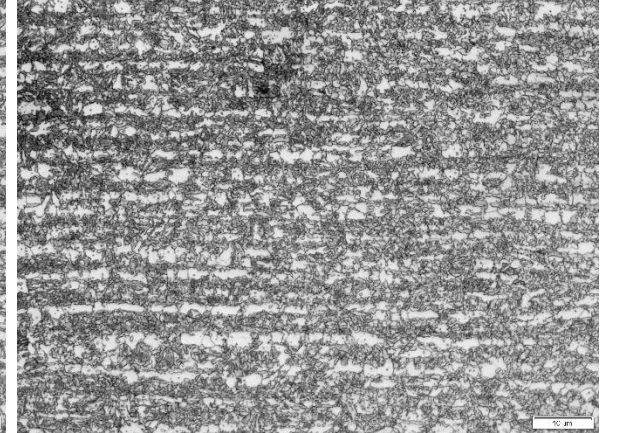
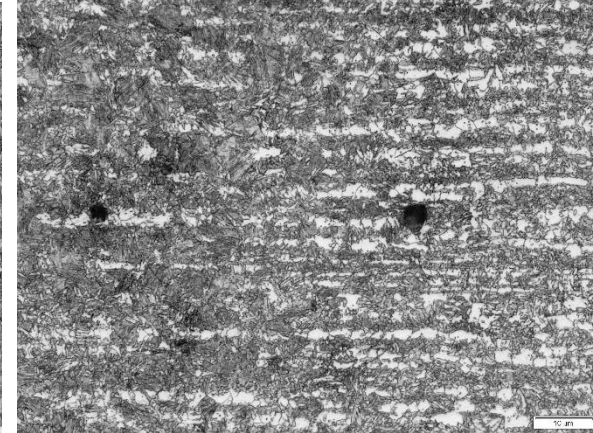
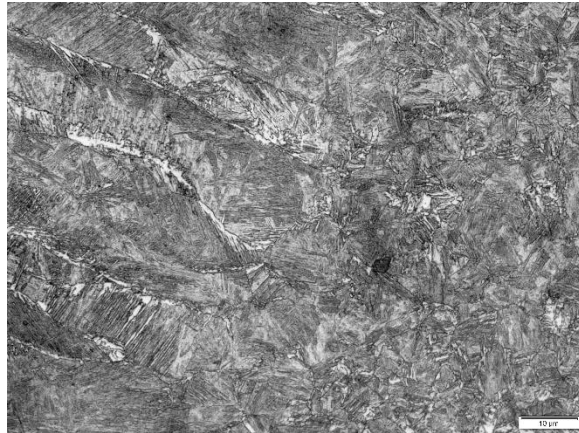
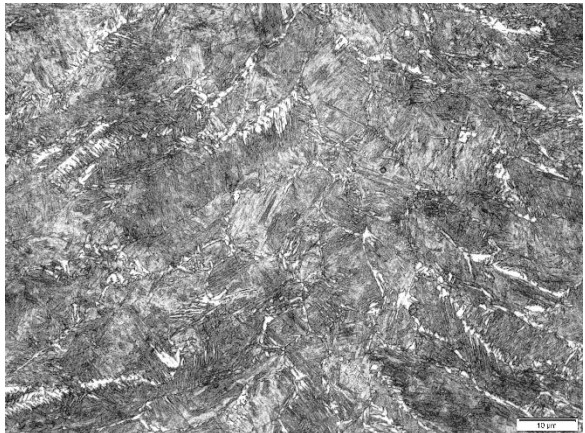
Verringerung der Härte um 80 – 110 HV1  
 Verringerung der Härte um 90 – 140 HV1  
 kein Effekt bis 2400 W, Steigerung ab 2400 W, Verlagerung bei 3600 W kleiner als bei in-situ

# Gefügebildungen

#3



#4



Schweißnahtmitte

Schmelzlinie

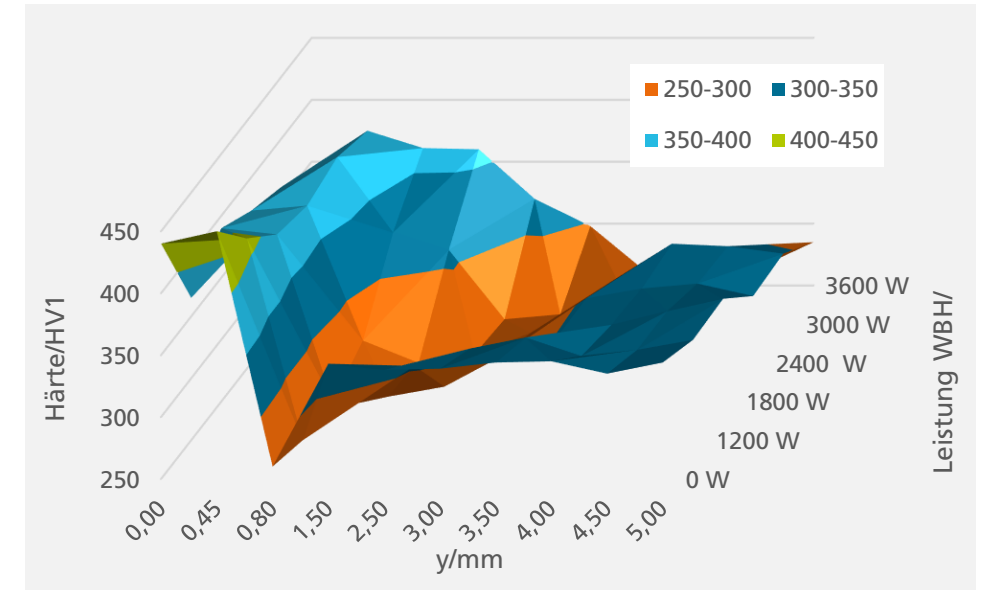
Anlasszone

Rückhärtezone



# Zusammenfassung Vorversuch 1

- Blechdicke 0,9 mm
  - Der Effekt der Schweißwärme ist deutlich erkennbar
  - LHT der kalten Naht benötigt bei den eingestellten Parametern ca. 1,2 kW, um die gleiche Breite der wärmebehandelten Zone zu erzeugen
  - Erkennbare Veränderungen im GW ab LHT-Leistung von 2400 W
  - Zonierung der Schweiß-WEZ ab 3000 W LHT-Leistung nicht mehr erkennbar



# Parameter Vorversuch 2

Strahlquellen:

- LBW: Trudisk 12002
- LHT: LDF 12000-100

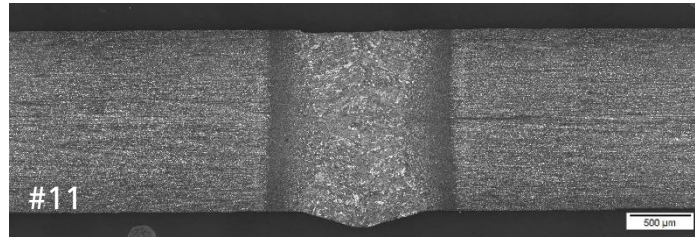
Parameter:

- $v_s = 4 \text{ m/min}$ ,  $\Delta z = 2 \text{ mm}$ , Schutzgas Ar 4.6, 15 l/min,  $d_f = 506 \text{ }\mu\text{m}$
- $A_f \approx 30 \times 7,5 \text{ mm}^2$ , Abstand Strahlachsen 45 mm
- Blech Kaltband  $d = 1,5 \text{ mm}$ , verzinkt, entschichtet

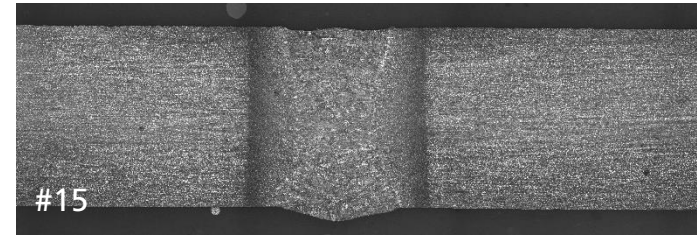
#	Mat.	d/mm	$P_L(\text{LBW})/\text{W}$	$P_L(\text{LHT})/\text{kW}$	simultan	a/mm	
10	1.0944	1,5	2400	0	1	33	Wurzel zu dünn
11	1.0944	1,5	2530	0	1	33	Wurzel sauber
12	1.0944	1,5	2530	1360	1	33	
13	1.0944	1,5	2530	1860	1	33	
14	1.0944	1,5	2530	2620	1	33	
15	1.0944	1,5	2530	3125	1	33	
16	1.0944	1,5	2530	3780	1	33	
17	1.0944	1,5	2530	4425	1	33	
18	1.0944	1,5	2530	5050	1	33	
19	1.0944	1,5	2530	2510	1	33	Verzinktes Blech
20	1.0944	1,5	2530	3780	1	33	Verzinktes Blech
21	1.0944	1,5	2530	5045	1	33	Verzinktes Blech

# Makroschliffe #11 - 18

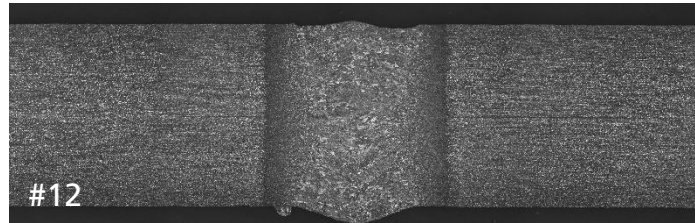
o. LHT



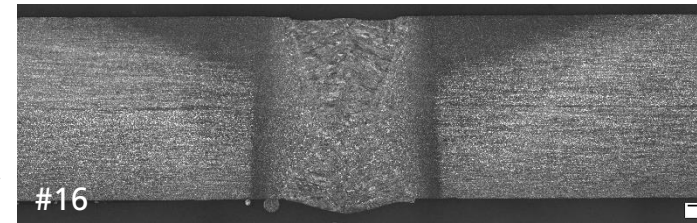
LHT 3125 W



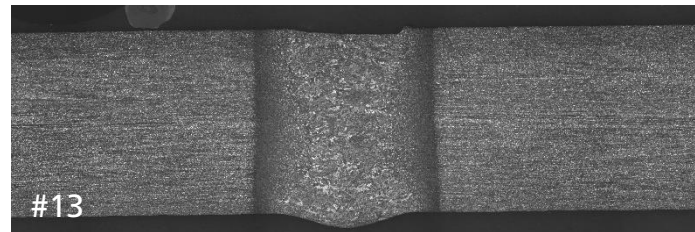
LHT 1360 W



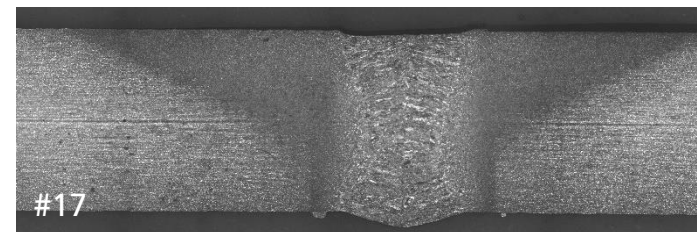
LHT 3780 W



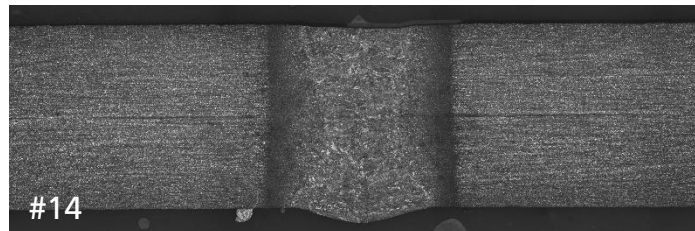
LHT 1860 W



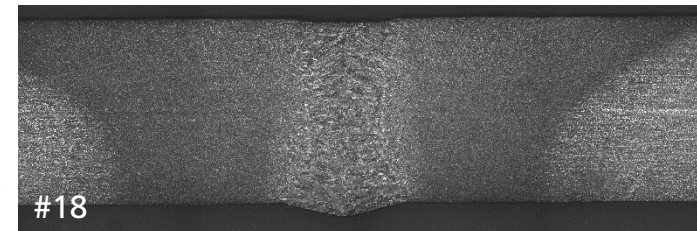
LHT 4425 W



LHT 2560 W



LHT 5050 W



# Vergleichende Härtemessungen

Verfahren: Vickers

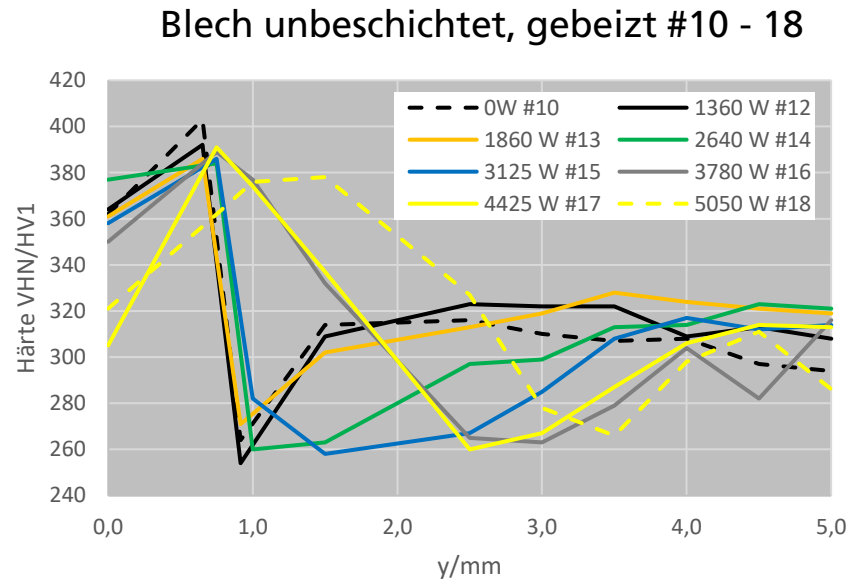
Prüflast 9,81 N (HV1)

Werkstoff: 1.0944

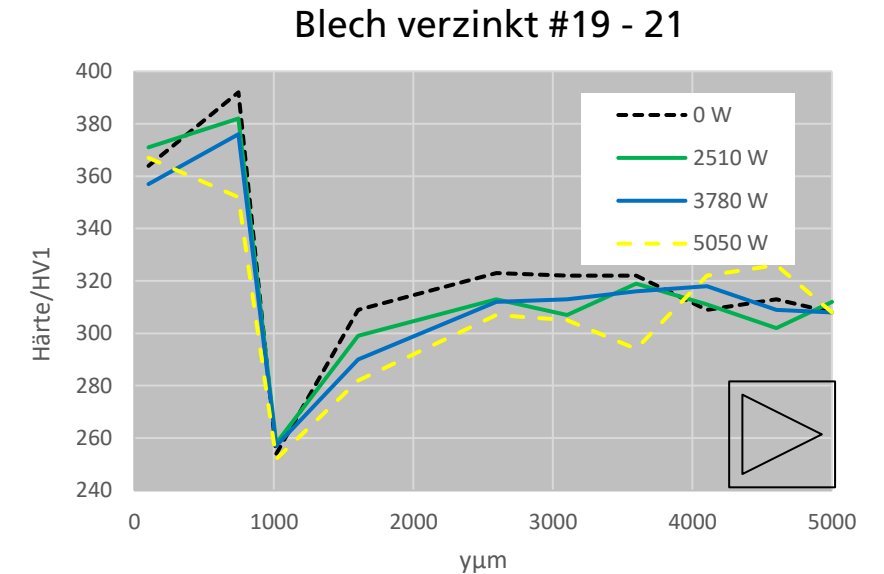
Dicke:  $d = 1,5 \text{ mm}$

Abstand:  $a = 30 \text{ mm}$

$$X_{HV1} \approx X_{HV0,1} - 50(\pm 12)$$



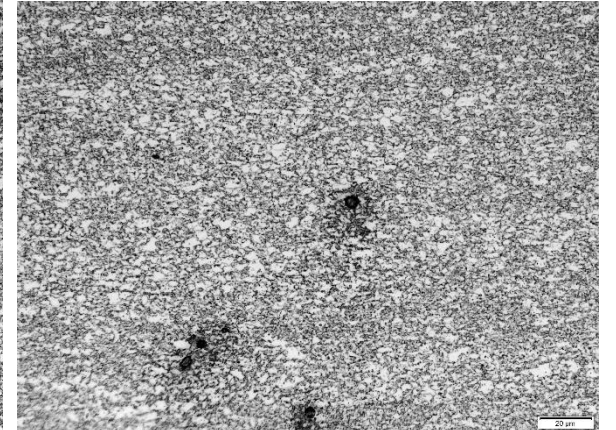
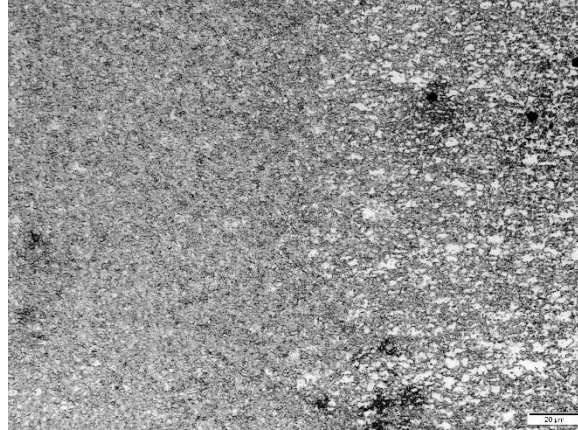
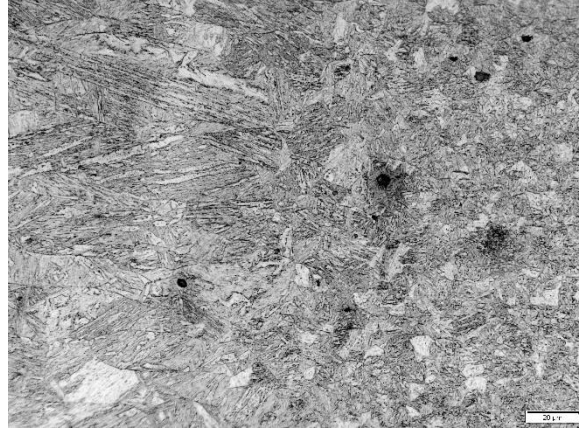
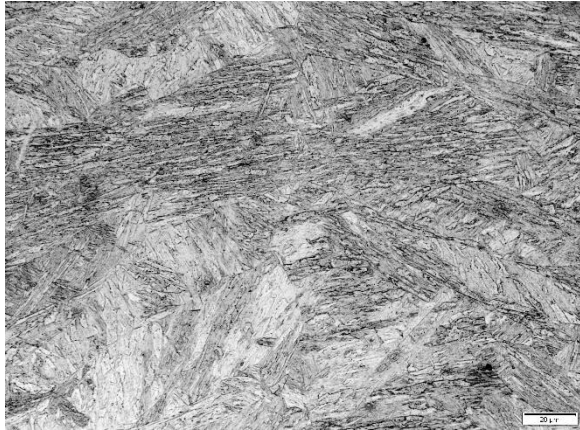
- Schweiße: keine Änderung bis 3800 W
- Schmelzlinie: Änderung im Streubereich; Rückhärtung in der Anlasszone bei 5050 W
- Anlasszone: Verminderung der Härte im Streubereich und Verlagerung nach außen mit steigender WBH-Leistung ab 2500 W



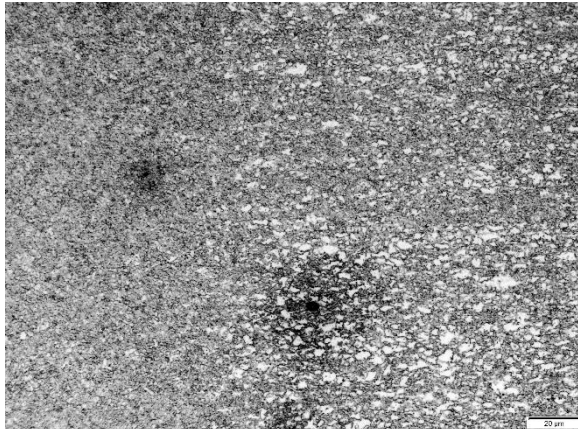
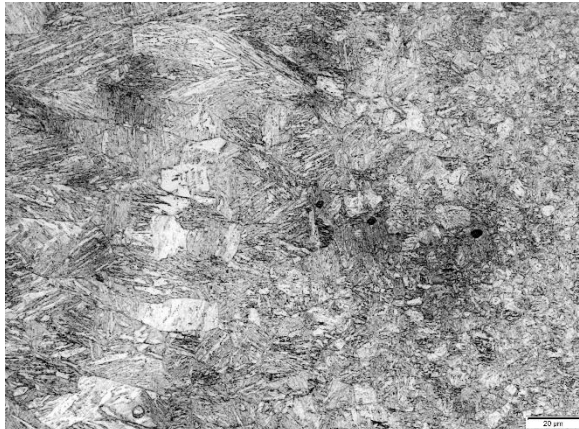
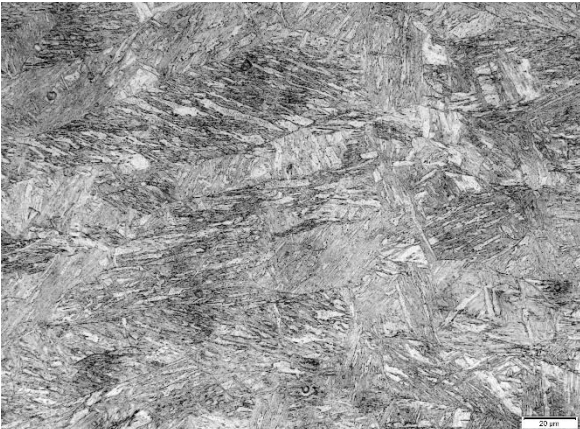
- Keine Änderung
- Verringerung der Härte 130 HV1 bei 5000 W
- Keine Veränderung der Minimalhärte, flacherer Anstieg auf das Grundwerkstoffniveau

# Gefügebildungen

#14



#15



Schweißnahtmitte

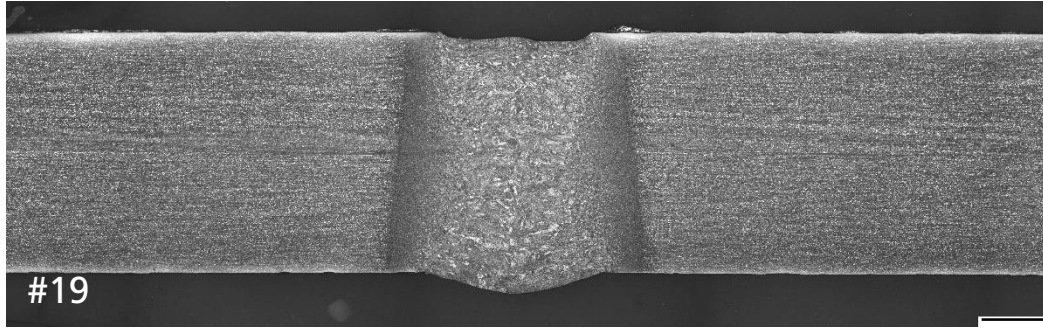
Schmelzlinie

Anlasszone

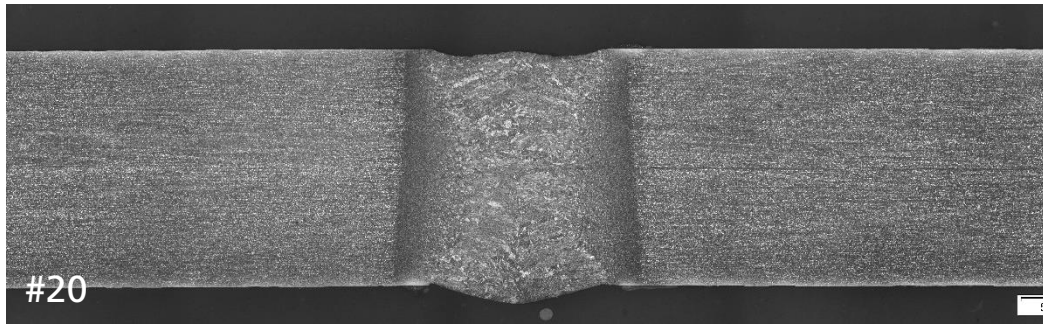
Rückhärtezone

# Makroschliffe #19 - 21

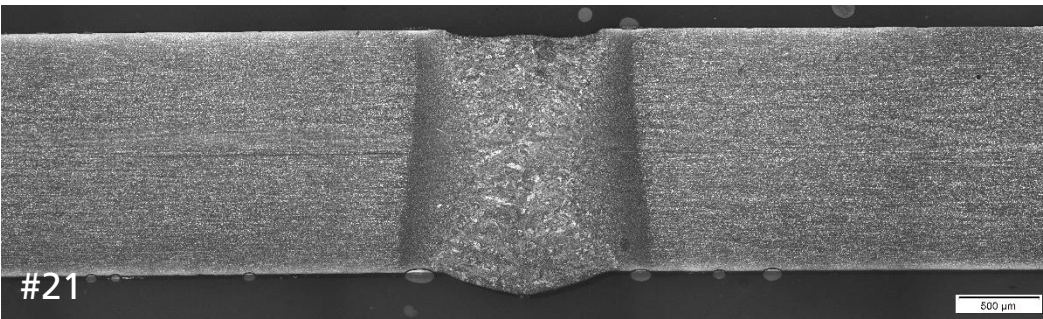
LHT 2560 W #19



LHT 3780 W #20



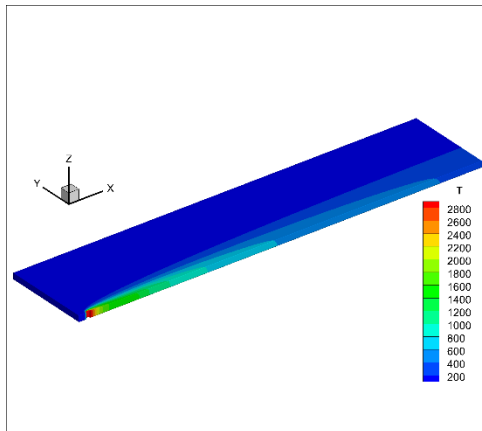
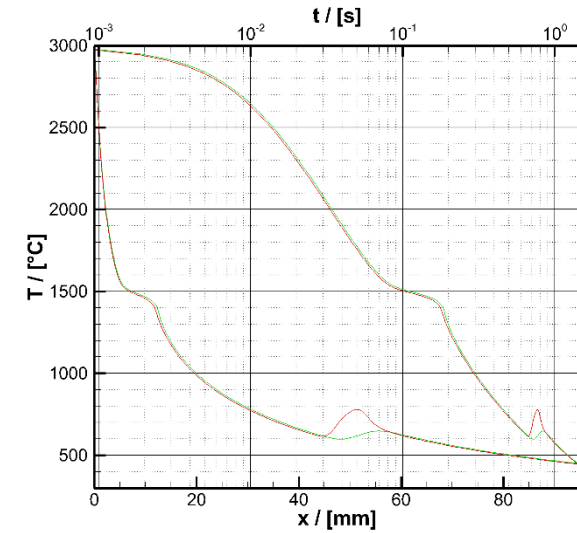
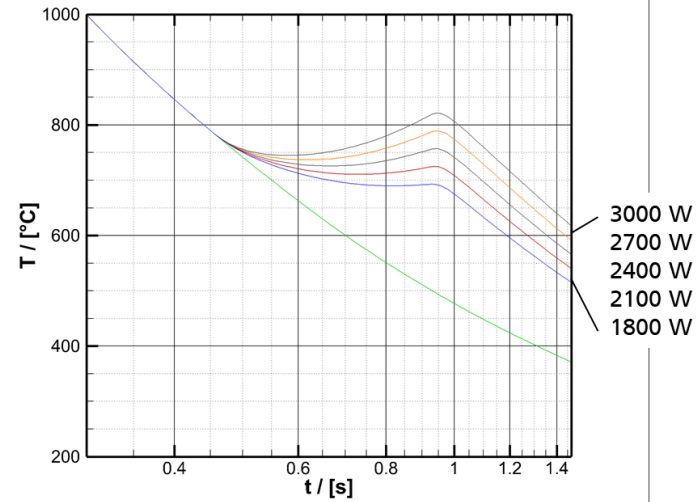
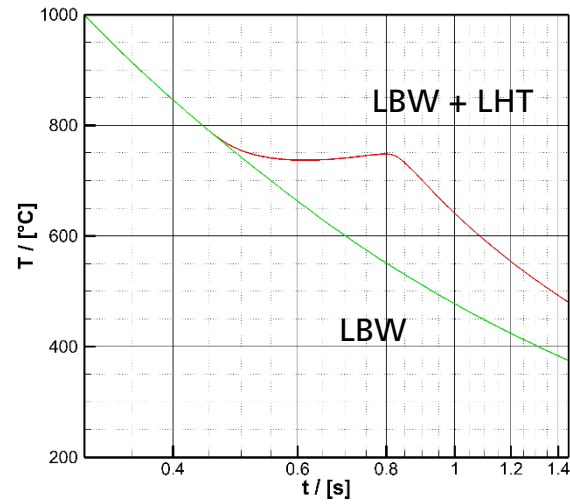
LHT 5050 W #21



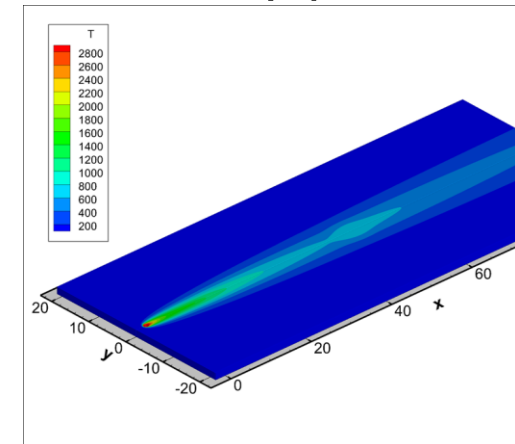
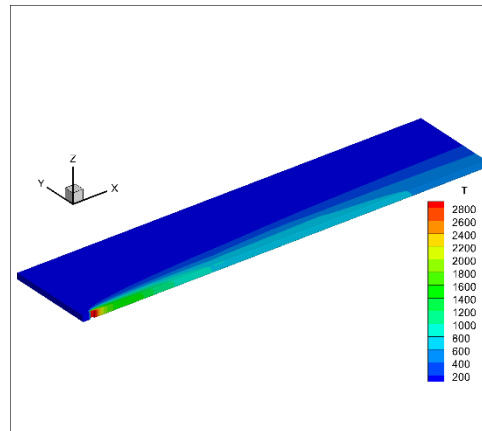
## Verzinktes Blech

- Zinkschicht wird bei hohen LHT-Leistungen partiell angeschmolzen
- Keine Verdampfung der Schicht: Oberflächentemperatur unter 900°C

# Temperaturfeldsimulation



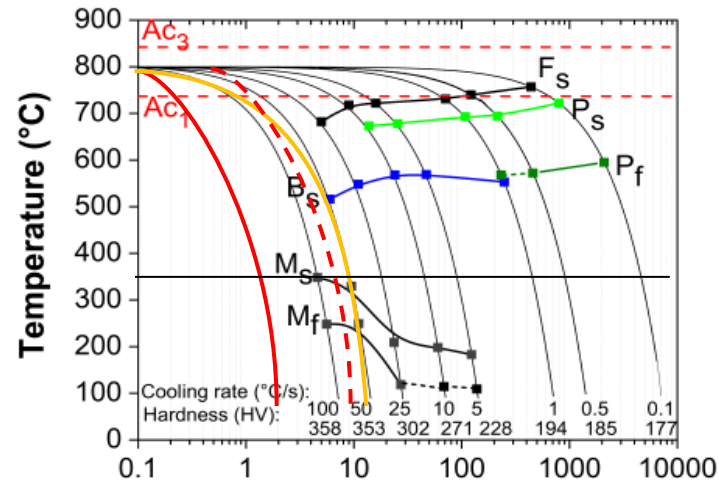
$a = 30$  mm



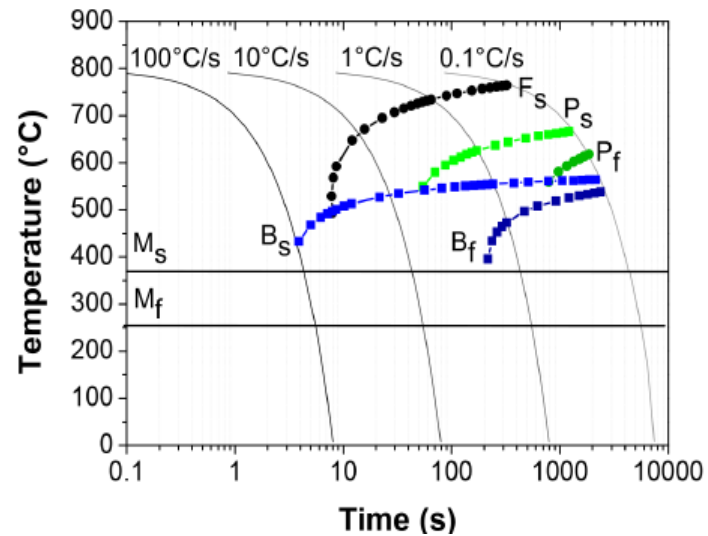
$a = 50$  mm

# ZTU-Diagramm (DP980), Temperaturfeld-Simulation

Experimentell

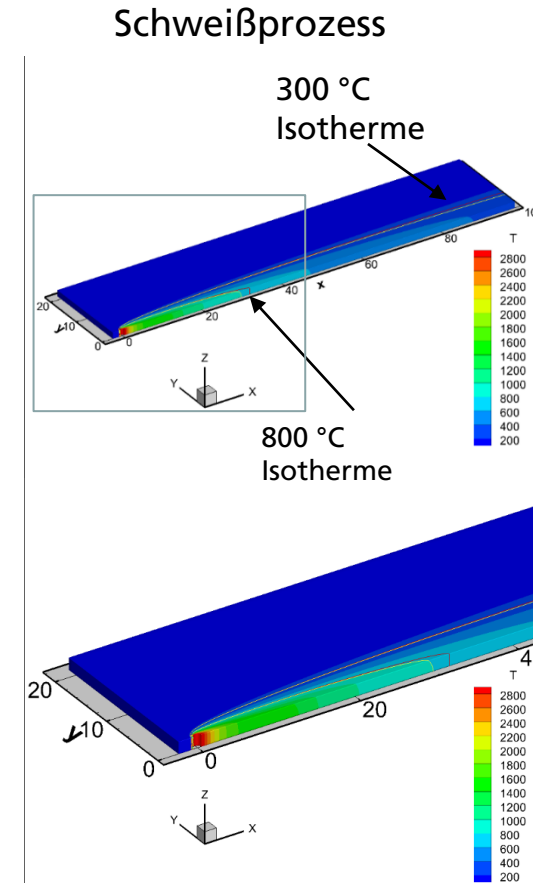


Simulation (JMatPro)

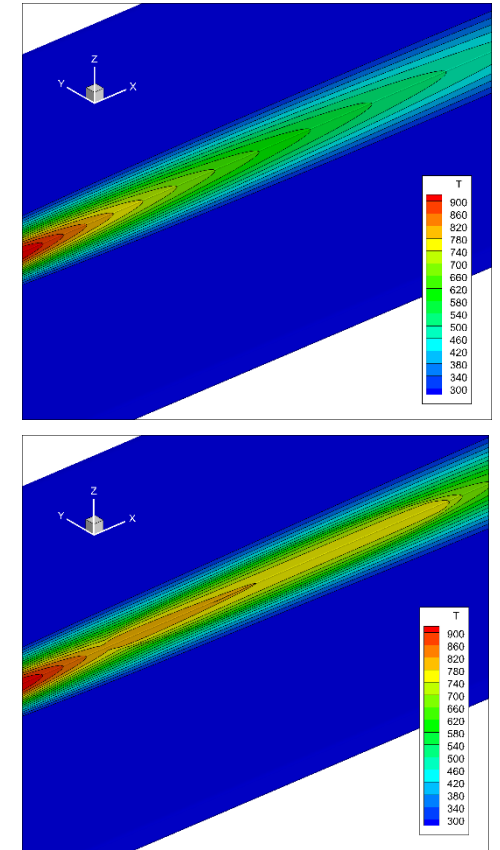


Quelle: Bräutigam-Matus K. et al.,  
Metals 8, 674 (2018), doi:10.3390/met80

Temperaturfeld



Inline-WBH





# Zusammenfassung Vorversuch 2

- Blechdicke 1,5 mm zeigt weniger Reaktion als Material mit 0,9 mm Stärke
- Unterschiede in der Härte an der Schmelzlinie sind marginal (bis 3 kW WBH wirkungslos)
- Minimalhärte in der Anlasszone nicht beeinflusst
- Verbreiterung der Anlasszone bei WBH-Leistung 3 bis 4 kW
- Bei  $P_{WBH} = 5000 \text{ W}$  wird der interkritische Bereich bei 1 bis 1,5 mm erreicht, Anlasszone wird nach außen verlagert
- Signifikante Verlagerung der Anlasszone bei WBH-Leistungen über 4 kW
- Bei verzinkten Blechen wird die Verdampfungstemperatur von Zn ( $907^\circ\text{C}$ ) nicht erreicht
- Hohe Härte zeigt an, dass bei WBH der interkritische Temperaturbereich erreicht wird

## Weitere Arbeiten

- Weitere Untersuchungen erforderlich:
  - höhere LDV
  - veränderter Abstand (mit ZTU-Schaubild abgleichen) = kleinere Einstiegstemperatur

# Parameter Vorversuch 3 (23-24/11/22)

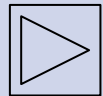
Strahlquellen:

- LBW: Trudisk 12002
- LHT: LDF 12000-100

Parameter:

- $v_s = 4 \text{ m/min}$ ,  $\Delta z = 2 \text{ mm}$ , Schutzgas Ar 4.6, 15 l/min,  $d_f = 506 \text{ }\mu\text{m}$
- $\alpha_{\text{LHT}} = -15^\circ$ ,  $A_f \approx 30 \times 7,5 \text{ mm}^2$ ,  $a = 50/70 \text{ mm}$

#	Mat.	d/mm	$P_L(\text{LBW})/\text{W}$	$P_L(\text{LHT})/\text{kW}$	simultan	a/mm	
22	1.0944	1,5	2400	1,87	1	50	Starttemperatur WBH 600°C
23	1.0944	1,5	2530	2,51	1	50	
24	1.0944	1,5	2530	3,15	1	50	
25	1.0944	1,5	2530	1,22	1	50	
26	1.0944	0,9	1200	1,22	1	50	
27	1.0944	0,9	1200	1,87	1	50	
28	1.0944	0,9	1200	2,51	1	50	
29	1.0944	0,9	1200	1,22	1	70	Starttemperatur WBH 430°C
30	1.0944	0,9	1200	1,8	1	70	
31	1.0944	0,9	1200	2,5	1	70	





# Parameter Vorversuch 3 (23-24/11/22)

Strahlquellen:

- LBW: Trudisk 12002
- LHT: LDF 12000-100

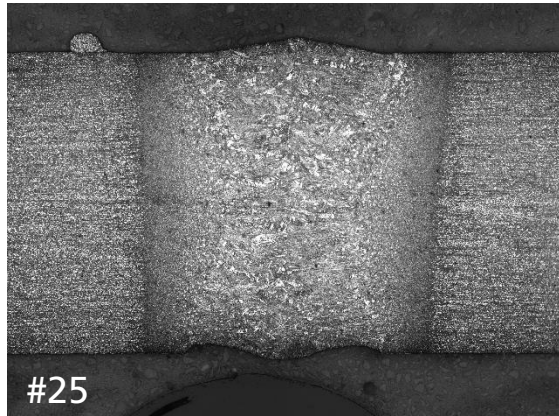
Parameter:

- $v_s = 4 \text{ m/min}$ ,  $\Delta z = 2 \text{ mm}$ , Schutzgas Ar 4.6, 15 l/min,  $d_f = 506 \text{ }\mu\text{m}$
- $\alpha_{\text{LHT}} = -15^\circ$ ,  $A_f \approx 30 \times 7,5 \text{ mm}^2$

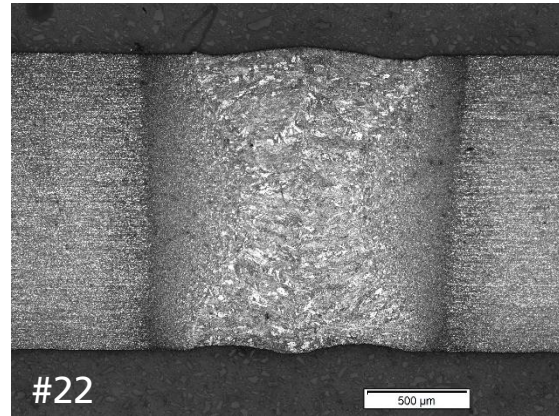
#	Mat.	d/mm	$P_L(\text{LBW})/\text{W}$	$P_L(\text{LHT})/\text{kW}$	simultan	a/mm	
32	1.0944	1,5	2530	2,5	1	70	Bis hier.: 1,5 mm mit HCl entzinkt
33	1.0944	1.5	2530	3,1	1	70	Ab hier: 1,5 sandgestrahlt
34	1.0944	1,5	2530	3,18	1	70	
35	1.0944	1,5	2530	1,87	1	70	 Vorwärmen mit Laserstrahlung 
36	1.0944	1,5	2530	1,2	1	70	
37	1.0944	1,5	2530	2,5	1	-15	
38	1.0944	1,5	2530	3,13	1	-15	
39	1.0944	1,5	2530	3,87	1	-15	
40	1.0944	1,5	2530	4,4	1	-15	

# Wärmebehandlung 50 mm nachlaufend, Starttemperatur ca. 600°C

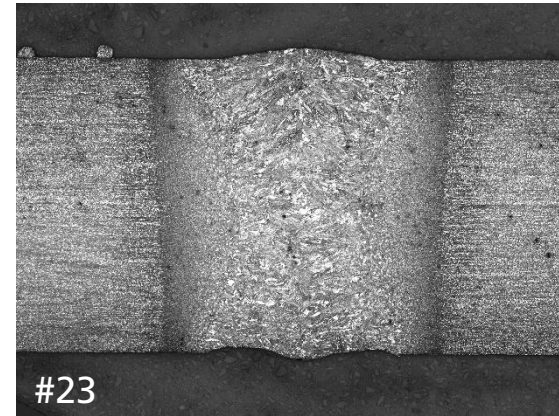
LHT 1200 W



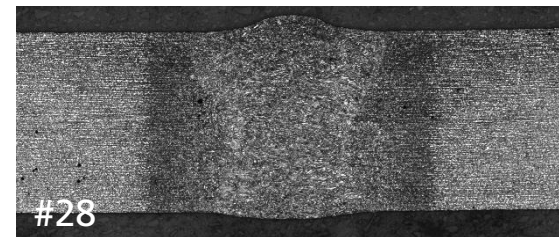
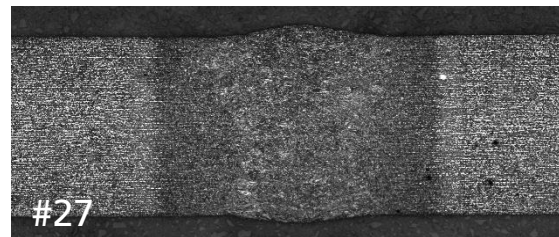
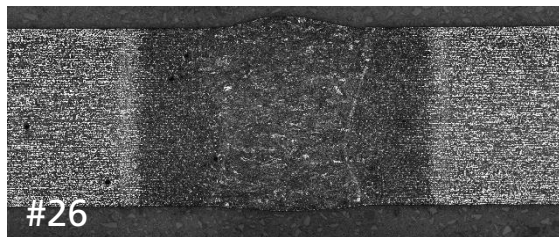
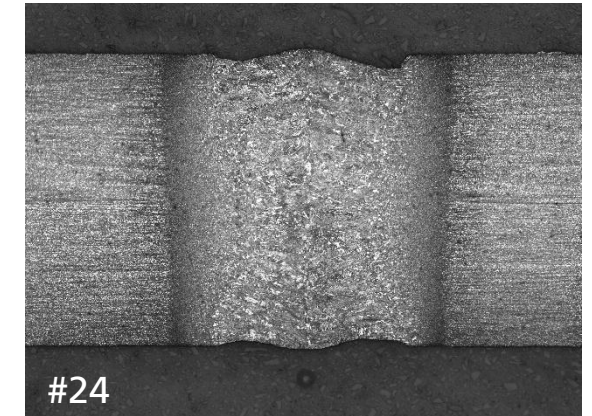
LHT 1800 W



LHT 2500 W



LHT 3150 W



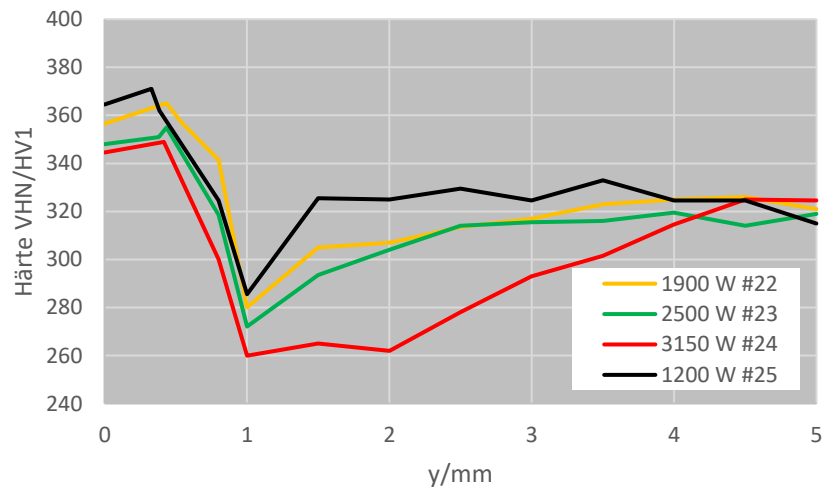
# Härteprüfung #22-25, #32-36

Nachlaufende Wärmebehandlung

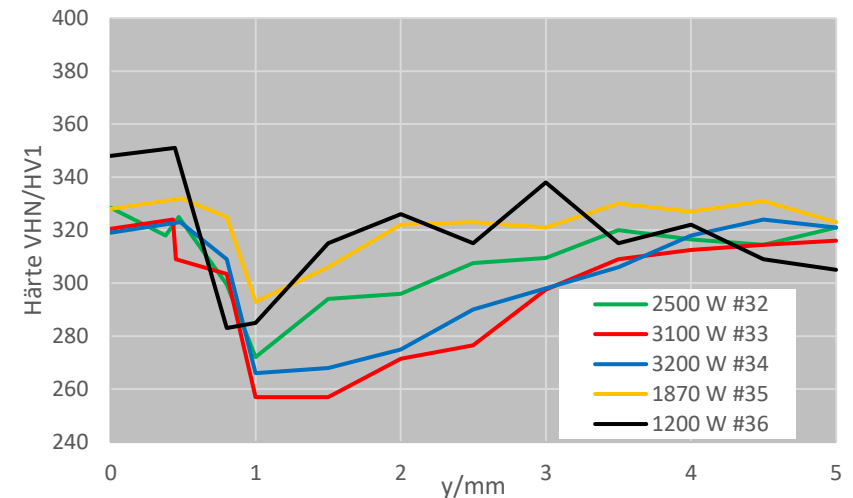
1.0944 (DP 980), d = 1,5 mm

#22 – 25, #32 - 36

a = 50 mm, Starttemperatur 600°C, #22-25



a = 70 mm, Starttemperatur 430°C, #32-36

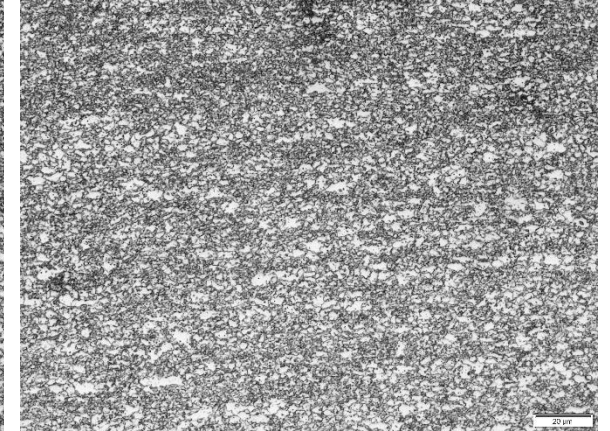
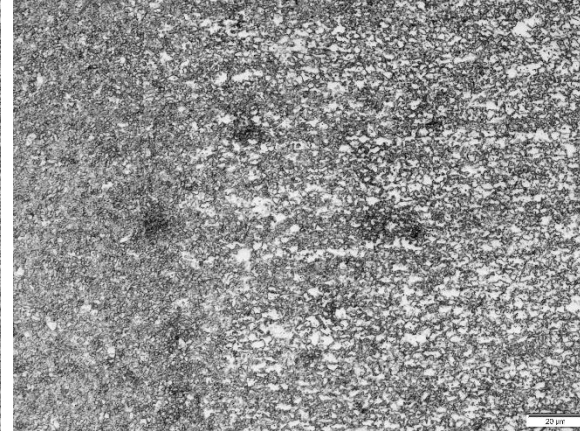
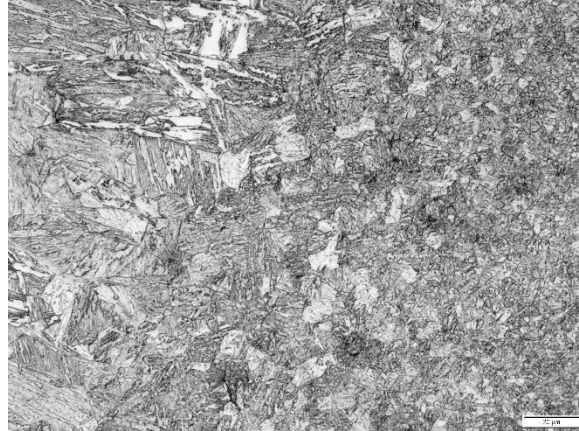


Schweiße: keine Änderung  
 Schmelzlinie: Änderung im Streubereich  
 Anlasszone: Verminderung der Härte im Streubereich und Verlagerung nach außen mit steigender WBH-Leistung

Verringerung der Härte um 45 HV1  
 Verringerung der Härte um 90 – 140 HV1  
 Signifikante Verringerung der Härte ab 1870 W, Verbreiterung der Anlasszone schwächer ausgeprägt

# Gefügebildungen a = 50 mm

#23



Schweißnahtmitte

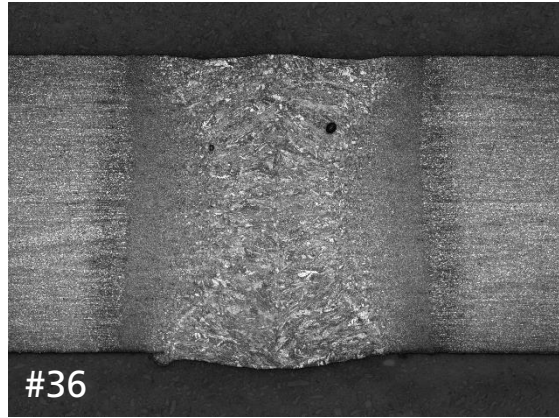
Schmelzlinie

Anlasszone

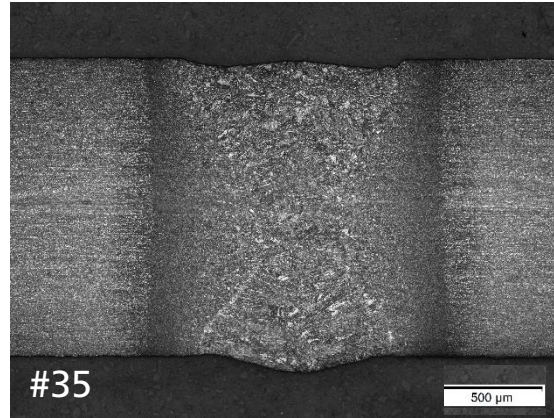
Rückhärtezone

# Wärmebehandlung 70 mm nachlaufend, Starttemperatur ca. 430°C

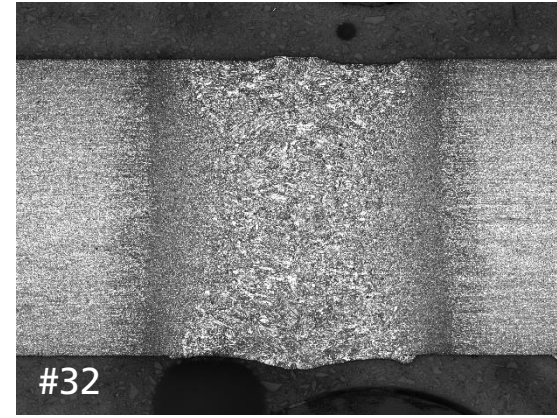
LHT 1200 W



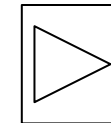
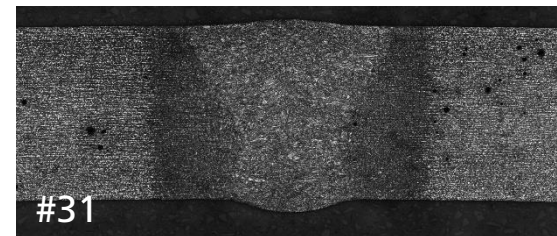
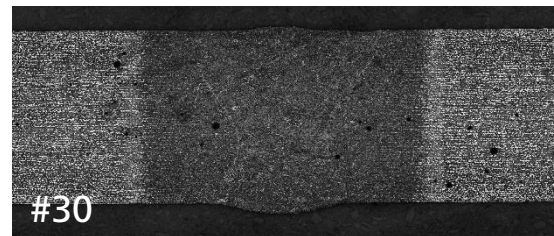
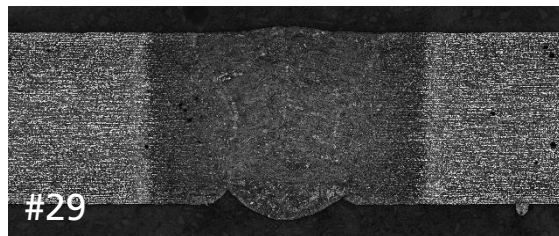
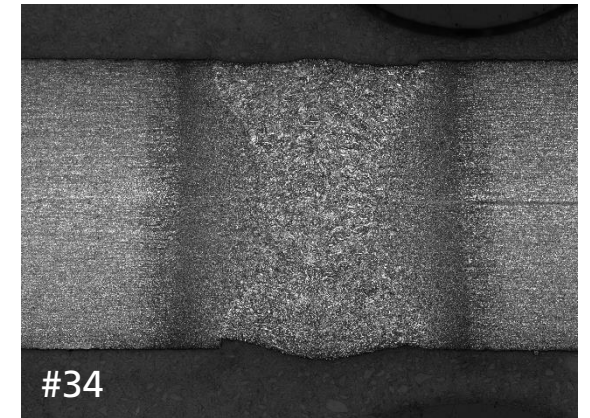
LHT 1870 W



LHT 2500 W

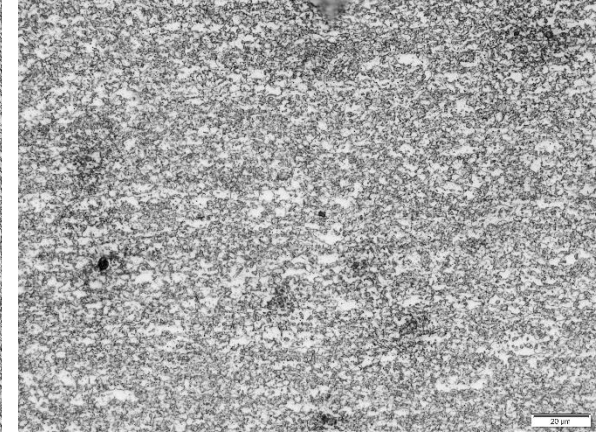
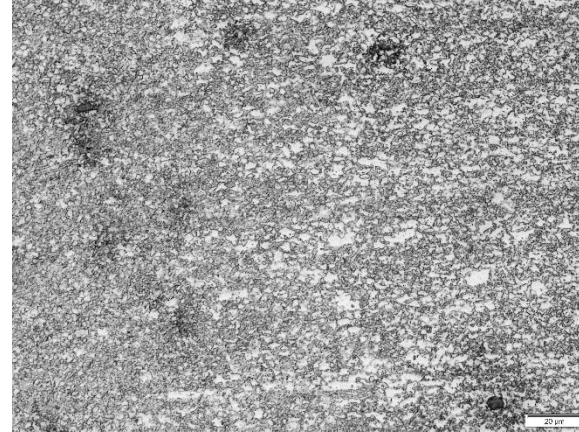
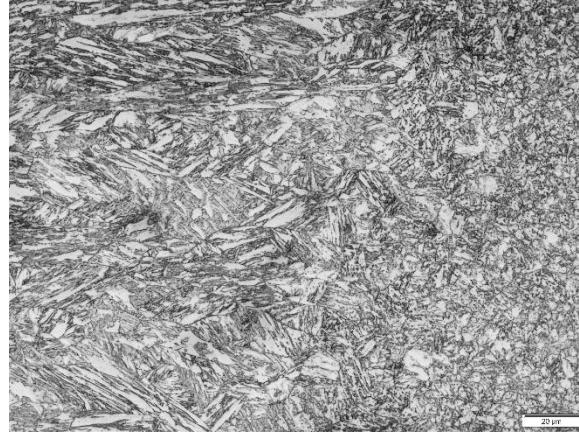
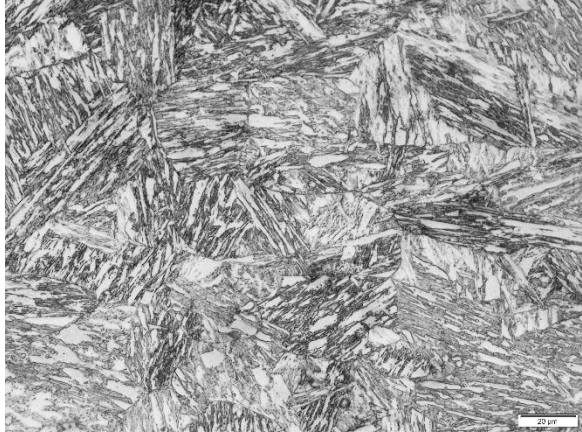


LHT 3180 W

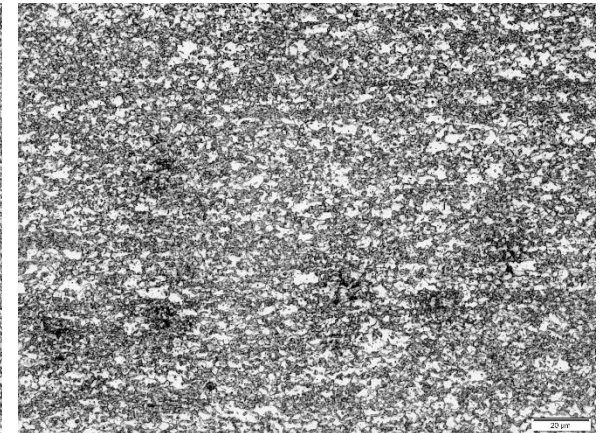
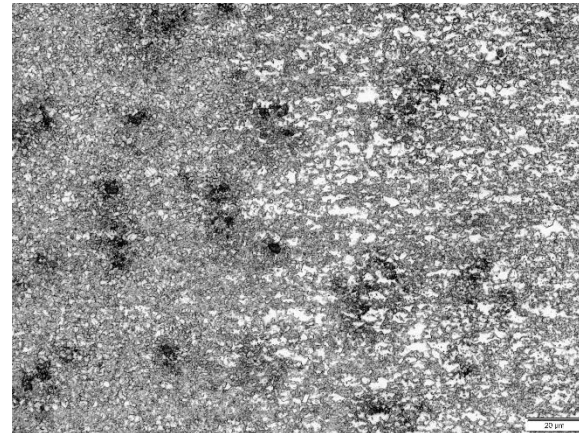
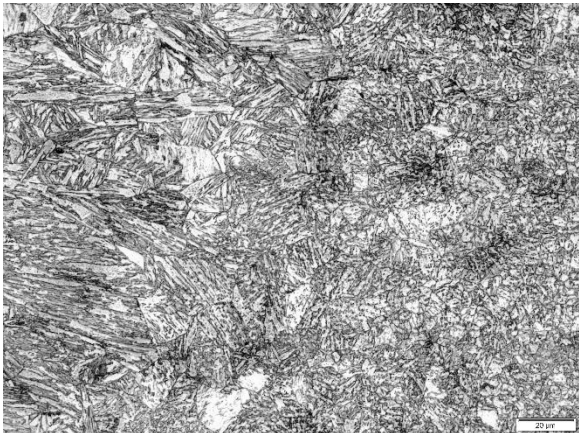
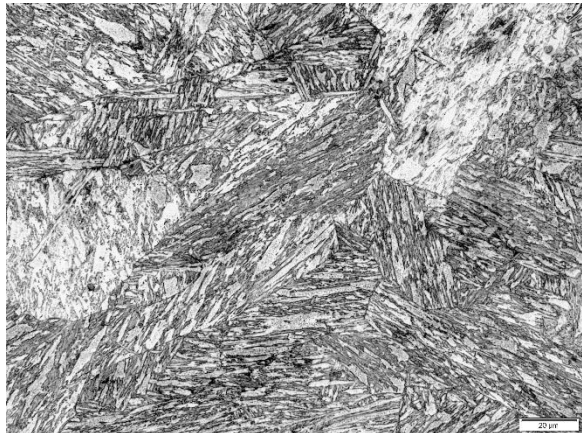


# Gefügebildungen im Detail a = 70 mm

#32



#35



Schweißnahtmitte

Schmelzlinie

Anlasszone

Rückhärtezone



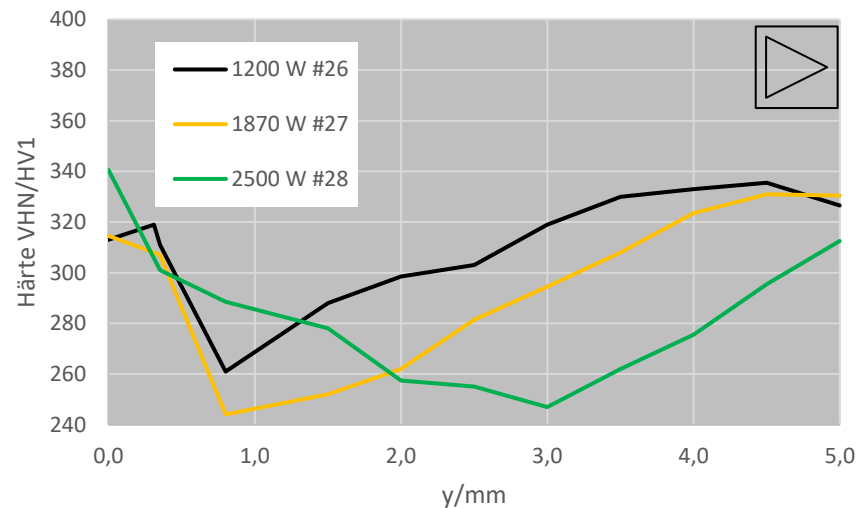
# Härteprüfung #26-28, #29-31

Nachlaufende Wärmebehandlung

1.0944 (DP 980), d = 0,9 mm

#26 - 28, #29 - 31

a = 50 mm, Starttemperatur 600°C

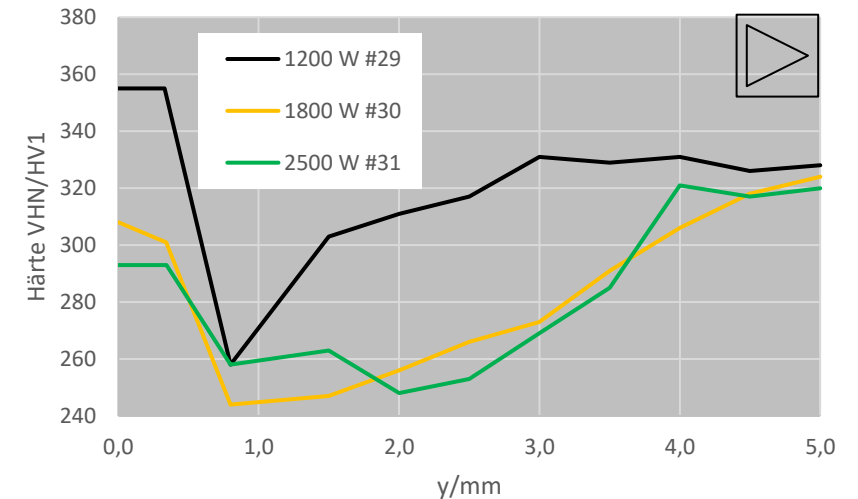


Schweißlinie: Verringerung der Härte auf 320 – 340 HV<sub>0,1</sub>

Schmelzlinie: Verringerung der Härte auf 310 – 320 HV<sub>0,1</sub>

Anlasszone: Verminderung der Härte auf max. 260 HV<sub>0,1</sub>,  
Verlagerung nach außen mit steigender WBH-Leistung

a = 70 mm, Starttemperatur 430°C



Keine Veränderung bei 1200 W, bei höheren Leistungen auf 295 – 310 HV<sub>0,1</sub>

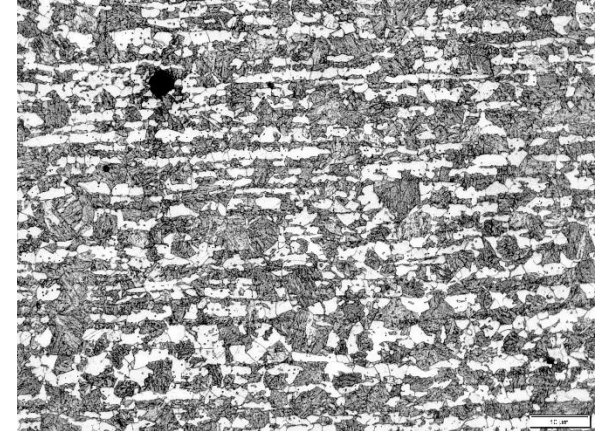
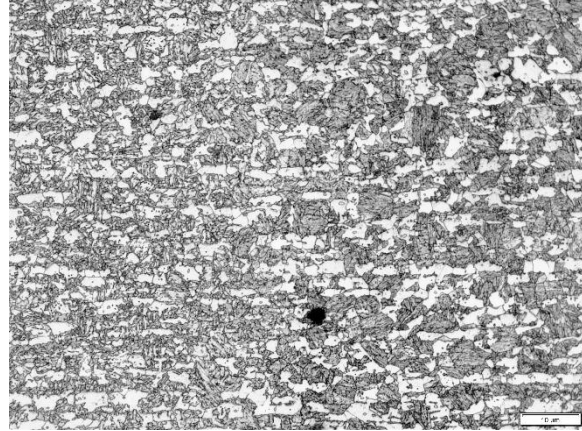
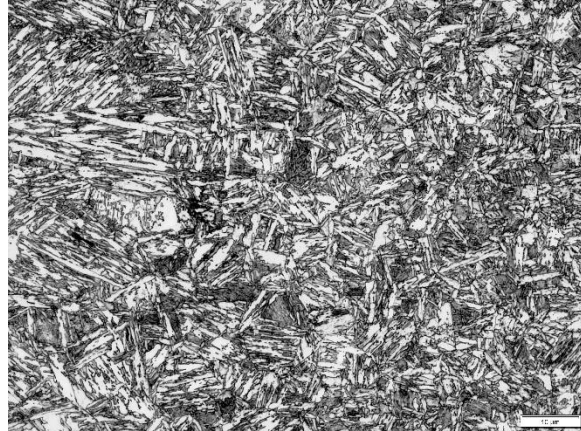
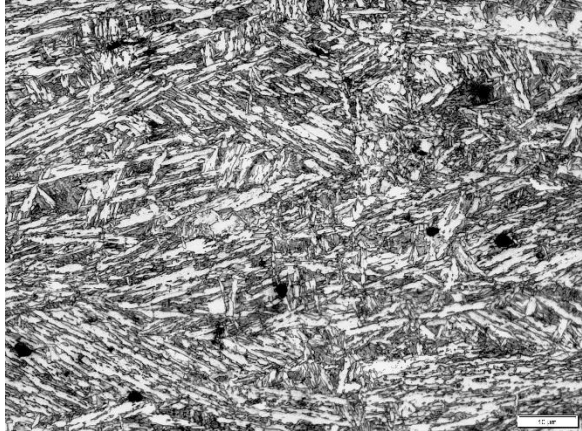
Verringerung der Härte auf 295 – 300 HV<sub>1</sub>

Verringerung der Härte ab 1870 W auf max 260 HV<sub>0,1</sub>; geringere Verbreiterung der Anlasszone

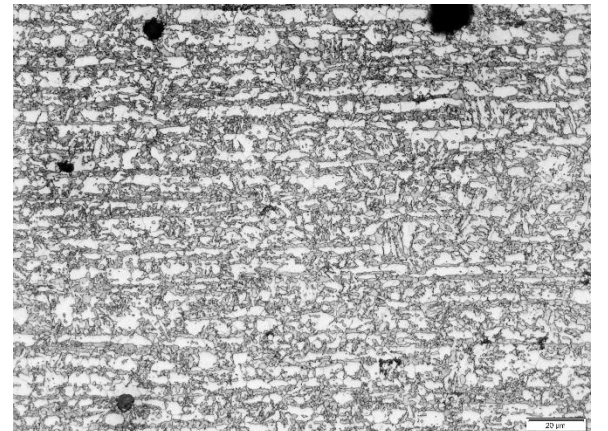
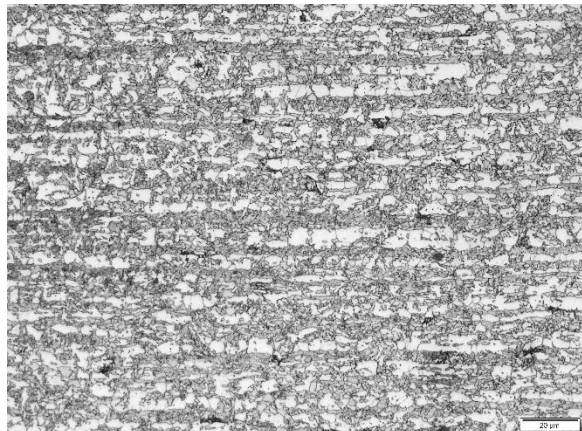
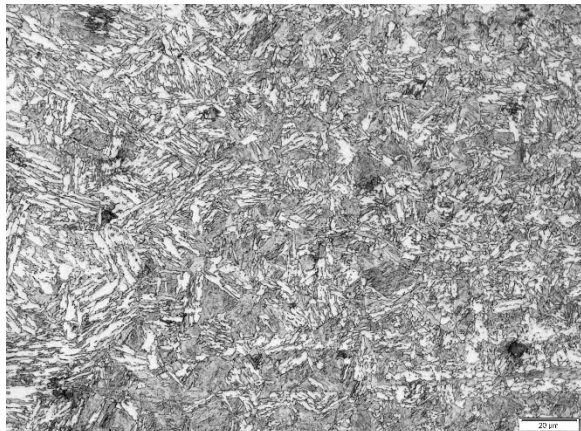
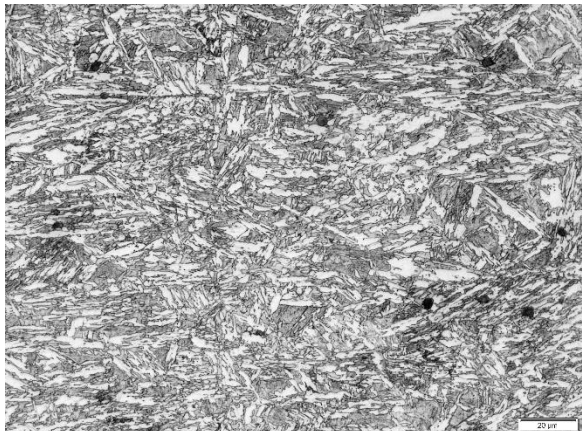


# Gefügebildungen a = 50 mm

#27



#28



Schweißnahtmitte

Schmelzlinie

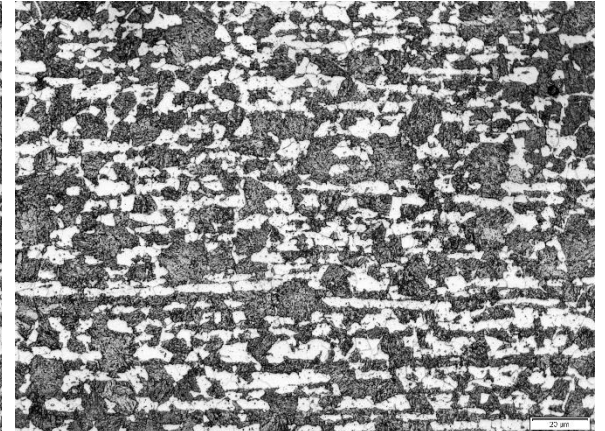
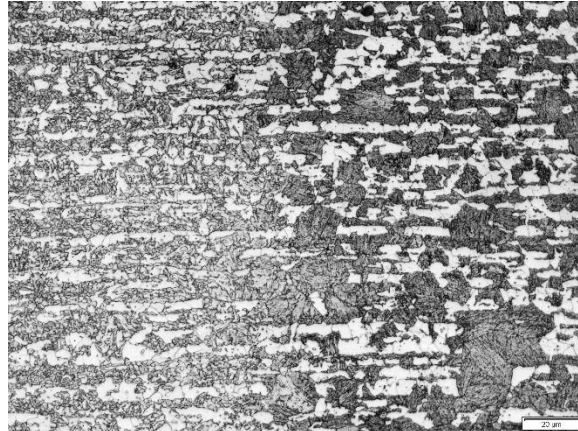
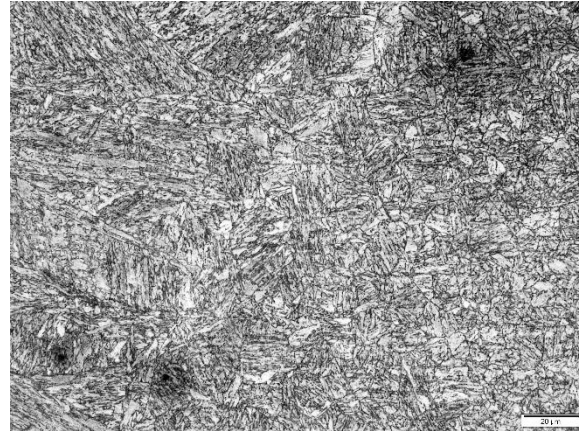
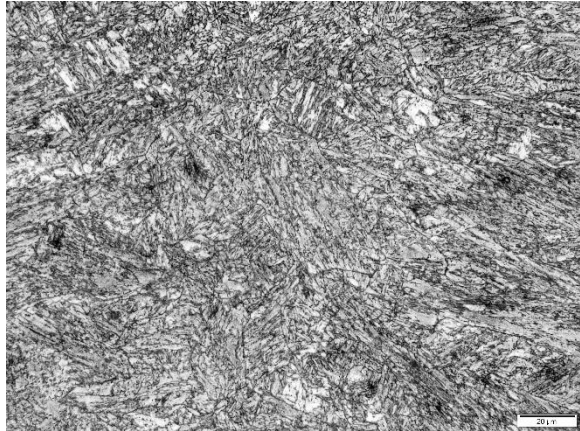
Anlasszone

Rückhärtezone

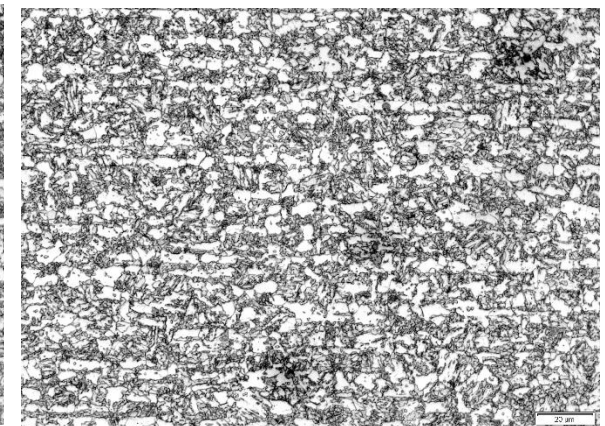
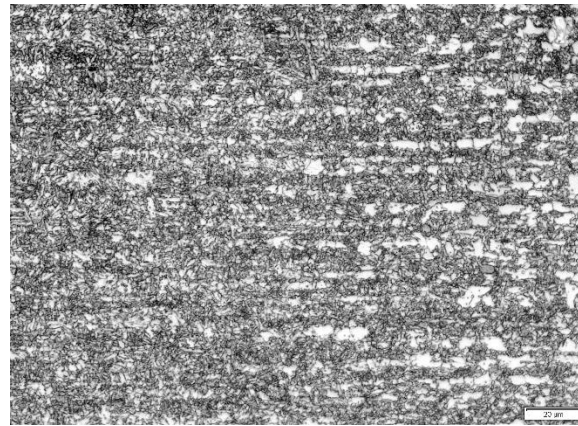
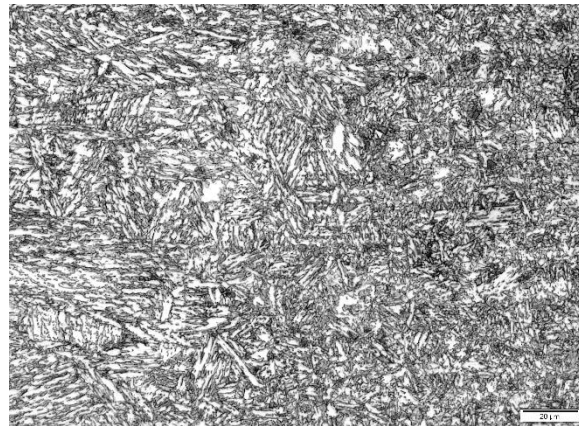
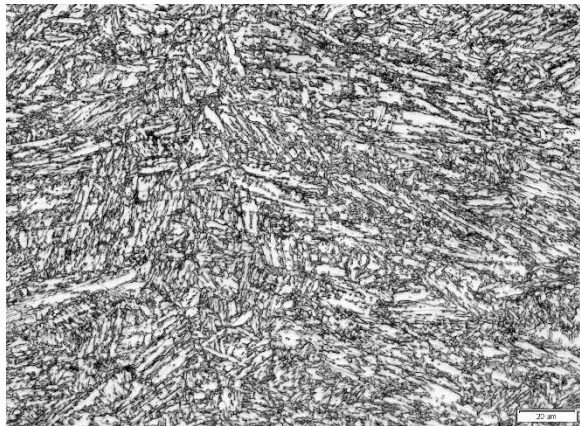


# Gefügebildungen im Detail a = 70 mm

#30



#31



Schweißnahtmitte

Schmelzlinie

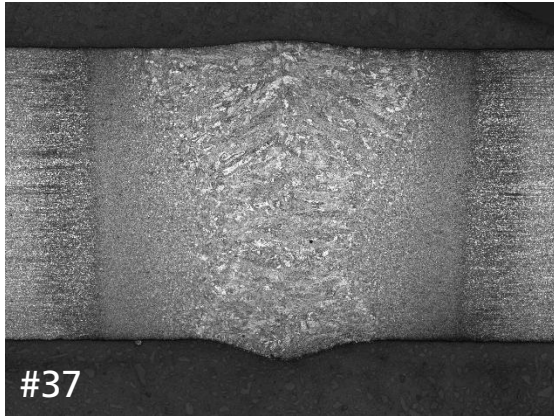
Anlasszone

Rückhärtezone

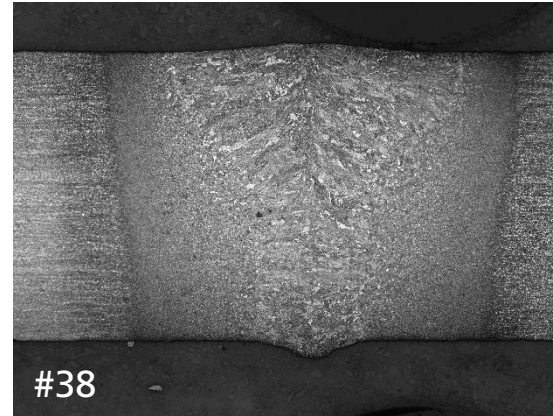


# Wärmebehandlung 15 mm vorlaufend

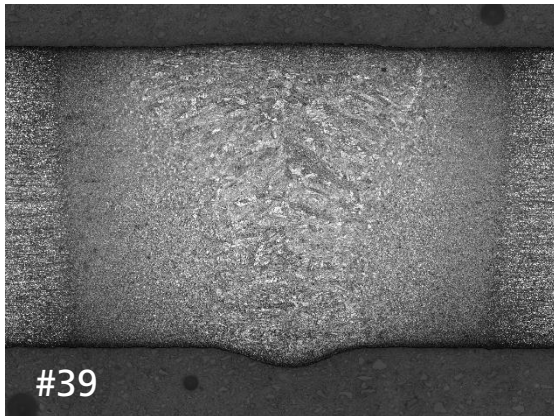
LHT 2500 W



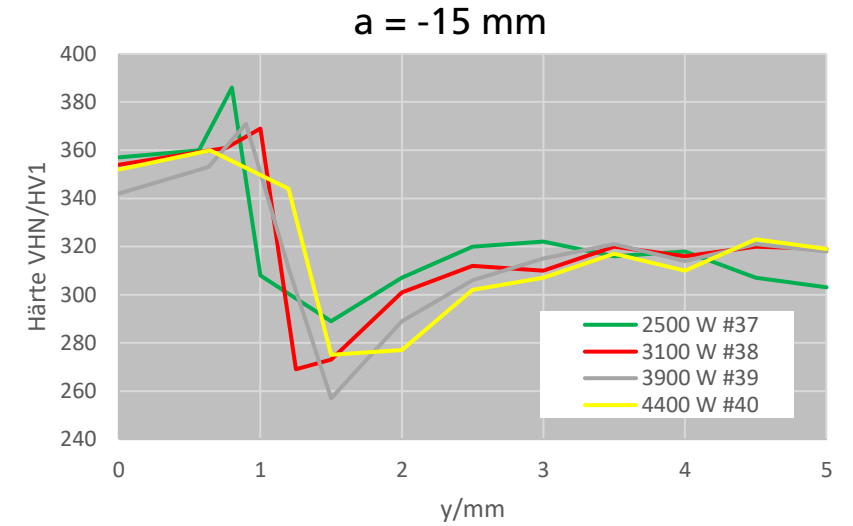
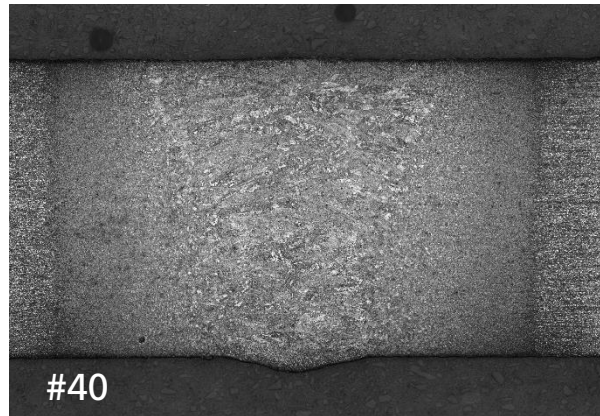
LHT 3130 W



LHT 3870 W



LHT 4400 W



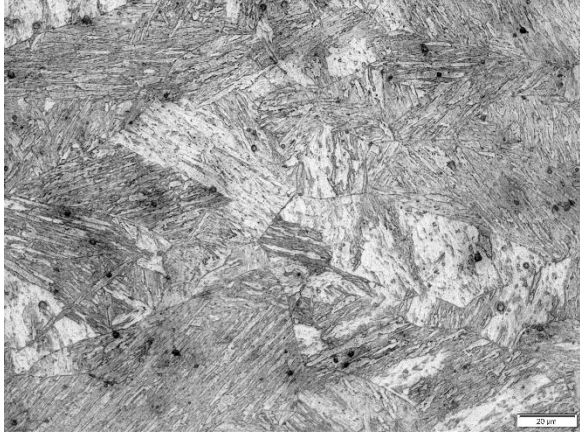
Schweiße: keine Änderung

Schmelzlinie: Verringerung der Härte um max. 50 HV1 bei 4400 W

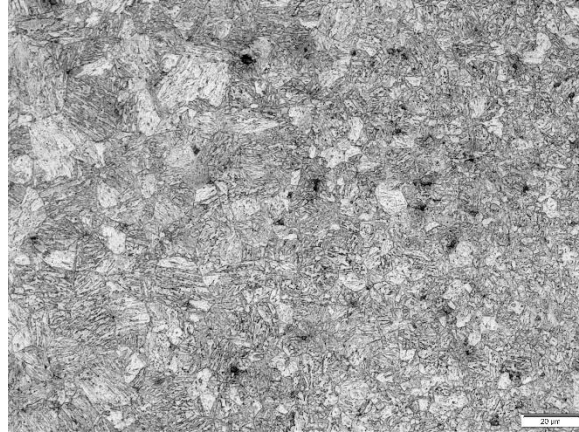
Anlasszone: Verlagerung nach außen bei steigender WBH-Leistung

# Gefügeaufnahmen im Detail

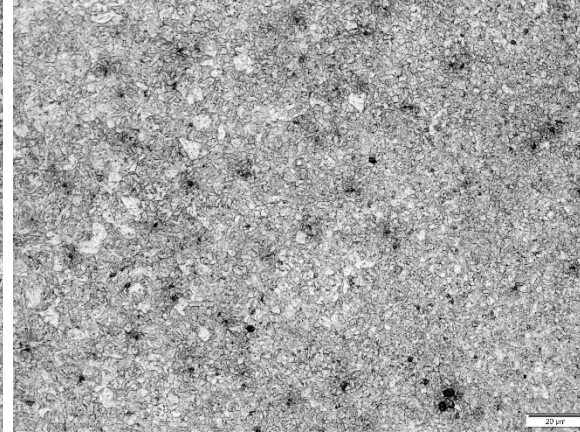
#40



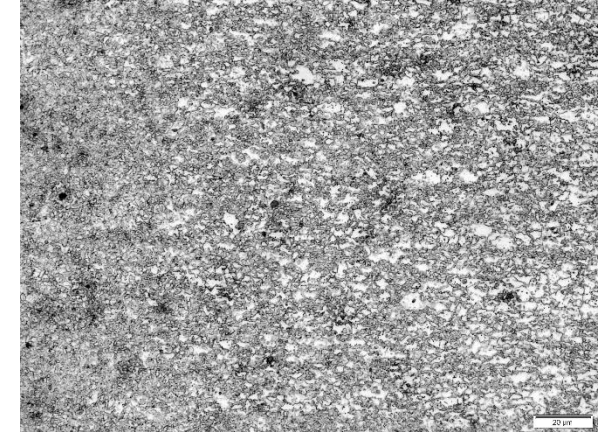
Schweißnahtmitte



Schmelzlinie



Anlasszone



Rückhärtezone

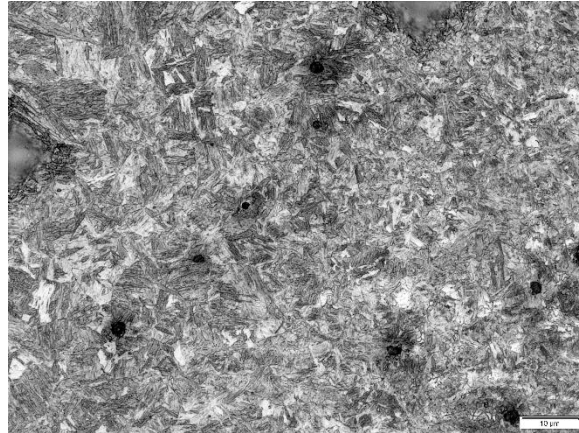
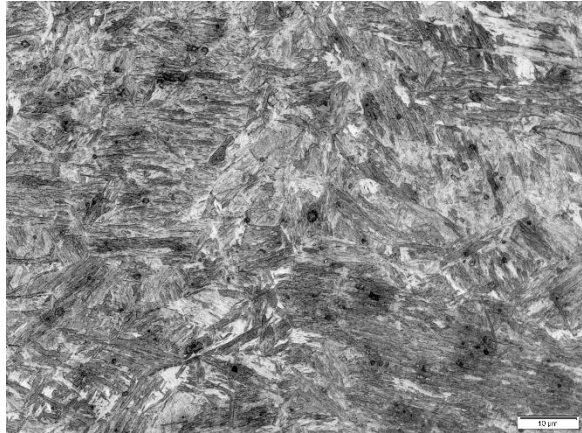


# Zusammenfassung Vorversuch 3

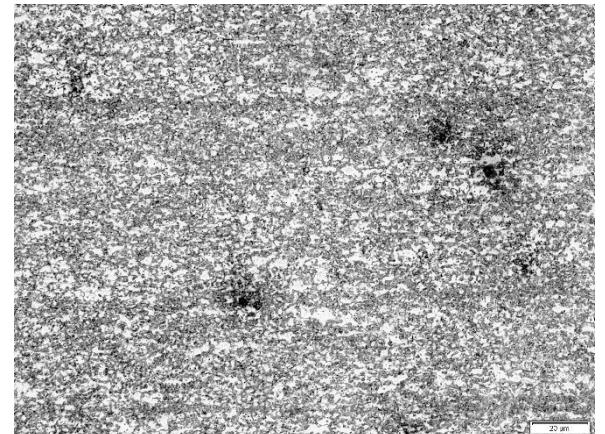
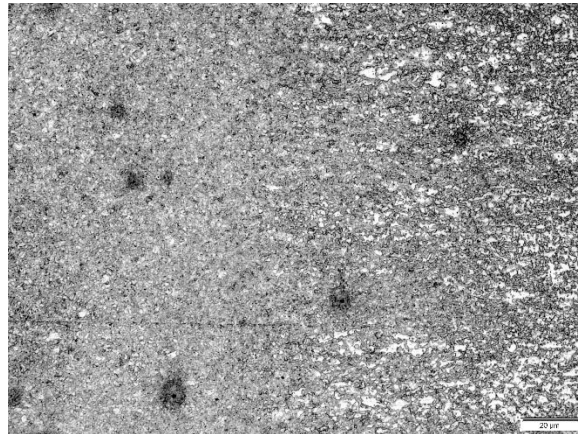
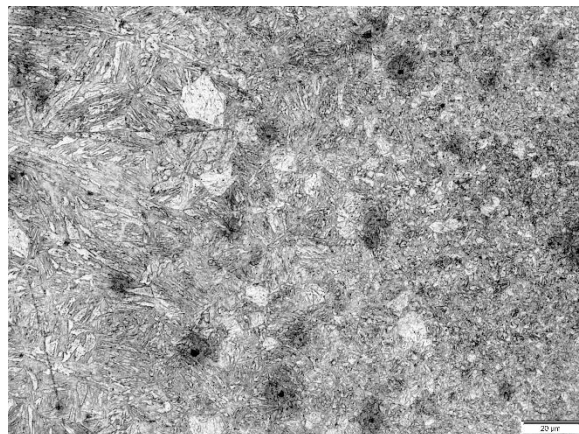
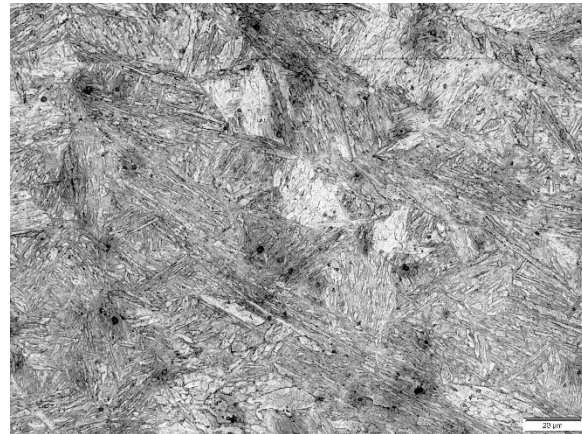
- Mit steigendem Abstand ist ein stärkere Verminderung der Härte zu beobachten
  - Größter Effekt bei  $a = 70$  mm,  $P_{LLHT} = 1800 - 2500$  W ( $d = 1,5$  mm) und  $a = 50$  ,  $P_{LLHT} = 1200 - 1500$  W ( $d = 0,9$  mm)
- Vorlaufende Wärmebehandlung zeigt im Ätzbild einen stärker ausgeprägten Angriff
  - Keine Änderung der Härte
  - Abkühlverhältnisse werden nicht beeinflusst
- WBH-Strahl verlängern, ggf. profilieren
- Unterschiede in der Wärmebehandlung auf vergrößerte Absorptivität bei sandgestrahlten Blechen zurückzuführen

# Gefüge ohne Wärmebehandlung

#1



#11



Schweißnahtmitte

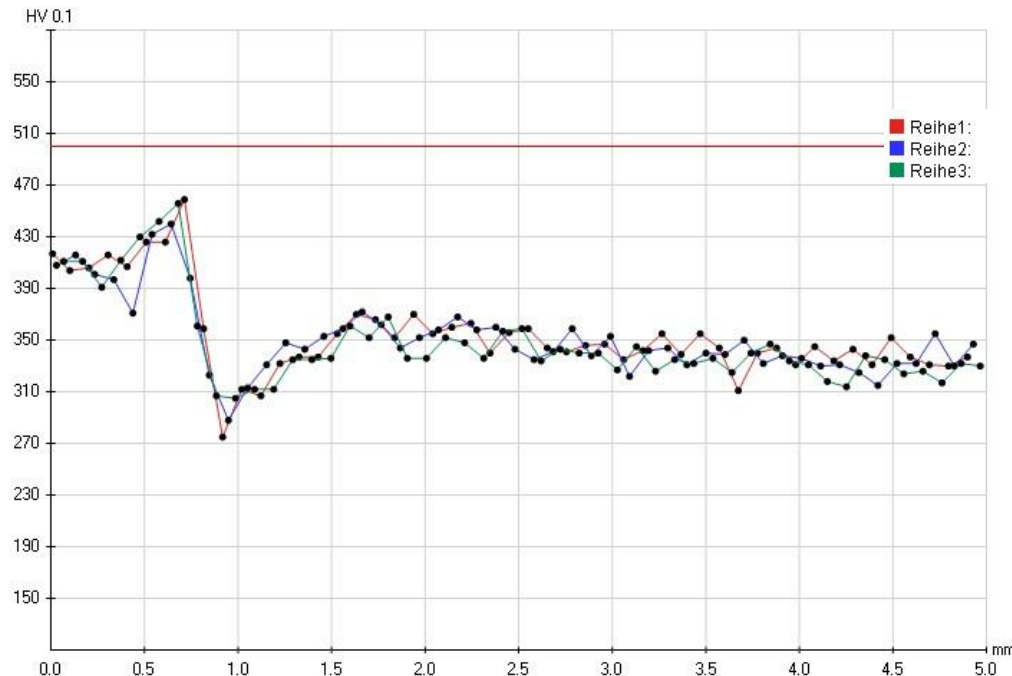
Schmelzlinie

Anlasszone

Rückhärtezone

# Härteprüfung – Referenz #11

Feinmessung HV0,1  
Schweißnaht in 1.0944, d = 1,5 mm  
ohne Wärmebehandlung



Schweiße:	415 HV0,1 $y \leq 0,5$ mm
Schmelzlinie:	450 HV0,1 $0,6 \leq y \leq 0,76$ mm
Anlasszone:	280 – 300 HV0,1 $0,85 \leq y \leq 1$ mm
Rückhärtezone:	350 HV0,1 $1,6 \leq y \leq 2,5$ mm
Grundwerkstoff:	330 HV0,1 $y \geq 2,65$ mm

- Ohne Wärmebehandlung
- Stahl arbeitet etwas weicher als das Material in d = 0,9 mm
- Streuung der Härtewerte kleiner
- Ausgeprägte Rückhärtezone