

Ausweitung der Möglichkeiten des WAAM Prozesses durch Verwendung von Fülldrähten

Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik

N. Enzinger, F. Pixner, A. Zelić, M. Decherf, M. Lasnik

26.02.2021



**4. Symposium
Materialtechnik**

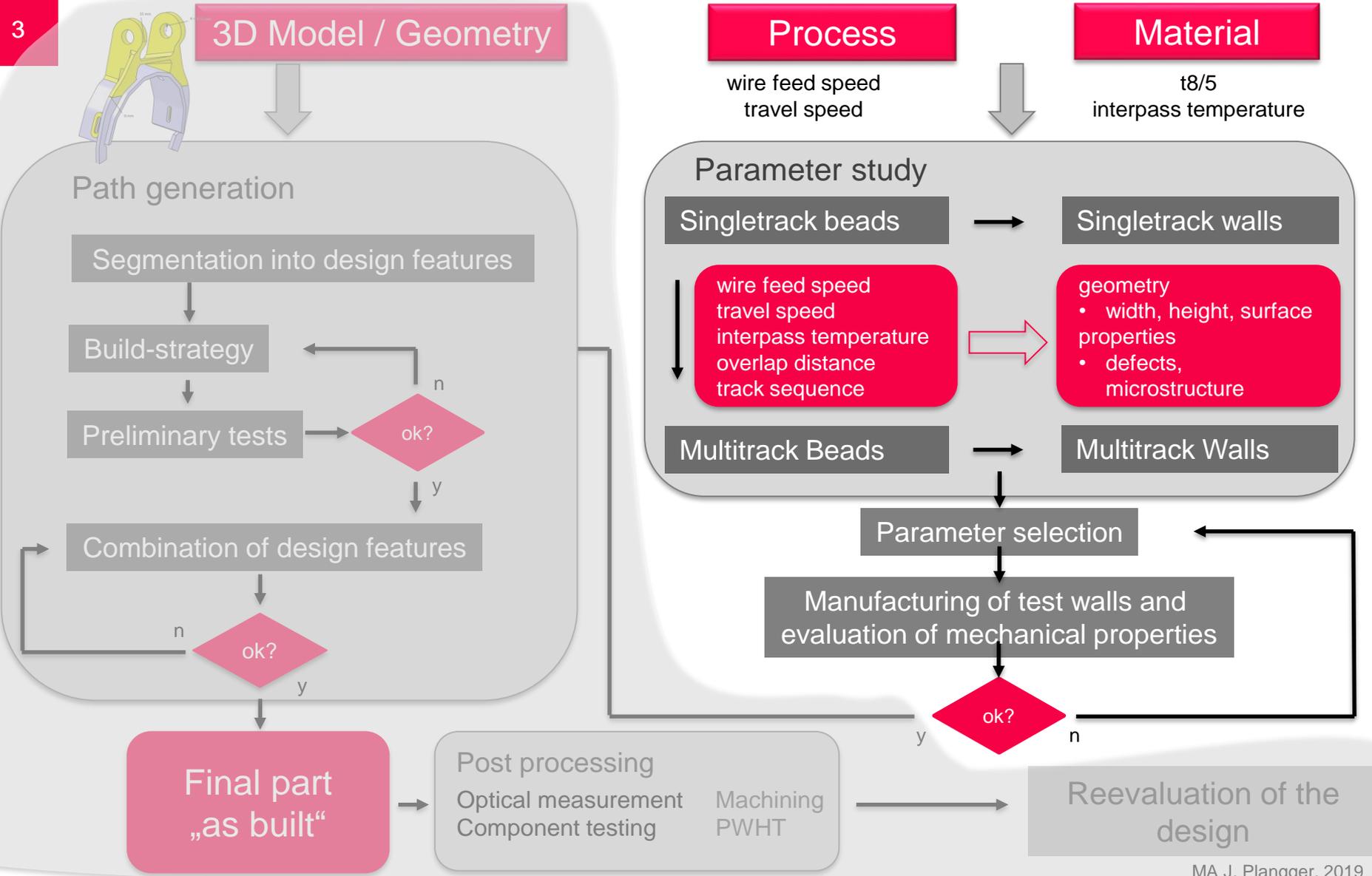
25. + 26. Februar 2021, Clausthal-Zellerfeld

Motivation



Schmiedegesenke

- Herstellung
- Reparatur
- Anpassung
- Reduzierte Wartezeiten



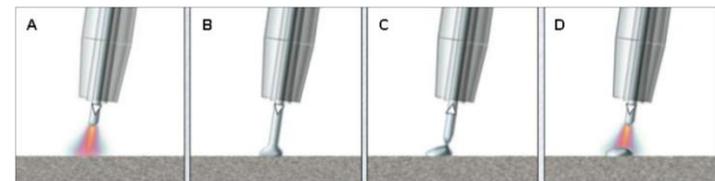
MA J. Plangger, 2019

Drahtbasierte additive Fertigung durch CMT

- Von Fronius modifizierter Schutzgasschweißprozess
- Mechanisch unterstützter Tropfenübergang (Drahtrückzug)
- Reduzierter Wärmeeintrag

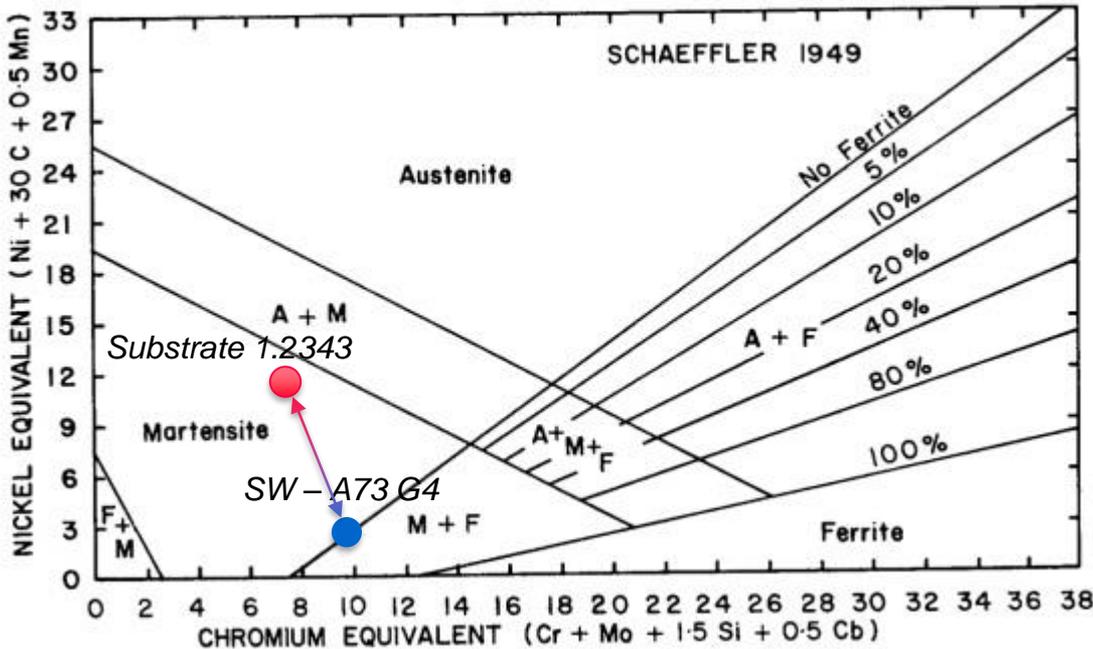


Tropfenübergang beim CMT Prozess
www.fronius.at



Phasen beim Tropfenübergang beim CMT Prozess
www.fronius.at

Werkstoff



- Substrat erhöhter C-Gehalt → eingeschränkte Schweißbarkeit
- Beschränkte Verfügbarkeit passender Zusatzwerkstoffe
- Geforderte Eigenschaften der AM Strukturen nicht sicher erreichbar
- Entwicklung eines passenden **Metallpulverfüllrahtes**

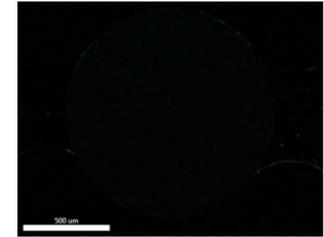
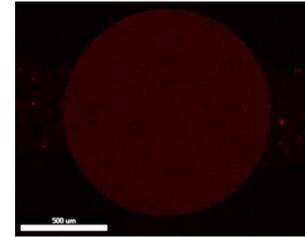
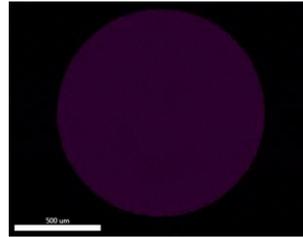
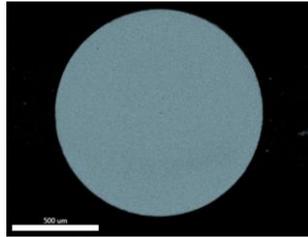
*depending on applied HT

**all weld metal

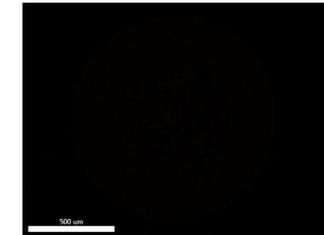
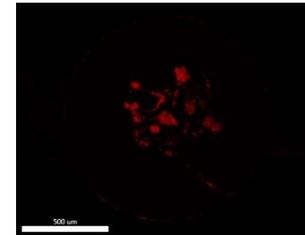
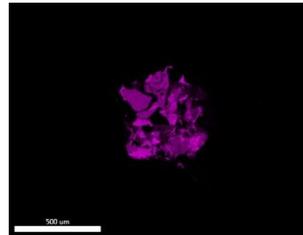
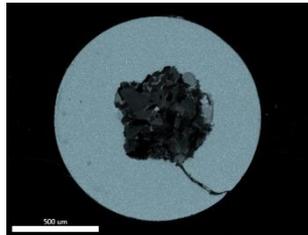
	C [wt%]	Cr [wt%]	Mo [wt%]	Ni [wt%]	Mn [wt%]	V [wt%]	Si [wt%]	Fe [wt%]	Cr _{eq} [wt%]	Ni _{eq} [wt%]	HRC
Substrat 1.2343	0.38	5.20	1.30	-	0.40	0.45	1.10	bal.	8.15	11.60	46 – 56 *
Massivdraht	0.10	6.50	3.30	-	0.60	-	0.40	bal.	10.40	3.30	38-42**

Prozessentwicklung - Zusatzwerkstoffe

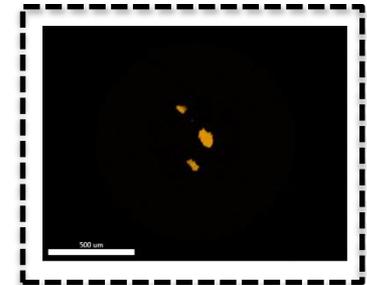
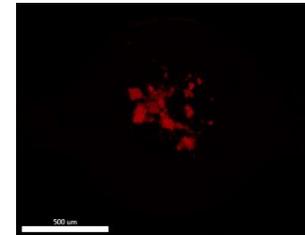
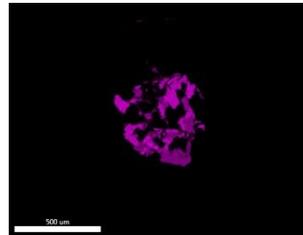
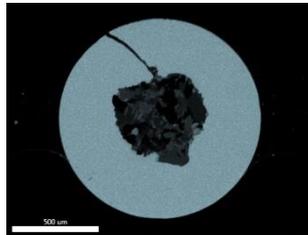
Massivdraht
X10CrMo6-3
(Referenz)



Fülldraht
X10CrMo6-3



Fülldraht
X10CrMoNi6-3-x



Fe K

Cr K

Mo L

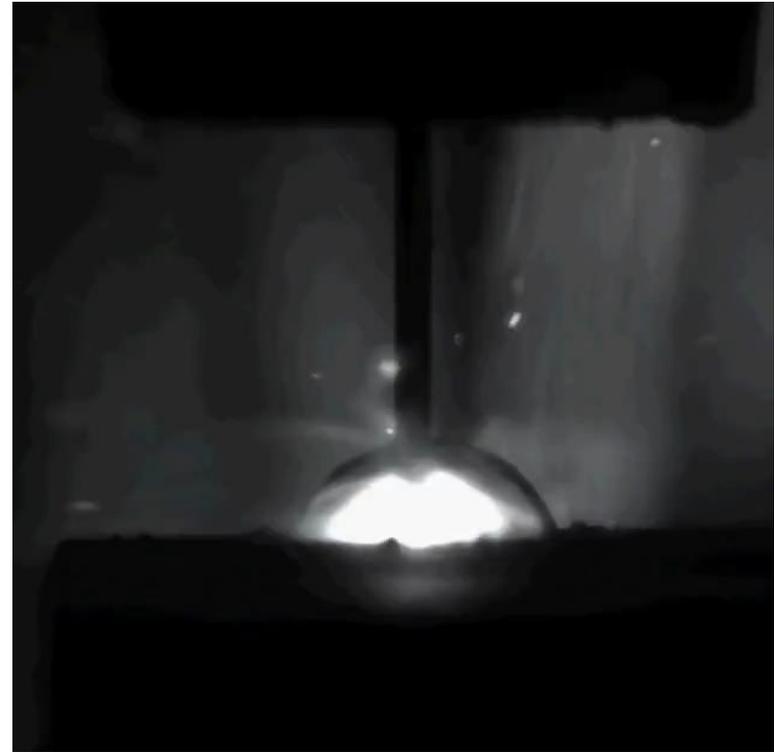
Ni K

Prozessentwicklung - Zusatzwerkstoffe

Parameter: $I = 232 \text{ A}$ ($v_w = 7.6 \text{ m/min}$) $v = 0.75 \text{ cm/s}$
 Schutzgas: M21 Corgon 18



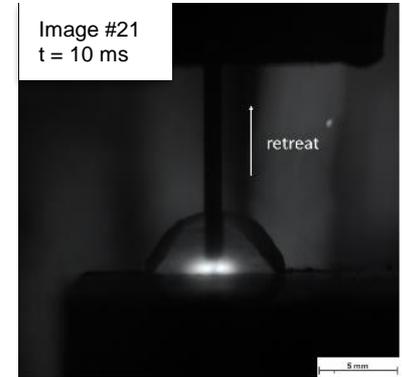
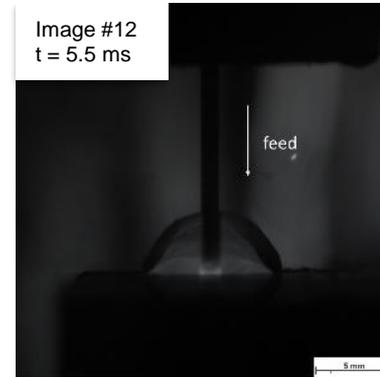
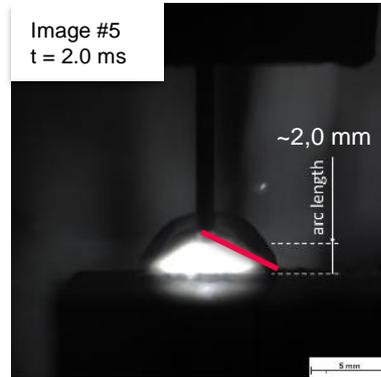
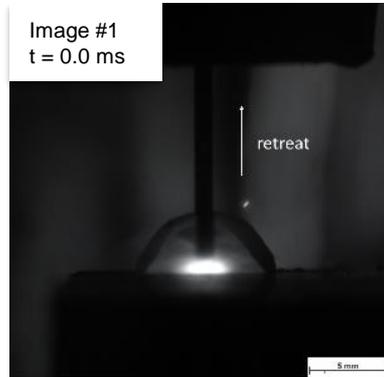
Massivdraht
X10CrMo6-3



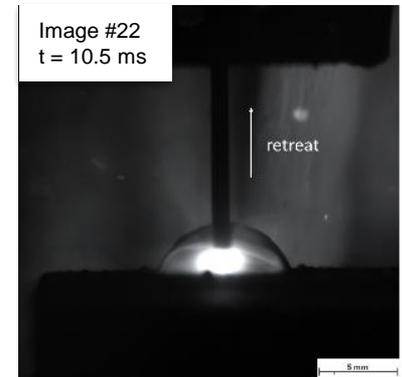
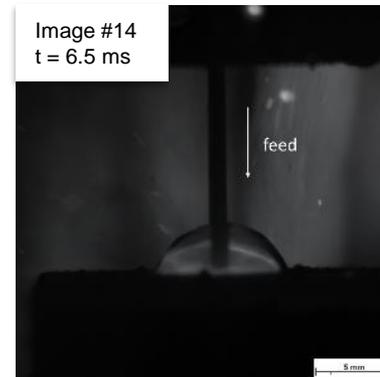
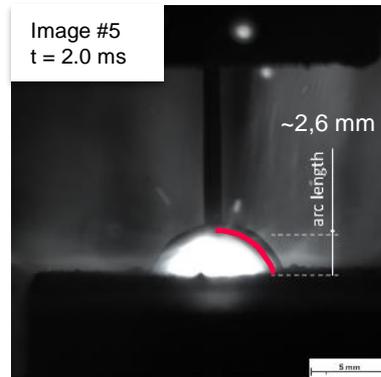
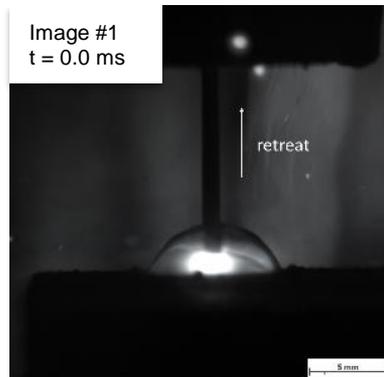
Fülldraht
X10CrMo6-3

Prozessentwicklung - Zusatzwerkstoffe

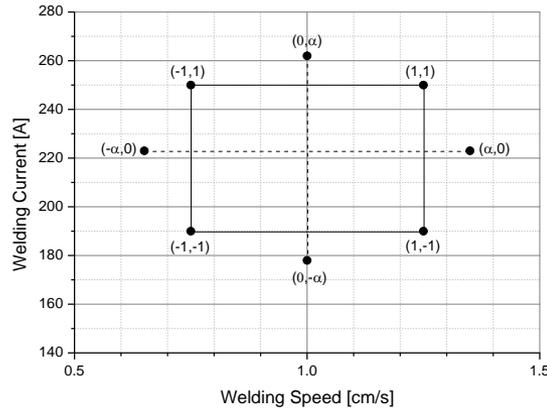
Solid Wire
X10CrMo6-3



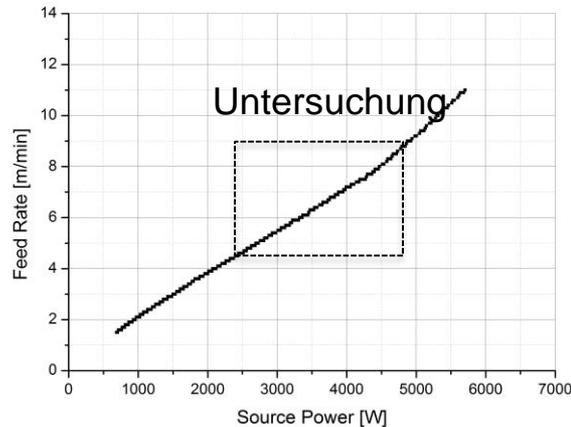
Metal Cored Wire
X10CrMo6-3



Prozessentwicklung - Parameterermittlung



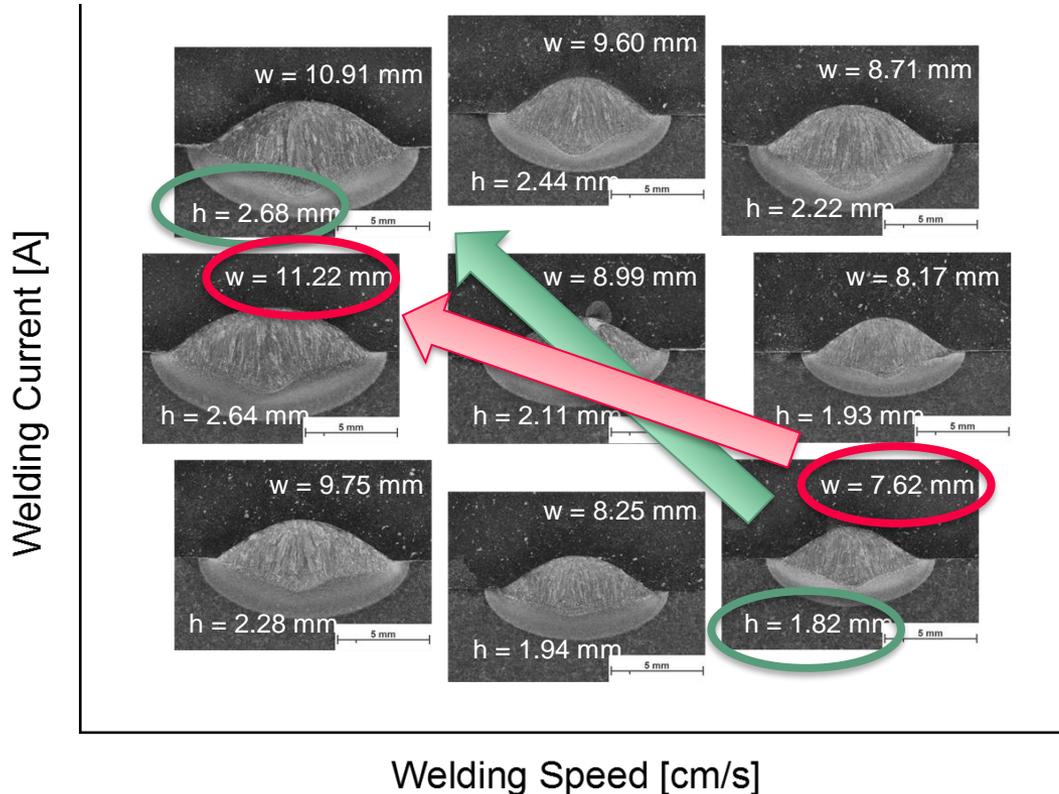
Central Composite Design (CCD) – MCW



CMT Characteristic Curve - Steel

- Design of Experiments (DoE) – CCD
- Einzelne Spuren auf vorgewärmtem (PH) Substrat 1.2343 ($\uparrow M_s$)
- Zwei Faktoren:
 - Schweißstrom
 - Schweißgeschwindigkeit
- Zielgröße
 - Schweißbadgeometrie h, w
 - Aufmischung
 - Härte
- Auswertung der Integrität und Schweißfehler

Prozessentwicklung - Parameterermittlung

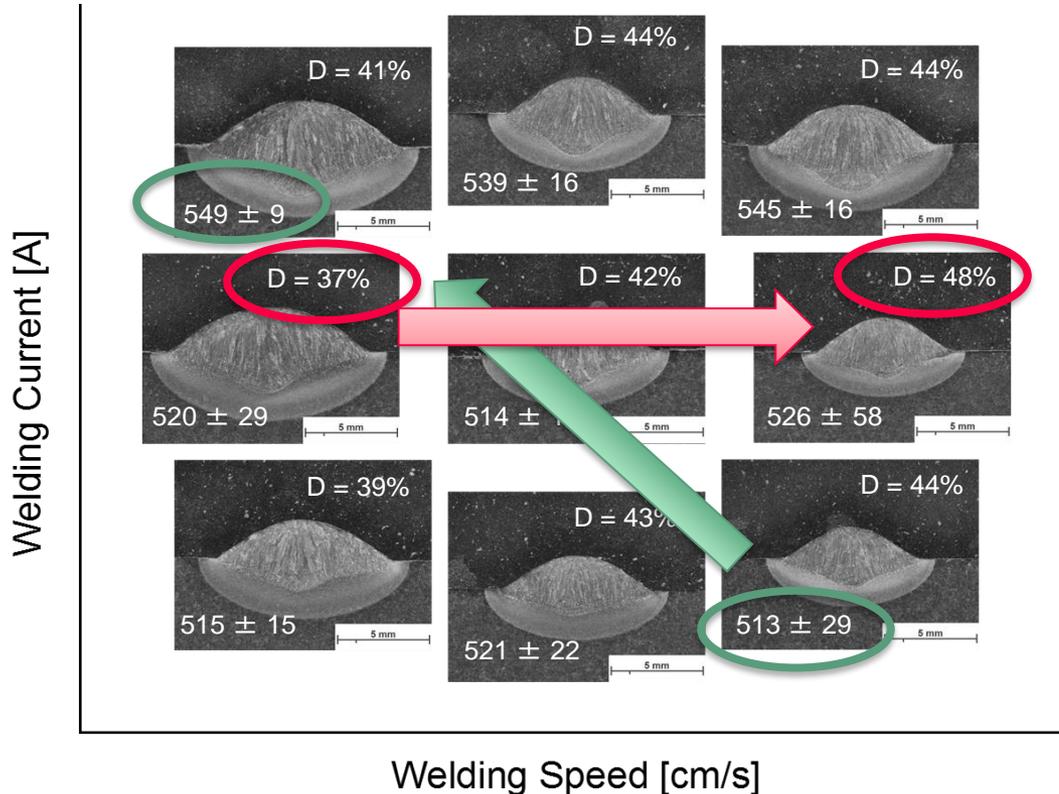


- Breite und Höhe:
 - w 7.62 – 11.22 mm
 - h 1.82 - 2.68 mm

- Aufmischung mit Vorwärmung
 - 37-48%

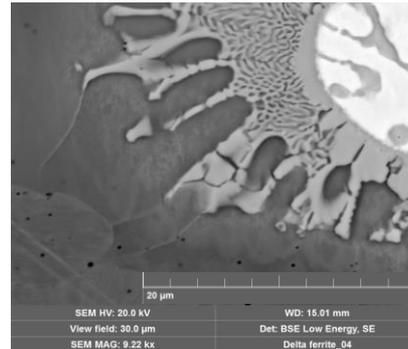
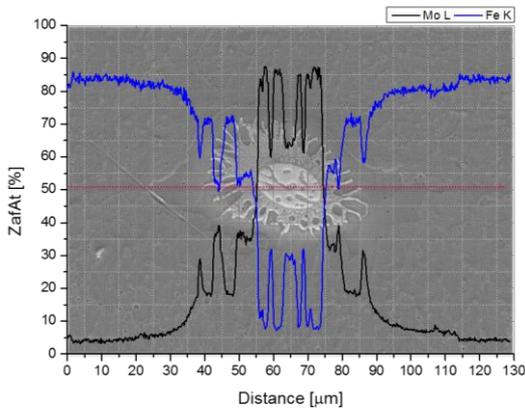
- Härte
 - 513 – 549 HV1

Prozessentwicklung - Parameterermittlung

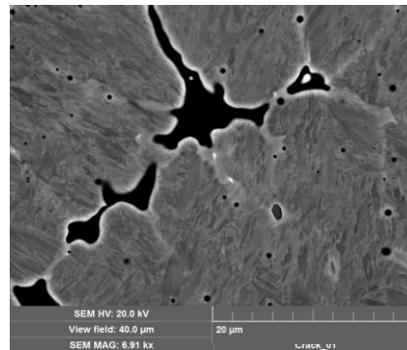
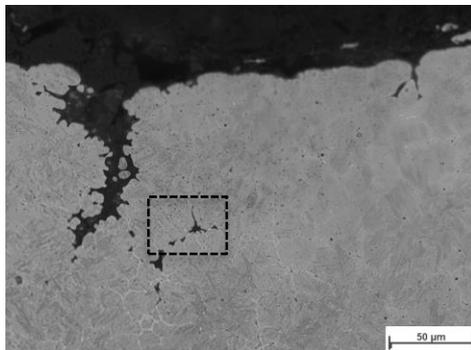


- Breite und Höhe:
 - w 7.62 – 11.22 mm
 - h 1.82 - 2.68 mm
- Aufmischung mit Vorwärmung
 - 37-48%
- Härte
 - 513 – 549 HV1

Prozessentwicklung - Parameterermittlung



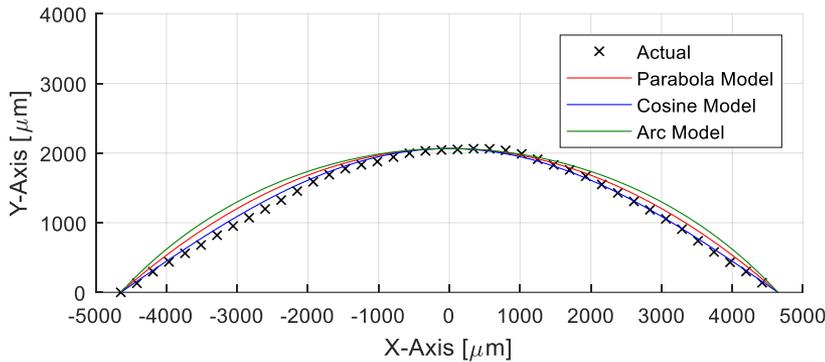
EDX Linienscan eines teilweise aufgeschmolzenen Mo-Partikels



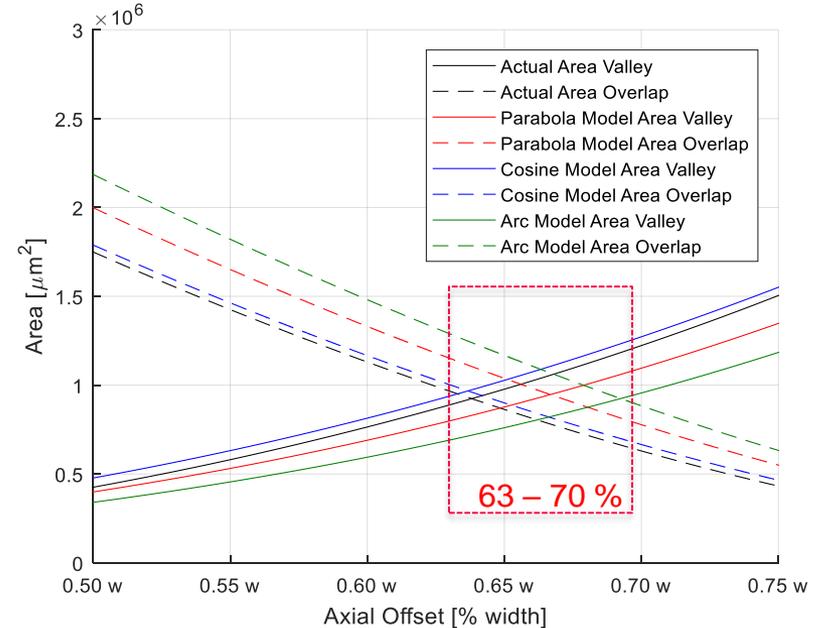
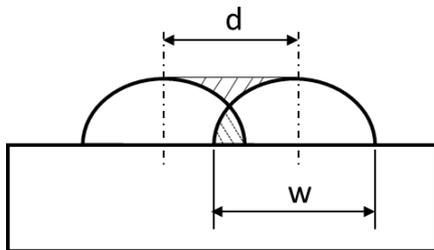
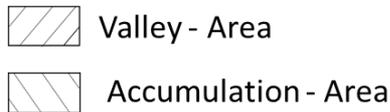
LIMI und REM Aufnahme einer Schrumpfluncker im oberen Bereich der Schweißnaht.

- Große, teilweise aufgeschmolzene Partikel
- EDX line scans ROI → pulverförmiges Mo aus dem Fülldraht
- Zugabe von Ferro-Molybden → $65-75\% \text{ Mo} \propto T_m \text{ } 1665-1715^\circ \text{ C}$
- Partikelgröße reduzieren
- Zuletzt erstarrte Bereiche zeigen kleine Lunker

Prozessentwicklung - Parameterermittlung

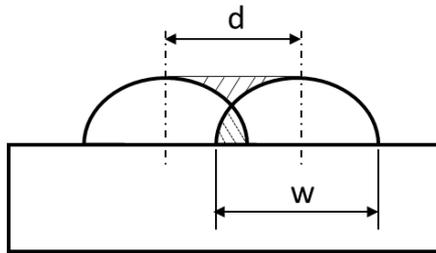
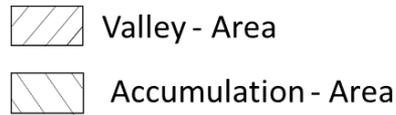


Berechnete vs. gemessene Oberfläche für $I = 190 \text{ A}$ $v_s = 0.75 \text{ cm/s}$



- Modelle in der Literatur um die Überlappung zu optimieren:
 - Flat-top Overlapping Model (FOM)
 - Tangent Overlapping Model (TOM)
 -
- Ursachen für die Abweichungen gegenüber den Modellen in der Literatur
 - Massiv- vs. Fülldraht
 - MAG vs. CMT Prozess
 - Mit/ohne Vorwärmung
 - ...

Prozessentwicklung - Parameterermittlung



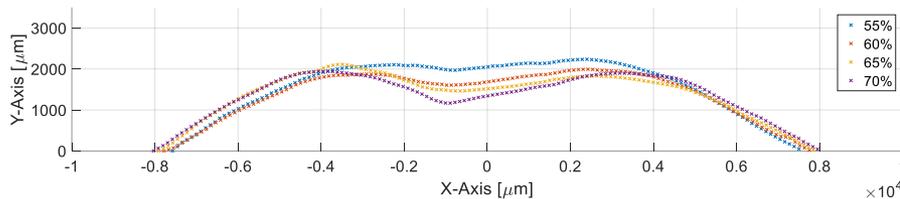
Schematische Darstellung der Überlappung bei zwei Spuren



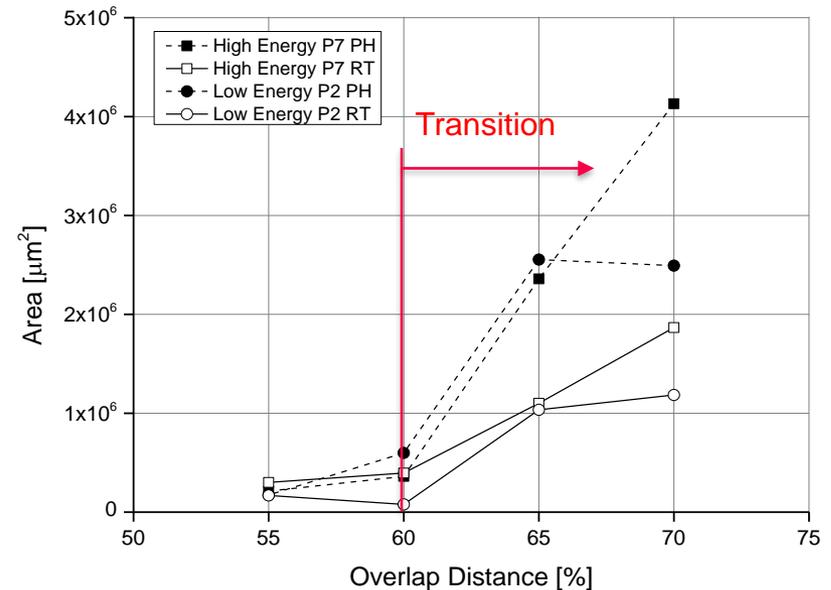
3D Oberfläche $I = 190 \text{ A}$ $v_s = 0.75 \text{ cm/s}$ $\eta = 70\%$

- Gewählte Parametersätze
 - geringe Energie
 - $I = 190 \text{ A}$ $v_s = 0.75 \text{ cm/s}$
 - hohe Energie
 - $I = 250 \text{ A}$ $v_s = 0.75 \text{ cm/s}$
- Überlappung 55% - 70%
- Einlagig auf vorgewärmtem Substrat 1.2343 ($\uparrow M_s$)
- Zielgrößen
 - Geometrie
 - Höhenentwicklung
 - Tal und kummulierte Fläche
 - Härte
 - Integrität und Defekte
 - ...

Prozessentwicklung - Parameterermittlung

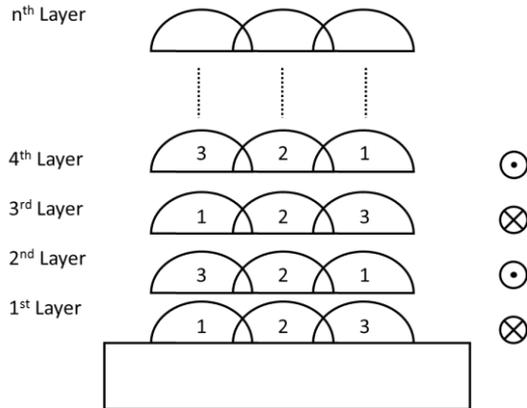


Measured surface $I = 190 \text{ A}$ $v_s = 0.75 \text{ cm/s}$



- Ziel ist ein defektfreies Bauteil
- Die optimierte Überlappung liegt zwischen 60 und 65%

Prozessentwicklung - Schweißstrategie



Schematische Darstellung der Schweißsequenz beim Aufbau der Struktur



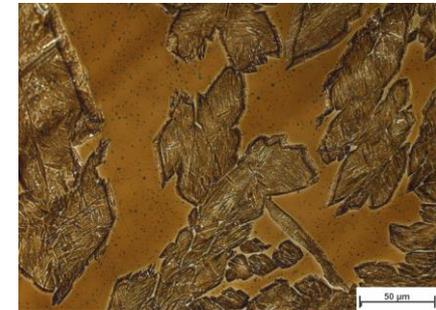
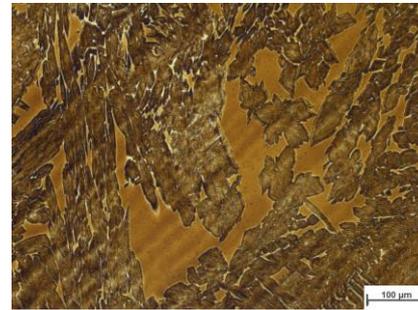
AM Struktur im as-build Zustand

- Aufbaustrategie:
 - Schweißparameter:
 - Niedrige Energie: $I = 190 \text{ A } v_s = 0.75 \text{ cm/s}$
 - Hohe Energie: $I = 250 \text{ A } v_s = 0.75 \text{ cm/s}$
 - Schweißpfad:
 - Alternierend
 - Überlappdistanz: 65%
 - Substrat:
 - Vorwärmung auf 400° C
 - Zusatzwerkstoff:
 - Zwischenlagentemperatur: $350 - 400^\circ \text{ C}$

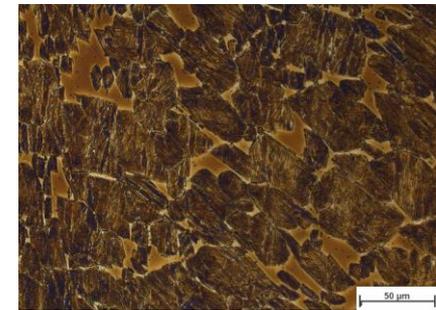
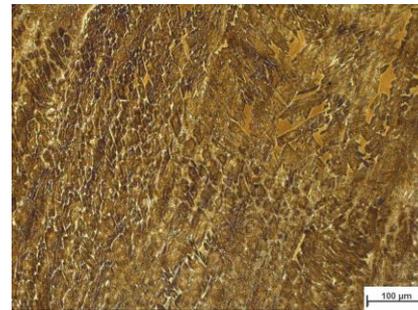
- Charakterisierung:
 - Mechanische Eigenschaften
 - Gefüge

Gefügecharakterisierung

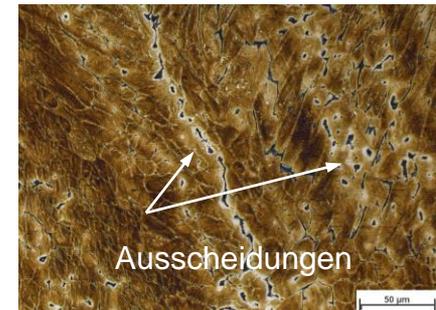
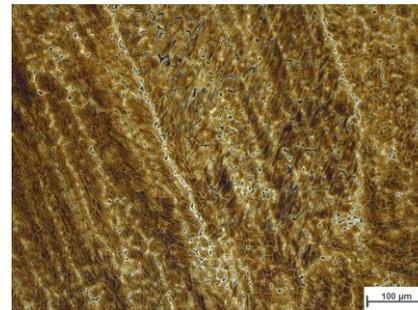
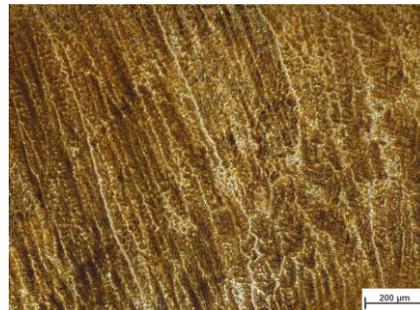
Metallpulver-FD
X10CrMo6-3
0 wt% Nickel



Metallpulver-FD
X10CrMo6-3-X
0.5 wt% Nickel



Metallpulver-FD
X10CrMo6-3-X
1.0 wt% Nickel

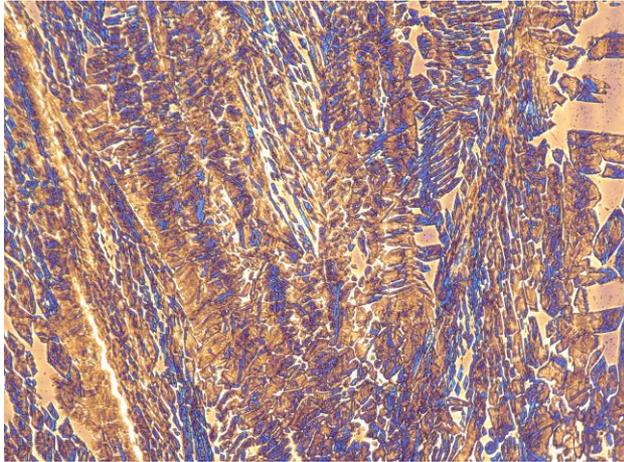


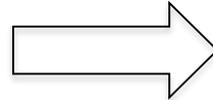
100x

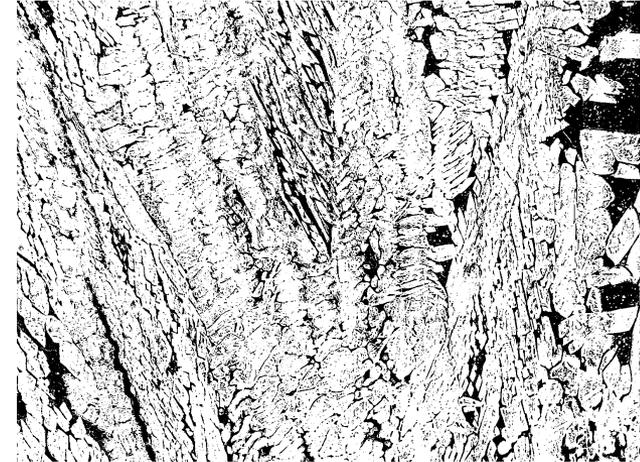
200x

500x

Gefügecharakterisierung

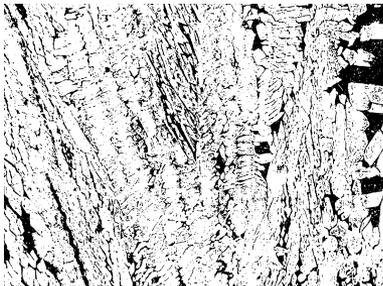


RGB

 Grenzwert



Rauschunterdrückung

23.2%



3x3 pixel

20.7%



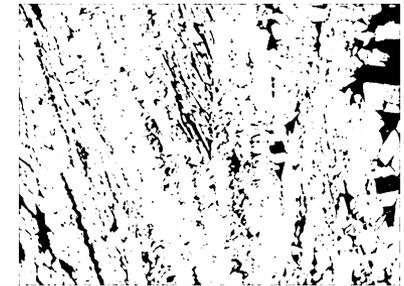
5x5 pixel

18.2%



7x7 pixel

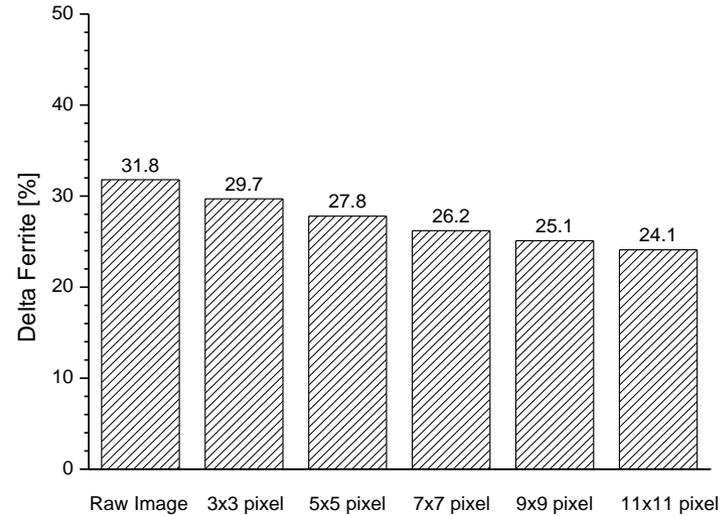
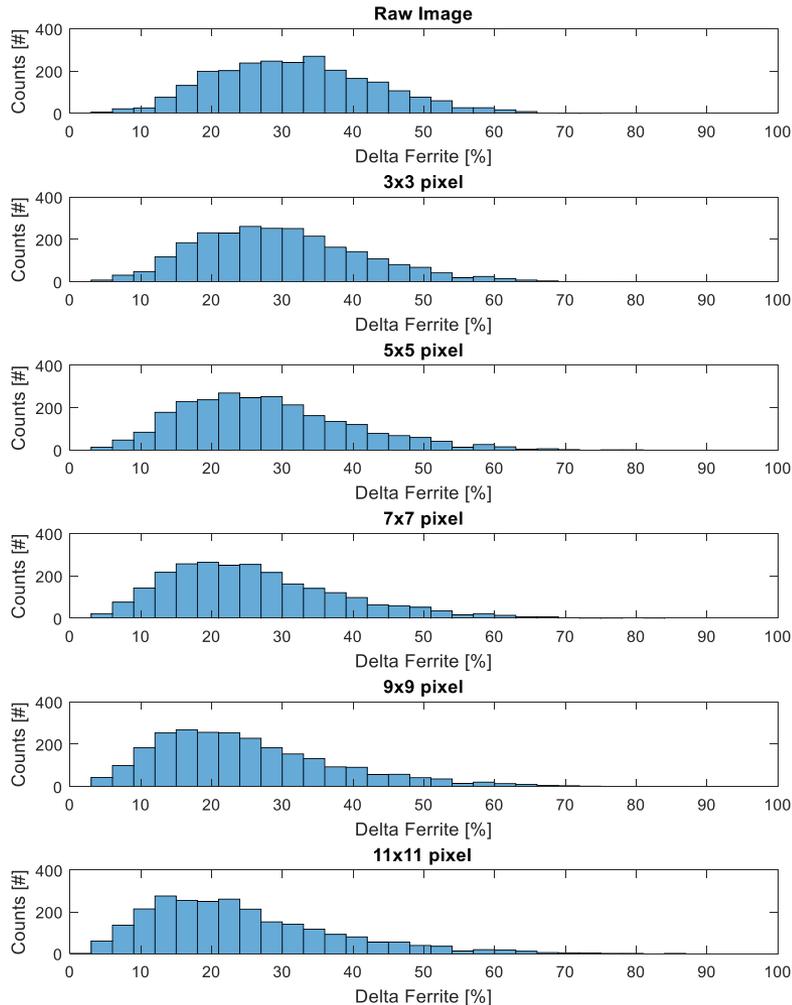
15.9%



9x9 pixel

14.1%

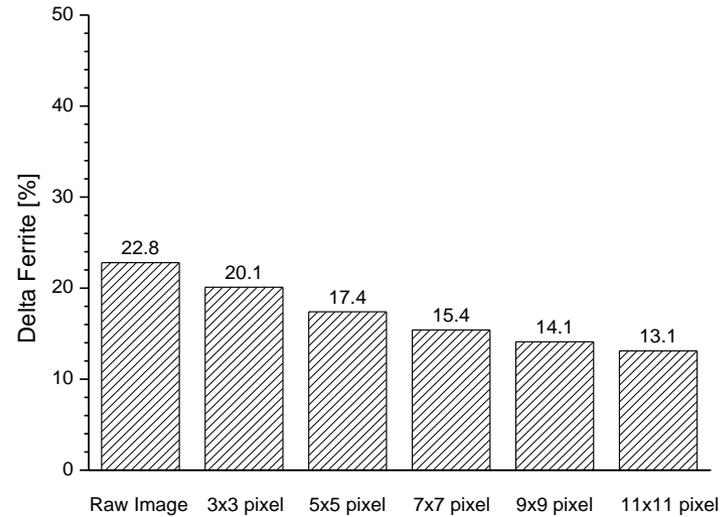
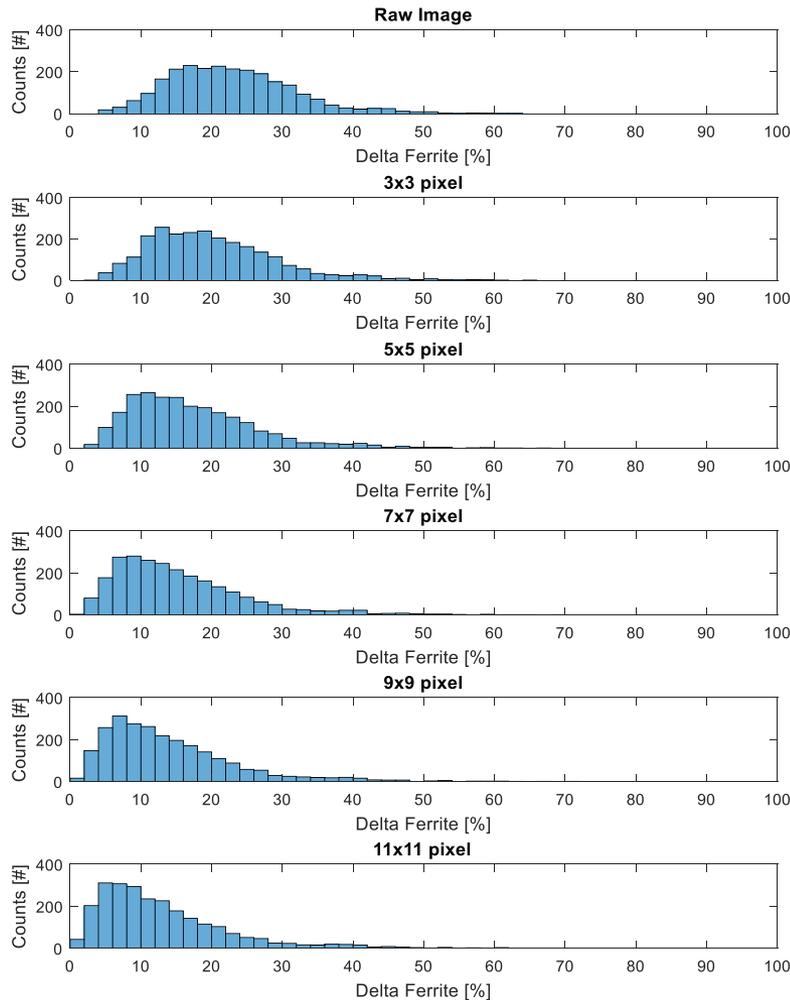
Gefügecharakterisierung



Metallpulver-FD
X10CrMo6-3
0 wt% Nickel

$$\delta_{\text{Average - Area}} = 24 \% - 31\%$$

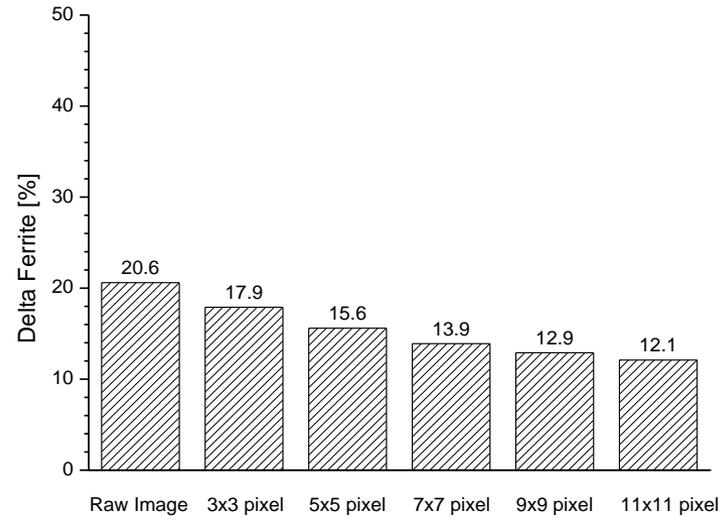
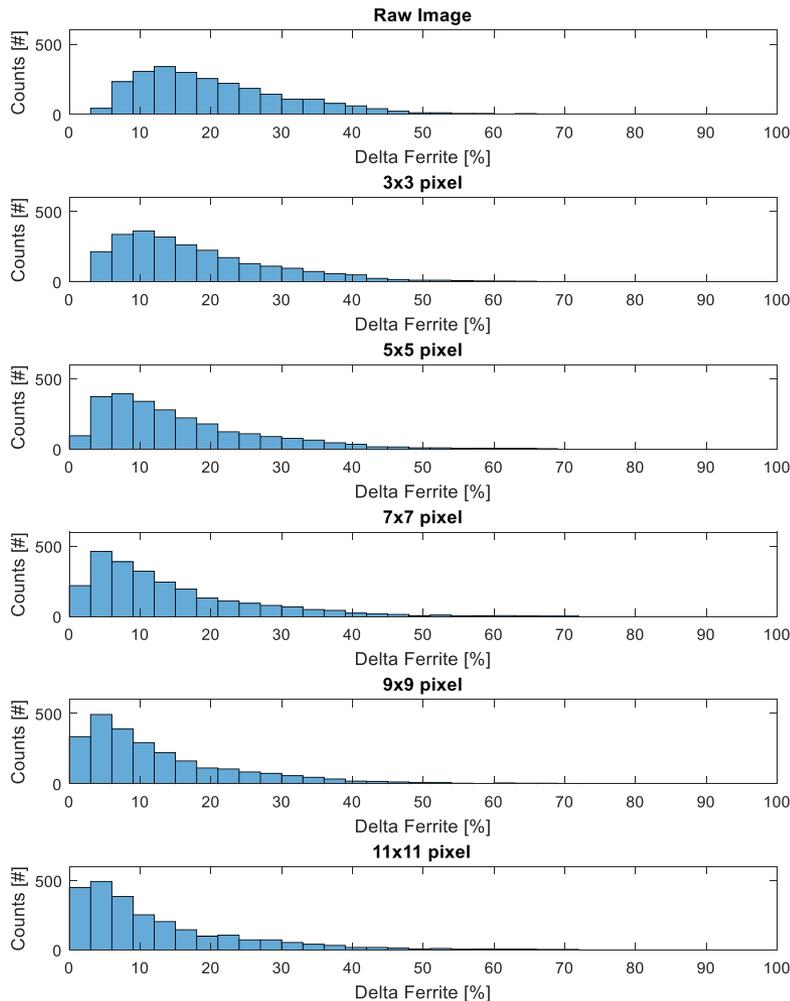
Gefügecharakterisierung



Metallpulver-FD
X10CrMo6-3
0.5 wt% Nickel

$$\delta_{\text{Average - Area}} = 13 \% - 23\%$$

Gefügecharakterisierung

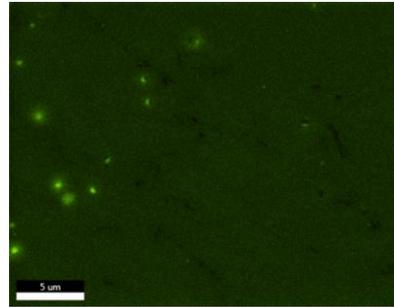
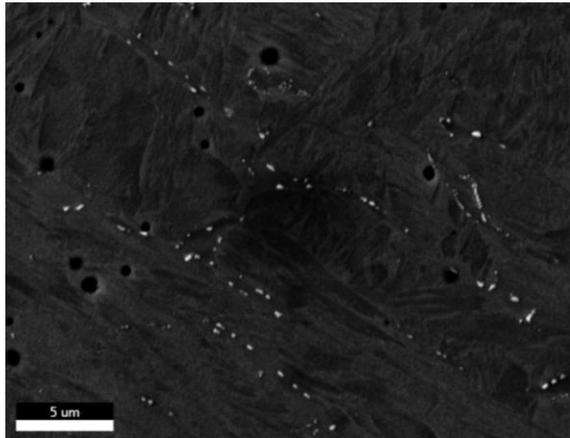


Metallpulver-FD
X10CrMo6-3
1.0 wt% Nickel

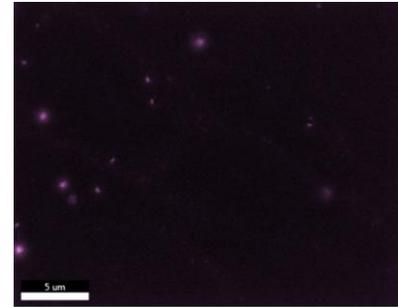
$$\delta_{\text{Average - Area}} = 12 \% - 21\%$$

Gefügecharakterisierung

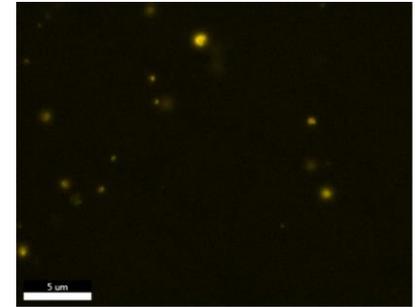
Metallpulver-FD
 X10CrMo6-3
 1.0 wt% Nickel



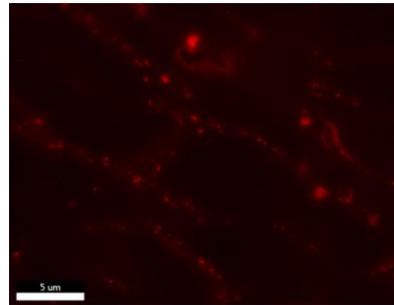
Oxygen - K



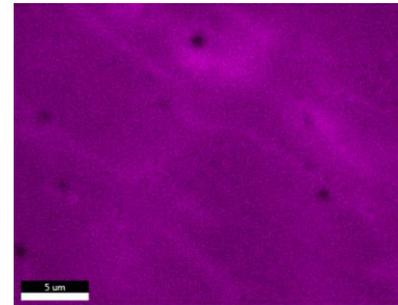
Silicon - K



Manganesen - K

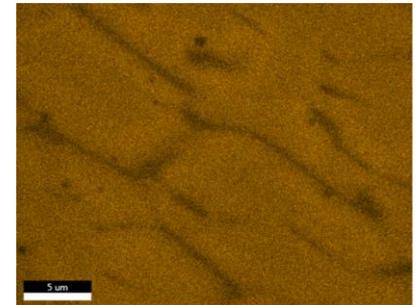


Molybdenum - L



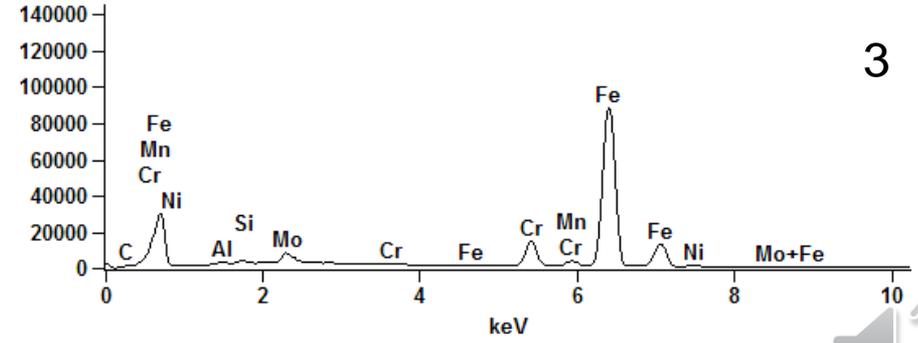
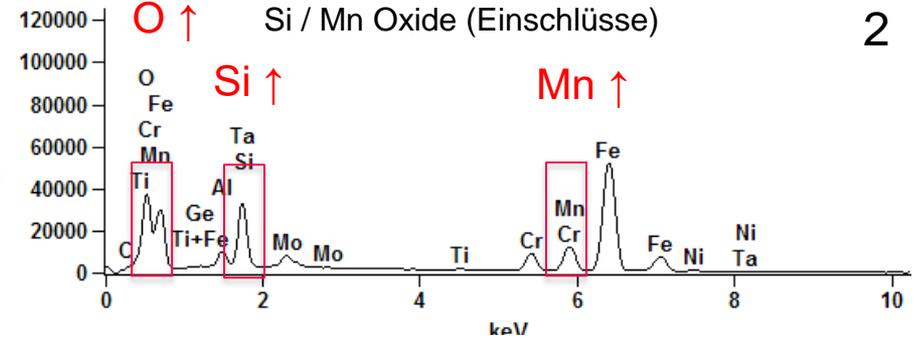
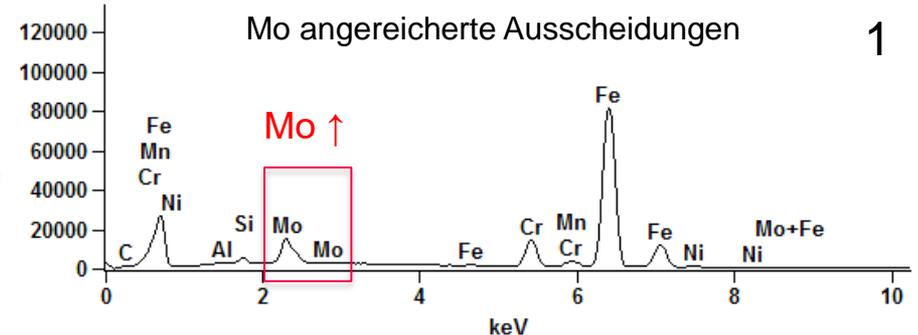
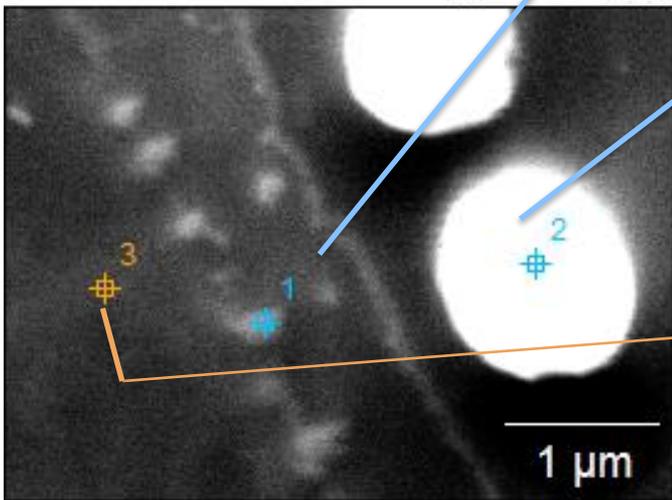
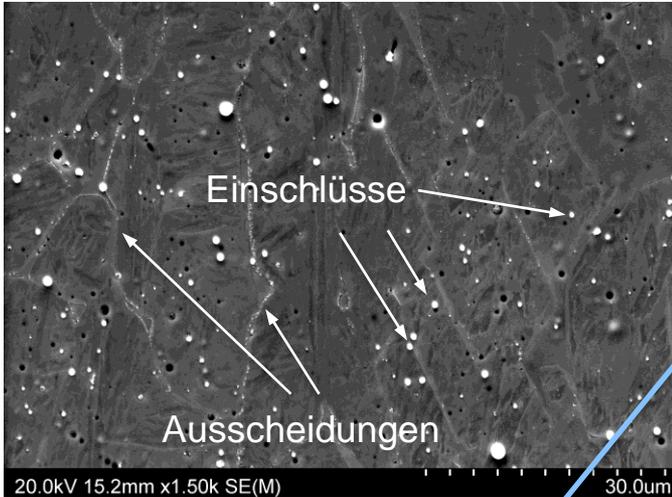
Chromium - K

Anreicherung im δ -Ferrit

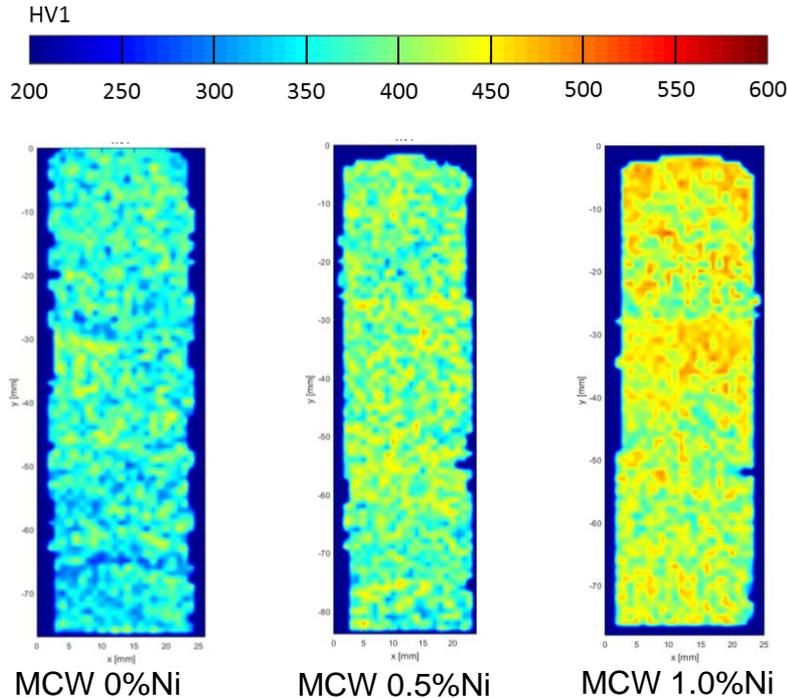


Nickel - K
 Anreicherung
 in der Matrix

EDX Gefügecharakterisierung



Mechanische Eigenschaften

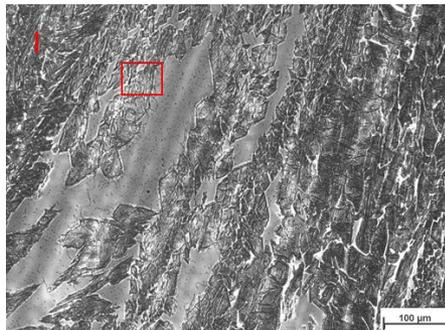
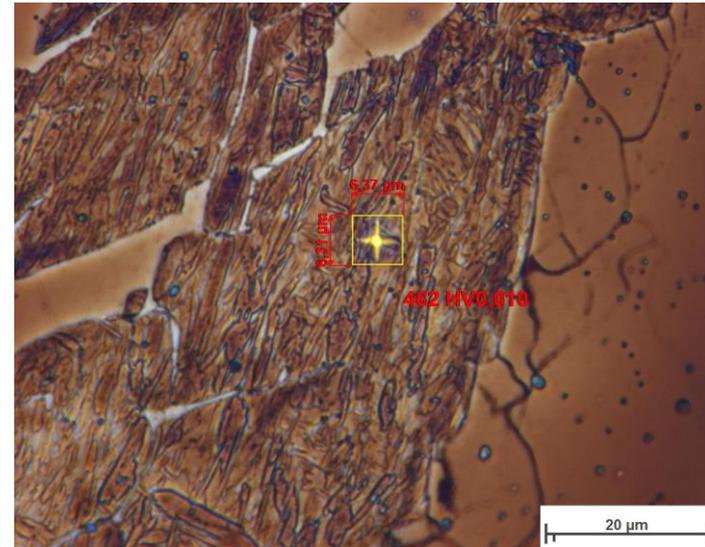
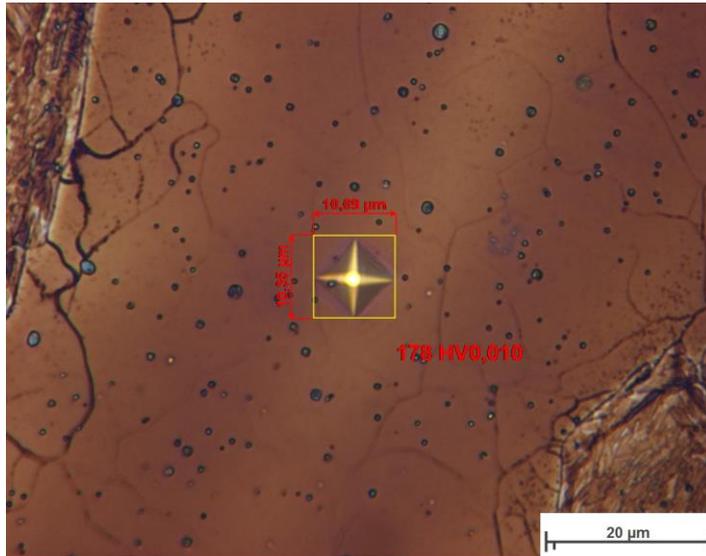


Hardness levels of AM bulk material in vertical direction with respect to varying Ni-content

	MCW 0%	MCW 0.5%	MCW 1.0%
Low Energy	360 ± 42	394 ± 43	429 ± 37

- Sehr homogene Härteverteilung
- Durchschnittliche Härte korreliert mit dem Ni-Gehalt des Metallpulverfülldrahts zusammen
- Mit dem abnehmenden Delta-Ferrit-Gehalt bei steigendem Ni-Gehalt steigt die Härte an.

Mechanische Eigenschaften



Matrix
Delta Ferrit

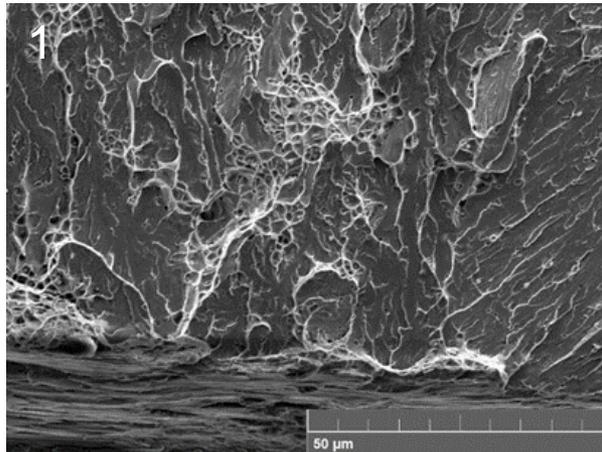
462 HV0.01
178 HV0.01

Mechanische Eigenschaften

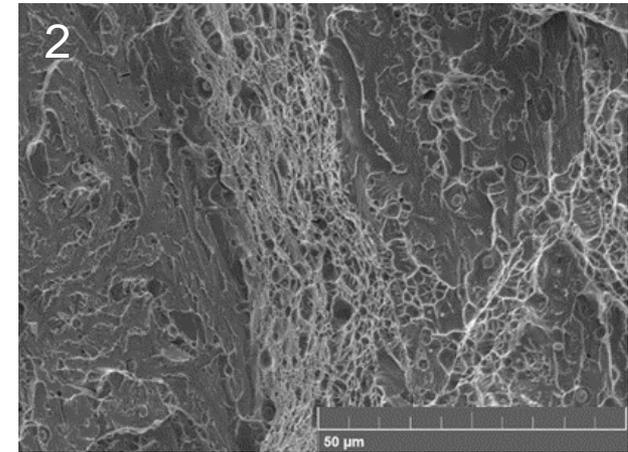
Metallpulver-FD
X10CrMo6-3
0 wt% Nickel



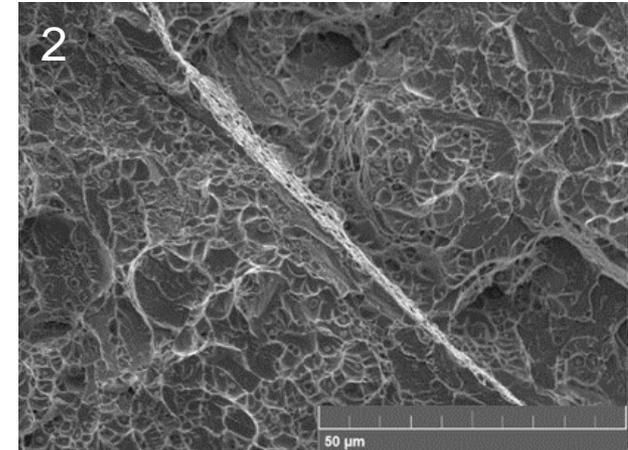
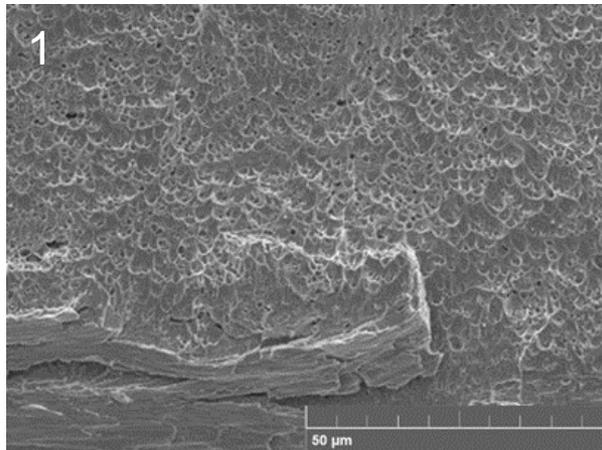
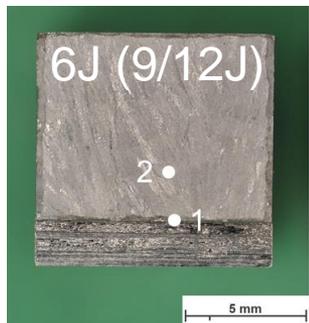
Risseinleitung



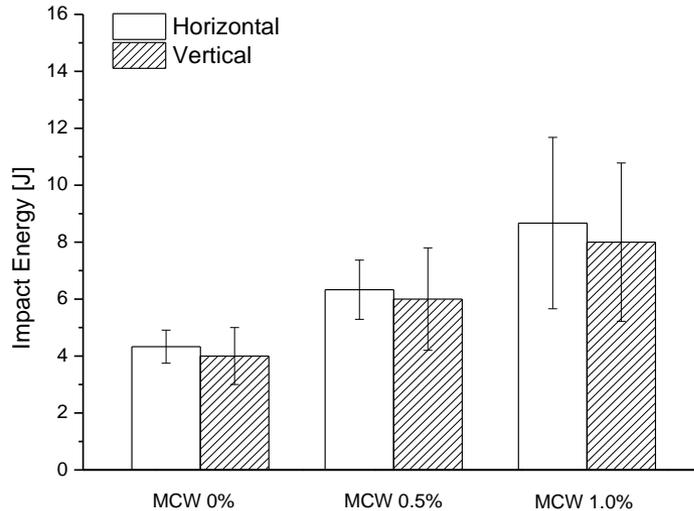
Rissausbreitung



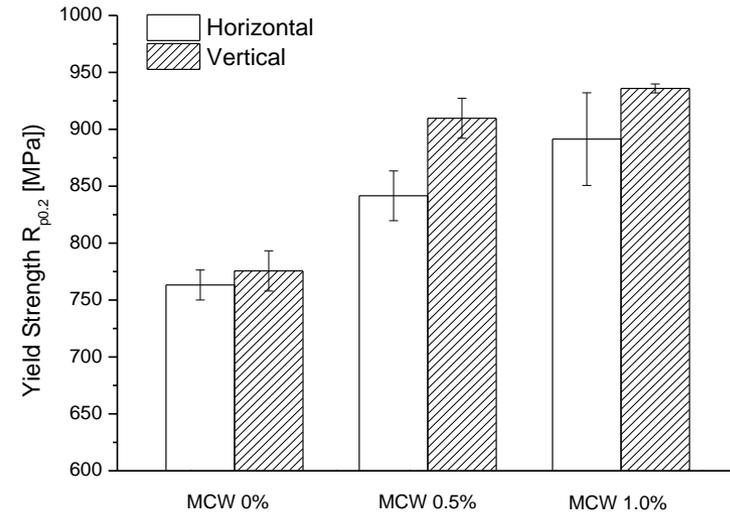
Metallpulver-FD
X10CrMo6-3
1.0 wt% Nickel



Mechanische Eigenschaften



Absorbed impact energy of AM material in vertical and horizontal direction for applied parameter sets low energy



Yield strength $R_{p0.2}$ of AM material in vertical and horizontal direction for applied parameter sets low energy

- Durch Erhöhung des Ni Gehalts steigt die Kerbschlagzähigkeit
- Durch Erhöhung des Ni Gehalts steigt die Dehngrenze
- Werte in horizontaler und vertikaler Richtung sind annähernd gleich

Zusammenfassung

- Metallpulverfülldraht mit CMT für WAAM geeignet
- Parameterfenster, Aufbauparameter und Schweißverfahren für MCW wurden bestimmt
- Grundlegende Charakterisierung
 - Gefüge
 - Mechanisch-technologische Eigenschaften
- Zugabe von Ni
 - Reduzierter δ -Ferrit Anteil
 - Veränderung der Morphologie von δ -Ferrit
 - Zunahme von Härte, Kerbschlagzähigkeit und Streckgrenze
- Fülldraht sehr effizientes Werkzeug für Werkstoffentwicklung

Ausweitung der Möglichkeiten des WAAM Prozesses durch Verwendung von Fülldrähten

Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik

N. Enzinger, F. Pixner, A. Zelić, M. Decherf, M. Lasnik |

26.02.2021