

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18.099 B

Thema

Beeinflussung von Nahteigenschaften und Prozessverhalten durch Einsatz basischer Schlackesysteme beim MSG-Fülldrahtschweißen von Ni-Basis-Legierungen

Berichtszeitraum

01.11.2016 bis 30.04.2019

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS

Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf

Forschungseinrichtung(en)

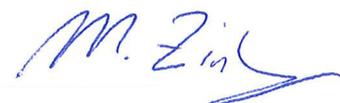
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, Lehrstuhl Fügetechnik

Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

Magdeburg, 23.09.2019

Dr.-Ing. Manuela Zinke



Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Bildverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	5
Anhangsverzeichnis	6
Formelverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	9
Formelzeichen	10
1 Zusammenfassung	11
2 Danksagung	12
3 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	13
3.1 Anlass für den Forschungsantrag	13
3.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Ergebnisse für KMU	14
4 Stand der Technik	14
4.1 Schweißbeignung von Ni-Basis-Legierungen	14
4.2 Lösungsansätze zur Vermeidung von Heißrissen in Ni-Basis-Legierungen.....	16
4.3 MSG-Schweißen von Ni-Basis-Legierungen.....	17
5 Forschungsziel und Lösungsweg	21
5.1 Forschungsziel.....	21
5.2 Arbeitshypothese	21
5.3 Lösungsweg zum Erreichen des Forschungszieles	21
6 Präzisierung der Arbeitspakete	23
7 Versuchskonzept und verwendete Gerätetechnik	25
7.1 Charakterisierung der eingesetzten MSG-Schweißtechnologien.....	25
7.2 Charakterisierung der Versuchswerkstoffe	26
7.3 Geräte- und Messtechnik zum MSG-Schweißen	26
7.4 Geräte- und Messtechnik für die Heißrissprüfverfahren.....	27
7.5 Verwendete Prüftechnik.....	30
8 Forschungsergebnisse	31
8.1 Grundlegende Charakterisierung der Versuchswerkstoffe.....	31
8.1.1 Versuchsplan und -durchführung.....	31
8.1.2 Ergebnisse zur Charakterisierung der Schweißzusatzwerkstoffe	34
8.2 Verarbeitungseigenschaften der Füll- und Massivdrahtelektroden	35
8.2.1 Versuchsplan- und -durchführung.....	35
8.2.2 Ergebnisse der Parameterfindung	37
8.2.3 Ergebnisse zur Lichtbogenstabilität	43
8.2.4 Ergebnisse der optischen Beurteilung des Nahtaussehens und von Schlackeausbildung und -abgang.....	45
8.3 Eigenschaften der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 und DIN EN ISO 15792-1:2012	47
8.3.1 Versuchsplan und -durchführung.....	47
8.3.2 Ergebnisse der Untersuchung der reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 6847:2013.....	49
8.4 Ergebnisse der Heißrissprüfung mit dem PVR-Test	55
8.4.1 Versuchsplan und -durchführung.....	55
8.4.2 MSG-Schweißen von Auftragraupen auf artgleichen Grundwerkstoffproben (Variante 1a).....	56
8.4.3 MSG-Schweißen von Auftragraupen auf artfremden Grundwerkstoffproben (Variante 1b).....	57
8.4.4 WIG-Umschmelzung von reinem MSG-Schweißgut (Variante 2a)	57

8.4.5	WIG-Umschmelzung von MSG-Schweißgut aus Verbindungsschweißungen (Variante 2b).....	58
8.4.6	Zusammenfassung PVR-Versuche.....	59
8.5	Schweißplattieren mit den Fülldrahtelektroden vom Typ T Ni 6625.....	60
8.5.1	Versuchsplan und -durchführung.....	60
8.5.2	Ergebnisse der Prüfung der MSG-Plattierungen	60
8.6	Herstellung der V-Nähte mit hoch Ni-haltigen Füll- und Massivdrahtelektroden und Prüfung	66
8.6.1	Versuchsplan und -durchführung.....	66
8.6.2	Ergebnisse der artgleichen MSG-Schweißverbindungen in PA (Blechdicke 5 mm und 12-14 mm).....	69
8.6.3	Ergebnisse des MSG-Schweißens am X8Ni9 (Blechdicke 17 mm) mit dem Schweißzusatz vom Typ Ni 6625 in PA- und PC-Position	75
8.7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	78
9	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des ursprünglichen Forschungsantrages und Schlussfolgerungen aus den Forschungsergebnissen	79
10	Erläuterungen zur Verwendung der Zuwendungen	81
11	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen.....	82
12	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	83
13	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	85
14	Literatur	86
15	Anhang.....	91

Bildverzeichnis

Bild 1:	Schematische Darstellung von Einflussfaktoren auf die Heißrissneigung.....	15
Bild 2:	REM-Aufnahme (BSE) auftretender Mikroheißrisse im MSG-Schweißgut von S Ni 6625 und EDX-Analyse interdendritischer Mo- und Nb-reicher Ausscheidungen [40]	17
Bild 3:	Gegenüberstellung der Abschmelz-leistung von Massiv- und Fülldrahtelektrode (Ø 1,2 mm) [11]	18
Bild 4:	Korrosionsabtrag verschiedener NiCrMo-Legierungen bei der Prüfung auf IK (ASTM G28, A) [11]	18
Bild 5:	Lösungsweg zum Erreichen des Forschungszieles (schematisch)	22
Bild 6:	Versuchsstand zum MSG-Auftrag- und Verbindungsschweißen (links) und Messsystem WeldAnalyst der Fa. HKS Prozesstechnik (rechts).....	27
Bild 7:	Prinzipielle Darstellung des PVR-Versuches.....	28
Bild 8:	Beispiel für Form und Abmessungen eingeschweißten 5 mm dicken PVR-Probe und PVR-Versuchsstand mit MSG-Brenner und Probe (Variante 1a).....	29
Bild 9:	Überblick über die Untersuchungsgegenstände und Analysemethoden zur grundlegenden Charakterisierung der Versuchswerkstoffe.....	31
Bild 10:	Grundlegendes Vorgehen der Button-Melt-Technik.....	32
Bild 11:	Vorgehen zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Fülldrahtelektrodenhüllen mittels Röntgenfluoreszenz-Analysen	33
Bild 12:	Vorgehen der REM-EDX Analyse an den Fülldrahtelektroden (links: Messpunkte am Querschliff einer Fülldrahtelektrode, rechts: präparierte Schlacke)	33
Bild 13:	Querschliffe der Fülldrahtelektroden (Lichtmikroskopie oder REM(BSE)-Aufnahme).....	34
Bild 14:	Allgemeines Vorgehen zur Untersuchung der Verarbeitungseigenschaften.....	35
Bild 15:	Arbeitsbereiche am Beispiel der SZW vom Typ Ni 6083, Ni 6082 und Ni 6182	37
Bild 16:	Arbeitsbereiche am Beispiel der SZW vom Typ Ni 6083, Ni 6082 und Ni 6182	37
Bild 17:	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen - Schweißzusatz Typ Ni 6625	40
Bild 18:	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen - Schweißzusatz Typ Ni 6083, Ni 6082, Ni 6182.....	41
Bild 19:	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen - Schweißzusatz Typ Ni 6276	42
Bild 20:	Lichtbogenstabilität in Abhängigkeit von den eingestellten Schweißparametern am Beispiel des basischen Fülldrahtes T Ni 6083 B	44
Bild 21:	Kategorien zur qualitativen Beurteilung der Schweißnaht mit Sichtprüfung	45
Bild 22:	Bewertungskriterien zur quantitativen Bewertung des Schlackeabgangs	46
Bild 23:	Ergebnisse der quantitativen Beurteilung der Schlackeausbildung und -abgang bei Schweißungen mit einem Drahtvorschub von 10 m/min.....	47
Bild 24:	Vorgehensweise zu Erstellung reiner Schweißgüter (DIN EN ISO 6847:2013 [60])	48
Bild 25:	Probenentnahmeplan der mehrlagigen Auftragschweißungen (links: Draufsicht, rechts: Querschliff)	48
Bild 26:	Nahtgeometrie zur Erzeugung reiner Schweißgutproben nach DIN EN ISO 15792-1 [61].....	49
Bild 27:	Prüfprobenplan bei den reinen Schweißgütern nach DIN EN ISO 15792-1 [61]	49

Bild 28:	Ergebnisse der Sauerstoffbestimmung an den reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] mittels TGSE	50
Bild 29:	Ergebnisse der Stickstoffbestimmung an den reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] mittels TGSE	50
Bild 30:	Ergebnisse der Kohlenstoffbestimmung an den an den reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] mittels TGSE	51
Bild 31:	Ergebnisse der Kohlenstoffbestimmung an den an den reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] mittels TGSE	51
Bild 32:	PT-geprüfte Querschliffe der reinen Schweißgüter der SZW vom Typ Ni 6625	52
Bild 33:	Heißrissneigung der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 [60]	53
Bild 34:	Beispiel für offene Schlauchporen mit Porenkanal in die Tiefe	53
Bild 35:	Grafische Darstellung der Kerbschlagarbeiten der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 15792-1 [61] bei RT.....	54
Bild 36:	Ergebnisse für den 1. Heißriss (Erstarrungsris) bei der fremdbeanspruchten Heißrissprüfung mit dem PVR-Versuch beim Schweißen von MSG-Einzelraupen auf alloy 625, alloy 800 H und alloy C-276, Variante 1a	56
Bild 37:	Ergebnisse für den 1. Heißriss bei der fremdbeanspruchten Heißrissprüfung mit dem PVR-Versuch beim Schweißen von MSG-Einzelraupen auf Kesselstahl, Variante 1b.....	57
Bild 38:	Ergebnisse der fremdbeanspruchten Heißrissprüfung mit dem PVR-Versuch - WIG-Umschmelzungen der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 15792-1, Variante 2a.....	58
Bild 39:	Ergebnisse der fremdbeanspruchten Heißrissprüfung mit dem PVR-Versuch - WIG-Umschmelzungen der Mischschweißgüter der V-Nähte, Variante 2b.....	59
Bild 40:	Probenentnahmeplan der Schweißplattierungen	60
Bild 41:	Offene längliche Gasblaseneindrücke auf der Schweißgutoberfläche des Fülldrahtelektrode vom Typ T Ni 6625 P* in Schweißposition PA	62
Bild 42:	Fotografie eines Röntgenfilmes der 2-lagigen Schweißung der FDE T Ni 6625 P**	63
Bild 43:	Anbindungsprüfung nach ASTM A265:2019 [81], links: Prinzip und Aufbau der Anbindungsprüfung, rechts: geprüfte Plattierung	64
Bild 44:	Kraft-Weg-Verläufe der Haftscherkraftversuche.....	64
Bild 45:	Querschliff und Lage der Härtemessungen (weiße Punkte) am Beispiel der basischen Fülldrahtelektrode T Ni 6625 B	65
Bild 46:	Mittlere Härtewerte der ein- und zweilagigen Schweißplattierungen, des Grundwerkstoffes und der WEZ	65
Bild 47:	Verwendete Schweißunterlagen zum Verbindungsschweißen in den Schweißpositionen PA (links) und PC (rechts), links oben: Aufspannung mit Spannpratzen. Links unten: Schrumpfbehindertes Aufschiessen auf steifer Grundplatte aufgeschweißt und Fixierung mit Spannpratzen, rechts: Aufspannung mit Blechen.....	67
Bild 48:	Verwendete Schweißfolgen und Fugenformen	68
Bild 49:	Ergebnisse der Zugversuche an den Querszugproben der V-Nähte der 5 mm dicken Bleche	71
Bild 50:	Ergebnisse der Zugversuche an den Querszugproben der V-Nähte der 12 bzw. 14 mm dicken Bleche.....	71

Bild 51:	Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche an den MSG-Schweißverbindungen an den 12-14 mm dicken Blechen.....	73
Bild 52:	Poren im Schweißgut des Fülldrahtes T Ni 6625 P** in Position PC beim Schweißen von X8Ni9	76
Bild 53:	Ergebnisse der Querkzugversuche an den MSG-Schweißverbindungen (X8Ni9, t = 17 mm) in unterschiedlichen Positionen bei Raumtemperatur	77
Bild 54:	Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche an den MSG-Schweißnähten an den 17 mm dicken Blechen aus dem kaltzähen X8Ni9 bei Einsatz der Füll- und Massivdrahtelektroden vom Typ Ni 6625	77
Bild 55:	Ermittelte Abschmelzleistungen am Beispiel von Füll- und Massivdrahtelektroden vom Typ Ni 6182, Ni 6082 und Ni 6083.....	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anhaltswerte für maximale Grenzwerte schädlicher Spurenelemente in Superlegierungen [35].....	16
Tabelle 2:	Nahtunregelmäßigkeiten in entnommenen Querschliffen (Anzahl: 4 bis 6) von artgleichen MSG-Schweißnähten (Nahtlänge: 500 mm) verschiedener Ni-Basis-Legierungen [40]	17
Tabelle 3:	Zusatz- und Grundwerkstoffkombinationen im Forschungsprojekt.....	23
Tabelle 4:	Überblick über die Varianten des PVR-Versuchs	28
Tabelle 5:	Allgemeine Vorgehensweise zur Auswertung der PVR-Versuche	29
Tabelle 6:	Eingesetzte Prüftechnik für die Bestimmung der Eigenschaften der Auftrag- und Verbindungsschweißungen	30
Tabelle 7:	Randbedingungen für das MSG-Schweißen	36
Tabelle 8:	Herstellerseitige Empfehlungen zum MSG-Schweißen für die verschiedenen Ni-Basis-Füll- und Massivdrahtelektroden.....	36
Tabelle 9:	Ergebnisse der Parametervariation der Fülldrahtelektroden vom Typ Ni 6625	38
Tabelle 10:	Ergebnisse der Parametervariation der Fülldrahtelektroden vom Typ Ni 6083, Ni 6082 und 6182	38
Tabelle 11:	Ergebnisse der Parametervariation der Fülldrahtelektroden vom Typ Ni 6276	39
Tabelle 12:	Auswertung der Ergebnisse der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der MSG-Schweißungen mit den Fülldrahtelektroden	39
Tabelle 13:	Ergebnisse der Beurteilung der Schlackeausbildung und -abgang bei Schweißungen mit einem Drahtvorschub von 10 m/min	46
Tabelle 14:	Ermittelte Einzelwerte der Kerbschlagarbeiten der reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 15792-1 [61] bei RT.....	54
Tabelle 15:	Abmessungen der Quer und Seitenbiegeproben aus den reinen Schweißgutproben entsprechend DIN EN ISO 5173:2012 [73].....	54
Tabelle 16:	Versuchsrandbedingungen der Quer- und Seitenbiegeprüfung an den reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 5173:2012 [73].....	55
Tabelle 17:	Ergebnisse der Quer- und Seitenbiegeprüfung der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 15792-1 [61]	55
Tabelle 18:	Prozess- und Prüfparameter zum MSG-Schweißen der Auftragraupen im PVR-Versuch (Variante 1a und 1b)	56
Tabelle 19:	Prozess- und Prüfparameter zum WIG-Schweißen der Blindraupen im PVR-Versuch (Umschmelzung von reinem MSG-Verbindungsschweißgut).....	58

Tabelle 20: Prozess- und Prüfparameter zum WIG-Schweißen der Blindraupen im PVR-Versuch (Umschmelzung des Schweißguts von V-Nähten)	59
Tabelle 21: Zusammenfassung der Ergebnisse der Heißrissprüfung mit dem PVR-Versuch	59
Tabelle 22: Einstellwerte zum Schweißplattieren in Position PA und PF	61
Tabelle 23: Aufmischungsgrade in Abhängigkeit von der Brennerneigung	61
Tabelle 24: Ergebnisse der Durchstrahlungsprüfung der Schweißplattierungen	62
Tabelle 25: Ergebnisse der Anbindungsprüfung nach ASTM A 265:2019 [81]	64
Tabelle 26: Abmessungen der Quer und Seitenbiegeproben aus den MSG-Schweißplattierungen mit den Fülldrahtelektroden vom Typ T Ni 6625	65
Tabelle 27: Prüfbedingungen der Quer- und Seitenbiegeprüfung an den MSG-Schweißplattierungen mit den Fülldrahtelektroden vom Typ T Ni 6625	65
Tabelle 28: Ergebnisse der Quer- und Seitenbiegeprüfung der Schweißplattierungen mit den Ni-Basis Fülldrahtelektroden vom Typ T Ni 6625	66
Tabelle 29: Übersicht über die verwendeten Grund- und Zusatzwerkstoffkombinationen und den Schweißpositionen beim MSG-Verbindungsschweißen	66
Tabelle 30: Randbedingungen für die MSG-V-Nähte.....	67
Tabelle 31: Umfang der zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfungen der V-Nähte an den Grundwerkstoffen alloy 625, alloy 800 H, alloy C-276 und X8Ni9	68
Tabelle 32: Auszug aus der EN ISO 5817:2012 bezogen auf die Zulässigkeit von Oberflächen- und Inneren Unregelmäßigkeiten	69
Tabelle 33: Ergebnisse der lichtmikroskopischen Auswertung der zwei Querschliffe der Stumpfnähte an alloy 625, alloy 800 H, und alloy C-276.....	70
Tabelle 34: Abmessungen der Flachzugproben aus den V-Nähten (Maße in Millimeter).....	70
Tabelle 35: Abmessungen der Biegeproben der V-Nähte an alloy 625, alloy 800 H und alloy C-276 nach DIN EN ISO 5173:2012 [73]	71
Tabelle 36: Prüfbedingungen der Quer- und Seitenbiegeprüfung der V-Nähte an alloy 625, alloy 800 H und alloy C-276 nach DIN EN ISO 5173:2012 [73]	72
Tabelle 37: Ergebnisse der Prüfung der Biegeproben aus den V-Nähten von alloy 625, alloy 800 H und alloy C-276	72
Tabelle 38: Ergebnisse der Lochkorrosionsprüfung nach ASTM G48:2015, Methode C der Verbindungsschweißungen mit den Schweißzusätzen des Typs Ni 6625	74
Tabelle 39: Ergebnisse der Korrosionsprüfung nach ASTM G48:2015, Methode C der Verbindungsschweißungen mit den Schweißzusätzen des Typs Ni 6276.....	75
Tabelle 40: Ergebnisse der lichtmikroskopischen Auswertung der 2 Querschliffe der V-Nähte an X8Ni9	76
Tabelle 41: Abmessungen der Flachzugproben der Form E nach DIN 50125:2016 [84] der V-Nähte am X8Ni9 (Blechdicke 17 mm), Maße in Millimeter	76

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Chemische Zusammensetzung und mechanisch-technologische Gütewerte der Grundwerkstoffe gemäß [65; 66; 67] bzw. APZ der Werkstoffhersteller	91
Anhang 2: Chemische Zusammensetzung und mechanisch-technologische Gütewerte der reinen Schweißgüter der Schweißzusätze gemäß [1; 85] und APZ der Werkstoffhersteller	92

Anhang 3: Chemische Zusammensetzung der WIG-Buttons, der FDE-Bänder und der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] der Drahtelektroden vom Typ Ni 6625.....	93
Anhang 4: Chemische Zusammensetzung der WIG-Buttons, der FDE-Bänder und der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] der Drahtelektroden vom Typ Ni 6083, 6182 und 6082.....	94
Anhang 5: Chemische Zusammensetzung der WIG-Buttons, der FDE-Bänder und der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] der Drahtelektroden vom Typ Ni 6276.....	95
Anhang 6: Chemische Zusammensetzung der Füllungen und der Schlacke der Fülldrahtelektroden in wt.-%.....	96
Anhang 7: Ergebnisse der metallographischen Untersuchung bei der Parameterfindung der Füll- und Massivdrahtelektroden.....	96
Anhang 8: U-I-, U-I-t-Diagramme und Boxplots der Schweißzusätze vom Typ Ni 6625.....	97
Anhang 9: U-I-, U-I-t-Diagramme und Boxplots der Schweißzusätze vom Typ T Ni 6082, 6083, 6182, S Ni 6082.....	98
Anhang 10: U-I-, U-I-t-Diagramme und Boxplots der Schweißzusätze vom Typ Ni 6276.....	99
Anhang 11: Quantitativer Vergleich der Lichtbogenstabilität anhand von Zentral-Extremwerten und Streuungsmaße.....	99
Anhang 12: Ermittelte Sauerstoff- und Stickstoffgehalte der reinen Schweißgüter, gefertigt nach DIN EN ISO 6847:2013 [60].....	100
Anhang 13: Querschliffe (Ausschnitt) der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 – Typ Ni 6625.....	101
Anhang 14: Querschliffe (Ausschnitt) der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 – Typ Ni 6082, Ni 8182 und Ni 6082.....	101
Anhang 15: Querschliffe (Ausschnitt) der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 – Typ Ni 6276.....	102
Anhang 16: Ergebnisse der Durchstrahlungsprüfung der reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] (Steiflankennaht).....	103
Anhang 17: Querschliffe der Steiflankennähte der reinen Schweißgüter des Typs Ni 6625 nach DIN EN ISO 15792-1 [61].....	103
Anhang 18: Querschliffe der Steiflankennähte der reinen Schweißgüter des Typs Ni 6083, 8182, 6082 nach DIN EN ISO 15792-1 [61].....	104
Anhang 19: Querschliffe der Steiflankennähte der reinen Schweißgüter des Typs Ni 6625 nach DIN EN ISO 15792-1 [61].....	104
Anhang 20: Ermittelte Schweißparameter und Nahtaussehen der MSG-Einzelraupen beim PVR-Test auf Alloy 625 (Variante 1a) mit Schweißzusätzen des Typs Ni 6625.....	105
Anhang 21: Ermittelte Schweißparameter und Nahtaussehen der MSG-Einzelraupen beim PVR-Test auf alloy 800 H (Variante 1a) mit Schweißzusätzen des Typs Ni 6082, Ni 6083 und Ni 6182.....	106
Anhang 22: Ermittelte Schweißparameter und Nahtaussehen der MSG-Einzelraupen beim PVR-Test auf alloy C-276 (Variante 1a) mit Schweißzusätzen des Typs Ni 6276.....	107
Anhang 23: Ermittelte Schweißparameter und Nahtaussehen der MSG-Einzelraupen beim PVR-Test auf S355NL (Variante 1b) mit Schweißzusätzen des Typs Ni 6625.....	108

Anhang 24: Ermittelte Schweißparameter und Nahtaussehen der MSG-Einzelraupen beim PVR-Test auf S355NL (Variante 1b) mit Schweißzusätzen des Typs Ni 6082, Ni 6083 und Ni 6182	109
Anhang 25: Ermittelte Schweißparameter und Nahtaussehen der MSG-Einzelraupen beim PVR-Test auf S355NL (Variante 1b) mit Schweißzusätzen des Typs Ni 6276 (Variante 1b)	110
Anhang 26: Oberflächen und Querschliffe der 1- und 2-lagigen Schweißplattierungen in Schweißposition PA und PF	111
Anhang 27: Chemische Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Schichthöhe an den 2-lagigen Schweißplattierungen	112
Anhang 28: Probenentnahmepläne für die zerstörende Prüfung der V-Nähte an den 5 mm dicken Blechen (links) und 12-14 mm dicken Blechen (rechts) von alloy 625, alloy 800 H und alloy C-276	112
Anhang 29: Probenentnahmepläne für die zerstörende Prüfung der V-Nähte an den 17 mm dicken Blechen des X8Ni9	113
Anhang 30: Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung der V-Nähte an den 5 mm und 12/14 mm dicken Blechen	113
Anhang 31: Querschliffe, Nahtoberflächen und Schweißparameter der V-Nähte mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6625 an den 5 mm dicken Blechen	114
Anhang 32: Querschliffe, Nahtoberflächen und Schweißparameter der V-Nähte mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6082, Ni 6083 und Ni 6182 an den 5 mm dicken Blechen	115
Anhang 33: Querschliffe, Nahtoberflächen und Schweißparameter der V-Nähte mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6276 an den 5 mm dicken Blechen	116
Anhang 34: Querschliffe, Nahtoberflächen und Schweißparameter der V-Nähte mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6625 an den 12 mm dicken Blechen von alloy 625	117
Anhang 35: Querschliffe, Nahtoberflächen und Schweißparameter der V-Nähte mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6082, Ni 6083 und Ni 6182 an den 14 mm dicken Blechen von alloy 800 H	118
Anhang 36: Querschliffe, Nahtoberflächen und Schweißparameter der V-Nähte mit den SZW vom Typ Ni 6276 an den 12 mm dicken Blechen von alloy C-276	119
Anhang 37: Querschliffe und Schweißparameter der V-Nähte mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6625 an den 17 mm dicken Blechen des X8Ni9 in PA	119
Anhang 38: Querschliffe und Schweißparameter der V-Nähte mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6625 an den 17 mm dicken Blechen des X8Ni9 in PC	120
Anhang 39: Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche an den V-Nähten der 17 mm dicken Bleche aus dem kaltzähen X8Ni9 bei Einsatz der SZW vom Typ Ni 6625	121

Formelverzeichnis

Formel 1: Basizitätsindex der Füllung nach Boniszewski (Oxid-/Fluorid-Konzentrationen in Gew.-%) [58]	20
Formel 2: Basizitätsindex der erstarrten Schlacke nach Bauné - erweitert durch Vallant (Oxid-/Fluorid-Konzentrationen in mol-%) [45]	20
Formel 3: Berechnung der kritischen Verformungsgeschwindigkeit	28
Formel 4: Bestimmung der Füllgrade der Fülldrahtelektroden nach [76]	31
Formel 5: Bestimmung der Ausbringung der Fülldrahtelektroden nach [76]	31

Abkürzungsverzeichnis

B	basische Schlacke
BSE	backscatterd electrons (zurückgestreute Elektronen)
CMT	Cold-Metal-Transfer (Firma Fronius)
CPT	Critical Pitting Temperatur (krit. Temperatur für Lochkorrosion)
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
FCB	Face Bend test for Cladding (oberseitige Biegeprobe mit Plattierung)
FDE	Fülldrahtelektrode
GW	Grundwerkstoff
ILB	Impulslichtbogen
IQA	Interquartilsabstand
LiBo	Lichtbogen
LK	Lochkorrosion
MDE	Massivdrahtelektrode
MSG	Metallschutzgas
OG	Obergrenze
P	rutile Schlacke, schnell erstarrend
PVR	Programmierter-Verformungs-Riss-Test
QS	Querschleiff
R	rutile Schlacke, langsam erstarrend
REM	Rasterelektronenmikroskop
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RSG	reines Schweißgut
RT	Raumtemperatur
RT-	-196 °C
SBB	Side Bend test for a Butt (Seitenbiegeprobe quer zur Stumpfnaht)
SBC	Side Bend test for Cladding (Seitenbiegeprobe mit Plattierung)
SG	Schweißgut
SLB	Sprühlichtbogen
SSQ	Schweißstromquelle
SZW	Schweißzusatzwerkstoff
TFBB	Transverse Face Bend Butt weld (Oberseitige Stumpfnaht-Querbiegeprobe)
TGSE	Trärgasschmelzextraktion
TIS	Temperaturintervall der Sprödigkeit
UG	Untergrenze
WIG	Wolfram-Inert-Gas
W.-Nr.	Werkstoffnummer

Formelzeichen

a	m/s ²	Beschleunigung
α	°	Biegewinkel bei der Biegeprüfung
l_k	mm	Kontaktrohrabstand
f	Hz	Impulsfrequenz
Δ Max	-	Differenz vom Mittelwert zum maximalen Messwert
Δ Min	-	Differenz vom Mittelwert zum minimalen Messwert
I_G	A	Grundstrom
I_S	A	Schweißstrom (von SSQ ausgegebener Mittelwert)
I_P	A	Impulsstrom
KV	J	Kerbschlagarbeit bei Probe mit V-Kerbe
$L_{1.HR}$	mm	Abstand vom Nahtanfang bis zum Auftreten des ersten Risses
m_{Band}	g	Masse der Hülle des Fülldrahtes
m_{Draht}	g	Masse des Gesamtdrahtes
r	-	Spannweite
R_m	MPa	Zugfestigkeit
s	-	Standardabweichung
t	mm	Blechdicke
U_s	V	Schweißspannung
v_D	m/min	Drahtvorschubgeschwindigkeit
v_{kr}	mm/min	kritische Verformungsgeschwindigkeit
v_s	cm/min	Schweißgeschwindigkeit
X_m	-	Median
\bar{X}	-	arithmetischer Mittelwert

1 Zusammenfassung

Der Einsatz von schlackeführenden Fülldrahtelektroden beim Metall-Schutz-Gas- (MSG)-Schweißen von Ni-Basis-Legierungen ist zurzeit noch wenig verbreitet. Das hat u. a. damit zu tun, dass diese Schweißzusatzwerkstoffe erst im Jahr 2012 mit der Einführung der DIN EN ISO 12153:2012 [1] standardisiert wurden, und sie bis heute auch keine Erwähnung in den DVS-Regelwerken finden.

Ni-Basis-Fülldrahtelektroden weisen gegenüber -Massivdrahtelektroden gemäß dem Schrifttum einige technologische und metallurgische Vorteile auf. So besteht die Möglichkeit des MSG-Schweißens ohne Impulslichtbogentechnik in einem breiteren Parameterfenster unter Nutzung preiswerter Standard-Mischgase vom Typ M21 und schlackentypabhängig in verschiedenen Schweißpositionen. Infolge eines verbesserten Einbrand- und Benetzungsverhaltens ist zudem eine geringere Neigung zum Auftreten von Bindefehler oder von unzulässigen Abweichungen in Nahtabmessung und -form zu erwarten.

Eine große Herausforderung beim Schweißen von Ni-Basis-Legierungen bildet die Vermeidung von Heißrissen. Diese werden u. a. verursacht durch die geringere Löslichkeit von verunreinigenden Elementen, wie S, P, Si, Pb oder B, im kfz-Gitter und der dadurch begünstigten Ausbildung von Seigerungen und niedrig schmelzenden Phasen, sowie dem hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten, der große Dehnungen bzw. Dehnraten in den geschweißten Bauteilen hervorruft. Gemäß dem Schrifttum sollen basische gegenüber rutilen Fülldrahtelektroden Vorteile im Hinblick auf eine geringere Heißrissempfindlichkeit aufweisen, da die desoxidierende Wirkung der basischen Schlackenbestandteile (z. B. Manganoxid) den Anteil an o. g. heißrissfördernden Elementen im Schweißgut reduziert. Zudem sinkt mit zunehmender Basizität der Sauerstoffgehalt im Schweißgut, was sich vorteilhaft auf die mechanisch-technologischen Güterwerte auswirken soll.

In diesem Forschungsprojekt wurde die MSG-Schweißneigung von Ni-haltigen Fülldrahtelektroden vom Typ Ni 6625, Ni 6082, Ni 6083, Ni 6182 und Ni 6276 mit basischer und rutiler Schlackencharakteristik untersucht und vergleichend zu adäquaten Massivdrahtelektroden betrachtet. Im Fokus standen dabei die Verarbeitungseigenschaften, das Auftreten von Nahtunregelmäßigkeiten, insbesondere von Heißrissen, und die mechanisch-technologischen Eigenschaften von Verbindungsschweißungen.

Zu den wichtigsten Ergebnissen gehören die folgenden Erkenntnisse:

- Die basischen Fülldrahtelektroden weisen eine geringere Lichtbogenstabilität als die rutilen Fülldrahtelektroden auf und neigen aus diesem Grund häufiger zur Spritzerbildung und zu einer ungleichförmigen Schweißnaht. Außerdem führen die basischen Fülldrahtelektroden zu einem vergleichsweise hohen Anteil an fest anhaftender Schlacke auf der Schweißnaht, welcher lediglich durch Schleifen entfernbar ist.
- Entgegen der in der Literatur getroffenen Aussage lässt sich anhand von selbst- und fremdbeanspruchten Heißrissprüfungen keine höhere Heißrissbeständigkeit der Schweißnähte basischer ggü. rutiler Fülldrahtelektroden belegen.
- Die mechanisch-technologischen Güterwerte der Schweißnähte der basischen Fülldrahtelektroden liegen lediglich auf dem Niveau der rutilen Fülldrahtelektroden bzw. sogar leicht darunter.

Die erzielten Ergebnisse tragen dazu bei, die Fertigungssicherheit beim Verbindungsschweißen im Apparate- und Anlagenbau der Öl- und Gasindustrie, der Chemie- und Petrochemie, der Flüssigerdgas (LNG)- und Flüssigerdölgas (LPG)-Industrie sowie beim Auftragschweißen von Kesselstählen zu gewährleisten bzw. zu erhöhen.

Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.

2 Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr.: 18.099 B / DVS-Nr.: 01.086 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

An dieser Stelle möchte sich die Forschungseinrichtung auch bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses (PA) für die materielle Unterstützung und die wertvollen fachlichen Hinweise bedanken.

Unser Dank gilt:

Dr.-Ing. S. Krebs / Dipl.-Ing.Foerster	BORSIG Process Heat Exchanger GmbH, Berlin
Dipl.-Ing. R. Scholz	CiF GmbH, Grünstadt
Dr.-Ing. F. Stahl	Deutsche Nickel GmbH, Schwerte
Prof. Dr.-Ing. R. Rosert	Dr. Rosert RCT GmbH, Dresden
Dipl.-Ing. R. Paschold	ESAB Welding Cutting GmbH, Karben
Dr.-Ing. A. M. Sevim	EIPA Consult GmbH, Aachen
Dipl.-Ing. I. Pfeiffer	Fronius Deutschland GmbH, Neuhof-Dorfborn
Dipl.-Ing. T. Garske	IMO Anlagenmontagen GmbH, Merseburg
Dipl.-Ing. R. Seydel	Meeraner Dampfkesselbau GmbH, Meerane
Dipl.-Ing. A. Heydenreich	MSS GmbH, Barleben
Dipl.-Ing. L. Richter	Siemens AG, Berlin
Dipl.-Ing. B. Hoberg	Böhler Schweißtechnik Deutschland GmbH, Hamm
Dipl.-Ing. B. Schneider	W. Pilling Kesselfabrik GmbH & Co KG, Altena
Dr. rer. nat. H. Mühlbauer	Welding Alloys Deutschland GmbH, Wachtendonk
Dipl.-Ing. K. Gerner	Uhlig Rohrbogen GmbH, Langelsheim
Dipl.-Ing. A. Baldus	Quast Anlagentechnik GmbH, Eschweiler

3 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

3.1 Anlass für den Forschungsantrag

Zum artgleichen MSG-Schweißen von Ni-Basis-Legierungen mit Massivdrahtelektroden werden aufgrund der verbesserten Tropfenablösung und reduzierten Spritzerneigung der Impulslichtbogen und kostenintensive spezielle Mehrkomponenten-Schutzgasmische genutzt. [2] Die geringen, jedoch notwendigen Zugaben von CO₂, verbessern zwar das Benetzungsverhalten der Schmelze, können jedoch beim Mehrlagenschweißen die Lagenüberschweißbarkeit und das Korrosionsverhalten verschlechtern. Zudem besteht beim MSG-Schweißen dickwandiger Ni-Basis-Bauteile trotz des Einhaltens vorgegebener Schweißparameter die Gefahr von unzulässigen Heißbrissen und/oder Bindefehlern. [3]

Für verschiedene praxisrelevante vollaustenitische Fe- und Ni-Basis-Legierungen wurden in den vergangenen Jahren ausgewählte schlackeführende artgleiche Fülldrahtelektroden zum Auftrag- und Verbindungsschweißen entwickelt. Während rutiler Fülldrähte für das MSG-Schweißen von Ni-Basis-Legierungen seit längerer Zeit kommerziell verfügbar sind, finden sich nur vereinzelt Ni-Basis-Fülldrahtelektroden mit rein basischer Schlacke auf dem Markt, beispielsweise für alloy 800 H (1.4876), alloy 600 (2.4816), alloy 625 (2.4856) und alloy C-276 (2.4819). Hauptanwendungsfelder von Ni-Basis-Fülldrähten sind das Verbindungsschweißen im Apparate- und Anlagenbau der Öl- und Gasindustrie, der Chemie- und Petrochemie, der Flüssigerdgas (LNG)- und Flüssigerdölgas (LPG)-Industrie sowie das Cladden von C-Stählen.

Ni-Basis-Fülldrahtelektroden bieten gegenüber Massivdrahtelektroden in Abhängigkeit vom genutzten Schlackentyp verschiedene technologische Vorteile, wie gute Handhabbarkeit, gute Positionsverschweißbarkeit, sehr geringe Schweißnahtoxidation, bessere Benetzung, tieferer Einbrand, hohe Lichtbogenstabilität mit feintropfigem Werkstoffübergang auch ohne Einsatz von Impulslichtbogentechnik, größere Parameterfenster und die Einsatzmöglichkeit preiswerter Standard-Ar-CO₂-Mischgase. [4; 5; 6; 7; 8; 9; 10] Demgegenüber stehen höhere Zusatzwerkstoffkosten und Nebenzeiten durch die Schlackeentfernung.

Schweißgüter rutiler Ni-Basis-Fülldrahtelektroden sind zudem sehr heißrissempfindlich. [11; 12] Hier kann eine basische Schlackencharakteristik signifikante Vorteile bringen. Dennoch finden basische Fülldrähte für das Schweißen von Ni-Basis-Legierungen aufgrund der geringen kommerziellen Verbreitung und der lange Zeit fehlenden Normung bislang nur bedingt Anwendung, obwohl sie sich infolge der desoxidierenden Wirkung vorteilhaft auf eine Reduzierung der Heißrisseignung und auf die Verbesserung der mechanisch-technologischen Güterwerte auswirken können. [13]

Die basischen Ni-Basis-Fülldrahtelektroden bieten somit einen vielversprechenden metallurgischen Lösungsansatz, das bekannte Problem der Heißrissebildung und Bindefehlergefahr zu beheben und qualitätsgerechte MSG-Schweißungen an Ni-Basis-Legierungen entsprechend DIN EN ISO 5817:2014 [14] mit sehr guten mechanisch-technologischen Güterwerten bei gleichzeitig hoher Produktivität und geringen Fertigungskosten zu erzeugen. Das Forschungsprojekt soll wesentliche Kenntnisse für die Entwicklung bzw. für die Weiterentwicklung von Ni-Basis-Fülldrahtelektroden mit basischer Schlackencharakteristik schaffen. Zudem dient es der Aufbereitung und Klarstellung der schweißmetallurgischen Möglichkeiten und Grenzen von rutilen und basischen Ni-Basis-Fülldrahtelektroden im Vergleich zu Massivdrahtelektroden.

3.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Ergebnisse für KMU

Das Schutzgasschweißen mit schlackeführenden Fülldrahtelektroden hat in den letzten Jahren eine zunehmende Bedeutung gewonnen. [15; 16; 17; 18] Der Fülldrahtanteil bei Zusatzwerkstoffen beträgt weltweit mehr als 10 %. [5]

2008 wurden in Deutschland ca. 400 t hochlegierte Fülldrahtelektroden für das Verbindungs- und Auftragschweißen in nahezu allen stahlverarbeitenden Bereichen, wie z. B. im Transportwesen, in der Energieerzeugung, im Stahl-, Berg- und Fahrzeugbau, in der Nahrungsmittelindustrie und in der chemischen und petrochemischen Industrie, verarbeitet. Dies entspricht in etwa 50 % des Bedarfs an hochlegierten Stabelektroden. [13] 2012 stieg der Verbrauch sogar auf etwa 586 t an. [19]

Die angestrebten Forschungsergebnisse haben ein hohes Innovationspotential für die Wirtschaftszweige Metallerzeugung und -bearbeitung, Maschinenbau und für die Herstellung von chemischen Erzeugnissen, da die basische Schlackencharakteristik bei Fülldrahtelektroden für das MSG-Schweißen von Ni-Basis-Legierungen für KMU nur wenig nutzbar gemacht worden ist. Von den Ergebnissen profitieren sowohl die Hersteller von Grund- und Zusatzwerkstoffen aus Ni-Basis als auch die Unternehmen der Chemie-, Offshore- und Umwelttechnik sowie des Kraftwerksbaus, die schweißtechnische Erzeugnisse aus diesen Legierungen produzieren (Anlagenhersteller) oder reparieren (Dienstleister). In diesen Bereichen gibt es eine Vielzahl von KMU, die ihre Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit und ihr regionales Standortprofil nur durch die Nutzung hochtechnologischer und qualitätssicherer Füge-technologien wesentlich steigern bzw. stärken können. Durch die anwendungsorientiert erarbeiteten Projektergebnisse können die deutschen KMU das MSG-Schweißen als etabliertes Verfahren qualitätssicherer und effizienter einsetzen, schnell und flexibel auf Anfragen reagieren, diese aufgrund der gesteigerten Prozesssicherheit treffend kalkulieren und die Aufträge zuverlässig erfüllen.

Auftretende unzulässige Heißrisse und Bindefehler in geschweißten Bauteilen aus Ni-Basiswerkstoffen erfordern eine z. T. sehr aufwendige Nacharbeit. Ist bei der Kalkulation für die Fertigungsschweißung das MSG-Schweißen mit Fülldrahtelektrode mit einer Abschmelzleistung von z. B. 6 kg/h zugrunde gelegt worden, und muss bei der Reparatur das manuelle WIG-Schweißen oder das E-Handschweißen mit einer Abschmelzleistung von 1-2 kg/h eingesetzt werden, so erhöht sich der Aufwand um das ca. 3-5fache. Derartige Szenarien stellen die Auftragsabwicklung, die Ertragsgrundlage und die Konkurrenzfähigkeit massiv in Frage. Daher bieten die Ni-Basis-Fülldrahtelektroden, trotz ihres ca. 1,5 bis 2 fach höheren Preises, eine wirtschaftliche Alternative zu Stab- oder Massivdrahtelektroden.

4 Stand der Technik

4.1 Schweißbeignung von Ni-Basis-Legierungen

Die schweißtechnische Verarbeitung von Ni-Basis-Legierungen ist durch ihre Sensibilität gegenüber dem Auftreten von Heißrissen in den Schweißnähten häufig als problematisch einzustufen. [20; 21] Heißrisse werden nach DIN EN ISO 17641-1:2004 [22] als "Werkstofftrennungen, die bei hohen Temperaturen längs der Korngrenzen (Dendritengrenzen) auftreten, wenn die Größe der Dehnungen und der Dehngeschwindigkeit ein bestimmtes Niveau überschreiten" definiert. Risse sind nach DIN EN ISO 5817:2014 [14] in Lichtbogenschweißnähten selbst nach der geringsten Bewertungsgruppe unzulässig und stellen in dynamisch beanspruchten Bauteilen generell die gefährlichste Schweißnahtunregelmäßigkeit dar [23]. Mikroheißrisse in Schweißnähten von dickwandigen Bauteilen sind mit den etablierten zerstörungsfreien Prüfmethoden zudem kaum detektierbar, so dass sie

entweder als Folge ihrer Kerbwirkung erst nach mehreren Jahren oder – mehr oder weniger zufällig – in metallographischen Schliffen von Arbeitsproben sichtbar werden. [24] Das Heißbrissverhalten wird von den drei Faktoren Metallurgie, Schweißverfahren und strukturmechanischem Bauteilverhalten beeinflusst. [25]

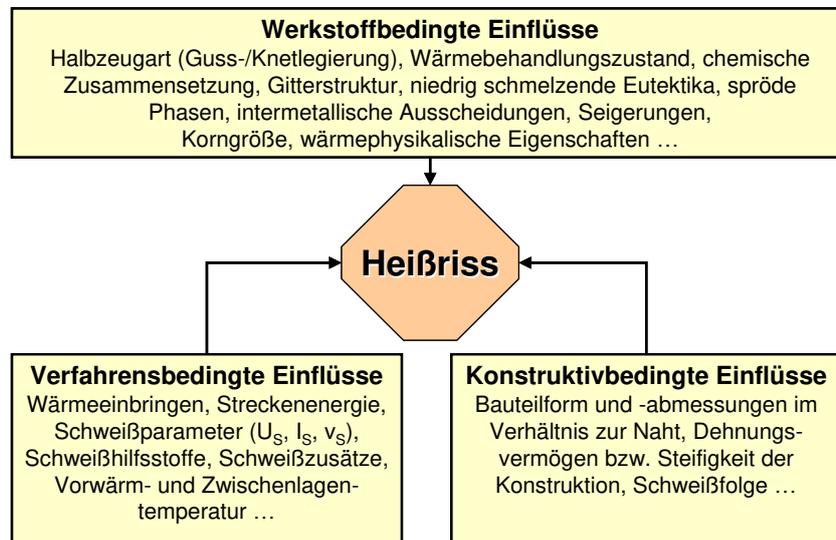


Bild 1: Schematische Darstellung von Einflussfaktoren auf die Heißbrissneigung

Die metallurgischen Ursachen für die sehr hohe Heißbrissensibilität der Ni-Basis-Schweißgüter liegen vor allem in der geringen Löslichkeit und Diffusionsgeschwindigkeit verunreinigender Elemente, wie Schwefel, Phosphor, Silizium, Blei, Bor, in der vorliegenden kubisch-flächenzentrierten Gitterstruktur. Dies begünstigt die Ausbildung von Seigerungen und niedrigschmelzenden Phasen an den Korngrenzen. Menge und Morphologie dieser Phasen beeinflussen im Weiteren das Heißbrissaufreten. Während davon ausgegangen werden kann, dass große Anteile an Verunreinigungen die Heißbrissgefahr erhöhen, kann sich die Bildung von verschiedenen Einschlüssen im Material jedoch auch günstig auf die Morphologie der filmartigen Korngrenzenfilme und auf die Korngröße auswirken. Eine feinere Erstarrungsstruktur und der Übergang von filmförmiger zur globularen Form der unerwünschten Verunreinigungen kann in solchen Fällen sogar die Heißbrissbeständigkeit erhöhen. [26; 27; 28]

Weitere Gründe für die hohe Heißbrissensibilität der Ni-Basis-Legierungen sind:

- hohe Wärmeausdehnung bei geringer Wärmeleitfähigkeit, was zu größeren Dehnungs- und Schrumpfungsreaktionen im Temperaturbereich der Heißbrissbildung führt [29],
- zumeist zellulare Erstarrung des Schweißgutes, die die Bildung von Erstarrungsrissen fördert [30] und
- geringe Duktilität bei hohen Temperaturen, wodurch in Schmelzbadnähe höhere thermische Spannungen auftreten [31].

Typische Unregelmäßigkeiten in Schweißnähten von Ni-Basis-Legierungen sind neben Heißbrissen, Bindefehlern, Poren, Seigerungen sowie dendritische Erstarrungsstrukturen mit intermetallischen Phasen und verschiedenen Ausscheidungen [32]. Bindefehler treten infolge der sehr zähflüssigen Schmelze und des damit verbundenen schlechten Fließ- und Benetzungsverhaltens auf. Eine genügend hohe Temperatur an den Nahtflanken hat hier eine begünstigende Wirkung [33]. Mikroseigerungen und intermetallische Ausscheidungen im Gefüge können die mechanisch-technologischen Eigenschaften und die Korrosionsbeständigkeit der Ni-Basis-Schweißnähte zum Teil erheblich herabsetzen und die Sicherheit und Lebensdauer der Schweißkonstruktionen negativ beeinflussen [3; 34].

4.2 Lösungsansätze zur Vermeidung von Heißrissen in Ni-Basis-Legierungen

Die Lösungsansätze zum Vermeiden von Heißrissen ergeben sich aus den zuvor genannten Einflussfaktoren auf die Heißrissbildung. Aus metallurgischer Sicht wird dem Reinheitsgrad von Ni-Basis-Legierungen ein z. T. signifikanter Einfluss auf die Werkstoff- und Schweißigenschaften zugesprochen [3; 35]. Zum Erreichen einer hohen Reinheit werden daher schon bei der Herstellung dieser Legierungen modernste Technologien eingesetzt. Nach dem Erschmelzen im Lichtbogen- oder Induktionsofen wird die Schmelze zur weiteren Entkohlung, Desoxidation und Entschwefelung in einem VOD- oder VD-Konverter weiterbehandelt. Hier werden z. B. schädigend wirkende Verunreinigungen, wie Blei und Wismut, verdampft. Zur Reduzierung von Seigerungen sowie Oxiden und Nitriden wird anschließend noch ein Elektro-Schlacke-Umschmelzen (ESU) bzw. ein Umschmelzen im Vakuum-Lichtbogenofen (VAR) angewendet. Die Erschmelzung der sogenannten Superlegierungen (Luftfahrtwerkstoffe) erfolgt sogar vorwiegend im Vakuum-Induktionsofen (VIM) mit anschließendem Umschmelzen. Auskunft über typische Reinheitsgrade gibt die Tabelle 1.

Tabelle 1: Anhaltswerte für maximale Grenzwerte schädlicher Spurenelemente in Superlegierungen [35]

Bi, Te, Ti	(Pb), Sb, Se	Ag, As, Pb	Ga, N, O, S, Sn	P
≤ 0,5 ppm	≤ 1 ppm	≤ 5 ppm	≤ 25 ppm	≤ 50 ppm

Die massiven Ni-Basis-Schweißzusätze werden aus derselben Schmelze, wie die Grundwerkstoffe erzeugt. Auch hier sind die Zieh- und Zwischenglühprozesse so optimiert, dass unzulässige äußere Verunreinigungen vermieden werden. Aus Sicht des Schweißverfahrens werden zum Reduzieren von Heißrissen grundsätzlich geringe Streckenenergien, Zwischenlagentemperaturen sowie die Strichraupentechnik gefordert. Ungünstige Schmelzbadgeometrien, verursacht durch zu hohe Schweißgeschwindigkeiten, die zum Auftreten von Nahtmittenrissen führen, sind ebenfalls zu meiden. Die zu verarbeitenden Halbzeuge sollen metallisch sauber und fettfrei sein [28; 37].

Einen signifikanten Einfluss auf das Heißrissentstehen hat auch das strukturmechanische Verhalten des geschweißten Bauteils. Dieses Verhalten bestimmt signifikant die in der Schmelzbadumgebung auftretende lokale Thermomechanik und die damit im Zusammenhang stehenden Verformungen bzw. Dehnungen. Gemäß der Heißrisstheorie nach Prokhorov existiert für jeden Werkstoff ein Hochtemperaturintervall der Sprödigkeit (TIS). Das entsprechende Risskriterium besagt, welches beim Durchlaufen dieses TIS eine werkstoffspezifische Mindestverformung und eine kritische Verformungsrate erreicht oder überschritten sein muss, um einen Erstarrungsriss auszulösen. Die Bildung von Erstarrungsrissen hängt nach Prokhorov folglich von drei Faktoren ab, der Breite des TIS, dem Verformungsvermögen und der Verformungsrate des Werkstoffs im TIS. [36]

Trotz Kenntnis dieser Einflussfaktoren ist das Auftreten von Heißrissen, speziell von Mikroheißrissen, in mehrlagigen Ni-Basis-Verbindungs- und Auftragschweißungen nicht vermeidbar [37; 38; 39]. Erschwerend ist, dass diese Risse aufgrund ihrer geringen Abmessungen erst in metallographischen Schliffen sichtbar werden. Vorherige Forschungsarbeiten des Antragstellers [40; 41] zum Lichtbogenschweißen verschiedener Ni-Basis-Legierungen bestätigen dies (Tabelle 2). Mit zunehmender Blechdicke und Streckenenergie (variiert über die Lichtbogenart) nimmt die Häufigkeit an Mikroheißrissen zu.

Hier zeigt der energiereduzierte CMT-Prozess zwar eine sehr positive Wirkung, jedoch erhöht sich gleichzeitig die Neigung zum Auftreten von Bindefehlern.

Tabelle 2: Nahtunregelmäßigkeiten in entnommenen Querschliffen (Anzahl: 4 bis 6) von artgleichen MSG-Schweißnähten (Nahtlänge: 500 mm) verschiedener Ni-Basis-Legierungen [40]

Grundwerkstoff	Schweißzusatz	Draht-Ø [mm]	Anzahl Risse / Anzahl Bindefehler E _{eff} [kJ/cm]											
			Blechdicke 5 mm						Blechdicke 16 mm					
			CMT		Puls-Mix		ILB		CMT		Puls-Mix	ILB		
alloy 625	S Ni 6625	1,0	- / -	5,4	- / -	7,4	- / -	8,2	1 / -	4,4	2 / -	4,7	1 / -	7,3
alloy 600 H	S Ni 6082	1,0	- / -	6,4	- / -	7,2	- / -	8,3	- / 1	4,2	- / -	4,7	1 / -	7,0
alloy 617 ^{*)}	S Ni 6617	1,0							1 / 1	4,6	4 / 1	3,9	4 / -	6,0

^{*)} nur in 12 mm Blechdicke

Die Mikroheißrisse sind auf das verstärkte Auftreten von Seigerungen bzw. Ausscheidungen (z. B. Karbiden) zurückzuführen. Bild 2 zeigt im Rückstreuerelektronenbild (BSE) einen interdendritisch auftretenden Heißrisses im MSG-Schweißgut von S Ni 6625 (2.4856) sowie hoch Mo- und Nb-haltigen Ausscheidungen in den Dendritenzwischenräumen, die in einem helleren Grauton im Gegensatz zur umgebenden Matrix erscheinen.

4.3 MSG-Schweißen von Ni-Basis-Legierungen

Zum MSG-Schweißen von Ni-Basis-Legierungen kommen bevorzugt Massivdrahtelektroden in Verbindung mit dem Impulslichtbogenprozess zum Einsatz, da damit bei den hoch viskosen Werkstoffen die Tropfenablösung verbessert, die Spritzerneigung reduziert und flexibel auf den Drahtelektroden Durchmesser, die Schutzgaszusammensetzung sowie die Schweißposition reagiert werden kann.

Als Schutzgase beim Schweißen mit Massivdrahtelektroden werden spezielle kostenintensive 3- bzw. 4-Komponentenmischgase auf der Basis von Argon und Helium verwendet, die Anteile an Wasserstoff (max. 2 %) oder Stickstoff (max. 5 %) sowie geringe CO₂-Zumischungen von 0,05 % enthalten. Schon CO₂-Anteile von 0,5 % im Schutzgas führen zu einer starken Oxidbildung bei mehrlagigen Schweißnähten, die ein instabileres Lichtbogenverhalten und ggf. eine Reduzierung der Korrosionsbeständigkeit der Schweißnaht zur Folge hat. [63; 64; 91]

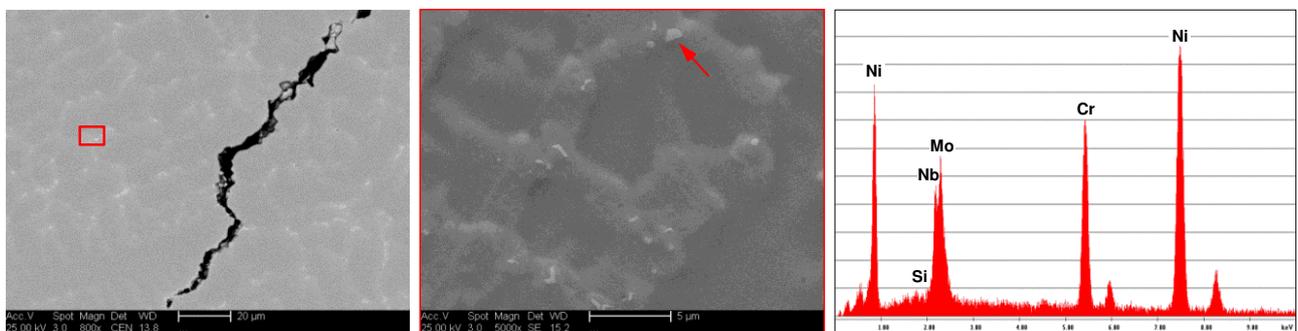


Bild 2: REM-Aufnahme (BSE) auftretender Mikroheißrisse im MSG-Schweißgut von S Ni 6625 und EDX-Analyse interdendritischer Mo- und Nb-reicher Ausscheidungen [40]

Für das MSG-Schweißen von Ni-Basis-Legierungen kommen neben Massivdrahtelektroden auch schlackeführende Fülldrahtelektroden zum Einsatz. Jedoch ist die Anwendung schlackeführender Fülldrahtelektroden signifikant weniger verbreitet. [13]

Das hat damit zu tun, dass Ni-Basis-Fülldrahtelektroden erst 2012 mit der Einführung der DIN EN ISO 12153:2012 [1] standardisiert wurden und darüber hinaus bis heute keine Erwähnung in den DVS-Regelwerken finden. Grundsätzlich teilt man die schlackeführenden Fülldrahtelektroden in folgende Gruppen ein: rutil (mit schnell und langsam erstarrender Schlacke) und basisch. Überwiegend Anwendung finden die rutilen Fülldrahtelektroden. Rein basische Schlackensysteme werden gegenwärtig nur vereinzelt angeboten und kommen daher kaum zum Einsatz [13].

Die Herstellung der schlackeführenden Ni-Basis-Fülldrahtelektroden erfolgt meist als formgeschlossener Fülldraht. Diese besteht aus einem Band zumeist artgleicher oder artähnlicher Ni-Basis-Legierung mit einer teilweise agglomerierten Füllung aus Schlackebildnern (z. B. TiO_2 , SiO_2 , MnO_2 , Zr_2O , CaF_2), Legierungselementen (z. B. Ni, Cr, Mo, Nb) sowie lichtbogenstabilisierenden (z. B. ZrO_2 , Na_2O , K_2O , Li_2O) und desoxidierenden Elementen (z. B. CaO, Mg). Die Herstellung als nahtloser Fülldraht ist aufgrund des geringen Füllgrades und der eingeschränkten Verfügbarkeit eines geeigneten Vormaterials für das Röhrchen nur sehr eingeschränkt möglich. [10]

Allgemein werden für schlackeführende Ni-Basis-Fülldrahtelektroden im Vergleich zu den Massivdrahtelektroden nachfolgende Vorteile aufgezählt [9; 10; 11; 13; 44]:

- Möglichkeit des MSG-Schweißens ohne Impulslichtbogentechnik in einem breiteren Parameterfenster,
- Einsatz von kostengünstigen Standardstromquellen und Standard-Mischgasen mit hohem CO_2 -Anteil, i.d.R. Schutzgase der Klassifikation DIN EN ISO 14175 - M21,
- Schutz des Schweißbades vor Oxidation durch die entstehende Schlackenabdeckung,
- Steigerung der Abschmelzleistung (um bis zu 30 %) bei gleicher Stromstärke im Vergleich zu Massivdrahtelektroden infolge der höheren Stromdichte (Bild 3),
- deutlich geringere Neigung zu Schweißnahtunregelmäßigkeiten, insbesondere Poren und Bindefehlern infolge eines verbesserten Einbrand- und Benetzungsverhaltens,
- geringere Wärmeeinbringung beim Schweißen, infolgedessen höhere Korrosionsbeständigkeit der reinen Schweißgüter (Bild 4) und ggf. Vorteile hinsichtlich ihrer Beständigkeit gegenüber dem Auftreten von Heißrisen,
- sehr gute mechanisch-technologische Gütwerte bei Nutzung von Fülldrahtelektroden mit basischer Schlackencharakteristik.

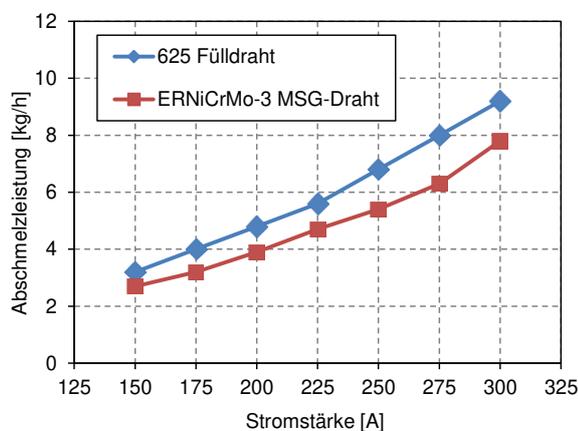


Bild 3: Gegenüberstellung der Abschmelzleistung von Massiv- und Fülldrahtelektrode (\varnothing 1,2 mm) [11]

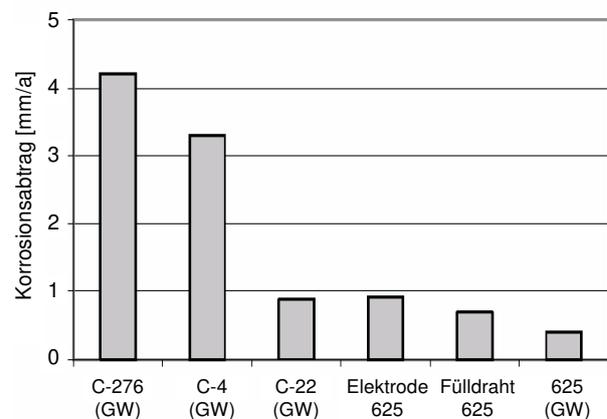


Bild 4: Korrosionsabtrag verschiedener NiCrMo-Legierungen bei der Prüfung auf IK (ASTM G28, A) [11]

Die beschriebenen Vorteile der schlackeführenden Ni-Basis-Füll- im Vergleich zu Massivdrahtelektroden basieren überwiegend auf dem Schlackensystem, da die Schlacke einen dominanten Einfluss auf das Schweißverhalten ausübt [45]. Wichtige Parameter, die das Verhalten der Schlacke beschreiben, sind Basizität, Viskosität, Oberflächenspannung und elektrische Leitfähigkeit [46]. Zum Vermeiden von Schlackeeinschlüssen werden schlackeführende Fülldrahtelektroden mit schleppender Brennerführung verschweißt [47]. Die wesentliche Aufgabe der Schlacke besteht darin, durch einen temperaturangepassten Viskositätsverlauf eine gute Positionsschweißbarkeit zu ermöglichen. Diese ist bei hochlegierten Massivdrahtelektroden auf Ni-Basis vergleichsweise schlecht [48].

Das Fließverhalten der Schlacke hat beim Schweißen von Ni-Basis-Legierungen darüber hinaus wichtige Funktionen im Hinblick auf die Gewährleistung einer vollständigen Nahtabdeckung zum Schutz vor Oxidation und zur Vermeidung von Schlackeanhaftungen. Von großer Bedeutung ist auch die Desoxidation des Ni-Basis-Schweißbades durch die Schlacke sowie deren lichtbogenstabilisierende Wirkung.

Die rutilen Ni-Basis-Fülldrahtelektroden zeichnen sich durch eine gute Schweißbarkeit in allen Schweißpositionen außer PG (fallend) aus. Das damit erzeugte Schweißgut neigt jedoch häufig zum Auftreten von Heißrissen [11; 49]. Fiedler et al. [49] haben in diesem Zusammenhang den Einfluss von Niob und Kohlenstoff auf die Heißrissbeständigkeit von Ni-Basis-Fülldrahtschweißgütern vom Typ T Ni 6082 und T Ni 6182 untersucht. Eine Nb-Zugabe in der Füllung von ca. 2 % führte bei diesen Legierungen zu einer Verringerung der Heißrissanfälligkeit. Die mit artgleichen Massivdrahtelektroden hergestellten Schweißgüter zeigten dennoch eine geringere Heißrissneigung, stellen jedoch höhere Anforderungen an die zu verwendenden Stromquellen, Schutzgase und die Handfertigkeit des Schweißers. [49] Außerdem enthält das Schweißgut rutiler Schlackensysteme infolge der hohen Abbrandverluste von Begleit- und Legierungselementen durch Sauerstoff vermehrt aus den Desoxidations- und Legierungselementen entstandene Oxide, die teilweise als Oxideinschlüsse im Schweißgut eingelagert sind [50]. Beide Aspekte können zu einer Verringerung der Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften führen.

Einige Ni-Basis-Fülldrahtelektroden weisen neben den rutilen zusätzlich basische Anteile auf. Sie werden vorwiegend für waagerechte und horizontale Schweißpositionen empfohlen. Der Werkstoffübergang erfolgt im Sprühlichtbogen bei hoher Produktivität und geringer Spritzerneigung. Die Schlacke ist selbstlösend, und es werden eine gute Flankenbenetzung und ein sicherer Einbrand erzielt. [51]

Die basische Schlackencharakteristik für Ni-Basis-Legierungen ist vor allem vom E-Handschweißen bekannt, bei dem vielfach rissfreie Schweißgüter und hohe mechanisch-technologische Gütewerte erzielt werden können. Als nachteilig erwiesen sich jedoch der erhöhte Legierungsabbrand sauerstoffaffiner Elemente, z. B. Ti, Al, B, der unerwünschte Zubrand von Silizium (resultierend aus dem Wasserglas, heißrissfördernd) und das meist schlechte Schweißverhalten [13]. Deshalb entwickelten [52; 53] für die hochwarmfesten Ni-Basis-Legierungen alloy 617 (2.4663) und alloy C-263 (2.4650) basische Doppelmantelektroden, die gegenüber den herkömmlichen basischen Stabelektroden die o. g. Zu- und Abbrände begrenzen und somit die Vorteile einer verringerten Heißrissneigung sowie einer einfacheren Handhabung aufweisen.

Auch bei den Fülldrahtelektroden wird der Zu- und Abbrand von Legierungselementen maßgeblich durch die Basizität des eingesetzten Schlackensystems beeinflusst [54].

In basischen Schlacken ist der Anteil oxidierender Verbindungen (z. B. TiO_2 , SiO_2) relativ gering. Es überwiegen nichtoxidierende, basisch wirkende Ca-Verbindungen (CaO , CaF_2) [50; 55], die kaum Sauerstoff in der Lichtbogenatmosphäre abspalten. Diese ist neutral bis reduzierend und weitgehend frei von Wasserstoff und Sauerstoff. Der Abbrand an Legierungselementen ist daher gering. Mit zunehmender Basizität sinkt der Sauerstoffgehalt im Schweißgut, was sich vorteilhaft auf die mechanisch-technologischen Gütewerte auswirkt.

Hingegen wandern bei rutilen Fülldrahtelektroden aufgrund des hohen Oxidanteils in der Füllung Legierungselemente, wie Ni, Mo, Ti oder Nb, in die Schlacke ab. Mit zunehmender Basizität der Schlacke ist das gezielte Einbringen von Legierungselementen über den Schweißzusatz somit effizienter möglich. [54; 55; 56]

Weitere Elemente, wie Schwefel und Phosphor, die mit Nickel niedrigschmelzende Eutektika vom Typ Ni-NiS oder Ni-Ni₃P bilden können, verhalten sich chemisch sauer. Sie können daher nur durch die Reaktion mit basischen Schlackebestandteilen (z. B. Manganoxiden) aus dem Schweißgut entfernt werden [50]. Durch diese Desoxidation können auch weitere heißbrissfördernde verunreinigende Elemente, wie Silizium, Blei und Bor, die ebenfalls in Form von niedrigschmelzenden Phasen (z. B. NiSi-Ni₃Si₂- und NiSi-Verbindungen) heißbrissfördernd wirken [26], vermindert werden.

Zum Beschreiben der chemischen Eigenschaften der Schlacke und ihres metallurgischen Verhaltens wird der Basizitätsindex (BI) herangezogen [57], der meist mit der Formel nach Tuliani, Boniszewski und Eaton [58] berechnet wird:

$$BI = \frac{CaO + MgO + BaO + CaF_2 + Na_2O + K_2O + Li_2O + 0,5 \cdot (MnO + FeO)}{SiO_2 + 0,5 \cdot (Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}$$

Formel 1: Basizitätsindex der Füllung nach Boniszewski (Oxid-/Fluorid-Konzentrationen in Gew.-%) [58]

Nach dem BI werden die Füllungen in drei verschiedene Gruppen eingeteilt: sauer (BI < 1,0), neutral (BI = 1,0) und basisch (BI > 1,0), wobei weiter in neutral bis schwach basisch (BI = 1-1,5) und hoch basisch (BI = 3-4) unterteilt wird. Neben der aufgeführten Berechnungsformel existieren auch modifizierte Formeln, beispielsweise nach Bauné, die sich insofern unterscheiden, dass die chemische Zusammensetzung der abgeschmolzenen Schlacke und nicht die der Pulverfüllung analysiert wird [24]. Durch Vallant [45] wurde bei Untersuchungen zur Optimierung von Schlackensystemen für Ni-Basis-Fülldrahtelektroden die Berechnungsformel nach Bauné [59] für Ni-Basis-Schlacken angepasst und erfolgreich eingesetzt. Die Formel wurde dafür um die Oxide Cr₂O₃ und Nb₂O₅ erweitert:

$$BI = \frac{CaO + MgO + BaO + CaF_2 + Na_2O + K_2O + Li_2O + 0,5 \cdot (MnO + Fe_2O_3 + Cr_2O_3)}{SiO_2 + 0,5 \cdot (Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2 + Nb_2O_5)}$$

Formel 2: Basizitätsindex der erstarrten Schlacke nach Bauné - erweitert durch Vallant (Oxid-/Fluorid-Konzentrationen in mol-%) [45]

5 Forschungsziel und Lösungsweg

5.1 Forschungsziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens bestand in der Ermittlung des Anwendungspotentials basischer Ni-Basis-Fülldrahtelektroden zum wirtschaftlichen MSG-Schweißen von Ni-Basis-Legierungen. Im Rahmen vergleichender Betrachtungen von derzeit gängigen Schweißzusatzwerkstoffen in Form von rutilen Fülldrahtelektroden und Massivdrahtelektroden wurden Untersuchungen zum Einfluss einer basischen Schlackencharakteristik auf das Schweißverhalten und die Schweißnahtausbildung durchgeführt. Dazu gehörte die Bewertung der Verarbeitungseigenschaften, wie der sinnvoll nutzbare Parameterbereich, der erreichbaren Abschmelzleistung, des Tropfenüberganges, des Schlackenabganges und der erreichbaren Schweißnahtgüte.

Darüber hinaus sind die Auswirkungen der basischen Elemente im Schweißzusatz auf die schweißmetallurgischen Vorgänge beim MSG-Schweißen mit Fülldrahtelektroden erforscht worden. Ein Schwerpunkt lag auf der Bestimmung des Einflusses der basischen Schlackencharakteristik auf die Heißrissneigung von Ni-Basis-Schweißgütern. Aufgrund der desoxidierenden Wirkung basischer Schlackensysteme war davon auszugehen, dass sich der Einsatz basischer Ni-Basis-Fülldrahtelektroden beim MSG-Schweißen positiv auf die Heißrissbeständigkeit auswirkt. Auf dieser Grundlage bieten basische Ni-Basis-Fülldrahtelektroden - ähnlich wie basisch umhüllte Stabelektroden - einen vielversprechenden Lösungsansatz, die Fertigungssicherheit beim MSG-Schweißen von Ni-Basis-Legierungen zu erhöhen. Darüber hinaus sollen sich weitere metallurgische Vorteile in Form eines geringeren Sauerstoffgehalts im Schweißgut gegenüber der Verwendung rutiler Fülldrahtelektroden ergeben, die zu exzellenten mechanisch-technologischen Gütewerten, vor allem Kerbschlagwerten, der Ni-Basis-Schweißgüter führen.

5.2 Arbeitshypothese

Zum Erreichen des Forschungszieles wurden nachfolgende wissenschaftlich-technische Ergebnisse angestrebt:

- Auswirkungen der Schlackencharakteristik auf das Schweißverhalten und die Schweißnahtausbildung
- Auswirkungen der Schlackencharakteristik auf schweißmetallurgische Vorgänge und mechanisch-technologischen Eigenschaften des Schweißgutes
- weiterführende Erkenntnisse zu den Heißrissursachen und -mechanismen bzw. zur Heißrissneigung von verschiedenen Ni-Basis-Legierungen.

Das Forschungsvorhaben sollte zudem wirtschaftlich nutzbare Ergebnisse in Form von Empfehlungen für das qualitätssichere Fertigen von Bauteilen aus hochkorrosionsbeständigen und hochwarmfesten Ni-Basis-Legierungen im Apparate- und Anlagenbau liefern. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen die Einsatzgrenzen aufzeigen und darüber hinaus auch Eingang in der Weiterentwicklung von schlackeführenden Fülldrahtelektroden finden.

5.3 Lösungsweg zum Erreichen des Forschungszieles

Zum Erreichen des Forschungszieles wurden verschiedene industriell relevante Ni-Basis-Füll- und Massivdrahtelektroden ausgewählt (vgl. Bild 5). Die Fülldrahtelektroden weisen dabei entweder eine basische oder rutilen Schlackencharakteristik auf.

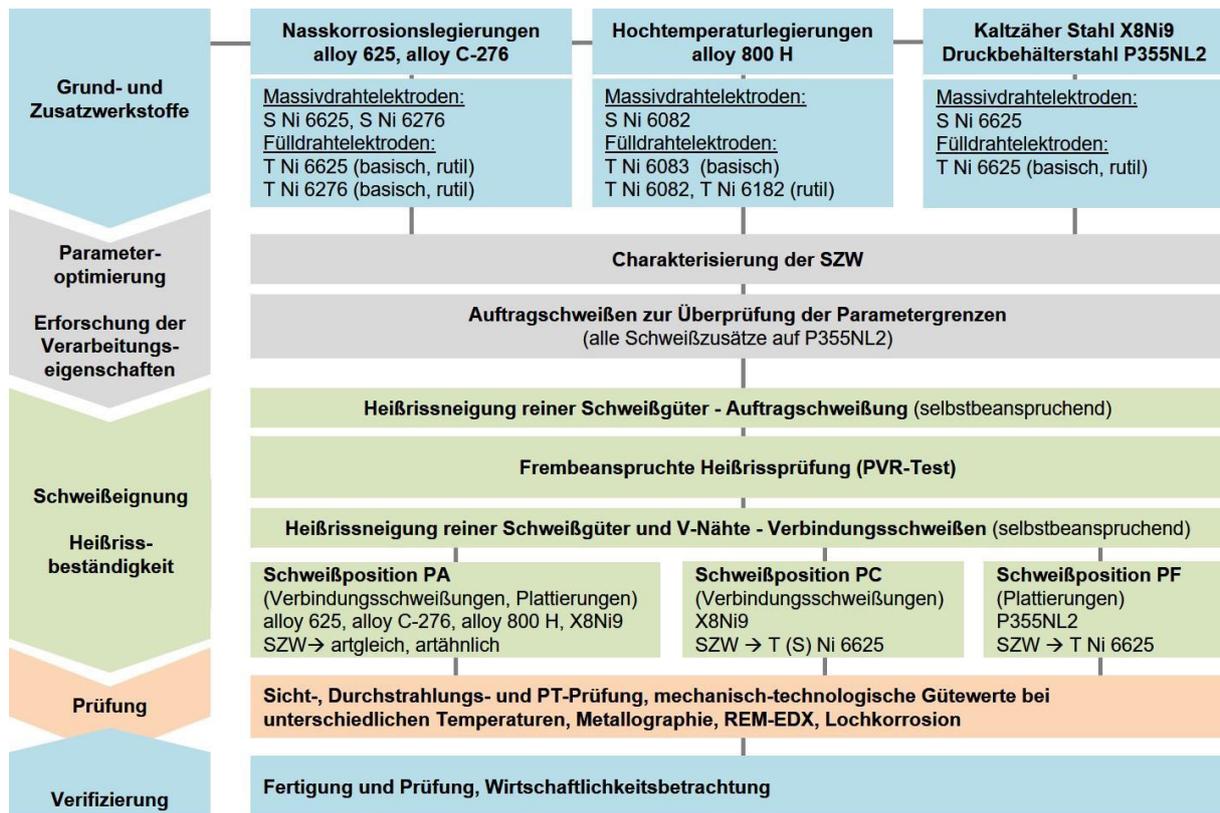


Bild 5: Lösungsweg zum Erreichen des Forschungszieles (schematisch)

Folgende Arbeitspakete waren laut Forschungsantrag zu realisieren:

- Beschaffung und Charakterisierung der Schweißzusatzwerkstoffe im Hinblick auf chemische Zusammensetzung, Füllgrad und Herstellungsart.
- Bewertung der Verarbeitungseigenschaften anhand des Schweißens von Auftragraupen unter Variation von Schweißzusatz- und -hilfsstoff, Schweißparameter, Lichtbogenart, Schutzgas und Brennerführung.
- Herstellen reiner Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 [39] zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Heißbrissanfälligkeit und chemischer Analyse.
- Heißbrissprüfung mit dem PVR-Test zur Bestimmung des Einflusses der Schweißzusatzwerkstoffe auf die Heißbrissneigung.
- Bestimmung der mechanisch-technologischen Eigenschaften reiner Schweißgüter nach DIN EN ISO 15792-1:2012-01 [61] zur Untersuchung der Auswirkung der Schlackencharakteristik auf diese Kennwerte.
- Schweißplattieren mit optimierten Parametern zur praktischen Anwendung der als optimal erkannten Schweißbedingungen und Bewerten der Schichtqualität.
- Verbindungsschweißen mit optimierten Parametern zur praktischen Anwendung der als optimal erkannten Schweißbedingungen und Bewerten der Nahtqualität.
- Durchführung einer vereinfachten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf Basis einer Kostenvergleichsrechnung.

6 Präzisierung der Arbeitspakete

Die Tabelle 3 gibt einen Überblick über die im Forschungsprojekt konkret verwendeten Versuchswerkstoffe. Auf die Verwendung von Firmenbezeichnungen wurde aus Gründen der Vorwettbewerblichkeit verzichtet.

Tabelle 3: Zusatz- und Grundwerkstoffkombinationen im Forschungsprojekt

Versuchswerkstoffe	Typ	Ni 6625 / NiCr22Mo9Nb	Ni 6083 / NiCr20Mn5Nb Ni 6182 / NiCr15Fe6Mn Ni 6082 / NiCr20Mn3Nb	Typ Ni 6276 / NiCr15Mo15Fe6W4
Schweißzusatz (Ø 1,2 mm)				
Basische Fülldrahtelektrode	B	T Ni 6625 B	T Ni 6083 B	T Ni 6276 B
Rutile Fülldrahtelektrode (schnellerstarrend)	P	T Ni 6625 P* T Ni 6625 P**	T Ni 6182 P	T Ni 6276 P
Rutile Fülldrahtelektrode (langsam erstarrend)	R	-	T Ni 6083 R T Ni 6082 R	-
Massivdrahtelektrode	-	S Ni 6625	S Ni 6082	S Ni 6276
Grundwerkstoff				
Verbindungsschweißen	-	alloy 625 (5 und 12 mm) X8Ni9 (17 mm)	alloy 800 H (5 und 14 mm)	alloy C 276 (5 und 12 mm)
Auftragschweißen	-	P355NL2 (10 mm)	-	-

* / ** - verschiedene Hersteller

Das Kurzzeichen für die Produktform Fülldrahtelektrode ist das T, während das Kurzzeichen für die Massivdrahtelektrode der Buchstabe S ist. Die Buchstaben B, P und R bei den schlackeführenden Fülldrahtelektroden stehen für den Typ der Füllung. B steht dabei für eine basische Schlacke. Bei den rutilen Fülldrahtelektroden gibt es Varianten, die aufgrund der schnell erstarrenden Schlacke für Zwangspositionen geeignet sind (Typ P), und andere, die eine langsam erstarrende Schlacke aufweisen (Typ R).

In Abstimmung mit den PA-Mitgliedern wurden die im Arbeitsplan des Projektes festgelegten Arbeitspakete wie nachfolgend beschrieben präzisiert und durchgeführt:

(1) Charakterisierung der Ni-Basis-Fülldrahtelektroden

Im ersten Arbeitspunkt erfolgten grundlegende werkstoffkundliche Untersuchungen an den bereitgestellten Versuchswerkstoffen. Hierzu gehören die Analyse der chemischen Zusammensetzung mittels Spektralanalyse (OES), Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und die Bestimmung der Gehalte an Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenstoff und Schwefel mittels Trägergasschmelzextraktion (TGSE). Die Analysen wurden dabei entweder direkt an den Drahtelektroden oder an mit Hilfe der Button-Melt-Technik erschmolzenen Proben aus den Drahtelektroden durchgeführt. Darüber hinaus sollen Aussagen zum Aufbau (Herstellungsart und Füllgrad) der Fülldrahtelektroden getroffen werden. Da mit der Button-Melt-Technik reine WIG-Schweißgutproben unter inerter Schutzgasatmosphäre erzeugt werden können, erfolgte die Bewertung der Wechselwirkung zwischen Schlacke und chemischer Zusammensetzung der Fülldrahtelektrode mit Hilfe von Elektronenstrahlmikroanalysen an den Schlacken in diesem AP und nicht wie geplant im AP 3.

(2) Erforschung der Verarbeitungseigenschaften der basischen Fülldrahtelektroden
Im zweiten AP wurden aufbauend auf den Empfehlungen der Hersteller vergleichende Betrachtungen zu den Verarbeitungseigenschaften der FDE anhand von Auftragschweißungen in der Schweißposition PA durchgeführt und so auch gleichzeitig ein sinnvoll nutzbarer Schweißparameterbereich für die nachfolgenden Untersuchungen ermittelt. Variationsgrößen bildeten hierbei die Lichtbogenart (FDE → Sprühlichtbogen, MDE → Impulslichtbogen), die Schweißparameter, die Brennerführung (FDE → schleppend, MDE → stehend) und das Schutzgas (FDE → Mischgas aus Ar und 18 % bzw. punktuell 25 % CO₂, MDE → ArHeHC 30/2/0,05). Der Werkstoffübergang wurde mittels Hochgeschwindigkeitskinematographie mit synchroner Erfassung der elektrischen Schweißparameter charakterisiert. Weiter erfolgten noch die rechnerische Bestimmung der Abschmelzleistung sowie die optische Beurteilung der Schlackenausbildung und des Schlackenabgangs. Das Nahtaussehen und die Nahtgeometrie wurden mittels Sichtprüfung und Metallographie bewertet.

(3) Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der reinen Schweißgutproben und der Schlacke

Im dritten AP wurden auf Grundlage der optimierten Schweißparameter aus AP 2 mehrlagige Auftragschweißungen nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] durch Aufschweißen der Bleche auf eine steife Grundplatte unter hoher Dehnungs- und Schrumpfbehinderung ausgeführt. Die Auftragschweißgutblöcke dienten der Ermittlung der chemischen Zusammensetzung und somit der Ab- und Zubrände von Legierungselementen. Die Gehalte an Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenstoff und Schwefel im Schweißgut sind mittels Schmelzextraktion bestimmt worden. Die reinen Auftragschweißgüter dienten aufgrund der beim Schweißen erzeugten hohen Schrumpfbehinderung zudem als eine praxisnahe selbstbeanspruchende Heißrissprüfung. Sie ermöglichten eine Ja/Nein-Bewertung zum Heißrissaufreten. Die Schweißgüter wurden zudem auf weitere innere und äußere Unregelmäßigkeiten (z. B. Lagenbindefehler, Schlackeeinschlüsse, Poren) geprüft.

(4) Heißrissprüfung mit dem PVR-Test

Der vierte Arbeitspunkt umfasste Untersuchungen zum Einfluss der Schlackencharakteristik auf die Heißrissneigung der mit den Füll- und Massivdrahtelektroden erzeugten Schweißgüter. Zu diesem Zweck wurde der fremdbeanspruchte Programmierte-Verformungsriß-Test (PVR-Test) genutzt, der nach DIN-Fachbericht 17641-3:2004 [93] eine quantitative Aussage über die Heißrissensibilität zulässt. Der PVR-Test wurde in verschiedenen Varianten durchgeführt, die weiter hinten erläutert werden.

(5) Bestimmung der mechanisch-technologischen Eigenschaften von reinen Schweißgutproben

Im fünften Arbeitspunkt wurden zur Bestimmung der Auswirkung der Schlackencharakteristik auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften reine Schweißgutproben auf Basis von Verbindungsschweißungen (Steifflankennaht) nach DIN EN ISO 15792-1:2012 [61] aus Ni- bzw. Fe-Basis Blechen mit einer Dicke von 12 mm bzw. 14 mm erzeugt. Vor der Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften sind die Schweißnähte auf innere und äußere Unregelmäßigkeiten geprüft worden. Danach erfolgen statische Zugversuche, Quer- und Seitenbiegeversuche sowie Kerbschlagbiegeversuche bei Raum- und tiefen Temperaturen (-196 °C). Als Referenz dienten auch hier wieder MAG-Schweißungen mit artgleichen Massivdrahtelektroden.

(6) Schweißplattieren mit optimierten Parametern

Der sechste AP umfasste die praktische Anwendung der in den vorherigen Arbeitspaketen ermittelten Schweißparameter auf Basis von Schweißplattierungen eines Druckbehälterstahls. In Abstimmung mit dem PA wurden die Plattierungen sowohl in Wannenlage (PA) als auch in steigender Schweißposition (PF) durchgeführt. Zur vergleichenden Gegenüberstellung der Plattierungen kamen sowohl zerstörende als auch zerstörungsfreie Prüfungen zur Anwendung.

(7) Verbindungsschweißen mit optimierten Parametern

Im siebten AP wurden die optimierten Schweißparameter auf das Verbindungsschweißen von V-Nähten an 5 mm, 12 mm bzw. 14 mm dicken Blechen übertragen. Diese artgleichen Schweißungen erfolgten zur Erhöhung der Eigenspannungen dehnungs- und schrumpfbegünstigt. Mittels zerstörungsfreier und zerstörender Prüfmethode erfolgte eine Bewertung der Schweißnahtqualität. Die Lochkorrosionsbeständigkeit ist in Absprache mit dem PA an den V-Nähten der 5 mm dicken Bleche geprüft worden. Zusätzlich erfolgten in diesem AP Verbindungsschweißungen in den Schweißpositionen PA und PC an 17 mm dicken Blechen des kaltzähnen X8Ni9-Stahls.

(8) Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In Abhängigkeit der eingesetzten Schweißzusätze und der Schutzgase wurde im Rahmen dieses Arbeitspunktes die Wirtschaftlichkeit betrachtet. In Abstimmung mit dem PA wurden hierzu die ermittelten Abschmelzleistungen und Ausbringungsmengen herangezogen.

7 Versuchskonzept und verwendete Gerätetechnik

7.1 Charakterisierung der eingesetzten MSG-Schweißtechnologien

Im Rahmen des Forschungsprojektes kamen in Abhängigkeit von den verwendeten Schweißzusatzwerkstoffen verschiedene MSG-Lichtbogenarten zum Einsatz.

Die Fülldrahtelektroden wurden unabhängig von der zum Grunde liegenden Schlackentyp mit einem klassischen Sprühlichtbogen unter Einsatz des Mischgases M21 (82 % Ar, 18 % CO₂) verarbeitet. Kennzeichnend für den SLB ist ein sich selbstständig ausbildender Arbeitspunkt aus Drahtvorschubgeschwindigkeit, elektrischer Charakteristik der Stromquelle (U-I-Kennlinie) und dem Lichtbogen (U-I-Kennlinie), sodass ein ungesteuerter, kurzschlussfreier Werkstoffübergang von der Drahtelektrode bis zur Werkstückoberfläche erfolgt, vgl. DVS Merkblatt 0973 und 0926-3 [62; 63].

Für die Massivdrahtelektroden kam praxisrelevant der Impulslichtbogen zur Anwendung, bei dem der Werkstoffübergang durch einen hohen Stromimpuls gezielt ausgelöst wird. Dieser führt durch die quadratische Zunahme des Pincheffektes zu einem erleichterten Werkstoffübergang der hochviskosen Ni-Schmelze. Zudem werden die Streckenenergie und das Auftreten von Schweißspritzern reduziert. Als Schutzgas ist ein spezielles kostenintensives 4-Komponentenmischgas auf Basis von Argon, 30 % Helium, 2 % Wasserstoff und 0,05 % CO₂ verwendet worden. Die prägnanten Vorteile dieses Gases gegenüber der alleinigen Nutzung von Argon spiegeln sich vor allem in der verbesserten Tropfenablösung, im geringeren Spritzerauftreten und im günstigeren Fließ- und Benetzungsverhalten der zähflüssigen Ni-Schmelze wider. Nachteilig sind der geringe Abbrand von Legierungselementen im Schweißgut und leicht oxidierte Schweißnahtoberflächen. Damit verschlechtert sich, insbesondere beim Mehrlagenschweißen, die Lagenüberschweißbarkeit. [42; 91]

7.2 Charakterisierung der Versuchswerkstoffe

Die in der Tabelle 3 aufgeführten Schweißzusätze finden eine breite Anwendung zum schweißtechnischen Verarbeiten der Ni-Basis-Legierungen NiCr22Mo9Nb (alloy 625, W.-Nr. 2.4856) und NiMo16Cr15W (alloy C-276, W.-Nr. 2.4819) sowie der Fe-Legierung X5NiCrAlTi31-20 (alloy 800 H, W.-Nr. 1.4958). Die chemischen Zusammensetzungen und mechanisch-technologischen Eigenschaften (sofern angegeben) der verwendeten Zusatz- und Grundwerkstoffe sind im Anhang 1

Anhang 1 und Anhang 2 aufgeführt.

Die im Forschungsprojekt genutzte Variante von alloy 625 wird aufgrund des geringen C-Gehaltes von $\leq 0,03\%$ und der stabilisierenden Wärmebehandlung bei vorzugsweise $980\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorwiegend für Nasskorrosionsanwendungen in der chemischen Prozessindustrie, der Meerestechnik und in der Umweltechnik eingesetzt. Das Schweißen dieser Legierung erfolgt mit dem artgleichen Schweißzusatz vom Typ Ni 6625. [65] Die Ni-Basis-Legierung alloy C-276 weist eine hohe Beständigkeit gegenüber chlorinduzierter Spalt-, Loch- und Spannungsrisskorrosion in wässrigen Medien auf und wird aus diesem Grund ebenfalls häufig in der chemischen und petrochemischen Industrie eingesetzt. Zum Schweißen dieser Legierung wird der artgleiche Schweißzusatz vom Typ Ni 6276 verwendet. [66] Bei Alloy 800 H handelt es sich um eine austenitische, hochwarmfeste Fe-Ni-Cr-Legierung mit kontrollierten C, Al und Ti-Anteilen. In Folge einer gezielt vorgenommenen Lösungsglühung (bei $1160\text{ }^{\circ}\text{C}$) weist diese Legierung eine erhöhte Zeitstandfestigkeit oberhalb $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf und findet daher ein breites Anwendungsfeld für korrosionsbeständige Bauteile im petrochemischen Anlagen- und Apparatebau. [67] Aufgrund der hohen Heißrissneigung von alloy 800 H wird dieser Werkstoff überlegiert mit Ni-Basis-Schweißzusätzen vom Typ Ni 6082, Ni 6083 und Ni 6182 verschweißt. Diese Schweißzusätze weisen unterschiedliche Anteile an Cr, Mn und Nb auf, woraus auch die unterschiedlichen numerischen Bezeichnungen und leicht differierende Eigenschaften resultieren.

Der Schweißzusatz vom Typ Ni 6625 ist auch für das Schweißplattieren von Kesselstählen (z. B. P355NL2) bzw. das Herstellen von LNG-Tanks aus dem kaltzähen Stahl X8Ni9 (W.-Nr. 1.5662) von großem wirtschaftlichem Interesse. LNG steht für Liquefied Natural Gas (Methan), d. h. das Gas ist bei Temperaturen zwischen $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ flüssig. Der Stahl X8Ni9 verbindet eine hohe Festigkeit ($R_{p0,2} = 500\text{ MPa}$, $R_m = 600\text{ MPa}-800\text{ MPa}$) mit der höchsten Kaltzähigkeit aller ferritischen Stähle. Diese Eigenschaften erhält er durch eine spezielle Wärmebehandlung, die zu einem weichen, martensitisch-bainitischen Gefüge mit geringen Austenitanteilen führt. X8Ni9 soll beim Schweißen nicht vorgewärmt werden. Er ist mit geringer Streckenenergie ($6\text{ kJ/cm}-20\text{ kJ/cm}$) und einer max. Zwischenlagentemperatur von $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu schweißen, damit keine unerwünschte Entfestigung aufgrund von Austenitbildung auftritt. [50; 92] Beim P355NL2 handelt es sich um einen gut schweißgeeigneten normalisierend gewalzten ferritischen Feinkornbaustahl, der u. a. zur Herstellung von Druckgasbehältern (z. B. Flüssiggastanks, Butan, Propan), Druckbehältern, Dampfkesselteilen, Druckrohrleitungen, Verdichtern usw. verwendet wird.

7.3 Geräte- und Messtechnik zum MSG-Schweißen

Für die vollmechanisierten MSG-Schweißungen wurde folgende Gerätetechnik genutzt:

- Schweißstromquelle TransPulsSynergic 4000 CMT (Fa. Fronius International GmbH),
- Schweißstromquelle Quineo Champ 450 (Fa. Carl Cloos Schweißtechnik GmbH),
- Schlauchpaket mit Versorgungsleitungen für Strom, Schutzgas, Drahtführungsschlauch, Steuerleitung und Kühlwasser,
- mechanisiertes Fahrwerk zur Brennerpositionierung und

– Schutzgasversorgung über Schutzgasflaschen.

Zur positionssicheren Fixierung während des Schweißprozesses und zur Erzeugung maximaler Dehnungs- und Schrumpfungsbehinderung wurden sowohl die mehrlagigen Auftragschweißgutproben als auch die Bleche für die Verbindungsschweißungen in PA-Position vor dem Versuch auf 50 mm dicke ferritische Stahlplatten aufgeschweißt. Bei den restlichen Schweißungen sind die Proben mit Spannsprätzen aufgespannt worden. Dies wird in den einzelnen Absätzen nochmal detailliert erläutert. Das Bild 6 zeigt einen der an der FE für die Schweißversuche genutzten Versuchsstände.

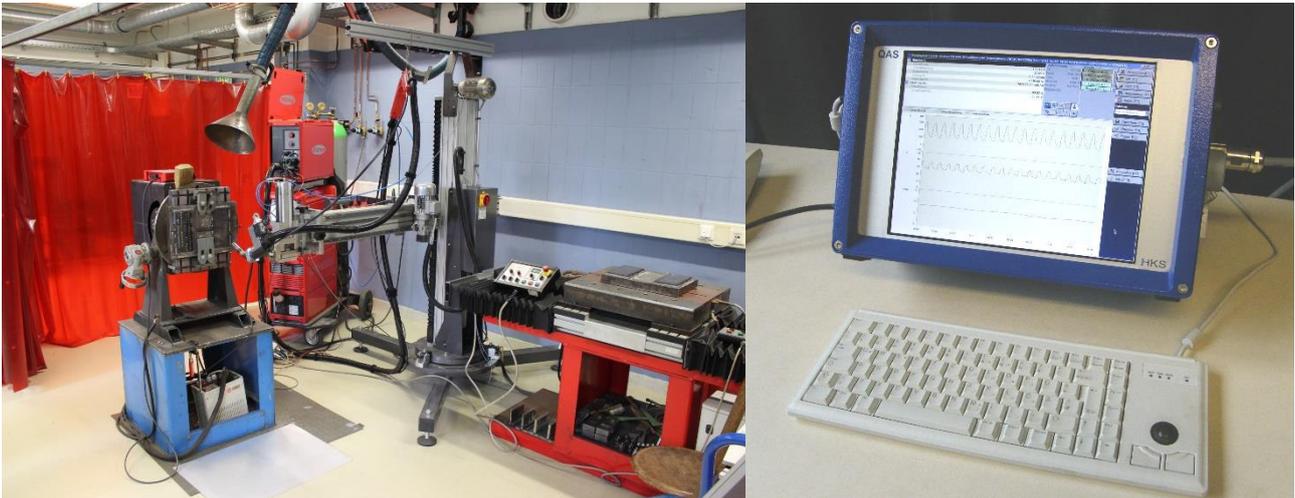


Bild 6: Versuchsstand zum MSG-Auftrag- und Verbindungsschweißen (links) und Messsystem WeldAnalyst der Fa. HKS Prozesstechnik (rechts)

Die Erfassung, Auswertung und Überprüfung der Prozessparameter sowie die Dokumentation der Schweißprozessverläufe erfolgte bei allen Schweißversuchen mit Hilfe des Messsystems WeldAnalyst der Fa. HKS Prozesstechnik GmbH (Bild 6, rechts). Zur Erfassung von Schweißstrom und Schweißspannung diente ein verfahrensspezifischer Prozesssensor vom Typ HKS P-1000. Zusätzlich wurden die Drahtvorschubgeschwindigkeit und der Schutzgasdurchfluss gemessen. Die Erfassung der beiden elektrischen Größen Schweißstrom und -spannung erfolgte mit einer Abtastrate von 25,6 kHz. Da die Spannungswerte bei dem HKS-System an der SSQ abgegriffen werden, setzt sich die gemessene Schweißspannung aus der Lichtbogenspannung und den Spannungsabfällen im Schlauchpaket u. a. zusammen. Die HKS-Spannungswerte sind daher im Durchschnitt etwa 2-3 V höher als die an der SSG abgelesenen arithmetischen Mittelwerte. Im PA wurde festgelegt, dass letztere in den Schweißprotokollen angegeben und zur Berechnung der Streckenenergie herangezogen werden sollen.

7.4 Geräte- und Messtechnik für die Heißrissprüfverfahren

Zur Beurteilung des Einflusses der Schlackencharakteristik auf die Heißrissneigung wurde der nach DIN-Fachbericht 17641-3:2004 [93] standardisierte Programmierte-Verformungs-Riss (PVR)-Test genutzt. Bei diesem fremdbeanspruchten Heißrissprüfverfahren wird eine Flachzugprobe während des zeitgleich ablaufenden Schweißprozesses mit einer linear ansteigenden Geschwindigkeit auf eine maximale Verformungsgeschwindigkeit v_{\max} gezogen (Bild 7). Die Stelle auf der PVR-Probe, an der der erste Heißriss auftritt, entspricht der kritischen Verformungsgeschwindigkeit v_{kr} . Sie steht in direktem Zusammenhang mit der nach der Heißrissstheorie von Prokhorov [68] postulierten kritischen Verformungsge-

schwindigkeit [%/°C] und kann somit als Kriterium für eine quantitative Bewertung der Heißbrissbeständigkeit herangezogen werden. Die kritische Verformungsgeschwindigkeit v_{kr} wird nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$v_{kr} = \frac{a \cdot L_{1.HR}}{v_s}$$

mit v_{kr} kritische Verformungsgeschwindigkeit
 a Beschleunigung
 $L_{1.HR}$ Abstand vom Nahtanfang bis zum Auftreten des ersten Risses
 v_s Schweißgeschwindigkeit

Formel 3: Berechnung der kritischen Verformungsgeschwindigkeit

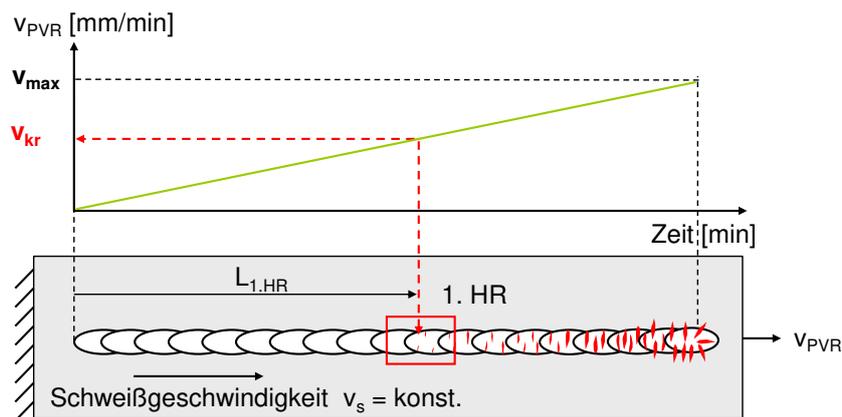


Bild 7: Prinzipielle Darstellung des PVR-Versuches

Der PVR-Test wurde zum Erreichen des o. g. Zieles abweichend zur Empfehlung im DIN-Fachbericht 17641-3:2004 [93] in verschiedenen Varianten durchgeführt (Tabelle 4).

Tabelle 4: Überblick über die Varianten des PVR-Versuchs

Variante	Zweck	Proben- dicke	Prüf- parameter	Querschliff PVR-Probe
1a	MSG-Schweißen einer Auftragraupe mit Fülldrahtelektrode auf alloy 625, 800 H und C-276 mit Nut	5 mm	U_s : 29,0 V v_{Dr} : 10,0 m/min v_s : 50 cm/min 20° schleppend	
1b	MSG-Schweißen einer Auftragraupe auf S355NL2 ohne Nut	10 mm		
2a	WIG-Blindraupe auf reinem MSG-Schweißgut (DIN EN ISO 15792-1) aus Füll- und Massivdrahtelektrode	10 mm	I_s : 180 A U_s : 12,0 V v_s : 20 cm/min	
2b	WIG-Blindraupe auf dem Mischschweißgut von V-Nähten aus Füll- und Massivdrahtelektrode	5 mm	I_s : 120 A U_s : 12,0 V v_s : 20 cm/min	

Für die PVR-Versuche der Variante 1a wurden aus den Grundwerkstoffen alloy 625, C-276 und 800 H PVR-Proben mit den Endabmessungen 5 mm x 250 mm x 40 mm gefräst. Diese Bleche erhielten zusätzlich eine Nut (Tiefe: 1mm, Breite: 5 mm). Die PVR-Proben der Variante 1b wurden aus 10 mm dicken P355NL2-Blech gefertigt. Bei den Variante 2a und 2b erfolgte nach der Probengenerierung auf der Decklagenseite (Prüfseite der PVR-Probe) ein blechebenes Planfräsen. Anschließend wurden die Wurzellagenseite auf die Endmaße von 10 mm (Variante 2a) und 5 mm (Variante 2b) abgearbeitet.

Nach dem Fräsen wurden die Prüfseiten der PVR-Proben mit 600er Körnung beschliffen. Anschließend erfolgte das Einschweißen der Proben in Einspannlaschen aus dem härtesten Stahl S355 J2G3 (Werkstoff-Nr. 1.0570) (Bild 8, links). Über diese Einspannlaschen erfolgte anschließend die Befestigung der Proben in die Aufnahmevorrichtung der PVR-Anlage. Das Bild 8, rechts zeigt eine Probe im PVR-Versuchsstand mit MSG-Brenner (Variante 1b). Für die Varianten 2a und 2b war es zwingend notwendig, die Spitze der Wolframelektrode in der Schweißnahtmitte zu positionieren, um eine WIG-Umschmelzung des MSG-Schweißgutes zu gewährleisten (siehe Bild in Tabelle 4). Tabelle 5 zeigt das allgemeine Vorgehen zur Auswertung der PVR-Proben.

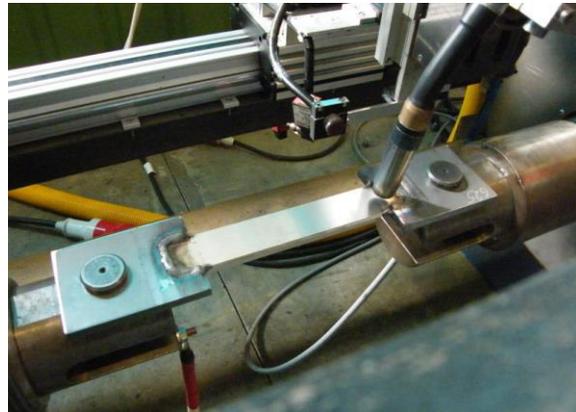
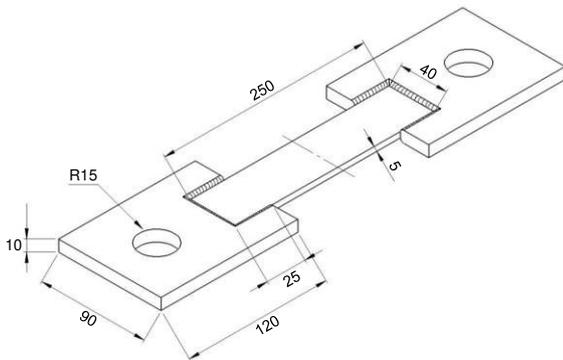


Bild 8: Beispiel für Form und Abmessungen eingeschweißten 5 mm dicken PVR-Probe und PVR-Versuchsstand mit MSG-Brenner und Probe (Variante 1a)

Tabelle 5: Allgemeine Vorgehensweise zur Auswertung der PVR-Versuche

Methode	Variante 1a und 1b Auftragraupe	Variante 2a und 2b WIG-Umschmelzung
Entfernen der Schlacke (Bürste/Schlackehammer)	X	-
Elektrolytische Reinigung (Magic Cleaner)	X	X
PT-Prüfung (Nachweis 1. Makro-Heißriss)	-	X
Entfernen der Schlackenreste mit flüssigem N ₂	X	-
Stereomikroskop (Nachweis 1. Mikro-Heißriss)	X	X

Bei den Varianten 1a und 1b wurde, bedingt durch Schlackenereste auf der Auftragraupe und den sich dadurch ergebenden Fehlanzeigen, auf eine PT-Prüfung zur makroskopischen Lokalisation der ersten Heißrisse verzichtet. Aus diesem Grund wurden die kritischen Verformungsgeschwindigkeiten der äußerlich auftretenden Heißrisse auf Basis einer mikroskopischen Bewertung der Proben bei 25-facher Vergrößerung unter dem Stereomikroskop ermittelt. Vorab wurde mit Hilfe von Flüssigstickstoff durch die Ausnutzung der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Schlacke und PBR-Probe eine Reduzierung der fest anhaftenden Schlacke.

7.5 Verwendete Prüftechnik

Zur Beurteilung der Auswirkungen der basischen Schlackencharakteristik auf die Heißrissneigung, die Ausbildung weiterer innerer und äußerer Unregelmäßigkeiten sowie die mechanisch-technologischen Eigenschaften und das Korrosionsverhalten sind die erzeugten Auftrag- und Verbindungsschweißungen mit den in Tabelle 6 dargestellten Prüftechniken untersucht worden.

Tabelle 6: Eingesetzte Prüftechnik für die Bestimmung der Eigenschaften der Auftrag- und Verbindungsschweißungen

Prüfung	Prüfziel / Prüfgrößen	Prüfmittel / Gerätetechnik
Sichtprüfung DIN EN ISO 17637:2017 [80]	Nachweis äußerer Nahtunregelmäßigkeiten	Lupe
PT-Prüfung DIN EN ISO 3452-1:2014 [69]	Nachweis äußerer Nahtunregelmäßigkeiten	Diffusions-Rot und Entwickler <i>ARDROX</i> (Fa. Chemetall)
Durchstrahlungsprüfung DIN EN 1425 [70]	Nachweis innerer Nahtunregelmäßigkeiten	<i>Eresco 42 MF4</i> (Fa. GE S&IT)
Stereomikroskopie	Nachweis von Oberflächenrissen	Mikroskop <i>MZ APO</i> (Fa. Leica)
Gefügeanalyse	Nahtunregelmäßigkeiten, Nahtgrößen, Aufmischungsgrad	Inverses Auflichtmikroskop <i>Leica MeF4A</i> (Fa. Leica)
Trägergasschmelzextraktion	Bestimmung der Gehalte an N, O, C und S	<i>ON/H-mat286</i> (Fa. Bruker) <i>G4 Icarus</i> (Fa. Bruker)
Rasterelektronenmikroskopie	EDX-Analyse	<i>XL 30 ESEM FEG</i> (Fa. Philips)
Vickers-Härteprüfung DIN EN ISO 6507-1:2006 [71]	Härtewerte HV10	Härtegerät <i>Dia Testor 2Rc</i> (Otto Wolpert Werke GmbH)
Querzugversuch DIN EN ISO 4136:2011 [72]	R_m , Bruchort	Materialprüfmaschine <i>Z250</i> (Fa. Zwick)
Anbindungsprüfung ASTM A 265:2012 [81]	Scherfestigkeit	Materialprüfmaschine <i>Z250</i> (Fa. Zwick)
Quer- u. Seitenbiegeprüfung DIN EN ISO 5173:2012 [73]	Biegewinkel	<i>Zug- und Druckmaschine ZDM 50</i> (Fa. VEB WPM Leipzig)
Kerbschlagbiegeversuch DIN EN ISO 9016:2011 [74] DIN EN ISO 148-1:2010 [87]	KV (Kerbschlagarbeit, Charpy V)	Pendelschlagwerk <i>RKP 300</i> (Fa. Roell Amsler)
Korrosionsprüfung ASTM G48:2015 [75]	Lochkorrosion, CPT [°C]	Tauchversuche
PVR-Test DIN-Fachbericht 17641-3:2004 [93]	Bewertung der Heißrissneigung	PVR-400/400 (Fa. WMP Leipzig GmbH)
Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	Bewertung des Werkstoffübergangs	Fastcam SA3 Modell 120K (Fa. Photron Limited)

Die PT-Prüfung wurde nur zur Bewertung der Schweißnähte aus den Massivdrahtelektroden genutzt. Für die Bewertung der Nähte der Fülldrahtelektroden ist diese Prüfung nicht zielführend, da die Reste der fest anhaftenden Schlacken Fehlanzeigen zur Folge haben. Auch nach dem Beschleifen der Nähte ist diese Art der Prüfung nicht zielführend, da durch das zähe Werkstoffverhalten kleine Risse zugeschmiert werden.

8 Forschungsergebnisse

8.1 Grundlegende Charakterisierung der Versuchswerkstoffe

8.1.1 Versuchsplan und -durchführung

Zur grundlegenden Charakterisierung der Schweißzusätze sind die in Bild 9 dargestellten Untersuchungsgegenstände und Analysemethoden angewendet worden.

Einflussgrößen / Variablen

Zielgrößen / Untersuchungsgegenstand

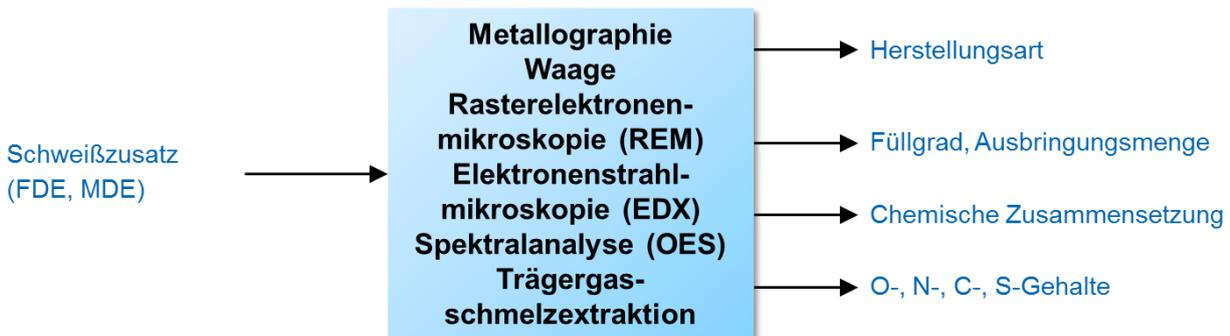


Bild 9: Überblick über die Untersuchungsgegenstände und Analysemethoden zur grundlegenden Charakterisierung der Versuchswerkstoffe

Anhand von Querschliffen der FDE sollten Aussagen zum Aufbau und zur Herstellungsart getroffen werden. Für die Bestimmung der Füllgrade nach DVS 0941-1:2004 ist gemäß der Formel 4 die Masse der Füllung zur Gesamtmasse des Fülldrahtes ins Verhältnis gesetzt worden [76].

$$\text{Füllgrad} = \frac{\text{Masse der Füllung in g}}{\text{Masse der Fülldrahtelektrode in g}} \times 100\%$$

Formel 4: Bestimmung der Füllgrade der Fülldrahtelektroden nach [76]

Dazu wurde das Gewicht der zugeschnittenen und gereinigten Fülldrähte mittels Feinwaage ermittelt, und danach die Füllung von dem Fülldrahtband mechanisch getrennt. Aufgrund der hohen Duktilität der Ni-haltigen Werkstoffe war dafür ein Tordieren der Fülldrahtmäntel nicht geeignet. Daher wurden die Fülldrähte parallel zur Drahtachse mittels Seitenschneider ohne Masseverluste sehr zeitaufwendig aufgetrennt. Andere Trennmethoden, wie das Ziehen der Fülldrahtelektroden über einen Dorn oder das spanabhebende Trennen mittels schnell drehenden Rotationswerkzeugs, erwiesen sich ebenfalls als ungeeignet. Zur rückstandslosen Entfernung aller Füllungsanteile sind die getrennten und aufgebogenen Fülldrahtmäntel mechanisch mittels Bürste und abschließend im Ultraschallbad in Ethanol gereinigt worden. Bevor nun die metallischen Mäntel gewogen wurden, erfolgte eine lichtmikroskopische Kontrolle auf evtl. vorhandene Rückstände der Füllung. Weiterhin wurde die Ausbringungsmenge bestimmt nach Formel 5 bestimmt.

$$\text{Ausbringung} = \frac{\text{Masse eingebrachtes Schweißgut in g}}{\text{Masse abgeschmolzener Schweißzusatz in g}} \times 100\%$$

Formel 5: Bestimmung der Ausbringung der Fülldrahtelektroden nach [76]

Das Aufschmelzen der Schweißzusätze erfolgte mittels Button-Melt-Technik im Lichtbogenofen (Bild 10). Diese Vorgehensweise ermöglichte die Bestimmung der Masseverhältnisse ausschließlich in Abhängigkeit von der Schlacke, da bei der WIG-Umschmelzung in inerter Schutzgasatmosphäre (Argon 4.6) keine Schweißspritzer entstehen, die das Ergebnis beeinflussen. Allerdings wurden so auch keine technologischen Einflüsse, die sich aus dem Schweißprozess ergeben, berücksichtigt. Die Ermittlung der Massenverhältnisse erfolgte durch Wiegen der Schweißzusätze vor und nach dem Umschmelzen und dem Entfernen der fest anhaftenden Schlackenbestandteile.

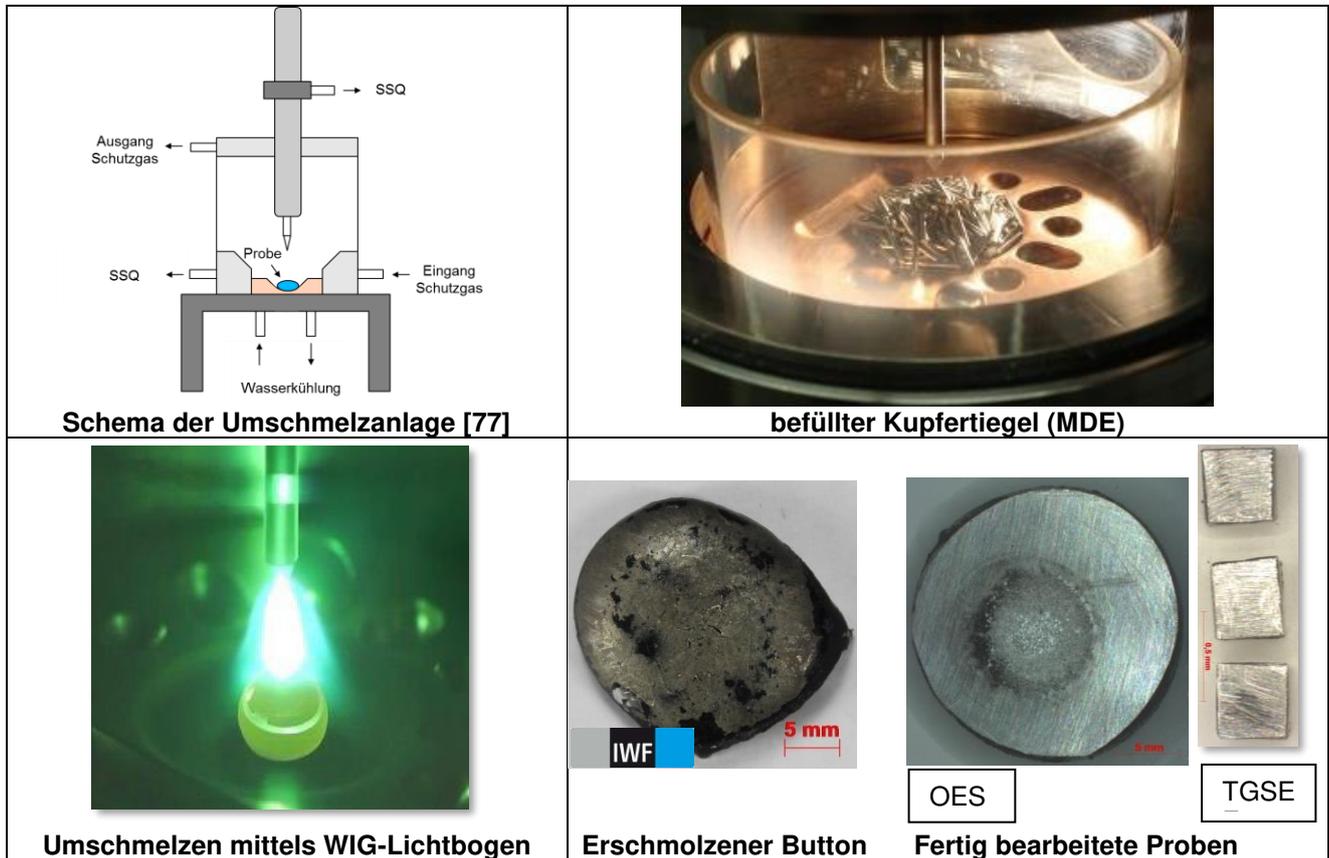


Bild 10: Grundlegendes Vorgehen der Button-Melt-Technik

Diese Methodik ermöglicht das Herstellen von reinen Schweißgutproben mit einem Gewicht von ca. 5 g bis 20 g. Für die anschließenden Spektralanalysen und Trägergas-schmelzextraktionen werden die erschmolzenen Buttons durch Schleifen (Metallographie) und Präzisionstrennung (gekühlt) vorbereitet.

Die detaillierte Vorgehensweise für die Schweißzusätze in diesem Projekt ist wie folgt:

1. Abtrennen von ca. 20 g Drahtelektroden-Stücken von der Drahtspule
2. Wischreinigung der Oberfläche
3. Trennen in stapelbare Stückgrößen (Länge ca. 10 mm-15 mm)
4. Reinigung des Kupfertiegels
5. Bestücken des Kupfertiegels mit dem Schweißzusatz und ca. 10 g Zirkon
6. Mehrmaliges Evakuieren und Spülen der Schutzgaskammer mit Ar 4.6
7. Umschmelzen mit WIG-Lichtbogen
 - a. Fülldrahtelektroden: mehrmaliges, beidseitiges Umschmelzen und zwischenzeitliche Entfernung der elektrisch nicht/schlecht leitenden Schlacke

- b. Massivdrahtelektroden: ein- oder mehrmaliges Umschmelzen in Abhängigkeit von Schmelzmenge
 - c. zwischenzeitliches Umschmelzen des Zirkon-Buttons zur Aufnahme des freien Sauerstoffs aus den FDE
8. Abkühlen der Umschmelzproben in Schutzgaskammer
 9. Reinigung der Anlagentechnik
 10. Weiterverarbeitung und Untersuchung der Proben

Zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Mäntel der FDE kam die Röntgenfluoreszenzanalyse zur Anwendung. Diese Methode ermöglichte eine Prüfung des Mantels, ohne dass die Fülldrahtelektrode zerstört wird. Die Abschnitte der FDE werden wie im Bild 11 dargestellt kompakt zusammengelegt und fixiert und danach analysiert.



Zusammengelegte Fülldrahtelektroden



RFA-Handgerät: X-MET8000 [78]

Bild 11: Vorgehen zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Fülldrahtelektrodenhüllen mittels Röntgenfluoreszenz-Analysen

Zur Bestimmung der Füllungsbestandteile der Fülldrahtelektroden (Punkte 1 bis 4 im Bild 12) und der Schlackenreste wurde die REM-EDX-Analyse mit einer Anregungsspannung von 25 kV genutzt. Die Schlackenreste mussten dazu mittels selbstklebendem Kohlenstoffpad auf den Probenhalter fixiert werden. Die EDX-Analysen der MDE und der FDE-Mäntel (Punkt 5 im) erfolgten flächig in einem Bereich von ca. 100 μm^2 . Die Schlackenreste der geschmolzenen FDE wurden aufgrund der undefinierten Oberfläche ebenfalls nur mit Spotanalysen bestimmt.

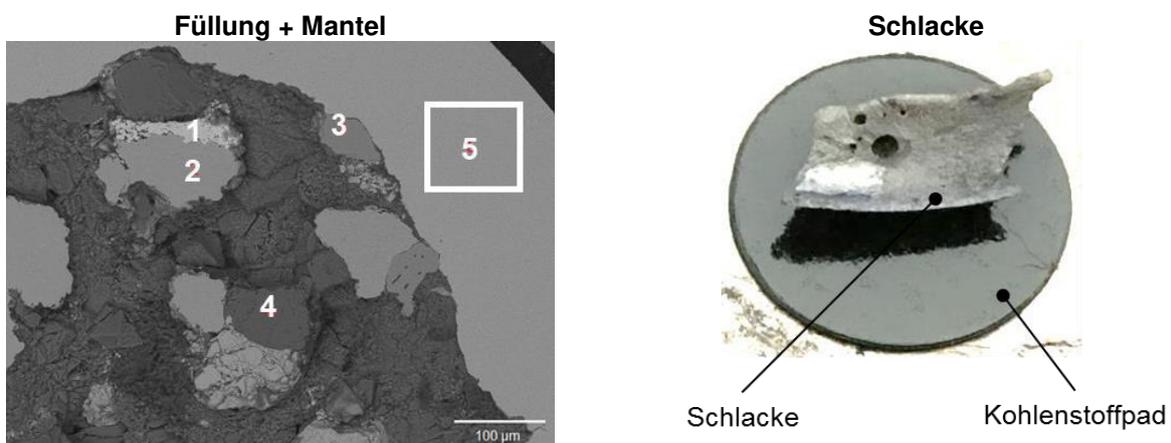


Bild 12: Vorgehen der REM-EDX Analyse an den Fülldrahtelektroden (links: Messpunkte am Querschliff einer Fülldrahtelektrode, rechts: präparierte Schlacke)

8.1.2 Ergebnisse zur Charakterisierung der Schweißzusatzwerkstoffe

Alle Fülldrahtelektroden sind formgeschlossen und unterscheiden sich herstellerabhängig lediglich in der Überlappungslänge der Bänder (vgl. Bild 13). Infolge dessen weisen sie unterschiedliche Querschnittsflächen des stromführenden Mantels auf, was bedingt durch die unterschiedliche Stromdichte einen Einfluss auf die Abschmelzleistung vermuten lässt.

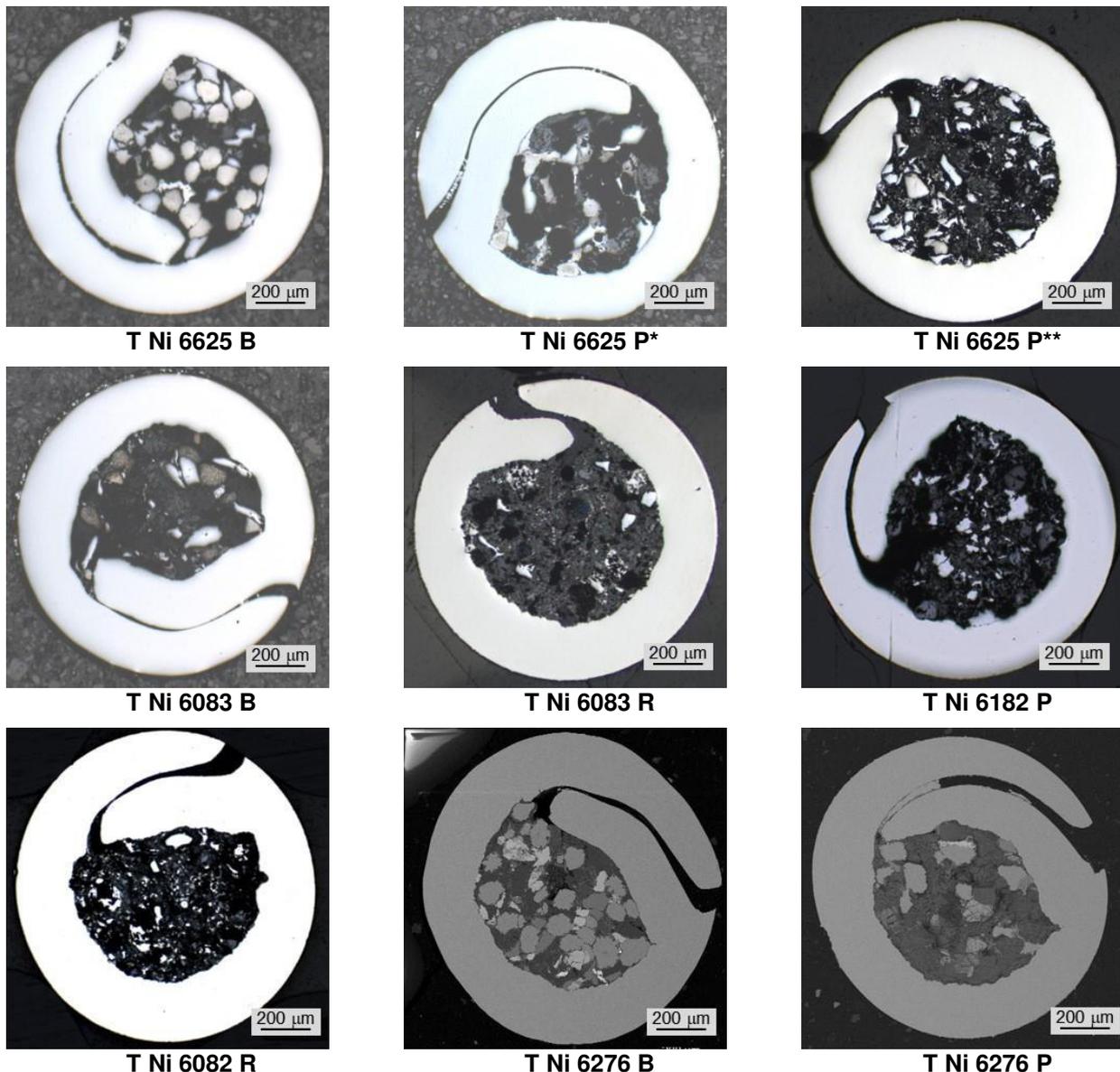


Bild 13: Querschnitte der Fülldrahtelektroden (Lichtmikroskopie oder REM(BSE)-Aufnahme)

Die Füllgrade liegen unabhängig von Schlackencharakteristik und Legierungstyp im Bereich zwischen 18 % und 25 %, was nach dem DVS-Merkblatt 0941:2005 [76] einen mittleren Füllgrad darstellt (Tabelle 7). Die Ausbringungsmengen liegen im Bereich von 90 ± 4 % und weisen demnach keine signifikanten Unterschiede auf. Aufgrund der fehlenden Korrelation von Füllgrad und Ausbringungsmenge ist in der Pulverfüllung von unterschiedlichen Anteilen an metallischen und mineralischen Bestandteilen auszugehen. In Anhang 3 bis Anhang 5 sind die chemischen Zusammensetzungen der mittels Button-Melt-Technik umgeschmolzenen Schweißzusätze und die RFA-Analysen der Mäntel der

FDE aufgeführt. Aufgrund der inerten Schutzgasatmosphäre weisen die ermittelten Werte an den Buttons keine Zu- oder Abbrände an Legierungselementen auf. Im Ergebnis der von der Firma voestalpine Böhler Welding GmbH durchgeführten RFA-Messungen zeigte sich, dass die Mäntel der Fülldrahtelektroden T Ni 6625 P**, T Ni 6083 R und Ni 6082 R nicht artgleich sind, sondern dem Legierungstyp NiCr8020 (W.-Nr. 2.4869) entsprechen. Die Mäntel der Fülldrahtelektrode T Ni 6083 B und T 6182 P sind aus dem Legierungstyp Ni 6082. Die fehlenden Legierungsbestandteile bei diesen FDE, wie z. B. Nb, Mn, Mo, müssen über die Füllung zu legiert werden.

Die Schlacken aller Fülldrahtelektroden zeigten im Rückstreuelektronenbild (BSE) am REM unterschiedliche Grauwerte, was auf verschiedenste chemische Zusammensetzungen der Füllungen hinweist. Gemäß den EDX-Analysen (Anhang 6) bestehen die Füllungen aus einem Multikomponentensystem aus Legierungselementen und Schlackebildnern. Die angegebenen quantitativen Werte stellen keine Absolutwerte dar, sondern dienen lediglich dem qualitativen Vergleich. Im Ergebnis der REM-EDX-Analysen waren neben den Legierungselementen auch typische basische und rutilische Schlackenbildner (CaF_2 , TiO_2) und weitere Schlackenbildner aus den Oxiden von Ca und Mg sowie Mn, Al, Si und K zu finden. Des Weiteren zeigten sich bei verschiedenen Fülldrahtelektroden Spuren von Zr in der Schlacke, das vermutlich als Desoxidationsmittel hinzugefügt und anschließend „verschlackt“ worden ist.

Die Bestimmung des Basizitätsgrades - wie im Projektantrag geplant - ist ohne die Bestimmung der Masseanteile der Schlackebildner in der gesamten Füllung des Schweißzusatzes nicht möglich. Zudem können bei der Probenpräparation durch das Schleifen der Fülldrahtelektroden mit geringerem Füllstoffgehalt ungewollt Partikel entfernt worden sein.

8.2 Verarbeitungseigenschaften der Füll- und Massivdrahtelektroden

8.2.1 Versuchsplan- und -durchführung

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden aufbauend auf den Schweißempfehlungen der Hersteller der Schweißzusatzwerkstoffe vergleichende Betrachtungen der Verarbeitungseigenschaften anhand des Schweißens einzelner Auftragraupen durchgeführt und Arbeitsparameter für die weitere Versuchsdurchführung bestimmt. Im Bild 14 sind die untersuchten Einflussgrößen, die Untersuchungsgegenstände sowie die angewandten Methoden dargelegt.

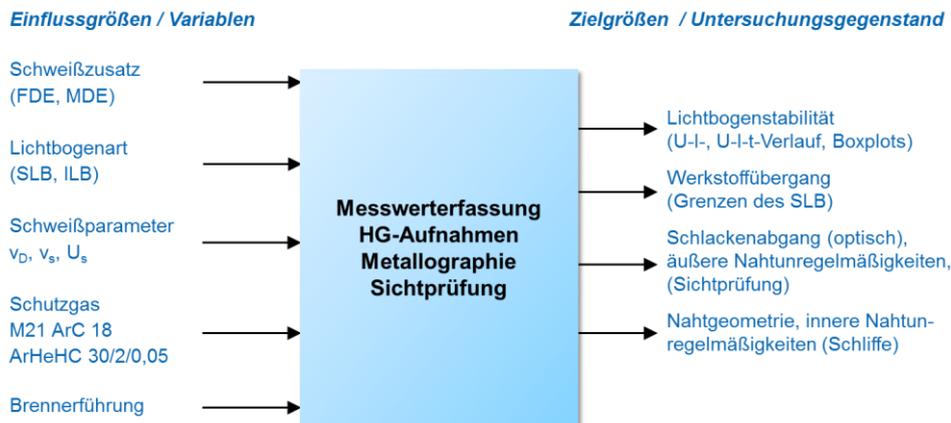


Bild 14: Allgemeines Vorgehen zur Untersuchung der Verarbeitungseigenschaften

Zur Gewährleistung konstanter Schweißparameter wurden alle Schweißungen vollmechanisiert in Position PA auf 10 mm dicken P355NL2 Blechen ausgeführt. Aus technischen Gründen erfolgte mit der Variation der Schweißzusätze auch eine Variation der Lichtbogenarten, der Schutzgase und der Brennerführung. Folgende Schweißprozessparameter wurden im Rahmen der Technologieoptimierung bei den FDE variiert:

- Drahtvorschub v_D
- Schweißgeschwindigkeit v_S
- Schweißspannung U_s .

Kriterien zur Bewertung der Verarbeitungseigenschaften bildeten im Hinblick auf die späteren Schweißungen ein gutes Benetzungsverhalten, eine gute Lichtbogenstabilität sowie ein spritzerarmer Werkstoffübergang. Die Bewertung der Auftragraupen erfolgte mittels Sichtprüfung. Die Nahtgeometrie wurde lichtmikroskopisch anhand der geometrischen Kenngrößen Einbrandtiefe, Nahtübergangswinkel, Nahtüberhöhung, Nahtbreite und Nahthöhe im Querschliff bewertet. Zur Beurteilung der Lichtbogenstabilität wurden die gemessenen Strom- und Spannungswerte miteinander verglichen und der Werkstoffübergang anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen beurteilt. Die Schweißversuche erfolgten unter der Einhaltung der Randbedingungen in Tabelle 7 und unter Berücksichtigung der in Tabelle 8 getroffenen Empfehlungen der Zusatzwerkstoffhersteller.

Tabelle 7: Randbedingungen für das MSG-Schweißen

Einflussgröße	Basische Fülldrahtelektrode	Rutile Fülldrahtelektrode	Massivdrahtelektrode
Schutzgas	Ar +18 % CO ₂	Ar +18 % CO ₂	Rest Ar + 28 % He + 2 % H ₂ + 0,05 %CO ₂
Schweißstromquelle	Fronius TPS 4000 / CLOOS QINEO CHAMP		
Lichtbogenart	Standard SLB	Standard SLB	ILB
Brennerführung	20° schleppend	20° schleppend	15° stechend

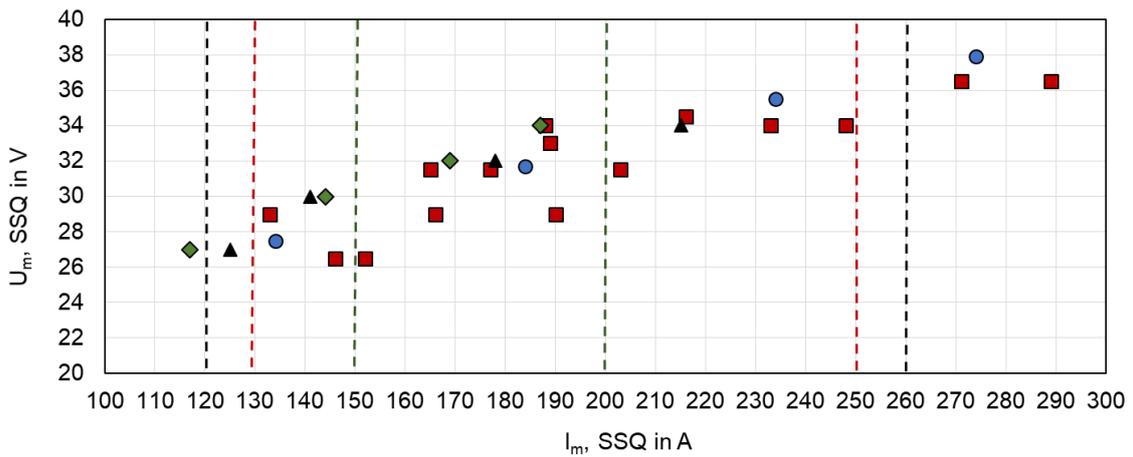
Tabelle 8: Herstellerseitige Empfehlungen zum MSG-Schweißen für die verschiedenen Ni-Basis-Füll- und Massivdrahtelektroden

Schweißzusatz	LiBo	Strom (Pol.)	I _s [A]	U _s [V]	v _{Dr} [m/min]	I _K [mm]	Schweißposition
T Ni 6625 B	SLB	DC (+)	130-250	24-32	-	12-25	PA, PB
T Ni 6625 P*	SLB	DC (+)	130-220	24-32	-	12-25	alle, außer PG
T Ni 6625 P**	SLB	DC (+)	150-250	22-28	-	-	PA, PB, PC, PF
S Ni 6625	ILB	DC (+)	130-150	23-27	6,0-7,0	-	alle
T Ni 6083 B	SLB	DC (+)	130-250	24-32	-	12-25	PA, PB
T Ni 6083 R	SLB	DC (+)	120-260	23-36	6-12	-	vorwiegend PA, PB
T Ni 6182 P	SLB	DC (+)	150-200	25-26	7,35-10,0	9-16	alle
T Ni 6082 R	SLB	DC (+)	130-260	24-36	-	-	vorwiegend PA, PB
S Ni 6082	ILB	DC (+)	150	23-27	5,0	-	alle
T Ni 6726 B	SLB	DC (+)	130-250	24-32	-	12-25	PA, PB
T Ni 6276 P	SLB	DC (+)	150-200	25-26	7,5-10,0	9-16	alle
S Ni 6276	ILB	DC (+)	130-150	23-27	8,0	-	alle

Zur Anwendung kamen Kennlinien für das Schweißen von Ni-Basis Schweißzusätzen, die in Absprache mit den Herstellern der Schweißzusatzwerkstoffe und der Schweißstromquellen ausgewählt worden sind. Eine Anpassung der Kennlinien erfolgte nicht.

8.2.2 Ergebnisse der Parameterfindung

Im Rahmen der Parameterfindung wurden die Drahtvorschubgeschwindigkeit, die Schweißspannung und die Schweißgeschwindigkeit bei konstanten Kontaktrohrabstand von 15 mm schrittweise variiert, um die in Tabelle 8 aufgeführten unteren und oberen Parametergrenzen zu erreichen. Bild 15 zeigt exemplarisch die Arbeitsbereiche der Füll- und Massivdrahtelektroden vom Typ Ni 6083, Ni 6082 und Ni 6182. Bei den aufgeführten Messwerten handelt es sich um arithmetische Mittelwerte der Schweißstromquelle. Zur Untersuchung des Einbrand- und Benetzungsverhaltens wurden nahe an den empfohlenen Parametergrenzen Querschliffe entnommen und ausgewertet (Tabelle 9 bis Tabelle 11 und Anhang 7).



Empfohlene Parameter lt. Hersteller:

■ T Ni 6083 B	130-250 A	24-32 V
▲ T Ni 6083 R	120-260 A	23-36 V
◆ T Ni 6182 P	150-200 A	25-26 V
● S Ni 6082	130-260 A	24-36 V

Bild 15: Arbeitsbereiche am Beispiel der SZW vom Typ Ni 6083, Ni 6082 und Ni 6182

Bild 16 zeigt für alle Fülldrahtelektroden die Arbeitspunkte der genutzten Schweißströme und -spannungen für die obere und untere Parametergrenzen und die Aufmischungsgrade in Abhängig vom Schweißstrom.

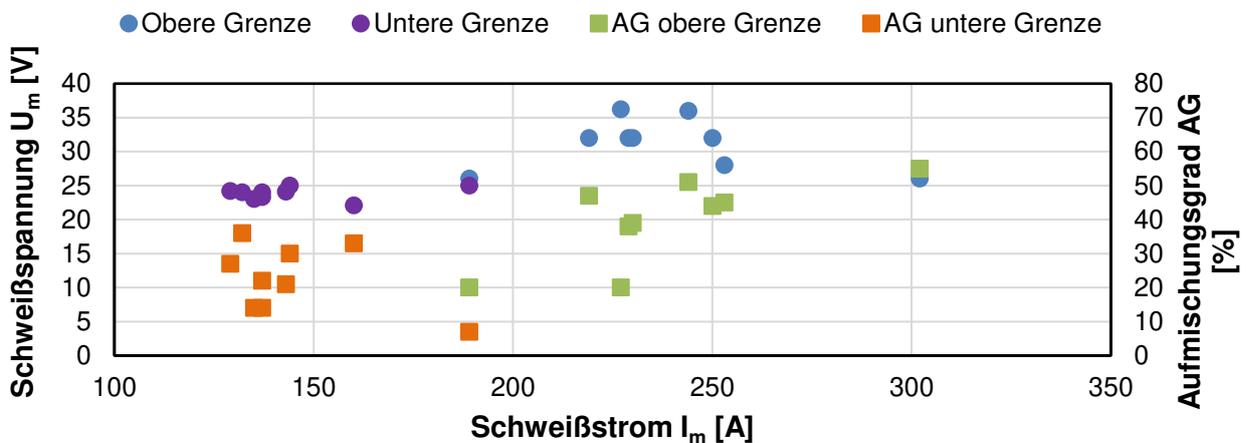


Bild 16: Arbeitsbereiche am Beispiel der SZW vom Typ Ni 6083, Ni 6082 und Ni 6182

Tabelle 9: Ergebnisse der Parametervariation der Fülldrahtelektroden vom Typ Ni 6625

Schweiß-zusatz	Grenze	Empfehlung		Einstellwerte			Messwerte			Geometrie	
		U _m V	I _m A	v _d m/min	U _s V	v _s cm/min	U _m V	I _m A	E _m kJ/cm	AG %	t _E mm
T Ni 6625 B	oben	32	250	13,0	32,0	80	32,0	230	5,5	39	1,7
	unten	24	130	8,0	24,0	40	24,1	143	5,1	21	1,1
T Ni 6625 P*	oben	32	220	14,5	32,0	90	32,0	219	4,7	47	1,3
	unten	24	130	7,0	24,0	40	24,0	132	4,8	36	0,8
T Ni 6625 P**	oben	28	250	13,0	28,0	90	28,0	253	4,7	45	2,1
	unten	22	150	8,0	22,0	40	22,1	160	5,3	33	0,9

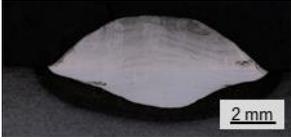
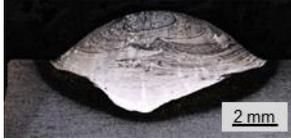
Grenze	T Ni 6625 B	T Ni 6625 P*	T Ni 6625 P**
Obere			
Untere			

Tabelle 10: Ergebnisse der Parametervariation der Fülldrahtelektroden vom Typ Ni 6083, Ni 6082 und 6182

Schweiß-zusatz	Grenze	Empfehlung		Einstellwerte			Messwerte			Geometrie	
		U _m V	I _m A	v _d m/min	U _s V	v _s cm/min	U _m V	I _m A	E _m kJ/cm	AG %	t _E mm
T Ni 6083 B	oben	32	250	10,0	32,0	50	32,0	250	9,6	44	2,5
	unten	24	130	6,0	24,0	35	24,2	129	5,3	27	1,5
T Ni 6083 R	oben	36	260	13,5	36,0	60	36,0	244	8,8	51	2,2
	unten	23	120	7,0	23,0	35	23,1	135	5,3	14	0,5
T Ni 6182 P	oben	26	200	13,0	26,0	50	26,0	194	6,1	20	1,1
	unten	25	150	8,0	25,0	35	25,0	144	6,2	14	0,9
T Ni 6082 R	oben	36	260	12,0	36,0	50	36,2	227	9,8	55	3,5
	unten	24	130	6,0	23,0	35	23,3	137	5,4	30	1,1

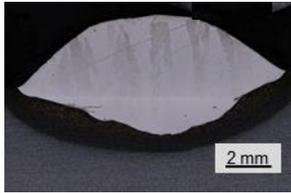
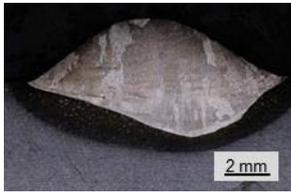
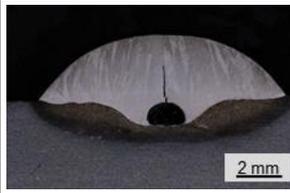
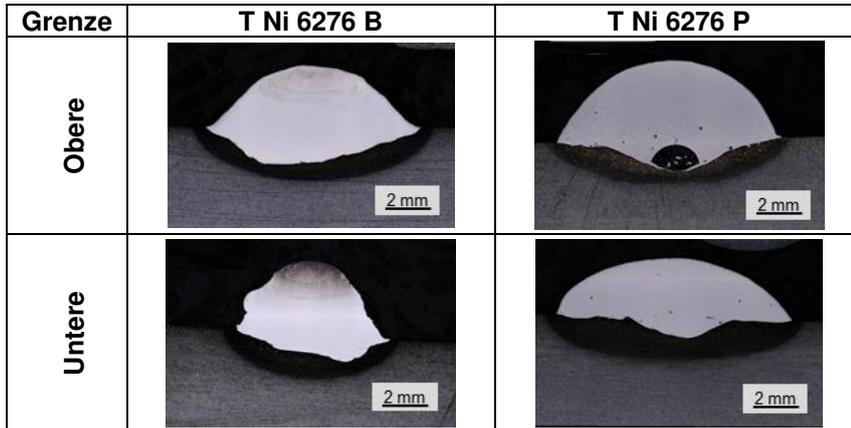
Grenze	T Ni 6083 B	T Ni 6083 R	T Ni 6182 P	T Ni 6082 R
Obere				
Untere				

Tabelle 11: Ergebnisse der Parametervariation der Fülldrahtelektroden vom Typ Ni 6276

Schweißzusatz	Grenze	Empfehlung		Einstellwerte			Messwerte			Geometrie	
		U _m V	I _m A	v _d m/min	U _s V	v _s cm/min	U _m V	I _m A	E _m kJ/cm	AG %	t _E mm
T Ni 6276 B	oben	32	250	13,5	32,0	70	32,0	229	6,3	38	1,6
	unten	24	130	7,0	24,0	35	24,0	137	5,6	22	1,0
T Ni 6276 P	oben	26	200	15,0	26,0	50	26,0	189	5,9	20	1,2
	unten	25	150	9,0	25,0	30	25,0	143	7,2	7	0,5

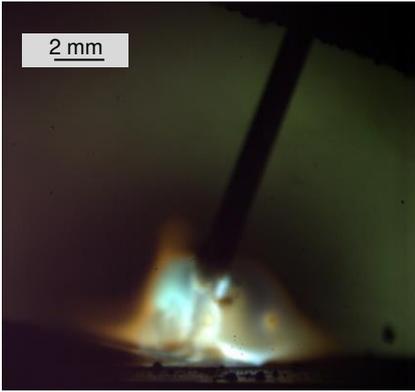


Im Weiteren wurden die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ausgewertet. Bild 17 bis Bild 19 zeigen exemplarisch jeweils zwei Momentaufnahmen von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen aller Schweißzusätze aufgeführt, um den Werkstoffübergang zu beurteilen. Die Tabelle 12 fasst die Ergebnisse der Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zusammen.

Tabelle 12: Auswertung der Ergebnisse der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der MSG-Schweißungen mit den Fülldrahtelektroden

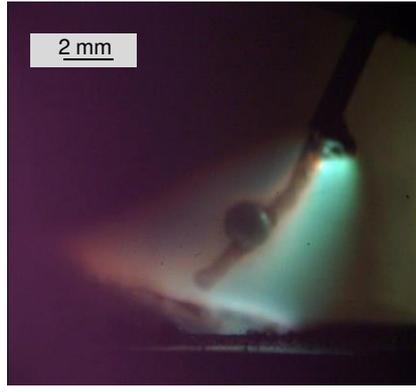
Schweißzusatz	Tropfenablösung	Füllung	Spritzer	Tropfengröße	Bemerkung
T Ni 6625 B	unregelmäßig	aufgeschmolzen	ja	grob	Wegschleudern von Mantelmaterial
T Ni 6625 P*	unregelmäßig	z. T. Lanzenbildung	wenig	grob	-
T Ni 6625 P**	regelmäßig	z. T. nicht aufgeschmolzen	wenig	mittel	-
S Ni 6625	regelmäßig	-	wenig	fein	„Nachtropfen“ teils vorhanden
T Ni 6083 B	unregelmäßig	aufgeschmolzen	wenig	mittel	-
T Ni 6083 R	regelmäßig	z. T. nicht aufgeschmolzen	wenig	mittel	-
T Ni 6182 P	regelmäßig	z. T. nicht aufgeschmolzen	wenig	mittel	-
S Ni 6082	regelmäßig	-	wenig	fein	1 Tropfen/Puls
T Ni 6276 B	unregelmäßig	z. T. nicht aufgeschmolzen	ja	gehr grob	schlagartige Tropfenexplosionen
T Ni 6276 P	unregelmäßig	z. T. nicht aufgeschmolzen	ja	grob	Werkstoffübergang sehr instabil und ungeordnet
S Ni 6276	regelmäßig	-	wenig	fein	1 Tropfen/Puls

T Ni 6625 B

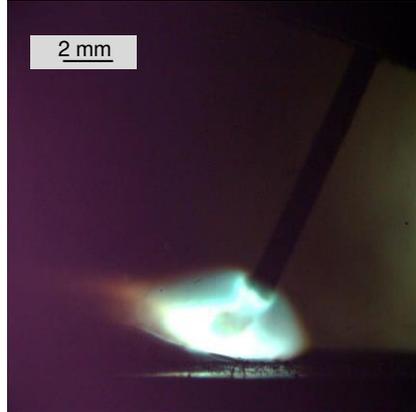
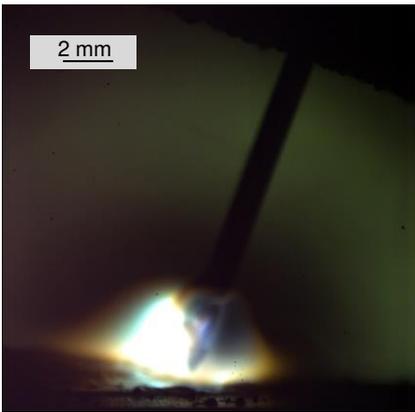


Einstellwerte:
 $v_d = 10 \text{ m/min}$
 $U_s = 31 \text{ V}$
 $v_s = 50 \text{ cm/min}$
 Messwerte:
 $U_m = 31,0 \text{ V}$
 $I_m = 199 \text{ A}$

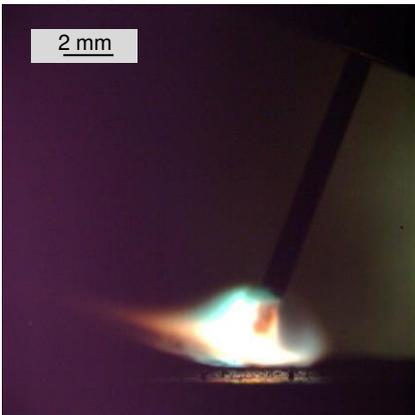
T Ni 6625 P*



Einstellwerte:
 $v_d = 10 \text{ m/min}$
 $U_s = 32 \text{ V}$
 $v_s = 50 \text{ cm/min}$
 Messwerte:
 $U_m = 32,0 \text{ V}$
 $I_m = 204 \text{ A}$

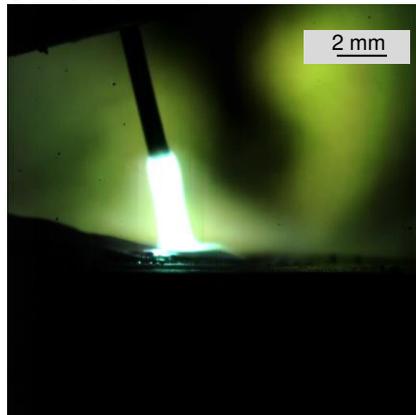


T Ni 6625 P**



Einstellwerte:
 $v_d = 10 \text{ m/min}$
 $U_s = 28 \text{ V}$
 $v_s = 50 \text{ cm/min}$
 Messwerte:
 $U_m = 28,3 \text{ V}$
 $I_m = 193 \text{ A}$

S Ni 6625



Einstellwerte:
 $v_d = 8 \text{ m/min}$
 $v_s = 50 \text{ cm/min}$
 Messwerte:
 $U_m = 33,1 \text{ V}$
 $I_m = 158 \text{ A}$
 $I_G = 90 \text{ A}$
 $I_P = 350 \text{ A}$
 $t_P = 3,2 \text{ ms}$
 $f = 149,4 \text{ Hz}$

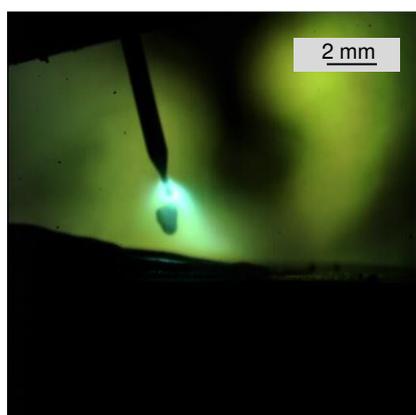
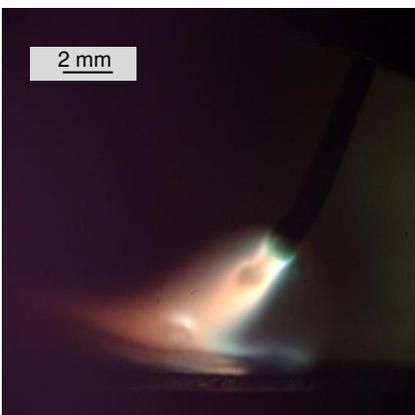
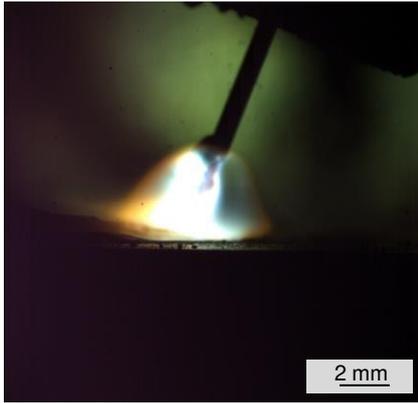


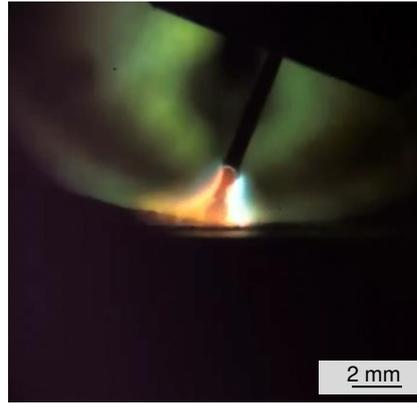
Bild 17: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen - Schweißzusatz Typ Ni 6625

T Ni 6083 B

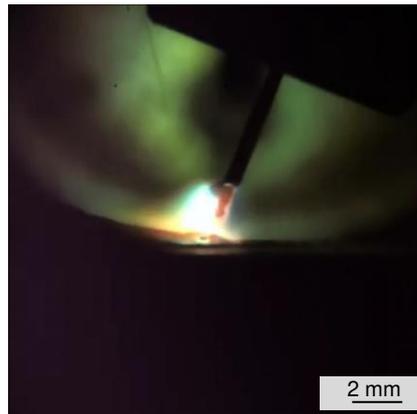
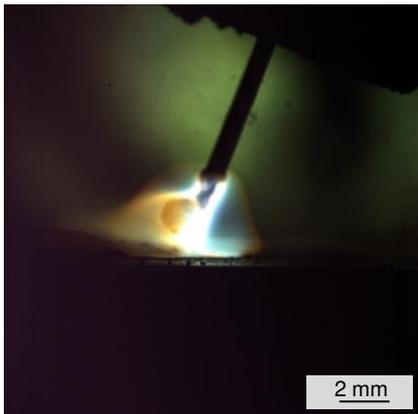


Einstellwerte:
 $v_d = 10 \text{ m/min}$
 $U_s = 31 \text{ V}$
 $l_K = 15 \text{ mm}$
 $v_s = 50 \text{ cm/min}$
 Messwerte:
 $U_m = 31,0 \text{ V}$
 $I_m = 188 \text{ A}$

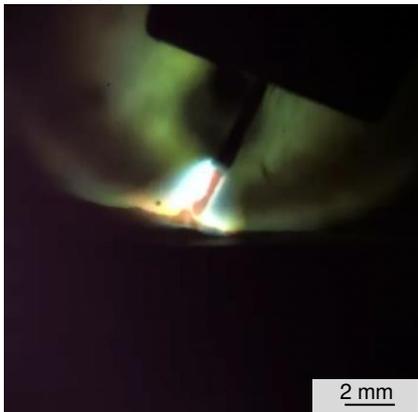
T Ni 6083 R



Einstellwerte:
 $v_d = 10 \text{ m/min}$
 $U_s = 30 \text{ V}$
 $l_K = 15 \text{ mm}$
 $v_s = 50 \text{ cm/min}$
 Messwerte:
 $U_m = 30,0 \text{ V}$
 $I_m = 199 \text{ A}$

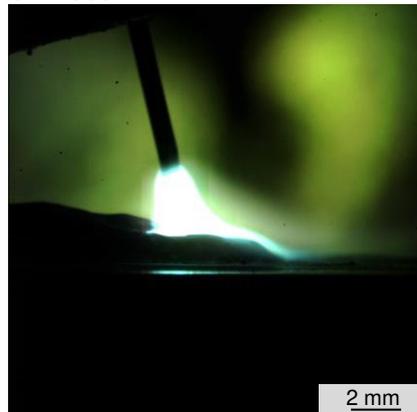


T Ni 6182 P



Einstellwerte:
 $v_d = 7,5 \text{ m/min}$
 $U_s = 25,5 \text{ V}$
 $l_K = 13 \text{ mm}$
 $v_s = 35 \text{ cm/min}$
 Messwerte:
 $U_m = 25,5 \text{ V}$
 $I_m = 135 \text{ A}$

S Ni 6082



Einstellwerte:
 $v_d = 8 \text{ m/min}$
 $l_K = 15 \text{ mm}$
 $v_s = 50 \text{ cm/min}$
 Messwerte:
 $U_m = 35,1 \text{ V}$
 $I_m = 186 \text{ A}$
 $I_G = 79,0 \text{ A}$
 $I_P = 369,0 \text{ A}$
 $t_P = 4,2 \text{ ms}$
 $f = 107,3 \text{ Hz}$

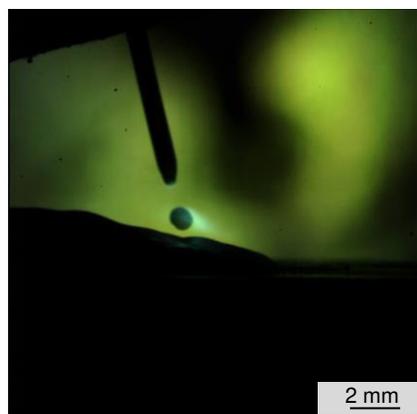
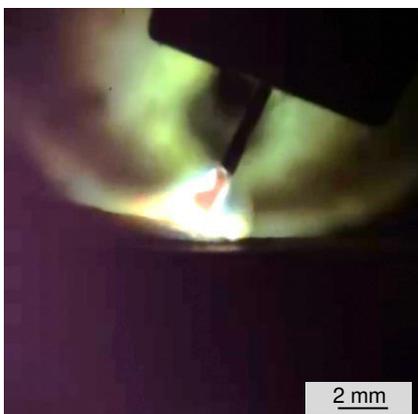
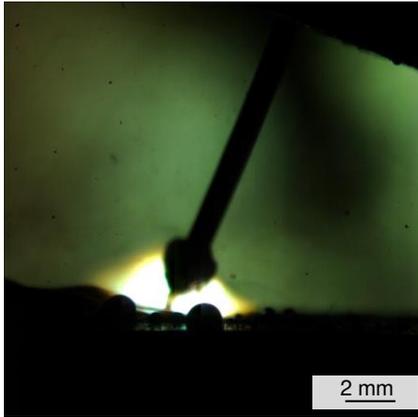


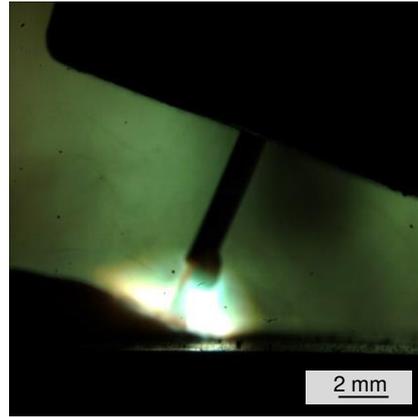
Bild 18: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen - Schweißzusatz Typ Ni 6083, Ni 6082, Ni 6182

T Ni 6276 B

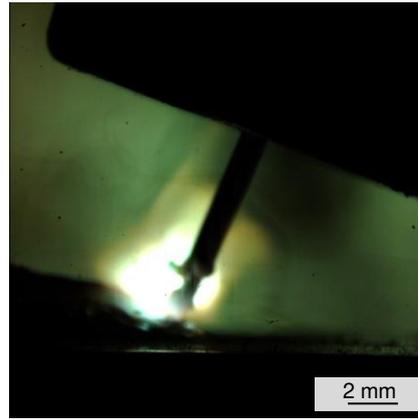
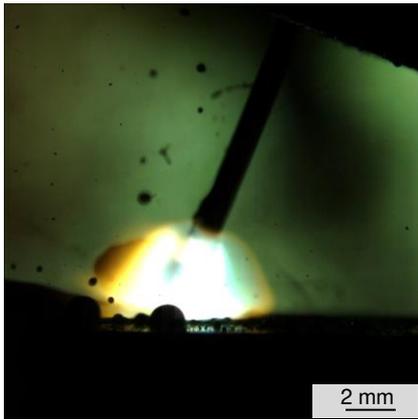


Einstellwerte:
 $v_d = 10 \text{ m/min}$
 $U_s = 30 \text{ V}$
 $l_K = 15 \text{ mm}$
 $v_s = 50 \text{ cm/min}$
Messwerte:
 $U_m = 30,0 \text{ V}$
 $I_m = 174 \text{ A}$

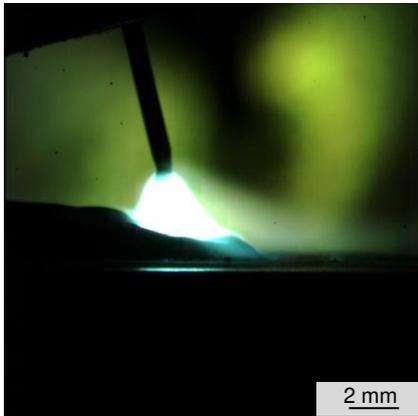
T Ni 6276 P



Einstellwerte:
 $v_d = 8 \text{ m/min}$
 $U_s = 26 \text{ V}$
 $l_K = 15 \text{ mm}$
 $v_s = 50 \text{ cm/min}$
Messwerte:
 $U_m = 26,0 \text{ V}$
 $I_m = 134 \text{ A}$



S Ni 6276



Einstellwerte:
 $v_d = 8 \text{ m/min}$
 $l_K = 15 \text{ mm}$
 $v_s = 50 \text{ cm/min}$
Messwerte:
 $U_m = 33,0 \text{ V}$
 $I_m = 174 \text{ A}$
 $I_G = 85,4 \text{ A}$
 $I_P = 347,8 \text{ A}$
 $t_P = 3,3 \text{ ms}$
 $f = 145,3 \text{ Hz}$

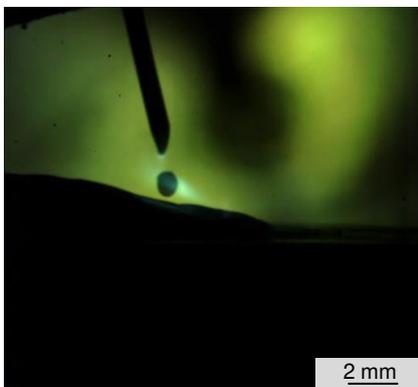


Bild 19: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen - Schweißzusatz Typ Ni 6276

Allgemein sind die Werkstoffübergänge im Vergleich zu Fe-Basis-Schweißzusätzen aufgrund der hochviskosen Ni-Schmelze grobtropfiger. Die Fülldrahtelektroden neigen tendenziell zu einem ungeordneten bzw. unregelmäßigen Tropfenübergang. Dennoch trat legierungsunabhängig bei einigen rutilen Fülldrahtelektroden ein vergleichsweise regelmäßiger, feintropfiger Werkstoffübergang auf, der in einen stabilen und spritzerarmen Lichtbogen resultierte. Bei den basischen Fülldrahtelektroden bildeten sich tendenziell größere Tropfen von Mantelmaterial, die teilweise durch den Lichtbogen weggeschleudert wurden (vgl. Bild 17, T Ni 6625 B). Des Weiteren unterschieden sich die Fülldrahtelektroden bei dem Aufschmelzverhalten der elektrisch nichtleitenden Füllung. So kam es unabhängig von der Legierung und der Schlackencharakteristik teilweise zu keiner Aufschmelzung der Füllung im Lichtbogen bzw. zu einem Hochbrennen des Lichtbogens in Richtung des Stromkontaktrohres (sog. Lanzenbildung). Dies führt zur Bildung von groben Tropfen, die teilweise vom Lichtbogen gestützt und erst aufgrund der Schwerkraft in die Schmelze übergehen oder die infolge eines Kurzschlusses schlagartig explodieren (vgl. Bild 19, T Ni 6276 B). Am Beispiel des Fülldrahtes vom Typ T Ni 6276 P lässt sich besonders gut erkennen, dass der Lichtbogen instabil in unterschiedliche Richtungen vom sich gebildeten Tropfen abgeht und sich somit ein besonders instabiler Lichtbogen bildet.

Der Werkstoffübergang der Massivdrahtelektroden ist aufgrund des eingesetzten Impulslichtbogens periodisch (1 Tropfen pro Impuls) und sehr spritzerarm. Lediglich bei der Schweißung mit der MDE vom Typ S Ni 6625 konnte ein Nachtropfen festgestellt werden, was jedoch nicht zu einer vermehrten Spritzerbildung führte.

8.2.3 Ergebnisse zur Lichtbogenstabilität

Obwohl der Lichtbogen direkt über Schweißströme und -spannungen, die sich aus den verwendeten Lichtbogenkennlinien ergeben und durch die Wahl des Schutzgases beeinflussbar ist, sorgen unbeeinflussbare Störgrößen, wie Unregelmäßigkeiten auf der Drahtelektrodenoberfläche, der Verschleiß der Stromkontaktrohres u. a., dafür, dass das Lichtbogenschweißen mit abschmelzender Elektrode ein stochastischer Prozess ist. Somit weist auch der Lichtbogen, dessen Stabilität einen großen Einfluss auf die Entstehung von Nahtunregelmäßigkeiten hat, ein stochastisches Verhalten auf. Schwankungen in der Lichtspannung bzw. im Schweißstrom, wie kurzzeitige Strom-, Spannungsspitzen oder Kurzschlüsse, können die geometrischen Nahtkenngrößen beeinflussen und zu Schweißspritzern führen.

Zur Bewertung der Lichtbogenstabilität (Anhang 8 bis Anhang 10) sind die gemessenen Schweißströme und -spannungen exemplarisch für Parameterkombinationen ($v_d = 10$ m/min bei FDE und $v_d = 8$ m/min bei MDE) mit Hilfe geeigneter Methoden visualisiert und miteinander verglichen werden. Zum Vergleich dienen folgende Methoden:

- Spannung-Strom-Diagramme (U-I)
- Strom-Zeit-Diagramm (I-t)
- Spannung-Zeit-Diagramm (U-t)
- Kastengrafik (Boxplot)

Die U-I-Diagramme geben die tatsächlich realisierten Arbeitspunkte der Schweißung wieder. Der bei diesen Schweißungen mit Fülldraht und argonreichen Mischgas zur Anwendung kommende Sprühlichtbogen mit seinen idealerweise wenig schwankenden Strom- und Spannungswerten zeigt in den U-I-Diagrammen idealerweise einen lokal begrenzten Punkt. Dagegen ist bei den Impulslichtbogenschweißungen der Massivdrahtelektroden deutlich die Grund- und Pulsphase zu erkennen.

Zur Visualisierung des zeitlichen Verlaufs der Messwerte dienen die I-t- und die U-t-Verläufe, die in einem Diagramm zusammengefasst wurden. Zur grafischen Darstellung über die auftretenden Werte und insbesondere dessen Verteilung werden zusätzlich Kastengrafiken genutzt. Der Kasten wird von den 25 %- und 75 %-Quantil begrenzt und beinhaltet somit 50 % aller Messwerte. Der sich ergebende Abstand zwischen den Quartilen wird als Interquartilsabstand (IQA) bezeichnet und ist vergleichbar wie die Standardabweichung, ein Streuungsmaß. Die von den Kästen nach unten und oben abgehenden Linien werden als Antennen (engl. Whisker) bezeichnet und beinhalten auch die Ausreißer. Sie geben zusammen einen sehr schnellen Eindruck über die Verteilung der Daten und ermöglichen über den relativen Vergleich eine Beurteilung der Lichtbogenstabilität. Jedoch ist diese Methode nur bei den Schweißungen mit Sprühlichtbogen nützlich. Zusätzlich zu den Extremwerten, die zur Beurteilung der Kurzschlussbildung dienen, ist mit dem Median auch noch ein Zentralwert ausgeführt (vgl. Bild 20).

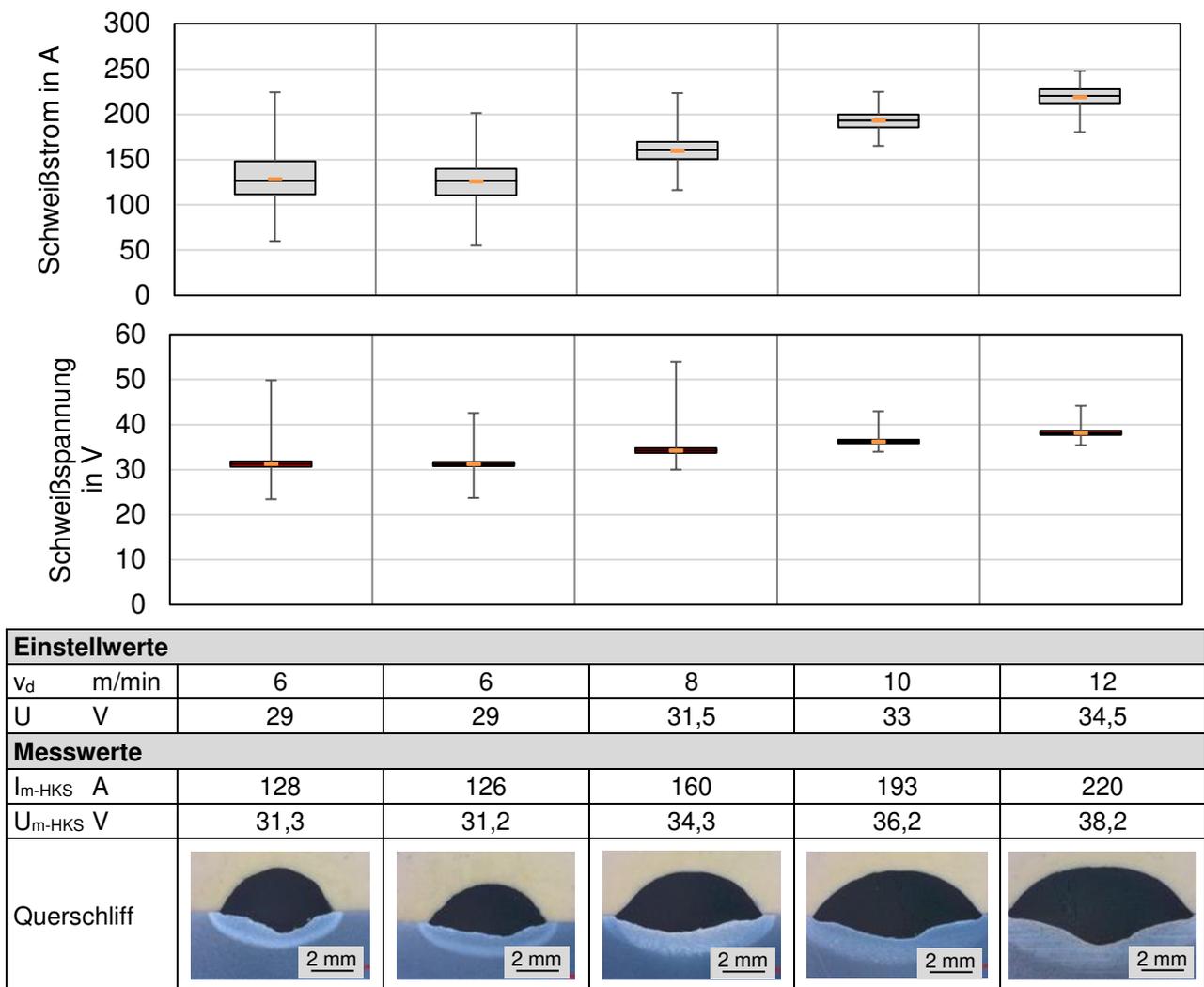


Bild 20: Lichtbogenstabilität in Abhängigkeit von den eingestellten Schweißparametern am Beispiel des basischen Fülldrahtes T Ni 6083 B

Mit dem Ziel die Rechenzeiten zu begrenzen musste aufgrund der hohen Abtastrate von 25,6 kHz eine Eingrenzung der Messwerte erfolgen. Um dennoch eine möglichst aussagekräftige und repräsentative Menge an Messwerten vorliegen zu haben, wurden 10 s der Schweißungen ohne die Betrachtung der Ein- und Auslaufbereiche herangezogen. Zum

quantitativen Vergleich sind die Kennwerte (Zentralwerte, Streuungsmaße und Extremwerte) noch zusätzlich in tabellarischer Form in Anhang 11 aufgeführt. Es ist festzustellen, dass bei den Schweißungen mit den Fülldrahtelektroden keine bzw. nur wenige Kurzschlüsse vorliegen, und es sich somit trotz des vergleichsweise unregelmäßigen Werkstoffübergangs um Sprühlichtbögen handelt. Lediglich die Schweißung mit dem T Ni 6276 P weist Spannungswerte auf, die gegen null tendieren, was auf das Vorhandensein von Kurzschlüssen hindeutet. Die Gegenüberstellung der Streuungsmaße macht deutlich, dass die Fülldrahtelektroden vom Typ Ni 6625 B und R** und die vom Typ Ni 6276 B einen instabileren Lichtbogen aufweisen, als die artgleichen rutilen Fülldrahtelektroden. Dagegen weist die Messwertstreuung der Schweißungen vom Typ Ni 6082, Ni 6083 und Ni 6182 keinen signifikanten Unterschied in Abhängigkeit der Schlackencharakteristik auf. Ein über die Legierung hinausreichender Vergleich der Streuungsmaße verdeutlicht, dass der Lichtbogen bei den Schweißungen dieses Typs vergleichsweise am stabilsten brennt. Aufgrund des stabileren Lichtbogens und der höheren Abschmelzleistung wurden die weiteren Schweißversuche mit den Fülldrahtelektroden, unter Berücksichtigung der Schweißempfehlungen der Schweißzusatzwerkstoffhersteller, bevorzugt mit einem Drahtvorschub von 10,0 m/min verarbeitet. Die Verarbeitung der Massivdrahtelektroden erfolgte mit einem Drahtvorschub von 8,0 m/min. Zur Einhaltung der empfohlenen Streckenenergien fand eine Anpassung der Schweißgeschwindigkeit statt.

8.2.4 Ergebnisse der optischen Beurteilung des Nahtaussehens und von Schlackeausbildung und -abgang

Neben der Beurteilung der Lichtbogenstabilität erfolgte noch eine optische Beurteilung der Nahtoberflächen der Auftragraupen sowie der Ausbildung und Entfernbareit der Schlacke anhand von Schweißungen an der oberen Grenze der empfohlenen Schweißströme und -spannungen bei einem Drahtvorschub von 10 m/min entsprechend dem Bild 21.

raue Nahtoberfläche



Schlacke nur im Randbereich



ungleichmäßige Nahtbreite



Schlacke großflächig



Bild 21: Kategorien zur qualitativen Beurteilung der Schweißnaht mit Sichtprüfung

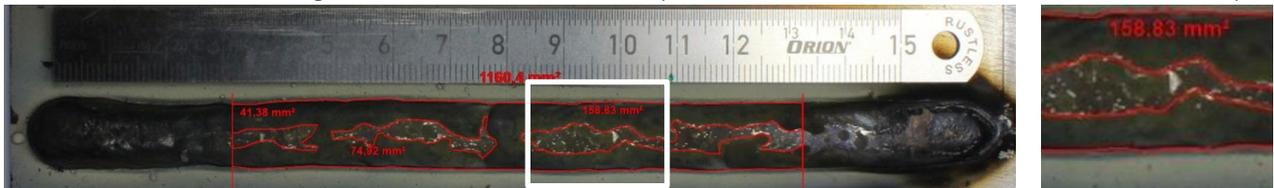
Die Ergebnisse in Tabelle 13 verdeutlichen, dass die für eine geringe Nachbearbeitung vorteilhafte selbstabhebende Schlacke lediglich bei den Fülldrahtelektroden vom Typ Ni 6082 R und Ni 6083 R auftritt. Festanhaftende Schlacke waren bei allen Fülldrahtelektroden vorhanden. Unterschiede zeigten sich lediglich in der Menge und im Ort des Auftretens. Entweder konzentrierte sich diese Schlacke nur auf den Randbereich der Auftragraupe oder trat großflächig auf der Raupe auf. Die festanhaftende Schlacke muss für dem Schweißen durch Schleifen entfernt werden.

Tabelle 13: Ergebnisse der Beurteilung der Schlackeausbildung und -abgang bei Schweißungen mit einem Drahtvorschub von 10 m/min

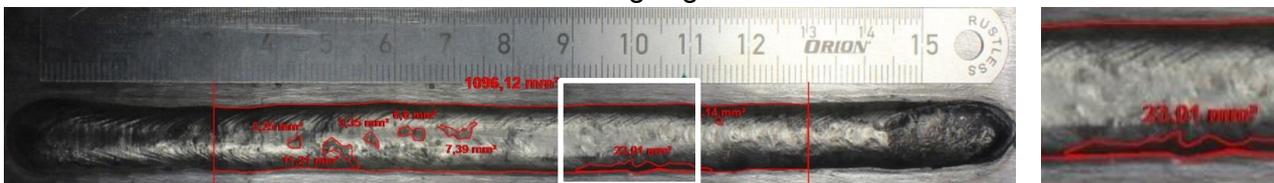
Schweißzusatz	selbstabhebende Schlacke	fest anhaftende Schlacke	äußeres Nahtbild	Oberfläche
T Ni 6625 B	keine	nur im Randbereich	schlecht	rau
T Ni 6625 P*	keine	großflächig	gut	rau
T Ni 6625 P**	keine	großflächig	gut	glatt
T Ni 6083 B	keine	großflächig	gut	rau
T Ni 6082 R	vorhanden	nur im Randbereich	gut	glatt
T Ni 6083 R	vorhanden	nur im Randbereich	gut	glatt
T Ni 6182 P	keine	nur im Randbereich	gut	glatt
T Ni 6276 B	keine	großflächig	schlecht	rau
T Ni 6276 P	keine	nur im Randbereich	schlecht	rau

Über die qualitative Beurteilung des Schlackeabgangs hinaus erfolgte exemplarisch für ausgewählte Fülldrahtelektroden eine quantitative Bewertung des Schlackeabgangs. Dazu gleich große Bereiche ohne Ein- und Auslaufzonen betrachtet (Bild 22). Die Flächenbestimmung erfolgte mit der Software AxioVision von Zeiss.

1. Schlackeabdeckung nach dem Schweißen (nicht bedeckte Anteile wurden bestimmt)



2. Fest anhaftende Schlacke nach der Reinigung mit Schlackehammer und Bürste



3. Selbstabhebende Schlacke

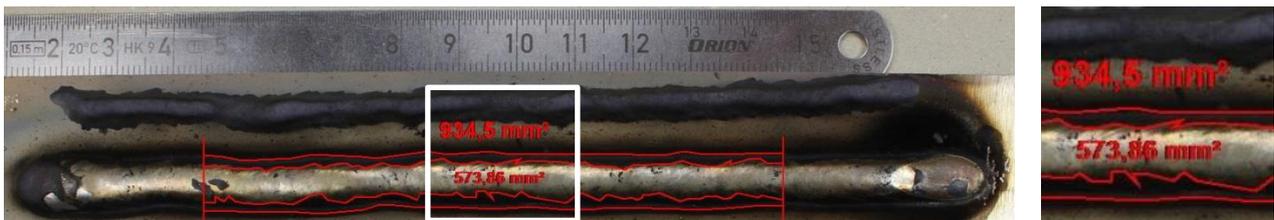
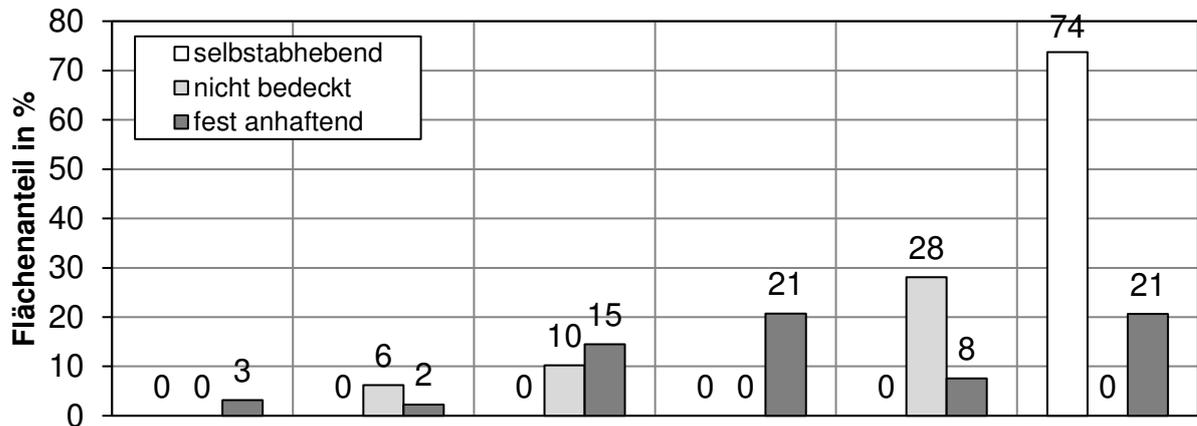


Bild 22: Bewertungskriterien zur quantitativen Bewertung des Schlackeabgangs

Das Diagramm in Bild 23 zeigt, dass lediglich bei der rutilen Fülldrahtelektrode vom Typ T Ni 6083 R selbstabhebende Schlackeanteile von ca. 74 % vorhanden sind. Jedoch befindet im Nahtrandbereich noch fest anhaftende Schlacke. Bei T Ni 6083 B und T Ni 6182 P* waren unmittelbar nach dem Schweißen in Abhängigkeit von den benutzten Schweißparametern unterschiedliche Anteile der Naht nicht mit Schlacke bedeckt. Mit steigendem Drahtvorschub zeigt sich bei der basischen Fülldrahtelektrode ein steigender Anteil an fest anhaftender Schlacke, wobei eine mögliche Korrelation zur Rauheit der Oberfläche besteht (Bild 23).



Einstellwerte						
v_d in m/min	7,3	10,0	15,0	18,5	10,0	10,0
Messwerte						
U_m, SSQ in V	26,5	29,0	34,0	36,0	32,0	32,0
I_m, SSQ in A*	146	190	248	289	169	178
FDE	T Ni 6083 B			T Ni 6182 P		T Ni 6083 R

Bild 23: Ergebnisse der quantitativen Beurteilung der Schlackeausbildung und -abgang bei Schweißungen mit einem Drahtvorschub von 10 m/min

Das Aussehen der Auftragraupen korrelierte mit der Lichtbogenstabilität. Die FDE-Schweißungen mit einem wenig stabilen Lichtbogen zogen auch ein schlechteres Nahtbild nach sich. Insbesondere die MSG-Schweißungen mit den FDE vom Typ Ni 6276 B und P wiesen eine besonders ungünstige Benetzung auf, was sich (trotz ausgiebiger Parametervariation) in einer ungleichmäßigen Nahtbreite und somit häufig auftretenden Bindefehlern und Einbrandkerben widerspiegelte. Auch die Auftragraupen der basischen Fülldrahtelektrode vom Typ Ni 6625 zeigten ein schlechtes Nahtbild. Demgegenüber stehen die Auftragraupen mit den Massivdrahtelektroden, bei denen sich keine Schlacke bildet und die aufgrund der sehr guten Lichtbogenstabilität keine oder nur wenige äußere Nahtunregelmäßigkeiten aufweisen.

8.3 Eigenschaften der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 und DIN EN ISO 15792-1:2012

8.3.1 Versuchsplan und -durchführung

Auf Grundlage der Technologieoptimierung im vorherigen Arbeitspunkt wurden mit allen SZW reine Schweißgutproben erstellt. Entsprechend der DIN EN ISO 6847:2013 [60] wurden 6-lagige reine Schweißgüter nach der Methode D mit einer Überlappung der Schweißraupen von ca. 50 % und einer Länge von ca. 150 mm erzeugt (Bild 24). Die beschliffenen Grundwerkstoffbleche wurden und auf eine ca. 60 mm dicke Stahlplatte aufgeschweißt.



Bild 24: Vorgehensweise zu Erstellung reiner Schweißgüter (DIN EN ISO 6847:2013 [60])

Diese Verhältnisse kommen denen in der Praxis nahe, wo aufgrund der Bauteilgeometrie mit einer starken Schrumpfbehinderung zu rechnen ist. Zur Vermeidung von Schlackeeinschlüssen ist die fest anhaftende Schlacke vor dem Schweißen der nächsten Raupe bzw. Lage vollständig durch Schleifen entfernt worden. Außerdem wurde nach jeder Lage die Schweißrichtung gewechselt. Die Zwischenlagentemperaturen lagen unterhalb 100 °C.

In Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss erfolgten die Fülldrahtschweißungen mit einem CO₂-Anteil von 18 % und mit ausgewählten Fülldrahtelektroden mit einem CO₂-Anteil von 25 %, um den Einfluss eines erhöhten Aktivgasanteils auf den Ab- und Zubrand von Legierungselementen bzw. das Heißrissverhalten zu untersuchen. Bild 25 zeigen die Probenentnahme an den mehrlagigen Schweißgutblöcken.

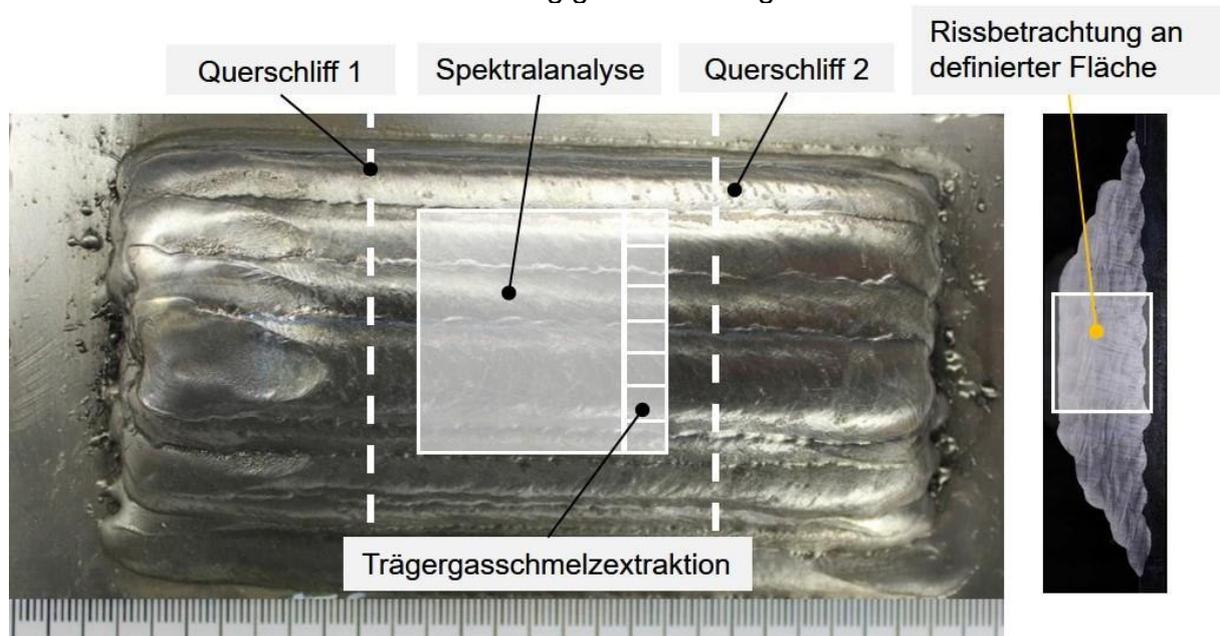


Bild 25: Probenentnahmeplan der mehrlagigen Auftragschweißungen (links: Draufsicht, rechts: Querschliff)

Aus den Schweißgutblöcken wurden zwei Querschliffe angefertigt, die anschließend metallographisch auf innere Unregelmäßigkeiten, insbesondere Heißrisse, untersucht worden sind. Zu besserer Sichtbarmachung der Heißrisse erfolgte zunächst eine PT-Prüfung an den Querschliffen. Am Stereomikroskop wurden anschließend die Rissanzahl und -längen bestimmt. Die Risslängen wurden anschließend aufsummiert und auf die Messfläche bezogen. Für die Spektralanalysen wurden in dem angezeichneten Bereich die Auftragschweißgutblöcke plangefräst. Anschließend erfolgte das Heraustrennen der Proben für die Tränergasschmelzextraktion. Alle chemischen Analysen wurden ausschließlich in der obersten Lage durchgeführt.

In einer 2. Versuchsreihe wurden für die Bestimmung der mechanisch-technologischen Eigenschaften Steiflankennähte nach DIN EN ISO 15792-1 [61] erzeugt. Bild 25 zeigt die Nahtvorbereitung. Zusätzlich ist aus diesen reinen Schweißgütern auch jeweils eine Probe für die fremdbeanspruchte Heißrissprüfung (PVR-Test) entnommen worden. Die Rundzugproben konnten im Bearbeitungszeitraum nicht angefertigt werden. Bild 26 gibt Aus-

kunft über die Probenentnahme und informiert über die Art und den Umfang der Prüfungen. Während der Herstellung der Schweißgutproben wurden die einzelnen Lagen zur Bewertung der Heißrissanfälligkeit einer visuellen Prüfung unterzogen.

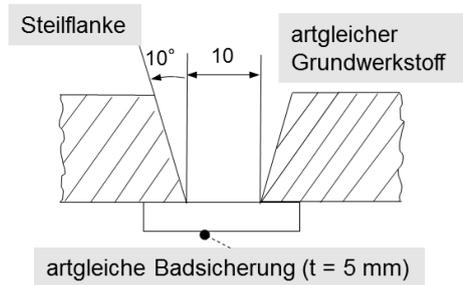
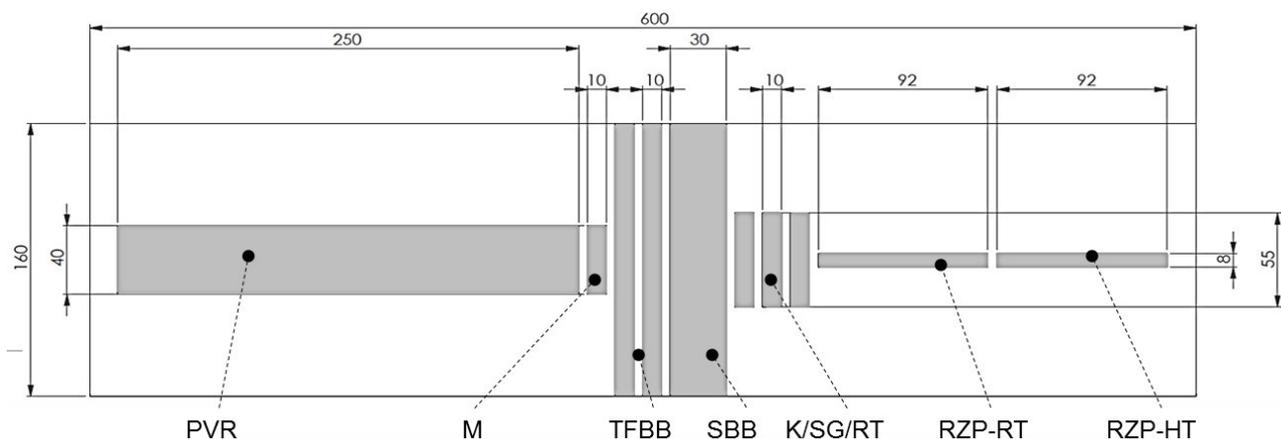


Bild 26: Nahtgeometrie zur Erzeugung reiner Schweißgutproben nach DIN EN ISO 15792-1 [61]



Abkürzung	Art	Anzahl	Beschreibung
PVR	PVR-Probe	1	Heißrissprüfung
M	Metallographie	1	Nahtunregelmäßigkeiten, Makro- u. Mikrogefüge
K/SG/RT	Kerbschlagproben	3	Schweißgut, RT, VWT 0/1
TFBB	Querbiegeprobe	1	Zugbeanspruchung decklagenseitig
SBB	Seitenbiegeproben	2	Nahtunregelmäßigkeiten
RZP-RT	Rundzugproben	1	bei Raumtemperatur
RZP-HT	Rundzugproben	1	bei hohen Temperaturen

Bild 27: Prüfprobenplan bei den reinen Schweißgütern nach DIN EN ISO 15792-1 [61]

8.3.2 Ergebnisse der Untersuchung der reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 6847:2013

In Folge der Nutzung aktiver Schutzgase beim MSG-Schweißen kann es zu einem Verlust (Abbrand) und einer Zunahme (Zubrand) von Legierungselementen im Schweißgut kommen, was die mechanisch-technologischen Eigenschaften und Korrosionsbeständigkeit beeinflusst. Bei Einsatz von Massivdrahtelektroden aus Ni-Basis kann Sauerstoff aus dem Schutzgas zu einer Nahtoxidation und zum Abbrand von sauerstoffaffinen Elementen, wie Mn, Si, Cr, usw. führen, bzw. dass CO₂ bei sehr niedrig gekohlten Schweißzusätzen ein C-Aufnahme nach sich ziehen. Daher ist der CO₂-Anteil im Schutzgas beim MSG-Schweißen von Ni-Basis-Massivdrahtelektroden limitiert (max. 0,05 %).

Zu klären war, ob beim MSG-Schweißen mit Fülldrahtelektroden Sauerstoff oder Kohlenstoff aus dem CO₂ im Mischgas chemische Reaktionen mit den Legierungselementen ein-

gehen oder ob die flüssige Schlacke den übergehenden Tropfen bzw. das grundwerkstoffseitige Schmelzbad ausreichend schützt.

In Anhang 3 bis Anhang 5 sind die Ergebnisse der chemischen Spektralanalyse der reinen Schweißgüter aller SZW aufgeführt. Es handelt sich hierbei um die Mittelwerte aus jeweils drei Messungen. Der Analysekörper „WIG-Button“, welcher unter reinem Ar 4.6-Atmosphäre erzeugt wurde, diente als Referenz. Die O-, N-, C- und S-Gehalte wurden aufgrund der höheren Genauigkeit mit der Trägergasschmelzextraktion bestimmt (Bild 28 bis Bild 31). Die quantitativen Messwerte sind im Anhang 12 enthalten.

Die Ergebnisse zur chemischen Zusammensetzung zeigen, dass bei allen Schweißgütern der FDE keine Ab- oder Zubrände an Legierungselementen aufgetreten sind. Lediglich bei den Schweißgütern der MDE ergaben sich leichte C-Zubrände an Kohlenstoff.

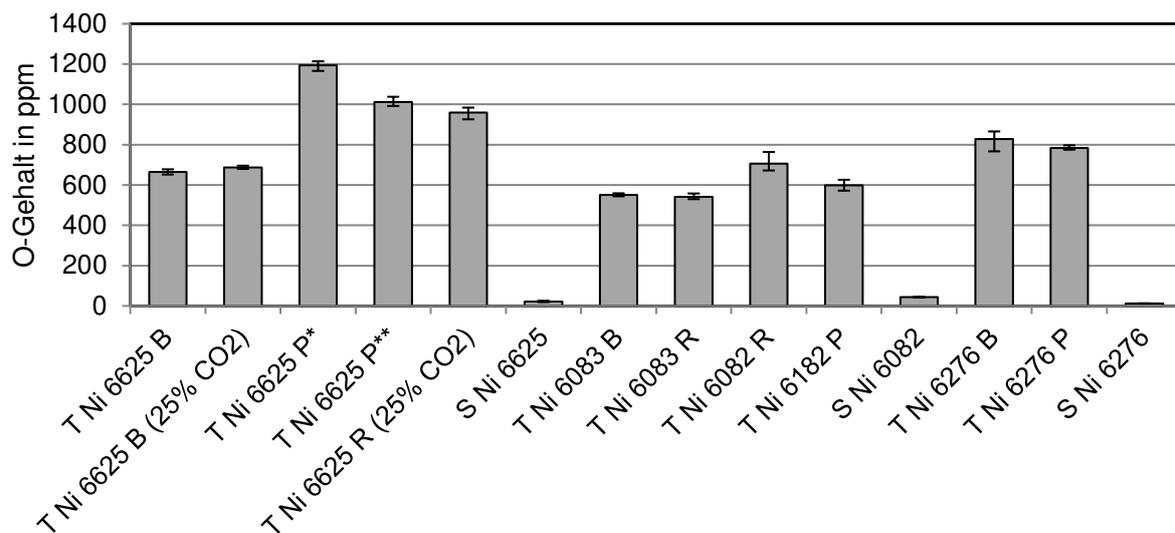


Bild 28: Ergebnisse der Sauerstoffbestimmung an den reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] mittels TGSE

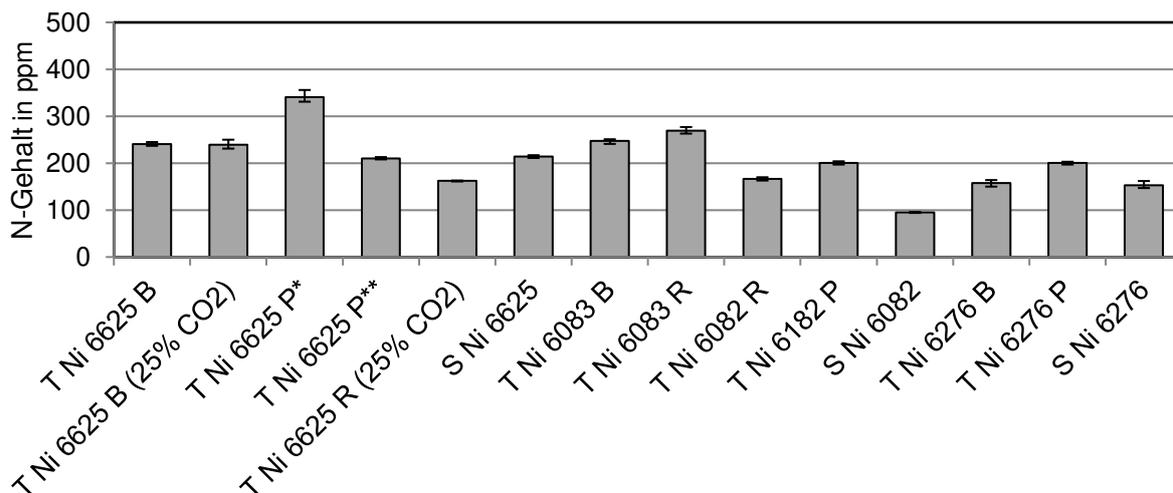


Bild 29: Ergebnisse der Stickstoffbestimmung an den reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] mittels TGSE

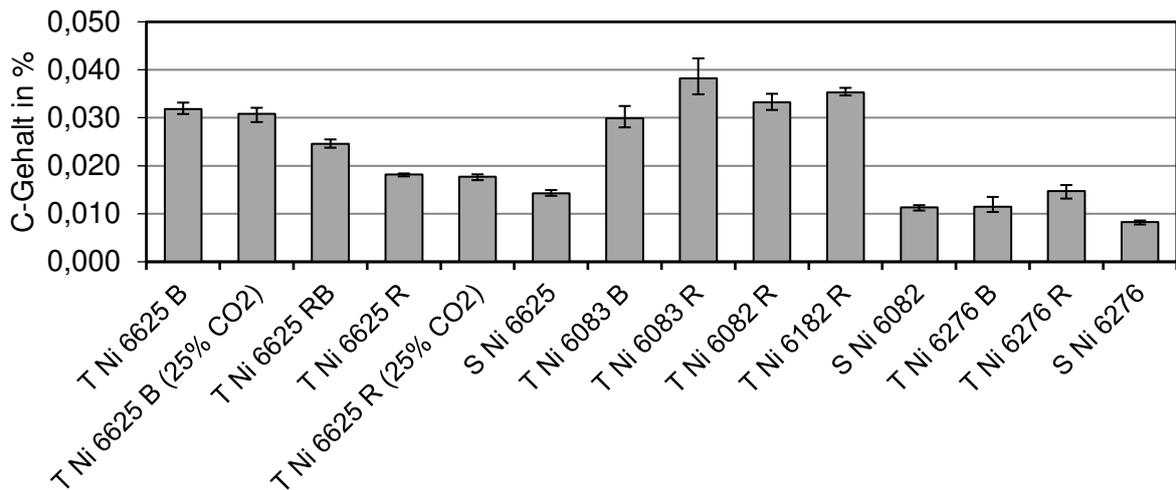


Bild 30: Ergebnisse der Kohlenstoffbestimmung an den an den reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] mittels TGSE

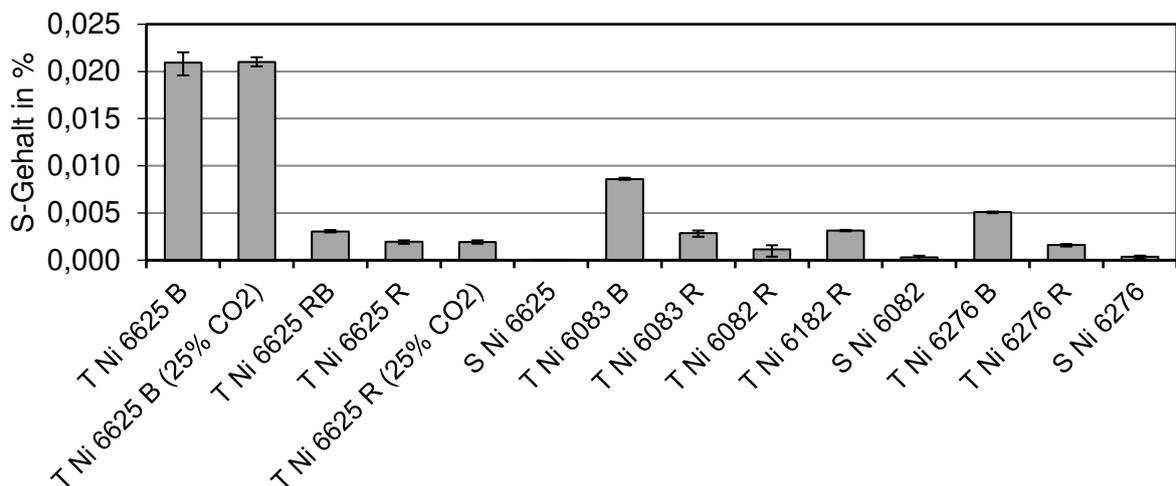


Bild 31: Ergebnisse der Kohlenstoffbestimmung an den an den reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] mittels TGSE

Bedingt durch die beim Schweißen auftretenden Reaktionen zwischen der flüssigen Schlacke und Schmelze enthalten die Schweißgüter der FDE sehr hohe O-Gehalte zwischen 500 ppm und 1.200 ppm. Die Schweißgüter der basischen Fülldrahtelektroden weisen dabei tendenziell leicht geringere Werte als die der rutilen Fülldrahtelektroden auf. Die Schweißgüter der MDE besitzen hingegen unabhängig von der Legierung nur sehr niedrige O-Anteile zwischen 20 ppm und 50 ppm. Die N-Gehalte ergeben sich herstellerabhängig aus dem Legierungstyp. Sie zeigen keine Besonderheiten. Die C-Gehalte sind beim hochwarmfesten Legierungstyp Ni 6082, 6083 und 6182 vergleichsweise am höchsten. Dies ist begründet in den gewollten Ausscheidungen von $M_{23}C_6$, die für hohe Warmfestigkeit- und Zeitstandwerte sorgen sollen.

Die Schweißgüter der basischen FDE haben legierungsunabhängig die höchsten S-Gehalte, während bei den MDE die S- und C-Gehalte sehr gering sind.

Im Ergebnis der metallographischen Auswertung der Schweißgutproben zeigte sich, dass die Querschliffe keine Bindefehler und wenig Poren und Schlackeeinschlüsse haben (vgl. Anhang 13 bis Anhang 15). Jedoch traten in unterschiedlichem Ausmaß Heißrisse auf, wie das Bild 32 exemplarisch zeigt.

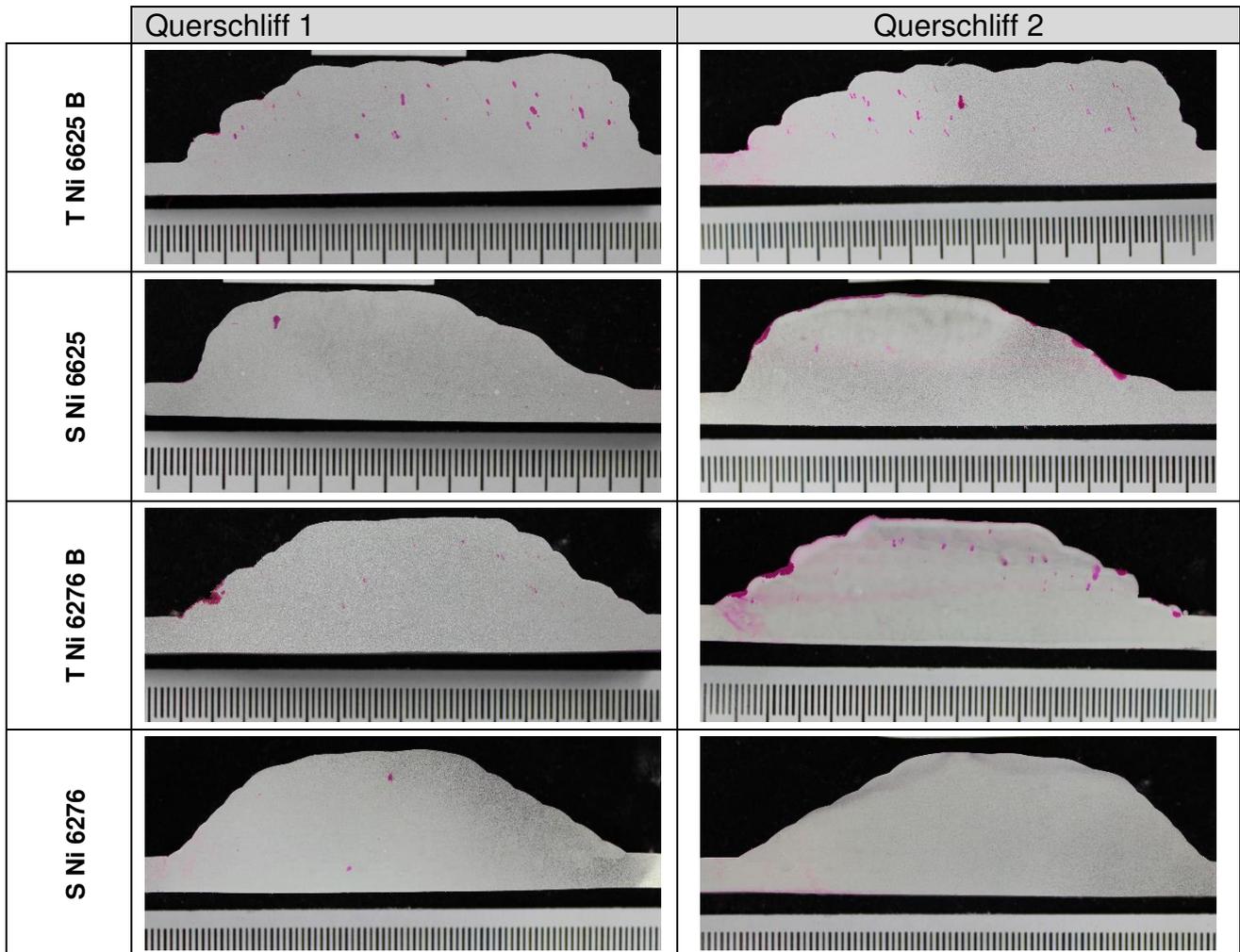


Bild 32: PT-geprüfte Querschliffe der reinen Schweißgüter der SZW vom Typ Ni 6625

Für eine vergleichende Betrachtung der Heißrisse neigung wurden daher die Rissanzahl und die Risslängen an einer Querschlifffläche von 35 x 20 [mm] lichtmikroskopisch bestimmt. Die Risslängen wurden summiert und auf die Messfläche bezogen. Zu beachten ist bei dieser Auswertung jedoch, dass es sich um eine selbstbeanspruchende Probenform handelt, so dass die Ergebnisse eher tendenziell zu bewerten sind. Begründet ist dies darin, dass die Schweißgutblöcke nicht identisch gefertigt werden können und somit auch Unterschiede in der Höhe der Beanspruchung auftreten.

Gemäß den Ergebnissen im Bild 33 besitzen die Schweißgüter der basischen Fülldrahtelektroden legierungsunabhängig die höchste Heißrisseanfälligkeit, wohingegen die rutilen Fülldrahtelektroden und Massivdrahtelektroden z. T. signifikant weniger Heißrisse besitzen. Die einzige Ausnahme war die Massivdrahtelektrode vom Typ Ni 6625, welche auf einem niedrigen Niveau Heißrisse zeigte. Eine Erhöhung des aktiven Schutzgasanteils an CO₂ reduzierte bei den FDE vom Typ 6625 das Auftreten von Heißrisse.

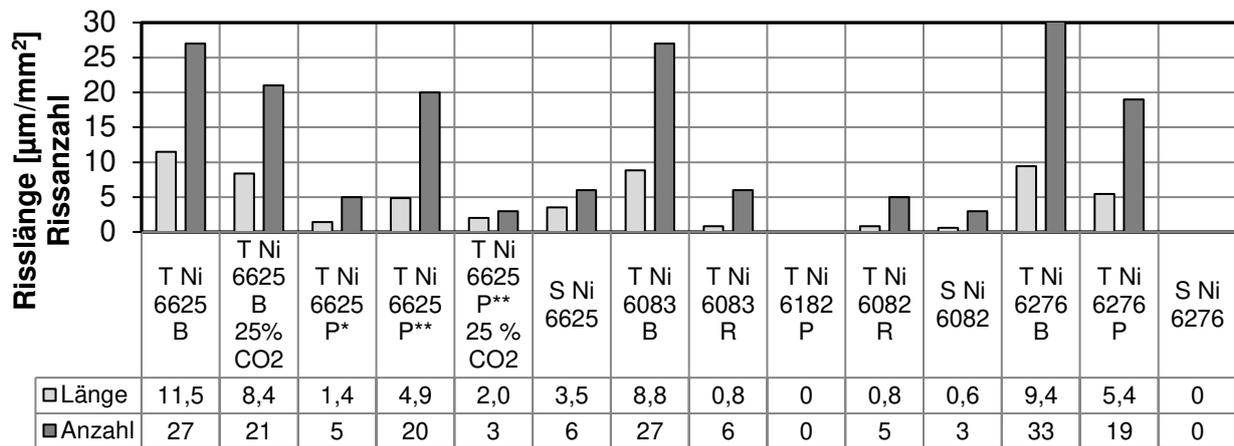


Bild 33: Heißrissneigung der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 [60]

In der 2. Versuchsreihe, der Herstellung der reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 15792-1 [61], zeigten sich schon während des Herstellens bei einigen Proben Nahtunregelmäßigkeiten in Form offener Schlauchporen und Heißrissen. Die Poren wurden flächig mittels Winkelschleifer ausgearbeitet. Jedoch war erkennbar, dass diese Poren auch kanalförmig in die Tiefe gingen (ähnlich wie eine Bohrung, Bild 34).



Bild 34: Beispiel für offene Schlauchporen mit Porenkanal in die Tiefe

Das Auftreten solcher Gaseinschlüsse weist darauf hin, dass die Schlacke schon erstarrt, während sich das Schweißgut noch im schmelzflüssigen oder teigigen Zustand befindet und entgasen will. Außerdem wurden in den Wurzellagen der Schweißungen am alloy 800 H zum Teil mittig verlaufende Längsrisse über die gesamte Nahtlänge ausfindig gemacht, die sogar durch die Durchstrahlungsprüfung sichtbar gemacht werden konnten (Anhang 16). Die Querschliffe der Steiflankennahte zeigen SZW-abhängig diese Heißrisse und Poren (Anhang 17 bis Anhang 19).

Am reinen Schweißgut der Steiflankennaht erfolgte die Ermittlung der Kerbschlagarbeit an jeweils drei Charpy VWT 0/1-Proben. Die Einzelwerte enthält die Tabelle 14. Bild 35 stellt die Ergebnisse graphisch gegenüber. Die Kerbschlagarbeitswerte innerhalb einer Versuchsreihe streuen nur gering. Unabhängig von der Legierung ist zu erkennen, dass die reinen Schweißgüter der Fülldrahtelektroden zu signifikant geringeren Werten als die der

Massivdrahtelektroden neigen. Dagegen lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den rutilen und basischen Fülldrahtelektroden ausmachen.

Tabelle 14: Ermittelte Einzelwerte der Kerbschlagarbeiten der reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 15792-1 [61] bei RT

Schweißzusatz	KV in J			Mittelwert
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	
T Ni 6625 B	82	96	80	86
T Ni 6625 P**	83	68	86	79
T Ni 6625 P*	81	79	90	83
S Ni 6625	187	188	172	182
T Ni 6083 B	116	123	124	121
T Ni 6082 R	140	124	124	129
T Ni 6182 R	134	132	138	135
S Ni 6082	200	208	202	203
T Ni 6276 B	72	72	66	70
T Ni 6276 R	74	76	71	74
S Ni 6276	154	122	124	133

Mit dem Ziel die Verformbarkeit der Schweißgüter zu beurteilen und innere Nahtunregelmäßigkeiten nachzuweisen erfolgten zusätzlich Quer- und Seitenbiegeprüfungen nach DIN EN ISO 5173:2012 [73]. Die Abmessungen der Biegeproben enthält die Tabelle 15.

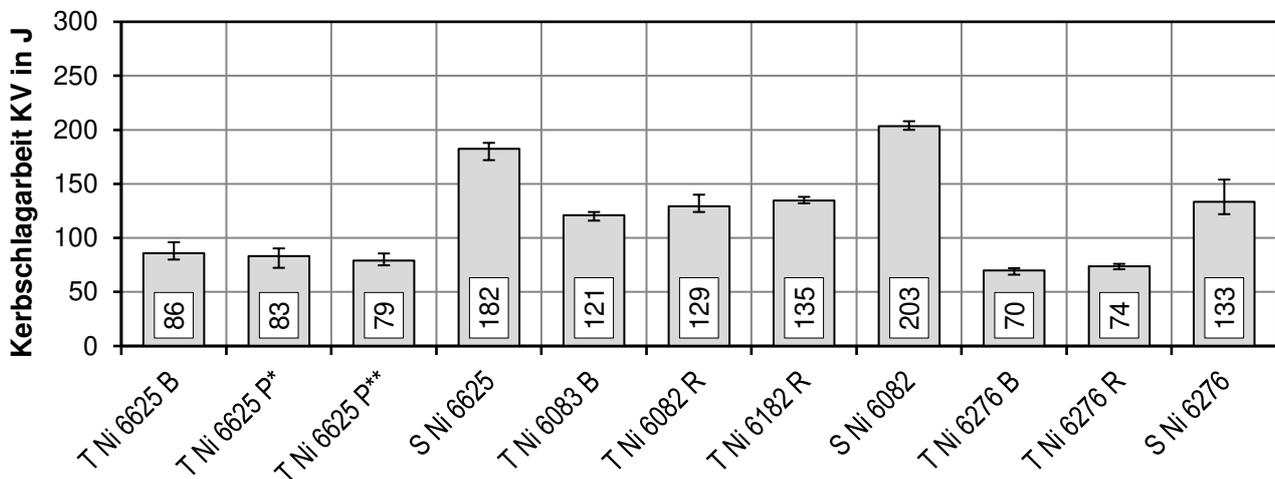


Bild 35: Grafische Darstellung der Kerbschlagarbeiten der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 15792-1 [61] bei RT

Tabelle 15: Abmessungen der Quer und Seitenbiegeproben aus den reinen Schweißgutproben entsprechend DIN EN ISO 5173:2012 [73]

Probenart	Proben- dicke	Proben- breite	Rundungs- radius	Proben- länge
TFBB	10 mm	30 mm	1 mm	160 mm
SBB	10 mm	10 mm	1 mm	160 mm

Die Proben werden mit einem Vorschub des Biegedorns von 1 mm/s belastet. Trat vor dem Erreichen des geforderten Biegewinkels von 180° ein Anriss auf, so wurde der Versuch abgebrochen und der tatsächlich erreichte Winkel zur vergleichenden Betrachtung herangezogen. Die Versuchsrandbedingungen sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Tabelle 16: Versuchsrandbedingungen der Quer- und Seitenbiegeprüfung an den reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 5173:2012 [73]

Probenart	Biegedorn-durchmesser	Stützrollen-durchgang	Biege-winkel	Biege-verhältnis
TFBB und SBB	40 mm	70 mm	180° (max.)	4

Tabelle 17 fasst die Resultate der Biegeversuche zusammen. Die geforderten Biegewinkel von 180° wurden von den Schweißgütern der Fülldrahtelektroden nur selten erreicht. So zeigte sich, dass die Rissbildung häufig bei Unregelmäßigkeiten, wie Heißrissen oder Schlackeeinschlüssen, oder im Wurzelbereich initiiert wurde. Der Vergleich der Ergebnisse der basischen und rutilen Fülldrahtelektroden zeigt keine eindeutige Tendenz.

Tabelle 17: Ergebnisse der Quer- und Seitenbiegeprüfung der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 15792-1 [61]

Schweißzusatz	Seitenbiegeprüfung		Querbiegeprüfung
	SBB 1	SBB 2	TFBB
T Ni 6625 B	180	180	38
T Ni 6625 P**	180	103	180
T Ni 6625 P*	180	42	32
S Ni 6625	180	180	180
T Ni 6083 B	29	36	180
T Ni 6082 R	10	17	180
T Ni 6182 R	24	180	180
S Ni 6082	23	19	133
T Ni 6276 B	101	65	58
T Ni 6276 R	103	180	32
S Ni 6276	180	180	180

8.4 Ergebnisse der Heißrissprüfung mit dem PVR-Test

8.4.1 Versuchsplan und -durchführung

Zur Beurteilung der Auswirkungen der Schlackencharakteristik auf die Heißrissbeständigkeit der in Tabelle 1 aufgeführten heißrissempfindlichen Grund- und Zusatzwerkstoffe wurde der PVR-Test als fremdbeanspruchtes Heißrissprüfverfahren nach DIN-Fachbericht 17641-3:2004 [93] in den in Absatz 7.4 erläuterten Varianten durchgeführt.

8.4.2 MSG-Schweißen von Auftragraupen auf artgleichen Grundwerkstoffproben (Variante 1a)

In der ersten Variante wurde auf einem artgleichen 5 mm dicken Blech mit eingearbeiteter Nut eine MSG-Einzelraupe geschweißt. Dieses Vorgehen ermöglichte die gleichzeitige Prüfung des Schweißgutes und der WEZ auf ihre Heißrissempfindlichkeit. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, ist es notwendig, gleiche Schweißparameter einzustellen. Aus diesem Grund konnte diese Art der Prüfung nur mit den Fülldrahtelektroden realisiert werden. Die verwendeten Schweißparameter stellt die Tabelle 18 dar. Als Schutzgas wurde das M21 (82% Ar/18% CO₂) verwendet. Je Schweißzusatz wurden zwei PVR-Versuche durchgeführt.

Tabelle 18: Prozess- und Prüfparameter zum MSG-Schweißen der Auftragraupen im PVR-Versuch (Variante 1a und 1b)

U_s	v_d	l_k	v_s	v_{max}	Brennerstellung
29,0 V	10,0 m/min	15 mm	50 cm/min	60 mm/mm (100 mm/min)	20° schleppend

Trotz gleicher Einstellwerte führen die verschiedenen Stoffwiderstände und Querschnittsflächen des stromleitenden Fülldrahtbandes zu unterschiedliche Schweißströmen und -spannungen und damit leicht abweichenden Streckenenergien (5,3 kJ/cm bis 6,9 kJ/cm) und Raupengeometrien. Im Anhang 20 bis Anhang 22 ist jeweils eine PVR-Probe mit Querschliff und Schweißparameter aufgeführt. Bei den angegebenen Schweißparametern handelt es sich um die arithmetischen Mittelwerte der Schweißstromquelle.

Bild 36 stellt die ermittelten kritischen Verformungsgeschwindigkeiten für das Auftreten des ersten Heißrisses der Variante 1a dar (Mittelwert aus 2 Proben). Je höher die kritische Verformungsgeschwindigkeit ist, desto größer ist die Heißrissempfindlichkeit. Es traten unabhängig vom eingesetzten Schweißzusatz bei allen PVR-Prüfraupen Erstarrungsrisse auf. Die Ergebnisse lassen eine höhere Heißrissempfindlichkeit der Auftragraupen der basischen Fülldrahtelektroden gegenüber den der rutilen Fülldrahtelektroden erkennen.

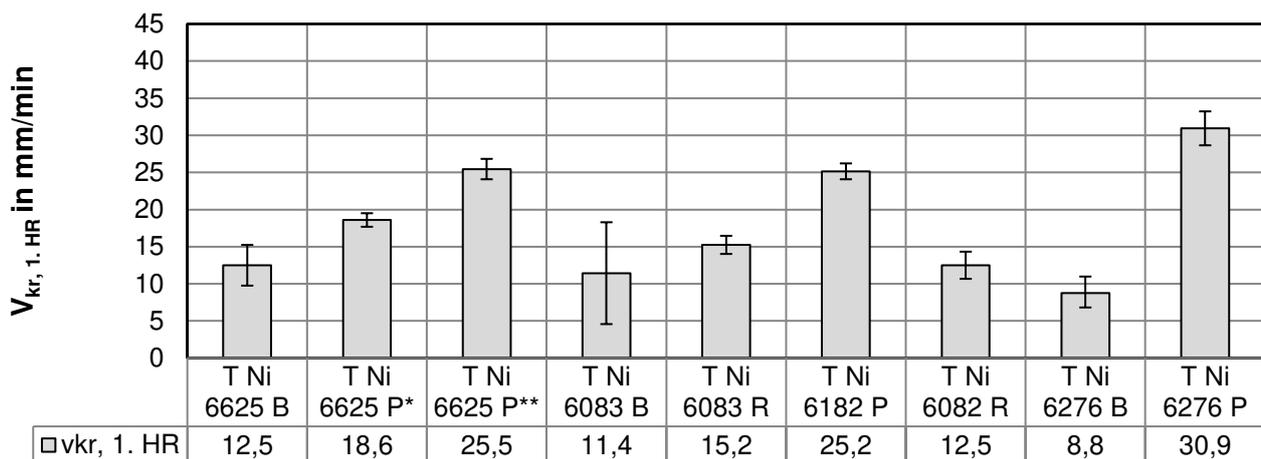


Bild 36: Ergebnisse für den 1. Heißriss (Erstarrungsriss) bei der fremdbeanspruchten Heißrissempfindlichkeitsprüfung mit dem PVR-Versuch beim Schweißen von MSG-Einzelraupen auf alloy 625, alloy 800 H und alloy C-276, Variante 1a

8.4.3 MSG-Schweißen von Auftragraupen auf artfremden Grundwerkstoffproben (Variante 1b)

In der zweiten Versuchsreihe (Variante 1b) wurden MSG-Einzelraupen zur Simulation von Plattierung auf einen ferritischen Druckbehälterstahl aufgebracht. Dabei wurden die Schweißparameter der Variante 1a verwendet. Die dickeren Bleche erforderten ein Anheben der maximalen Zuggeschwindigkeit auf 100 mm/min. Je Schweißzusatz wurden auch bei dieser Versuchsreihe erneut jeweils zwei PVR-Proben geprüft. In Anhang 23 bis Anhang 25 ist jeweils auch eine PVR-Probe mit Querschliff und Schweißparametern aufgeführt. Analog zu der Versuchsreihe der Variante 1a sind im Bild 37 die ermittelten kritischen Verformungsgeschwindigkeiten für das Auftreten der ersten Heißrisse aufgeführt (Mittelwert aus 2 Proben). Unabhängig vom eingesetzten Schweißzusatz traten bei der Variante 1b auch ausschließlich Erstarrungsrisse auf. Im Vergleich zu den PVR-Versuchen auf den artgleichen Grundwerkstoffen ergaben die PVR-Versuche am Kesselstahl deutlich höhere kritische Verformungsgeschwindigkeiten. Diese insgesamt geringere Neigung zu Heißrissen wird zum einen auf die Verwendung der dickeren Bleche und zum anderen auf die Aufmischung mit dem ferritischen Grundwerkstoff zurückgeführt. Im Vergleich der Schweißzusätze untereinander zeigt sich, dass der basische Fülldraht vom Typ Ni 6625 eine höhere Heißrissneigung als die rutile Fülldrahtelektroden zur Folge hat. Die basische FDE vom Typ Ni 6276 weist hingegen eine höhere Heißrissbeständigkeit auf.

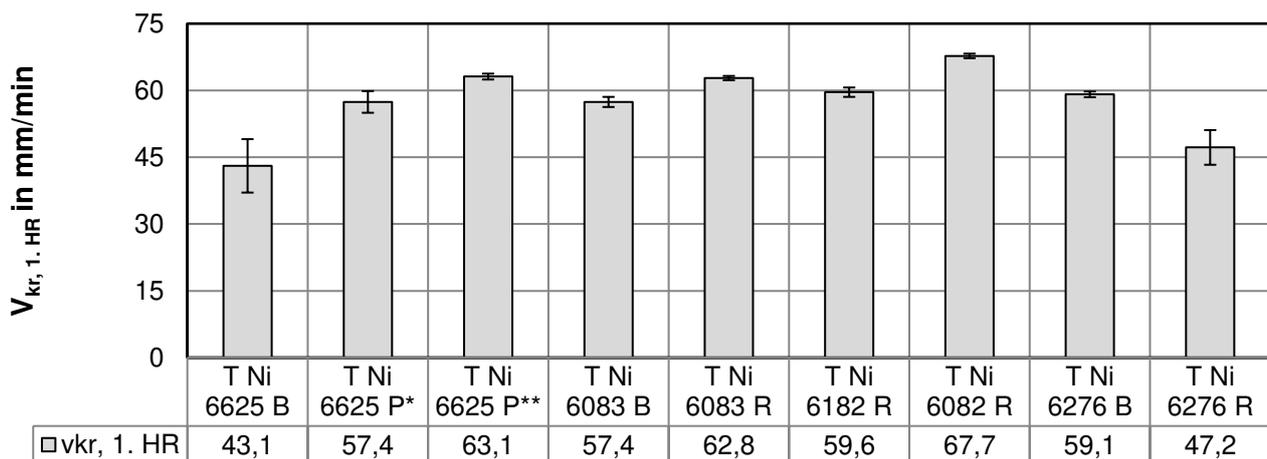


Bild 37: Ergebnisse für den 1. Heißriss bei der fremdbeanspruchten Heißrissprüfung mit dem PVR-Versuch beim Schweißen von MSG-Einzelraupen auf Kesselstahl, Variante 1b

8.4.4 WIG-Umschmelzung von reinem MSG-Schweißgut (Variante 2a)

Die Prozessparameter für die PVR-Heißrissprüfung des zuvor mit den verschiedenen Schweißzusätzen erzeugten reinen Schweißgutes aus den Verbindungsschweißungen nach DIN EN ISO 15792-1 sind in Tabelle 19 aufgeführt. Es wurde jeweils nur eine ausgearbeitete PVR-Probe mittels WIG-Umschmelzung (vgl. Abschnitt 7.4) geprüft. Bei der erneuten Aufschmelzung des Schweißgutes treten vorzugsweise Wiederaufschmelzungsrisse im reinen Schweißgut auf. Eventuell auftretende Risse durch Verformbarkeitsabfall (engl. ductility dip cracking, kurz DDC`s) im unbeeinflussten Grundwerkstoff wurden nicht in die vergleichende Betrachtung der Schweißzusätze mit einbezogen.

Tabelle 19: Prozess- und Prüfparameter zum WIG-Schweißen der Blindraupen im PVR-Versuch (Umschmelzung von reinem MSG-Verbindungsschweißgut)

I_s	U_s	v_s	E	v_{max}	Schutzgas
180 A	12 V	20 cm/min	6,5 kJ/cm	45 (60)	Argon 4.6

Die Auswertung der WIG-Umschmelzproben erfolgte, aufgrund der nun nicht mehr behindernden fest anhaftenden Schlacke, sowohl mittels PT-Prüfung als auch lichtmikroskopisch bei 25-facher Vergrößerung mit dem Stereomikroskop. Wie in zu erkennen ist, weisen die beiden unterschiedlichen Methoden nur geringe Abweichungen auf. Lediglich bei der PVR-Probe des Schweißzusatzes S Ni 6276 wurde ein deutlicher Unterschied festgestellt. Dies ist auf die besonders kurzen Risslängen der 1. Risse zurückzuführen, die mittels Stereomikroskop besser detektiert werden konnten. Die Ergebnisse in Bild 38 zeigen, dass die Massivdrahtelektroden im PVR-Versuch legierungsunabhängig die höchsten kritischen Verformungsgeschwindigkeiten und somit die größte Beständigkeit gegenüber dem Auftreten von Heißrissen (Wiederaufschmelzrisse) aufweisen. Ein signifikanter Einfluss der Schlackencharakteristik auf die Heißrissneigung ist nicht zu erkennen.

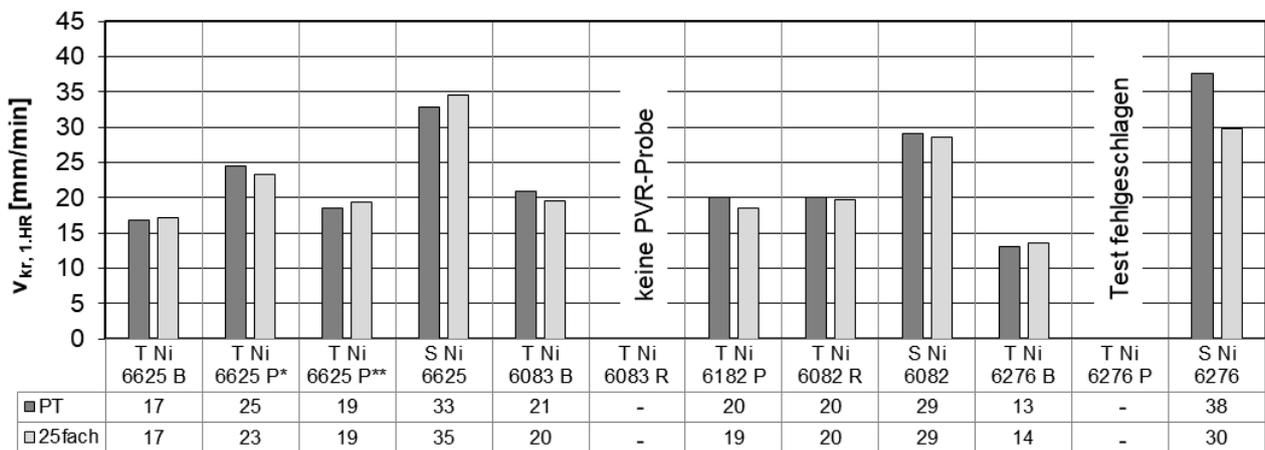


Bild 38: Ergebnisse der fremdbeanspruchten Heißrissprüfung mit dem PVR-Versuch - WIG-Umschmelzungen der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 15792-1, Variante 2a

8.4.5 WIG-Umschmelzung von MSG-Schweißgut aus Verbindungsschweißungen (Variante 2b)

Bei der Variante 2b des PVR-Versuches, wurden aus den zweilagigen V-Nähten ebenfalls je eine PVR-Probe ausgearbeitet. Bei der Verwendung des für die Variante 2a genutzten Schweißstroms von 180 A kam es in dieser Variante bei der Prüfung der ersten Probe T Ni 6625 P** aufgrund der geringeren Blechdicke von 5 mm zu einem Durchschweißen der Naht und in Folge dessen zu einem Bruch der Probe während des Zugvorganges. Daher wurde für die weiteren Tests der Schweißstrom auf 120 A abgesenkt. Bild 39 zeigt die Ergebnisse der Auswertung der PVR-Versuche an den V-Nähten. Die Ergebnisse lassen erkennen, dass die Massivdrahtelektroden des Typs S Ni 6525 und S Ni 6276 über eine geringere Heißrissneigung als die artgleichen Fülldrahtelektroden verfügen. Ein signifikanter Einfluss der Schlackencharakteristik auf die Heißrissneigung ist jedoch ebenfalls nicht zu erkennen.

Tabelle 20: Prozess- und Prüfparameter zum WIG-Schweißen der Blindraupen im PVR-Versuch (Umschmelzung des Schweißguts von V-Nähten)

I_s	U_s	v_s	E	v_{max}	Schutzgas
120 A	12 V	20 cm/min	4,3 kJ/cm	45	Argon 4.6

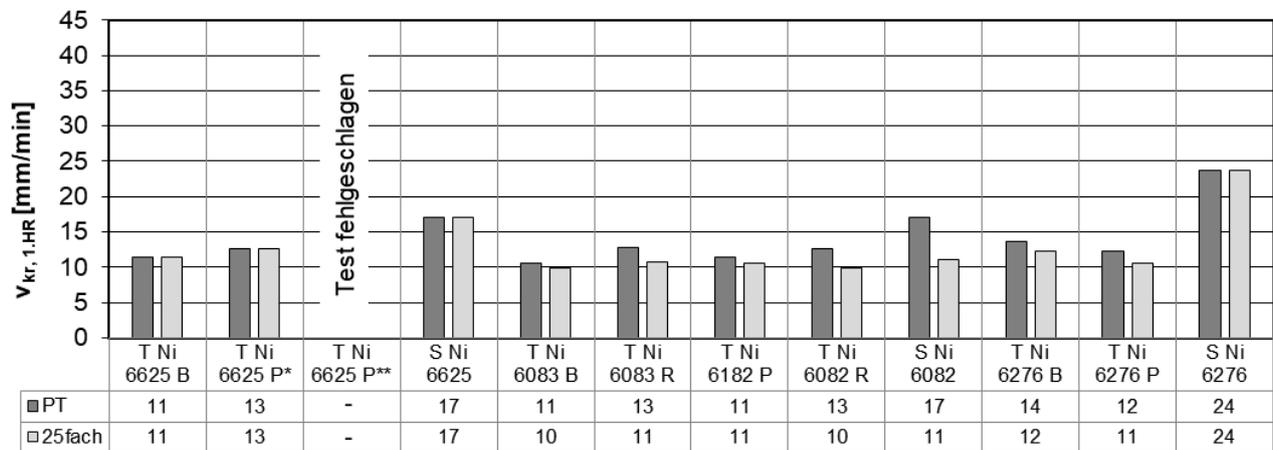


Bild 39: Ergebnisse der fremdbeanspruchten Heißrissprüfung mit dem PVR-Versuch - WIG-Umschmelzungen der Mischschweißgüter der V-Nähte, Variante 2b

8.4.6 Zusammenfassung PVR-Versuche

Zusammenfassend sind je Versuchsvariante die ermittelten kritischen Verformungsgeschwindigkeiten der ersten Heißrisse in der Tabelle 21 aufgeführt. Die Rangfolge bezieht sich jeweils auf einen Legierungstyp. Auch hier ist zu erkennen, dass die Massivdrahtelektroden zu den höchsten Heißrissbeständigkeiten im Schweißgut führen, während die basischen Fülldrahtelektroden die geringste Beständigkeit verursachen.

Tabelle 21: Zusammenfassung der Ergebnisse der Heißrissprüfung mit dem PVR-Versuch

Schweißzusatz	Variante 1a Auftragraupe t = 5 mm		Variante 1b Auftragraupe t = 10 mm		Variante 2a WIG-Blindraupe RSG, t = 10 mm		Variante 2b WIG-Blindraupe V-Naht, t = 5 mm		Mittelwert aus allen Rängen
	$v_{kr, 1.HR}$ mm/min	Rang	$v_{kr, 1.HR}$ mm/min	Rang	Rang	$v_{kr, 1.HR}$ mm/min	Rang	$v_{kr, 1.HR}$ mm/min	
T Ni 6625 B	12	3	43	3	17	4	11	3	3,3
T Ni 6625 P*	19	2	57	2	22	2	13	2	2,0
T Ni 6625 P**	25	1	60	1	19	3	-	-	1,7
S Ni 6625	-	-	-	-	33	1	17	1	1,0
T Ni 6083 B	11	4	57	4	19	2	10	5	3,8
T Ni 6083 R	12	2	63	2	-	-	11	1	1,7
T Ni 6182 P	25	1	60	3	18	4	11	1	2,3
T Ni 6082 R	12	2	68	1	19	2	10	5	2,5
S Ni 6082	-	-	-	-	28	1	11	1	1,0
T Ni 6276 B	9	2	59	1	13	2	12	2	1,8
T Ni 6276 P	31	1	47	2	-	-	11	3	2,0
S Ni 6276	-	-	-	-	29	1	24	1	1,0

- = keine Prüfung

8.5 Schweißplattieren mit den Fülldrahtelektroden vom Typ T Ni 6625

8.5.1 Versuchsplan und -durchführung

Im Arbeitspaket 6 wurden mit den Fülldrahtelektroden vom Typ T Ni 6625 Schweißplattierungen in den Positionen PA und PF schrumpfbehindert auf einem Druckbehälterstahl angefertigt, um die Eignung zum Cladding zu untersuchen. Während zum Schweißen in Wannenlage die Schweißparameter auf Basis der vorherigen Arbeitspunkte ausgewählt wurden, erforderte das Schweißen in steigender Position eine Anpassung der Schweißparameter. Nach einer Parameterfindung wurden etwa 70 mm breite ein- und zweilagige Plattierung erzeugt. Der Probenentnahmeplan für die zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfungen ist in Bild 40 dargestellt.

Während der Fertigung der Plattierungen wurde nach jeder Raupe per Sichtprüfung auf erste äußerliche Nahtunregelmäßigkeiten geschaut. Anschließend erfolgte eine Durchstrahlungsprüfung. Zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung sind in einer Schichthöhe von ca. 2 mm und 5 mm, was der ersten und zweiten Lage entspricht, EDX-Analysen durchgeführt worden. Des Weiteren wurden neben metallographischen Untersuchungen auch Biegeprüfungen durchgeführt. In Anlehnung an die ASTM A265:2019 [81] erfolgten darüber hinaus Anbindungsprüfungen. In Absprache mit dem PA wurden an den Plattierungen entgegen dem ursprünglichen Arbeitsplan keine Korrosionsprüfungen durchgeführt.

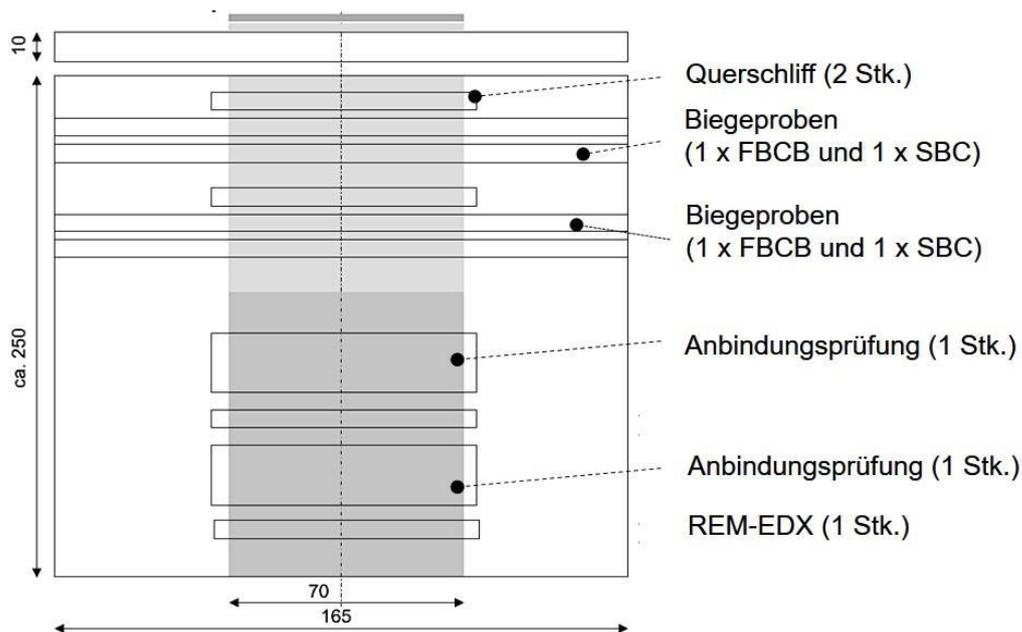


Bild 40: Probenentnahmeplan der Schweißplattierungen

8.5.2 Ergebnisse der Prüfung der MSG-Plattierungen

Beim Schweißplattieren erfolgten schweißpositionsabhängig zunächst eine Optimierung sowohl der Einstellwerte (v_D , U_s , v_s) als auch der Brennerführung. Es zeigte sich, dass bei den Einstellwerten, die in Tabelle 22 aufgeführt sind, die besten Ergebnisse erzielt werden konnten. Die Schweißgeschwindigkeit wurde auf 65 cm/min begrenzt, um keine ungleichmäßigen Nahtbreiten zu verursachen. Zur Optimierung der Parameter für die Plattierungen

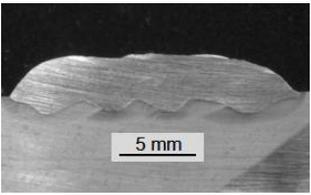
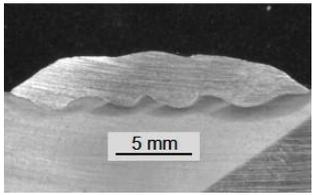
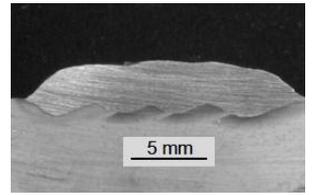
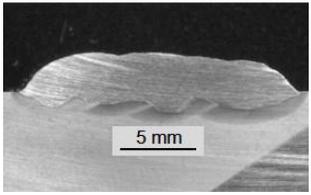
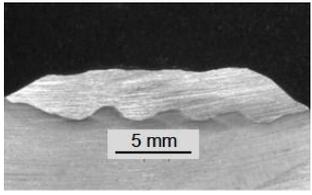
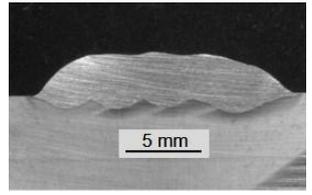
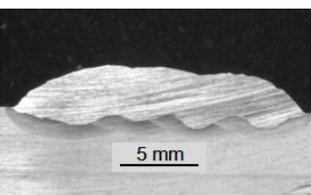
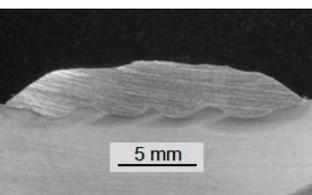
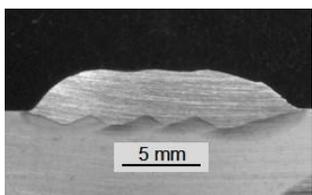
wurden vier Raupen mit einer Länge von ca. 200 mm nebeneinander geschweißt. Die jeweils erste Raupe wurde mit einer Brennerneigung in Y-Richtung von 0° und 20° schleppe geschweißt. Zur Untersuchung des Einflusses auf den Aufmischungsgrad wurden daraufhin die nachfolgenden drei Raupen in einer kleinen Versuchsreihe mit Brennerneigungen von 0°, 5° und 10° verschweißt. Zur Erzeugung einer 50 % Überlappung wurde der Brenner direkt an die Schmelzlinie der Raupe positioniert.

Tabelle 22: Einstellwerte zum Schweißplattieren in Position PA und PF

Position	U_s	v_d	l_k	v_s	Brennerstellung	Überlappung
PA	28,0 V	10,0 m/min	17 mm	65 cm/min	20° schleppend 10° Neigung in Y	50 %
PF	24,0 V	6,0 m/min	17 mm	20 cm/min	10° stechend 10° Neigung in Y	50 %

Die Tabelle 23 zeigt die ermittelten Aufmischungsgrade bei den einlagigen Auftragschweißungen in Abhängigkeit von der Brennerneigung. Eine Brennerneigung von 10° führte aufgrund des vermehrt brennenden Lichtbogens auf dem bereits erzeugten Schweißgut zu den geringsten Aufmischungen.

Tabelle 23: Aufmischungsgrade in Abhängigkeit von der Brennerneigung

	T Ni 6625 B	T Ni 6625 P*	T Ni 6625 P**
Makroschliff Neigung in Y 0°			
Aufmischungsgrad Streckenenergie	25 % 6,0 kJ/cm	26 % 5,8 kJ/cm	28 % 5,7 kJ/cm
Makroschliff Neigung in Y 5°			
Aufmischungsgrad Streckenenergie	27 % 5,8 kJ/cm	29 % 6,0 kJ/cm	28 % 5,8 kJ/cm
Makroschliff Neigung in Y 10°			
Aufmischungsgrad Streckenenergie	22 % 5,6 kJ/cm	24 % 5,8 kJ/cm	23 % 5,6 kJ/cm

Zum Auftragschweißen mit den Fülldrahtelektroden in senkrecht steigender Position PF mussten die Schweißparameter deutlich reduziert werden (Tabelle 23). Mit dem rutilen Fülldraht T Ni 6625 P** ließen sich damit durchgängige Auftragraupen erzeugen, während die Schweißbaupen mit T Ni 6625 P* nur teilweise durchgängig waren.

Im zweiten Schritt wurden ein- und zweilagige Schweißplattierungen in Position PA und PF gefertigt, die im Anhang 26 zu sehen sind. Diese wiesen i. a. keine unzulässigen Nahtunregelmäßigkeiten auf. Bei der FDE des Typs T Ni 6625 P* zeigten sich jedoch offene längliche Gasblaseneindrücke (Bild 41). Die offenen Schlauchporen traten herstellerunabhängig auch bei den anderen Schweißaufgaben mit den Ni-Basis-FDE auf.

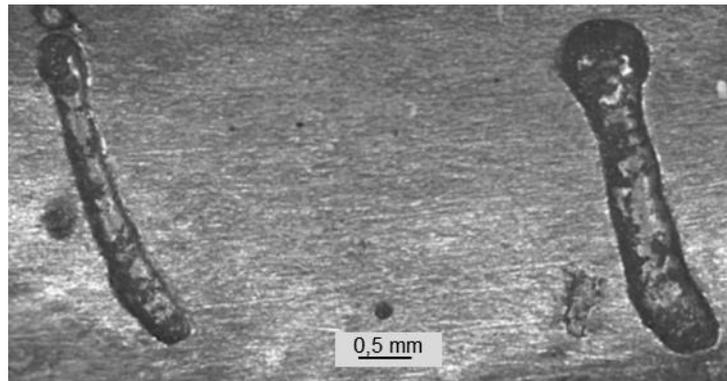


Bild 41: Offene längliche Gasblaseneindrücke auf der Schweißgutoberfläche des Fülldrahtelektrode vom Typ T Ni 6625 P* in Schweißposition PA

Die Durchstrahlungsprüfung zeigte nur eine relativ geringe Anzahl an Poren in den Auftragschweißungen. Durch die Bestimmung der Anzahl und Größe der Poren wurde ein prozentualer Anteil der Porosität von $< 1\%$ bei allen Proben ermittelt. Somit erfüllen alle Plattierungen hinsichtlich der Porosität die Anforderungen der Bewertungsgruppe B nach DIN EN ISO 5817:2014 [14]. Beim Vergleich der Porenanzahlen (Tabelle 24) ist auffällig, dass die Fülldrahtelektrode vom Typ T Ni 6625 P* deutlich mehr Poren aufweist. Die offenen länglichen Gasblaseneindrücke (Schlauchporen), welche bei der Sichtprüfung festgestellt wurden, waren jedoch bei der Röntgenprüfung nicht nachweisbar.

Tabelle 24: Ergebnisse der Durchstrahlungsprüfung der Schweißplattierungen

Schweiß-zusatz	Schweiß-position	Lage	Poren-anzahl	Poren-größe
T Ni 6625 B	PA	1	3	<1 mm
		2	2	<1 mm
T Ni 6625 P*	PA	1	10	<1 mm
		2	15	<1 mm
T Ni 6625 P**	PA	1	3	<1 mm
		2	8	<1 mm
	PF	1	2	<1 mm
		2	4	<1 mm

Bild 42 führt exemplarisch eine Röntgenaufnahme der zweilagigen Schweißung mit dem rutilen Fülldraht vom Typ T Ni 6625 P** (Position PA) auf. Die Poren sind als kleine runde, schwarze Punkte zu erkennen.

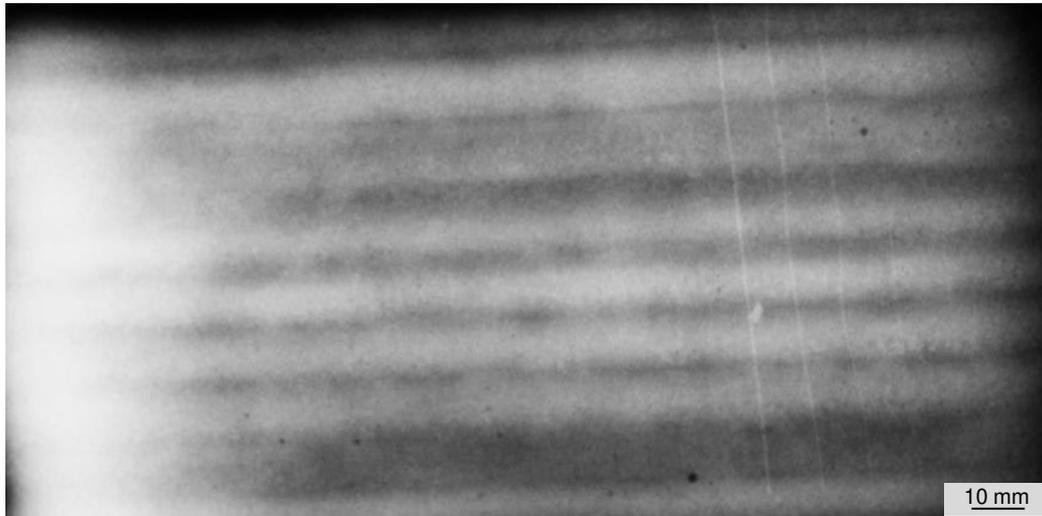


Bild 42: Fotografie eines Röntgenfilmes der 2-lagigen Schweißung der FDE T Ni 6625 P**

Mit Hilfe der REM-EDX-Analyse wurden die Gehalte der Hauptlegierungselemente in Abhängigkeit von der Schichtdicke im Querschnitt der zweilagigen Schweißplattierung ermittelt (vgl. Anhang 27). Die basische Fülldrahtelektrode T Ni 6625 B weist in der 1. Lage bei dem ersten Messpunkt einen Fe-Gehalt von 8,0 wt.-% auf und erreicht in der 2. Lage einen Fe-Gehalt von 1,5 wt.-%. Der Aufmischungsgrad lag bei 7 % (vgl. Anhang 26) Bei der rutilen Fülldrahtelektrode T Ni 6625 P* wurde bei dem ersten Messpunkt ein Fe-Gehalt von 21 wt.-% ermittelt, welcher nahe der Plattierungsoberfläche rapide auf 8,3 wt.-% abfällt. Dies ist auf die stärkere Aufmischung (12 %) mit dem Grundwerkstoff zurückzuführen. Die Fe-Gehalte der rutilen Fülldrahtelektrode T Ni 6625 P** weisen sowohl bei der Schweißung in PA und PF in der ersten Lage 1 mm Werte von rund 30 wt.-% auf und fallen aufgrund der Aufmischung (jeweils 18 %) mit dem C-Stahl auf einen Fe-Gehalt von 8,0 wt.-% in der 2. Lage. Demzufolge wird unter den vorliegenden Randbedingungen nur von der basischen Fülldrahtelektrode ein Fe-Gehalt ≤ 5 wt.-%.

Zur Charakterisierung der Anbindung der Plattierung und dem Substratblech sind die Haftscherkräfte bzw. -spannungen in Anlehnung an die ASTM A265:2019 [81] ermittelt worden (Bild 43). Unter der Berücksichtigung der Mindestblechstärke von $t > 9$ mm wurden aus den vorhandenen Plattierungen Scherproben mit einer Kantenlänge von $64,5 \times 25,4 \times 10$ mm ausgearbeitet. Die Plattierung wurde bis auf einen definierter Scherstreifen von mindestens 1,9 mm abgetragen. Zur Durchführung der Anbindungsprüfung wird der Scherstreifen der Probe auf einen Klotz mit deutlich geringerer Verformbarkeit aufgelegt und mittels Materialprüfmaschine quasistatisch belastet. Mit 572 MPa bis 614 MPa erreichen die errechneten Scherspannungen rund das Vierfache der geforderten 140 MPa (Bild 44, Tabelle 25). Den Kraft-Weg-Verläufen ist zu entnehmen, dass bei der Versuchsdurchführung mit dem basischen Fülldraht offenbar ein minimaler Spalt von ca. 0,5 mm zwischen der Probe und dem krafteinleitenden Scherklotz vorlag. Dieser Umstand hatte jedoch keinen Einfluss auf die Ermittlung der maximalen Scherkräfte bzw. -spannungen.

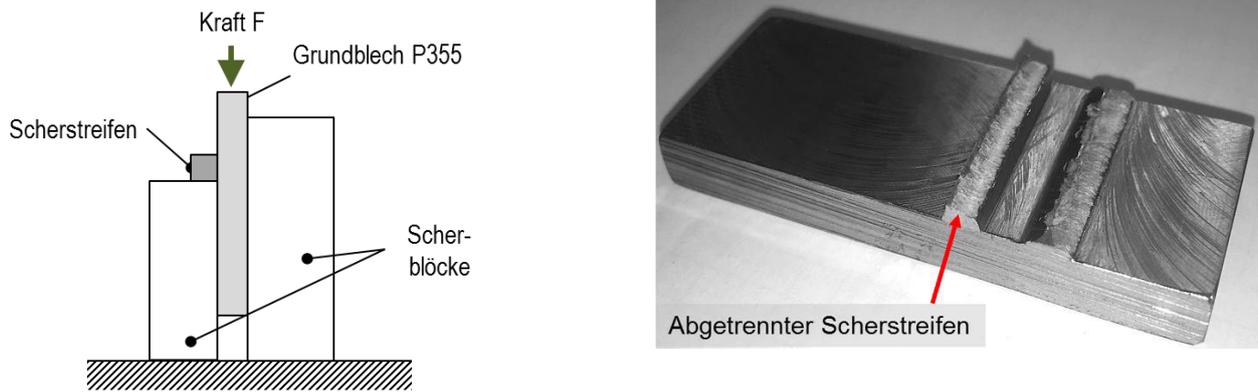


Bild 43: Anbindungsprüfung nach ASTM A265:2019 [81], links: Prinzip und Aufbau der Anbindungsprüfung, rechts: geprüfte Plattierung

Tabelle 25: Ergebnisse der Anbindungsprüfung nach ASTM A 265:2019 [81]

Schweiß-zusatz	Scherkraft F_{\max} in kN	Scherfläche A in mm^2	σ_{\max} in N/mm^2
T Ni 6625 B	68,3	112,5	607,1
T Ni 6625 P*	69,1	112,5	614,2
T Ni 6625 P** (PA)	64,4	112,5	572,4
T Ni 6625 P** (PF)	65,8	112,5	584,8

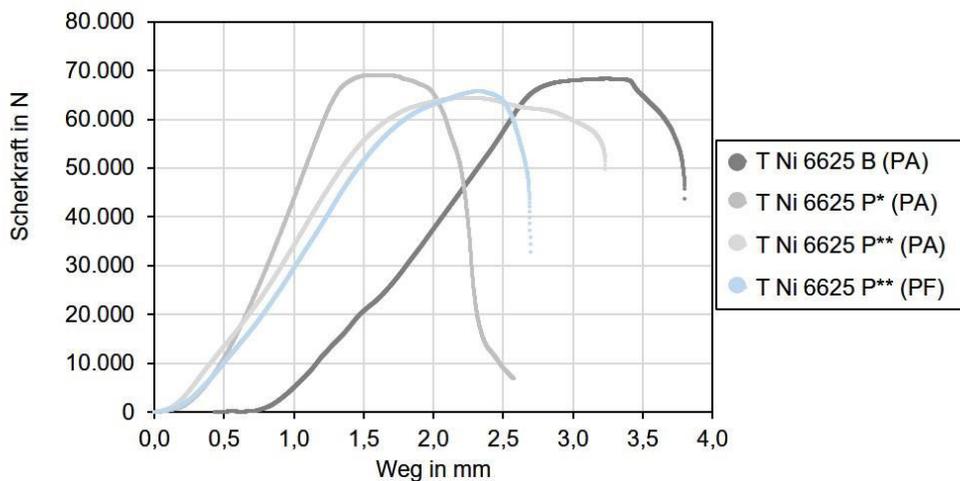


Bild 44: Kraft-Weg-Verläufe der Haftscherkraftversuche

An den Querschliffen erfolgten Härteprüfungen (HV10) nach DIN EN ISO 6507-1:2006 mit dem Ziel die ermittelten Härtewerte der verwendeten Fülldrahtelektroden in Abhängigkeit von der Schweißlage und der Aufmischung vergleichend gegenüber zu stellen. Bild 45 zeigt exemplarisch die Lage der Härtemessungen am Beispiel der zweilagigen Plattierung mit der basischen Fülldrahtelektrode T Ni 6625 B. Die Härtewerte der Plattierungen der drei Fülldrahtelektroden liegen erwartungsgemäß mit 204 HV10 bis 236 HV10 unterhalb von 250 HV10 und weisen bei vergleichender Betrachtung keine signifikanten Unterschiede auf. Tendenziell zeigen die einlagigen Plattierungen zwar geringere mittlere Härtewerte, jedoch sind die Unterschiede zu den Härtewerten der zweilagigen Plattierungen kleiner als die vorliegende Streuung. Auch die Betrachtung der Härtewerte längs des Querschnitts der Schweißplattierung unterscheiden sich nicht signifikant (Bild 46).

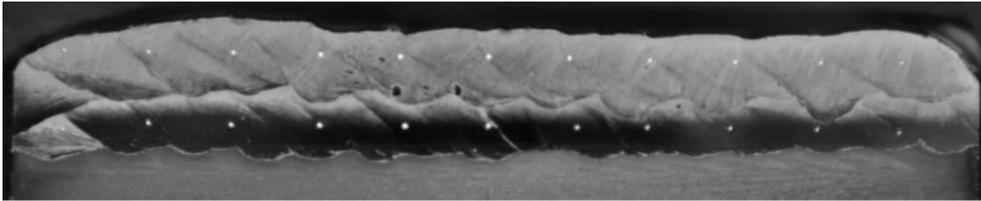


Bild 45: Querschliff und Lage der Härtemessungen (weiße Punkte) am Beispiel der basischen Fülldrahtelektrode T Ni 6625 B

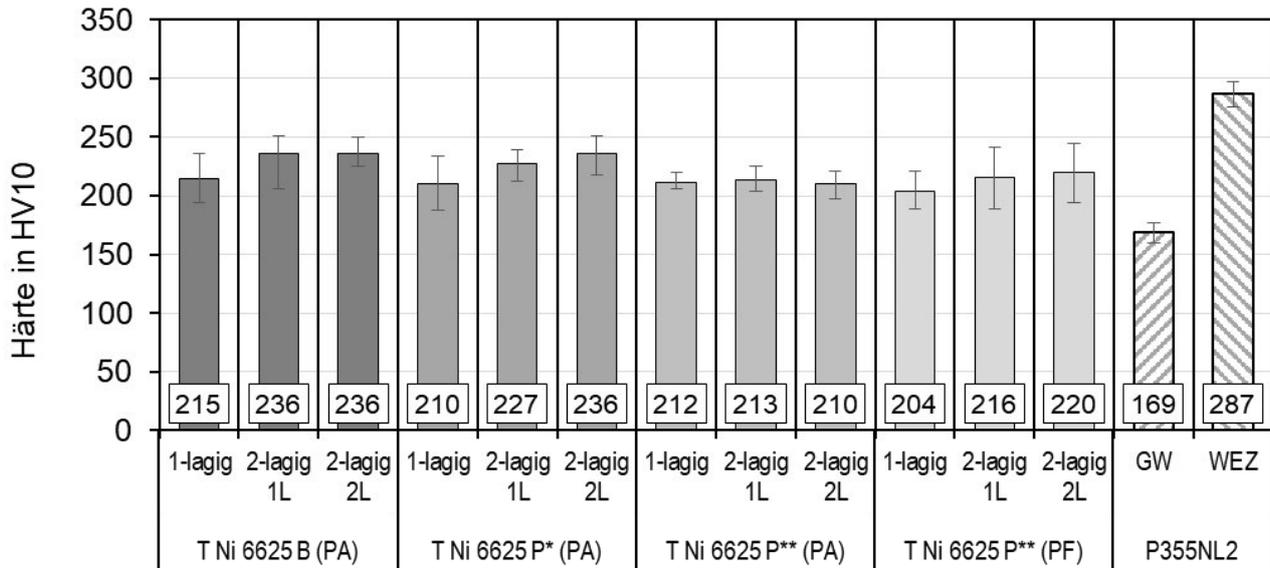


Bild 46: Mittlere Härtewerte der ein- und zweilagigen Schweißplattierungen, des Grundwerkstoffes und der WEZ

Aus den MSG-Schweißplattierungen wurden aufgrund des begrenzten Probenmaterials jeweils zwei Seitenbiegeproben quer zur Schweißrichtung (SBC) sowie zwei oberseitige Querbiegeproben (FCB) quer zur Schweißrichtung mit den in (Tabelle 26) aufgeführten Endabmessungen entnommen und unter den in Tabelle 27 aufgeführten Bedingungen geprüft.

Tabelle 26: Abmessungen der Quer und Seitenbiegeproben aus den MSG-Schweißplattierungen mit den Fülldrahtelektroden vom Typ T Ni 6625

Probe	Proben- dicke	Proben- breite	Radius	Proben- länge
SBC und FCB	10 mm	10 mm	1 mm	165 mm

Tabelle 27: Prüfbedingungen der Quer- und Seitenbiegeprüfung an den MSG-Schweißplattierungen mit den Fülldrahtelektroden vom Typ T Ni 6625

Prüfung	Biegedorn- durchmesser	Stützrollen- durchgang	Biegedorn- vorschub	Biegeverhältnis
SBC und FCB	30 mm	62 mm	1 mm/s	3,0

Alle Seiten- und Querbiegeproben erreichten unabhängig von den eingesetzten Fülldrahtelektroden und der Schweißposition einen Biegewinkel von 180°. Lediglich bei der Probe T

Ni 6625 P** wurde unter dem Stereomikroskop bei 8-facher Vergrößerung ein kleiner Anriss festgestellt (Tabelle 28).

Tabelle 28: Ergebnisse der Quer- und Seitenbiegeprüfung der Schweißplattierungen mit den Ni-Basis Fülldrahtelektroden vom Typ T Ni 6625

Schweißzusatz	Schweißposition	Biegewinkel	Bemerkung
Querbiegeprobe (FBCB)			
T Ni 6625 B	PA	180°	-
T Ni 6625 P*	PA	180°	-
T Ni 6625 P**	PA	180°	Riss
T Ni 6625 P**	PF	180°	-
Seitenbiegeprobe (SBC)			
T Ni 6625 B	PA	180°	-
T Ni 6625 P*	PA	180°	-
T Ni 6625 P**	PA	180°	-
T Ni 6625 P**	PF	180°	-

8.6 Herstellung der V-Nähte mit hoch Ni-haltigen Füll- und Massivdrahtelektroden und Prüfung

8.6.1 Versuchsplan und -durchführung

Gemäß den Zielstellungen des Forschungsvorhabens wurden im Rahmen des AP 7 mit allen zur Verfügung gestellten Schweißzusätzen V-Nähte an den eingangs beschriebenen Grundwerkstoffen gefertigt. Das Ziel dieser Untersuchung bestand in der Prüfung und Bewertung der Auswirkung der Schlackencharakteristik der Fülldrahtelektroden auf die Nahtqualität und die mechanisch-technologischen Güterwerte der Schweißungen. Darüber hinaus wurde ein Vergleich mit der Nahtqualität der mit den Massivdrahtelektroden gefertigten Schweißnähte vorgenommen. Die durchgeführten MSG-Schweißungen zum Herstellen der V-Nähte und die Randbedingungen verdeutlichen Tabelle 29 und Tabelle 30.

Tabelle 29: Übersicht über die verwendeten Grund- und Zusatzwerkstoffkombinationen und den Schweißpositionen beim MSG-Verbindungsschweißen

Drahtelektrode (Ø 1,2 mm)		Grundwerkstoff	Position
NiCr22Mo9Nb	T Ni 6625 B T Ni 6625 P* T Ni 6625 P** S Ni 6625	alloy 625 t = 5 mm und 12 mm	PA
		X8Ni9, t = 17 mm	PA und PC
NiCr20Mn6Fe4Nb NiCr20Mn6Fe4Nb NiCr15Fe6Mn NiCr20Mn3Nb NiCr20Mn3Nb	T Ni 6083 B T Ni 6083 R T Ni 6182 P T Ni 6082 R S Ni 6082	alloy 800 H t = 5 mm und 14 mm	PA
NiCr15Mo15Fe6W4	T Ni 6276 B T Ni 6276 P S Ni 6276	alloy C276 t = 5 mm und 12 mm	PA

Tabelle 30: Randbedingungen für die MSG-V-Nähte

Kriterien	Position PA	Position PC
Flankenwinkel	35°	15 / 45°
Spaltbreite	2,4 mm (Ø WIG-Stab)	
Zwischenlagentemperatur	≤ 100 °C	
Wurzellage	manueller WIG-Prozess mit Ar 4.6	
Streckenenergie	max. 8 kJ/cm	
Einspannbedingungen	schrumpfbehindert	Befestigung mit Spannpratzen

Als Schutzgase fanden, wie bei den vorhergehenden Versuchen, bei den Fülldrahtelektroden das Mischgas M21 (Ar + 18 % CO₂) und bei den Massivdrahtelektroden das 4-Komponenten-Schutzgas Z (ArHeHC 30/2/0,05) Anwendung. Die verwendeten Schweißparameter orientierten sich erneut an den im Absatz 8.2 ermittelten oberen Leistungsgrenzen. Das Bild 47 zeigt die verwendeten Schweißunterlagen und Einspannungen zum Verbindungsschweißen der Bleche. Die während des Schweißens auftretenden fest anhaftenden Schlackereste, die sich nicht mit Bürste und Schlackehammer entfernen ließen, sind mit eisen- und schwefelfreien Schleifscheiben entfernt worden.

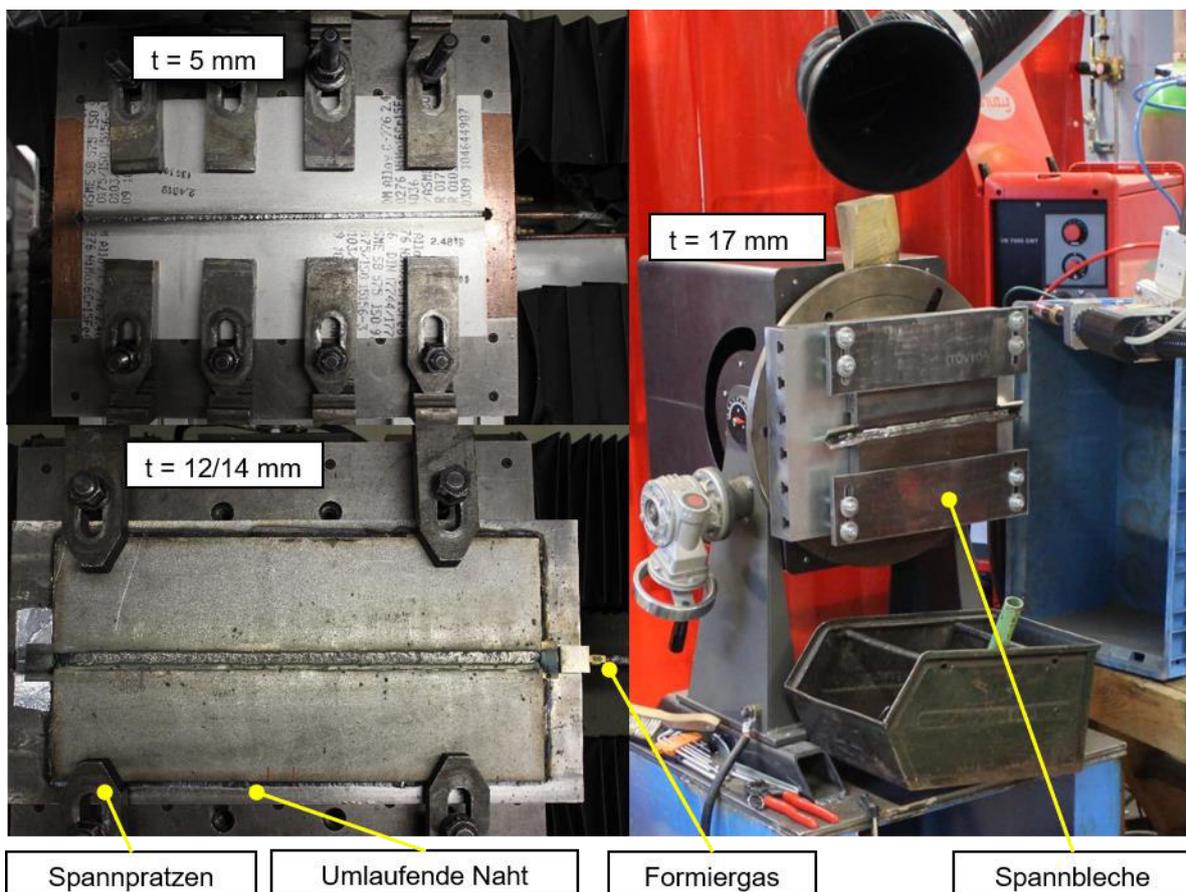


Bild 47: Verwendete Schweißunterlagen zum Verbindungsschweißen in den Schweißpositionen PA (links) und PC (rechts), links oben: Aufspannung mit Spannpratzen. Links unten: Schrumpfbehindertes Aufschiessen auf steifer Grundplatte aufgeschweißt und Fixierung mit Spannpratzen, rechts: Aufspannung mit Blechen

Bild 48 zeigt die verwendeten Fugenformen und Schweißfolgen. Die Schweißfolgen können in Abhängigkeit von den verwendeten Schweißzusätzen und -parametern geringfügig abweichen.

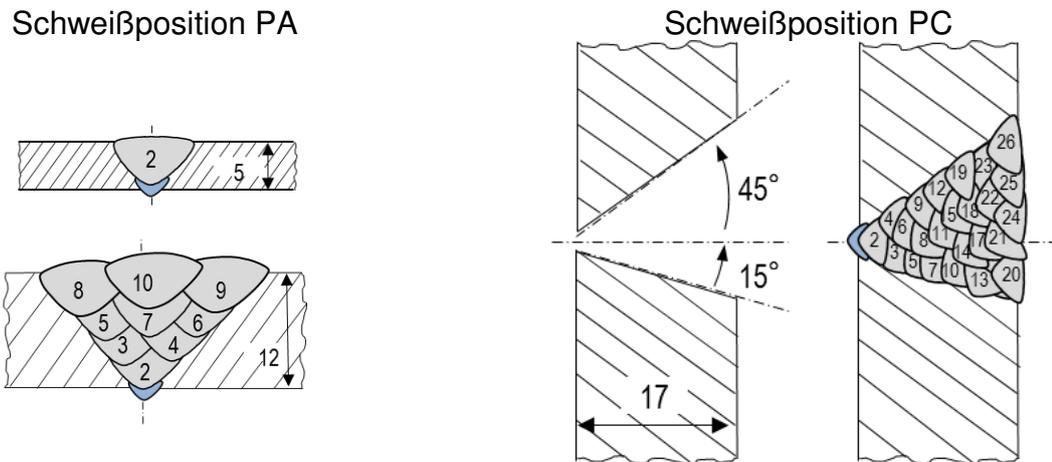


Bild 48: Verwendete Schweißfolgen und Fugenformen

Art und Umfang der zerstörungsfreien und zerstörende Prüfungen an den gefertigten V-Nähten sind der Tabelle 31 zu entnehmen.

Tabelle 31: Umfang der zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfungen der V-Nähte an den Grundwerkstoffen alloy 625, alloy 800 H, alloy C-276 und X8Ni9

Abkürzung	Art	Probenanzahl	Beschreibung	Blechdicke [mm]	
				5	12/14
FZP	Flachzugproben	3	DIN 50125, Form E	X	X
M	Metallographie	3	-	X	X
K/SG/RT	Kerbschlagproben	3	RT, VWT 0/1	-	X
K/SG/-	Kerbschlagproben	3	-196 °C, VWT 0/1	-	X
K/GW/RT	Kerbschlagproben	3	Grundwerkstoff, RT	-	X
K/GW/-	Kerbschlagproben	3	Grundwerkstoff, -196 °C	-	X
TFBB	Querbiegeproben	3	Decklage	X	X
SBB	Seitenbiegeproben*	3	-	-	X
G48	ASTM G48:2015, Methode C**	1	Lochkorrosion, CPT	X	-
-	Durchstrahlungsprüfung	1	Innere Nahtunregelmäßigkeiten	X	X
-	Sichtprüfung	1	Äußere Nahtunregelmäßigkeiten	X	X

*) nur (alloy 625 /alloy C-276)

Die Probenentnahmepläne für die zerstörenden Prüfungen sind in Anhang 28 und Anhang 29 aufgeführt. Die lichtmikroskopischen Untersuchungen wurden an 2 Querschliffen pro Schweißnaht durchgeführt. An allen Schweißungen sind Quersugversuche und Biegeprüfungen vorgenommen worden. Die Kerbschlagbiegeprüfungen erfolgten nur an den Schweißungen der dicken Bleche. In Absprache mit dem PA sind die Lochkorrosionsprüfungen nach ASTM G48:2015, Methode C [75] an den V-Nähten der 5 mm dicken Bleche realisiert worden.

8.6.2 Ergebnisse der artgleichen MSG-Schweißverbindungen in PA (Blechdicke 5 mm und 12-14 mm)

- Sicht- und Durchstrahlungsprüfung

Die Ergebnisse der Durchstrahlungsprüfungen sind im Anhang 30 zusammengefasst. Lediglich die Hälfte der Schweißnähte erfüllte die Anforderungen der Bewertungsgruppe B der DIN EN ISO 5817:2014. Der Rest wies entweder unzulässige Endkraterrisse, Schlauchporen, Bindefehler oder Schlackeeinschlüsse auf. Mit einer Ausnahme (Nachweis eines Endkraterrisses) erreichten die mit den Massivdrahtelektroden gefertigten V-Nähte die Bewertungsgruppe B.

- Lagenaufbau, Nahtoberfläche, Lichtbogenstabilität und Schweißparameter

Die Anhänge 31 bis 36 dokumentieren exemplarisch den Lagenaufbau, die Nahtoberflächen, die Lichtbogenstabilität und die Schweißparameter. Auch hier zeigt die Auswertung der Strom-Spannungs-Zeit-Verläufe, dass die basischen Fülldrahtelektroden legierungsunabhängig ein instabileres Lichtbogenverhalten hervorrufen. An zwei Querschliffen jeder Schweißnaht wurden lichtmikroskopische Auswertungen zum Auftreten innerer Nahtunregelmäßigkeiten durchgeführt. Dies ist erforderlich, da u. a. Mikrorisse unterhalb der Nachweisgrenze der Durchstrahlungsprüfung liegen. Die Zulässigkeit für Mikrorisse gemäß DIN EN ISO 5817:2012 hängt, wie in der Tabelle 32 zu erkennen ist, von der Art des Grundwerkstoffes und vor allem von der Rissanfälligkeit ab.

Tabelle 32: Auszug aus der EN ISO 5817:2012 bezogen auf die Zulässigkeit von Oberflächen- und Inneren Unregelmäßigkeiten

Nr.	Ordnungs-Nr. nach ISO 6520-1:1998	Unregelmäßigkeit/Benennung	Bemerkungen	t mm	Grenzwerte für Unregelmäßigkeiten bei Bewertungsgruppen		
					D	C	B
1 Oberflächenunregelmäßigkeiten							
1.1	100	Riss	-	≥0,5	Nicht zulässig		
1.2	104	Endkraterriss	-	≥0,5	Nicht zulässig		
2 Innere Unregelmäßigkeiten							
2.1	100	Riss	Alle Risstypen außer Mikrorisse und Endkraterrisse.	≥0,5	Nicht zulässig		
2.2	1001	Mikroriss	Ein Riss gewöhnlich nur sichtbar unter dem Mikroskop (50x).	≥0,5	Zulässig	Die Zulässigkeit hängt ab von der Art des Grundwerkstoffes und vor allem von der Rissanfälligkeit.	

Die Querschliffe der Schweißnähte der 5 mm dicken Bleche wiesen keine Risse oder Bindefehler auf (Tabelle 33). Allerdings traten während des Schweißens mit den basischen Fülldrahtelektroden T Ni 6625 B und T Ni 6276 B bei den zweiten Raupen jeweils einseitig gravierende Bindefehler oder Einbrandkerben auf, sodass nach dem Ausschleifen eine zusätzliche dritte Raupe eingebracht wurde. Zudem zeigen sich bei den Fülldrahtschweißungen z. T. durchlaufende Einbrandkerben und schroffe Nahtübergänge. In den Querschliffen der 12 bzw. 14 mm dicken Bleche waren ggü. den Querschliffen der dünnen Bleche mehr innere Nahtunregelmäßigkeiten nachweisbar. Es traten gelegentlich Risse auf, wobei jedoch kein eindeutiger Zusammenhang zu dem verwendeten Schlackensystem

festzustellen war. Einzig die Schweißungen mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6276 blieben auf der Betrachtungsebene der Querschliffe frei von Heißrissen.

Tabelle 33: Ergebnisse der lichtmikroskopischen Auswertung der zwei Querschliffe der Stumpfnähte an alloy 625, alloy 800 H, und alloy C-276

Drahtelektrode	Risse (100)				Pore (2011)				Bindefehler (401)				Schlacke-Einschluss (301)			
	5mm		12/14mm		5mm		12/14mm		5mm		12/14mm		5mm		12/14mm	
T Ni 6625 B	-	-	-	1	-	-	2	-	-	-	-	-	5	6	1	1
T Ni 6625 P*	-	-	-	3	-	-	2	1	-	-	-	-	-	-	2	1
T Ni 6625 P**	-	-	1	-	-	-	9	17	-	-	-	-	7	1	1	-
S Ni 6625	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T Ni 6083 B	-	-	-	-	-	-	20	28	-	-	-	-	-	-	-	-
T Ni 6083 R	-	-	-	-	1	-	10	20	-	-	-	-	-	1	2	-
T Ni 6182 P	-	-	-	-	-	-	2	4	-	-	-	-	-	1	-	1
T Ni 6082 R	-	-	2	1	-	-	15	10	-	-	-	-	1	-	1	-
S Ni 6082	-	-	1	1	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-
T Ni 6276 B	-	-	-	-	-	-	3	1	-	-	-	-	-	-	3	1
T Ni 6276 P	-	-	-	-	-	-	3	2	-	-	-	-	20	15	5	3
S Ni 6276	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-

- Querzugprüfung (Blechdicke 5 mm und 12/14 mm)

Aus jeder V-Naht wurden Flachzugproben Form E nach DIN 50125:2016 [84] entnommen und geprüft (Tabelle 34). Diese Proben sind auf der Nahtoberseite blecheben abgefräst und anschließend auf der Wurzellagenseite auf das Endmaß von 4 mm bzw. 8 mm gebracht worden. Ein Einfluss der manuell ausgeführten WIG-Wurzelschweißungen auf die Prüfergebnisse wurde somit ausgeschlossen. Aufgrund der nicht gleichmäßigen Dehnung der verschiedenen Grund- und Zusatzwerkstoffkombinationen wurden im Querzugversuch lediglich die Zugfestigkeit und der Bruchort bestimmt.

Tabelle 34: Abmessungen der Flachzugproben aus den V-Nähten (Maße in Millimeter)

Blechdicke	Proben- dicke	Proben- breite	Kopf- breite	Kopf- höhe	Anfangs- messlänge	Gesamt- länge
	4	10	15	30	40	120
12	8	25	33	60	80	246
14	8	25	33	60	80	246

Bild 49 und Bild 50 zeigen die Ergebnisse der Zugversuche. Alle Schweißnähte am alloy 800 H versagen im Grundwerkstoff, da die Festigkeitswerte der Schweißzusätze deutlich über denen des Grundwerkstoffes liegen. Aus diesem Grund sind in diesem Fall keine Rückschlüsse auf die Festigkeit des Schweißgutes zulässig. Die Querzugproben der Schweißnähte am alloy 625 und alloy C-276 brachen dagegen mit einer Ausnahme (12 mm dickes Blech, S Ni 6276) im Schweißgut. Die Unterschiede in den Zugfestigkeitswerten der verschiedenen Schweißungen sind nur gering. Bei den dickeren Blechen erreichen die mit den Massivdrahtelektroden erzeugten Schweißnähte leicht höhere Zugfestigkeiten.

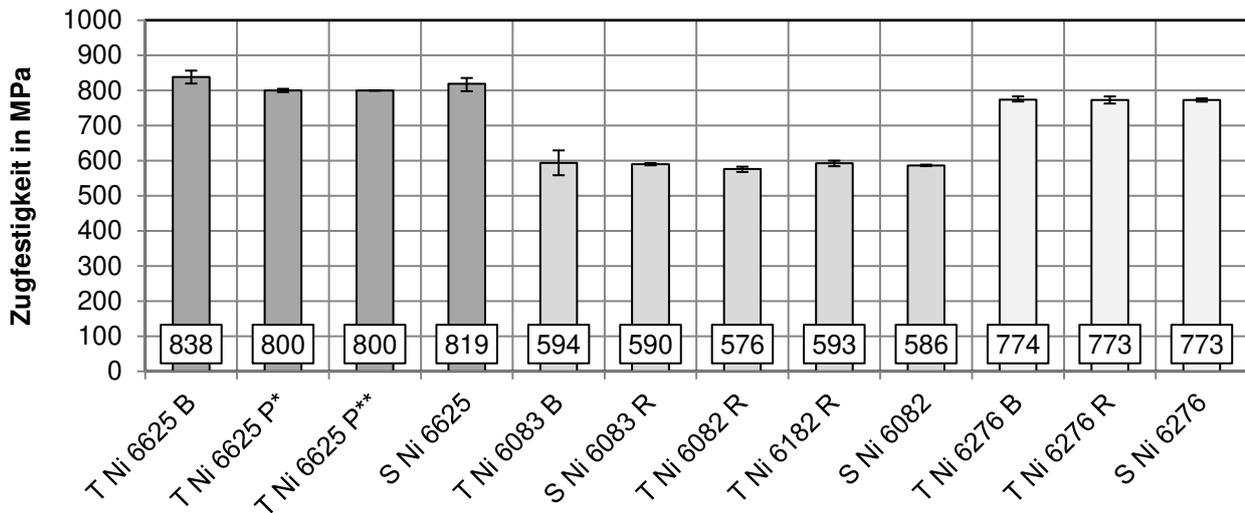


Bild 49: Ergebnisse der Zugversuche an den Querzugproben der V-Nähte der 5 mm dicken Bleche

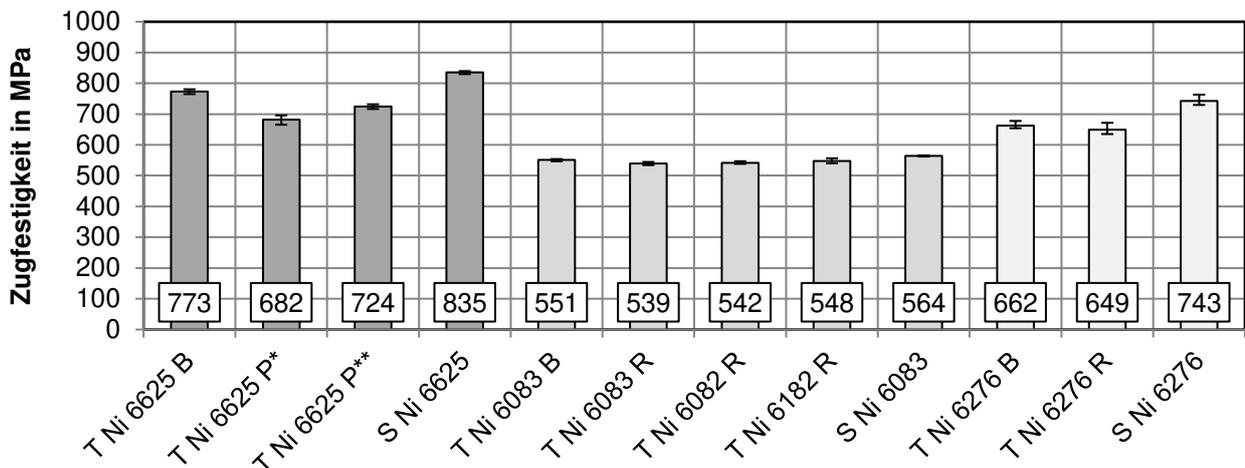


Bild 50: Ergebnisse der Zugversuche an den Querzugproben der V-Nähte der 12 bzw. 14 mm dicken Bleche

- **Quer- und Seitenbiegeprüfung**

Analog zu den vorhergehenden Arbeitspaketen erfolgten auch an den V-Nähten Biegeprüfungen an Seiten- (SBB) und Querbiegeproben (TFBB). Der Zugbereiche der Querbiegeproben lag auf der Decklagenseite. Die einzelnen Probenabmessungen sind Tabelle 35 zu entnehmen. Die Bedingungen der Biegeprüfungen enthält Tabelle 36.

Tabelle 35: Abmessungen der Biegeproben der V-Nähte an alloy 625, alloy 800 H und alloy C-276 nach DIN EN ISO 5173:2012 [73]

Blechdicke	Prüfung	Proben- dicke	Proben- breite	Radius	Proben- länge
5 mm	TFBB	4 mm	25 mm	1 mm	120 mm
12 und 14 mm	SBB	10 mm	10 mm	1 mm	180 mm
12 und 14 mm	TFBB	10 mm	40 mm	1 mm	180 mm

Die Biegeprüfungen mit den oberseitigen Stumpfnah-Querbiegeproben (TFBB) der 5 mm und 12 mm dicken Verbindungsschweißungen zeigten keine signifikante Abhängigkeit

zwischen den eingesetzten Schweißzusatzwerkstoffen und den erreichten Biegewinkeln (vgl. Tabelle 37). Die Biegeprüfungen mit den oberseitigen Stumpfnah-Querbiegeproben (TFBB) der 5 mm und 12 mm dicken Verbindungsschweißungen zeigten keine signifikante Abhängigkeit zwischen den eingesetzten Schweißzusatzwerkstoffen und den erreichten Biegewinkeln (vgl. Tabelle 37).

Tabelle 36: Prüfbedingungen der Quer- und Seitenbiegeprüfung der V-Nähte an alloy 625, alloy 800 H und alloy C-276 nach DIN EN ISO 5173:2012 [73]

Blechdicke	Prüfung	Biegedorn-durchmesser	Stützrollen-durchgang	Biegedorn-vorschub	Biege-verhältnis
5 mm	TFBB	10 mm	22 mm	1 mm/s	2,5
12 und 14 mm	TFBB	30 mm	62 mm	1 mm/s	3,0
12 und 14 mm	SBB	30 mm	62 mm	1 mm/s	3,0

Tabelle 37: Ergebnisse der Prüfung der Biegeproben aus den V-Nähten von alloy 625, alloy 800 H und alloy C-276

Probe	TFBB, t = 5 mm		TFBB, t = 12-14 mm		SBB, t = 12-14 mm	
	α in °	Bemerkung	α in °	Bemerkung	α in °	Bemerkung
T Ni 6625 B	155	Riss	15	Riss	45	Riss
	110	Riss	24	Riss	180	-
	-	-	41	Riss	180	-
T Ni 6625 P*	65	Riss	14	Riss	28	Riss
	180	-	67	Riss	42	Riss
	-	-	5	Riss	9	Riss
T Ni 6625 P**	106	Riss	16	Riss	28	Riss
	180	-	10	Riss	55	Riss
	-	-	7	Riss	63	Riss
S Ni 6625	180	-	55	Riss	180	-
	70	Riss	37	Riss	180	-
	-	-	55	Riss	35	Riss
T Ni 6083 B	180	-	117	Riss	58	Riss
	180	-	180	-	45	Riss
	-	-	49	Riss	180	-
T Ni 6083 R	180	-	180	-	180	-
	180	-	180	-	180	-
	-	-	180	-	180	-
T Ni 8082 R	180	-	180	-	180	-
	180	-	180	-	180	-
	-	-	109	Riss	180	-
T Ni 6182 P	180	-	180	-	180	-
	180	-	180	-	52	Riss
	-	-	180	-	180	-
S Ni 6082	180	-	80	Riss	37	Riss
	180	-	26	Riss	180	-
	-	-	32	Riss	180	-
T Ni 6276 B	180	-	17	Riss	60	Riss
	180	-	27	Riss	60	Riss
	-	-	140	Riss	55	Riss
T Ni 6276 P	87	Riss	28	Riss	160	Riss
	180	-	11	offene Pore	135	offene Pore
	-	-	18	Riss	67	Riss
S Ni 6276	180	-	25	Riss	180	-
	180	-	180	-	180	-
	-	-	15	Riss	-	-

Bei den Proben aus den 5 mm dicken Verbindungsschweißungen erzielten jedoch trotz des geringfügig kleineren Biegeverhältnisses deutlich mehr Proben den maximal erreichbaren Biegewinkel. Bei den Prüfungen der Seitenbiegeproben der 12 mm dicken Schweißverbindungen erreichten die Schweißungen mit den Massivdrahtelektroden besonders häufig den maximal erreichbaren Biegewinkel von 180°. Auch die rutilen Fülldrahtelektroden des Typs Ni 6082 R, Ni 6083 R und die basische Fülldrahtelektrode vom Typ Ni 6625 B erreichten überwiegend einen Biegewinkel von 180°.

- Kerbschlagbiegeprüfung (Blechdicke 12 und 14 mm)

Für die Ermittlung der Kerbschlagarbeiten wurden aus den V-Nähten und den Grundwerkstoffen jeweils sechs Charpy V-Kerbschlagproben zur Prüfung bei Raumtemperatur und bei -196°C (Kühlung in Flüssigstickstoff) entnommen. Die Kerblage bei den Schweißnähten war im Schweißgut senkrecht zur Nahtoberfläche (VWT 0/1).

Bild 51 stellt die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche grafisch dar. Die einzelnen Prüfwerte befinden sich im Anhang 39. Eine Abhängigkeit der Kerbschlagarbeit von der Schlackencharakteristik ist nur beim Legierungstyp Ni 6625 zu erkennen.

Beim Legierungstyp T Ni 6182 P bewirkt der geringe Cr-Gehalt leicht höhere Kerbschlagarbeitswerte. Der höhere Mn-Gehalt des Legierungstyps 6083 ggü. 6082 bewirkt keine höheren Kerbschlagarbeitswerte. Die höchsten Werte erreichen legierungsunabhängig die mit den Massivdrahtelektroden ausgeführten Schweißungen.

Die für das Schweißgut der Schweißzusätze vom Hersteller garantierten Mindestwerte bei -196 °C (vgl. Anhang 2) von 60 J (T Ni 6625), 90 J (T Ni 6082) und 42 J (T Ni 6726) werden fast durchgängig erreicht und zum Teil weit übertroffen. Lediglich die basische Fülldrahtelektrode vom Typ T Ni 6625 B erreicht nicht die geforderten Mindestwerte.

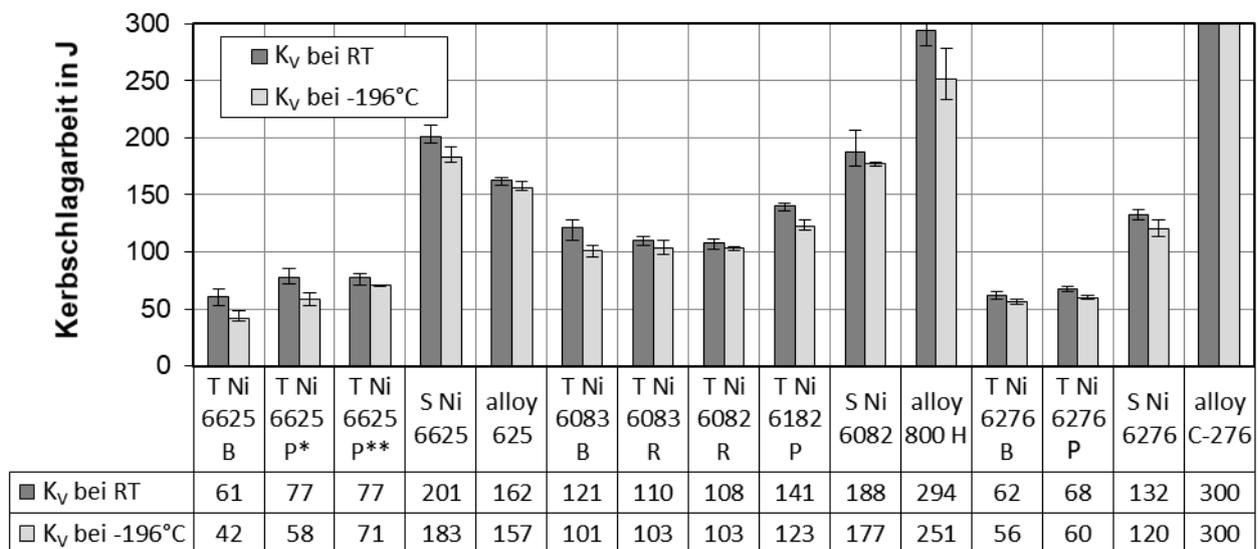


Bild 51: Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche an den MSG-Schweißverbindungen an den 12-14 mm dicken Blechen

- Korrosionsprüfung

Für die Lochkorrosionsprüfungen wurden aus jeder Schweißnaht jeweils drei Proben mit den Maßen 25 x 50 x 5 [mm] entnommen, geschliffen, gebeizt und passiviert. Abweichend von der Norm wurde die Prüftemperatur nicht schrittweise um 5 °C erhöht, sondern auf der errechneten CPT-Starttemperatur mit einer Prüfzeit von 24 h geprüft.

Diese betragen für Ni 6625 80 °C und für Ni 6276 115 °C. Aus technischen Gründen konnten bei der letztgenannten Starttemperatur nicht geprüft werden, so dass für Ni 6276 85 °C als Starttemperatur festgelegt wurde. Das Elektrolyt war eine Lösung aus FeCl₃. Aufgrund des überwiegenden Auftretens der Korrosionserscheinungen an den Schnittkanten des Grundwerkstoffes wurde auf einen Vergleich der Massenverlustrate verzichtet. Dementsprechend erfolgte die Auswertung rein qualitativ. Tabelle 38 und Tabelle 39 fassen die Ergebnisse der Lochkorrosionsprüfung zusammen. Unter den vorhandenen Randbedingungen waren nur vereinzelt bei wenigen Proben Spuren von Lochkorrosion in Schweißgut zu erkennen.

Tabelle 38: Ergebnisse der Lochkorrosionsprüfung nach ASTM G48:2015, Methode C der Verbindungsschweißungen mit den Schweißzusätzen des Typs Ni 6625

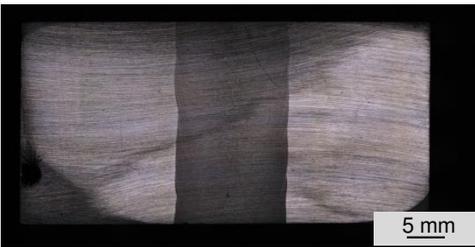
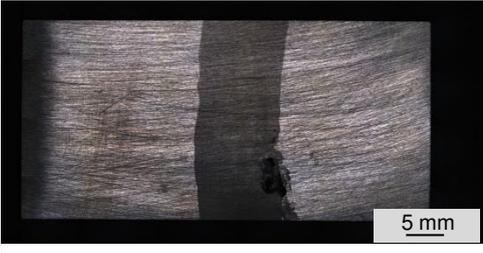
Schweißzusatz	Kommentar	Exemplarisches Bild
T Ni 6625 B	Schweißgut: keine LK Schnittkante: LK vorhanden	
T Ni 6625 P*	Schweißgut: keine LK Schnittkante: LK vorhanden	
T Ni 6625 P**	Schweißgut: LK bei einer Probe Schnittkante: keine LK	
S Ni 6625	Schweißgut: LK vorhanden Schnittkante: LK vorhanden	

Tabelle 39: Ergebnisse der Korrosionsprüfung nach ASTM G48:2015, Methode C der Verbindungsschweißungen mit den Schweißzusätzen des Typs Ni 6276

Schweißzusatz	Kommentar	Bild
T Ni 6276 B	Schweißgut: keine LK Schnittkante: LK vorhanden	
T Ni 6276 P	Schweißgut: LK vorhanden Schnittkante: keine LK	
S Ni 6276	Schweißgut: keine LK Schnittkante: LK vorhanden	

8.6.3 Ergebnisse des MSG-Schweißens am X8Ni9 (Blechdicke 17 mm) mit dem Schweißzusatz vom Typ Ni 6625 in PA- und PC-Position

- Schweißparameter, Lichtbogenstabilität und innere Nahtunregelmäßigkeiten

Analog zum Abs. 8.6.2 wurden am kaltzähen Stahl X8Ni9 V-Nähte in den Schweißpositionen PA und PC hergestellt und anschließend zerstörend geprüft. Auf eine Durchstrahlungsprüfung wurde aus Zeitgründen verzichtet. Für die Schweißungen in PA sind die gleichen Schweißparameter wie bei den vorhergehenden MSG-Schweißungen an den voll-austenitischen Blechen ausgewählt worden (Anhang 37). Die Zwischenlagentemperaturen lagen unter 100 °C. Zum Schweißen in Position PC ist die Streckenenergie auf 4 bis 5 kJ/cm reduziert worden, um ein Abfließen der Schmelze zu verhindern (Anhang 38). An dieser unteren Leistungsgrenze der Empfehlungen der SZW-Hersteller brannte der Lichtbogen ebenfalls stabil. Wie zum Teil bei den vorangegangenen Schweißungen traten während des Schweißens schon offene Poren auf, die z. T. weit in die Tiefe gingen, Bild 51. Für die lichtmikroskopischen Untersuchungen wurden wiederum jeweils zwei Querschliffe aus den Schweißnähten entnommen und bewertet (Anhang 37 und Anhang 38). In den Schliffen zeigte sich eine Vielzahl von Heißrissen und Poren, weshalb die meisten Schweißungen nicht den Anforderungen der Bewertungsgruppe B gemäß DIN EN ISO 5817:2014 entsprechen (vgl. Tabelle 40). Die Stumpfnähte zeigten zudem teilweise nicht durchlaufende Einbrandkerben und schroffe Nahtübergänge. Die höchsten Nahtqualitäten erreichten erneut die Schweißungen mit der Massivdrahtelektrode.



Bild 52: Poren im Schweißgut des Fülldrahtes T Ni 6625 P** in Position PC beim Schweißen von X8Ni9

Tabelle 40: Ergebnisse der lichtmikroskopischen Auswertung der 2 Querschliffe der V-Nähte an X8Ni9

Draht- elektrode	Risse (100)				Pore (2011)				Gl.m. Pore in % (2012)				Bindefehler (401)				Feste Einschlüsse (300)			
	PA		PC		PA		PC		PA		PC		PA		PC		PA		PC	
T Ni 6625 B	5	4			5	8			0,5	0,5			1	-			8	9		
T Ni 6625 P*	4	1	1	3	3	5	12	5	0,5	1,0	1,0	0,5	-	-	3	1	2	-	2	-
T Ni 6625 P**	3	5	-	-	10	11	27	30	1,0	1,0	2,0	2,0	-	-	-	-	13	8	4	5
S Ni 6625	4	-	-	-	4	-	1	-	0,5	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-

- Querkzugprüfung

Analog zu den artgleichen MSG-Verbindungsschweißungen wurden den X8Ni9-V-Nähten ebenfalls drei Flachzugproben quer zur Schweißnaht entnommen (Tabelle 41).

Tabelle 41: Abmessungen der Flachzugproben der Form E nach DIN 50125:2016 [84] der V-Nähte am X8Ni9 (Blechdicke 17 mm), Maße in Millimeter

Blech- dicke	Proben- dicke	Proben- breite	Kopf- breite	Kopf- höhe	Anfangs- messlänge	Gesamt- länge
17	8	25	33	60	80	246

Die Ergebnisse der Zugversuche differenzieren in den Festigkeitswerten nur gering, da die Zugproben durchgängig im Grundwerkstoff versagten (Bild 53).

- Kerbschlagbiegeprüfung

Die Kerbschlagbiegeprüfung erfolgte ebenfalls an genormten Charpy VWT 0/1. Bild 54 zeigt die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche. Die einzelnen Messwerte befinden sich im Anhang 39. Die ermittelten Kerbschlagarbeitswerte weisen bei allen verschweißten Schweißzusätzen in den beiden verwendeten Schweißpositionen PA und PC eine geringe Streuung auf. Unabhängig von Prüftemperatur und Schweißposition ist zu erkennen, dass die basische Fülldrahtelektrode mit ca. 50 J die signifikant geringsten Werte bewirkt. Dem

gegenüber steht die Massivdrahtelektrode, die ebenfalls unabhängig von Schweißposition und Prüftemperatur, mit ca. 180 J ca. 3,6mal höhere Werte als die basische Fülldrahtelektrode erzielte. Die Werte der basischen Fülldrahtelektrode erreichen somit nicht die im Abnahmeprüfzeugnis angegebenen 60 J bei -196°C (vgl. Anhang 2). Die anderen Schweißzusätze und auch der Grundwerkstoff erreichen oder übertreffen sehr deutlich die geforderten Werte.

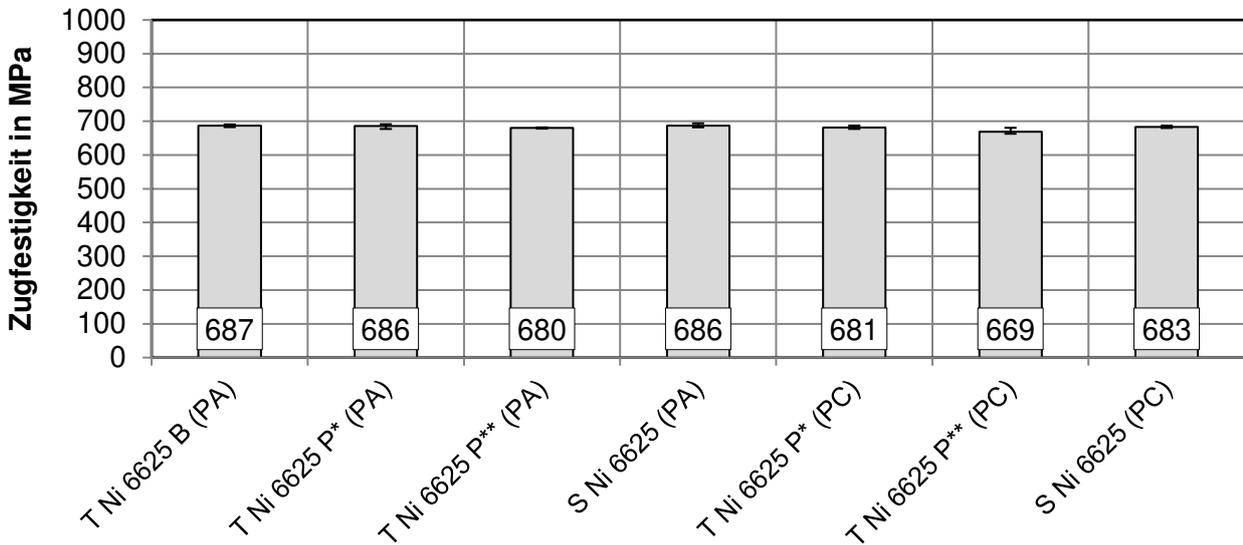


Bild 53: Ergebnisse der Querzugversuche an den MSG-Schweißverbindungen (X8Ni9, t = 17 mm) in unterschiedlichen Positionen bei Raumtemperatur

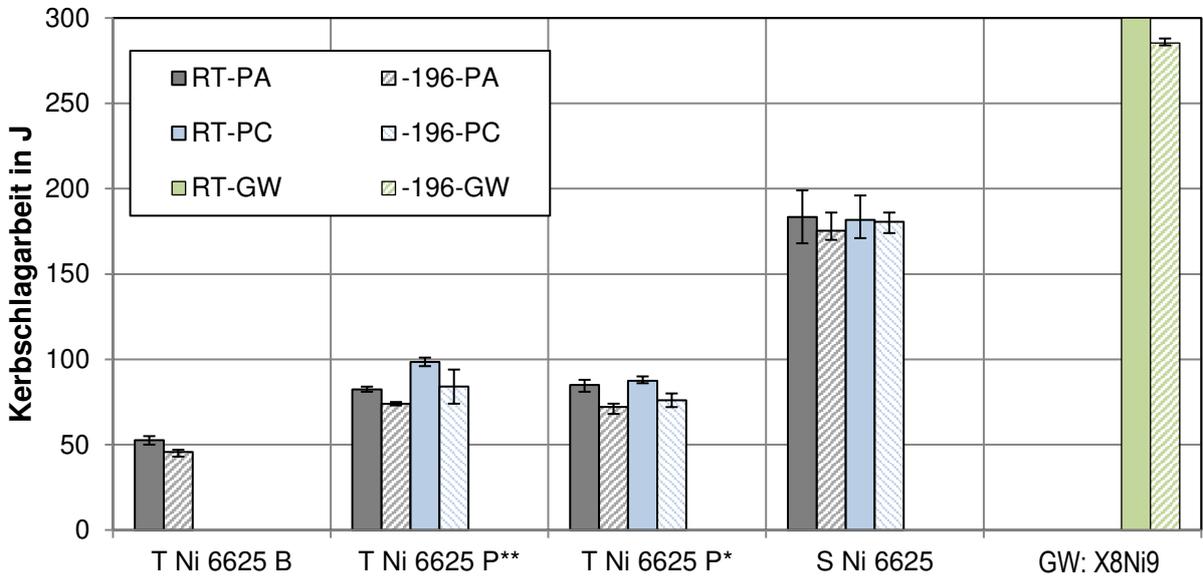


Bild 54: Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche an den MSG-Schweißnähten an den 17 mm dicken Blechen aus dem kaltzähem X8Ni9 bei Einsatz der Füll- und Massivdrahtelektroden vom Typ Ni 6625

8.7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In Abhängigkeit der eingesetzten Schweißzusätze und der Schutzgase war im Rahmen des AP 8 die Wirtschaftlichkeit auf Basis eines Kostenvergleichs zu bewerten. Eine Betrachtung des Erlöses fand nicht statt. In Abstimmung mit dem PA sollen hierzu insbesondere die ermittelten Abschmelzleistungen und die Ausbringungsmengen herangezogen werden.

Die Abschmelzleistung in kg/h ergibt sich aus dem Produkt des spezifischen Gewichtes des Gesamdrahtes in g/m und der gewählten Drahtvorschubgeschwindigkeit in m/min. Bei den Fülldrahtelektroden leitet ausschließlich die metallische Hülle den Strom. Bedingt durch den geringere Querschnittsfläche des Stromleiters resultiert bei gleichem Drahtvorschub eine höhere Stromdichte, die das Abschmelzen der Fülldrahtelektrode erleichtert und so zu einer höheren Abschmelzleistung der Fülldrahtelektroden führt. In der folgenden Abbildung sind die erzielten Abschmelzleistungen verschiedener Füll- und Massivdrahtelektroden in Abhängigkeit des Schweißstromes aufgeführt.

Im Bild 55 ist zu erkennen, dass im empfohlenen Parameterbereich für den basischen Fülldraht (130-250 A) die erzielten Abschmelzleistungen in einem Bereich von ca. 3-8 kg/h liegen. Außerdem ist mit zunehmendem Drahtvorschub und Schweißstrom erwartungsgemäß eine größere Abschmelzleistung zu erkennen. Dem gegenüber steht allerdings eine um ca. 10 % verringerte Ausbringungsmenge der Fülldrahtelektroden im Vergleich zu den Massivdrahtelektroden, vgl. Kapitel 6.1.2. Auf eine Betrachtung der Schweißhaupt- und -nebenzeiten wurde verzichtet.

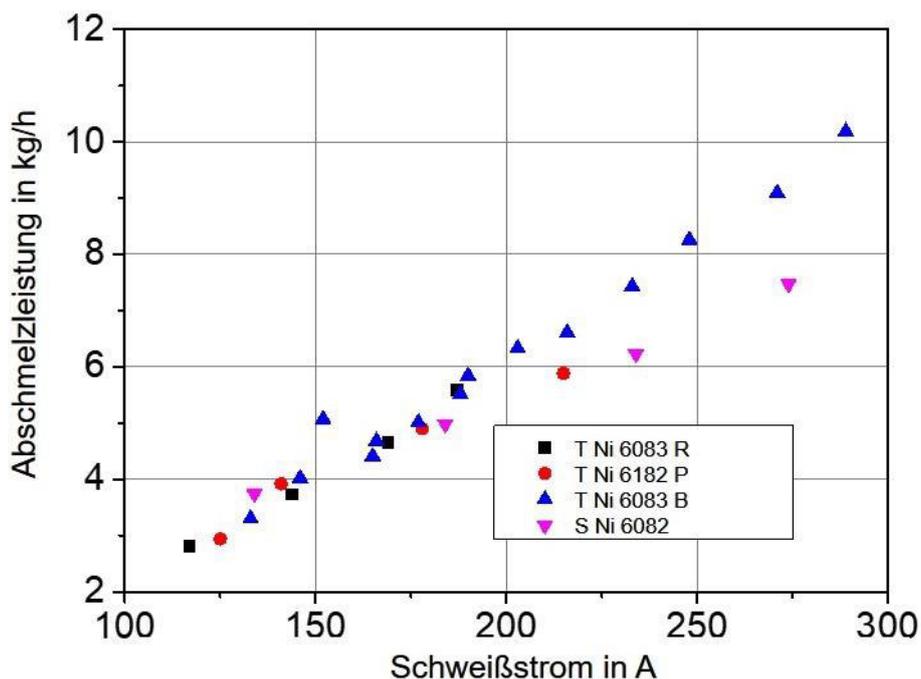


Bild 55: Ermittelte Abschmelzleistungen am Beispiel von Füll- und Massivdrahtelektroden vom Typ Ni 6182, Ni 6082 und Ni 6083

9 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des ursprünglichen Forschungsantrages und Schlussfolgerungen aus den Forschungsergebnissen

Das Ziel des Forschungsvorhabens bestand primär in der Ermittlung des Anwendungspotentials basischer Ni-Basis Fülldrahtelektroden zum wirtschaftlichen MAG-Auftrag- und Verbindungsschweißen von Ni-Basis-Legierungen. In diesem Zusammenhang zielte das Vorhaben insbesondere auf die Erforschung des Einflusses der basischen Schlackencharakteristik auf die Verarbeitungseigenschaften, wie dem sinnvoll nutzbaren Parameterbereich, die erreichbare Abschmelzleistungen, der Tropfenübergang und die Schlackeausbildung, sowie die Bestimmung der erreichbaren Schweißnahtgüte beim MAG-Lichtbogenschweißen. Darüber hinaus sollten die Auswirkungen der basischen Elemente im Schweißzusatz auf die schweißmetallurgischen Vorgänge im Schweißbad erforscht werden. Ein Schwerpunkt lag dabei auf der Untersuchung des Einflusses der basischen Schlackencharakteristik auf die Heißrissneigung von Ni-Basis-Schweißgütern.

Als Versuchswerkstoffe wurden die voll-austenitischen Ni-Basis-Legierungen alloy 625 (2.4856), alloy C-276 (2.4819), die voll-austenitische hochwarmfeste Fe-Basislegierung alloy 800 H (1.4958) und der kaltzähe Stahl X8Ni9 (1.5662) im Blechdickenbereich von 5 mm bis 17 mm herangezogen. Als Untersuchungsgegenstände kamen Ni-Basis-Fülldrahtelektroden mit basischer und rutiler Schlackencharakteristik sowie Massivdrahtelektroden zum Einsatz, die im Rahmen vergleichender Betrachtung gegenübergestellt wurden.

Im Einzelnen ergaben sich die nachfolgend dargestellten wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Ergebnisse:

Im Zuge der grundlegenden Charakterisierung der Schweißzusätze konnte ermittelt werden, dass alle untersuchten Fülldrahtelektroden formgeschlossen sind und sich herstellerbedingt lediglich in der Überlappungslänge des Mantels unterscheiden. Auf Basis der Verhältnisse der Masse der pulverförmigen Füllung zur Gesamtmasse der Fülldrahtelektroden wurden für die verwendeten Fülldrahtelektroden Füllgrade zwischen 18 % und 25 % bestimmt. Sie weisen somit nach Merkblatt DVS 0941-1:2004 [76] einen mittleren Füllgrad auf. Die Ausbringungsmenge, die von wirtschaftlichem Interesse ist, liegt bei allen Fülldrahtelektroden bei 90 ± 4 %. Signifikante Unterschiede waren nicht zu verzeichnen. Bei den Mänteln verfolgen die Hersteller der Ni-Basis Fülldrahtelektroden unterschiedliche Strategien. Entweder sind sie artgleich oder artähnlich zum Legierungstyp. Entsprechend angepasst sind die pulverförmigen Füllungen, die ein Multikomponentensystem aus Legierungselementen und Schlackenbildnern darstellen. Im Ergebnis der REM-EDX-Analysen waren neben typischen basischen (CaF_2) und rutilen (TiO_2) Bestandteilen auch weitere Schlackenbildner aus den Oxiden von Ca und Mg sowie Mn, Al, Si und K zu finden. Des Weiteren zeigten sich bei verschiedenen Fülldrahtelektroden Spuren von Zr in der Schlacke, das vermutlich als Desoxidationsmittel hinzugefügt und anschließend „verschlackt“ worden ist.

Auf Basis von Auftragschweißungen wurden im Rahmen der Technologieoptimierung die Verarbeitungseigenschaften der Füll- und Massivdrahtelektroden untersucht. Allgemein stellte sich heraus, dass bei den eingestellten Schweißparametern keine bzw. nur vereinzelt Kurzschlüsse auftraten. Trotz des zum Teil jedoch unruhigen und groben Werkstoffübergangs lag bei den Fülldrahtelektroden dennoch jeweils ein Sprühlichtbogen vor. Die Auswertung der Schweißstrom- und -Spannungs-Zeit-Verläufe ergab, dass legierungsunabhängig ein etwas instabilerer Lichtbogen bei den basischen als bei den vergleichbaren rutilen Fülldrahtelektroden vorlag. Bei dem übergreifenden Vergleich der verschiedenen

Legierungstypen war festzustellen, dass der Lichtbogen der Fülldrahtelektrode vom Typ T Ni 6276 P am instabilsten brannte, was sich auf die Nahtgeometrie ungünstig auswirkte. So traten trotz umfangreicher Parametervariation sehr ungleichmäßige Schweißraupen mit Bindefehlern auf. Auch die Auftragraupe der basischen Fülldrahtelektrode T Ni 6625 B wies einen vergleichswisen instabilen Lichtbogen und infolge dessen viele Nahtunregelmäßigkeiten auf.

Bei allen Fülldrahtelektroden traten festanhaftende Schlackenbestandteile auf, die mittels Schlackenhammer und Drahtbürste nicht entfernt werden konnten. Dies hat zur Folge, dass sich die Nebenzeiten deutlich erhöhen. Entweder lagerte sich die Schlacke fest anhaftend nur im Randbereich ab, was eine vereinfachte Nachbearbeitung durch Schleifen bedeutete, oder großflächig auf der Nahtraupe, was einen deutlich höheren Schleifaufwand nach sich zog. Lediglich bei den Auftragschweißungen mit den rutilen Fülldrahtelektroden vom Typ Ni 6082 R und T Ni 6083 R löste sich ein Großteil der Schlacke selbstabhebend.

Bezüglich der Heißrissneigung der verschiedenen Zusatzwerkstoffe stellte sich auf Basis der fremdbeanspruchten Heißrissprüfung mit dem PVR-Test heraus, dass die basischen Fülldrahtelektroden, entgegen der ursprünglichen Vermutung, eine größere Neigung zum Auftreten von Heißrissen zeigen. Die Gründe hierfür konnten im Rahmen der Projektlaufzeit noch nicht abschließend geklärt werden. Es wird jedoch ein negativer Einfluss der vergleichsweise hohen Schwefelgehalte in den basischen Fülldrahtelektroden vermutet. Die Schweißgüter der Massivdrahtelektroden zeigen unabhängig vom Legierungstyp die höchste Heißrissbeständigkeit. Die WIG-Umschmelzungen der PVR-Proben aus den reinen Schweißgutproben aller Schweißzusätze ließen hingegen innerhalb der Fülldrahtelektroden keine großen Unterschiede mehr erkennen. Lediglich die Schweißgüter der Massivdrahtelektroden zeigten erneut die höchsten Heißrissbeständigkeiten.

Im Hinblick auf die schweißmetallurgischen Vorgänge beim MSG-Schweißen mit Fülldrahtelektroden konnte aufgezeigt werden, dass unabhängig vom verwendeten Schweißzusatz- und -hilfsstoff keine signifikanten Zu- und Abbrände an Legierungselementen auftreten. Die basischen Fülldrahtelektroden weisen im reinen Schweißgut tendenziell höhere Schwefelgehalte auf, was den Schluss zulässt, dass die desoxidierende Wirkung der basischen Schlacke anscheinend nicht ausreichend ist, da das heißrissfördernde Schwefel durch eine Reaktion mit den basischen Schlackebestandteilen (z. B. MnO) aus der Schmelze entfernt (verschlackt) werden soll.

Die praktische Erprobung der Ni-Basis-Füll- und -Massivdrahtelektroden erfolgte anhand von praxisrelevanten Plattierungen und Verbindungsschweißungen in Wannelage und auch in verschiedenen Zwangspositionen. Die Ergebnisse der mechanisch-technologischen Untersuchungen verdeutlichen, dass der Schlackentyp keinen Einfluss auf die ermittelten Streckgrenzen und Zugfestigkeiten sowie auf die Kerbschlagarbeit bei Raum- und tiefer Temperatur (-196 °C) ausübt. Lediglich die Schweißgüter der Massivdrahtelektroden verfügen über deutlich höhere Kerbschlagarbeitswerte, vermutlich aufgrund der signifikant geringeren Sauerstoffanteile.

Fasst man die Ergebnisse zusammen, so spricht für den Einsatz von Ni-Basis-Fülldrahtelektroden der Einsatz von Standard-Schweißstromquellen und Standard Ar-CO₂-Mischgase, das deutlich bessere Handling beim teilmechanisierten Schweißen sowie die Zwangspositionsschweißneigung (für rutil FDE). Dagegen sprechen jedoch die deutlich höheren Anschaffungs- und Verarbeitungskosten sowie die höhere Heißrissneigung.

Durch den teilweise sehr schlechten Schlackenabgang erhöhen sich die Nebenzeiten drastisch und auch die aus dem Schleifen resultierenden zusätzlichen Anforderungen an den Arbeitsschutz müssen Beachtung finden.

Die dargestellten Ergebnisse des Vorhabens finden u. a. Eingang bei den Zusatzwerkstoffherstellern in die Weiterentwicklung von schlackeführenden Fülldrahtelektroden für Ni-Basis-Legierungen. Insbesondere die Eignung rutiler FDE für Zwangspositionen eröffnet den KMU potentielle Anwendungen beim Herstellen von LNG-Tanks. Für KMU im Bereich der chemischen und petrochemischen Industrie entsteht ein direkter wirtschaftlicher Vorteil, da die Forschungsergebnisse bei der Auswahl und Festlegung von Schweißzusätzen und Technologien in der Druckbehälter- und Apparatefertigung aus vollaustenitischen Ni- und Fe-Basis-Legierungen unmittelbar nutzbar sind. Die Ergebnisse tragen dazu bei, die Schweißsicherheit bei gleichzeitiger Reduzierung der Fertigungszeit zu erhöhen.

Das Forschungsvorhaben kann als erfolgreich bearbeitet eingeschätzt werden. Die Projektziele wurden erreicht.

10 Erläuterungen zur Verwendung der Zuwendungen

Bedingt durch die verzögerte Bereitstellung von einzelnen Zusatzwerkstoffen durch die PA-Mitglieder und die späte Bestellung/Lieferung der notwendigen Grundwerkstoffe (die vom PA nicht wie ursprünglich geplant beigestellt werden konnten) resultieren zeitliche Verschiebungen schon zu Projektbeginn. Zudem ergab sich ein signifikant erhöhter Probenanfertigungs- und teils auch Prüfaufwand in fast allen Arbeitspunkten bedingt durch den teils sehr schlechten Schlackenabgang ausgewählter FDE. Das Ausmaß der notwendigen Schleifarbeiten war bei der Projektplanung nicht bekannt gewesen.

Einem Antrag auf kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um 6 Monate wurde daher stattgegeben.

Weiterhin ergab sich während des Projektverlaufs, dass der Aufwand für die experimentellen Untersuchungen durch das wissenschaftliche Personal deutlich höher als geplant war. Der o. g. schlechte Schlackenabgang hat zur Folge, dass sich u. a. die Fertigungszeit bei der Herstellung der Buttons, der reinen Schweißgutproben, der Verbindungs- und Auftragschweißungen sowie der Heißrissprüfproben signifikant erhöht hat (z. T. um den Faktor 5). Gleiches galt für die Prüfung der Schweißungen.

Daher wurde das Personal der Einzelansätze A1 und A2 wie folgt eingesetzt.

Einzelansätze	Anzahl der Personenmonate
A1 Wiss.-technisches Personal	28
A2 Übriges Fachpersonal	7

Während der Projektlaufzeit wurden antragsgemäß keine Geräte (Einzelansatz B des FP) angeschafft und keine Leistungen Dritter (Einzelansatz C des FP) erbracht.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag. Alle durchgeführten Arbeiten erfolgten zielgerichtet. Das eingesetzte wissenschaftlich-technische Personal war für die Auswahl und

Koordinierung sowie zur Bearbeitung der durchzuführenden Aufgaben notwendig und vom Zeitumfang her angemessen.

Es wurden keine gewerblichen Schutzrechte erworben oder angemeldet. Dies ist auch zukünftig nicht geplant.

Für die experimentellen Untersuchungen wurde das durch die PA-Mitglieder zur Verfügung gestellte Versuchsmaterial in Form von Schweißzusätzen und Grundwerkstoffen verwendet sowie ausgewählte Prüfleistungen genutzt.

11 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen

Eine Nutzung der Forschungsergebnisse ist voraussichtlich in den Fachgebieten Werkstoffe, Materialien und Produktion zu erwarten. Von den Ergebnissen profitieren alle Hersteller und Verarbeiter von Ni-Basiswerkstoffen aus den Bereichen der Chemie-, Energie- und Umwelttechnik und dem Kraftwerksbau. In diesen Bereichen gibt es eine Vielzahl klein- und mittelständischer Unternehmen, die als Apparate- und Anlagenhersteller (Produktentwicklung) und als Dienstleister (Reparaturschweißungen) Schweißarbeiten an hochkorrosionsbeständigen und hochwarmfesten Ni-Basiswerkstoffen durchführen. Die Erkenntnisse des Forschungsprojektes stehen den Unternehmen unmittelbar nach Abschluss des Forschungsprojektes zur Verfügung und könnten z. B. bei der Fertigung von LNG-Tanks eingebracht werden.

Im Rahmen des Projektes konnte aufgezeigt werden, dass sich durch den Einsatz von den gegenwärtig verfügbaren basischen Ni-Basis Fülldrahtelektroden keine wesentlichen Produktivitätssteigerungen und technologische Vorteile im Vergleich zu den rutilen Fülldrahtelektroden ergeben.

Insgesamt tragen die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens dazu bei, gegebene Fertigungsaufgaben in einer Lohnfertigung von klein- und mittelständischen Unternehmen gleichzeitig in der geforderten Qualität und mit hoher Produktivität und Fertigungssicherheit abzuwickeln.

12 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Bisherige Transfermaßnahmen:

Maßnahme	(Anzahl)	Rahmen	Datum/Zeitraum
Vorträge auf Konferenzen (2)		72nd IIW Annual Assembly & International Conference (Bratislava)	08.07.2019
		DVS Congress 2019 (Rostock)	17.09.2019
Vorträge in Gremien und Veranstaltungen des DVS (3)		Arbeitskreises der Schweißfachingenieure des DVS BV Magdeburg	05.09.2018
		Sitzung der AfT-DVS-Arbeitsgruppe V 2.7 „Schweißen mit Fülldraht“	09.05.2017
			07.11.2017
			13.06.2018
			29.11.2018
Sitzungen des FA 1 „Schweißmetallurgie und Werkstoffverhalten“	22.03.2017		
	19.10.2017		
	26.09.2018		
Veröffentlichung der Ergebnisse	Vorträge in Gremien des IIW (1)	Intermediate meeting of Commission II-A (Miami)	14.03.2019
		Online-Veröffentlichungen (3)	Einstellung der Projektkurzfassung und Ansprechpartner in das Forschungsportal Sachsen-Anhalt (http://www.forschung-sachsen-anhalt.de)
Forschungsberichte des IWF (http://www.iwf.ovgu.de)	01.05.2017		
	01.05.2018		
Ergebnistransfer in die Industrie (2)		Projektgespräche mit den PA-Mitgliedern an der Forschungsstelle	06.09.2017
			04.10.2017
Projektbegleitender Ausschuss	an der FE (6)	Darstellung und Diskussion von aktuellen Ergebnissen und Abgleich mit den Anforderungen der Industrie	31.01.2017
			13.09.2017
			07.11.2017
			23.05.2018
			05.09.2018
			25.04.2019
			07.11.2017
in AfT-DVS-Arbeitsgruppe V 2.7 „Schweißen mit Fülldraht“ (3)		im Rahmen der FA 1 Sitzung in Aachen (1)	13.06.2018
			29.11.2018
			27.02.2018
Ergebnistransfer in die akademische Ausbildung	Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses (7)	3 Masterarbeiten 2 Bachelorarbeiten 2 Masterprojekte	Während der Projektlaufzeit

Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende:

Maßnahme	(Anzahl)	Rahmen	Datum/Zeitraum	
Veröffentlichung der Ergebnisse	Vorträge auf Konferenzen (2)	Workshop on Cracking Phenomena in welds	2021	
		73rd IIW Annual Assembly & International Conference (Singapore)	19-24.7.2020	
	Beiträge in Fachzeitschriften (2)	Schweißen und Schneiden	Januar 2020	
		Welding in the World	April 2020	
	Vorträge in Gremien und Veranstaltungen des DVS (1)	Sitzungen des FA 1 „Schweißmetallurgie und Werkstoffverhalten“	24.10.2019	
		Abschlussbericht auf den Internetseiten des DVS (www.dvs-forschungsvereinigung.de)	Oktober 2019	
		Online-Veröffentlichung (3)	Forschungsbericht des IWF (http://www.iwf.ovgu.de)	2020
	Projektkurzfassung, Publikation und Ansprechpartner im Forschungsportal Sachsen-Anhalt (http://www.forschung-sachsen-anhalt.de)		fortlaufend (bis 2025)	
	Ergebnistransfer in die akademische Ausbildung	Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses (2)	Dissertation	Januar 2021
			Lehrveranstaltungen (Seminare, Vorlesungen und Demonstrationspraktika) an der Universität Magdeburg	kontinuierlich fortlaufend
Übernahme der Ergebnisse in Arbeitsblätter / Technische Regelwerke / Normen	Erstellung von DVS-Merkblättern und -Richtlinien in der AfT-DVS-Arbeitsgruppe V 2.7 „Schweißen mit Fülldraht“ (1)	Konzept für ein neues DVS Merkblatt 0941-4: Fülldrahtelektroden für das Metall-Lichtbogenschweißen von Ni-Basiswerkstoffen	12.11.2019 laufend	

13 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Im fortgeschriebenen Plan zum Ergebnistransfer werden verschiedene bisherige und geplante Maßnahmen dargestellt.

Eine weite Verbreitung der Forschungsergebnisse an KMU ist über die schon getätigten bzw. noch beabsichtigten Konferenzvorträge, Fachbeiträge in Zeitschriften und Tagungsbände sowie die Einbindung in die akademische Ausbildung an der Universität gegeben.

Die Firmen des PA (sowohl KMU als auch Großunternehmen) und die Schweißfachingenieure regionaler Unternehmen profitierten von den Forschungsergebnissen schon während der Projektlaufzeit für entsprechende Schweißanweisungen. Als ein exemplarisches Beispiel wird die Stellungnahme von Herrn Dipl.-Ing. Andreas Förster von der Firma BORSIG Process Heat Exchanger GmbH, Berlin zitiert:

„Über die Mitarbeit in diesem Projekt haben wir viele neue Erkenntnisse über das Einsatzpotential basischer Fülldrahtelektroden zum Herstellen von Schweißverbindungen an hochwarmfesten Ni-Basis- bzw. Fe-Basislegierungen, z.B. Alloy 800 H, für unsere gasseitigen Einbauten gewinnen können. Für uns als Anwender von Fülldrahtelektroden bei der Fertigung von Druckbehältern für die Petrochemie sind die Ergebnisse zum Handling, zum Schlackenabgang und zu den mechanisch-technologischen Eigenschaften der basischen Fülldrähte, die vergleichend zu rutilen Fülldrahtelektroden und Massivdrahtelektroden betrachtet wurden, sehr hilfreich. Es entsteht ein direkter wirtschaftlicher Vorteil, da die Ergebnisse bei der Auswahl und Festlegung von Schweißzusätzen in der Behälter- und Apparatefertigung unmittelbar nutzbar sind. Die Schweißsicherheit bei unseren Einbauten konnte durch die Verwendung rutiler Fülldrähte erhöht werden, bei gleichzeitiger Reduzierung der Fertigungszeit.“

Weitere Aktivitäten lassen sich für die Schweißzusatzwerkstoffhersteller und Berater im PA ableiten. Hier sind die Firmen ESAB Welding Cutting GmbH, voestalpine Böhler Welding und Welding Alloys Deutschland GmbH sowie die CiF GmbH und die Dr. Rosert RCT GmbH zu nennen. Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Projekt finden Eingang in der Weiterentwicklung von schlackenführenden Fülldrahtelektroden im Sinne einer höheren Verarbeitungssicherheit.

Auch die Online-Veröffentlichungen lassen erwarten, dass sich weitere KMU bei der FST melden, um Forschungsergebnisse abzurufen und in die Praxis zu überführen.

Eine Übernahme der Ergebnisse in Arbeitsblätter / Technische Regelwerke / Normen soll durch die Erarbeitung eines Entwurfs eines vierten Teils für das DVS Merkblatt 0941 mit dem Titel „Fülldrahtelektroden für das Metall-Lichtbogenschweißen von Ni-Basiswerkstoffen“ erfolgen. Hieraus resultiert dann eine weite Verbreitung in der Industrie. Dafür arbeitet der wissenschaftliche Mitarbeiter M. Sc. Stefan Burger weiterhin in der AfT-DVS-Arbeitsgruppe V 2.7 „Schweißen mit Fülldraht“ aktiv mit. Die mitarbeitenden Firmen in dieser AfT-DVS-Arbeitsgruppe V 2.7 wurden regelmäßig über den Projektfortschritt informiert.

Des Weiteren führt der wissenschaftliche Mitarbeiter weiterführende Untersuchungen mit den FDE vom Typ Ni 6625 für die Firma voestalpine Böhler Welding im Rahmen seiner Promotion durch. Dieser Schweißzusatz erweist sich von besonderem Interesse für die Herstellung von Tanks und Anlagen im LNG-Bereich.

Die vorgeschlagenen und aktualisierten Transfermaßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und insbesondere zu kleinen und mittleren Unternehmen sind in sich schlüssig, so dass von einer erfolgreichen Realisierung der noch geplanten Maßnahmen ausgegangen wird.

14 Literatur

- [1] DIN EN ISO 12153 (2012): Schweißzusätze - Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Gasschutz von Nickel und Nickellegierungen
- [2] Kersche, A.: Schutzgasauswahl beim MAG-Schweißen von Stählen. In: Buchmayr, B. (Hrsg.): Moderne Trends beim MAG-Schweißen. Tagungsband zur 7. Werkstofftagung, TU Graz am 26.4.2001. Graz, 2001, S. 65–76.
- [3] Heubner, U.; Klöwer, J.; Alves, H.: Nickelwerkstoffe und hochlegierte Sonderedeltähle. Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendungen, 5. Auflage. Renningen, 2012.
- [4] Heinemann, J.: Neue Generation von NickelBasisFülldrähten. Schweißtechnik / Soudure (2010), 07, S. 22-25.
- [5] Sommitsch, C.; Posch, G.; Weinberger, T., et al.: Neue Fügetechniken mit höherer Prozesssicherheit. In: BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 155 (2010) 5, S. 219–26.
- [6] Posch, G.; Baumgartner, S.; Fiedler, M.: GMA-Welding of creep resistant steels with flux cored wires (FCAW): perspectives and limitations. In: Sun, Z. (Hrsg.): Proceedings of the IIW International Conference on Advances in Welding and Allied Technologies. 2009 Intern. Conference Advances in Welding and Allied Technologies; Singapore, Grand Copthorne Waterfront Hotel, 16. - 17. July 2009. Singapore, 2009, S. 619–24.
- [7] Perteneder, E.; Dörfler, R.; Posch, G., et al.: MAG-Schweißen unlegierter und hochlegierter Stähle mit Fülldrahtelektroden, dargestellt aus der Sicht eines Schweißzusatzherstellers. In: Schweiß- & Prüftechnik 55 (2001) 9, S. 130–35.
- [8] Newell, W. F., JR.: Flux cored wires for high integrity applications, Adv. Mater. Technol. Foss. Power Plants - Proc. Int. Conf. In: Gandy, D. (Hrsg.): Advances in materials technology for fossil power plants. Proceedings from the sixth international conference ; August 31 - September 3, 2010, Santa Fe, New Mexiko, USA. Materials Park, Ohio, 2011, S. 1030–44.
- [9] DVS-Tagung, A. 6.: Schweißen im Anlagen- und Behälterbau - Aktueller Wissensstand und Erfahrungsaustausch von Praktikern. In: Schweißen und Schneiden 53 (2001) 8, S. 510–20.
- [10] Bouquin, B.; Penning, O.; Bonnel, J.-M.: Herstellung von korrosionsbeständigen Plattierungen durch Auftragschweißen mit Fülldrahtelektroden: DVS Congress 2010. Große Schweißtechnische Tagung - Studentenkongress - Statusseminar "Schneidtechnik" - Abschlusskolloquium zum AiF-Forschungscluster "Integration des Rührschweißens in Fertigungsprozessketten; Vorträge der Veranstaltung in Nürnberg am 27. und 28. September 2010. Düsseldorf, 2010, S. 23–29.
- [11] Draugelates, U.; Bouaifi, B.; Bonnel, J.-M., et al.: Qualifizierung von Ni-Basis-Fülldrahtelektroden mit basischer Schlacke für den MSG-Schweißprozeß: Schweißen und Schneiden 2005. Vorträge der gleichnamigen Großen Schweißtechnischen Tagung in Essen vom 12. bis 14. September 2005. Düsseldorf, 2005, S. 81–84.
- [12] Holmberg, B.; Thür, J.: Fülldrahtschweißung rost- und säurebeständiger Stähle in der Praxis. Produkt und Schweißguteigenschaften. In: Schweiß- & Prüftechnik (1997) 11, S. 162–66.
- [13] Penning, O.; Mühlbauer, H.; Bonnel, J.-M.: Basische Fülldrähte für Edelstahl und Nickel-Basis-Legierungen - Das fehlende Bindeglied: Die Verbindungs Spezialisten 2008. Große Schweißtechnische Tagung, BMBF-Forschungsförderung "Fügen im Produktlebenszyklus", Studentenkongress; Vorträge und Posterbeiträge der Veranstaltung in Dresden vom 17. bis 19. September 2008. Düsseldorf, 2008, S. 291–98.

- [14] DIN EN ISO 5817 (2014-06): Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten
- [15] Rosert, R.: Schweißen mit Fülldraht - Entwicklung und Perspektiven in der Anwendung. In: Matthes, K.-J.; Riedel, F. (Hrsg.): Tagungsband zum 6. Chemnitzer Symposium Fügetechnik/Schweißtechnik. Konstruktion Fertigung Montage Prüfung/Bewertung Schadenanalyse, 2004, S. 19–28.
- [16] Engindeniz, E.: MAG-Schweißen mit Fülldrahtelektroden. Technologie, Wirtschaftlichkeit, Applikationsbeispiele. In: Schweißtechnik (1996) 4, S. 51–55.
- [17] Aichele, G.: Auf die Füllung kommt es an. MAG-Schweißen - mit Massivdraht- oder Fülldrahtelektroden? In: Industriebedarf (2006) 6, S. 22–24.
- [18] Tessin, F.: Gasgeschützte Fülldrahtelektroden für allgemeine Baustähle - Normung und Auswahl: Jahrbuch Schweißtechnik 2000. Düsseldorf, 1999, S. 79–91.
- [19] Schweißelektroden-Vereinigung e. V (2012).
- [20] Herold, H.; Zinke, M.: Entwicklungstendenzen bei korrosionsbeständigen hochwarmfesten Werkstoffen und ihre schweißtechnische Verarbeitung. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 30 (1999) 11, S. 678–81.
- [21] Yushchenko, K. A.; Savchenko, S.: Welding of high-nickel alloys: High Productivity Joining Processes, Volume II. 7th International Aachen Welding Conference 2001, 2001, S. 677–88.
- [22] DIN EN ISO 17641-1 (2004): Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Heißrissprüfungen für Schweißungen - Lichtbogenschweißprozesse, Teil 1: Allgemeines
- [23] Matting, A.; Neitzel, M.: Das Bewerten von Schweißfehlern im Dauerschwingversuch. In: Schweißen und Schneiden 18 (1966) 3, S. 113–24.
- [24] Thomas, R.: HAZ-cracking in thick sections of austenitic stainless steels - part II. In: Welding Journal, New York 63 (1984) 12, S. 355s-368s.
- [25] Gollnow C, Kannengiesser T, Consideration of welding specific component design and resulting loads on solidification crack initiation, in: Hot Cracking Phenomena in Welds IV, EDX.: Lippold J, Böllinghaus T, Cross CE, Springer Berlin 2015
- [26] Schuster, J.: Heißrisse in Schweißverbindungen - Entstehung, Nachweis und Vermeidung, Habil.-Schr. TU Chemnitz, 2004. Düsseldorf.
- [27] Lippold, J. C.; Baeslack, W. A. I.; Varol, I.: Heat-Affected Zone Liquation Cracking in Austenitic and Duplex Stainless Steels. In: Welding Journal, Welding Research Supplement 71 (1992) 1, S. 1s-14s.
- [28] Schuster, J.: Grundlegende Betrachtung zur Entstehung von Heißrissen. In: Schweißen und Schneiden 50 (1998) 10, S. 646–54.
- [29] Tösch, J.; Schabereiter, H.; Perteneder, E., et al.: Bedeutung und praktische Beeinflussbarkeit des Ferritgehaltes bei der Schweißung austenitischer Stähle. In: Schweiss- & Prüftechnik (1997) 2, S. 18–26.
- [30] Krafka, H.: Risse in Schweißverbindungen: Heißrissarten, Heißrissentstehung und Heißrissprüfung. In: Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung (Hrsg.): Festigkeits- und Bruchverhalten von Fügeverbindungen, 2000, S. 161–71.
- [31] Shankar, V.; Gill, T.; Mannan, S., et al.: Solidification cracking in austenitic stainless steel welds. In: Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences 28 (2003) 3-4, S. 359–82.
- [32] Herold, H.; Neubert, G.; Zinke, M.: Werkstoffverhalten von neuen korrosionsbeständigen Stählen und Nickellegierungen beim Schweißen: Schweißen und Schneiden '96. Vorträge der gleichnamigen Großen Schweißtechnischen Tagung in Hannover vom 11. bis 13. September 1996. Düsseldorf, 1996, S. 153–58.

- [33] Geipl, H.: Neue Entwicklungen beim Metall-Schutzgasschweißen von Ni-Werkstoffen: Schweißen und Schneiden '95. Vorträge der gleichnamigen Großen Schweißtechnischen Tagung in Dresden vom 13.-15. September 1995. Düsseldorf, 1995, S. 239–45.
- [34] Rudolph, G.; Hoffmann, T.: Verbesserung der Schweißtechnik und Schweißbeignung von Nickellegierungen. Teil 1: Kenntnisstand und Schweißverfahren. In: Metall 41 (1987) 10, S. 988–97.
- [35] Bürgel, R.; Maier, H. J.; Niendorf, T.: Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik. Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden (2011).
- [36] Prokhorov, N.; Jakuschin, B.; Prokhorov, N. N.: Theorie und Verfahren zum Bestimmen der technologischen Festigkeit von Metallen während des Kristallisationsprozesses beim Schweißen. In: Schweißtechnik 18 (1968) 1, S. 8–11.
- [37] Rudolph, G.: Der Einfluss der Streckenenergie auf Gefügeeigenschaften von Nicrofer 6020 hMo- und Nicrofer 3127 LC E-Hand-Verbindungsschweißungen. In: Dieser, K. (Hrsg.): Metallographie - Präparationstechnik und Gefügeanalyse an Schweiß- und Lötverbindungen, Korrosions- und Verschleißschutzschichten. Berichte der Metallographie-Tagung Trier, 9. bis 11. Oktober 1985. Stuttgart, 1986, S. 41–54.
- [38] Wilson, I.; Gourley, R.; Walkosak, R., et al.: The effect of heat input on microstructure and cracking in alloy 625 weld overlays. In: Loria, E. A. (Hrsg.): Superalloys 718, 625 and various derivatives. Proceedings of the International Symposium on the Metallurgy and Applications of Superalloys 718, 625 and Various Derivatives; held June 23 - 26, 1991. Warrendale, Pa, 1991, S. 735–45.
- [39] Naffakh, H.; Shamanian, M.; Ashrafizadeh, F.: Weldability in dissimilar welds between Type 310 austenitic stainless steel and Alloy 657. In: Journal of Materials Science 43 (2008) 15, S. 5300–04.
- [40] Schlussbericht: Schweißmetallurgische Untersuchungen zum wärmereduzierten MAG-Verbindungsschweißen heißrisseempfindlicher Ni-Basis-Legierungen. IGF-Forschungsvorhaben 16.316BR (2012).
- [41] Schlussbericht: Verbesserung der Schweißbeignung von Ni-Basis-Schleuder- und Sandformguss. IGF-Forschungsvorhaben 17.403B (2014).
- [42] Kersche, A.: Schutzgasauswahl beim MAG-Schweißen von Stählen. In: Buchmayr, B. (Hrsg.): Moderne Trends beim MAG-Schweißen. Tagungsband zur 7. Werkstofftagung, TU Graz am 26.4.2001. Graz, 2001, S. 65–76.
- [43] DIN EN ISO 12153 [2012-07: Schweißzusätze - Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Gasschutz von Nickel und Nickellegierungen - Einteilung.
- [44] Bouquin, B.; Bonnel, J.-M.; Pease, N. C., et al.: Use of modern nickel-base flux-cored wires in apparatus manufacturing: Die Verbindungs-Spezialisten 2009. Große Schweißtechnische Tagung; Forschungsforum, IndustrieForum, Studentenkongress, Handwerkerforum; Vorträge der Veranstaltung in Essen vom 14. bis 19. September 2009. Düsseldorf, 2009, S. 264–68.
- [45] Vallant, R.: Optimierung von Schlackensystemen für Nickelbasis-Fülldrähte. In: Cerjak, H. H. (Hrsg.): Modellbildung und Simulation in der Werkstoff-, Schweiß- und Umformtechnik. Tagungsband zur 8. Werkstofftagung, TU-Graz, am 29.4.2003. Graz, 2003, S. 131–44.
- [46] Jackson, C. E.: Fluxes and slags in welding. In: WRC Bulletin 190 (1973). New York, NY.
- [47] DVS-Merkblatt 0941-1 [2004-03: DVS 0941-1: Fülldrahtelektroden für das Verbindungs- und Auftragschweißen - Grundlagen und Begriffsbestimmung.
- [48] Vallant, R.; Fiedler, M.: Die Rolle der Schlacke beim MAG-Schweißen. In: Buchmayr, B. (Hrsg.): Moderne Trends beim MAG-Schweißen. Tagungsband zur 7. Werkstofftagung, TU Graz am 26.4.2001. Graz, 2001, S. 128–38.

- [49] Fiedler, M.; Posch, G.; Vallant, R., et al.: Potentiale von Nickelbasis-Fülldrahtelektroden. Leoben, 2007.
- [50] Schulze, G.: Die Metallurgie des Schweißens. Eisenwerkstoffe - Nichteisenmetallische Werkstoffe, 4. Auflage. Berlin, Heidelberg, 2010.
- [51] Böhler Welding: Böhler Nibas 70/20-FD. Fülldrahtelektrode, Nickelbasis, Werkstoffdatenblatt (2009).
- [52] Grimm, F.: Entwicklung von Nickelbasis-Doppelmantel-Elektroden für das Lichtbogenhandschweißen von Kraftwerkskomponenten aus Alloy 617 mod. und Alloy 263: 5. FDBR - Werkstofftagung. Fertigungstechnologien für neue Werkstoffe, 2012.
- [53] Guimaraens, E.; Wendland, H.; Schmitz-Niederau, M.: Entwicklung von Doppelmantel-Nickel-Basis-Elektroden (Legierungen A 617 und A 263) für das Lichtbogenhandschweißen von Kraftwerkskomponenten: DVS Congress 2012. Große Schweißtechnische Tagung - Studentenkongress, Vorträge der Veranstaltungen in Saarbrücken am 17. und 18. September 2012. Düsseldorf, 2012, S. 234–38.
- [54] van Bemst, A.: Contribution to the study of slag/metal reactions during the arc welding of nickel and copper base alloys. In: Bailey, N. (Hrsg.): Weld Pool Chemistry and metallurgy. An International Conference. Abington Cambridge, 1980, S. 259–69.
- [55] Bergmann, W.: Werkstofftechnik 2. Werkstoffherstellung, Werkstoffverarbeitung, Werkstoffanwendung, 4. Auflage. s.l, 2009.
- [56] Vallant, R.; Fiedler, M.; Buchmayr, B., et al.: Optimization of Slag Systems for Ni-Base FCAW Consumables. In: David, S. A. (Hrsg.): Trends in welding research. Proceedings of the 6th International Conference, Callaway Gardens Resort, Phoenix, Arizona, 15-19 April 2002. Materials Park, OH, 2003, S. 523–28.
- [57] Turkdogan, E.: Fundamentals of Steelmaking. LeEDX, 1996.
- [58] Tuliani, S. S.; Boniszewski, T.; Eaton, N. F.: Notch Toughness of commercial submerged arc weld metal. In: Welding and Metal Fabrication 37 (1969) 8, S. 32–39.
- [59] Baune, E.; Bonnet, C.; Liu, S.: Reconsidering the basicity of a FCAW consumable. Pt.1. Solidified slag composition of a FCAW consumable as a basicity indicator. Überlegungen zur Basizität einer Fülldrahtelektrode zum Lichtbogenschweißen. Teil 1. Zusammensetzung der erstarrten Schlacke einer Fülldrahtelektrode als Basizitätsindikator. In: Welding Journal, New York 79 (2000) 3, S. 57s.
- [60] DIN EN ISO 6847 (2013-11): Schweißzusätze - Auftragung von Schweißgut zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung
- [61] DIN EN ISO 15792-1 (2012-01): Schweißzusätze - Prüfverfahren - Teil 1: Prüfverfahren für Prüfstücke zur Entnahme von Schweißgutproben an Stahl, Nickel und Nickellegierungen
- [62] DVS 0973 (12/2015): Übersicht der Prozessregelvarianten des MSG Schweißens
- [63] DVS 0926-3 (2012-04): Prozessparameter und Gerätetechnik für das Impuls-Lichtbogenschweißen
- [64] Kersche, A.: Schutzgasauswahl beim MAG-Schweißen von Stählen. In: Buchmayr, B. (Hrsg.): Moderne Trends beim MAG-Schweißen. Tagungsband zur 7. Werkstofftagung, TU Graz am 26.4.2001. Graz, 2001, S. 65–76.
- [65] ThyssenKrupp VDM GmbH (2007): Nicrofer 6020hMo - alloy 625. Hochtemperatur- und korrosionsbeständige Legierung, Werkstoffdatenblatt Nr. 4118.
- [66] ThyssenKrupp VDM GmbH (2016): VDM®Alloy C-276 Nicrofer5716hMoW, Werkstoffdatenblatt Nr. 4115.
- [67] ThyssenKrupp VDM GmbH (2003): Nicrofer 3220H - alloy 800 H, Nicrofer 3220HP - alloy 800 HP. Werkstoffdatenblatt Nr. 4129, Korrosionsbeständige Legierungen.
- [68] Prokhorov, N.: The technological strength of metals while crystallizing during welding. In: Welding Production 9 (1962) 4, S. 1–8.

- [69] DIN EN ISO 3452-1 (2014-09): Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen
- [70] DIN EN 1435 (2002-09): Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Durchstrahlungsprüfung von Schmelzschweißverbindungen.
- [71] DIN EN ISO 6507-1 (2006-03): Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren.
- [72] DIN EN ISO 4136 (2011-05): Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Querzugversuch.
- [73] DIN EN ISO 5173 (2012-02): Zerstörende Prüfungen von Schweißnähten an metallischen Werkstoffen - Biegeprüfungen.
- [74] DIN EN ISO 9016 (2011-05): Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Kerbschlagbiegeversuch - Probenlage, Kerbrichtung und Beurteilung.
- [75] ASTM G48 - 11 (2015): Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution
- [76] DVS 0941-1 (2004-03): Fülldrahtelektroden für das Verbindungs- und Auftragschweißen
- [77] Gould, E. K. (2010): Development of Constitution Diagram for Dissimilar Metal Welds in Nickel Alloys and Carbon and Low-Alloy Steels, The Ohio State University
- [78] Hitachi High-Tech Analytical Science : "RFA Handgeräte - X-MET8000 Serie, unter: <https://hha.hitachi-hightech.com/de/product-range/products/rfa-libshandgeraete/handheld-xrf-analysers> (abgerufen am 01.08.2019)
- [79] DIN EN ISO 148-1 (2017-05): Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy - Teil 1: Prüfverfahren
- [80] DIN EN ISO 17637 (2017-04): Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Sichtprüfung von Schmelzschweißverbindungen
- [81] ASTM A265-12 (2019): Standard Specification for Nickel and Nickel-Base Alloy-Clad Steel Plate
- [82] Manzke, A. (2015): Neues vom Cladding - das Update, 9. Uhlig Symposium, Goslar.
- [83] VDTÜV-Merkblatt 1166: Merkblatt zur Durchführung und Prüfung von Auftragschweißungen an Rohrwänden von Kesselanlagen
- [84] DIN 50125 (2016-12): Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben
- [85] DIN EN ISO 18274 (2004-05): Schweißzusätze - Massivdrähte, -bänder und -stäbe zum Schmelzschweißen von Nickel und Nickellegierungen - Einteilung
- [86] DIN EN ISO 6520-1 (2007-17): Schweißen und verwandte Prozesse - Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen - Teil 1: Schmelzschweißen
- [87] DIN EN ISO 148-1 (2017-01): Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy - Teil 1: Prüfverfahren
- [88] DIN 17744:2002-09 Nickel-Knetlegierungen mit Molybdän und Chrom - Zusammensetzung
- [89] DIN EN 10028-7:2016-10: Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen - Teil 7: Nichtrostende Stähle; Deutsche Fassung EN 10028-7:2016
- [90] DIN EN 10028-4:2017-10, Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen - Teil 4: Nickellegierte kaltzähe Stähle; Deutsche Fassung EN 10028-4:2017
- [91] DVS-Merkblatt 0601 (1998-12): Schweißen von Nickel und Nickellegierungen.
- [92] ESAB Schweißweiser (2019): ESAB GmbH
- [93] DIN-Fachbericht 17641-3 (2004): Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Heißrissprüfungen für Schweißungen - Lichtbogenschweißprozesse - Teil 3: Frembeanspruchte Prüfungen

Anhang 2: Chemische Zusammensetzung und mechanisch-technologische Güterwerte der reinen Schweißgüter der Schweißzusätze gemäß [1; 85] und APZ der Werkstoffhersteller

DIN EN ISO-Bezeichnung		C	Mn	Si	Cr	Mo	Nb	Fe	Ti	Ni	W	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A5 [%]	KV [J]
numerisch	chemisch	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]					
DIN EN ISO 12153:2012		≤0,1	≤0,5	≤0,5	20-23	8-10	3,0-4,2	≤5	≤0,4	min. 58	-	-	-	-	-
T Ni 6625 B	NiCr22Mo9Nb	0,029	0,25	0,23	20,2	9,04	3,21	0,38	0,200	66,24	-	≥ 780	≥ 500	≥ 40	≥ 60 (-196 °C)
T Ni 6625 P*	NiCr22Mo9Nb	0,020	0,04	0,40	21,0	8,80	3,20	<1,0	-	Rest	-	≥ 750	≥ 490	≥ 35	≥ 65 (-196 °C)
T Ni 6625 P**	NiCr22Mo9Nb	0,030	0,02	0,36	20,4	8,60	3,28	0,25	-	Rest	-	≥ 690	≥ 420	≥ 25	≥ 32 (-196 °C)
DIN EN ISO 18274:2004		≤0,1	≤0,5	≤0,5	20-23	8-10	3,0-4,2	≤5	≤0,4	min. 58	-	760	-	-	-
S Ni 6625	NiCr22Mo9Nb	0,1	<0,10	<0,1	22,2	8,70	3,50	0,2	0,2	Rest	-	≥ 740	≥ 460	≥ 30	≥ 40 (-196 °C)
DIN EN ISO 12153:2012		≤0,1	5,0-9,5	≤1,0	13-17	-	1,0-2,5	≤10	≤1,0	min. 59	-	-	-	-	-
T Ni 6083 B	NiCr20Mn6Fe4Nb	0,020	5,50	0,20	20,0	-	2,40	2,40	-	Rest	-	≥ 650	≥ 400	≥ 40	≥ 100 (20 °C)
T Ni 6083 R	NiCr20Mn6Fe4Nb	0,040	5,11	0,26	19,8	0,05	2,05	-	0,08	70,9	-	≥ 600	≥ 360	≥ 27	≥ 32 (-196 °C)
DIN EN ISO 12153:2012		≤0,1	2,5-3,5	≤0,5	18-22	≤2	2,0-3,0	≤3	-	-	-	-	-	-	-
T Ni 6082 R	NiCr20Mn3Nb	0,040	3,0	0,23	20,0	0,04	2,37	1,45	0,08	72,6	-	≥ 550	≥ 360	≥ 22	≥ 32 (-196 °C)
DIN EN ISO 12153:2012		≤0,1	4-8	≤0,8	18-22	≤2	1,5-3,0	≤4	≤0,5	min. 60	-	-	-	-	-
T Ni 6182 P	NiCr15Fe6Mn	0,030	6,5	0,3	16,5	-	2,20	7,50	0,200	Rest	-	≥ 649	≥ 400	≥ 35	keine Angabe
DIN EN ISO 18274:2004		≤0,1	2,5-3,5	≤0,5	18-22	-	2,0-3,0	≤3	≤0,7	min 67	-	550	-	-	-
S Ni 6082	NiCr20Mn3Nb	0,010	3,1	<0,1	20,4	-	2,50	0,70	0,3	Rest	-	≥ 620	≥ 380	≥ 35	≥ 90 (20 °C)
DIN EN ISO 12153:2012		≤0,02	≤1,0	≤0,2	14,5-16,5	15-17	-	4-7	-	min 50	3,0-4,5	-	-	-	-
T Ni 6276 B	NiCr15Mo15Fe6W4	0,015	0,4	0,2	16,0	16,00	-	5,00	-	Rest	4,0	≥ 740	≥ 500	≥ 30	≥ 60 (-196 °C)
T Ni 6276 P	NiCr15Mo15Fe6W4	0,020	0,5	0,2	15,4	15,60	-	5,20	-	Rest	4,0	≥ 705	≥ 452	≥ 42	≥ 42 (-196 °C)
DIN EN ISO 18274:2004		≤0,02	≤1,0	≤0,08	14,5-16,5	15-17	-	4-7	-	min 50	3,0-4,5	690	-	-	-
S Ni 6276	NiCr15Mo15Fe6W4	0,006	0,48	0,07	15,8	15,60	-	5,81	-	58,20	3,6	≥ 750	≥ 450	≥ 35	≥ 100 (20 °C)

Anhang 3: Chemische Zusammensetzung der WIG-Buttons, der FDE-Bänder und der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] der Drahtelektroden vom Typ Ni 6625

Drahtelektrode	Prüf-gegenstand	Methode	C ¹⁾ [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	Nb [%]	Fe [%]	P [%]	S ¹⁾ [%]	Ti [%]	Al [%]	Ni [%]	Typ
ISO 12153:2012	T Ni 6625	-	< 0,1	< 0,5	0,5	20-23	8-10	3,15-4,15	5	-	-	0,4	-	min.58	-
	WIG-Button ²⁾	OES/TGSE	0,014	0,27	0,27	20,56	8,45	3,98	0,38	< 0,001	0,018	0,21	0,005	65,70	-
T Ni 6625 B	Mantel FDE	RFA	-	0,10	0,00	21,80	8,20	3,40	-	-	-	0,20	-	65,60	Ni 6625
	RSG-Block ³⁾	OES/TGSE	0,032	0,27	0,23	20,30	8,55	3,77	0,38	< 0,001	0,021	0,21	0,071	66,05	-
	RSG-Block ⁴⁾	OES/TGSE	0,040	0,26	0,22	20,42	8,55	3,83	0,38	< 0,001	0,002	0,20	0,071	65,91	-
	WIG-Button ²⁾	OES/TGSE	0,025	0,01	0,36	22,11	8,67	4,30	0,57	< 0,001	0,002	0,12	0,011	63,68	-
T Ni 6625 P*	Mantel FDE	RFA	-	0,10	0,10	21,90	8,50	3,40	-	-	-	0,30	-	64,70	Ni 6625
	RSG-Block ³⁾	OES/TGSE	0,025	0,01	0,27	22,18	8,63	4,11	0,58	< 0,001	0,003	0,26	0,045	63,38	-
T Ni 6625 P** ²⁾	WIG-Button ²⁾	OES/TGSE	0,025	0,01	0,49	20,21	7,45	3,57	0,10	< 0,001	0,002	0,05	0,001	67,99	-
	Mantel FDE	RFA	-	0,10	0,10	19,90	0,00	0,10	-	-	-	0,10	-	79,60	NiCr8020
ISO 18274:2004	RSG-Block ³⁾	OES/TGSE	0,018	0,01	0,36	20,55	7,34	3,11	0,16	< 0,001	0,002	0,09	0,004	68,25	-
	RSG-Block ⁴⁾	OES/TGSE	0,018	0,01	0,41	20,45	7,88	3,38	0,20	< 0,001	0,002	0,07	0,003	67,46	-
S Ni 6625	S Ni 6625	-	0,1	0,5	0,5	20-23	8-10	3,0-4,2	5	-	-	0,4	-	min.58	-
	WIG-Button ²⁾	OES/TGSE	0,006	0,01	0,07	22,20	8,20	4,15	0,14	< 0,001	0,000	0,21	0,195	64,67	-
S Ni 6625	RSG-Block ³⁾	OES/TGSE	0,014	0,00	0,07	22,27	8,28	4,19	0,16	< 0,001	< 0,001	0,22	0,172	64,48	-

⁵⁾ Rest Ar / 30 % He / 2 % H₂ / 0,05 % CO₂

⁴⁾ 75 % Ar / 25 % CO₂

³⁾ 82 % Ar / 18 % CO₂

²⁾ 100 % Ar

¹⁾ TGSE

Anhang 4: Chemische Zusammensetzung der WIG-Buttons, der FDE-Bänder und der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] der Drahtelektroden vom Typ Ni 6083, 6182 und 6082

Drahtelektrode	Prüf-gegenstand	Methode	C ¹⁾ [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	Nb [%]	Fe [%]	P [%]	S ¹⁾ [%]	Ti [%]	Al [%]	Ni [%]	Typ
ISO 12153:2012	T Ni 6083	-	0,1	5,0-9,5	1,0	13-17	-	1,0-2,5	10	0,03	-	1,0	-	min.59	-
T Ni 6083 B	WIG-Button ²⁾	OES/TGSE	0,033	5,88	0,18	19,40	0,86	2,59	2,68	0,001	0,008	0,17	<0,001	68,10	-
	MantelFDE	RFA	-	2,80	0,4	20,20	0,00	2,70	-	-	-	0,40	-	73,40	Ni 6082
T Ni 6083 R	RSG-Block ³⁾	OES/TGSE	0,030	5,77	0,17	19,36	0,85	2,49	2,81	<0,001	0,009	0,25	0,011	68,13	-
	WIG-Button ²⁾	OES/TGSE	0,028	5,29	0,28	19,70	0,03	2,50	1,31	0,001	0,003	0,12	<0,001	70,40	-
	MantelFDE	RFA	-	0,20	0,1	19,70	0,00	0,10	-	-	-	0,10	-	79,40	NiCr8020
	RSG-Block ³⁾	OES/TGSE	0,038	5,37	0,25	20,02	0,02	2,48	1,48	<0,001	0,003	0,08	<0,001	70,14	-
ISO 12153:2012	T Ni 6182	-	0,1	4-8	0,8	18-22	2	1,5-3,0	4	-	-	0,5	-	min. 60	-
T Ni 6182 P	WIG-Button ²⁾	OES/TGSE	0,024	6,90	0,47	17,10	0,01	2,39	6,06	<0,001	0,004	0,19	0,005	66,70	-
	MantelFDE	RFA	-	2,60	0,2	20,10	0,00	2,40	-	-	-	0,20	-	74,10	Ni 6082
	RSG-Block ³⁾	OES/TGSE	0,035	6,41	0,29	17,92	0,02	2,35	5,91	<0,001	0,003	0,30	0,028	66,61	-
ISO 12153:2012	T Ni 6082	-	0,1	2,5-3,5	0,5	18-22	2	2,0-3,0	3	0,03	-	0,75	-	min. 67	-
T Ni 6082 R	WIG-Button ²⁾	OES/TGSE	0,039	2,90	0,26	19,75	0,16	2,62	1,14	0,004	0,002	0,11	<0,001	72,91	-
	MantelFDE	RFA	-	0,10	0,1	20,20	0,00	0,10	-	-	-	0,00	-	79,30	NiCr8020
	RSG-Block ³⁾	OES/TGSE	0,033	2,99	0,24	20,09	0,01	2,36	1,54	0,002	0,001	0,10	<0,001	72,52	-
ISO 18274:2004	S Ni 6082	-	0,1-	2,5-3,5	0,5	18-22	-	2,0-3,0	3	-	-	0,7	-	min. 67	-
S Ni 6082	WIG-Button ²⁾	OES/TGSE	0,005	2,76	0,08	20,30	0,01	2,97	0,65	<0,001	<0,001	0,35	<0,001	72,70	-
	RSG-Block ⁴⁾	OES/TGSE	0,011	2,86	0,09	20,51	0,03	3,02	0,75	<0,001	<0,001	0,36	0,079	72,16	-

1) TGSE

2) 100 % Ar

3) 82 % Ar / 18 % CO₂4) Rest Ar / 30 % He / 2 % H₂ / 0,05 % CO₂

Anhang 5: Chemische Zusammensetzung der WIG-Buttons, der FDE-Bänder und der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] der Drahtelektroden vom Typ Ni 6276

Drahtelektrode	Prüf-gegenstand	Methode	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	Nb [%]	Fe [%]	P [%]	S [%]	W [%]	Ti [%]	Al [%]	Co [%]	Ni [%]	Typ
ISO 12153:2012	T Ni 6276	-	0,02	1,0	0,2	14,5-16,5	15-17	4-7	0,03	0,03	-	3,0-4,5	-	-	-	min.50	-
T Ni 6276 B	WIG-Button ²⁾	OES/TGSE	0,021	0,26	0,18	16,00	15,60	5,56	< 0,001	< 0,001	<0,001	3,69	0,05	<0,01	0,145	58,20	-
	Mantel FDE	RFA	-	0,30	0,10	16,00	15,20	0,10	-	-	-	3,30	0,00	-	-	57,90	Ni 6276
	RSG-Block ³⁾	OES/TGSE	0,011 ¹⁾	0,26	0,15	15,70	15,49	5,62	0,003	<0,001	0,005 ¹⁾	3,78	0,05	0,048	0,138	58,40	-
T Ni 6276 P	WIG-Button ²⁾	OES/TGSE	0,018	0,21	0,49	15,10	15,10	4,50	< 0,001	<0,001	<0,001	4,49	0,07	0,039	1,118	58,80	-
	Mantel FDE	RFA	-	0,10	0,30	15,50	15,20	0,10	-	-	-	3,40	0,10	-	-	58,00	Ni6276
	RSG-Block ³⁾	OES/TGSE	0,015 ¹⁾	0,17	0,26	15,28	15,30	4,47	< 0,001	<0,001	0,002 ¹⁾	4,38	0,10	0,086	1,197	58,52	-
ISO 18274:2004	S Ni 6276	-	0,02	1,0	0,08	14,5-16,5	15-17	4-7	-	-	-	3,0-4,5	-	-	-	min.50	-
S Ni 6276	WIG-Button ²⁾	OES/TGSE	0,006	0,46	0,12	16,00	15,60	5,29	< 0,001	<0,001	<0,001	3,61	0,02	0,211	0,002	58,40	-
	RSG-Block ³⁾	OES/TGSE	0,011 ¹⁾	2,86	0,09	20,51	0,03	3,02	0,75	<0,001	<0,001 ¹⁾	0,079	0,36	-	-	72,16	-

1) TGSE

2) 100 %Ar

3) 82 %Ar / 18 %CO₂4) Rest Ar / 30 %He / 2 %H₂ / 0,05 %CO₂

Anhang 6: Chemische Zusammensetzung der Füllungen und der Schlacke der Fülldrahtelektroden in wt.-%

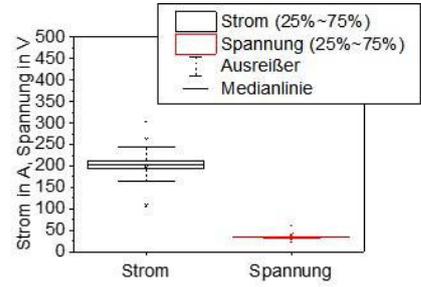
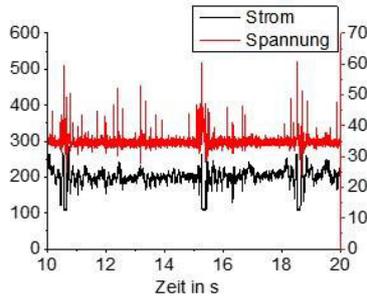
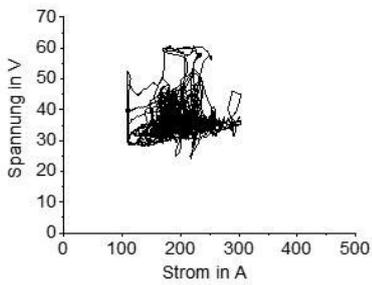
Drahtelektrode	Ort	Art/Fläche [µm]	Ni	Cr	Mo	Ti	Si	Ca	Na	Mg	F	Al	Zr	K	Mn	Nb	Fe	W	Typ Mantel
T Ni 6625 B	Füllung	Spot	X	X	X	X	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	Ni6625
	Schlacke	100x100	-	X	-	X	-	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	Ni6625
T Ni 6625 P*	Füllung	Spot	X	-	X	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	Ni6625
	Schlacke	100x100	-	20	-	50	-	2	1	3	-	3	20	-	-	-	-	-	Ni6625
T Ni 6625 P**	Füllung	Spot	-	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	NiCr
	Schlacke	100x100	-	23	-	34	4	1	6	1	-	6	14	-	-	11	-	-	8020
T Ni 6083 B	Füllung	Spot	X	X	X	-	-	X	-	-	X	-	-	-	X	-	X	-	Ni6082
	Schlacke	100x100	-	10	-	50	-	16	-	1	-	1	-	1	10	-	-	-	Ni6082
T Ni 6083 R	Füllung	Spot	-	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	X	-	X	X	-	NiCr
	Schlacke	100x100	-	9	-	29	3	13	17	-	-	1	8	6	8	6	-	-	8020
T Ni 6182 P	Füllung	Spot	-	-	-	X	X	-	-	-	-	X	-	-	X	-	X	-	Ni6082
	Schlacke	100x100	-	10	-	60	-	-	5	-	-	2	10	-	15	-	-	-	Ni6082
T Ni 6082 R			keine Messung																Ni6082
T Ni 6276 B	Füllung	Spot	X	X	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	Ni6276
	Schlacke	100x100	-	44	-	50	1	2	-	-	2	1	-	-	-	-	-	-	Ni6276
	Schlacke	100x100	-	2	-	8	-	38	-	-	34	1	-	-	-	-	-	17	Ni6276
T Ni 6276 P	Füllung	Spot	-	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	Ni6276
	Schlacke	100x100	-	11	-	70	0,5	-	-	-	-	7	12	-	-	-	-	-	Ni6276

Anhang 7: Ergebnisse der metallographischen Untersuchung bei der Parameterfindung der Füll- und Massivdrahtelektroden

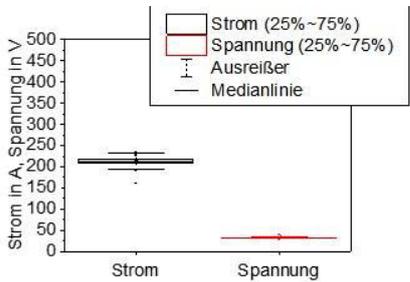
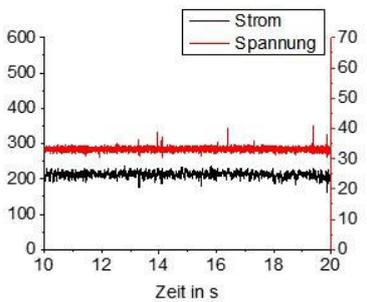
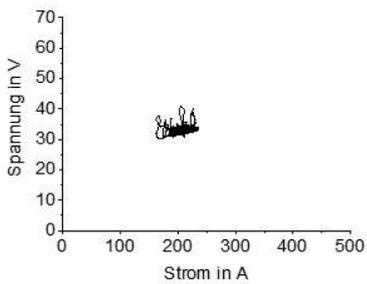
Drahtelektrode	Parameter- variante Grenze	Nahtüber- höhung [mm]	Einbrand- tiefe [mm]	Naht- Breite [mm]	Auftrag- Fläche [mm ²]	Einbrand- Fläche [mm ²]	Nahtübergangs- winkel Links/Rechts [°]	Aufmischungs- Grad [%]
T Ni 6625 B	Obere Grenze	2,2	1,7	9,5	13,9	8,9	150 / 145	39
	Untere Grenze	3,4	1,1	8,7	18,1	5,0	146 / 133	21
T Ni 6625 P*	Obere Grenze	2,2	2,3	9,4	12,9	11,5	150 / 160	47
	Untere Grenze	1,6	0,8	7,2	7,1	4,0	145 / 147	36
T Ni 6625 P**	Obere Grenze	2,3	2,1	8,8	12,2	9,8	164 / 139	45
	Untere Grenze	1,6	0,9	7,3	7,8	3,9	156 / 151	33
T Ni 6083 B	Obere Grenze	2,8	2,5	11,8	21,8	17,0	140 / 146	44
	Untere Grenze	2,9	1,5	7,7	15,0	5,4	139 / 129	27
T Ni 6083 R	Obere Grenze	2,2	2,2	10,5	13,1	13,7	150 / 160	51
	Untere Grenze	2,3	0,5	8,3	13,1	2,2	124 / 131	14
T Ni 6182 P	Obere Grenze	2,6	1,1	10,0	18,8	4,6	128 / 124	20
	Untere Grenze	2,4	0,9	9,5	16,4	2,7	122 / 127	14
T Ni 6082 R	Obere Grenze	3,0	3,5	12,6	20,1	25,0	152 / 157	55
	Untere Grenze	2,5	1,1	8,7	13,9	5,9	144 / 146	30
T Ni 6276 B	Obere Grenze	1,5	1,8	9,8	11,3	10,1	154 / 147	47
	Untere Grenze	3,0	1,0	7,8	15,8	4,5	130 / 133	22
T Ni 6276 P	Obere Grenze	3,5	1,4	9,8	24,1	5,8	111 / 130	19
	Untere Grenze	2,8	0,5	9,1	18,4	1,4	102 / 118	7

Anhang 8: U-I-, U-I-t-Diagramme und Boxplots der Schweißzusätze vom Typ Ni 6625

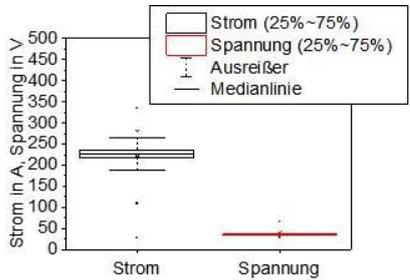
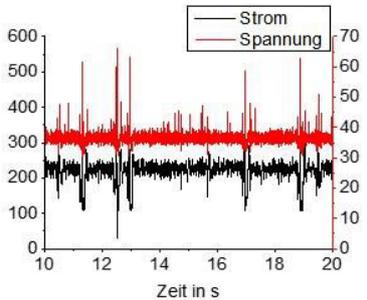
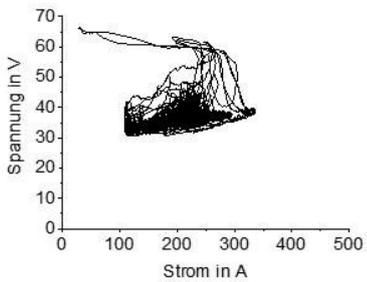
T Ni 6625 B



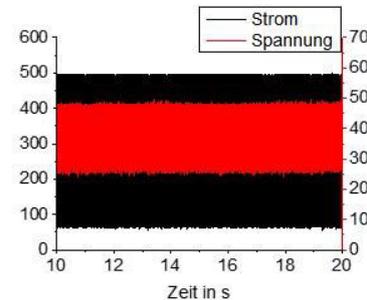
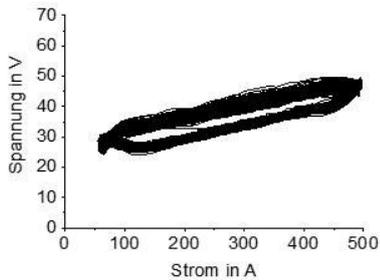
T Ni 6625 P**



T Ni 6625 P*



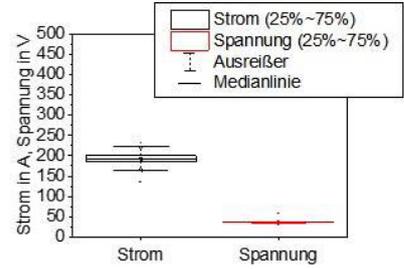
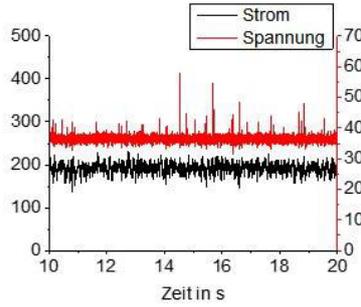
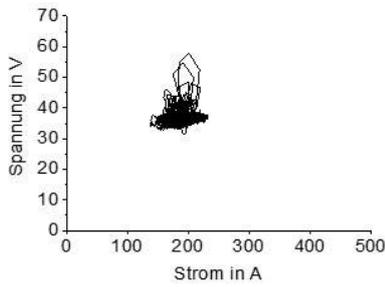
S Ni 6625



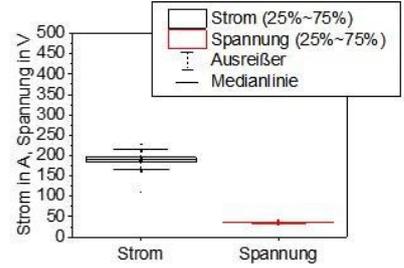
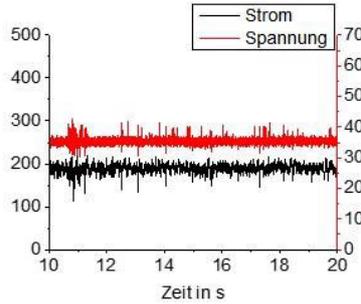
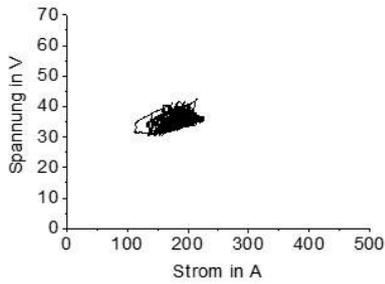
**Darstellung als
Boxplot nicht sinnvoll**

Anhang 9: U-I-, U-I-t-Diagramme und Boxplots der Schweißzusätze vom Typ T Ni 6082, 6083, 6182, S Ni 6082

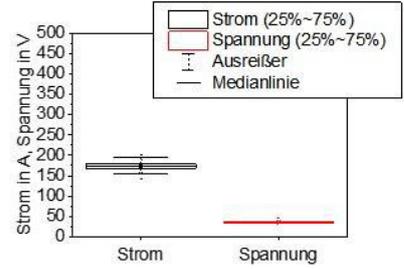
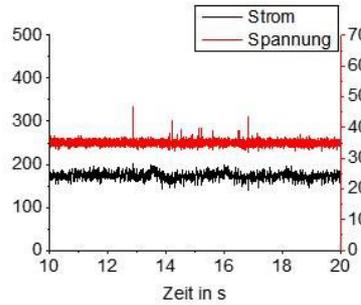
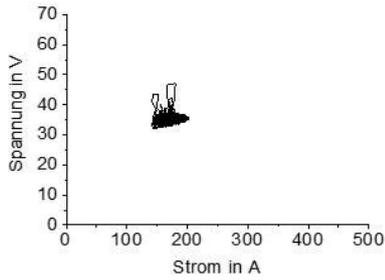
T Ni 6083 B



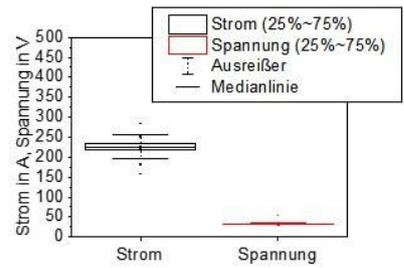
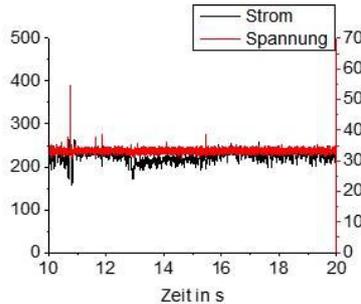
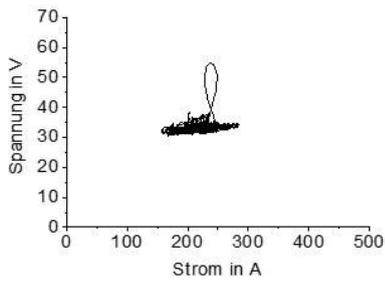
T Ni 6083 R



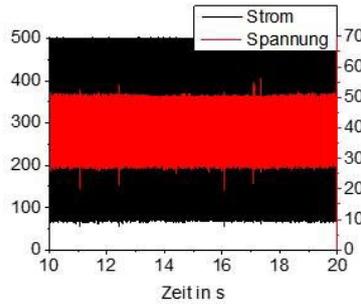
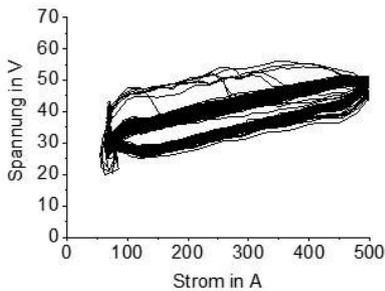
T Ni 6182 P



T Ni 6082 R



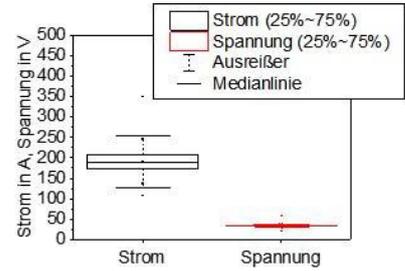
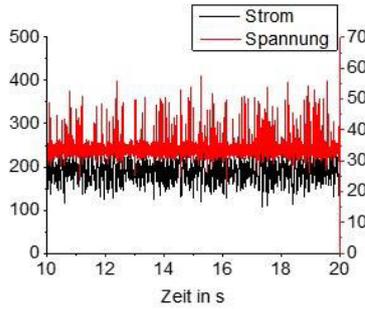
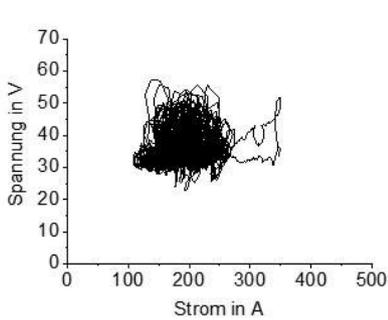
S Ni 6082



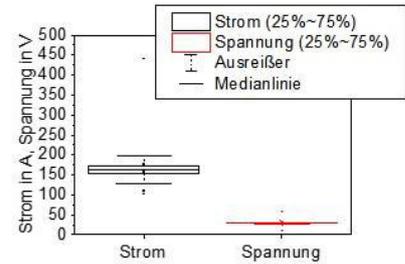
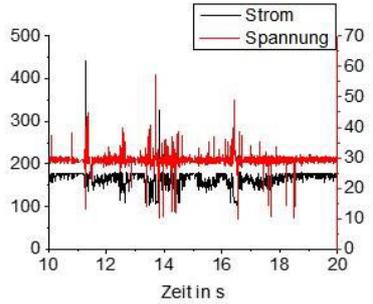
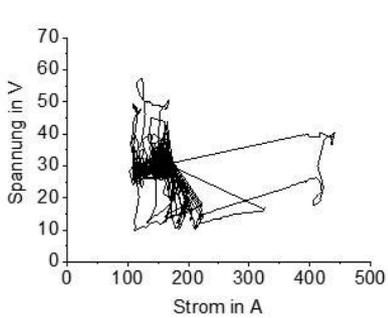
**Darstellung als
Boxplot nicht sinnvoll**

Anhang 10: U-I-, U-I-t-Diagramme und Boxplots der Schweißzusätze vom Typ Ni 6276

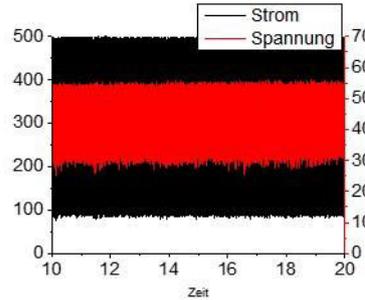
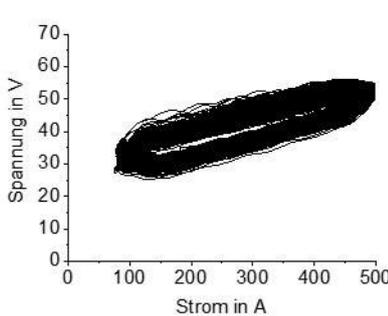
T Ni 6276 B



T Ni 6276 P



S Ni 6276



**Darstellung als
Boxplot nicht sinnvoll**

Anhang 11: Quantitativer Vergleich der Lichtbogenstabilität anhand von Zentral- Extremwerten und Streuungsmaße

Drahtelektrode	Messwert	Zentralwerte		Streuungsmaße			Extremwerte	
		\bar{X}	X_m	s	R	IQA	Min.	Max.
T Ni 6625 B	Strom in A	201,1	202,8	25,2	197,0	20,0	107,0	304,0
	Spannung in V	34,5	34,4	1,4	36,9	0,8	23,9	60,8
T Ni 6625 P*	Strom in A	223,0	227,8	28,5	308,4	19,1	28,3	336,8
	Spannung in V	36,3	36,3	1,5	36,0	1,2	30,4	66,4
T Ni 6625 P**	Strom in A	213,1	213,1	7,8	74,3	10,3	161,8	236,1
	Spannung in V	33,1	33,1	0,4	10,9	0,5	30,1	41,0
S Ni 6625	Strom in A	keine Bestimmung der Boxplots						
	Spannung in V							
T Ni 6083 B	Strom in A	192,5	193,1	11,6	94,8	15,2	136,9	231,7
	Spannung in V	36,3	36,3	0,7	26,5	0,9	31,4	57,9

Fortsetzung Anhang 11

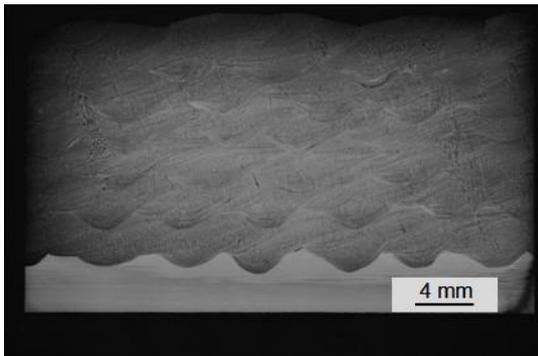
T Ni 6083 R	Strom in A	189,6	190,1	10,0	115,4	12,2	111,4	226,8
	Spannung in V	35,2	35,2	0,7	12,5	0,8	30,1	42,6
T Ni 6182 P	Strom in A	173,5	173,5	7,8	61,5	10,3	141,3	202,8
	Spannung in V	35,0	35,0	0,6	15,1	0,7	32,0	47,1
T Ni 6082 R	Strom in A	224,5	225,3	12,7	126,6	15,2	157,4	284,0
	Spannung in V	33,1	33,1	0,5	24,2	0,5	30,6	54,9
S Ni 6082	Strom in A	keine Bestimmung der Boxplots						
	Spannung in V	keine Bestimmung der Boxplots						
T Ni 6276 B	Strom in A	190,8	190,1	24,0	241,4	31,8	108,5	350,0
	Spannung in V	33,3	33,3	1,2	34,6	1,4	22,7	57,3
T Ni 6276 P	Strom in A	159,9	163,7	17,2	337,3	17,6	103,1	440,4
	Spannung in V	29,2	29,2	1,1	47,7	0,7	9,7	57,4
S Ni 6276	Strom in A	keine Bestimmung der Boxplots						
	Spannung in V	keine Bestimmung der Boxplots						

Anhang 12: Ermittelte Sauerstoff- und Stickstoffgehalte der reinen Schweißgüter, gefertigt nach DIN EN ISO 6847:2013 [60]

Draht- elektrode	O-Gehalt in ppm				N-Gehalt in ppm				C-Gehalt in %				S-Gehalt in %			
	1	2	3	\bar{x}	1	2	3	\bar{x}	1	2	3	\bar{x}	1	2	3	\bar{x}
T Ni 6625 B ¹⁾	666	678	652	665	245	240	237	241	0,032	0,033	0,031	0,032	0,021	0,020	0,022	0,021
T Ni 6625 B ²⁾	680	696	685	687	237	250	231	239	0,031	0,029	0,032	0,031	0,021	0,021	0,022	0,021
T Ni 6625 P ^{*1)}	1166	1204	1214	1195	331	335	356	341	0,024	0,026	0,025	0,025	0,003	0,003	0,003	0,003
T Ni 6625 P ^{**1)}	992	1038	1007	1012	210	208	213	210	0,018	0,018	0,018	0,018	0,002	0,002	0,002	0,002
T Ni 6625 R ¹⁾	971	926	984	960	161	163	163	162	0,017	0,018	0,018	0,018	0,002	0,002	0,002	0,002
S Ni 6625 ³⁾	19	21	26	22	214	211	217	214	0,014	0,015	0,014	0,014	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
T Ni 6083 B ¹⁾	544	559	548	550	251	250	241	247	0,029	0,032	0,028	0,030	0,009	0,009	0,009	0,009
T Ni 6083 R ¹⁾	558	537	530	542	277	268	263	269	0,042	0,035	0,037	0,038	0,003	0,003	0,003	0,003
T Ni 6182 P ¹⁾	626	572	595	598	201	197	204	201	0,035	0,036	0,035	0,035	0,003	0,003	0,003	0,003
T Ni 6082 R ¹⁾	672	683	764	706	170	166	163	166	0,032	0,035	0,033	0,033	0,001	0,002	0,001	0,001
S Ni 6082 ¹⁾	43	44	44	44	94	96	95	95	0,011	0,012	0,011	0,011	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
T Ni 6276 B ¹⁾	767	866	850	828	150	164	159	158	0,011	0,014	0,011	0,012	0,005	0,005	0,005	0,005
T Ni 6276 P ¹⁾	775	797	780	784	202	197	203	201	0,016	0,015	0,013	0,015	0,002	0,002	0,002	0,002
S Ni 6276 ³⁾	13	12	13	13	162	149	147	153	0,008	0,009	0,009	0,009	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

1) 82 % Ar / 18 % CO₂2) 75 % Ar / 25 % CO₂3) Rest Ar / 30 % He / 2 % H₂ / 0,05 % CO₂

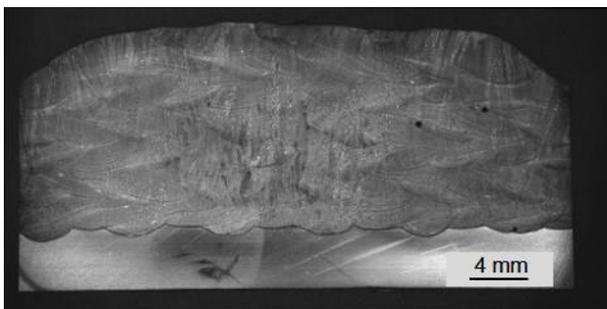
Anhang 13: Querschliffe (Ausschnitt) der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 – Typ Ni 6625



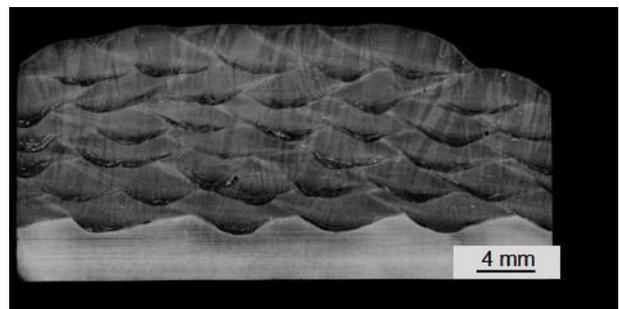
T Ni 6625 B



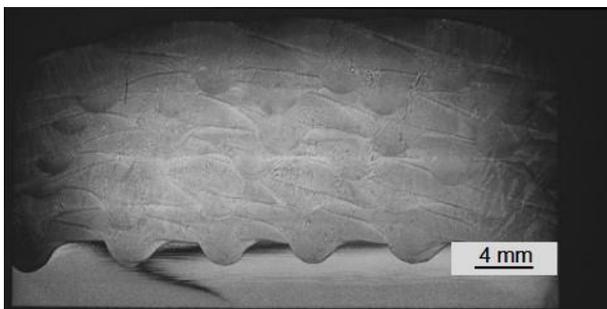
T Ni 6625 B (25% CO₂)



T Ni 6625 P*

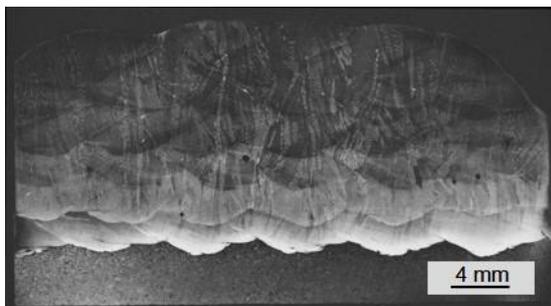


T Ni 6625 P**

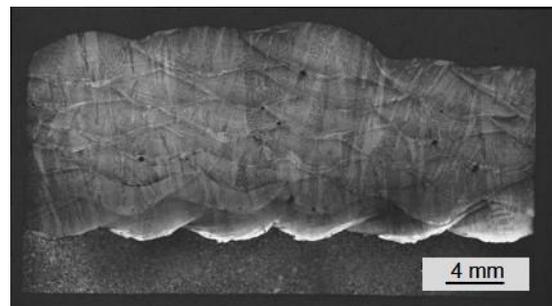


S Ni 6625

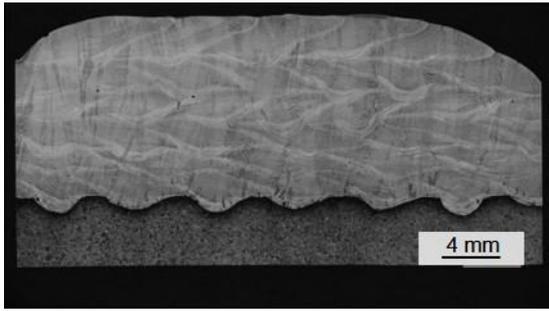
Anhang 14: Querschliffe (Ausschnitt) der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 – Typ Ni 6082, Ni 8182 und Ni 6082



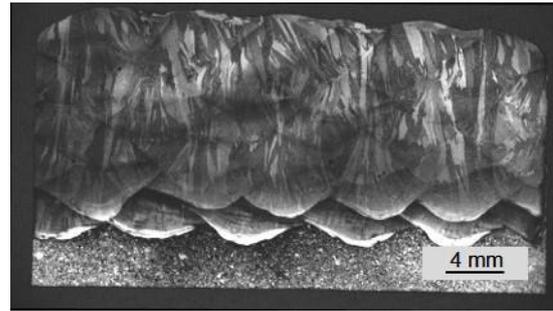
T Ni 6083 B



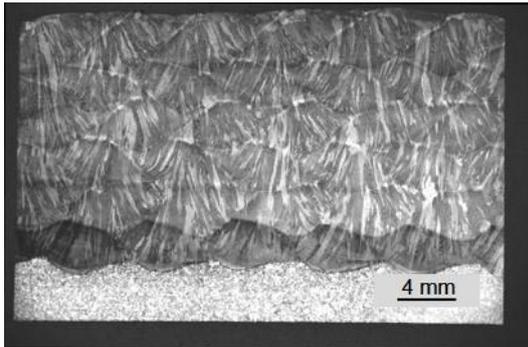
T Ni 6083 R



T Ni 6182 P

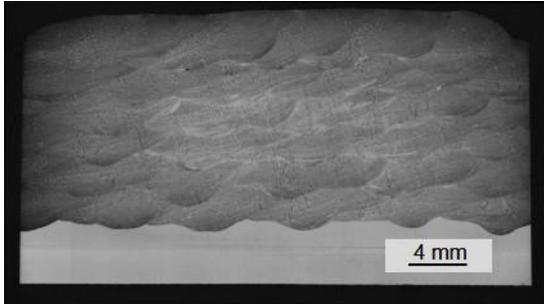


T Ni 6082 R

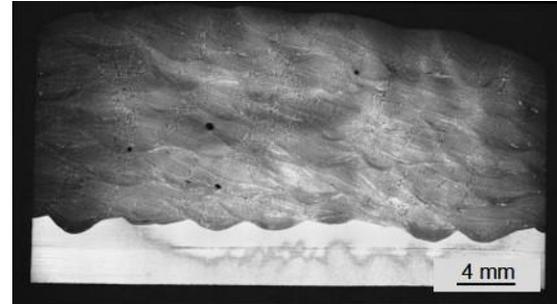


S Ni 6082

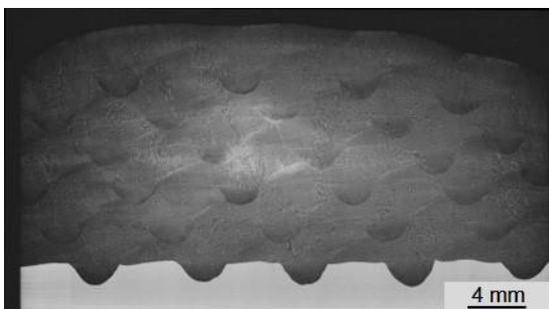
Anhang 15: Querschliffe (Ausschnitt) der reinen Schweißgüter nach DIN EN ISO 6847:2013 – Typ Ni 6276



T Ni 6276 B



T Ni 6276 P

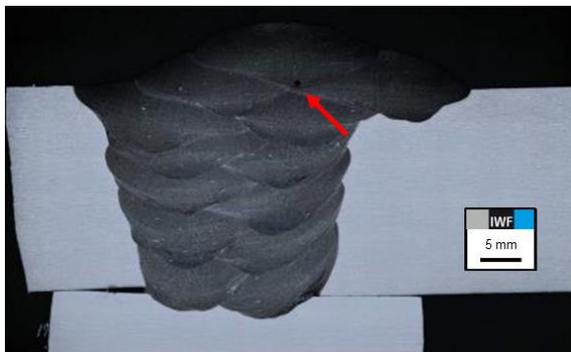


S Ni 6276

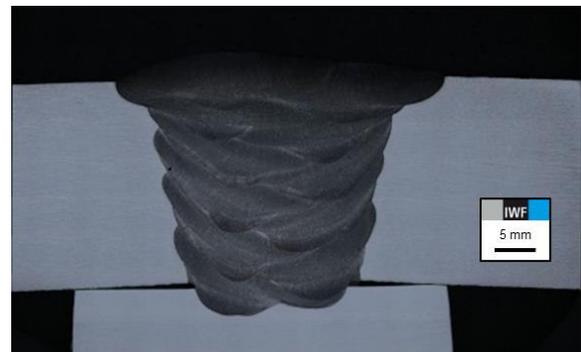
Anhang 16: Ergebnisse der Durchstrahlungsprüfung der reinen Schweißgutproben nach DIN EN ISO 6847:2013 [60] (Steiflankennaht)

Draht- elektrode	Unregelmäßigkeiten nach DIN EN ISO 6520-1:2007 [68]									Bewertungs- gruppe (B)
	101 Längsriss	2011 Pore	2012 Gleich- mäßige Poren	2016 Schlauch- pore	301 Schlacke- einschluss	401 Binde- fehler	501 Einbrand- kerbe	5013 Wurzel- kerbe	5041 Wurzel- über- höhung	
Grundwerkstoff: alloy 625										
T Ni 6625 B	-	x	-	-	-	-	-	-	-	erfüllt
T Ni 6625 P*	-	x	-	-	-	-	-	x	-	nicht erfüllt
T Ni 6625 P**	-	x	x	-	-	-	-	-	-	erfüllt
S Ni 6625	-	x	-	-	-	-	-	-	-	erfüllt
Grundwerkstoff: alloy 800 H										
T Ni 6083 B	x	x	-	-	-	-	-	-	-	nicht erfüllt
T Ni 6083 R	x	x	-	-	-	-	-	x	-	nicht erfüllt
T Ni 6182 P	x	x	-	-	-	-	-	-	-	nicht erfüllt
S Ni 6082	x	x	-	-	-	-	-	-	-	nicht erfüllt
Grundwerkstoff: alloy C-276										
T Ni 6276 B	-	x	-	-	-	x	-	-	-	nicht erfüllt
T Ni 6276 P	-	x	x	-	x	-	-	x	-	nicht erfüllt
S Ni 6276	-	-	-	-	-	-	-	-	-	erfüllt

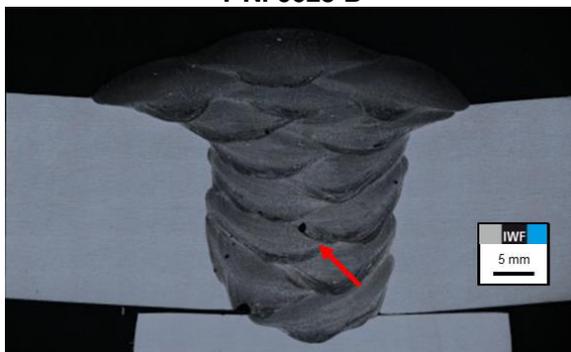
Anhang 17: Querschliffe der Steiflankennahte der reiner Schweißgüter des Typs Ni 6625 nach DIN EN ISO 15792-1 [61]



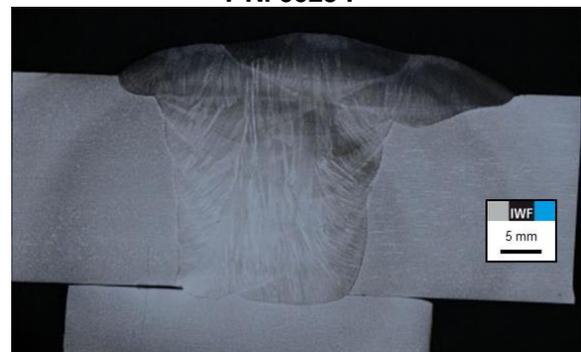
T Ni 6625 B



T Ni 6625 P*



T Ni 6625 P**

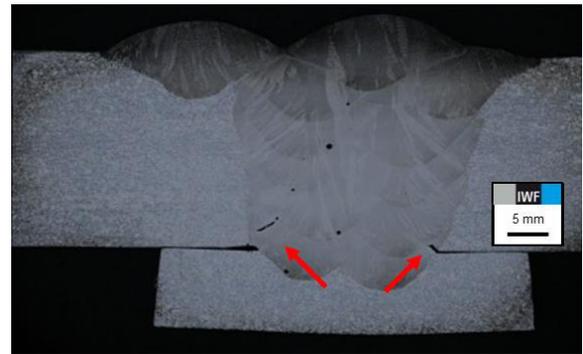


S Ni 6625

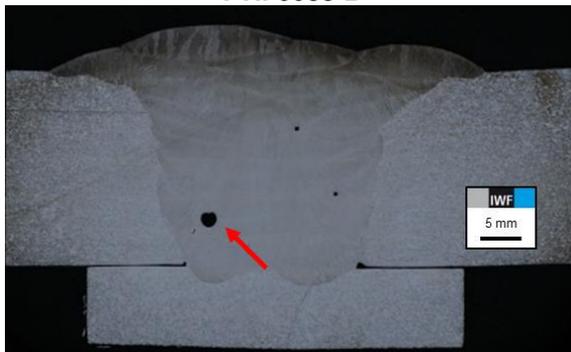
Anhang 18: Querschliffe der Steiflankennähte der reiner Schweißgüter des Typs Ni 6083, 8182, 6082 nach DIN EN ISO 15792-1 [61]



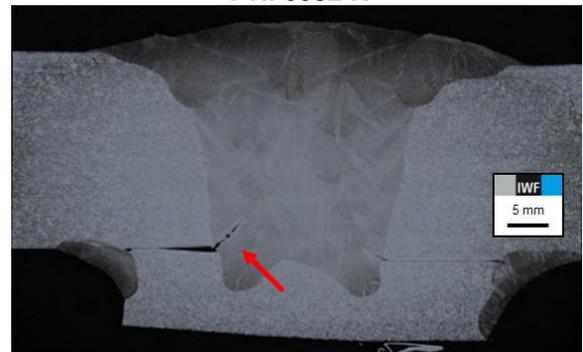
T Ni 6083 B



T Ni 6082 R

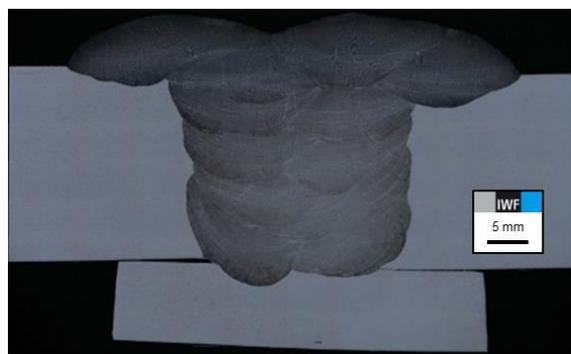


T Ni 6182 P

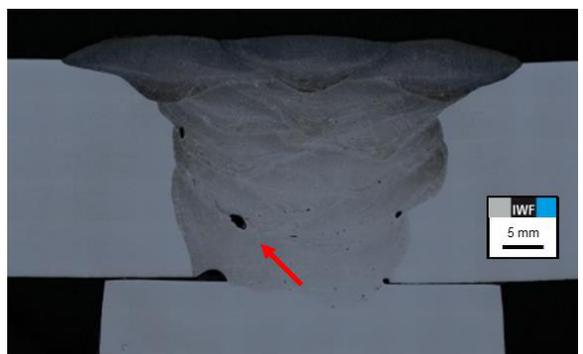


S Ni 6082

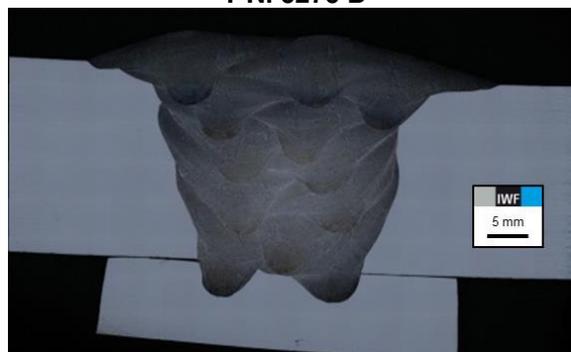
Anhang 19: Querschliffe der Steiflankennähte der reiner Schweißgüter des Typs Ni 6625 nach DIN EN ISO 15792-1 [61]



T Ni 6276 B

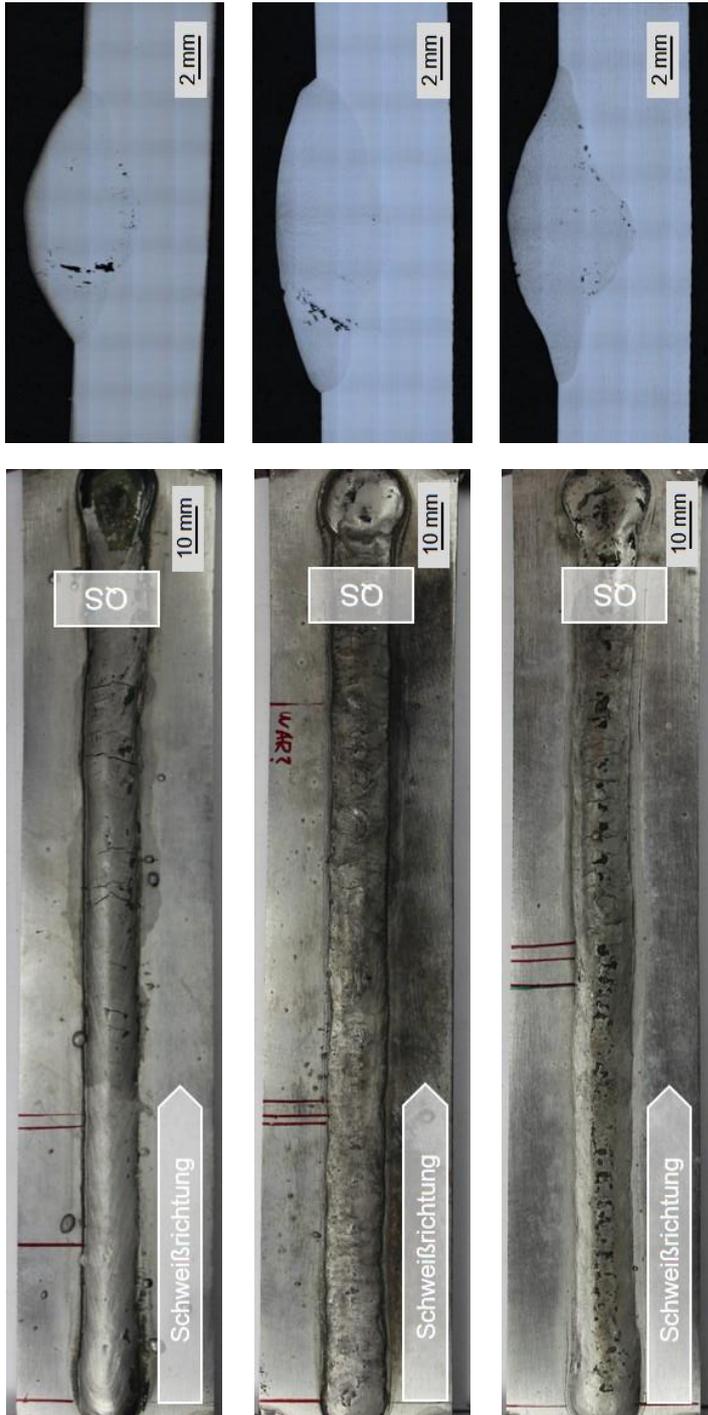


T Ni 6276 P



S Ni 6276

Anhang 20: Ermittelte Schweißparameter und Nahtaussehen der MSG-Einzelraupen beim PVR-Test auf Alloy 625 (Variante 1a) mit Schweißzusätzen des Typs Ni 6625

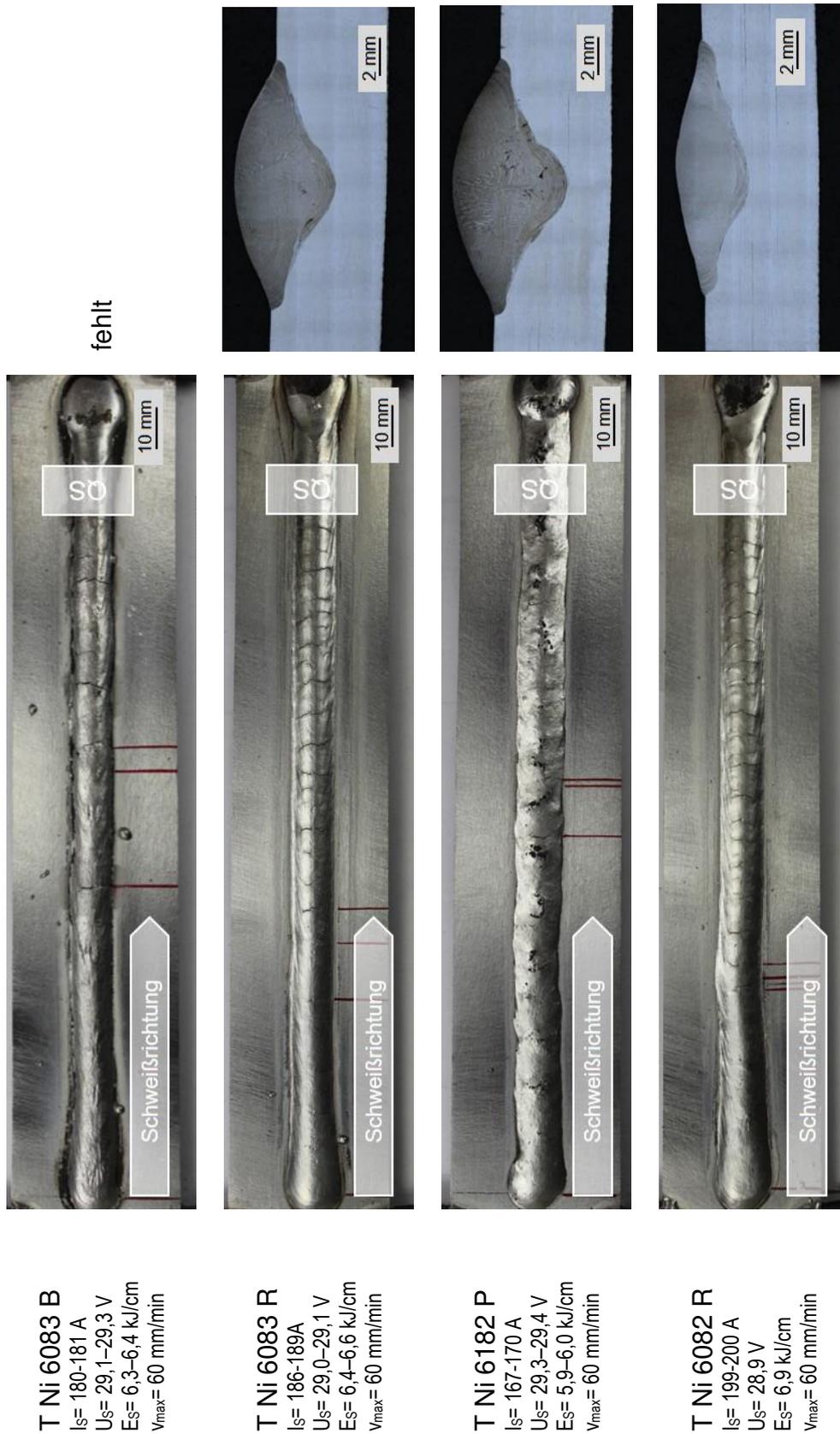


T Ni 6625 B
 $I_m, SSQ = 191-193 \text{ A}$
 $U_m, SSQ = 29,0 \text{ V}$
 $E_m, SSQ = 6,6-6,7 \text{ kJ/cm}$
 $v_{max} = 60 \text{ mm/min}$

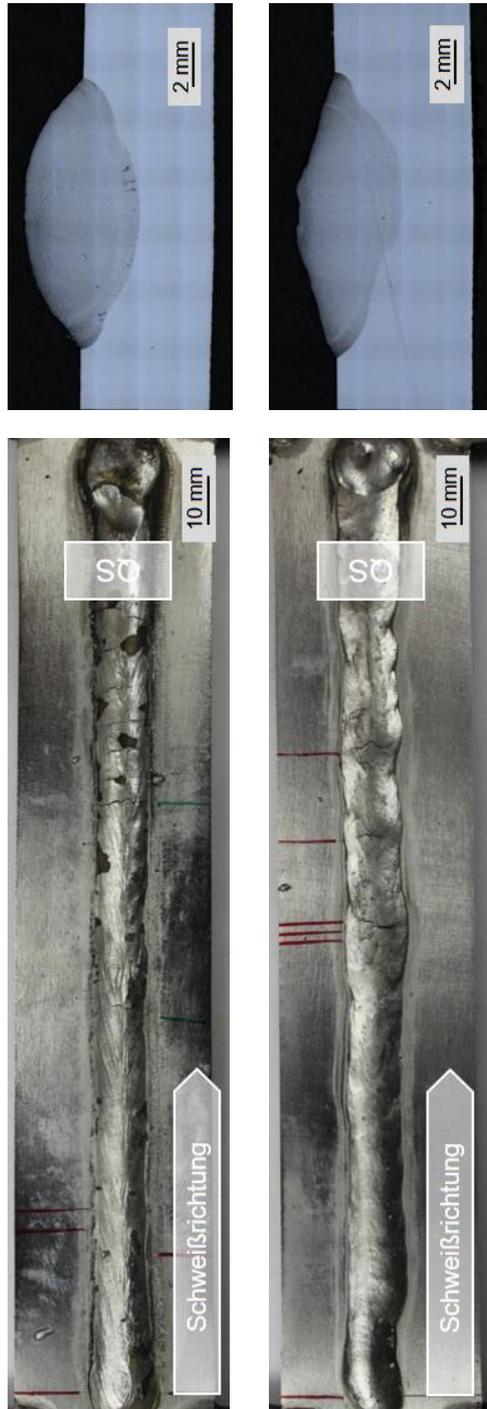
T Ni 6625 P*
 $I_s = 199 \text{ A}$
 $U_s = 28,9-29,0 \text{ V}$
 $E_s = 6,9 \text{ kJ/cm}$
 $v_{max} = 60 \text{ mm/min}$

T Ni 6625 P**
 $I_s = 185-195 \text{ A}$
 $U_s = 29,0 \text{ V}$
 $E_s = 6,4-6,8 \text{ kJ/cm}$
 $v_{max} = 60 \text{ mm/min}$

Anhang 21: Ermittelte Schweißparameter und Nahtaussehen der MSG-Einzelraupen beim PVR-Test auf alloy 800 H (Variante 1a) mit Schweißzusätzen des Typs Ni 6082, Ni 6083 und Ni 6182



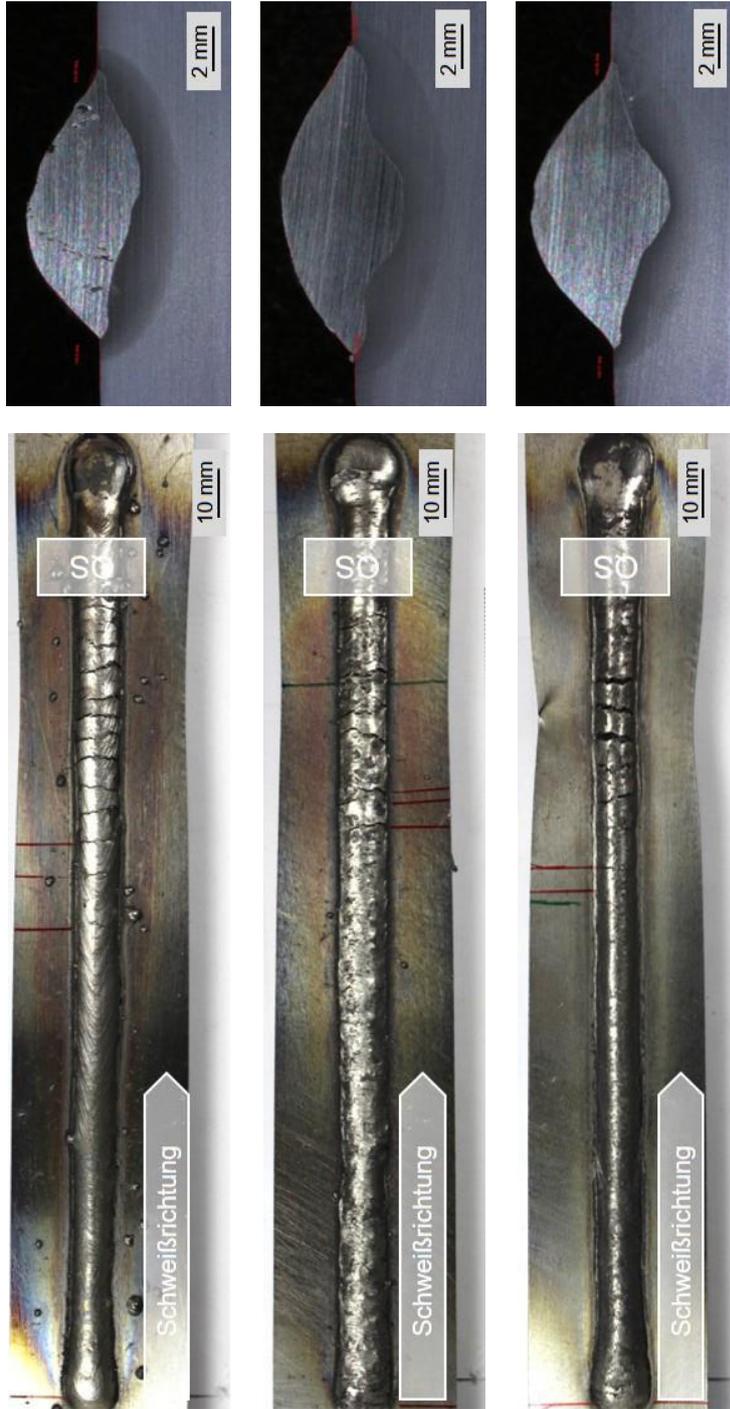
Anhang 22: Ermittelte Schweißparameter und Nahtaussehen der MSG-Einzelraupen beim PVR-Test auf alloy C-276 (Variante 1a) mit Schweißzusätzen des Typs Ni 6276



T Ni 6276 B
I_s= 178-181 A
U_s= 29,0-29,3 V
E_s= 6,2-6,4 kJ/cm
v_{max}= 60 mm/min

T Ni 6276 P
I_s= 150-163 A
U_s= 29,4-29,9 V
E_s= 5,3-5,8 kJ/cm
v_{max}= 60 mm/min

Anhang 23: Ermittelte Schweißparameter und Nahtaussehen der MSG-Einzelraupen beim PVR-Test auf S355NL (Variante 1b) mit Schweißzusätzen des Typs Ni 6625

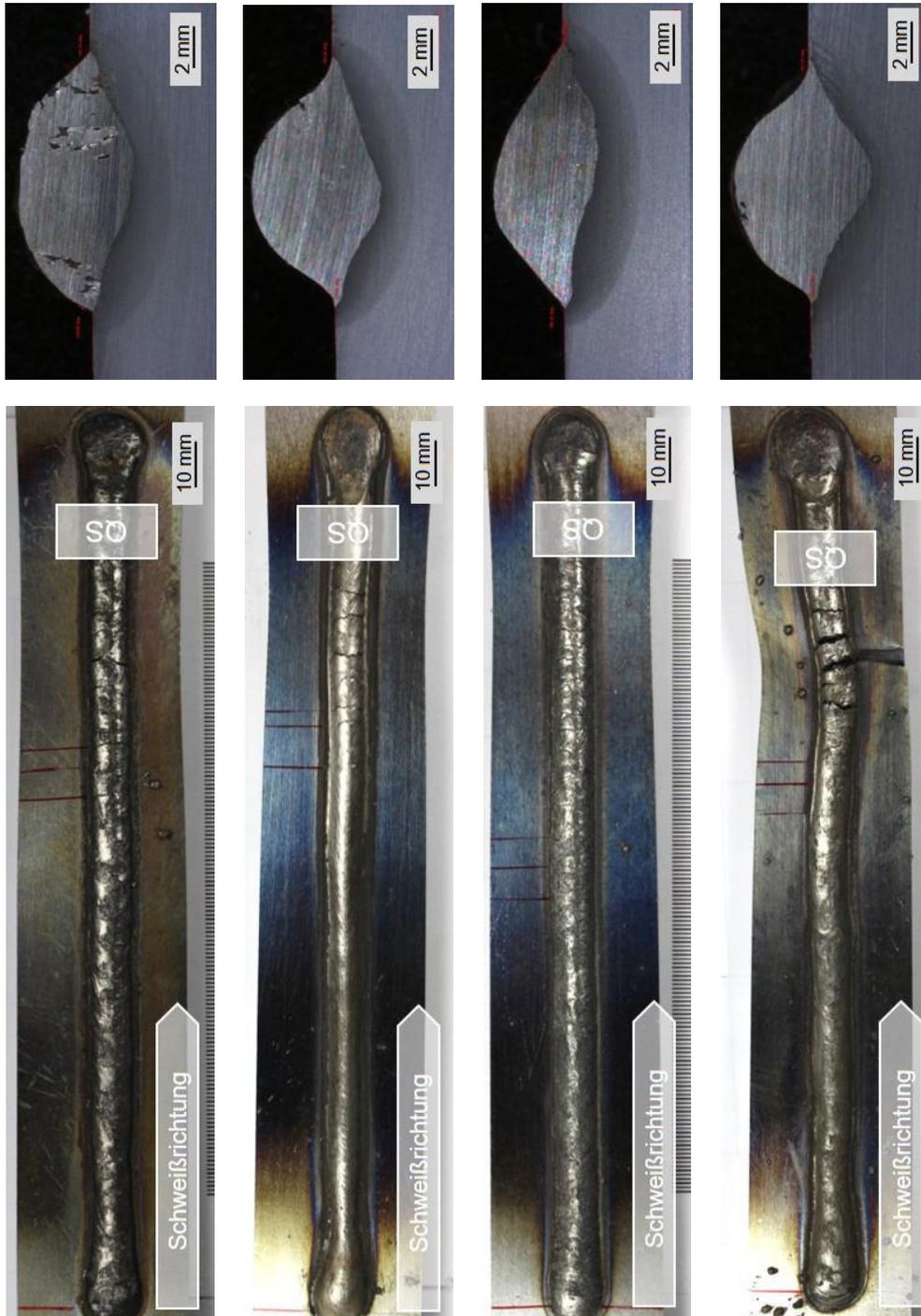


T Ni 6625 B
 $I_m, SSQ = 202-204 \text{ A}$
 $U_m, SSQ = 28,7 \text{ V}$
 $E_m, SSQ = 7,0 \text{ kJ/cm}$
 $v_{max} = 100 \text{ mm/min}$

T Ni 6625 P*
 $I_m, SSQ = 205-207 \text{ A}$
 $U_m, SSQ = 28,7 \text{ V}$
 $E_m, SSQ = 7,1 \text{ kJ/cm}$
 $v_{max} = 100 \text{ mm/min}$

T Ni 6625 P**
 $I_m, SSQ = 204-207 \text{ A}$
 $U_m, SSQ = 28,6-29,0 \text{ V}$
 $E_m, SSQ = 7,1 \text{ kJ/cm}$
 $v_{max} = 120 \text{ mm/min}$

Anhang 24: Ermittelte Schweißparameter und Nahtaussehen der MSG-Einzelraupen beim PVR-Test auf S355NL (Variante 1b) mit Schweißzusätzen des Typs Ni 6082, Ni 6083 und Ni 6182



T Ni 6083 B

$I_m, SSQ = 194 A$
 $U_m, SSQ = 29,0 V$
 $E_m, SSQ = 6,8 kJ/cm$
 $v_{max} = 100 mm/min$

T Ni 6083 R

$I_m, SSQ = 200-201 A$
 $U_m, SSQ = 28,9-29,0 V$
 $E_m, SSQ = 7,0 kJ/cm$
 $v_{max} = 100 mm/min$

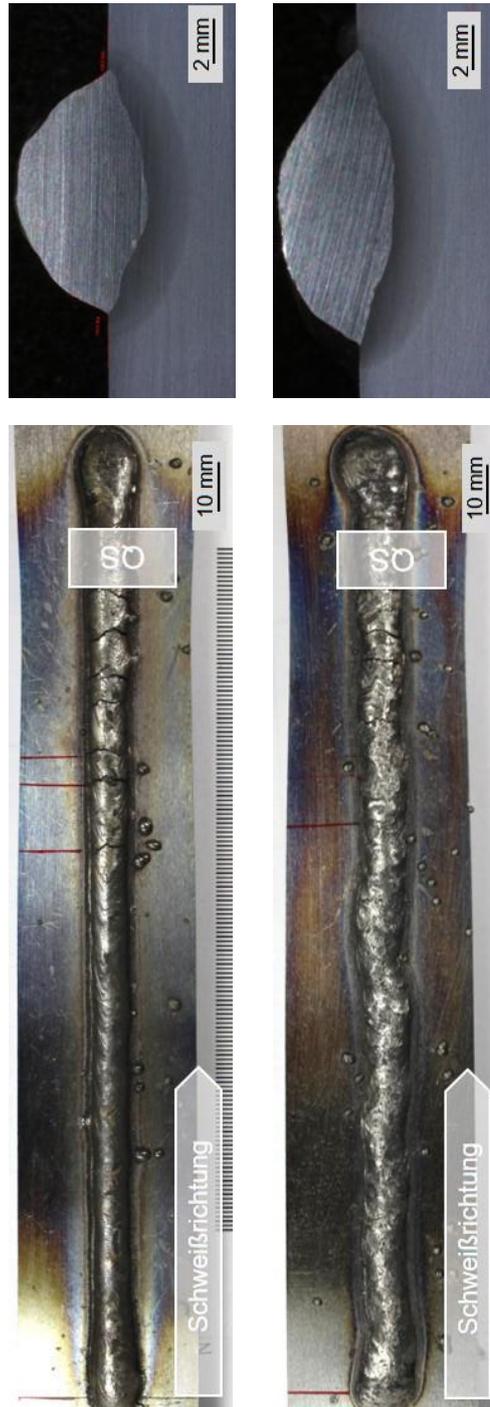
T Ni 6182 P

$I_m, SSQ = 179-181 A$
 $U_m, SSQ = 29,0 V$
 $E_m, SSQ = 6,3 kJ/cm$
 $v_{max} = 100 mm/min$

T Ni 6082 R

$I_m, SSQ = 209 A$
 $U_m, SSQ = 28,5-28,8 V$
 $E_m, SSQ = 7,1-7,2 kJ/cm$
 $v_{max} = 120 mm/min$

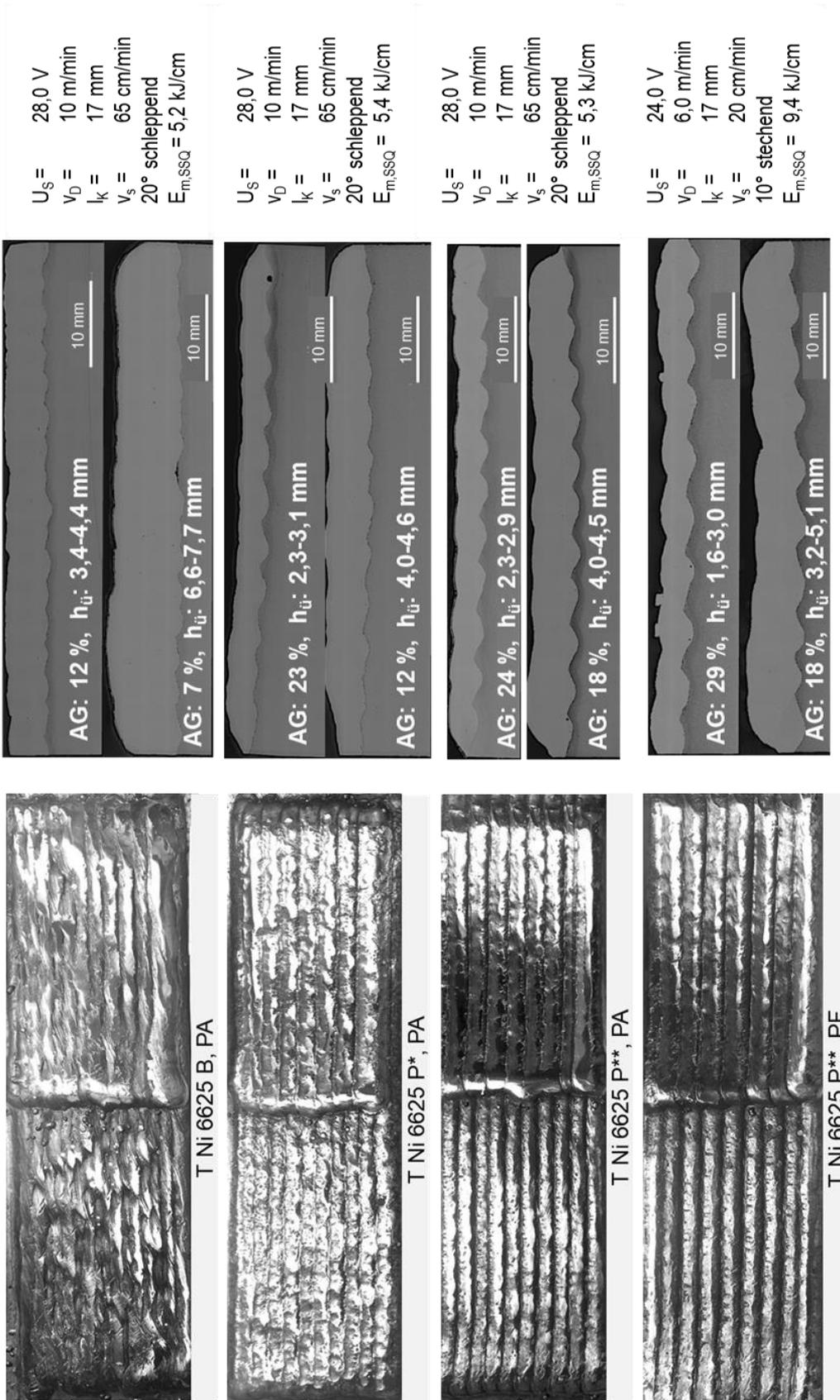
Anhang 25: Ermittelte Schweißparameter und Nahtaussehen der MSG-Einzelraupen beim PVR-Test auf S355NL (Variante 1b) mit Schweißzusätzen des Typs Ni 6276 (Variante 1b)



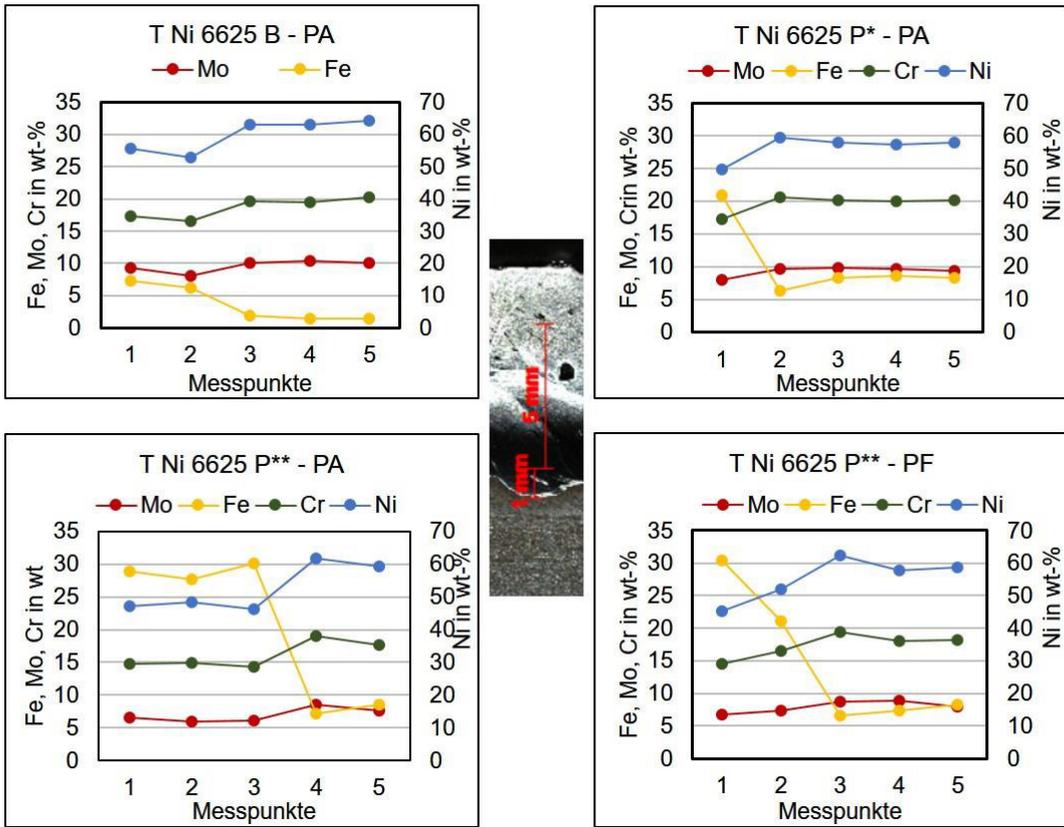
T Ni 6276 B
 $I_m, SSQ = 194 \text{ A}$
 $U_m, SSQ = 29,0 \text{ V}$
 $E_m, SSQ = 6,8 \text{ kJ/cm}$
 $v_{max} = 100 \text{ mm/min}$

T Ni 6276 P
 $I_m, SSQ = 170 \text{ A}$
 $U_m, SSQ = 29,3 \text{ V}$
 $E_m, SSQ = 6,0 \text{ kJ/cm}$
 $v_{max} = 100 \text{ mm/min}$

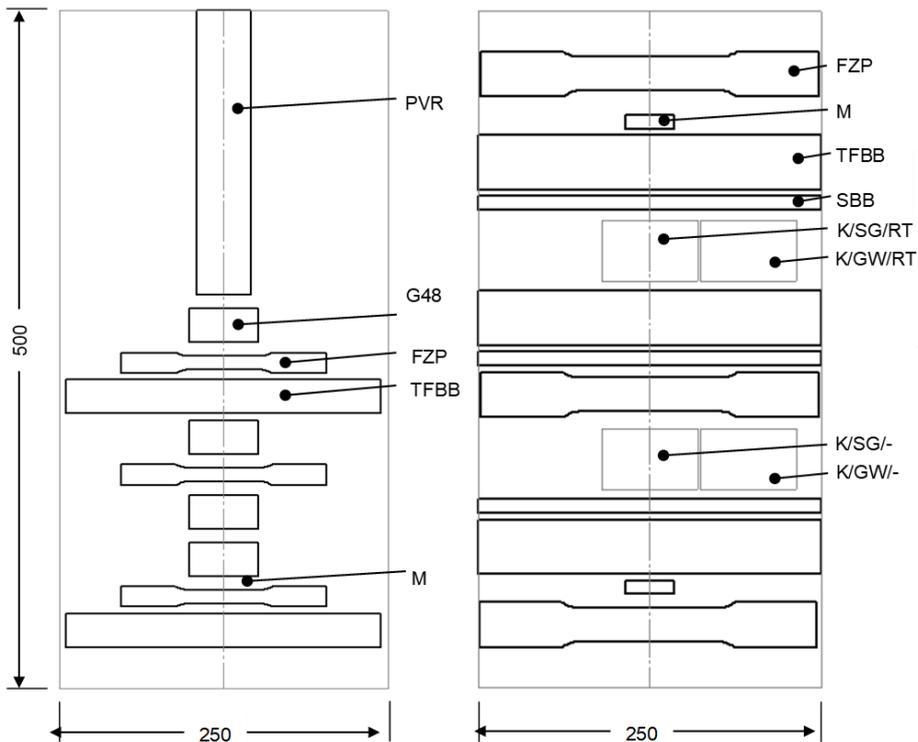
Anhang 26: Oberflächen und Querschnitte der 1- und 2-lagigen Schweißplattierungen in Schweißposition PA und PF



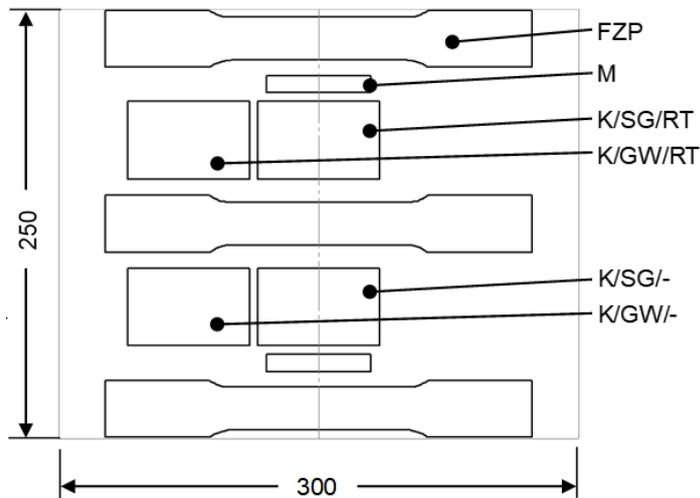
Anhang 27: Chemische Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Schichthöhe an den 2-lagigen Schweißplattierungen



Anhang 28: Probenentnahmepläne für die zerstörende Prüfung der V-Nähte an den 5 mm dicken Blechen (links) und 12-14 mm dicken Blechen (rechts) von alloy 625, alloy 800 H und alloy C-276



Anhang 29: Probenentnahmepläne für die zerstörende Prüfung der V-Nähte an den 17 mm dicken Blechen des X8Ni9



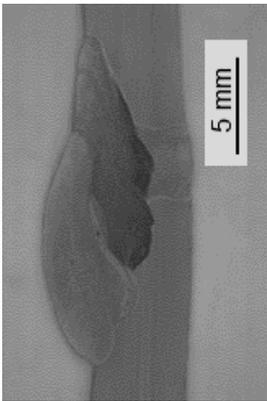
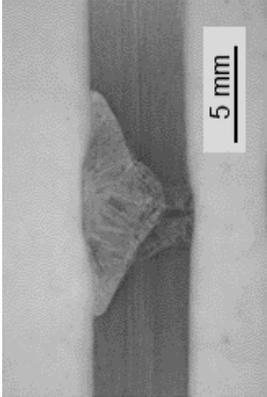
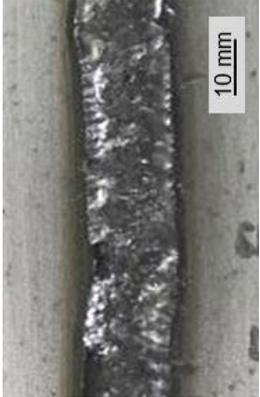
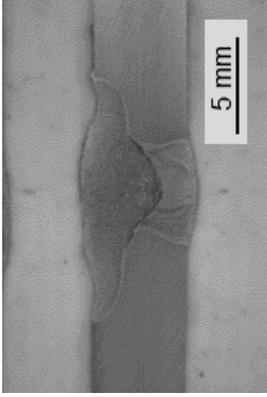
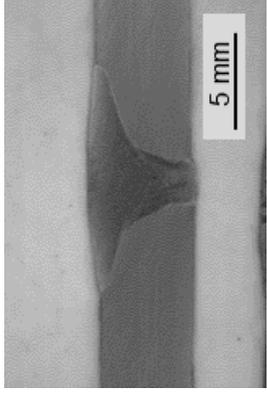
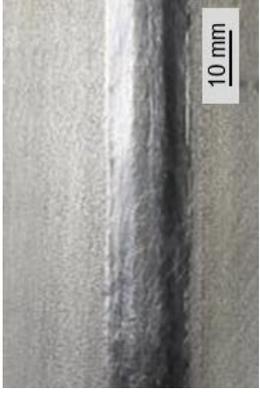
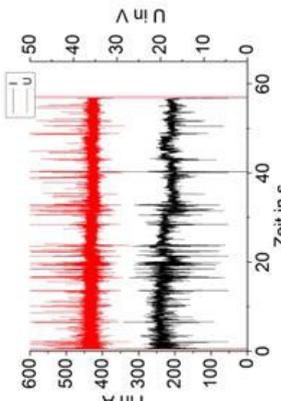
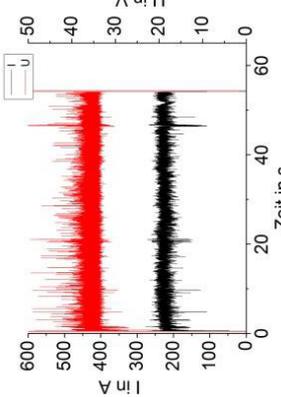
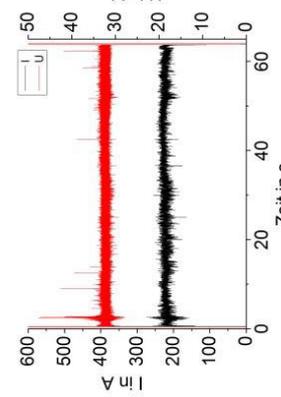
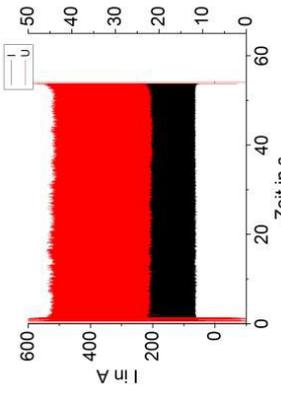
Anhang 30: Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung der V-Nähte an den 5 mm und 12/14 mm dicken Blechen

Blechdicke [mm]	Unregelmäßigkeiten nach DIN EN ISO 6520-1:2007 [86] und Bewertung nach DIN EN ISO 5817:2014 [14]																Bewertungsgruppe B				
	5	12/14	5	12/14	5	12/14	5	12/14	5	12/14	5	12/14	5	12/14	5	12/14			5	12/14	
Grundwerkstoff/ Drahtelektrode	104 Endkrater-riss	2011 Pore	2012 Gleichmäßige Poren	2016 Schlauch-Pore	301 Schlacke-einschluss	401 Binde-fehler	501 Einbrand-kerbe	5013 Wurzel-kerbe	5041 Wurzel-über-höhung												
alloy 625																					
T Ni 6625 B	-	-	x	x	-	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	e.	n. e.	
T Ni 6625 P*	-	x	x	x	-	-	-	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	n. e.	n. e.	
T Ni 6625 P**	-	-	x	x	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	e.	n. e.	
S Ni 6625	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	n. e.	e.	
alloy 800 H																					
T Ni 6083 B	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	n. e.	e.	
T Ni 6083 R	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	e.	e.	
T Ni 6082 R	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	e.	e.	
T Ni 6182 P	-	-	x	x	-	-	-	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-	x	n. e.	n. e.	
S Ni 6082	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	e.	e.	
alloy C-276																					
T Ni 6276 B	x	-	-	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	x	-	-	-	x	n. e.	e.	
T Ni 6276 P	-	-	x	x	-	-	-	x	x	x	x	-	x	x	-	-	-	-	n. e.	n. e.	
S Ni 6276	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	e.	e.	

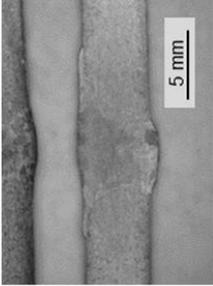
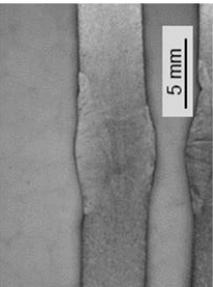
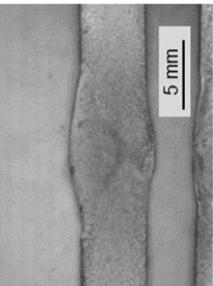
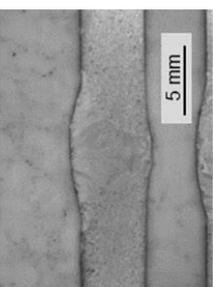
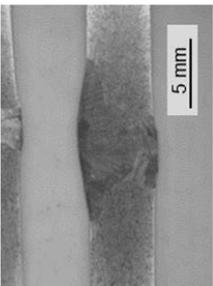
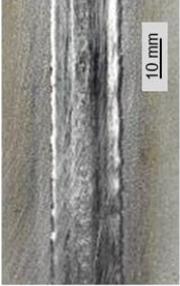
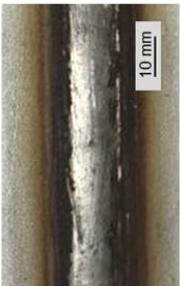
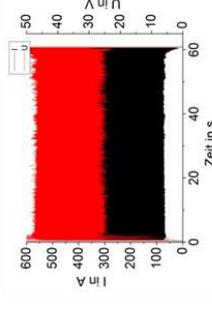
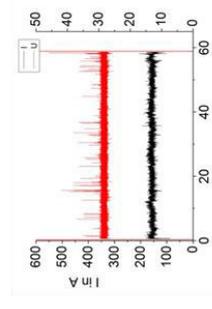
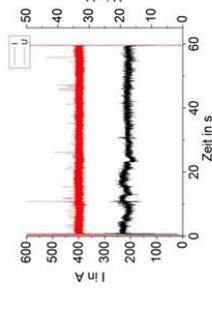
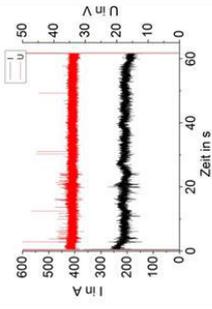
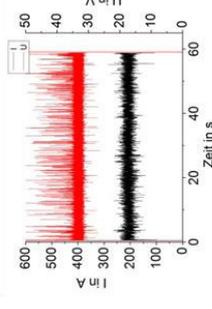
e. = erfüllt

n. e. = nicht erfüllt

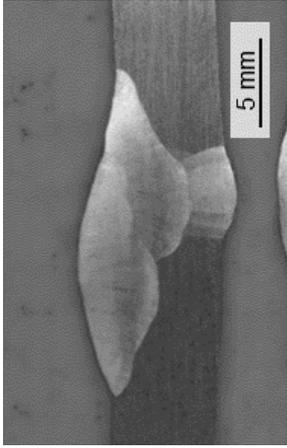
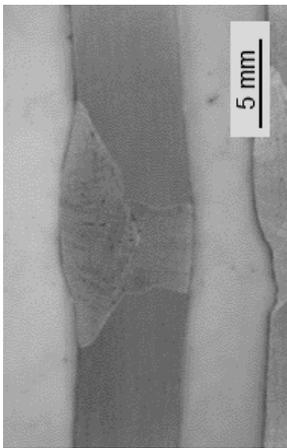
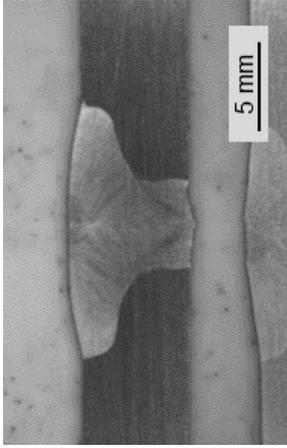
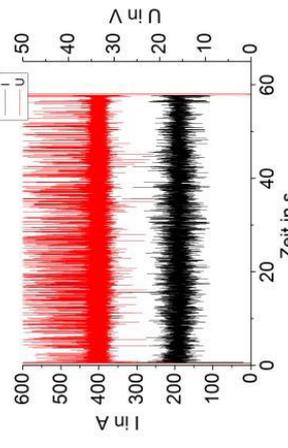
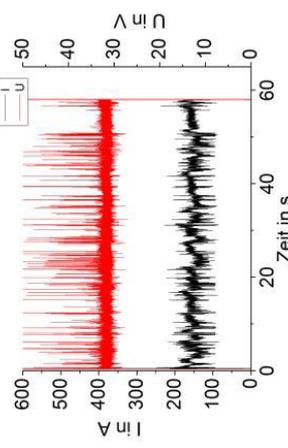
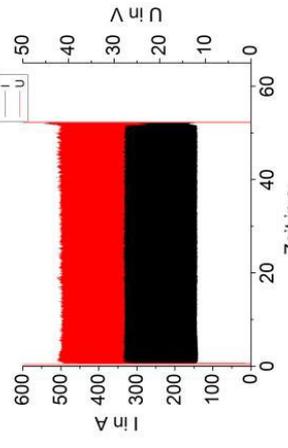
Anhang 31: Querschliffe, Nahtoberflächen und Schweißparameter der V-Nähte mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6625 an den 5 mm dicken Blechen

T Ni 6625 B	T Ni 6625 P*	T Ni 6625 P**	S Ni 6625
 	 	 	 
			
$v_D = 10 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 202-209 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 31,8 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 7,7-7,9 \text{ kJ/cm}$ Raupenzahl = 3	$v_D = 10 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 207 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 31,4 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 7,8 \text{ kJ/cm}$ Raupenzahl= 2	$v_D = 10 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 204 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 28,9 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 6,9 \text{ kJ/cm}$ Raupenzahl= 2	$v_D = 8 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 170 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 31,5 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 4,5 \text{ kJ/cm}$ Raupenzahl= 2

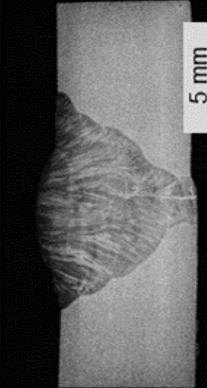
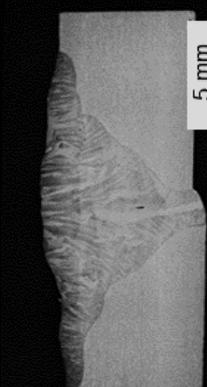
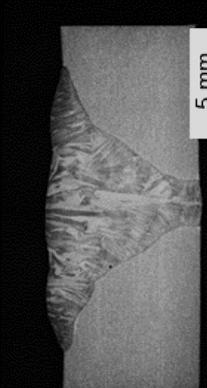
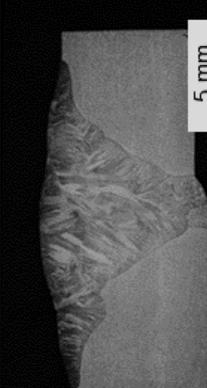
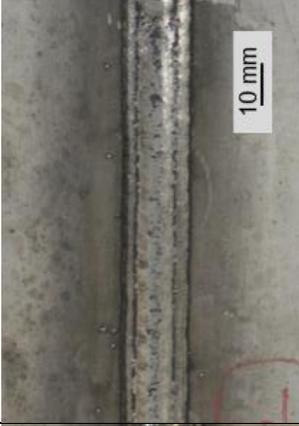
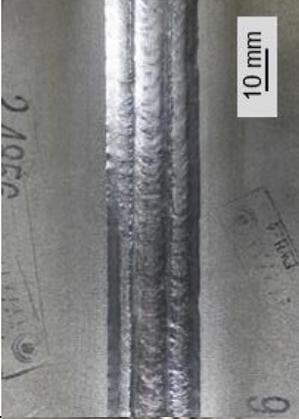
Anhang 32: Querschliffe, Nahtoberflächen und Schweißparameter der V-Nähte mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6082, Ni 6083 und Ni 6182 an den 5 mm dicken Blechen

	S Ni 6082	T Ni 6182 P	T Ni 6082 R	T Ni 6083 R	T Ni 6083 B
					
					
					
	$v_D = 8 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 182 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 32,2 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 7 \text{ kJ/cm}$ Raupenzahl= 2	$v_D = 7,5 \text{ m/min}$ $v_S = 35 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 131 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 25,5 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 5,7 \text{ kJ/cm}$ Raupenzahl= 2	$v_D = 10 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 205 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 30 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 7,5 \text{ kJ/cm}$ Raupenzahl= 2	$v_D = 10 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 207 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 30 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 7,5 \text{ kJ/cm}$ Raupenzahl= 2	$v_D = 10 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 205 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 28 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 6,4 \text{ kJ/cm}$ Raupenzahl= 2

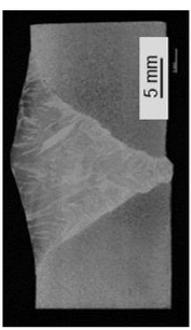
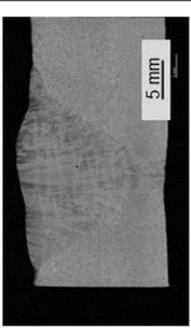
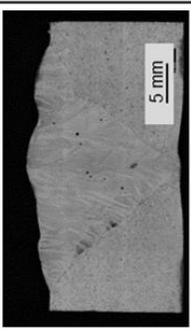
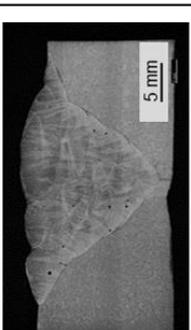
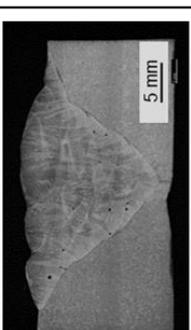
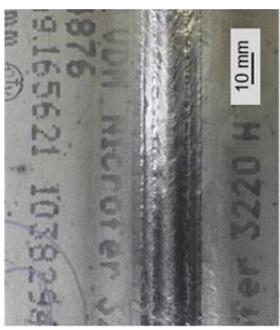
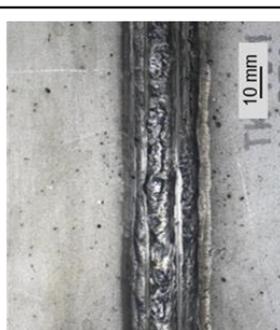
Anhang 33: Querschliffe, Nahtoberflächen und Schweißparameter der V-Nähte mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6276 an den 5 mm dicken Blechen

T Ni 6276 B	T Ni 6276	S Ni 6276
 	 	 
		
<p>VD = 10 m/min VS = 50 cm/min I_{m,SSQ} = 177 A U_{m,SSQ} = 30 V E_{m,SSQ} = 6,4 kJ/cm Raupenanzahl= 3</p>	<p>VD = 8 m/min VS = 35 cm/min I_{m,SSQ} = 144 A U_{m,SSQ} = 26 V E_{m,SSQ} = 6,4 kJ/cm Raupenanzahl= 2</p>	<p>VD = 8 m/min VS = 50 cm/min I_{m,SSQ} = 174 A U_{m,SSQ} = 33 V E_{m,SSQ} = 6,9 kJ/cm Raupenanzahl= 2</p>

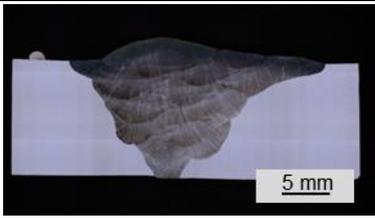
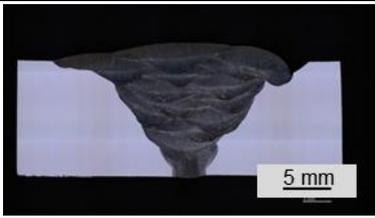
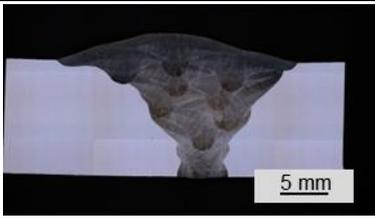
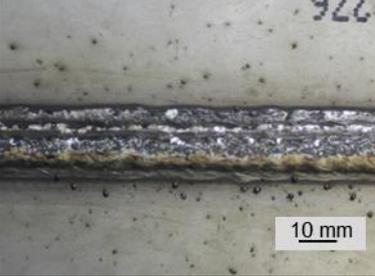
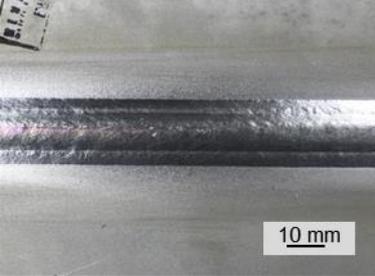
Anhang 34: Querschliffe, Nahtoberflächen und Schweißparameter der V-Nähte mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6625 an den 12 mm dicken Blechen von alloy 625

T Ni 6625 B	T Ni 6625 P*	T Ni 6625 P**	S Ni 6625
			
			
$v_D = 10 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 198\text{-}206 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 31,8 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 7,5\text{-}7,9 \text{ kJ/cm}$ Raupenanzahl= 11	$v_D = 10 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 204\text{-}218 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 31,4 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 7,6\text{-}8,2 \text{ kJ/cm}$ Raupenanzahl= 11	$v_D = 10 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 188\text{-}202 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 28,3 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 6,4\text{-}6,9 \text{ kJ/cm}$ Raupenanzahl= 10	$v_D = 8 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 157\text{-}171 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 31,5\text{-}33,1 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 6,0\text{-}6,8 \text{ kJ/cm}$ Raupenanzahl= 9

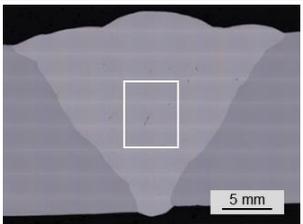
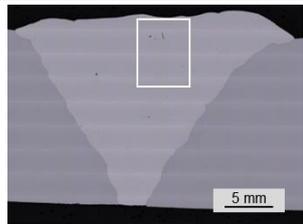
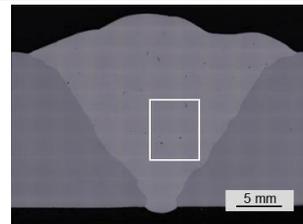
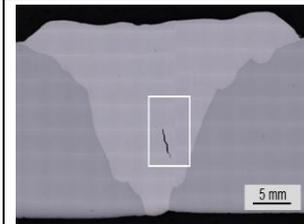
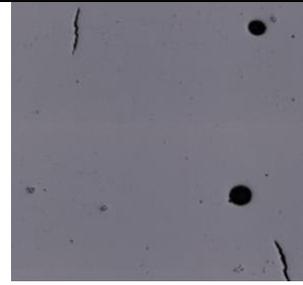
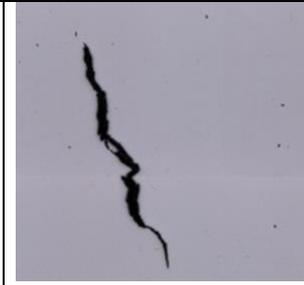
Anhang 35: Querschliffe, Nahtoberflächen und Schweißparameter der V-Nähte mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6082, Ni 6083 und Ni 6182 an den 14 mm dicken Blechen von alloy 800 H

S Ni 6082	T Ni 6182P	T Ni 6082R	T Ni 6083R	T Ni 6083B
				
				
$V_D = 8 \text{ m/min}$ $V_S = 50\text{-}60 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 171\text{-}200 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 32,2\text{-}35,9 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 7,6\text{-}7,3 \text{ kJ/cm}$ Raupenanzahl= 12	$V_D = 7,5 \text{ m/min}$ $V_S = 35 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 125\text{-}139 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 25,5 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 5,5\text{-}6,0 \text{ kJ/cm}$ Raupenanzahl= 17	$V_D = 10 \text{ m/min}$ $V_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 184\text{-}206 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 30,0 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 6,2\text{-}7,4 \text{ kJ/cm}$ Raupenanzahl= 17	$V_D = 10 \text{ m/min}$ $V_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 182\text{-}194 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 30,0 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 6,5\text{-}7,0 \text{ kJ/cm}$ Raupenanzahl= 18	$V_D = 10 \text{ m/min}$ $V_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 180\text{-}231 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 31,0 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 6,7\text{-}8,6 \text{ kJ/cm}$ Raupenanzahl= 20

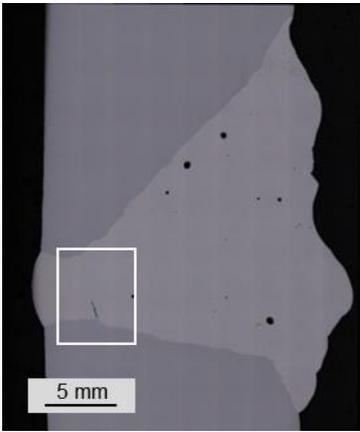
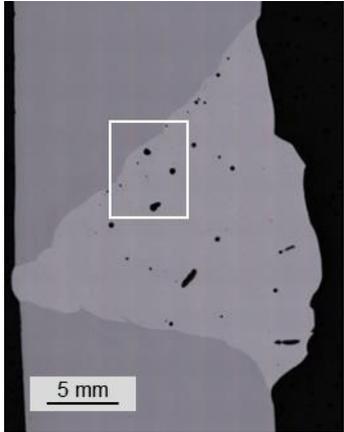
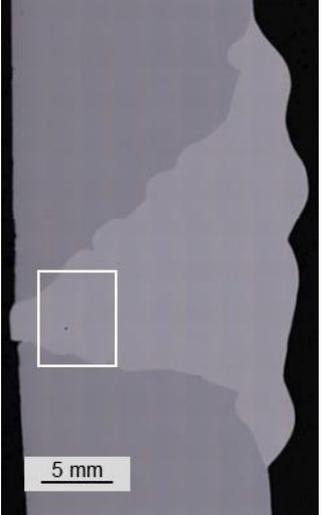
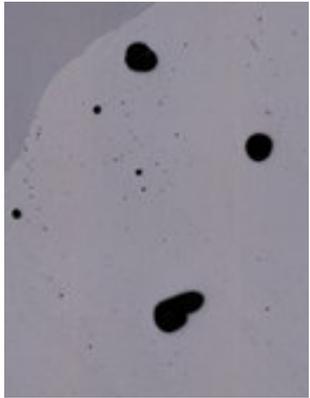
Anhang 36: Querschliffe, Nahtoberflächen und Schweißparameter der V-Nähte mit den SZW vom Typ Ni 6276 an den 12 mm dicken Blechen von alloy C-276

T Ni 6276 B	T Ni 6276 P	S Ni 6276
		
		
$v_D = 10 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 169-188 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 30,0 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 6,0-6,8 \text{ kJ/cm}$ Raupenanzahl = 10	$v_D = 8 \text{ m/min}$ $v_S = 35 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 118-144 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 26,0 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 5,3-6,4 \text{ kJ/cm}$ Raupenanzahl = 13	$v_D = 8 \text{ m/min}$ $v_S = 50-60 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 160-189 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 29,9-33,0 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 5,0-6,2 \text{ kJ/cm}$ Raupenanzahl = 9

Anhang 37: Querschliffe und Schweißparameter der V-Nähte mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6625 an den 17 mm dicken Blechen des X8Ni9 in PA

T Ni 6625 B	T Ni 6625 P*	T Ni 6625 P**	S Ni 6625
			
			
$v_D = 10 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 177-208 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 30,4-30,7 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 6,5-7,7 \text{ kJ/cm}$ LiBo-Stabilität: mittel Raupenanzahl = 11	$v_D = 10 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 186-211 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 27,9-28,1 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 6,3-7,1 \text{ kJ/cm}$ LiBo-Stabilität: gut Raupenanzahl = 16	$v_D = 10 \text{ m/min}$ $v_S = 45 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 172-195 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 25,0-25,7 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 5,9-6,5 \text{ kJ/cm}$ LiBo-Stabilität: gut Raupenanzahl = 15	$v_D = 8 \text{ m/min}$ $v_S = 50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 183-207 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 27,7-32,1 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 6,6-7,5 \text{ kJ/cm}$ LiBo-Stabilität: gut Raupenanzahl = 16

Anhang 38: Querschliffe und Schweißparameter der V-Nähte mit den Schweißzusätzen vom Typ Ni 6625 an den 17 mm dicken Blechen des X8Ni9 in PC

T Ni 6625 P*	T Ni 6625 P**	S Ni 6625
		
		
<p> $v_D = 6 \text{ m/min}$ $v_S = 45-50 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 133-155 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 26,0 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 4,1-5,3 \text{ kJ/cm}$ LiBo-Stabilität: mittel Raupenanzahl= 26 </p>	<p> $v_D = 6 \text{ m/min}$ $v_S = 40 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 145-156 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 25,0 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 5,4-5,9 \text{ kJ/cm}$ LiBo-Stabilität: gut Raupenanzahl= 23 </p>	<p> $v_D = 6 \text{ m/min}$ $v_S = 40 \text{ cm/min}$ $I_{m,SSQ} = 131-148 \text{ A}$ $U_{m,SSQ} = 25,0 \text{ V}$ $E_{m,SSQ} = 4,9-5,6 \text{ kJ/cm}$ LiBo-Stabilität: gut Raupenanzahl= 21 </p>

Anhang 39: Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche an den V-Nähten der 17 mm dicken Bleche aus dem kaltzähem X8Ni9 bei Einsatz der SZW vom Typ Ni 6625

Schweißzusatz	Schweißposition	Kerbschlagarbeit in J bei RT					
		Wert 1	Wert 2	Wert 3	\bar{X}	Δ Max	Δ Min
T Ni 6625 B	PA	50	55	53	53	2	3
T Ni 6625 P**		84	81	82	82	2	1
T Ni 6625 P*		86	81	88	85	3	4
S Ni 6625		199	168	183	183	16	15
T Ni 6625 P**	PC	101	96	-	99	3	3
T Ni 6625 P*		86	90	86	87	3	1
S Ni 6625		178	196	171	182	14	11
X8Ni9	-	300	300	300	300	0	0
Schweißzusatz	Schweißposition	Kerbschlagarbeit in J bei -196 °C					
		Wert 1	Wert 2	Wert 3	\bar{X}	Δ Max	Δ Min
T Ni 6625 B	PA	47	47	43	46	1	3
T Ni 6625 P**		75	73	74	74	1	1
T Ni 6625 P*		74	74	68	72	2	4
S Ni 6625		186	170	170	175	11	5
T Ni 6625 P**	PC	84	74	94	84	10	10
T Ni 6625 P*		72	80	76	76	4	4
S Ni 6625		182	186	174	181	5	7
X8Ni9	-	284	288	284	285	3	1