



Abschlussbericht

BeKaS

zum Verbundforschungsvorhaben:

**„Entwicklung neuer Technologien zur Herstellung
Beschichtungsgerechter Kanten im Schiffbau durch
thermische Bearbeitungsverfahren“**

Teilvorhaben 4

**Entwicklung von Verfahren und Werkzeugen für die
Herstellung beschichtungsgerechter Kanten an
schiffbaulichen Stahlstrukturen durch Bearbeitung mit
modifizierten Plasmaschneidsystemen**

Förderkennzeichen:

3SX238C

Laufzeit:

01.07.2006 – 31.12.2009

Gefördert durch:

Bundesministerium für Bildung und Forschung
Projektträger Jülich - PtJ

Erarbeitet durch:

Fraunhofer Anwendungszentrum Großstrukturen in der Produktionstechnik

Prof. Dr.-Ing. Martin-Christoph Wanner
Dr.-Ing. Knuth-Michael Henkel
Dipl.-Ing. Mario Anders

Inhaltsverzeichnis

Bilderverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Diagrammverzeichnis	VI
1 Kurze Darstellung	1
1.1 Aufgabenstellung.....	1
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	1
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	9
1.4.1 Angaben bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens genutzt wurden	9
1.4.2 Angaben der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste.....	10
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	10
2 Eingehende Darstellung	14
2.1 Erzielte Ergebnisse - Anwendung im Werftbetrieb (AK 100).....	14
2.1.1 Abstimmung und Durchführung betrieblicher Prozessanalysen (AP 110)	14
2.1.2 Entwicklung potentielle Einsatzszenarien (AP120).....	15
2.1.3 Entwicklung von Anlagen- und Logistikkonzepten.....	18
2.2 Erzielte Ergebnisse - Entwicklung des Verfahrens und Werkzeuges zur Herstellung beschichtungsgerechter Kanten an schiffbaulichen Stahl-strukturen durch Bearbeitung mit modifizierten Plasmaschneid-systemen (AK 400).....	22
2.2.1 Definition Ausgangszustand, Lastenheft zur Verfahrensentwicklung modifizierter Plasmaschneidsysteme (AP 410).....	22
2.2.2 Experimentelle Untersuchungen zur Beeinflussung praxisrelevanter Plasmaschneidbögen innerhalb existierender Verfahrensgrenzen mittels Variation von Gas, UW / Luft-Einsatzszenarien, Brennereinstellungen- und varianten (AP 420).....	24
2.2.3 Entwicklung von Methoden zur gezielten Modulation von Plasmabögen mittels Düsenvariation, Kombination mit Aktoren, Magnetfeldern und Schneid-/ Fokussiergasen (AP 430).....	37
2.2.4 Entwicklung bzw. Adaption und Bau von Systemen zur gezielten Modulation des Plasmalichtbogens zum Kantenrunden (AP 440)	48

2.2.5 Experimentelle Untersuchungen von Schneidbrennervarianten und Schnittkantenparametern durch den Einsatz spezieller Systeme zur Modulation des Plasmalichtbogens (AP 450)	51
2.2.6 Entwicklung von Anlagenkonzepten zur Einbindung spezieller Plasmaschneidsysteme in bestehende Anlagen (AP 460).....	69
2.2.7 Experimentelle Untersuchungen zur Einbindung der entwickelten bzw. adaptierten Systeme in Standard-Schneidanlagen (AP 470)	70
2.2.8 Anwendungserprobung und Feldversuche unter werftnahen Bedingungen (AP 480).....	72
2.3 Voraussichtlicher Nutzen	74
2.4 Paralleler Fortschritt anderer Stellen auf dem Forschungsgebiet.....	74
2.5 Veröffentlichung der Ergebnisse	75
3 Zusammenfassung	V
Literaturverzeichnis	V
Anhang	VII

Bilderverzeichnis

Bild 1: Vermeiden von scharfen Kanten aus DIN EN ISO 12944-3	2
Bild 2: Manuell geschliffene Kante mittels Winkelschleifer	2
Bild 3: Balkenplan für die Arbeitspakete in den Arbeitskomplexen 100 und 400.....	9
Bild 4: Auszug DVS-Merkblatt 2103	9
Bild 5: Plasmaschneidvarianten mit Wirbelgas	14
Bild 6: Mögliche Lichtbogenvarianten	15
Bild 7: Mögliche verfolgbare Einsatzszenarien	16
Bild 8: Mannlochausschnitt mit Stegen und geräumtes Zuschnittblech auf Kammpalette	18
Bild 9: 3 mögliche Konzepte für das Plasmaschweißverfahren	19
Bild 10: Profilzuschnittroboter mit Autogen- oder Plasmabrenner	20
Bild 11: Plasmabrenner mit versetztem Werkzeug zum thermischen Kantenbearbeiten.....	20
Bild 12: Plasmaschneidportal mit neuem Brennerwechselsystem für nachträgliche Bearbeitung	21
Bild 13: KUKA Roboter KR 15 mit adaptierten Plasmaschneidbrenner am Schweißportal	24
Bild 14: Inverter HiFocus 160i (l.); Plasmagaseinstelleinheit (r.).....	25
Bild 15: Plasmaschneidbrenner PerCut 170 mit Verschleißteilen	25
Bild 16: Einsatzbereiche nach Materialstärke.....	26
Bild 17: Parameter für beste Schnittqualität	26
Bild 18: Schnitte unterschiedlicher Materialdicken S 235 JR.....	27
Bild 19: Verringerte Winkelabweichung durch FineFocus ^{PLUS} -Technologie	27
Bild 20: Bauteilunterschiede, HiFocus ^{PLUS} (l.) und HiFocus F (r.)	28
Bild 21: Mögliche Einsatzszenarien	29
Bild 22: Kantenanschmelzung an Ober- und Unterkante	30
Bild 23: V-Form eines Plasmaschnittes	30
Bild 24: Konvexe Schnittoberkante durch Wirbelgasverringering	31
Bild 25: Koordinatensystem mit Bezeichnung der Einstellparameter	31
Bild 26: Plasmaschneiden an Luft auf Brenntisch.....	32
Bild 27: Ar/H ₂ -Wasserstoffschnitt: Querschnitte (l.), Schnittflächen (r.).....	33
Bild 28: Argon-Wasserstoffschnitt: Querschnitte (l.), Schnittflächen (r.)	34
Bild 29: Stickstoffschnitt: Querschnitte (l.), Schnittflächen (r.).....	34
Bild 30: Sauerstoffschnitt: Querschnitte (l.), Schnittflächen (r.)	35
Bild 31: Argon-Wasserstoff Schnitt $\beta=30^\circ$: Querschnitt (l.), Schnittfläche (r.)	36
Bild 32: Schliffe von Plasmaschnittkantengeometrien durch Parametervariationen.....	37
Bild 33: Schliffe von Plasmachnittkanten unterschiedlicher Gase	38
Bild 34: Stechend ausgeführter Plasmaschnitt	38
Bild 35: Schliffe von Plasmaschnittkantengeometrien durch Parametervariationen.....	39
Bild 36: Geradschnitt mit Brenneranstellung und Schliffbild der Kantengeometrie	39

Bild 37: Kreisförmiger Ausschnitt mit und ohne Vorwinkel und dazugehörigen Schliffbild	39
Bild 38: Zweistufiger Arbeitsprozess	40
Bild 39: Mittels Plasmaschneidbrenner bearbeitete Kante.....	41
Bild 40: Einfluss des Plasmagases auf Schlackebildung	42
Bild 41: Kantengeometrie bei Nachfahren der Kontur bei nicht geräumten Plattenzuschnitt.....	42
Bild 42: Kantengeometrie beim Fugenhobeln vor dem Schnitt	43
Bild 43: Fasenschnitt mit festhaftender Schmelze	43
Bild 44: Mittels Plasmaschneiden erzielte obere Fase.....	44
Bild 45: Mittels Plasmaschneiden erzielte untere Fase	45
Bild 46: 3-Fasenschnitt	47
Bild 47: Prinzip und Einsatz der Handplasmaschneidanlage der Firma Fronius.....	48
Bild 48: Stromquelle Fa. SBI, Plasmabrenner Fa. Abicor Binzel und Räderwagen Fa. Kjellberg	49
Bild 49: Links alte Düsenform und rechts neue Düsenform.....	49
Bild 50: Brenner mit indirektem Lichtbogen	50
Bild 51: Schneid- und Schweißbrenner in einer Aufnahme	50
Bild 52: Plasmaschneid- und -schweißprozess in einer Aufnahme mit Ergebnis	51
Bild 53: Brennerhaltung β und Brenneranstellung α	52
Bild 54: Bearbeitete Kanten (v. o.) mit gerader, schleppender, stechender Brennerführung.....	52
Bild 55: Unregelmäßigkeiten durch zu große kinetische Energie des Plasmagases.....	53
Bild 56: Brennerstellung zur Blechunter- und Oberkante	53
Bild 57: Mittels Plasmaschweißverfahren gerundete Oberkante.....	54
Bild 58: Mittels Plasmaschweißverfahren gerundete Unterkante.....	55
Bild 59: Schematischer Zusammenhang zwischen Stromstärke und Plasmagas	56
Bild 60: Schweißnaht der Oberkante bei einem Brennerwinkel α von 45°	56
Bild 61: Veränderung des Brennerwinkel α	57
Bild 62: Plasmalichtbogen bei Brennerwinkel α : 45° (li.), 110° (re.).....	57
Bild 63: Schematische Darstellung der Winkel.....	58
Bild 64: Ergebnis der optimierten Brennerstellung.....	58
Bild 65: Kantenumschmelzung mittels gepulsten Lichtbogen mit R=2 mm und v=1,5 m/min	58
Bild 66: Kantenumschmelzungen mit unterschiedlichen Gasvariationen	59
Bild 67: Kantenumschmelzung mit fallender Bearbeitungsrichtung	59
Bild 68: Bearbeitung von stehenden Blechen mit vertikalen und horizontalen Mannlöchern.....	60
Bild 69: Brenner PB-S75 WI mit indirektem Lichtbogen und neuen Komponenten.....	61
Bild 70: Neue Düsen mit ersten Auswaschungen und deren Weiterentwicklung.....	61
Bild 71: Kantenumschmelzung mittels indirektem Lichtbogen	61
Bild 72: Brennerzustellung und Ergebnis mit Schliff	62

Bild 73: Untersuchungen an geraden Konturen zur Einbindung entwickelter Systeme	70
Bild 74: Wasserlauflöcher mit $R=35$ mm	70
Bild 75: Brenner von oben an der Unterkante	70
Bild 76: Unterschied der Düsengeometrie mit Verschmelzung an den langen Düsen ...	71
Bild 77: Demonstratorblech mit derzeit verwendeten Geometrien.....	71
Bild 78: Möglichkeit der Qualitätskontrolle der bearbeiteten Kanten	72
Bild 79: Schneidroboter mit appliziertem Plasmabrenner zum thermischen Bearbeiten	73
Bild 80: Demonstratorbauteil für das thermische Kanterunden mit dem Plasmaschweißverfahren in der Profilschneidanlage	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitskomplexe und Arbeitspakete	4
Tabelle 2: Verbundpartner.....	11
Tabelle 3: Erläuterung der Einsatzszenarien aus Bild 7.....	16
Tabelle 4: Arbeitsschritte Einsatzszenarien der nachgelagerten Kantenbearbeitung ...	21
Tabelle 5: Übersicht der zu untersuchenden Szenarien.....	23
Tabelle 6: Materialdicken bei unterschiedlichen Schneidtechnologien	28
Tabelle 7: Beschreibung der Einsatzszenarien.....	29
Tabelle 8: Schneiddatenübersicht	32
Tabelle 9: Vorläufige Ergebnisse mittels Plasmaschneidverfahren aus AP 420/430	46
Tabelle 10: Zusammenstellung Streckenenergie, Härtewerte, Kohlenstoffäquivalent ...	64
Tabelle 11: Plasmaschweißen 1	65
Tabelle 12: Plasmaschweißen 2	66
Tabelle 13: Plasmaschweißen 3	66
Tabelle 14: Plasmaschneiden 1	67
Tabelle 15: Plasmaschneiden 2	67
Tabelle 16: Plasmaschneiden 3	68
Tabelle 17: Kombination Plasmaschneiden und Plasmaschweißen	68

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Härteverläufe an Schnitte und Fasen unterschiedlicher Verfahren.....	63
Diagramm 2: Einblick in die Härteverläufe unterschiedlicher Stähle und Verfahren	63

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

In dem Verbundvorhaben BeKaS soll ein Verfahren und / oder Werkzeug entwickelt werden, dass die manuellen spanenden Kantennachbearbeitung im Schiffbau zum Zweck der Beschichtungsvorbereitung an ebenen plattenförmigen Bauteilen durch eine hocheffektive thermische Bearbeitung mittels Laser- oder Plasmastrahl ersetzt. Dabei werden Korrosionsuntersuchungen verschiedener Beschichtungssysteme und Geometrien an Kanten durchgeführt, um die Anwendbarkeit dieser neuen Verfahren nachweisen zu können. Darüber hinaus werden Möglichkeiten und Voraussetzungen einer kostenoptimalen Integration in den schiffbaulichen Fertigungsprozess untersucht.

Angesichts vergleichsweise hoher Lohnkosten in Deutschland können die Ergebnisse dieses Vorhabens entscheidend dazu beitragen, dass die Schiffbauindustrie die tendenziell wachsenden Anforderungen von Seiten der Behörden und der Schifffahrt an den Korrosionsschutz und damit an die Oberflächenvorbereitung auch zukünftig kostendeckend und in hoher Qualität erfüllen kann.

Im Rahmen des Teilvorhabens 4 sollen verfahrenstechnische Voraussetzungen für modifizierte Plasmaschneidsysteme und –schweißsysteme ermittelt und eine optimale Prozeßintegration des plasmaschneid- und -schweißgestützten Rundens plattenförmiger Bauteile in den schiffbaulichen Fertigungsprozeß unter werftnahen Bedingungen erzielt werden.

Dazu sollen systematische Plasmabogenuntersuchungen mit verschiedenen Modulationsvarianten durchgeführt und als Funktionsparameter in existierenden und neuartigen Brennerkonfigurationen getestet werden. Anschließend wird die Funktionsfähigkeit der entwickelten Plasmaschneidmodule in ausgewählten Schneidanlagen nachgewiesen.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Ökonomische und ökologische Aspekte, insbesondere der Korrosionsschutz spielen über den gesamten Lebensdauerzyklus eines Schiffes eine bedeutende Rolle. Ausschlaggebend für eine beständige Konservierung ist eine konstante Beschichtungsdicke. In der DIN EN ISO 12944-3 sind Empfehlungen zum vermieden scharfer Kanten angegeben Bild 1.

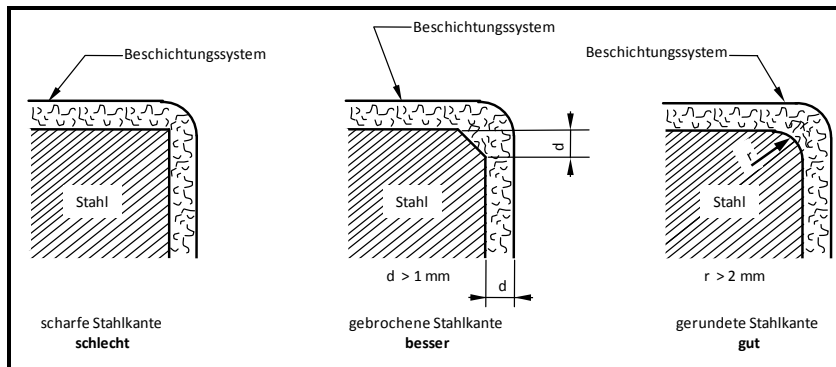


Bild 1: Vermeiden von scharfen Kanten aus DIN EN ISO 12944-3

Um die geforderte Beschichtungsdicke an freien Körperkanten zu gewährleisten, müssen diese gebrochen werden. Ein Fertigungsschritt der heute weltweit durch manuelle mechanische Bearbeitung realisiert wird. Derzeit wird die Kante manuell mittels Winkelschleifer, speziellen Fasenschleifer und mobilen Kantenfräsmaschinen von den Werkern nach subjektiven Eindrücken geschliffen. In Bild 2 ist eine fertig geschliffene Blechkante zu sehen, die aufgrund manueller Bearbeitung eine neue Kante hervorbringt.

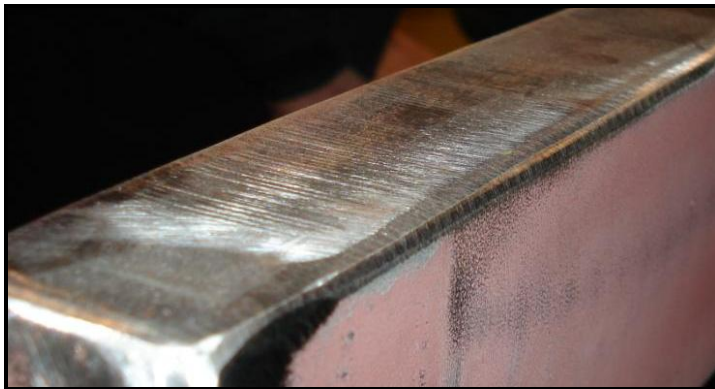


Bild 2: Manuell geschliffene Kante mittels Winkelschleifer

Begründet wird dies durch verschiedene Einflussfaktoren:

o Steigende wirtschaftliche Konkurrenz in der maritimen Industrie

Der Anteil von freien Körperkanten die beschichtungsgerecht ausgeführt werden müssen, ist abhängig von der Schiffsgröße, dem Schiffstyp und der Bauweise des Schiffes. So können für ein mittelgroßes Containerschiff etwa 10000 Stunden für Putz- und Schmirgelarbeiten kalkuliert werden. In Anbetracht der Lohnkosten im europäischen Wirtschaftsraum und der steigenden Schiffbaukapazitäten in Asien, entwickeln sich die angesprochen Putz- und Schmirgelarbeiten zu einem Kostenfaktor, der sich nachteilig auf die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Werften auswirkt.

o Wachsenden Umwelt- und Sicherheitsstandards

Am 1. Juli 2008 trat die von der International Maritime Organisation (IMO) beschlossene Richtlinie „Performance Standard for Protective Coating“ (PSPC) [1] zur Erhöhung der

Schiffssicherheit durch Korrosionsvorbeugung in Kraft. Der PSPC legt unter anderem für Seewasserballasttanks in Schiffsneubauten ab 500 BRZ (Bruttoreaumzahl) ohne Einschränkung des Schiffstyps ein beschichtungsgerechtes Kantenbrechen fest. Diese Norm fordert unter anderem für die Ballastwassertanks aller Schiffstypen und für die Doppelhüllen von Bulkern zukünftig einen Kantenradius für alle „Freien Kanten“ von >2 mm in Anlehnung an die in ISO 12944-3 [2] gegebene Empfehlung. Eine Ausweitung dieses Standards auf weitere Schiffstypen und Bereiche im Schiff ist bereits in Diskussion.

o Bedingt genügende arbeitswissenschaftliche Gesichtspunkte der Putz- und Schmirgelarbeiten an freien Körperkanten

Die Bearbeitung der freien Körperkanten erfolgt in der Regel in erzwungenen Körperhaltungen. Des Weiteren führt die Arbeit mit Winkelschleifern zu erhöhten Lärm- und Staubbelastungen des Werktätigen. Daraus folgend muss eine automatisierte Lösung für das Problem des beschichtungsgerechten Kantenbrechens im europäischen Wirtschaftsraum gefunden werden.

Aufgrund der Erhöhung des Korrosionsschutzstandards durch die IMO kann nach Analyse einiger Werften mit einem Mehraufwand von bis zu 65 % gegenüber der derzeitigen Praxis des Kantenbrechens gerechnet. Angesichts hoher Lohnkosten in Deutschland und Europa wird deutlich, dass bei steigenden Korrosionsschutzanforderungen für das Problem der Kantenbearbeitung dringend eine Lösung gefunden werden muss, die zufrieden stellende Standzeiten der Beschichtung sicherstellt.

Systematische wissenschaftliche Untersuchungen zu den sehr vielschichtigen Zusammenhängen:

- Qualität der Kantenausführung
- Art des Beschichtungssystems
- Technologie der Beschichtungsausführung
- Korrosionsbelastung
- Korrosionsbeständigkeit

sind derzeit nicht vorhanden bzw. für die deutschen Werften nicht zugänglich. Dadurch haben die Werften wenig Spielraum, im konkreten Fall die Sinnhaftigkeit hoher Forderungen von Seiten der Reeder und ihrer Bauaufsichten bzw. der Farbenhersteller einschätzen zu können oder überhöhte Forderungen abzumildern. Nicht selten wird von Auftraggeberseite versucht, die Verwendung eines preiswerteren Farbauftrags durch mehr Aufwand in der Oberflächenvorbereitung zu kompensieren, was dann im Regelfall zu Lasten der Werften geht. Der eindeutige wissenschaftliche Beweis zur Notwendigkeit einer Kantenrundung größer 2 mm für die im maritimen Bereich eingesetzten Beschichtungssysteme existiert derzeit nicht. Die Erfahrungen deutscher Werften zeigen demgegenüber, dass bei nur gebrochenen Kanten und ordnungsgemäßer Farbabplikation („Vorlegen“) solche extrem korrosionsbelasteten Schiffsbereiche wie Ballastwassertanks noch nach vielen Jahren Schiffsbetrieb keinerlei Korrosion zeigen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben ist in folgende Arbeitskomplexe und Arbeitspakete gegliedert.

Tabelle 1: Arbeitskomplexe und Arbeitspakete

Arbeitskomplex 100	Anwendung im Werftbetrieb
Zeitplan	PS bis PS + 30 Monate
	Untersuchung der optimalen Prozessintegration neuer thermischer Verfahren zur Kantenbearbeitung plattenförmiger Bauteile sowie deren Anforderungen an Anlagentechnik und Arbeitsvorbereitung unter den Bedingungen verschiedener Schiffstypen und Werften
Arbeitspaket 110	Abstimmung und Durchführung betrieblicher Prozessanalysen
Zeitplan	PS bis PS + 6M
Aufgaben / Lösungsweg	- Strukturierung / Zusammenfassung der anlagenseitigen Plasmaschneidprozeßparameter am Beispiel des Zuschnitts P-UW und P-L - Quantitative Erfassung ausgewählter Schnittkantenparameter
Ergebnisse	- Erfassung der technischen Randbedingungen der praxisseitig eingesetzten Plasmaschneidverfahren
Arbeitspaket 120	Entwicklung potentielle Einsatzszenarien
Zeitplan	PS + 4M bis PS +10M
Aufgaben / Lösungsweg	- Entwicklung / Strukturierung von grundsätzlichen Einsatzszenarien der Kombination / Überlagerung der gegenwärtigen Zuschnittechnologie mit modifizierten Plasmaschneidsystemen (z.B. Automatisierbarkeit, Strahlbeeinflussung von vorhandenen Systemen) für den Praxiseinsatz in Abstimmung mit den Praxispartnern - Definieren von Einsatzszenarien für verschiedene Werfttypen und Materialdicken, -konturen
Ergebnisse	- Konzeption für den Einsatz neuartiger Techniken bei der plasmaschneidseitigen Kantenbearbeitung im schiffbaulichen Zuschnitt
Arbeitspaket 130	Entwicklung von Anlagen- und Logistikkonzepten
Zeitplan	PS + 13M bis PS + 22M
Aufgaben / Lösungsweg	- Simulation von Anlagenkonzeptvarianten für Plasmaschneidsysteme hinsichtlich einer Integration in den Zuschnitt (Ober-, Unterkante gleichzeitig mit einem Werkzeug bzw. nur Oberkante, auch als Werkzeugkombination) bzw. als Nachbearbeitung nach dem Zuschnitt oder im Sektionsbau als technologische Prozeßsimulation (EM-Workplace) mit

	<p>Visualisierung, Prozeßzeiten und simulativen Nachweis der Produktivität</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aufstellen eines Lastenheftes für Anlagenhersteller mit der Definition fertigungstechnischer Anforderungen an zu entwickelnde modifizierte Plasmaschneidsysteme entsprechend der jeweilig existierenden Anlage- und Logistikkonzepten der Anwender
Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung der Realisierbarkeit der Einsatzszenarien für den Werfteinsatz aus fertigungstechnischer und transportlogistischer Sicht
Arbeitskomplex 400	Entwicklung des Verfahrens und Werkzeuges zur Herstellung beschichtungsgerechter Kanten an schiffbaulichen Stahlstrukturen durch Bearbeitung mit modifizierten Plasmaschneidsystemen
Zeitplan Gesamt	PS bis PS + 30 Monate
Gesamtziel	Schaffung der verfahrenstechnischen Voraussetzungen für den Einsatz von modifizierten Plasmaschneidsystemen vorzugsweise für die Kantenbearbeitung während des Zuschnittes oder alternativ für die Nachbearbeitung
Arbeitspaket 410	Definition Ausgangszustand, Lastenheft zur Verfahrensentwicklung modifizierter Plasmaschneidsysteme
Zeitplan	PS bis PS + 2M
Aufgaben / Lösungsweg	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung der Potentiale existierender Plasmaschneidsysteme in laborseitigen und praxisseitigen Entwicklungen - Ermittlung geeigneter Schneid- und Verfahrensvariationen sowie Anlagenkonzepten zur Einbindung in Schneidanlagen, Abgleich mit externen Entwicklern und Praxispartnern und Umsetzung der Anforderungen in das Lastenheft
Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> - Definition der Vorgaben zur Verfahrensentwicklung und -adaption modifizierter Plasmaschneidsysteme
Arbeitspaket 420	Experimentelle Untersuchungen zur Beeinflussung praxisrelevanter Plasmaschneidbögen innerhalb existierender Verfahrensgrenzen mittels Variation von Gas, UW / Luft-Einsatzszenarien, Brenneinstellungen- und varianten
Zeitplan	PS + 3M bis PS + 10M
Aufgaben / Lösungsweg	<ul style="list-style-type: none"> - Experimentelle Variation von Plasmaschneidvarianten (direkter Lichtbogen an Luft / UW, mit und ohne Sekundärgas) mit handelsüblichen Brennerdüsen- und Katodenvarianten sowie Gasart- und Stromstärkenvariation zur Ermittlung geeigneter Bögen hinsichtlich Bartfreiheit und Kantenrundungspotential - Abgleich der Ergebnisse mit Erfahrungswerten der Projektpartner und existierenden Forschungsansätzen / Prognosen

Ergebnisse	- Geeignete Systemeinstellungen innerhalb existierender Verfahrensvarianten und Schneidparameter zum Kantenrunden und Eingangsparameter für Verfahrensmodifikationen
Arbeitspaket 430	Entwicklung von Methoden zur gezielten Modulation von Plasmabögen mittels Düsenvariation, Kombination mit Aktoren, Magnetfeldern und Schneid-/ Fokussiergasen
Zeitplan	PS + 5M bis PS + 10M
Aufgaben / Lösungsweg	- Entwicklung experimenteller Methoden zur gezielten Beeinflussung von Plasmaschneidbögen mit verschiedenen Düsenvarianten, mit transienten Lageveränderungen der Plasmabrenner über piezoelektrische Aktoren und variablen Magnetfeldern - Kombination der geräteseitigen Bogenmodulationen mit geeigneten Schneid-, Fokussiergasen und Stromstärkevariationen / -pulsungen
Ergebnisse	- Methoden zur gezielten Modulation von Plasmabögen zum Kantenrunden und Schaffung von Voraussetzungen für Eingangsparameter für Verfahrensmodifikationen
Arbeitspaket 440	Entwicklung bzw. Adaption und Bau von Systemen zur gezielten Modulation des Plasmalichtbogens zum Kantenrunden
Zeitplan	PS + 8M bis PS + 10M
Aufgaben / Lösungsweg	- Entwicklung und Bau von geräteseitigen Systemen (Brennerköpfe, Aktoren, Magnete) und Gestaltung von Parametereinstellungen (Stromstärke, Schneid- / Fokussiergase), die weitgehend mit handelsüblichen Brennern und Stromquellen kompatibel sind - Abgleich und Schnittstellenüberwachung mit Brennerherstellern
Ergebnisse	- geräte- und parameterseitige Voraussetzungen zum Kantenrunden im Labormaßstab
Arbeitspaket 450	Experimentelle Untersuchungen von Schneidbrennervarianten und Schnittkantenparametern durch den Einsatz spezieller Systeme zur Modulation des Plasmalichtbogens
Zeitplan	PS + 11M bis PS + 24M
Aufgaben / Lösungsweg	- experimentelle Untersuchungen von Schneidbrennervarianten, mit denen über Piezoaktoren den thermischen, elektrischen und magnetischen Beeinflussungen gezielt horizontale und vertikale translatorische Bewegungen überlagert werden, um einen definierten einseitigen / zweiseitigen Kantenrundungsprozeß zu unterstützen - regelmäßiger Abgleich der Ergebnisse unter dem Aspekt der Anwendung im Werftbetrieb und den werkstoff- und beschichtungsseitigen Anforderungen

Ergebnisse	- Brennervarianten und Einstellparameter, die im Labormaßstab die Anforderungen an das Kantenrunden beim Trockenplasmaschneiden erfüllen
Arbeitspaket 460	Entwicklung von Anlagenkonzepten zur Einbindung spezieller Plasmaschneidysteme in bestehende Anlagen
Zeitplan	PS + 22M bis PS + 24M
Aufgaben / Lösungsweg	- Entwicklung von technischen und ablauforganisatorischen Möglichkeiten der Einbindung der getesteten Plasmaschneidysteme und der entsprechenden Parametereinstellungen in bestehende und konzipierte Anlagenkonzepte - Abgleich mit den Anforderungen von Praxisanwendern und den speziellen einseitigen / zweiseitigen Bauteilvoraussetzungen zum Kantenrunden
Ergebnisse	- Konzept der Einbindung geeigneter Brennervarianten und Einstellparameter in den Werftbetrieb
Arbeitspaket 470	Experimentelle Untersuchungen zur Einbindung der entwickelten bzw. adaptierten Systeme in Standard-Schneidanlagen
Zeitplan	PS + 25M bis PS + 27M
Aufgaben / Lösungsweg	- technische Einbindung der entwickelten / adaptierten Plasmaschneidysteme in handelsübliche Schneidanlagen - experimentelle Untersuchungen der Eignung der entwickelten Systeme und Einstellparameter im Zusammenspiel mit den existierenden Schneidanlagen und praxisorientierten Materialgeometrien und -beschichtungen - Kooperation mit Praxisanwendern zur technischen Umsetzung des Kantenrundens unter praxisnahen Bedingungen und einseitigen / zweiseitigen Bauteilvoraussetzungen
Ergebnisse	- Ermittlung der Eignung adaptierter Plasmaschneidysteme für die Kombination mit handelsüblichen Plasmaschneidanlagen
Arbeitspaket 480	Anwendungserprobung und Feldversuche unter werftnahen Bedingungen
Zeitplan	PS + 28M bis PS + 30M
Aufgaben / Lösungsweg	- exemplarische technische und logistische Einbindung der entwickelten / adaptierten Plasmaschneidysteme in ausgewählte Schneidanlagen im Werftbetrieb: <ul style="list-style-type: none"> • die in AP 470 ermittelte experimentelle labormäßige Eignung von Plasmazuschnitt und plasmaschneidgestützter Kantenrundung wird auf der Peenewerft als Labormuster an existierende Plasmaschneidysteme appliziert mit Halterungskonstruktion / -fertigung und Steuerungskopplung für ein- und zweiseitige Bearbeitungsvariante

	<ul style="list-style-type: none"> • Schnittstellenabsprache für Erkennung von Freien Kanten und Schweißkanten aus Programmen / Zeichnungen - Ermittlung der Eignung der kombinierten Anlagensysteme für repräsentative Zuschnittaufgaben <ul style="list-style-type: none"> • Auswahl von geeigneten Zuschnittaufgaben zunächst an Testproben, dann an realen Bauteilen mit Konstruktion, Numerik-, Fertigungsbereich der Werft mit Realisierung von Schnitten und Kantenrundungen außerhalb des Schichtbetriebes - Ermittlung der Zeitstandsfähigkeit der Systeme in 24 h-Tests <ul style="list-style-type: none"> • Einbindung des Systems in Probeaufgaben (Testproben) und Serienaufgaben (reale Bauteile) mit mehrere 24 h-Tests unter ständiger Qualitätskontrolle durch Projektmitarbeiter - Abgleich der Ergebnisse mit anderen Verfahrensentwicklungen <ul style="list-style-type: none"> • Auswertung der Prüfergebnisse durch Vergleich der geometrischen, wirtschaftlichen und materialtechnischen Ergebnisse • Bewertung der Ergebnisse im Vergleich der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen technischen Varianten (einseitig, zweiseitig, ein bzw. 2 Zusatzbrenner) mittels Plasmarunden, Vergleich mit den vorhabenrelevanten Lösungen im Laserbereich
Ergebnisse	- Ermittlung der Eignung adaptierter Plasmaschneidsysteme in Kombination mit handelsüblichen Plasmaschneidanlagen für technische und ablauforganisatorische Werftanforderungen am Beispiel der Peenewerft

Im Vorhaben sind insgesamt zwei Meilensteine vorgesehen, um eine ziel- und ergebnisorientierte Bearbeitung zu gewährleisten.

Zum Meilenstein 1 (Projektstart + 10 Monate) ist die Bewertung potentieller Einsatzszenarien von modifizierten Plasmaschneidsystemen aus dem Arbeitspaket 100 abgeschlossen. Weiterhin im Arbeitspaket 400 ist eine Bewertung der abgeschlossenen experimentellen Voruntersuchungen mit Systemen zur gezielten Modulation des Plasmabogens zum Kantenrunden möglich und damit geräte- und parameterseitige Voraussetzungen zum Kantenrunden im Labormaßstab geschaffen.

Zum Meilenstein 2 (Projektstart + 20 Monate) sind Anlagen- und Logistikkonzepte in der Simulation und als Anforderung im Lastenheft aus dem Arbeitspaket 100 nahezu abgeschlossen. Im Arbeitspaket 400 sind die Einstellparameter von modifizierten Plasmabrennervarianten, die im Labormaßstab die Anforderungen an das Kantenrunden erfüllen, ermittelt.

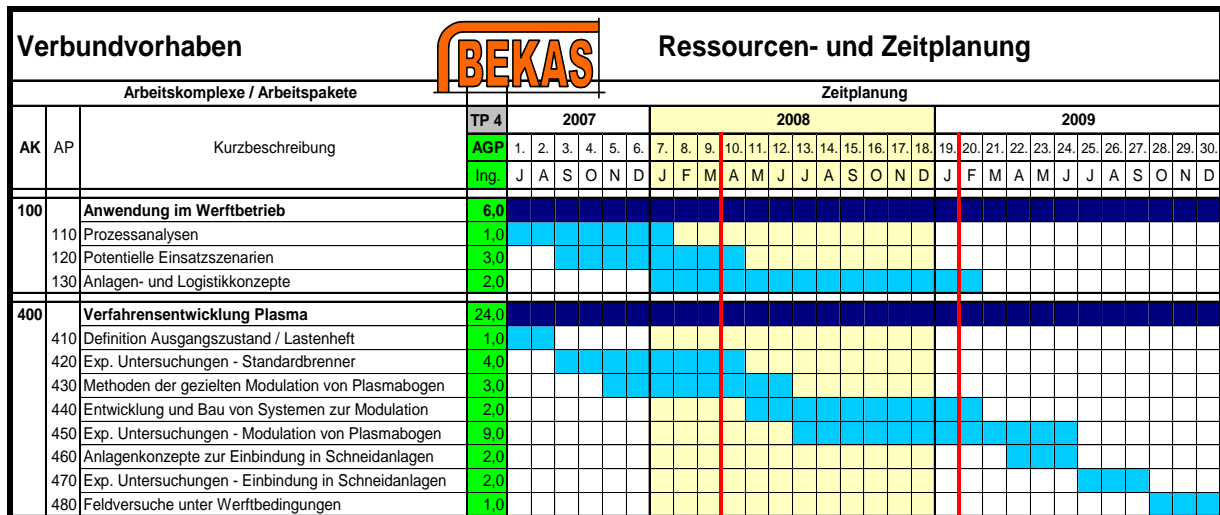


Bild 3: Balkenplan für die Arbeitspakete in den Arbeitskomplexen 100 und 400

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

1.4.1 Angaben bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens genutzt wurden

In dem DVS-Merkblatt 2103 (Bild 4) „Unregelmäßigkeiten und deren Ursachen beim Plasmaschneiden von metallischen Werkstoffen“ [3] sind Wege aufgezeigt mit denen die Schneidtechnologie eine Verrundung im Zuschnitt erreichen kann.

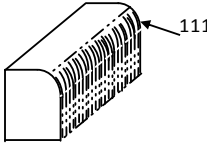
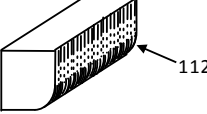
Ordnungsnummer	Benennung	Erklärung	Darstellung	Ursachen/Anmerkung
Gruppe 1				
1	Unregelmäßigkeiten an Schnitkanten	Beschädigungen der Schnittfläche durch Anschmelzung oder Abtragung im Bereich der Schnitkanten		
11	Kantenanschmelzung	Die Schnittkante ist stark abgerundet		
111	Kantenanschmelzung an der Schnitoberkante	Abgerundete Schnitoberkante, die Anschmelzung ist größer als verfahrenstypisch		<ol style="list-style-type: none"> 1 Brennvorschub zu langsam – zu schnell/ Stromstärke zu groß/ Plasmagasgemisch nicht im richtigen Verhältnis 2 Düsenabstand vom Blech zu groß – zu klein – nicht konstant 3 Düse für die zu schneidende Blechdicke zu groß Typisch für das WIP-Schneiden mit Stickstoff als Plasmagas
112	Kantenanschmelzung an der Schnittunterkante	Abgerundete Schnittunterkante, die Anschmelzung ist größer als verfahrenstypisch		<ol style="list-style-type: none"> 1 Brennvorschub zu langsam Tritt nur sehr selten auf

Bild 4: Auszug DVS-Merkblatt 2103

Diese wurden als Ansatz für die Parameterstudien und Verfahrensmodifikationen genutzt. Weiterhin werden Stromquellen und Plasmabrenner mit derzeitig neustem Stand der Technik eingesetzt. Wobei Technologien der Firma Kjellberg, als derzeitigen Marktführer und Technologievorreiter in der Düsentechologie für die Schneidtechnik, sowie Schweißbrenner der Firma Abicor Binzel, eingesetzt wurden. Diese sollten in dem Vorhaben modifiziert werden, um während oder nach dem Zuschnitt eine Kantenverrundung zu erzielen. Die auf den Werften vorhandene Schneidtechnologie, Schneidportale und Schweißapplikationen sollten nach Möglichkeit mit geringem Aufwand an Umbaumaßnahmen für den Einsatz des Verfahrens genutzt werden.

Statistische Untersuchungen, sowie dazugehörige Korrosionsuntersuchung an thermisch behandelten Kanten zur beschichtungsgerechten Vorbereitung stellen technisches und wissenschaftliches Neuland dar. Diese Untersuchungen können dazu beitragen den nicht wissenschaftlich bewiesenen Radius von 2 mm an Kanten zur beschichtungsgerechten Vorbereitung zu widerlegen und den Einsatz von thermisch gerundeten Kanten gebrauchstauglich zu machen. Dies soll dabei zu anderen möglichen Kantengeometrien anregen, die im Verbundvorhaben zusätzlich untersucht werden.

1.4.2 Angaben der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Informationen zum derzeitigen Stand der Werften wurden in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern ermittelt und nehmen Bezug auf die Vorschriften der Klassifikationsgesellschaften, wie zum Beispiel der projektbegleitende DNV. Die von der IMO (International Maritim Organisation) beschlossene Richtlinie (PSPC-„Performance Standard for Protective Coating“) bildete die Basis für alle Klassifikationsvorschriften und kann daher zur Auslegung und Informationsbeschaffung herangezogen werden.




Zur Recherche bestehender Konzepte für die Schnittkantenbearbeitung– und beeinflussung in der Industrie und auf den wurden neben instituts- und universitätsinternen Materialien und Arbeiten insbesondere folgende Informations- und Dokumentationsdienste genutzt:




- Datenbanken GBV, ZDB, EZB, DBIS, Perinorm Online
- FhG Bibliothek, Universitätsbibliothek Rostock, Patent- und Normenzentrum,
- DPMAREgister

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die im Verbundprojekt enthaltenen Teilvorhaben sind thematisch abgestimmt und ergänzen sich inhaltlich und fachlich. Die Durchführung erfolgt in enger Zusammenarbeit zwischen den Verbundpartnern. Die Verbundpartner sind im Einzelnen:

Tabelle 2: Verbundpartner

	<p>CMT e.V.</p> <ul style="list-style-type: none"> - FuE-Koordinierung und -Projektmanagement für die deutsche Schiffbauindustrie (EU, diverse nationale Programme) - FuE-Projekte zu Beschichtung, innovativen Fügeverfahren, Leichtbau, Fertigungsorganisation und -steuerung, z.T. mit Anwendung statistischer Versuchsplanung (DoE): „DOCKLASER“ (EU 5.FP), „SAND.CORE“ (EU 6.FP), „ECODOCK“; weitere EU-Projekte zu diesen Themen unmittelbar bevorstehend - Forschungsdienstleistungen u.a. auf den Gebieten: Produktionssimulation (z.T. als Unterauftrag im EU-Projekt InterSHIP), Fabrikplanung, DoE
	<p>IMAWIS GmbH</p> <ul style="list-style-type: none"> - investitionsbegleitende Laserschweiß- und –schneidversuche für Anlagenhersteller und Endkunden (z.B. Siemens) + FuE auf dem Gebiet der Lasertechnik für die Aker Yards Germany, MTW Werft + Laser-MSG-Verfahrenszulassung für maritime Applikation durch Germanischen Lloyd erreicht - FuE-Projekte: „Laser- und Laser-MSG-Hybridschweißen für Bleche und Profile aus hoch- und höchstfesten Stählen“ (AiF ProInno II; 2005-07); „Innovativer Leichtbau mit lasergefertigten Deckhausstrukturen“ (BMBF InnoRegio, 2004-06) - Ausstattung mit Laser-Versuchsfeld (5kW CO₂-Laser, 10kW CO₂-Laser)
	<p>Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt M-V GmbH</p> <ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung und Anwendung von Laser-Lichtbogen-Hybridverfahren + Bau von Laser- und Hybrid-Arbeitsköpfen sowie Integration von Festkörperlasertechnik in bestehende schiffbauliche Fertigungsanlagen - nationale und europäische FuE-Projekte zur Lasertechnik im Schiffbau, (Laserschneiden, Laser- und Laserhybridschweißen, Laserpulverauftragschweißen und Laserumschmelzen) - Ausstattung mit 10 kW Faserlaser und geeigneten Bearbeitungsköpfen für den stationären und handgeführten bzw. mechanisierten Einsatz; umfangreiche Laborausstattung der Werkstoffprüfung

 <p>Fraunhofer Anwendungszentrum Großstrukturen in der Produktionstechnik</p>	<p>Fraunhofer IPA AGP</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kooperation mit Lehrstuhl Fertigungstechnik der Universität Rostock - Einbindung in vielfältige Forschungsaktivitäten (mechanische, thermische und klebtechnische Fügeverfahren über AiF (EFB), DVS und BMBF sowie langjährige Kooperation mit den relevanten Schweiß- und Schneidsystemanbietern - langjährige Lehr- und Forschungsaktivitäten im schiffbaulichen Schweißbereich und beim Plasmaschneiden kerntechnischer Anlagen - Ausstattung mit Schweißlabor (Plasma- und Autogenschneidanlagen), Prüflabor für Verfahren der zerstörenden / zerstörungsfreien Werkstoff- und Verbindungsprüfung; Werkstatt zum Bau bzw. zur Adaption von Anlagenmodulen
 <p>Fraunhofer Institut Fertigungstechnik Materialforschung</p>	<p>Fraunhofer IFAM</p> <ul style="list-style-type: none"> - Schwerpunkte: Lacktechnik in der Anwendung und Elektrochemie und Korrosion - Einbindung in die Gesellschaft für Korrosionsschutz (GfKORR) - Untersuchung der Grundlagen von Korrosionsprozessen und deren Vermeidung; Entwicklung von Methoden zur Beurteilung von Korrosionsschutzbeschichtungen; Entwicklung von Schutzkonzepten und deren Prüfung für Offshore-Windanlagen - FuE-Projekte: „Entwicklung eines optimalen Korrosionsschutzkonzeptes für Offshore-WEA“ (BIA Bremen, 2004-06); „Nutzung des Elektrochemischen Rauschens zur Beschleunigung der Lackentwicklung“ (AiF 14639N, 2006-08) - Umfangreiche Labor-Ausstattung zur Durchführung klassischer Korrosionstests und Oberflächenanalysen + Frei- und Laborbewitterungsstände zur Durchführung von Realtests
 <p>FLENSBURGER SCHIFFBAU-GESELLSCHAFT</p>	<p>Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH</p> <ul style="list-style-type: none"> - Handelsschiffbau: RoRo- / Fährschiffe - Marineschiffbau: Marinehilfsschiffe (EGV) - Erfahrungen mit Dünoblechkonstruktionen - Durchführung und Federführung vieler nationaler und EU-FuE-Projekte: InterSHIP; SIMBA; WaRiS

	<p>Peene Werft GmbH</p> <ul style="list-style-type: none"> - Handelsschiffbau: mittelgroße Containerschiffe, kleine Spezialschiffe - Marineschiffbau: im Rahmen der nationalen Arbeitsteilung Zulieferung von Großsektionen für Marineschiffe; Reparatur und Umbau von Marineschiffen und U-Booten - Erfahrungen mit Dünnschleibkonstruktionen
	<p>ThyssenKrupp Marine Systems – Nordseewerke GmbH</p> <ul style="list-style-type: none"> - Handelsschiffbau: mittelgroße Containerschiffe, Spezialschiffe - Marineschiffbau: Fregatten, Korvetten, U-Boote - Erfahrungen mit Dünnschleibkonstruktionen - Einsatz von Lasertrenn- und –fügeverfahren (Standort Blohm+Voss)
	<p>Muehlhan Equipment Services GmbH</p> <ul style="list-style-type: none"> - führender Korrosionsschutz-Dienstleister mit 125-jähriger Tradition - alle Standardverfahren und technischen Geräte für die Untergrundvorbereitung und das Beschichten von Stahlbauteilen vorhanden - FuE-Untersuchungen zu Verfahren der Oberflächenvorbereitung und zu Qualitätsaspekten; Entwicklung von Korrosionsschutzsystemen - FuE-Projekte: „ecodock – environmentally friendly coatings for ship building and ships in operation“ (EU FP6-PLT-506491, 2004-07); „Entwicklung eines optimalen Korrosionsschutzkonzeptes für Offshore-WEA“ (BIA Bremen, 2004-06)
	<p>DNV Maritime</p> <ul style="list-style-type: none"> - international renommierte Klassifikationsgesellschaft - Vorreiter bei der Zulassung von Laserschweißverfahren im Schiffbau - Forschungs- und Entwicklungstätigkeit im Bereich des maritimen Korrosionsschutzes – z.B. FuE-Projekte „ECOPAINT“, „ECODOCK“ (EU)

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse - Anwendung im Werftbetrieb (AK 100)

2.1.1 Abstimmung und Durchführung betrieblicher Prozessanalysen (AP 110)

Für die Weiterentwicklung eines Plasmaverfahrens hinsichtlich der beschichtungsgerechten Bearbeitung von Schnittkanten während des Zuschnitts erfolgte eine Erfassung der technischen Randbedingungen der derzeit eingesetzten Plasmaschneidverfahren auf den Werften und bei den Anlagenherstellern. Dabei wurden anlagenseitige Prozessparameter zusammengefasst und mit Anlagenhersteller ausgewertet. Das Verfahren, das der größte Teil aller Werften benutzt, ist das Plasmaschneiden an Luft mit oder ohne Wirbelgas. Da die meisten Werften Sauerstoff als Schneidgas einsetzen, wurde diese Verfahrensvariante Plasmagas Sauerstoff und Zuschnitt an Luft als Ausgangsposition der Versuchsdurchführung verwendet. In Bild 5 sind die zwei wesentlich unterschiedlichen Plasmaschneidvarianten mit Wirbelgas aufgezeigt, wobei die Trockenplasmaschneidtechnologie eingesetzt wurde.

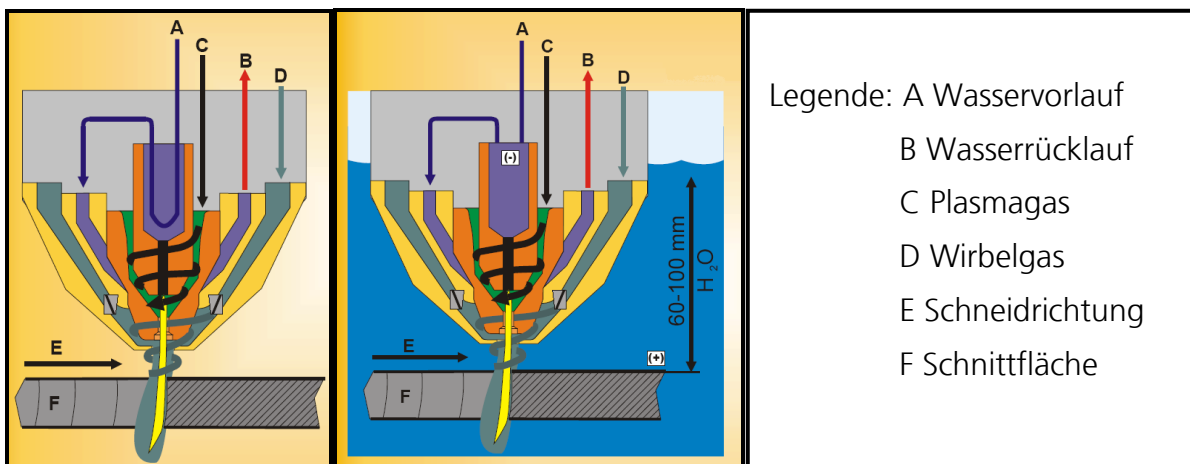


Bild 5: Plasmaschneidvarianten mit Wirbelgas

links: Trockenplasmaschneiden

rechts: Unterwasserplasmaschneiden

Der größte führende Maschinenhersteller Firma Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH bestätigte den Einsatz des Sauerstoffs als derzeit bestgeeignetes Gas zum Schneiden von Baustahl. Der Sauerstoff der an der Schnittkante rekombiniert, bildet eine Oxidschicht die eine schützende Wirkung gegenüber Korrosion übernimmt. Werften aus dem Projektkonsortium bestätigten die Verschweißbarkeit dieser Oxidschicht ohne nennenswerte Verringerung der Qualität im Schweißgut zu erhalten.

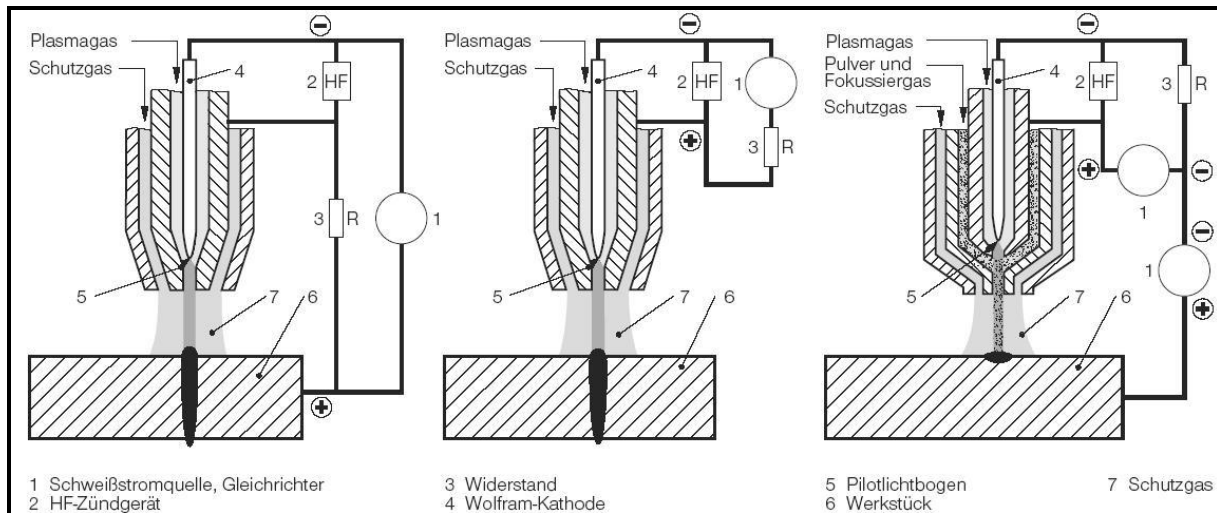


Bild 6: Mögliche Lichtbogenvarianten

**übertragender Lichtbogen (WPL),
nichtübertragender Lichtbogen (WPS),
Kombination (WPSL) mit Wirbelgas**

In Bild 6 sind verschiedene mögliche Lichtbogenvarianten dargestellt. Der direkte übertragende Lichtbogen ist der derzeit eingesetzte Lichtbogen bei allen Schneidanlagen und wird auch in dem Projekt als Ausgangslichtbogen untersucht. Aufgrund der freien zu bearbeitenden Kanten können in den weiteren Untersuchungen die Gase Stickstoff und Luft eingesetzt werden. Die Aufstickungsgefahr bei der Verwendung dieser Gase und die Entstehung von Poren beim Verschweißen der entstandenen Schnittkanten konnten in vorangegangenen Forschungsvorhaben anderer Einrichtung nachgewiesen werden, sind aber für die freibleibenden Kanten und für dieses Projekt nicht relevant. Eine damit verbundene Aufhärtung wird, in der Versuchsdurchführung und bei Erfolgsaussichten durch den Gebrauch dieser Gase, noch in diesem Projekt überprüft. Bei der Zusammenfassung aller Prozessparameter der Werften wurde festgestellt, dass eine hohe Geschwindigkeit bis zu 5 m/min im Zuschnitt benötigt wird und die Schneidarbeitsplätze für eine nachträgliche Bearbeitung auch mit hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten der Kanten auf den Brenntisch nicht genutzt werden können, da dies zu einer Durchsatzverzögerung kommen könnte. Für eine nachträgliche Bearbeitung der Kanten könnten Blechlagerregale oder der Sektionsbau in Frage kommen. Eine Nachlagerung im Schneidbetrieb könnte im Profilzuschnitt vorstellbar sein, da hier die Anlagen zeitliche Kapazitäten aufzeigen.

2.1.2 Entwicklung potentielle Einsatzszenarien (AP120)

Während der Projektlaufphase entwickelten sich zwei mögliche Verfahrensarten zum bearbeiten der Schnittkanten. Dabei sind das Plasmaschneiden und das Plasmaschweißen als artähnliche Varianten zu betrachten, um während des Zuschnittes oder im Nachgang die Ober- und / oder Unterkante zu bearbeiten. Für einen Überblick zu den verschiedenen Einsatzszenarien unter Laborbedingungen wurden diese in Bild 7 für die Schneid- und Schweißanwendungen dargestellt.

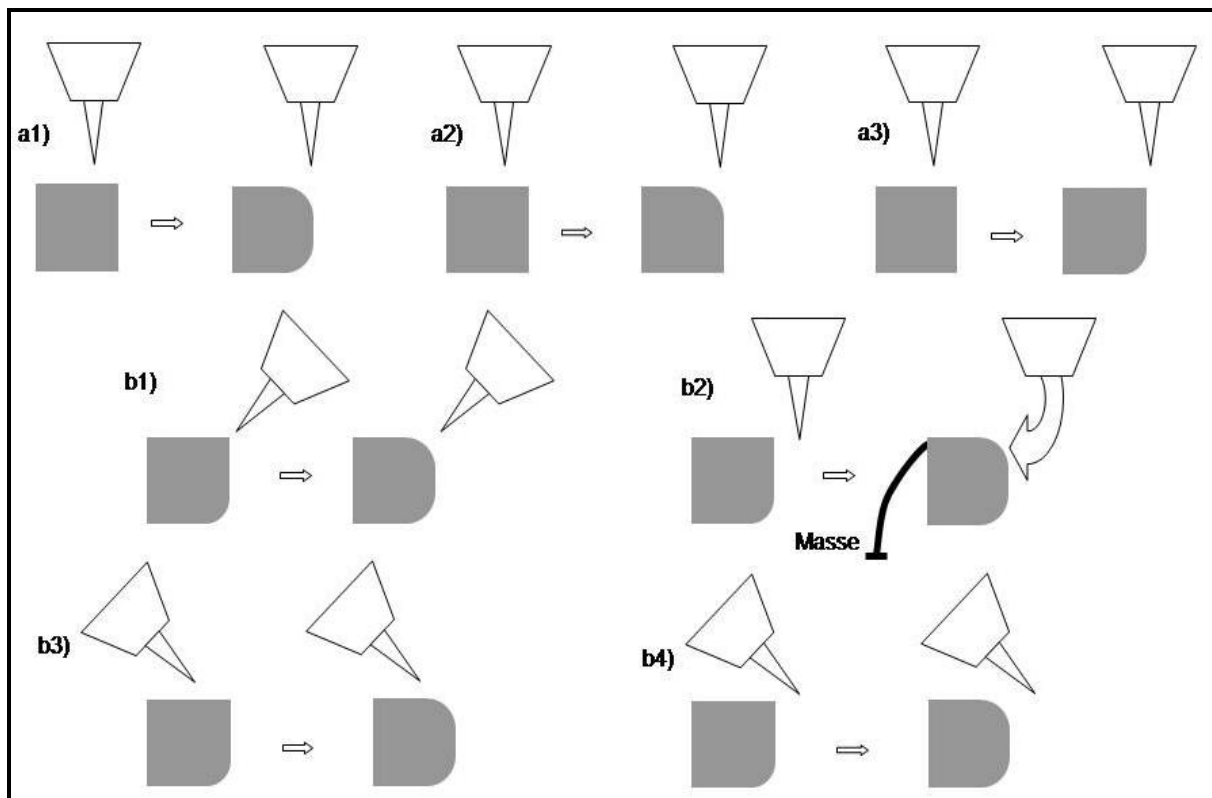


Bild 7: Mögliche verfolgbare Einsatzszenarien

In Tabelle 3 sind die aus Bild 7 vorüberlegten Einsatzszenarien erklärt, die in den Vorversuchen ausprobiert werden sollten, um den Versuchsplan, durch nicht einsatztaugliche Versuchsdurchführungen, zu minimieren. Es konnte mehrere Varianten kombiniert werden. Die drei Grundvoraussetzungen waren a1) der Zuschnitt mit scharfer Ober- und Unterkante, a2) der Zuschnitt mit gerundeter Oberkante und a3) der Zuschnitt mit gerundeter Unterkante. Diese konnten mit b1) dem direktem Anschmelzen, b2) dem indirektem Anschmelzen durch Lichtbogenablenkung, b3) dem Anfasen und b4) dem indirektem Umschmelzen durch eine indirekte Brennerkonfiguration kombiniert werden.

In Tabelle 3 sind die drei Grundvoraussetzungen unter a1) bis a3) und weitere mögliche Verfahren unter b1) bis b4) mit jeweils einer Kombinationen eines möglichen Verfahrensablauf erläutert.

Tabelle 3: Erläuterung der Einsatzszenarien aus Bild 7

Szenario	Verfahren	Beispiele möglicher Verfahrensabläufe: Voraussetzung und mögliches Ergebnis
a1)	Zuschnitt: Schneiden	Schneiden von unbearbeitetem Material mit dem Ergebnis einer gerundeten Ober- und Unterkante

a2)	Zuschnitt: Schneiden	Schneiden von unbearbeitetem Material mit dem Ergebnis einer gerundeter Oberkante
a3)	Zuschnitt: Schneiden	Schneiden von unbearbeitetem Material mit Ergebnis einer gerundeter Unterkante
b1)	nach dem Zuschnitt: direkt Anschmelzen von Ober- und / oder Unterkante	gerundete Unterkante aus a3) mit dem Ergebnis einer direkt angeschmolzenen Oberkante
b2)	nach dem Zuschnitt: indirekt Anschmelzen durch Ablenkung des Lichtbogens von Ober- und / oder Unterkante	gerundete Unterkante aus a3) mit dem Ergebnis einer indirekt angeschmolzenen Unterkante durch Lichtbogenablenkung
b3)	nach dem Zuschnitt: Anfasen von Ober- und / oder Unterkante	Gerundete Unterkante aus a3) mit dem Ergebnis einer direkten Umschmelzung der Unter- und / oder Oberkante
b4)	nach dem Zuschnitt: indirekt Umschmelzen von Ober- und / oder Unterkante	Gerundete Unterkante aus a3) mit dem Ergebnis einer direkten Umschmelzung der Unter- und / oder Oberkante

Bei einem Plasmaschnitt ohne eine Verrundung oben oder unten, müssen mit einem geeigneten Verfahren zwei nachgelagerte Arbeitsschritte gleichzeitig oder nacheinander zum Einsatz kommen.

Nach Abstimmung der Projektpartner soll das Plasmaschneidverfahren eine Verrundung der Ober- und Unterkante oder mindestens eine Verrundung der Ober- oder der Unterkante erreichen, so dass mindestens die Hälfte der Nacharbeit reduziert werden kann. Das Plasmaschweißen könnte nachgelagert während des Zuschnittes oder nachgelagert nach dem Zuschnitt zum Einsatz kommen. Dabei sind die möglichen Einsatzorte mit dem Einsatzszenario und dem verfahrensspezifischen geometrischen Gegebenheiten abzustimmen. Wobei die Bleche vorrangig im Liegen bearbeitet werden sollen, aber die stehende Variante und die Überkopfbearbeitung nicht auszuschließen sind. Bei der Stehenden Variante müssen alle Positionen verifiziert werden. Ein entscheidender Vorteil des Plasmaschweißprozesses bei allen Lagen und Positionen ist, dass die Bleche nicht gehandelt werden müssen, da beim Abräumen der Restbleche der Brenner mit Durchgreifen auch die gegenüberliegende Kante bearbeiten kann. Derzeit einsatzfähige Systeme und Arbeitsabläufe müssen für das Verfahren im Nachgang genauer betrachtet werden. Aufgrund unterschiedlichster Arbeitsweisen der Werften und unterschiedlichen Abläufen im Zuschnittbereich werden mehrere Einsatzszenarien durchgespielt, auf deren Basis Parameterstudien durchgeführt.



Bild 8: Mannlochausschnitt mit Stegen und geräumtes Zuschnittblech auf Kammpalette

Mögliche Engpässe könnten bei folgenden Szenarien entstehen. Die Unterkante bei Blechen auf der Kammpalette liegend Bild 8 kann durch die etwaige Kollision des Brenners mit der Palette oder das Verschmelzen der Palette mit dem Blech nicht bearbeitet werden. Platten an denen Stege Bild 8 für steifes Verhalten beim Drehen der Sektion stehen gelassen werden und dann herausgetrennt werden, können nur bedingt oder gar nicht bearbeitet werden. Weiterhin müssen nachträgliche Bewegungen der Platte durch die Wärmeeinbringung und durch das Freiwerden von Eigenspannungen mit berücksichtigt werden.

2.1.3 Entwicklung von Anlagen- und Logistikkonzepten

Nach den Vorüberlegungen und Zusammentrag der möglichen Einsatzszenarien auf den Werften konnten folgende Anlagen- und Logistikkonzepte aufgestellt und untersucht werden. Plasmaschneiden mit modifizierten Plasmalichtbogen und geometrischen Parametern wurde als ein Konzept für die Schneidvariante angenommen. Beim Plasmaschweißen konnten drei Konzepte auf Einsatztauglichkeit geprüft werden. Dabei kommen Klein- und Großbauteile, sowie Klein- und Großsektionen zum Einsatz. Die Sektionen werden durch geeignete Blechformen bzw. Blechzuschnitte und Anordnungen im Labormaßstab simuliert.

Der Kleinteilbereich wird mittels Greifsystem (Vakuumsauger, Magnet) an das Bearbeitungswerkzeug geführt und / oder in die richtige Orientierung gebracht. Dabei kann der Bearbeitungskopf verfahren oder das Bauteil an einem feststehenden Werkzeug in Vorzugslage vorbeigeführt werden.

Der Großteilbereich sollte wie bisher auf dem Brenntisch im Plattenzuschnitt liegend nachbearbeitet werden. Dies setzt ein Abräumen der Schlechteile voraus. Eine Kantenerkennung und damit ein zusätzlicher Arbeitsschritt und Werkzeug entfallen bei diesem Bearbeitungskonzept. Der Profilzuschnitt ordnet sich in dieses Konzept ein, da hier die Voraussetzungen gegeben sind, dass die Schlechteile herausfallen und die Bauteile gegen jede Bewegung von Eigenspannungen des Materials oder der Schneidwärme gesichert sind.

Ein weiteres Anlagenkonzept das in Betracht gezogen wird, ist die Bearbeitung der Kanten im Vorsektionsbau oder im Lager stehende Zuschnittplatten. Hierbei wären ein Erkennungssystem sowie ein mehrachsiger Roboter notwendig, um die Geometrien in allen Lagen beidseitig abzufahren.

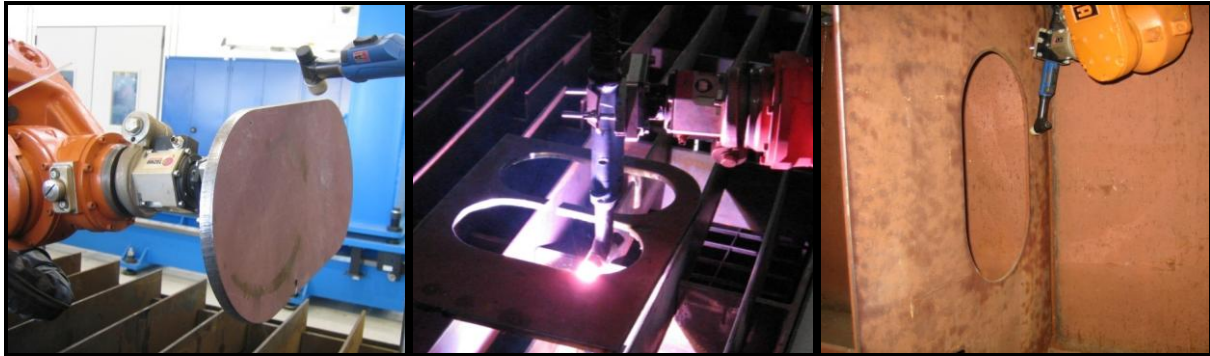


Bild 9: 3 mögliche Konzepte für das Plasmaschweißverfahren

**Kleinteilbereich
Plattenzuschnitt
Vorsektionsbau**

Der Kleinteilbereich wurde von keinem Anwender derzeit als sinnvoll erachtet. Desweiteren sollten Parameterstudien für den Vorsektionsbau ermittelt werden, da hier die höchste Anforderung an das Verfahren gestellt werden und die Gebrauchstauglichkeit optimal geprüft werden kann. Dabei wird dieses Konzept mit dem Verfahren derzeit von keiner Werft präferiert. Im Plattenzuschnitt müssen die Bearbeitungsbedingungen, wie das Abräumen von Abfallblechen garantiert werden, um mindestens die Oberkante bearbeiten zu können. Um die Unterkante umzuschmelzen muss ein Anheben der Platte realisiert werden, damit die umzuschmelzende Kante kein Kontakt mit der Kammpalette hat. Untersucht wird ein Umschmelzen der Oberkante trotz liegen bleibender Restbleche, die jedoch ohne Stege mit dem Zuschnitt verbunden sind. Dabei soll geprüft werden, ob der Lichtbogen stabil auf der gerichteten Kante bleibt. Nach weiteren Abstimmungen hinsichtlich der Prozessanalysen konnte das Plasmaschweißen optimal in den Profilzuschnitt, der als Untergruppe des Plattenzuschnitts eingegliedert wird, eingeordnet werden. Im Profilzuschnitt ist auf dem größten Teil der Werften die Voraussetzung zum Einsatz des Plasmaschweißens im Nachgang des Zuschnitts gegeben. Die Geschwindigkeit kann hierbei geringer ausgelegt werden als die eingangs geforderten Bearbeitungsgeschwindigkeiten von bis zu 4 m/min. Beim Umschmelzen der Wasserlaulöcher ist der zurückzulegende Weg sehr gering. Die Bearbeitungszeit an den kleinen Geometrien reicht nicht aus, um die Führungsmaschine auf eine hohe Geschwindigkeit zu beschleunigen bzw. zu bremsen und den Umschmelzprozess zu stabilisieren. Weiterhin würde der Roboter die entfernten Achsen mit noch höheren Geschwindigkeiten bewegen, damit der Toolcenterpoint eine bestimmte hohe Geschwindigkeit erreicht. Eine Kantenerkennung wird hierbei nicht benötigt, da die Führungsmaschine des Kantenbearbeitungsprozesses die gleichen Daten benutzt wie der Schneidprozess.



Bild 10: Profilzuschnittroboter mit Autogen- oder Plasmabrenner

In Bild 10 ist ein derzeit eingesetzter Profilzuschnittroboter dargestellt. Dieser kann ausgerüstet sein mit einem Autogen- oder Plasmabrenner. In Bild 11 ist eine Variante aufgezeigt in der der Plasmaschweißbrenner versetzt integriert in das Profilzuschnittwerkzeug wurde, um direkt nach dem Zuschnitt mit kleineren Zustellbewegungen das Kantenbearbeitungswerkzeug zusetzt und die Ober- und Unterkante thermisch bearbeitet.

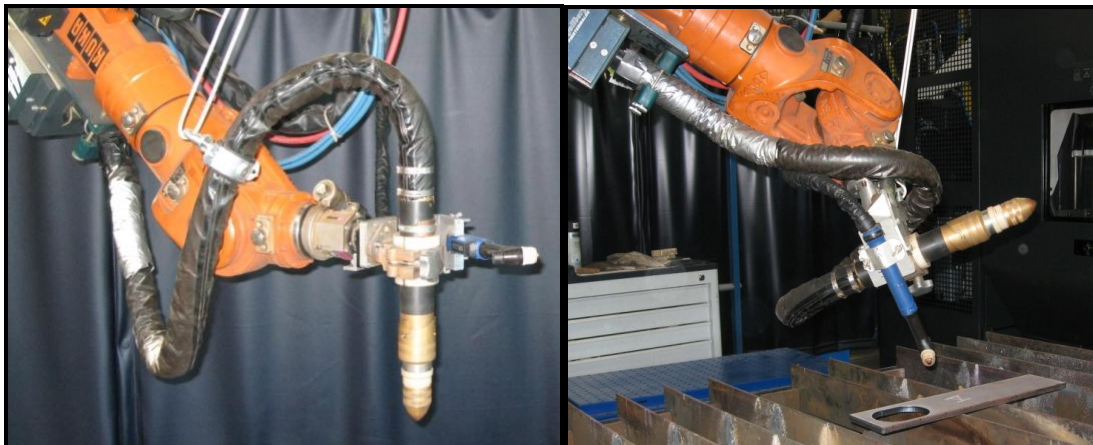


Bild 11: Plasmabrenner mit versetztem Werkzeug zum thermischen Kantenbearbeiten

Ein weiteres Szenario ergab sich während der Projektarbeit. Dabei wurde das Szenario Plattenzuschnitt mittels Brennerwechselsystem aufgestellt. Voraussetzung sind geräumte Plattenfelder, die mittels neuen Brennerkopfs an der Oberkante mit dem Zuschnitt gleichwertigen Geschwindigkeiten bearbeitet werden können. Das thermische Bearbeitungsverfahren ist dem Plasmaschweißen ähnlich und damit auch ein nachträglicher Arbeitsschritt. Die Zustellaten werden aus den Zuschnitt-CAD-Daten entnommen. Beachtet werden muss hierbei ebenso die Plattenbewegung. Die Unterkante bleibt weiterhin in diesem Arbeitsgang unbearbeitet, da ein Verschmelzen mit der Kammpalette nicht auszuschließen ist. In Bild 12 ist ein Schneidportal darstellt bei dem nach dem Zuschnitt der Plasmaschneidbrenner zur dargestellten Wechselstation fährt und mit einen zum thermischen Kantenbearbeiten Brennerkopf bestückt wird. Dieser Brennerkopf verfährt gleich dem Zuschnittkopf und bearbeitet die zu rundenden Schnittkanten.

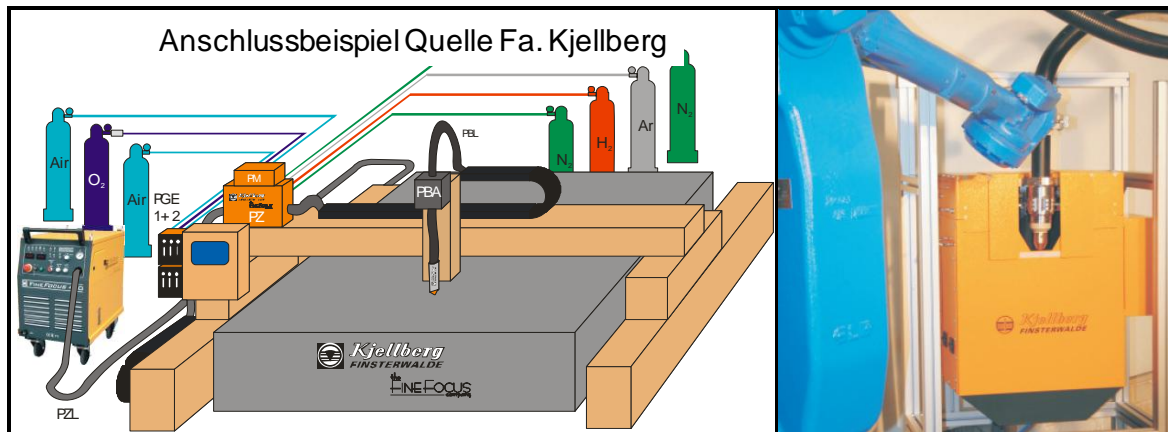


Bild 12: Plasmascneidportal mit neuem Brennerwechselsystem für nachträgliche Bearbeitung

In Tabelle 4 sind die zusätzlichen Arbeitsschritte dargestellt, die bei einem Einsatz der jeweiligen Verfahren im Szenario zum Einsatz kommen könnten. Die genannten zusätzlichen Arbeitsschritte sind als Ausgleich zum manuellen Bearbeiten zu verstehen.

Tabelle 4: Arbeitsschritte Einsatzszenarien der nachgelagerten Kantenbearbeitung

Szenario		
	Profilzuschnitt	Plattenzuschnitt
Arbeitsschritt		
1	Schneiden mit Schneidbrenner am Roboter (Schlechtteil fällt weg)	Schneiden mit Schneidbrenner an der Trockenplasmascneidanlage
2	Drehvorgang zur Zustellung des Schweißbrenners	Abräumen der Schlechteile (optional)
3	Brennerzustellung und Abfahren der Oberkante mit Schweißbrenner	Herausfahren des Brenners zur Wechselstation
4	Ausdrehen des Schlauchpaketes (optional) und Zustellen zur Unterkante	Wechseln des Schneidkopfes auf Umschmelzkopf (optional automatisch)
5	Abfahren der Unterkante mit Schweißbrenner	Nachfahren des CNC-Files nur der freien Kanten mit Versatz des Brenners der Oberkante
6	Herausfahren aus der Geometrie	Herausfahren des Brenners zur Wechselstation
Zus. Arbeitsschritte	Arbeitsschritte 2-6 zusätzlich zum derzeitigen Profilzuschnitt	Arbeitsschritte 3-5 zusätzlich zum derzeitigen Plattenzuschnitt
Ergebnis	Umschmelzung der Ober- und Unterkante	Umschmelzung der Oberkante

Das Plasmaschweißverfahren bleibt dabei ein nachträgliches Bearbeitungsverfahren und benötigt für weitere Szenarien außer dem Plattenzuschnittszenario mit Brennerwechselsystem und dem Profilzuschnittszenario mit integriertem Plasmabrenner ein Kantenerkennungssystem, das in anderen Arbeitskomplexen von der Firma IMAWIS entwickelt wird.

2.2 Erzielte Ergebnisse - Entwicklung des Verfahrens und Werkzeuges zur Herstellung beschichtungsgerechter Kanten an schiffbaulichen Stahlstrukturen durch Bearbeitung mit modifizierten Plasmaschneidsystemen (AK 400)

2.2.1 Definition Ausgangszustand, Lastenheft zur Verfahrensentwicklung modifizierter Plasmaschneidsysteme (AP 410)

Die Aufstellung des Lastenheftes erfolgte in Zusammenarbeit mit dem CMT und den Projektpartnern anderer thermischer Verfahrensarten.

Im Ausgangszustand für das Kantenrunden im Zuschnitt haben die Werften ähnliche Portalanlagen und Schneidanlagen mit gleichen Leistungsspektren. Die Portalanlage des Fh AGP kann aufgrund des 3 achsigen Portals mit einem 6 Achs-Schweißroboter kombiniert alle möglichen Einsatzszenarien durchfahren. Die Schneidanlage hat den derzeit neusten Stand mit einer kleineren Leistung als auf den Werften und der Brenner mit den Düsenkonfigurationen ist derzeit weltmarktführend. Die geringere Leistung der vorhandenen Schneidanlage ist für den im Projekt definierten Blechdickenbereich ausreichend.

Für eine nachträgliche Bearbeitung müssen auf allen Werften Anpassungsarbeiten erfolgen. Die Entwicklung des Wechselkopfsystems wurde im Jahr 2009 abgeschlossen und könnte einen Einsatz auf den Werften finden. Die manuelle Ausführung eines Wechsels kann ebenso erfolgen, falls die Kosten einer Wechsellanlage zu hoch sind. Derzeit werden Brennerkopfwechsel manuell für den Austausch von Verschleißteile ausgeführt. Eine Anpassung der Profilschneidlinie ist grundsätzlich möglich, da diese mit 6-Achs-Robotern ausgestattet sind und jederzeit mit wenigen Arbeitsschritten an neue Werkzeuge angepasst werden können. Der Ausgangszustand für den Vorsektionsbau ist auf den Werften bedingt gegeben, da einige Werften im Sektionsbau mit Schweißrobotern von Portalen aus die Sektionswände steigend schweißen und diese Roboter für einen Gebrauch der nachträglichen Bearbeitung mit Plasmaschweißbrennern eingesetzt werden können.

Probleme kann es bei einer direkten und nachträglichen Bearbeitung von stehengelassenen Stegen geben, wie es gelegentlich im Werftbetrieb vorkommt. Die Stege dienen der Vereinfachung des Abräumens vom Brenntisch (Brenntisch schnellstmöglich für weitere Zuschnitte frei machen). Für eine Weiterverarbeitung der Bleche werden diese u.U. stehengelassen, um eine höhere Steifigkeit in den Platten zu gewährleisten. Die Stege werden auf einigen Werften nachträglich auf dafür

vorgesehene Arbeitsplätze mit einer Brenngas-Sauerstoff-Flamme herausgetrennt. Einige Werften, die in Überkopfbauweise bauen, trennen diese Stege erst nach dem Drehen der Sektionen mit der Brenngas-Sauerstoff-Flamme heraus. Weiterhin arbeiten die Werften mit Magnet- und Unterdruckabräumern sowohl für Abfall als auch für Zuschnittteile. Hier ist eine einheitliche Arbeitsweise möglichst ohne Stehenlassen von Stegen bzw. ohne ein Trennen dieser auf anderen Arbeitsplätzen mit anderen Schneidvarianten eine wichtige Voraussetzung für ein optimales Ergebnis.

Bei der etwaigen nachträglichen Bearbeitung der zugeschnittenen Kanten mit gleichen oder anderen Verfahrensvarianten müssen die Werften den Schneidabfall abräumen. Der vorhandene Schneidabfall würde die Bearbeitung der Unterkante, gegebenenfalls auch die der Oberkante auf dem Brenntisch behindern.

In der Tabelle 5 sind die im Arbeitskomplex 400 zu untersuchenden Szenarien aufgelistet.

Tabelle 5: Übersicht der zu untersuchenden Szenarien

	Zeitpunkt der Bearbeitung	Verfahren	Szenario	Zu erledigende Arbeiten
1	Während des Zuschnitts	Plasmaschneiden	Zuschnitt	Parameterfindung für Ober- und / oder Unterkante
2.1	Im Nachgang	Plasmaschweißen	Vorsektionsbau bzw. stehende Platten im Lager	Parameterfindung alle Lagen und Positionen
2.2	Im Nachgang	Kombination Plasmaschneiden und Plasmaschweißen	Profilzuschnitt	Vollständige Bearbeitung in autak arbeitenden Profilzuschnittanlage
2.3	Im Nachgang	Plasmaschneiden mit Wechselkopfsystem und Plasmaschweißen ähnlichem Verfahren	Plattenzuschnitt	Bearbeitung der Oberkante mit Wechselkopfsystem im Plattenzuschnitt

2.2.2 Experimentelle Untersuchungen zur Beeinflussung praxisrelevanter Plasmaschneidbögen innerhalb existierender Verfahrensgrenzen mittels Variation von Gas, UW / Luft-Einsatzszenarien, Brenneinstellungen- und -varianten (AP 420)

Für die Durchführung der folgenden Arbeitspakete wurden Geräte verwendet, die im Weiteren erläutert werden. Das Portal der Firma GÜDEL GmbH gehört zu den Multi-Achsen Gantry Robot Portalen mit drei Verfahr-Achsen. Die Ritzel-/Zahnstangen-Antriebe an allen Linearachsen ermöglichen das präzise Fahren, sowie eine hohe Wiederholgenauigkeit. Außerdem sind Haltebremsen an allen Achsen installiert. Die Robotersteuerung der Firma KUKA ermöglicht das Adaptieren eines Roboters, wie in dem nachfolgenden Bild 13 zu sehen [4].

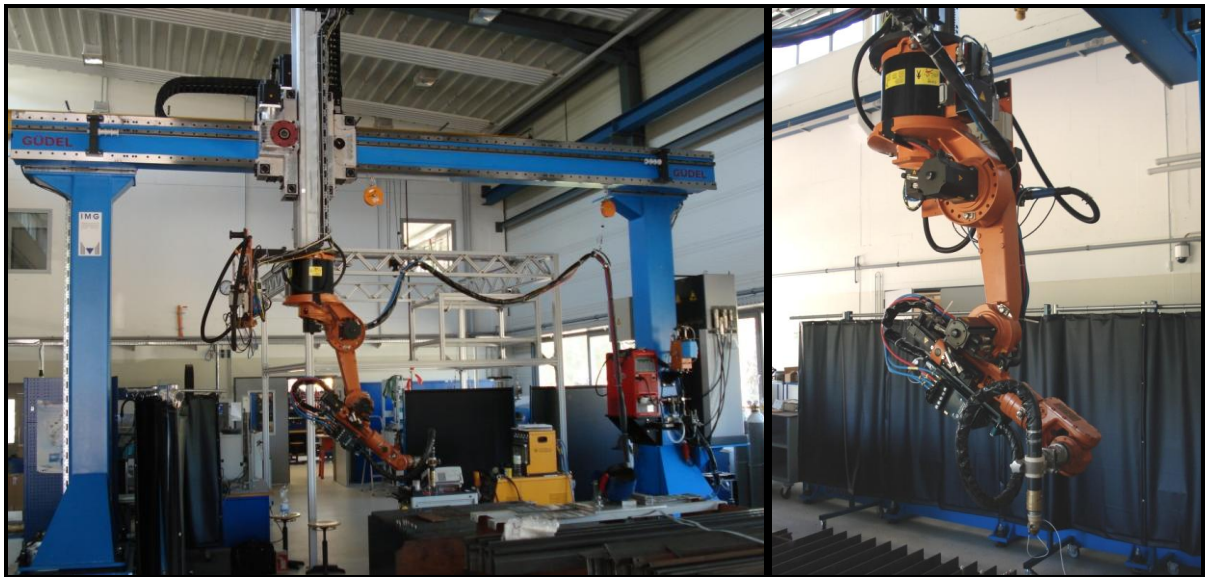


Bild 13: KUKA Roboter KR 15 mit adaptierten Plasmaschneidbrenner am Schweißportal

Der 6 Achsen-Vertikal- Knickarmroboter KR15 der Firma Kuka Roboter GmbH wurde an dem zuvor dargestellten Portal der Firma GÜDEL GmbH angebracht, somit ist es ein Schweißportal. An dem Roboter gibt es die Möglichkeit, an dem vorhandenen Kollisionsschutz z.B. einen Plasmaschneidbrenner zu adaptieren. Der Roboter KR 15 kann eine Nenn- Traglast von 15 kg an der Hand und eine für diese Nennlast maximale Zusatzlast von 10 kg am Roboterarm, bei vollkommener Armausladung und Maximalgeschwindigkeit, mit sich führen. Er kann wahlweise stehend auf dem Boden sowie hängend eingebaut werden. Alle Grundkörper der bestehenden Hauptbaugruppen bestehen aus Leichtmetallguss [5]. Als Antriebsmotoren sind transistorgesteuerte AC- Servomotoren eingesetzt. Der Roboter wiegt ca. 235 kg verfügt über eine Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,1$ mm. Gesteuert wird dieser dann über das Bedienpanel KR C2. Der KR 15 kann bei Temperaturen von 10 °C bis 55 °C eingesetzt werden und er verfügt über die Schutzklasse IP 64 [5].

Die Plasmaschneidanlage HiFocus 160i der Firma Kjellberg Finsterwalde besteht aus dem Inverter, der Plasmagaseinstelleinheit PGE- HM und dem Schneidbrenner PerCut 170, welche in dem Bild 14 dargestellt sind.



Bild 14: Inverter HiFocus 160i (l.); Plasmagaseinstelleinheit (r.)

Der Soft- Switch- Inverter hat einen Schweißstrombereich von 10 – 160 A, die Zündung erfolgt per Hochspannung, und die Kühleinheit des Brenners ist ebenfalls darin enthalten.

An der Plasmagaseinstelleinheit werden die Plasma- und Wirbelgase manuell, je nach Materialeigenschaften, eingestellt und dann von der Anlage gemischt, welches dann für den Brenner bereitgestellt wird. Als Plasmagase können folgende Flaschen angeschlossen werden, wie z.B. Sauerstoff 2.5, Stickstoff 5.0, Luft/Druckluft, Argon 4.6 und Wasserstoff 3.5, mit den geforderten Feinfiltern. Weiterhin ist es möglich, die Wirbelgase Sauerstoff 2.5 und Stickstoff 3.0 anzuschließen.

Der Schneidbrenner PerCut 170, siehe Bild 15, ermöglicht ein schnelles Wechseln des Brenners durch einen Bajonettverschluss, sowie das Markieren und Schneiden von Baustählen, legierten Stählen, Aluminium und andere leitfähige Materialien im Bereich von 0,5 bis 50 mm. Durch das Schnellwechselsystem werden Stillstands- sowie Rüstzeiten sehr verkürzt [6].



Bild 15. Plasmaschneidbrenner PerCut 170 mit Verschleißteilen

Der Plasmaschneidbrenner besitzt eine direkte Umlaufkühlung, die durch die im Inverter befindliche Kühleinheit gespeist wird.

Das nächste Bild 16 stellt die möglichen Einsatzbereiche zum Erreichen der besten Schnittqualität dar [6].

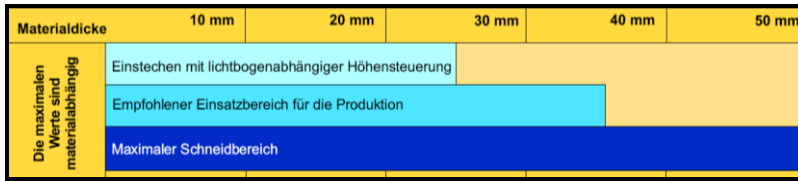


Bild 16: Einsatzbereiche nach Materialstärke

Materialdicke (mm)	unlegierte Stähle			legierte Stähle			Aluminium		
	Technologie	Schneidstrom (A)	Schneidgeschwindigkeit (mm/min)	Technologie	Schneidstrom (A)	Schneidgeschwindigkeit (mm/min)	Technologie	Schneidstrom (A)	Schneidgeschwindigkeit (mm/min)
0,5	HiFocus	20	5000	HiFinox	30	5000	HiFocus	35	3800
1		35	2400						
2		50	2600						
3	HiFocus plus	50	2200	HiFocus F plus	130	1600	HiFocus F	50	1300
4		60	2200						
5		60	1950						
6		100	2700						
8		100	2400						
10		130	2400						
12		160	2400						
15	160	2000	HiFocus F	160	950	HiFocus F	160	1250	
20	160	1400							
25	160	1200							
30	160	550							
35	160	450							
40	160	400							
45	160	300							
50	160	200							

Bild 17: Parameter für beste Schnittqualität

In Bild 17 ein Überblick der Technologien und Materialien gegeben. Weitere Parameter sind Plasma- und Wirbelgase im richtigen Mischungsverhältnis (Drücke und Durchflussmenge) sowie der Brennerabstand zum Material und dessen Winkel.

Die existierenden Verfahrensgrenzen der Plasmaschneidlichtbögen werden in 3 Varianten eingeteilt. Zum Einen gibt es das „Aufwasserplasmaschneiden“, welches mit und ohne Wirbelgas arbeiten kann. Das Wirbelgas soll eine zusätzliche Einschnürung des Plasmastrahls bewirken, dadurch die Schnittqualität verbessern, und die Düse bei Einstechvorgängen vor hochspritzendem Material schützen. Bei dieser Variante liegt das zu trennende Blech mit der Unterseite auf einem Wasserbecken, oder es ist sogar mit Wasser überdeckt. Der Vorteil liegt in der optimalen Kühlung der zu schneidenden Werkstücke und einer Minderung der Rauchbelastung der Arbeiter. Zum anderen wird das „Unterwasserplasmaschneiden“ (rechts Bild 5), mit Wirbelgas, auf den Werften eingesetzt, wobei die zu trennenden Teile und der Brenner unter Wasser arbeiten. In diesem Betriebszustand wird der Brenner noch zusätzlich gekühlt. Der Nachteil bei diesen beiden Varianten besteht in der Entsorgung des Wassers mit dem enthaltenen Oxiden und anderen Schneidschadstoffen [7], [8].

Positiv zu bewerten sind das Wegfallen der ultravioletten Strahlung, die erhebliche Rauch und Gasentwicklung, sowie die hohe Geräuschbelastung während des Schneidens von bis zu 105 dB (A). Die letzte Variante des Plasmatrennverfahrens ist das „Trockenplasmaschneiden“, siehe Bild 5 links. Dies bedeutet das Schneiden an Luft, wiederum mit und ohne Wirbelgas. Diese Variante soll Gegenstand dieser Untersuchung sein, da im Zuschnitt das Trockenplasmaschneiden auf den Werften eingesetzt wird [7], [8]. Die unterschiedlichen Technologiebereiche der Plasmaschneidtechnik sollen speziell

an der Firma Kjellberg Finsterwalde dargestellt werden. Die Firma entwickelte Anfang der 60-er Jahre die Plasmaschneidtechnik. Der Einsatz des Plasmagases Luft für das Schneiden von Baustahl erfolgte dann in den 70-ern. Mitte der 90-er Jahre erfolgte die Entwicklung der Sauerstofftechnologie mit dem XL Life-Time-System, welches zur Erhöhung der Lebensdauer und Reduzierung der Betriebskosten bei nachbearbeitungsfreien Schnittflächen beiträgt [7].

1998 wurde dann der Plasmabrenner mit Wirbelgas eingeführt. Dabei wird der Plasmalichtbogen von einem Sekundärmedium umströmt und stellt somit eine definierte Atmosphäre her. Durch eine Weiterentwicklung rotiert das Wirbelgas um den Plasmabogen und bündelt den Schneidstrahl mittels einer mehrstufigen Düse. Damit wurde 2000 das HiFocus Plasmaschneiden mit einer erhöhten Einschnürwirkung entwickelt. Mit der Einführung der HiFocusPLUS Technologie im Jahre 2004 gelang ein erneuter Durchbruch. Neuerungen bestanden in der Optimierung des Strahlenerzeugungssystems durch eine veränderte Gasführung, mit der Erhöhung der Schneiddrücke, sowie der Kühlung der Katode und Düse [9].

Momentan ist es mit der Plasmaschneidanlage HiFocus 160i möglich, Materialdicken von 0,5 bis 50 mm zu schneiden, siehe Bild 18. Dafür sind drei unterschiedliche Brennerbestückungen einsetzbar [6].

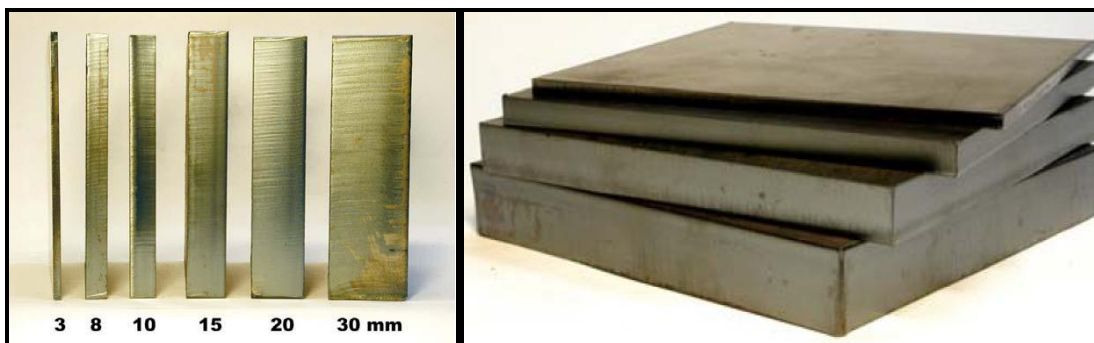


Bild 18: Schnitte unterschiedlicher Materialdicken S 235 JR

Die Werkstückdicken sind abhängig von der Formung des Plasmastrahls und vom verwendeten Schneidgas, dies variiert je Brennerbestückung und somit der Technologie. Zur Auswahl stehen die HiFocus-, HiFocus^{PLUS}- und HiFocus F-Technologie.

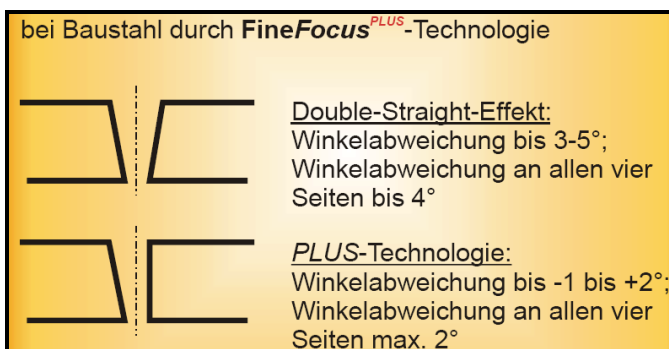


Bild 19: Verringerte Winkelabweichung durch FineFocus^{PLUS}-Technologie

Wird die HiFocus F-Technologie beim Schneiden angewendet, so zeichnet sich eine V-förmige Schnittfuge ab (Double-Straight-Effekt), wie in Bild 19 oben dargestellt ist. Diese Technologie ist die älteste von den dreien. Bei der HiFocus-Variante gibt es in der Schnittfugegeometrie ebenfalls eine V-Form, die einen geringeren Winkel aufweist. Erst die HiFocus^{PLUS} Einführung ermöglicht eine nahezu gerade Schnittkante mit einer Winkelabweichung von -1° bis $+2^\circ$, die in Bild 19 unten veranschaulicht wird. Außerdem erfolgt eine Erhöhung der Schneidgeschwindigkeit bei wachsendem Querschnitt und verbesserter Schnittflächenqualität [7], [6]. Bild 20 zeigt die geometrischen Unterschiede der Bauteile der HiFocus F und der HiFocus^{PLUS}-Technologie. Dabei kann die engere Bündelung an den Teilen durch das Einschnüren des Plasmastrahls an dem Düsenaustritt und an der Wirbelgaskappe erkannt werden.

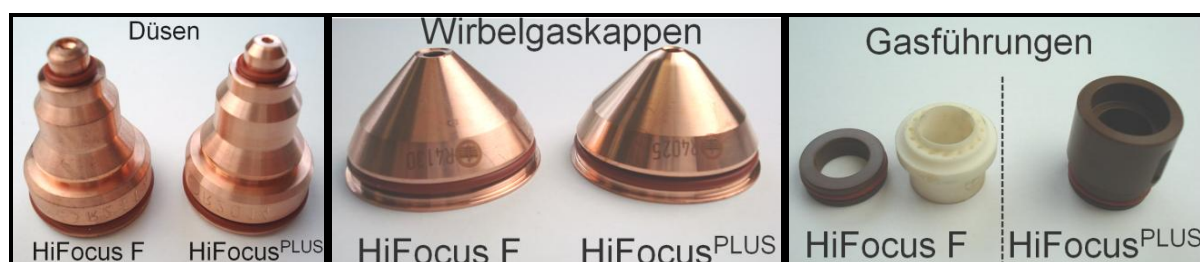


Bild 20: Bauteilunterschiede, HiFocus^{PLUS} (l.) und HiFocus F (r.)

Die Gasführung wurde durch weniger Gasaustrittsöffnungen und mit anderen Winkeln an die höheren Schneidgasdrücke angepasst. Die Tabelle 6 soll einen Überblick über den Einsatz der Technologien bei unterschiedlichen Materialien und deren Erzeugnisdicken darstellen.

Tabelle 6: Materialdicken bei unterschiedlichen Schneidtechnologien

Technologie Material	HiFocus	HiFocus ^{PLUS}	HiFocus F
Baustahl	0,5 – 8,0 mm	4,0 – 50,0 mm	2,0 – 50,0 mm
CrNi	-	-	6,0 – 35,0 mm
Aluminium	-	-	1,0 – 25 mm

Je nach Schneidanwendung kommen andere Plasma- und Wirbelgase zum Einsatz. In der Technik werden Sauerstoff, Stickstoff, Argon, Wasserstoff und Luft genutzt. Auf den Werften wird derzeit Sauerstoff verwendet, da bei dieser Variante die beste Qualität des Schnittes erreicht wird und somit keine Nacharbeiten der Schnittflächen durchzuführen ist. Eine mögliche Stickstoffdiffusion der Schnittfläche kann somit verhindert werden. Bei dem Gas Stickstoff nimmt die Schnittqualität ab und es kommt zu einer starken Stickstoffaufnahme im Schneidbereich. Werden diese geschnittenen Kanten nun geschweißt, so ist eine Porenbildung nicht auszuschließen. Außerdem kommt es zu einer starken Rauchentwicklung, die toxische Stickoxide freisetzt. Eine hohe Schnittqualität wird bei langsamen Schneidgeschwindigkeiten mit Argon erzielt. Durch die Beimischung von geringen Mengen an Wasserstoff kann die Geschwindigkeit erhöht

werden, aber der Wasserstoff trägt zur Kaltrissanfälligkeit und Versprödung bei, deshalb wird diese Gasvariante nicht eingesetzt [6][10][11].

In dem nachfolgenden Bild 21 werden Einsatzszenarien dargestellt, die durch vorherige Überlegungen als Varianten von konventionellen Schneidanwendungen ermittelt wurden.

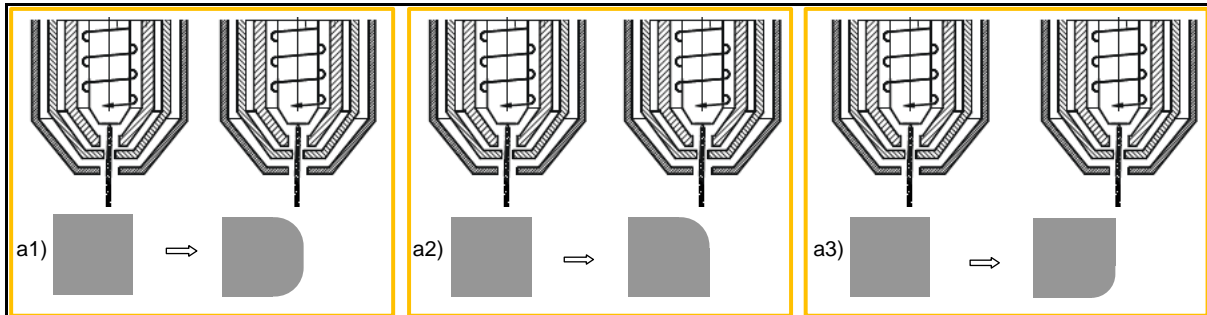


Bild 21: Mögliche Einsatzszenarien

Die folgende Tabelle 7 soll die Szenarien näher erläutern. Die drei Grundszenarien waren: a1) der Plasmaschnitt mit nachfolgender gerundeter Ober- und Unterkante; a2) der Plasmaschnitt mit abgerundeter Oberkante und a3) der Plasmaschnitt mit abgerundeter Unterkante.

Tabelle 7: Beschreibung der Einsatzszenarien

Szenario	Verfahren	Mögliche Verfahrensabläufe
a1)	Plasma-schneiden	Das unbearbeitete Material wird geschnitten mit 90° zum Material oder auch stechend und schleppend. Dabei soll als Ergebnis eine Rundung der Ober- und Unterkante erzielt werden.
a2)	Plasma-schneiden	Das unbearbeitete Material wird geschnitten mit 90° zum Material oder auch stechend und schleppend. Dabei soll als Ergebnis eine Rundung der Oberkante erzielt werden.
a3)	Plasma-schneiden	Das unbearbeitete Material wird geschnitten mit 90° zum Material oder auch stechend und schleppend. Dabei soll als Ergebnis eine Rundung der Unterkante erzielt werden.

In diesen Versuchen wird das Plasmaschneidverfahren zur Kantenbearbeitung mit Materialabtrag betrachtet. Um den Materialabtrag zu erreichen, soll zur Entstehung des Schnitts mit gerundeter Ober- und, oder Unterkante der Schneidprozess angepasst werden. Zum Erreichen dieser Kanten geometrie wurde eine Standard Schneidtechnik mit angepassten Parametern benutzt.

Für die Auswahl von Parameterveränderungen des Schneidprozesses für das Erreichen einer gerundeten Kanten geometrie, siehe Bild 22, wurde das DVS – Merkblatt 2103 herangezogen.

Als Ursachen für die Kantenanschmelzung/Abrundung der Schnittoberkante wird ein zu langsamer oder zu schneller Brennvorschub erwähnt. Weiterhin kann eine zu hohe Stromstärke, ein falsches Verhältnis des Plasmagasgemisches, ein zu großer, kleiner oder nicht konstanter Düsenabstand zum Blech, sowie ein zu großer Düsendurchmesser für die Blechdicke verantwortlich für diese Unregelmäßigkeiten sein. Für die Kantenanschmelzung der Schnittunterkante wird nur ein zu geringer Brennvorschub erwähnt [3].

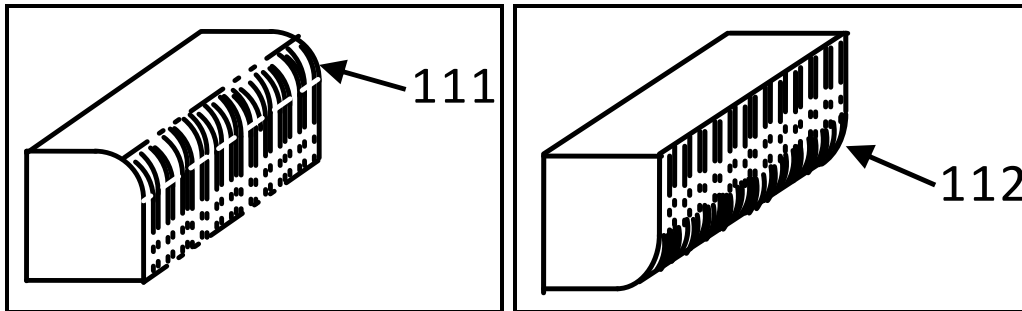


Bild 22: Kantenanschmelzung an Ober- und Unterkante

Nach den ersten Stichproben der Plasmaschnitte ist zu erkennen, dass das Plasmaschneidverfahren überaus stabil auf Veränderungen der Standardparameter reagiert. Bei der Verringerung/Erhöhung der Brennergeschwindigkeit wurde ohne Umstände ein Schnitt angefertigt, aber eine Rundung der Ober- und/oder Unterkante blieb aus. Zwei unzulässige Unregelmäßigkeiten beim Schneiden traten in Form eines Bartes und von festhaftender Schlacke/Schmelze an der Kantenunterseite auf, als der Abstand von der Düse zur Werkstückoberfläche variiert wurde. Außerdem zeichnete sich die typische V-Form beim Plasmaschneiden ab. Diese V-Form verbreitert sich, wenn der Abstand von der Düse zum Blech vergrößert wird. Dies entsteht durch den divergierenden Plasmastrahl, der breiter auf die Blechoberfläche auftrifft und somit mehr Material wegnimmt. Während des Schnittes wird der Plasmagasstrahl dann wieder mit dem Querschnitt des Bleches eingeschnürt. Das folgende Bild 23 zeigt eine V-Schnittgeometrie.

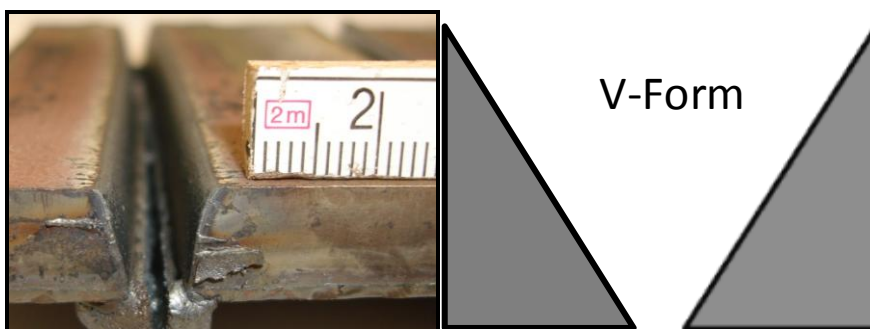


Bild 23: V-Form eines Plasmaschnittes

Desweiteren zeigt das Bild 24 eine konvexere Schnittoberkantengeometrie durch die Verringerung der Durchflussmenge des Wirbelgases. Dadurch erhält der Plasmastrahl eine geringere Einschnürung.

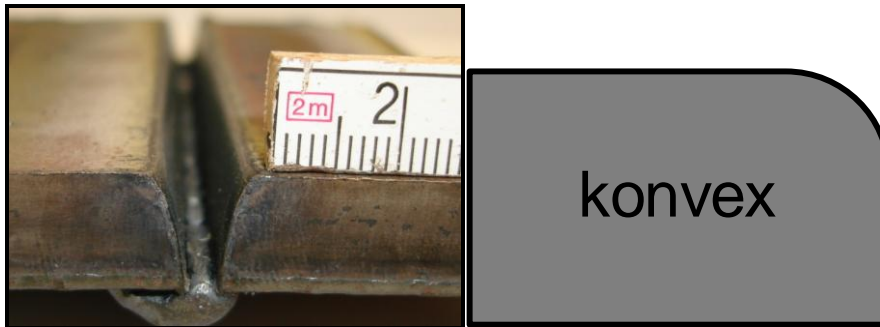


Bild 24: Konvexe Schnittoberkante durch Wirbelgasverringering

Die beiden Plasmaschnitte verdeutlichen die unterschiedlichen Schnittkanten, V-förmig und konvex-rund, bei gezielten Parametervariationen. Somit lässt es den Schluss zu, dass eine Kantenverrundung während des Zuschnitts möglich ist.

Mehrere Einsatzfälle konnten für weitere Untersuchungen mittels Plasmaschneidverfahren in den Vorversuchen ermittelt werden. Dazu gehört der Geradschnitt mit möglicher Ober- und/oder Unterkantenverrundung. Weiterhin soll das stechende Schneiden, unter dem Winkel α , und das Schneiden unter einem Winkel β auf eine Verrundung der Schnittkanten hin untersucht werden, siehe Bild 25. In der nächsten Abbildung werden diese Einstellparameter zur Veranschaulichung dargestellt. Das Einhalten aller möglichen Positionen gewährleistet das Schweißportal mit dem adaptierten Roboter.

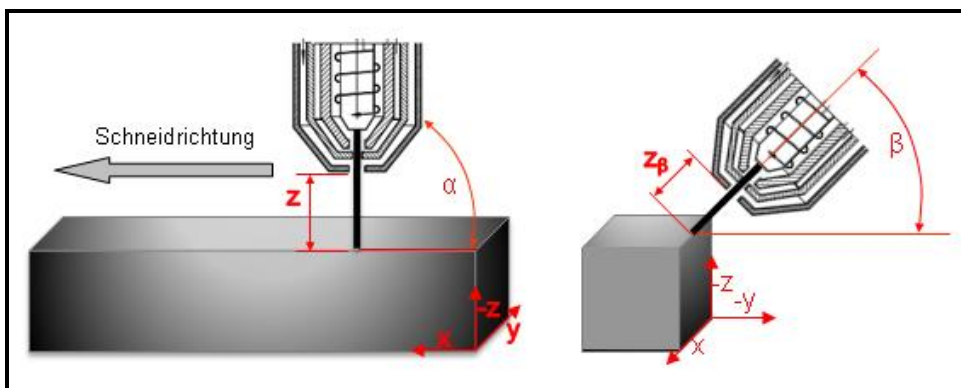


Bild 25: Koordinatensystem mit Bezeichnung der Einstellparameter

Der Versuchsaufbau im Labor wurde den möglichen Wertbedingungen nachempfunden. Das zu schneidende Blech wurde auf den Brenntisch gelegt und dann mit geeigneten Parametern geschnitten. In diesem Laborversuch kam die Variante „Schneiden an Luft“ zum Einsatz, welches in dem Bild 26 dargestellt ist.

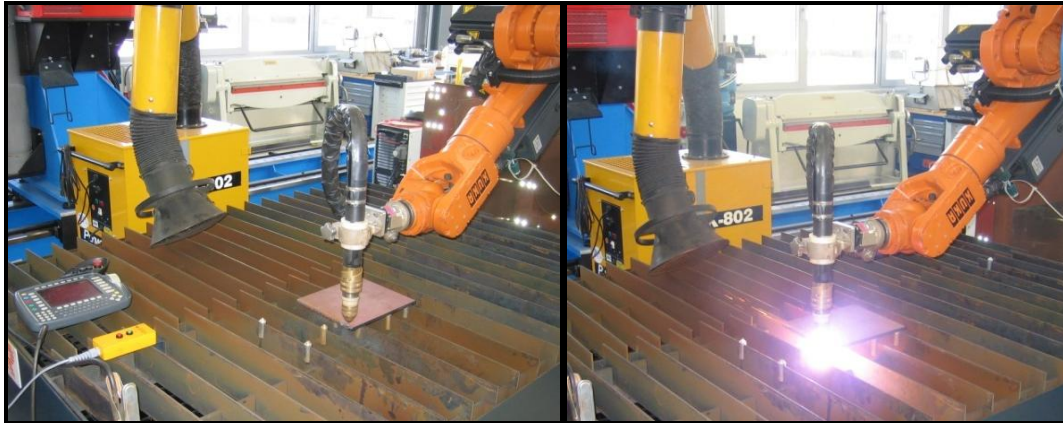


Bild 26: Plasmaschneiden an Luft auf Brenntisch

Ein Datenblatt zum Dokumentieren wurde für alle Versuche angefertigt. Das Datenblatt befindet sich als Muster im Anhang 1. Darin sind die Schneidvariante, Plasmagase, Brennerbestückung usw. eingetragen. Für die Untersuchungen zum Schneiden kam die konventionelle Technik zum Einsatz. Die Vorversuche brachten kein Ergebnis für eine gerundete Schnittkante, aus diesem Grund wurden weitere Parameterabhängigkeiten getestet. In der Tabelle 8 sind alle Schneidparameter als Übersicht dokumentiert worden.

Tabelle 8: Schneiddatenübersicht

Probe	Technologie	Schneidgas	Wirbelgas	Strom [A]	Geschwindigkeit [m/min]	Abstand in z-Richtung [mm]	Blechdicke [mm]
080207-01	HiFocus F	H ₂	N ₂	130	1,0	2,5	10
080207-04	HiFocus F	H ₂	N ₂	130	1,0	7,0	10
0802011-01	HiFocus F	H ₂	N ₂	120	1,0	3,0	10
080211-19	HiFocus F	H ₂	N ₂	120	1,0	3,0 $\beta=30^\circ$	10
080211-21	HiFocus F	H ₂	N ₂	130	1,0	16,0	10
071119-03	HiFocus plus	N ₂	-	160	2,0	5,0	10
071119-12	HiFocus plus	N ₂	-	160	2,0	8,0	10
080313-07	HiFocus plus	O ₂	O ₂ /N ₂	160	2,0	8,0	10
080313-01	HiFocus plus	O ₂	O ₂ /N ₂	160	2,0	3,0	10
080313-16	HiFocus plus	O ₂	O ₂ /N ₂	160	1,0	8,0	10
080401-05	HiFocus plus	O ₂	-	130	1,0	5,0 $\alpha=30^\circ$	9

Die Ergebnisse des Schneidens mit der Variante Wasserstoff als Schneidgas und Argon-Wasserstoff als Zündgas konnten gute Ergebnisse zur konvexen Rundung der Schnittkanten geometrie erzielt werden, jedoch nicht zur Schnittqualität, siehe Bild 27, da ein festhaftender Schlackenbart und auch nicht geschnittene Proben vorhanden sind.

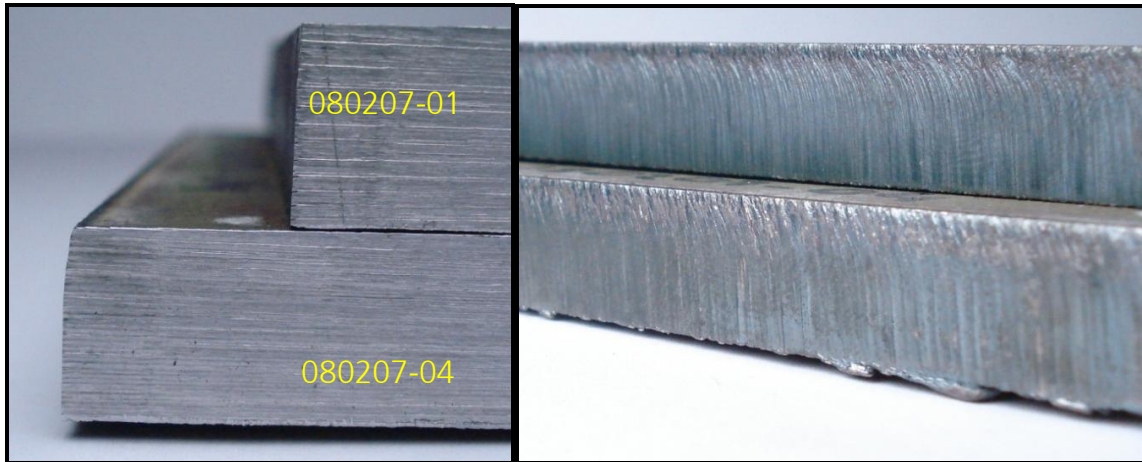


Bild 27: Ar/H₂-Wasserstoffschnitt: Querschnitte (l.), Schnittflächen (r.)

Die Probe 080207-01 zeigt im Querschnitt einen Geradschnitt mit originalen Parametern. Dieser Schnitt weist eine leichte V-Form mit einer Rechtwinkligkeitsabweichung von 0,2 mm (Bereich 3 nach DIN EN ISO 9013) auf. Die gemittelte Rauhtiefe liegt mit 40,8 µm in dem Bereich 2. Ein Rillennachlauf von ca. 3,0 mm, war an der Schnittfläche zu erkennen. Ansonsten trat keine weitere Unregelmäßigkeit auf. Mit den ermittelten Werten liegt der Schnitt in einer „typisch erreichbaren Schnittqualität“ bei Plasmaschnitten. Desweiteren zeigt die Probe 080207-04 durch eine Parameterveränderung mit Hilfe der Erhöhung des Abstandes zwischen Blech und Düse von 2,0 mm auf 7,0 mm eine konvexe Kanten geometrie mit 0,7 mm Rechtwinkligkeitsabweichung (Bereich 4), eine gemittelte Rauhtiefe von 48,89 µm (Anfang Bereich 3), einen Rillennachlauf mit 3,5 mm und deren -tiefe von 0,5 mm. Ein festhaftender Bart ist ebenfalls vorhanden, siehe im Schnittflächenbild oben. Auch dieser Schnitt wird mit einer „typisch erreichbaren Schnittqualität“ kategorisiert. Nur der festhaftende Bart, als Unregelmäßigkeit nach DVS Merkblatt 2103, darf bei einem Qualitätsschnitt nicht vorhanden sein.

Die nächsten beiden Schnitte wurden mit der Variante Argon als Zündgas und Wasserstoff als Schneidgas hergestellt. Eine noch bessere konvexe Verrundung der Schnittkanten geometrie konnte hierbei erzielt werden. Der Plasmaschnitt 080211-01, siehe Bild 28, stellt einen Geradschnitt nach originalen Parametern der Firma Kjellberg dar. Dieser Schnitt zeigt eine weiter öffnende V-Form mit einer Rechtwinkligkeitsabweichung von 0,3 mm (Bereich 3) auf. Die gemittelte Rauhtiefe liegt mit 77,65 µm in dem Bereich 3 nach DIN EN ISO 9013. Ein Rillennachlauf von ca. 1,5 mm, war an der Schnittfläche zu erfassen. Ein festhaftender Bart ist ebenfalls vorhanden, siehe Bild 28 rechts. Mit den ermittelten Werten liegt der Schnitt in einer „typisch erreichbaren Schnittqualität“ bei Plasmaschnitten.

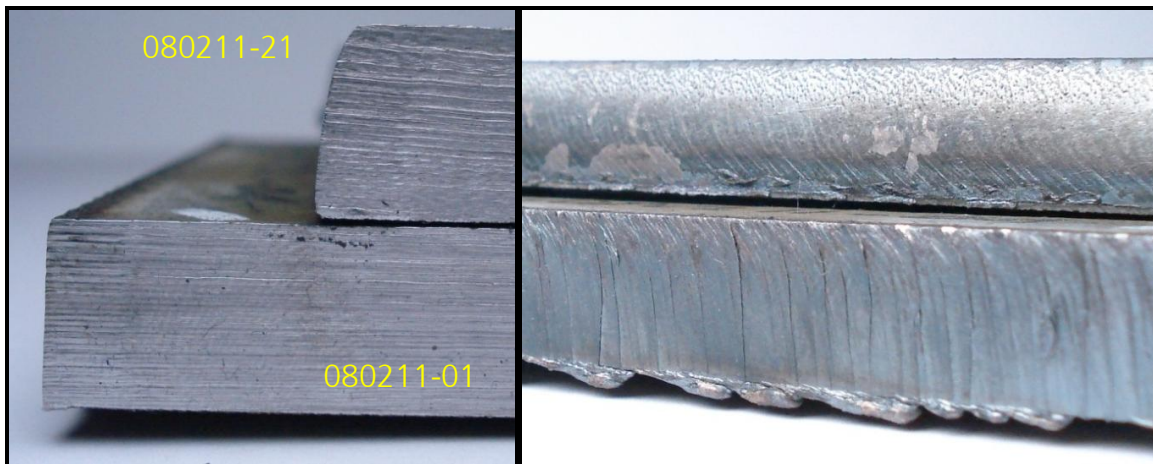


Bild 28: Argon-Wasserstoffschnitt: Querschnitte (l.), Schnittflächen (r.)

Bei einer Parameterveränderung, siehe Bild 28 Probe 080211-21, durch die Erhöhung des Abstandes zwischen Blech und Düse von 3,0 mm auf 16,0 mm ist eine sehr konvexe Kanten geometrie mit 2,3 mm Rechtwinkligkeitsabweichung (außerhalb der Bereiche), eine gemittelte Rauhtiefe von 22,45 μm (Bereich 2) und einen Rillennachlauf mit 4,1 mm festzustellen. Ein festanhaftender Bart ist auch mit diesen Parametern vorhanden. Der Schnitt kann nicht mit einer „typisch erreichbaren Schnittqualität“ betitelt werden, da die Rechtwinkligkeitsabweichung zu erheblich ist. Auch der festanhaftende Bart darf bei einem Qualitätsschnitt nicht vorhanden sein.

Die folgenden zwei Plasmaschnitte wurden mit der Variante Stickstoff als Zünd- und Schneidgas hergestellt. Das Bild 29 stellt eine gute konvexe Kantenrundung dar.



Bild 29: Stickstoffschnitt: Querschnitte (l.), Schnittflächen (r.)

Beide Schnitte, Probe 071119-03 und 071119-12, weisen eine Oxidschicht auf. Dabei zeigt der obere Bereich eine ankrustfreie Schicht. Diese kann mit normalen Ätzmitteln nicht angegriffen werden und heißt „weiße Schicht“. Das nicht vollständig ausgeblasene Material hat sich im unteren Bereich ankrustet und wird somit als angegossene Schicht bezeichnet. Diese Schichten werden als anhaftende Oxidschicht bezeichnet. Die geschnittenen Proben weisen erneut durch die Parametervariation der Erhöhung des Abstandes zwischen Blech und Düse von 5,0 mm (oberes Werkstück) auf

8,0 mm (untere Probe) eine konvexe Kantengeometrie auf. Die Rechtwinkligkeitsabweichung beträgt (Bild oben/unten) 1,3 mm / 1,7 mm und eine gemittelte Rauhtiefe von 21,0 μm / 34,9 μm . Der Schnitt 071119-03 hat im Gegensatz zum Schnitt N einen leicht anhaftenden Bart. Der obige Schnitt gehört noch in die Kategorie „Schnitte mit typisch erreichbarer Schnittqualität“, beim anderen trifft dies aufgrund einer zu hohen Neigungsabweichung nicht zu.

Bei den drei nächsten Plasmaschnitten kam die Variante Druckluft als Zündgas und Sauerstoff als Schneidgas zum Einsatz. In dem nächsten Bild 30 wird ein originaler Geradschnitt (Probe 080313-01), ein Schnitt mit großem Blechabstand (Probe 080313-07) und ein stechender Schnitt mit $\alpha=30^\circ$ (Probe 080401-05) dargestellt.

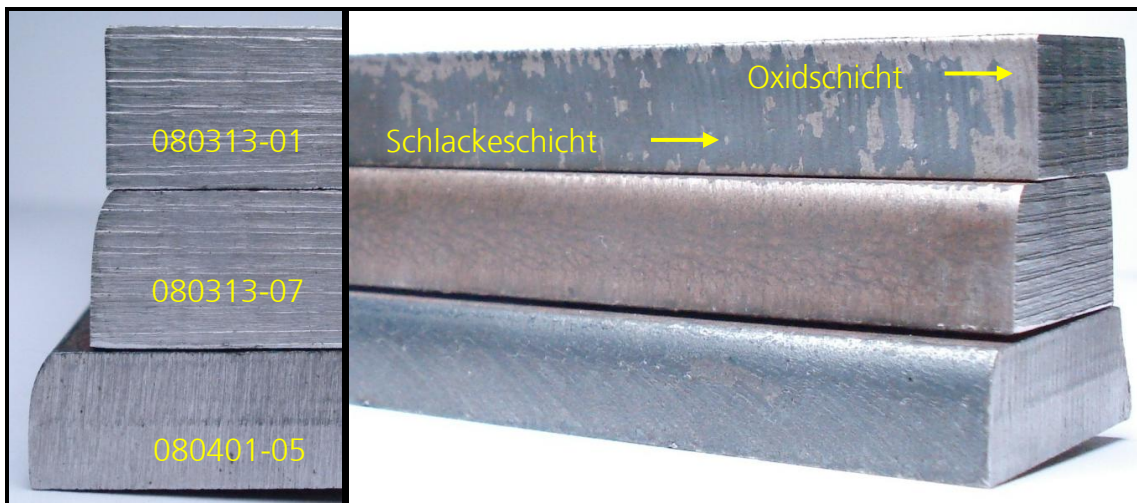


Bild 30: Sauerstoffschnitt: Querschnitte (l.), Schnittflächen (r.)

Bei einem Sauerstoffschnitt entsteht eine leicht anhaftende Schlackeschicht, die aber zu einem großen Teil durch die unterschiedlichen Abkühlbedingungen abplatzt. Durch eine sofort bildende Oxidschicht kann die Schlacke sich nicht mit dem Grundmaterial verbinden. Die dünne Oxidschicht bildet sich durch den freiwerdenden Sauerstoff während der Rekombination und unterbindet eine Oxidation. Der Schnitt 080313-01 entspricht einem originalen Geradschnitt für eine Blechdicke von 10 mm. Wie in der obigen Abbildung zu erkennen ist, entstand eine senkrechte Schnittfläche, ohne jegliche Rechtwinkligkeitsabweichung, mit einer gemittelten Rauhtiefe von 30,15 μm (Bereich 2) und einem Rillennachlauf von 1,5 mm. Ein Bart trat nicht auf. Mit den aufgenommenen Werten liegt der Schnitt in der „typisch erreichbaren Schnittqualität“ bei Plasmaschnitten. Der nächste Schnitt, bezeichnet mit 080313-07, zeigt die Auswirkung der Erhöhung des Abstandes zwischen Blech und Düse von 3,0 mm auf 8,0 mm. Dabei erscheint eine sehr konvexe Kantengeometrie mit 1,3 mm Rechtwinkligkeitsabweichung (Bereiche 5) und eine gemittelte Rauhtiefe von 20,77 μm (Bereich 2). Ein festanhaftender Bart ist nicht vorhanden. Der Schnitt weist eine „typisch erreichbare Schnittqualität“ auf.

Die beste gerundete Schnittkante, siehe Bild 30 Probe 080401-05, wurde durch eine stechende Brennerstellung mit einem Anstellwinkel von $\alpha=30^\circ$, einem Abstand von 5,0 mm des Brenners zum Blech und einer aufgebohrten Düse auf einen Durchmesser von

2,0 mm realisiert. Für diesen Schnitt kam kein Wirbelgas zum Einsatz. Die konvexe Kantengeometrie drückt sich hier durch die Rechtwinkligkeitsabweichung von 1,85 mm (außerhalb Toleranzbereich) aus. Die Schnittfläche mit der gemittelten Rauhtiefe von 23,05 μm liegt im Bereich 2. Ein Bart hat sich nicht ausgeprägt. Die „typisch erreichbare Schnittqualität“ gilt nur für die gemittelte Rauhtiefe.

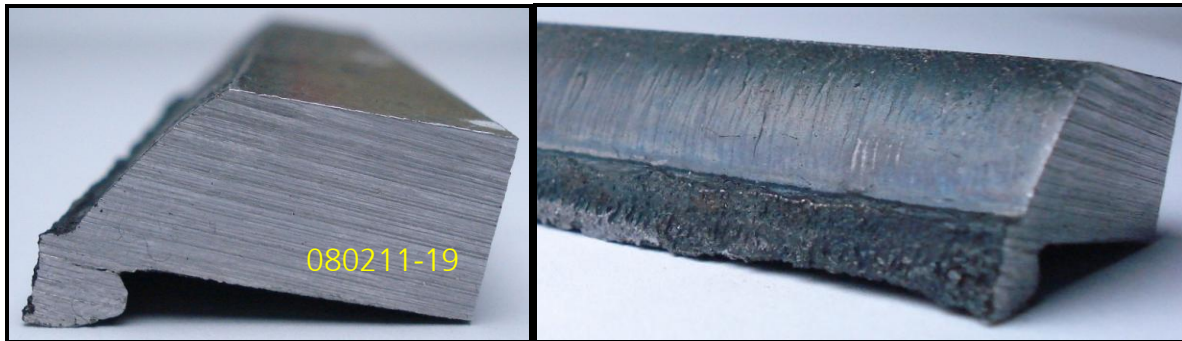


Bild 31: Argon-Wasserstoff Schnitt $\beta=30^\circ$: Querschnitt (l.), Schnittfläche (r.)

Das Bild 31 zeigt einen Argon-Wasserstoff-Schrägschnitt mit einem Anstellwinkel von $\beta=30^\circ$. Dieser Schnitt wurde durchgeführt, um den Einfluss eines Schnittes unter einem Winkel β aufzunehmen. Ein festanhaltender Schlackenbart hinderte das Durchschneiden, da das ausgeblasene Material erneut zusammenklebte. Der Schnitt besitzt eine Rechtwinkligkeitsabweichung von nur 0,3 mm (Bereich 2) und eine gemittelte Rauhtiefe von ca. 77,65 μm (Bereich 3). Dieses Einsatzszenario wurde verworfen, da keine gute Rundung der Schnittfläche entstand.

Zusammenfassend eignet sich die Variante des stehenden Sauerstoffschnitts ohne Wirbelgas mit einer aufgebohrten Düse auf 2,0 mm am besten für das beschichtungsgerechte Kantenbrechen im Zuschnitt, da eine obere Kantengeometrie erreicht wird, die größer ist als 90° , siehe Probe 080401-05. Bei anderen hier vorgestellten Varianten wurden zwar größere Rechtwinkligkeitsabweichungen erreicht, aber durch einen Bart oder einer hohen gemittelten Rauhtiefe als Unregelmäßigkeiten konnte somit kein Qualitätsschnitt erzielt werden. Die Untersuchung des konventionellen Plasmaschneidverfahrens innerhalb existierender Verfahrensgrenzen konnten abgeschlossen werden. Die Schneidtechnologie reagiert sehr konstant auf Parameterveränderung. Der Schneidprozess kann in seinen Variationsgrenzen nicht durch Gase, Stromstärken, Schneidvarianten, Brennerdüsen, Katodenvariationen etc. beeinflusst werden um eine Kantenrundung zu erzeugen. Die extrem, von Originalangaben der Firma Kjellberg, abweichenden Parameter erzeugen zum einen Schnitte mit vielen Unregelmäßigkeiten, die nicht zielführend sind, oder führen zu keinem Schnitt. Eine Rundung der Schnittunterkante konnte durch keine Parametervariation erzeugt werden.

2.2.3 Entwicklung von Methoden zur gezielten Modulation von Plasmabögen mittels Düsenvariation, Kombination mit Aktoren, Magnetfeldern und Schneid-/ Fokussiergasen (AP 430)

Nach ersten Stichversuchen mit herkömmlicher Schneidtechnologie aus Arbeitspaket 430 zeichnete sich ab, dass das Plasmaschneidverfahren sehr stabil auf grobe Veränderungen der Idealschneidparameter reagiert. Die Geschwindigkeiten des Brenners wurden nach oben und unten verändert, dabei erzeugte der Plasmabrenner problemlos Schnitte ohne Verrundung der Ober- und / oder Unterkante. Als negativen Nebeneffekt bildet sich ein Bart an der Kantenunterseite, der als unzulässige Unregelmäßigkeit beim Schneiden unerwünscht ist. Durch diese Veränderung der herkömmlichen zum Schneiden eingesetzten Parameter entsteht weiterhin die für das Plasmaschneiden typische V-Form (Bild 32 Nr. 1). Diese Form prägt sich verstärkt bei Erhöhung des Schneidabstands weiter aus (Bild 32 Nr. 2). Bei Vergrößerung des Abstandes entsteht ein leicht divergierender Plasmagasstrahl der breiter als gewöhnlich auf die Blechoberfläche auftrifft und dabei verstärkt die V-Form am oberen Teil der Schnittkante ausbildet, als im mittleren und unteren Bereich. Der Plasmastrahl wird während des Schnittes im Material wieder eingeschnürt. Dies ist durch den sehr geraden Schnitt am unteren Teil der Schnittkante zu sehen.

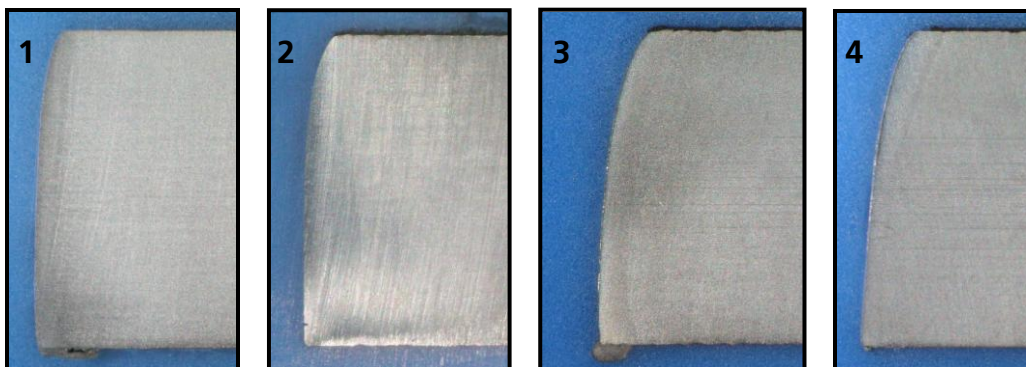
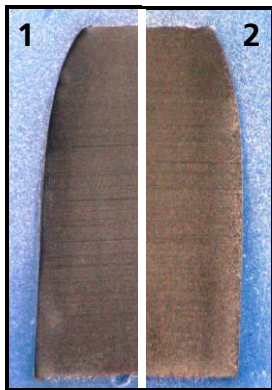


Bild 32: Schliffe von Plasmaschnittkantengeometrien durch Parametervariationen

Der Einsatz eines Brenners ohne Wirbelgas und den dazugehörigen Brennerkomponenten brachte eine ballige Schnittkantenform (Bild 32 Nr. 3). Durch eine Vergrößerung einer konventionellen Plasmagasdüse von 1,6 mm auf 2 mm Düsenaustrittsöffnung konnte eine noch balligere, V-Form ähnliche Schnittkanten erzielt werden (Bild 32 Nr. 4).

Durch den Einsatz vergrößerter Schneiddüsen und einem vergrößertem Abstand weitet sich der Plasmastrahl auf und schmilzt eine größere Fläche vom Material auf. Der Plasmastrahl schnürt sich während des Eindringens in das Material wieder ein. Dieser Ansatz wurde für die unterschiedlichen Gase und Gaskombination aufgegriffen, um ein mögliches Verrunden der Oberkante zu erreichen.

An Beispielen in Bild 33 bildet sich bei beiden Plasmagasen an der Oberkante eine leicht abgerundete Form aus. Diese Form könnte auf den divergierenden Plasmastrahl zurückzuführen sein, der einen V-Form ähnlichen Schnitt oberhalb der Schnittkante ausführt und dabei eine ballige Form prägt. Eine scharfe Kante oben und unten bleibt weiter erhalten. Jedoch verändert sich der Winkel der Oberkante auf einen Wert über 90° , was zu einer Verbesserung der Beschichtung oder einer Verbesserung der Nacharbeiten führen könnte. Die Formen der Schnittkanten sind in diesem Fall nicht auf die Gase Sauerstoff und / oder Stickstoff zurückzuführen.



- Düsengröße 2 mm (Empfehlung Kjellberg 1,4 mm)
 Arbeitsabstand 8 mm (Empfehlung Kjellberg 2 mm)
 Bearbeitungsgeschwindigkeit und Brennerkonfiguration
 nach Datenblatt der Firma Kjellberg
- 1: Schnittkante eines Plasmaschnittes mit Stickstoff als Plasmagas
 - 2: Schnittkante eines Plasmaschnittes mit Sauerstoff als Plasmagas

Bild 33: Schliffe von Plasmanschnittkanten unterschiedlicher Gase

Eine Kombination der Parameterveränderungen von Abstandserhöhung, Düsendgröße und Anstellwinkel konnte eine bessere Verrundung der Oberkante erzielen. In Bild 35 Nr. 1 ist die Kantenverrundung aus vorheriger Abbildung Bild 32 Nr. 2 zum Vergleich dargestellt, um die Veränderungen der Kantengeometrie nachvollziehen zu können. Die Kantengeometrie in Bild 35 Nr. 2 konnte durch eine zu der Parameterveränderung aus Nr.1 zusätzlichen Brenneranstellung Bild 34 erzielt werden.

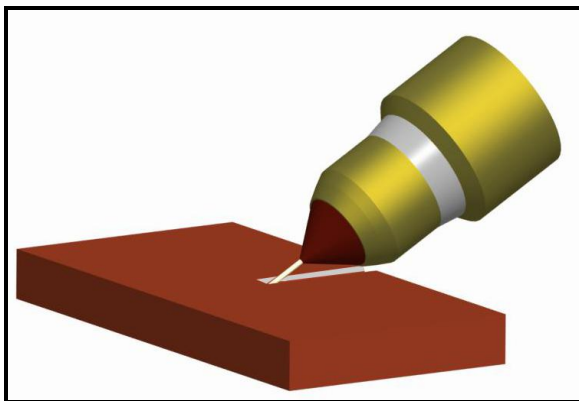


Bild 34: Stechend ausgeführter Plasmaschnitt

Um einen größeren Rundungseffekt zu erzielen, wurde in Bild 35 Nr. 3 ein zum Schnitt nachträglich ausgeführter Schnitt mit vorhergehenden Einstellungen aus Nr. 2 ausgeführt. Die größtmögliche Anrundung der Oberkante konnte daraufhin mit zwei gleichen Arbeitsschritten nacheinander erzielt werden. Diese Arbeitsvariante erzielte die beste Verrundung, wurde aber vom Konsortium, aufgrund des nicht praxisrelevanten Aufwand-Nutzen-Verhältnisses, als nicht zielführend eingestuft.

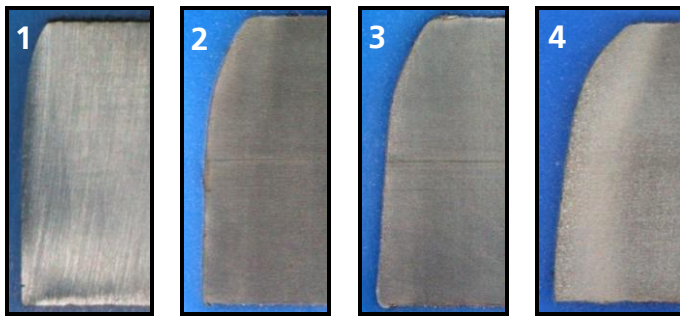


Bild 35: Schliffe von Plasmaschnittkantengeometrien durch Parametervariationen

Weitere Versuche mit der Variante Nr. 2 aus Bild 35 in Bild 36 um an kreisförmigen Ausschnitten eine optimale Verrundung zu erzeugen konnten mit einer Winkelverstellung in der x-y-Ebene erzielt werden.

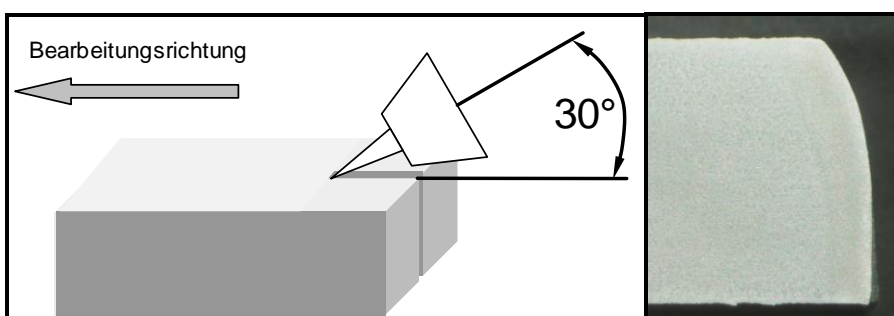


Bild 36: Geradschnitt mit Brenneranstellung und Schliffbild der Kantengeometrie

Dabei wurde eine Abhängigkeit des Winkels mit dem zu schneidenden Radius festgestellt. Wird der Winkel in der Ebene nicht nachjustiert entsteht ein in Bild 37 mitte dargestellter Schnitt. Im Fall des ausgeführten Radius konnte bei einem 15° eingestellten Vorwinkel beim Beginn der Drehung bis zum Ende eine verwendbare Schnittqualität erzielt werden, wobei die Unterkante eine leichte Anrundung erhielt.

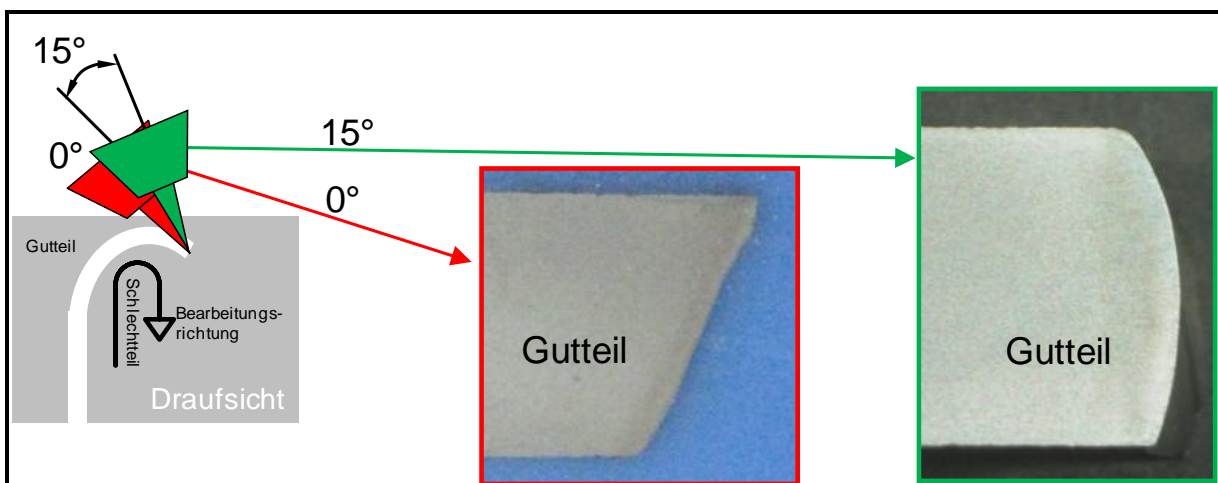


Bild 37: Kreisförmiger Ausschnitt mit und ohne Vorwinkel und dazugehörigen Schliffbild

Diese Anrundung erleichtert die Nacharbeit mittels Plasmaschweißprozess, da hier weniger Material aufgeschmolzen werden muss. Diese zum Arbeitspaket 440 gehörenden Arbeiten wurden gleich durchgeführt und konnten erfolgreich abgearbeitet

werden. In Bild 38 sind die Schnitte mit den ermittelten Parametersätzen mit angerundeter Oberkante und nachträglich thermisch bearbeitete Unterkanten an Geraden und Kreisausschnitten dargestellt.

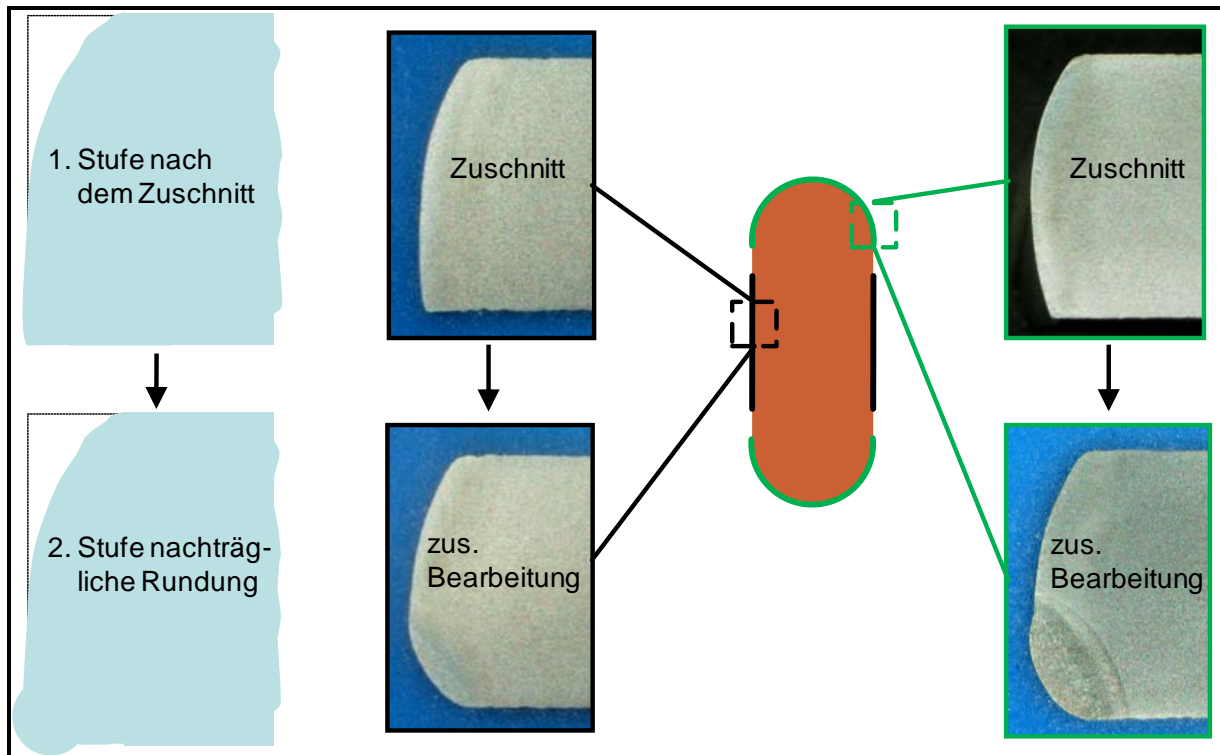


Bild 38: Zweistufiger Arbeitsprozess

Eine weitere Anwendung für die Kantenvorbereitung mittels Plasmaschneidverfahren könnte das direkte Anschmelzen sein. Aus Vorüberlegung schneidet der direkte Lichtbogen eine Fuge in das Material. Durch eine Leistungsverringerung über eine Minimierung der Plasmagasmengen und der Stromstärken, mit einem so genannten Markierdatensatz, erreicht der Lichtbogen eine geringfügige Anschmelzung des Materials. Mit einer entsprechenden Anstellung des Brenners wird das flüssige Schmelzgut mit der ausreichenden kinetischen Energie des Gases weggeblasen. In Bild 39 ist eine direkt angeschmolzene Kante dargestellt. Das Verfahren, mit dem diese Kante bearbeitet wurde, ähnelt dem Plasmafugenhobeln. Auch bei diesem Verfahren wird Material aus einer Fuge getrieben nachdem es schmelzflüssig geworden ist. Der Makroschliff zeigt eine sehr kleine Wärmeeinflusszone, die eine Verringerung der Rissanfälligkeit durch Aufhärtung zur Folge hat. Ein weiterer Vorteil ist die geringe Schlacke und Schlackehaftung. Das ausgeblasene Schmelzgut kühlt schnell ab und bildet durch den rekombinierten Sauerstoff eine Oxidschicht.

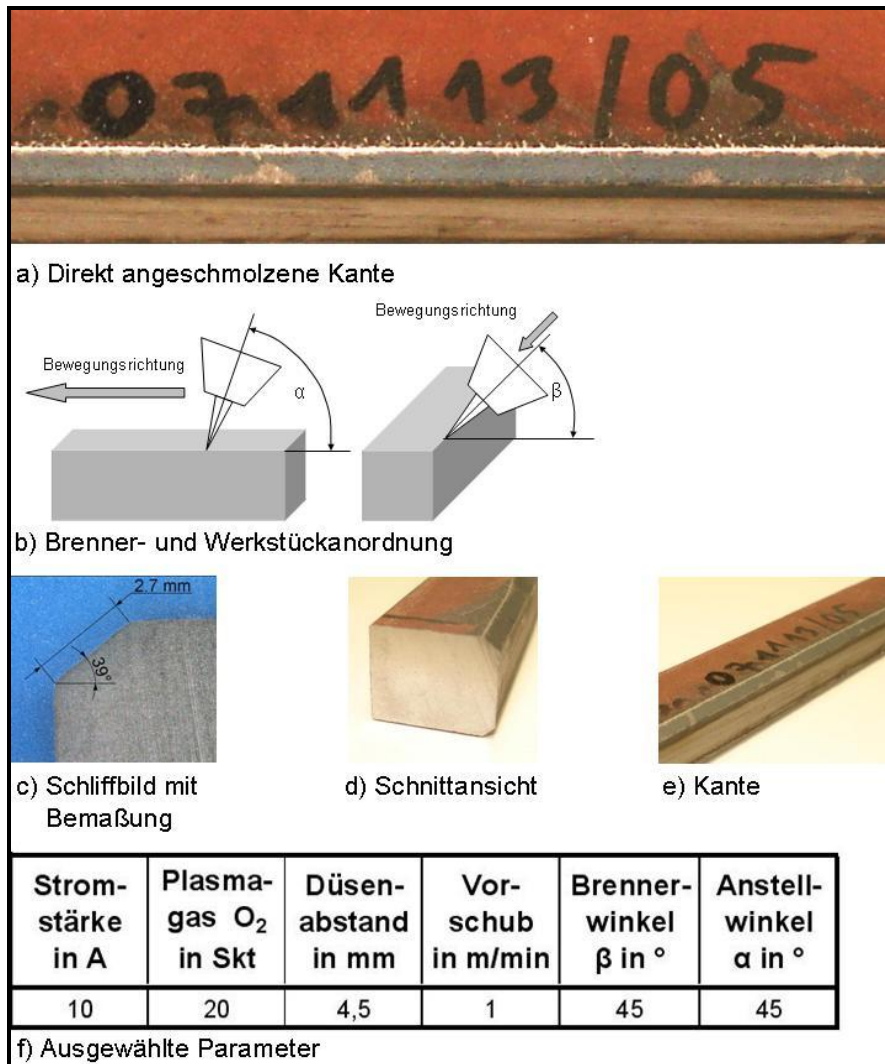


Bild 39: Mittels Plasmaschneidbrenner bearbeitete Kante

Diese Schicht verhindert das Anhaften der Schlacke und das Verschmelzen des ausgeblasenen Materials an der Werkstückoberfläche. Ein zu erwähnender Vorteil dieser Verfahrensvariante ist die hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit, die in Kombination mit der elektrischen und kinetischen Energie angepasst werden muss. Über die Anpassung der Geschwindigkeit erfolgt eine Veränderung der Fasenbreite. Das heißt, dass eine hohe Geschwindigkeit mit geringer Energie eine kleine Fase möglich macht und mit Erhöhung der Energie bzw. mit Verringerung des Vorschubs die Fase größer wird. Um einen Einfluss des Plasmagases auf die Schlackemenge, Schlackeform und Schlackefestigkeit festzustellen, konnte mit der konventionellen Technik drei Gase getestet werden.

Die dargestellten Ausschnitte von plasmagehobelten Fasen zeigen alle drei eine gute Schlackelösbarkeit. Die sauerstoffbearbeitete Fase hinterließ die geringsten Schlackeanhaftungen. Die bearbeiteten Fasen lassen beim Plasmagas Argon lange dünne leicht abnehmbare Schlackespritzer und die mit Plasmagas Stickstoff lassen wenig dickere abnehmbare Schlackeplatten erkennen. Beim Plasmagas Stickstoff und Sauerstoff entsteht eine leicht entfernbare Oxidschicht, die wie im Bild 40 oben und

unten abblättert. Die Schlacken und die Oxidschichten, die noch haften bleiben, können ohne bleibende Rückstände von der Kante und Materialoberfläche mit konventionellen Lackiervorbereitungen entfernt werden.

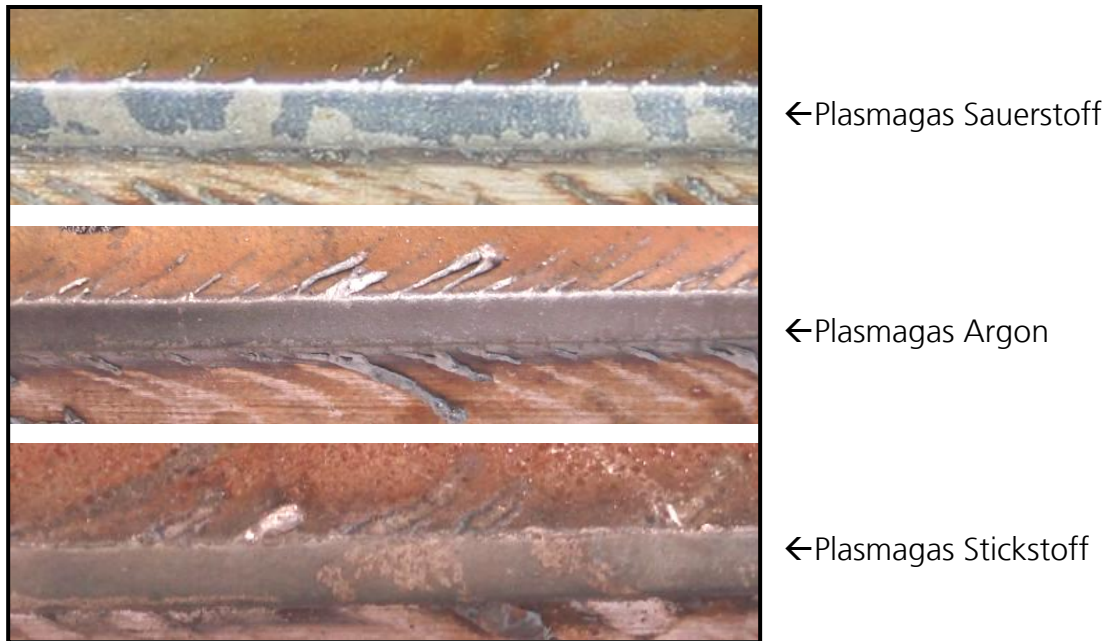


Bild 40: Einfluss des Plasmagases auf Schlackebildung

Möglichkeiten die nicht geräumten Platten mit dieser Variante zu bearbeiten, zeigen dass beim Nachfahren der Schneidkontur mit angewinkeltm Brenner und abgeschwächter Energie beide Kanten angefast werden (Bild 41). Vorteile dieser Variante sind die sehr hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten und die Bearbeitung von Stegen. Diese können nachträglich wie bisher geschnitten werden und besitzen danach eine Fase wie die restlichen Kanten. Die Bearbeitung des Schlechteils ist ein zu vernachlässigender positiver Nebeneffekt.

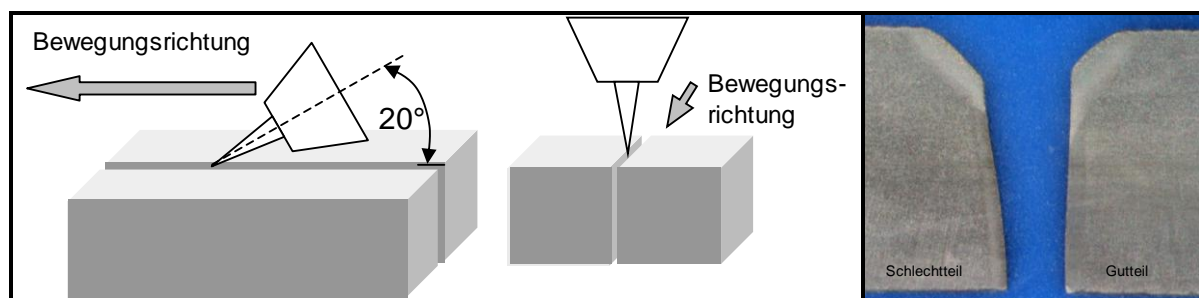


Bild 41: Kantengeometrie bei Nachfahren der Kontur bei nicht geräumten Plattenzuschnitt

Auch der Versuch vor dem Schneiden mit dem Fugenhobel eine Fuge zu erzeugen, die danach geschnitten wird, erzeugte ähnliche Ergebnisse (Bild 42).



Bild 42: Kantengeometrie beim Fugenhobeln vor dem Schnitt

Versuche zeigten, dass eine Kantenvorbereitung mit geschnittenen Fasen möglich ist. Der Fasenschnitt, der zurzeit für eine Schweißnahtvorbereitung eingesetzt wird, könnte aufgrund keiner konkreten Aussagen der Normen und Richtlinien für eine beschichtungsgerechte Kantenvorbereitung in Frage kommen. Die Fasenschnitte setzen ein Abräumen des Restschrotts aus dem Zuschnitt voraus, ansonsten ist die Zugänglichkeit des Brenners maximal für die Oberkante gegeben. Der Fasenschnitt sollte rechts in Bewegungsrichtung liegen, da bei der HiFocus Plus-Technologie die rechte Seite keine Winkelabweichung aufweist. Um einen möglichst kleinen Fasenschnitt zu bekommen, wurde versucht sehr wenig Material von der Kante zu entfernen. Der Schneidbrenner wurde knapp an der Kante abgefahren. Es kommt zu einem Schnitt, bei dem kein Abfall entsteht. Die aufgeschmolzene Kante wird vollständig von der kinetischen Energie weggeblasen. Dabei fehlt dem Plasmastrahl der Gegenpol, wie er bei einem herkömmlichen Materialschnitt vorhanden ist. Dieser fehlende Gegenpol lässt den Plasmastrahl in Richtung Restmaterial ablenken. Dabei legt der abgelenkte Lichtbogen sich um die Kante und lässt dabei die Schlacke bzw. die ausgeblasene Schmelze dort mit dem Grundmaterial verwachsen (Bild 43). Diese Schmelze ist sehr fest haftend, ähnlich einer Auftragsschweißung. Diese Art der Kantenbearbeitung ist untauglich für die beschichtungsgerechte Herstellung der Kanten.



Bild 43: Fasenschnitt mit festhaftender Schmelze

Somit wurden Fasenschnitte mit einem definierten Materialabschnitt ausgeführt (Bild 44 und Bild 45). Dabei sind Fasenschnitte der Ober- und Unterkante untersucht worden. Bis auf die geometrische Anordnung des Brenners führt dieser die Fasenschnitte in gleicher Qualität aus (Bild 44 oben und Bild 45 oben).

Ein weiterer Untersuchungsgegenstand war die erreichbare Fasenbreite, da eine beschichtungsgerechte Kante und nicht ein Fasenschnitt zur Schweißnahtvorbereitung Ziel ist. Die Brennerbestückung spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Die Brenner werden für unterschiedliche Blechstärken mit unterschiedlichen Verschleißteilen ausgerüstet, um die Blechstärke in einer sehr guten Qualität zu trennen. In Bild 44 ist eine breite Fase abgebildet, die mit einer Brennerbestückung von 10 mm geschnitten wurde. Bei einer großen Brennerbestückung wird die Schnittfuge breiter. Das hat zur Auswirkung, dass der Schnitt von vornherein breiter angesetzt werden muss, um das vorher beschriebene Phänomen der Lichtbogenablenkung zu umgehen. Der Plasmastrahl treibt das Material vollständig aus der Fuge ohne einen Bart oder anderen Schnittunregelmäßigkeiten zu hinterlassen.

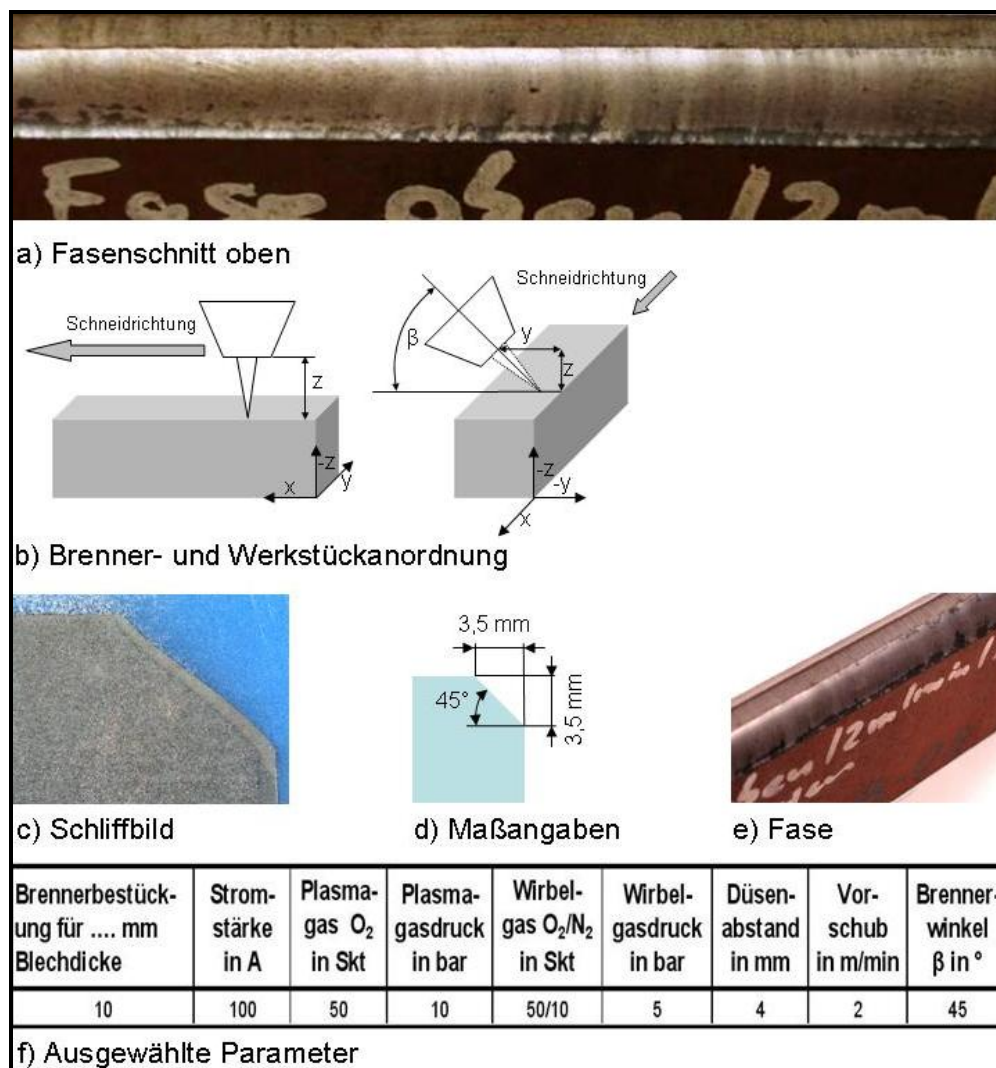


Bild 44: Mittels Plasmaschneiden erzielte obere Fase

Die Schnittgeschwindigkeiten sind, aufgrund der gleichen Technologie wie beim Schneiden, identisch. Eine kleine Fase durch eine kleinere Verschleißteilbestückung konnte, wie in Bild 45 demonstriert, in sehr guter Qualität hergestellt werden. Diese Größe der Fase kommt einer beschichtungsgerechten Kantenvorbereitung, zum Beispiel laut DIN EN ISO 12944 Teil 3, sehr nahe. Die Wärmeeinflusszonen sind in beiden Fällen

der Faserschnitte dem herkömmlichen Schneiden identisch. Kleine Faserschnitte können in einer größeren Schneidgeschwindigkeit hergestellt werden als die Schnitte des Grundmaterials.

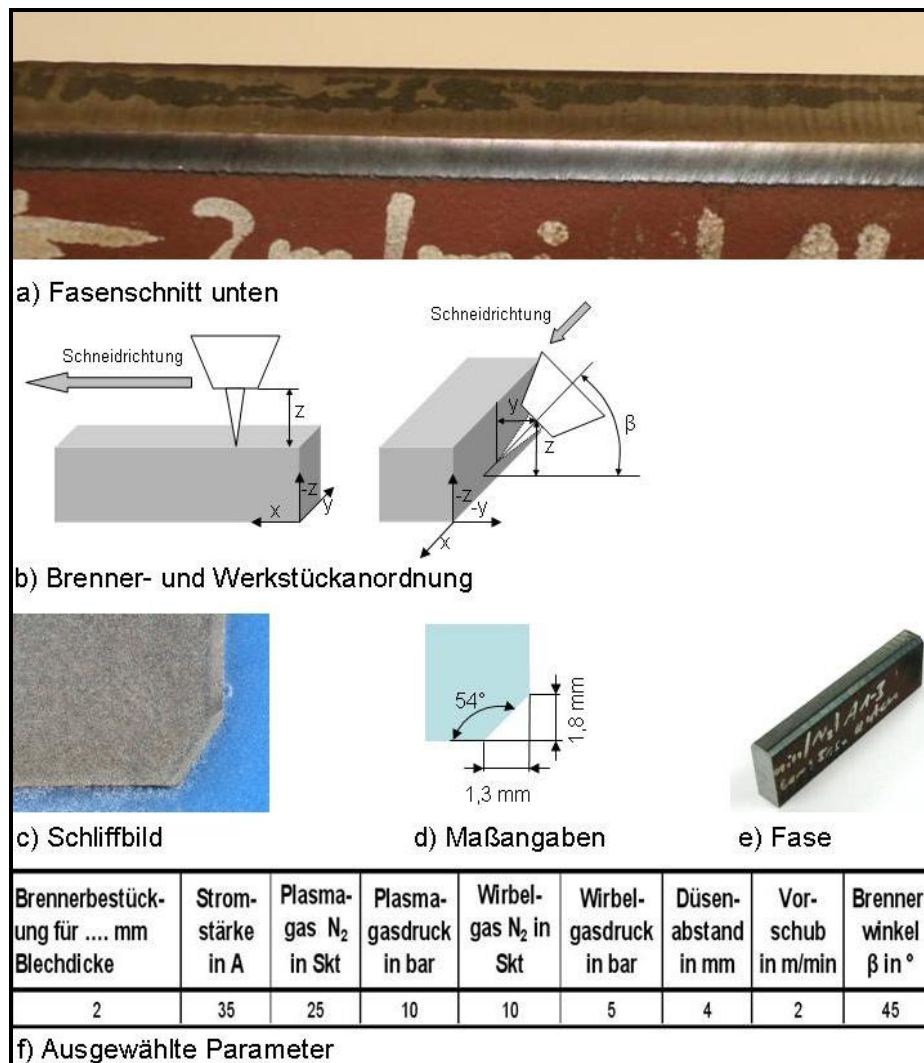


Bild 45: Mittels Plasmaschneiden erzielte untere Fase

Der Gebrauch unterschiedlicher Plasmagase zeigte keinerlei Auswirkung auf das Ergebnis beim Faserschneiden. Die Gase bzw. Gaskombinationen konnten gleichermaßen wie beim Schneiden eingesetzt werden und zeigten dieselben Eigenschaften der Oberflächengestaltung und der Unregelmäßigkeiten an den Schnittflächen.

Aufgrund der in dem Projekt nicht avisierten Kantenform Fase wurden in den dargestellten Varianten Möglichkeiten aufgezeigt, die mittels Plasmaprozess, eventuell auch als Alternative zur Fase, zu erreichen sind.

Tabelle 9: Vorläufige Ergebnisse mittels Plasmaschneidverfahren aus AP 420/430

	Einsatzszenario	Ergebnisse und weitere Untersuchungen
●	<p>a1)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Verrundung der Ober- und Unterkante im Zuschnitt mit herkömmlichen Brennerkomponenten nicht möglich - Weitere Untersuchung mit neuen Düsenkonfiguration, Brennerpendelung und Lichtbogenablenkung
●	<p>a2)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Verrundung der Oberkante im Zuschnitt mit herkömmlichen Brennerkomponenten und geeigneten Schneidparameter ballige Form möglich - Weitere Untersuchung (siehe oben)
●	<p>a3)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Verrundung der Unterkante im Zuschnitt mit herkömmlichen Brennerkomponenten nicht möglich - Weitere Untersuchung (siehe oben)
●	<p>b1)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Verrundung der Oberkante mit direktem Anschmelzen nicht möglich - Erreichen einer Fase an der Kante durch Verringerung der kinetischen und elektrischen Energie mit geeigneten geometrischen Brennerparametern in guter Qualität und hoher Geschwindigkeit möglich
●	<p>b2)</p> <p>Masse</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ablenkung des Lichtbogens zur Verrundung bzw. Umschmelzen der Kante weitere Untersuchung notwendig
●	<p>b3)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fasenschnitte an Ober- und Unterkante in sehr guter Qualität und hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten machbar
●	<p>b4)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Umschmelzen der Kanten mit indirektem Lichtbogen weitere Untersuchungen mit entsprechender Technologie notwendig

● Einsatzfähigkeit, ● bedingte Einsatzfähigkeit, ● keine Einsatzfähigkeit nachgewiesen

Einige ausgeführte Vorüberlegungen scheiterten bei ersten Stichversuchen, wie zum Beispiel das nochmalige Vorbeifahren des Plasmaschneiders am vorher erzeugten Schnitt. Dieser Versuch brachte ein weiteres unvollständigen Anschnitt und eine Unbrauchbarkeit der Kante.

Bei einem kleinen Versatz des Brenners ins Blech schneidet der Plasmastrahl lediglich eine Scheibe vom Blech ab. Ist der Versatz sehr klein schmilzt der Plasmastrahl das Material an, dass sich an der Unterkante als Schlackebart sammelt.

Ein Versuch den Lichtbogen, durch ein davor liegendes Blech, auf sich zu ziehen und mit den sogenannten Isothermen des Plasmastrahls die Kante umzuschmelzen, misslang. Aufgrund des längeren Lichtbogens entstand ein stark spritzender Prozess mit einer unbeeinflussten Kante als Ergebnis.

Weiterhin wurden Fasenschnitte in unterschiedlichen Reihenfolgen ausgeführt. Dabei sollte der Lichtbogen vom Schnitt 3 bei der Variante in Bild 46 an der Unterkante abgelenkt werden. Die angerundete Unterkante besitzt bei einem sehr unruhigen Lichtbogen keine definierte Rundung mit einem vorgegebenen Radius. Der Arbeitsablauf eines Fasenschnittes um eine Rundung zu erzeugen, ist aufgrund des hohen Aufwandes nicht zielführend für die Produktivität der Werften.

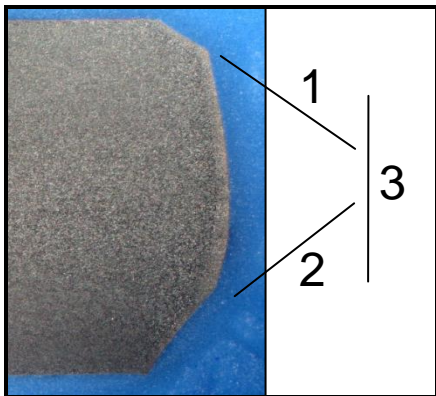


Bild 46: 3-Fasenschnitt

Die letzten genannten aufgeführten Varianten werden aufgrund der Einsatzuntauglichkeit für die Werft und der selbst unter Laborbedingungen geringen Erfolgsquote nicht weiter verfolgt. Da mit der vorhandenen Technik abzusehen war, dass die Plasmaschneidvariante keine hohe Erfolgsquote besitzt, wurden nach Absprache im Konsortium auf dem 5. Projekttreffen in Rostock am 26.06.2008 Teile aus dem Arbeitspaket 430/440/450 Modulationsvarianten über piezoelektrische Aktoren und variablen Magnetfelder geändert, um das erfolgversprechende Plasmaschweißen weiter untersuchen zu können. Dabei wurde das Plasmaschweißen in die Korrosionsuntersuchungen und statistischen Versuchsplanung aufgenommen. Zusätzlich wurden Untersuchungen zum indirekten Lichtbogen, als weitere Lichtbogenmodulation, in den Versuchsplan eingereiht.

2.2.4 Entwicklung bzw. Adaption und Bau von Systemen zur gezielten Modulation des Plasmalichtbogens zum Kantenrunden (AP 440)

Das Handplasmасhneidverfahren der Firma Fronius (Bild 47) konnte im Einsatz getestet werden. Durch die autarke Gasversorgung mittels Wasserdruckflaschen muss ein entsprechender Volumenstrom aufrecht erhalten werden, um eine bestimmte Kühlung zu gewährleisten.

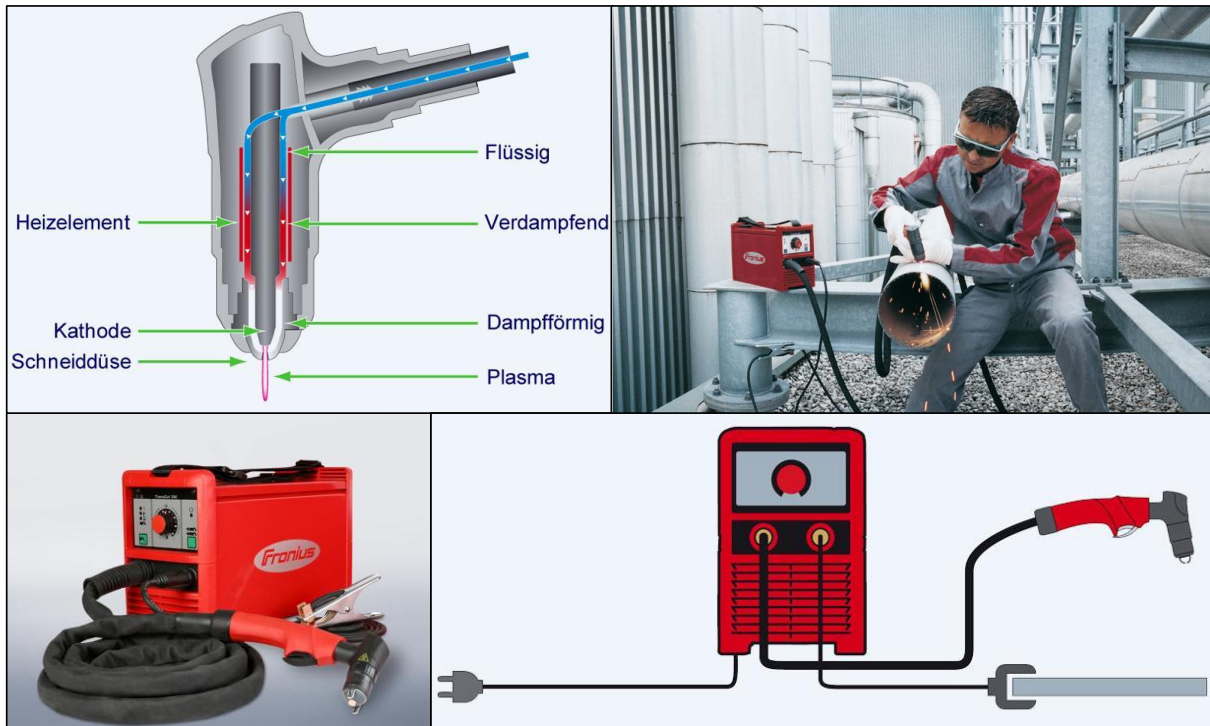


Bild 47: Prinzip und Einsatz der Handplasmасhneidanlage der Firma Fronius

Dieser Volumenstrom besitzt für das Umschmelzen einen zu hohen kinetischen Anteil. Die Kante kann bei gezielter Beeinflussung der Parameter eine Fase erzeugen, die schon mit dem Maschinenbrenner bei niedriger Energieeinstellung im Fraunhofer AGP mittels vorhandener Technik erzeugt wurde. Diese Kantenform entsprach nicht den Vorstellungen der IMO und des Projektkonsortiums. So konnte das Plasmahandschneidgerät in dieser konventionellen Form ausgeschlossen werden. Weitere Recherche mit der Firma Kjellberg brachten ähnliche Aussagen. Durch die Luftkühlung benötigt das Schneidverfahren einen überhöhten Volumenstrom zur Kühlung, der bei wassergekühlten Anlagen trotz Verringerung kein zielführendes Ergebnis brachte.

Die vorhandene Handplasmасhweißanlage wurde in Vorversuchen von Hand an der Kante geführt. Der Plasmalichtbogen konnte schwankende Brennerhaltung optimal ausgleichen. Er kann bis zu 100 mm Lichtbogenschwankungen ausgleichen ohne abzureißen. Mittels Rollwagen wurde in dem folgenden Untersuchungszeitraum die Handhabbarkeit der Plasmасhweißanlage geprüft.

Das Bearbeiten mit einem Handplasmасystem kann nur mit einem Schweißgerät und einem Handbrenner realisiert werden. Die, aufgrund der Größe, favorisierten

Handplasmaschneidsysteme sind für den Einsatz zum Umschmelzen nicht geeignet. Der für den maschinellen Einsatz genutzte Schweißbrenner wurde mit und ohne Räderwagen (Bild 48) zum Umschmelzen getestet und kann mit eingewiesenen Bearbeitern für den manuellen Gebrauch zum Einsatz kommen.



Bild 48: Stromquelle Fa. SBI, Plasmabrenner Fa. Abicor Binzel und Räderwagen Fa. Kjellberg

Der geplante Einsatz des indirekten Lichtbogens wird nach einer aus Bild 49 ersichtlichen Modifizierung der Düsen durch die Firma Kjellberg möglich. Die Düsen wurden mit einer größeren Kupfermenge hergestellt als herkömmliche Düsen und werden bis an den vorderen Rand am Austritt gekühlt, was über eine zusätzliche Anpassung der Düsenkappe ermöglicht wurde.



Bild 49: Links alte Düsenform und rechts neue Düsenform

Durch die Düsen besitzt der Brenner längere Standzeiten und kann bei vielen Zündungen am Düsenaustritt nicht „aufressen“. Über die verbesserte Kühlung sind höhere Spannungen möglich. Führt der Plasmabrenner mit dem indirekten Lichtbogen beim Umschmelzen zum Ziel, könnte die Firma Kjellberg ein Automatenbrenner fertigen und der Einsatz zum maschinellen Umschmelzen verifiziert werden. In Bild 50 ist der modifizierte Plasmabrenner mit einem indirekten Lichtbogen dargestellt.



Bild 50: Brenner mit indirektem Lichtbogen

Ein Wechselkopfsystem ist möglich, wenn eine Umschmelzung mittels indirektem Lichtbogen auf den Werften zum Einsatz kommen soll. Die Feldversuche zeigten eine dem Plasmaschweißprozess ähnliche Kantenform und können den Radius von 2 mm realisieren. Die geforderten Bearbeitungsgeschwindigkeiten können derzeit nicht eingehalten werden und sind kleiner als beim Plasmaschweißprozess.

Durch den großen Düsenaustritt wird die kinetische Energie abgeschwächt. Damit wirkt der Prozess wie ein Schweißprozess. Der Prozess benötigt lediglich eine Zustellung des Brenners auf das zu bearbeitende Blech mit freier Kante um ca. 1-2 mm.

In weiteren Versuchen wurde der Umschmelzprozess dem Schneidprozess folgend adaptiert. Die Arbeitspunkte wurden möglichst dicht aneinander gestellt, um die Arbeitswärme des Schneidprozesses für den Umschmelzprozess auszunutzen (Bild 51). Die vom Schneidprozess erzeugte im Material vorhandene Wärmeenergie kann beim Umschmelzen eingespart werden. Damit können höhere Arbeitsgeschwindigkeiten realisiert und die Wärmeeinbringung um eine reduziert werden.



Bild 51: Schneid- und Schweißbrenner in einer Aufnahme

Die Prozesse können aufgrund ihrer unterschiedlichen Energieformen nicht in einen Arbeitspunkt gebracht werden. Zudem unterliegen die Lichtbögen einer elektromagnetischen Beeinflussung. Die Lichtbögen verhalten sich wie zwei stromdurchflossene Leiter mit gleicher Flussrichtung und ziehen sich gegenseitig an. Weiterhin bläst der hohe kinetische Anteil des Schneidens dem Schweißprozess die Prozessgase weg. Der Abstand beider Bearbeitungswerkzeuge, bei dem keinerlei Beeinflussung stattfindet, wurde bei 60 mm ermittelt (Bild 52 oben).

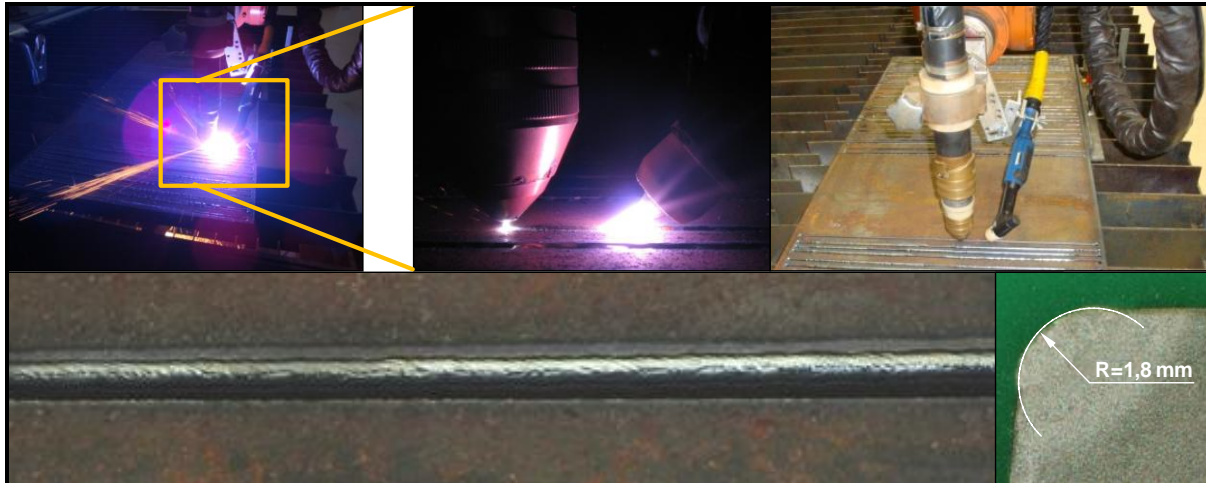


Bild 52: Plasmaschneid- und -schweißprozess in einer Aufnahme mit Ergebnis

Das Verfahren arbeitet stabil und erzielt mit 2,5 m/min die höchste Geschwindigkeit bei optimalen Rundungsergebnissen (Bild 52 oben), die mit der Hi Focus 160i im Schneidbetrieb von 10 mm Blechstärke möglich ist. Höhere Geschwindigkeiten könnten mit höherstromigen Schneidanlagen getestet werden. Der nachfolgende Umschmelzprozess benötigt in Kreisbewegungen eine zusätzliche Zustellachse und wurde dadurch vom Konsortium als nicht sinnvoll erachtet und sollte nicht weiter getestet werden.

Das Plasmaschweißen mit dem sehr konzentrierten und stabilen Lichtbogen wurde als Verfahren für den nachträglichen zweiten Bearbeitungsschritt im Projekt als sinnvoll angesehen und wurde weiterhin auf seine Anwendbarkeit überprüft. Dabei wurden in folgenden Arbeitspunkten die Lichtbogenmodulation mittels Gasvariation, Positionsvariation und weiteren Parametereinstellungen an allen möglichen Einsatzstellen zum Kantenrunden untersucht.

2.2.5 Experimentelle Untersuchungen von Schneidbrennervarianten und Schnittkantenparametern durch den Einsatz spezieller Systeme zur Modulation des Plasmalichtbogens (AP 450)

Im Vorfeld musste ein Brennerwinkel gefunden werden, bei dem dieses Verfahren generell anwendbar ist. Das Blech wurde zu Beginn der Tests in eine 45° Vorzugslage gebracht um ein ideales Verlaufen des verflüssigten Materials zu erreichen. Nach positiven Ergebnissen wurden die Bleche werftnah in die liegende Position gebracht und der Brenner in $\beta = 45^\circ$ an die Blechkante geführt.

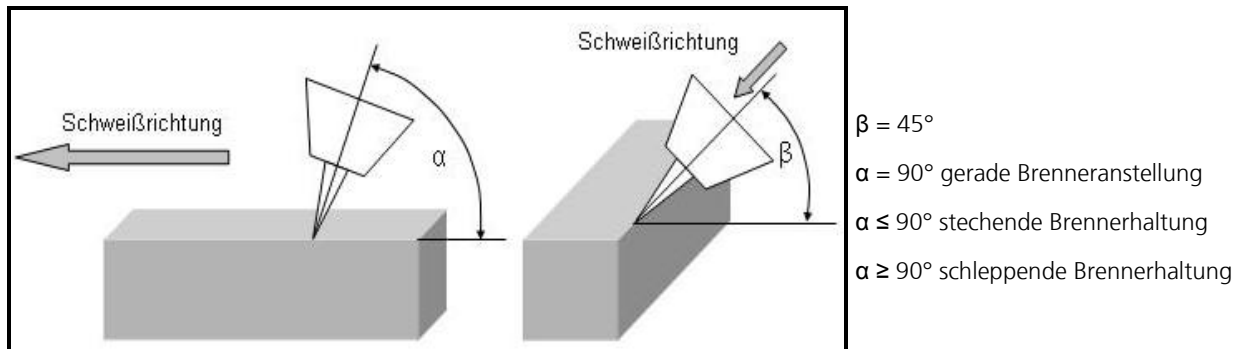


Bild 53: Brennerhaltung β und Brenneranstellung α

Dazu passend musste eine optimale Brenneranstellung gefunden werden. Diese konnte durch die Variation des Winkels α in plus und minus um 90° ermittelt werden. In Bild 54 ist der Unterschied an geschweißten Proben zwischen gerader, schleppender, und stechender Brenneranstellung α bei einem Brennerwinkel $\beta = 45^\circ$ zu sehen.

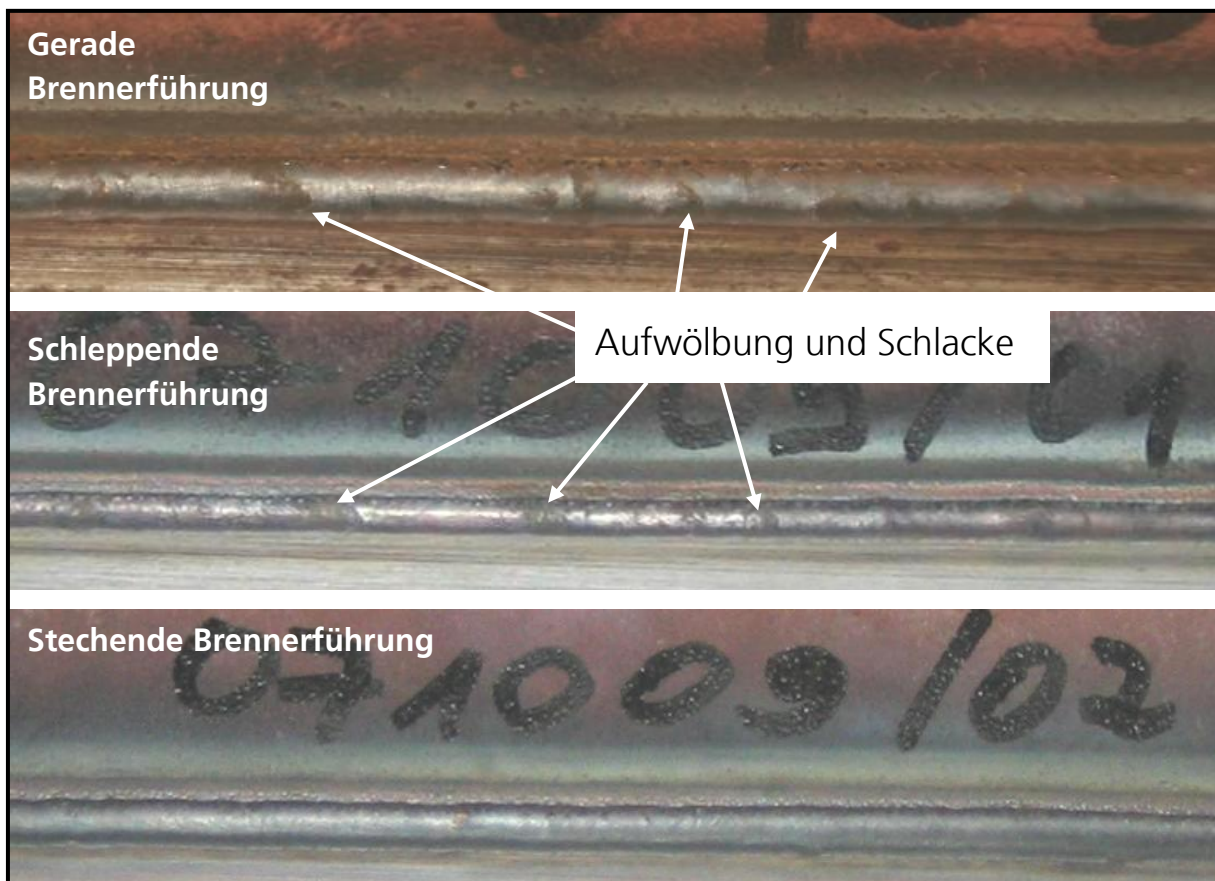


Bild 54: Bearbeitete Kanten (v. o.) mit gerader, schleppender, stechender Brennerführung

Dabei stellte sich heraus, dass die stechende Brennerführung die optisch beste Kante durch eine sehr glatte und gleichmäßige Oberfläche liefert (Bild 54 unten). Bei den anderen beiden Brennerführungen bilden sich über die ganze Länge der umgeschmolzenen Kante unregelmäßig Aufwölbungen und Schlackeplacken (Bild 54 oben und mitte). Für die weitere Parameterfindung und Optimierung wurde mit der stechenden Brennerführung gearbeitet.

Als Plasmagas wurde ein Argongemisch mit 5% Wasserstoffanteil genutzt, da reines Argon zu geringe Energien überträgt. Der Wasserstoff ist ein optimaler Energieträger mit hohem Ionisationpotential.

Während der Voruntersuchungen entstanden auf der Oberfläche der umgeschmolzenen Kante große Krater und nachfolgende Aufwerfungen. Diese Unregelmäßigkeiten in der Oberfläche könnten durch die kinetische Energie des Plasmagases entstehen. Das aufgeschmolzene Material wird durch den Druck und die Menge des Plasmagases weggeblasen und bildet dabei diese Unregelmäßigkeiten, wie im Bild 55 zu sehen.

Aufgrund des geringen Wärmeeintrages, der hohen Wärmeableitung ins Blech und der schnellen Abkühlung der Kante an der Luft kühlen die Aufwerfung schnell ab, ohne den entstandenen Krater hinter dem Arbeitspunkt zu schließen.



Bild 55: Unregelmäßigkeiten durch zu große kinetische Energie des Plasmagases

Durch geeignete Einstellungen des Plasmagasdrucks, der Plasmagasmenge sowie die Brenner- und Anstellwinkel konnten diese Unregelmäßigkeiten vermieden werden.

Um eine möglichst praxisnahe Versuchsdurchführung zu erhalten, konnten zwei Einsatzfälle festgelegt werden. Ein Einsatzfall beinhaltet die Nachbearbeitung der Oberkante nach dem Zuschnitt. Hierbei sind die Winkel und Parameter zu ermitteln. Der zweite Einsatzfall schließt die Bearbeitung der Unterkante mit ein. Dabei ist die wichtigste Voraussetzung für den Einsatz auf der Werft, dass der Schneidabfall abgeräumt wird. Ein entscheidendes Kriterium für den praxisnahen Einsatz ist die Anstellung des Brenners zur Kante, in dem die unterste Brennerkante nicht tiefer als der untere Blechabschluss ist (Bild 56 links). Diese Anordnung verhindert beim Werfteinsatz die Kollision mit der Kammpalette, auf der die Bleche im Zuschnitt liegen.

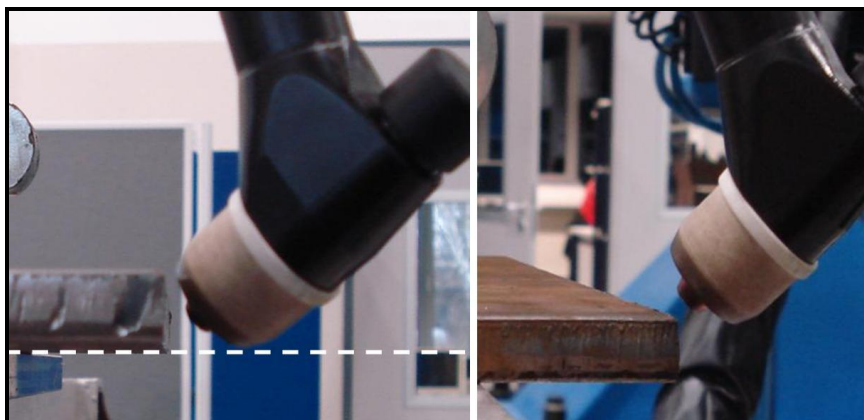


Bild 56: Brennerstellung zur Blechunter- und Oberkante

In Bild 57 ist eine gerundete Oberkante mit einem ermittelten Radius von 1,7 mm zu sehen. Die Oberkante zeichnet sich durch eine sehr gleichmäßige glatte Oberfläche aus. Um einen Einfluss der Nachbearbeitung durch das Sandstrahlen zu überprüfen, wurden die Proben halbiert und gestrahlt. Nach der Radienausmessung der gestrahlten Probe ergab sich der gleiche Radius. Die Oberfläche der Verrundung entsprach, nach dem Strahlvorgang, den Anforderungen einer Lackier Vorbereitung. Der kritische Übergang zwischen Grundmaterial und umgeschmolzener Kante erhielt, durch das Strahlen, eine für Lackierarbeiten geeignete kerbfreie Oberfläche.

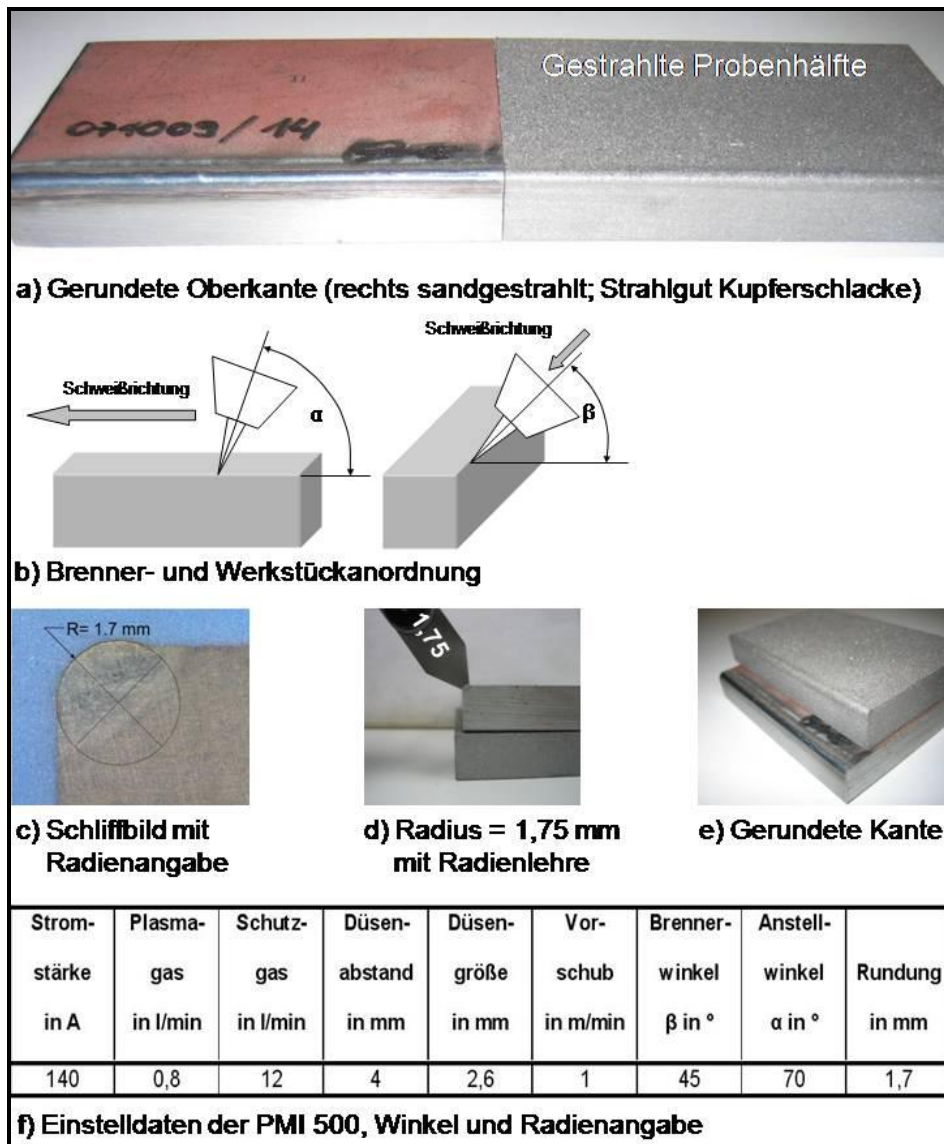


Bild 57: Mittels Plasmaschweißverfahren gerundete Oberkante

Die Brennerstellung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Oberflächenbeschaffenheit. Durch die stechende Haltung wird eine geringere kinetische Energie in das Material gebracht, die das Material nicht wegblasen kann. Der Wasserstoffanteil im Plasmagas ist entscheidend für die Wärmemenge des Plasmagases, da er hohe Dissoziations- und Ionisierungsenergie, hohe Wärmeleitfähigkeit und eine gute Wärmeübertragung besitzt. Zudem verringert der Wasserstoffanteil, durch das geringe

Molekulargewicht, den Anteil der schweren Argonatome, die durch ihr hohes Atomgewicht zum Austreiben der Schmelze beim Schneiden von hochlegiertem Stahl genutzt werden.

In Bild 58 ist eine gerundete Unterkante mit einem Radius von 1,8 mm dargestellt. Die Oberfläche der Kante ist sehr glatt und gleichmäßig ausgebildet. Diese Kante wurde mit Einhaltung der Arbeitshöhe des Brenners nach Bild 56 bearbeitet.



Bild 58: Mittels Plasmaschweißverfahren gerundete Unterkante

Bei der Bearbeitung mit den Winkeleinstellungen für die Oberkante traten Probleme mit der Schutzgasdüse auf, die durch ihre Form den Abstand vergrößert. Das führt zu Zündungsproblemen des Hauptlichtbogens. Die Winkel wurden so angepasst, dass die Düse den Abstand erhält, bei dem ein problemloses Zünden des Hauptlichtbogens möglich ist.

Die Prüfung der Kantenradien erfolgt über eine Sichtprüfung mit Hilfe einer Radianlehre (Bild 58 d) und durch eine Vermessung des Radius mittels eines Maßstabs im Mikroskop, der mit einer Kamera (Bild 58 c) aufgenommen wird.

Die Plasmagasmenge hat einen wesentlichen Einfluss auf die Einbrandtiefe beim Schweißen. Eine gleiche Einbrandtiefe wird nach Bild 59, entweder durch hohe Stromstärke und kleiner Plasmagasmenge, oder durch niedrigere Stromstärke und einer erhöhten Menge an Plasmagas erreicht. Die Grenzen der Gasmenge ergeben sich zum Einen aus der kinetische Energie die das Gas an die Schweißnaht abgibt und zum Anderen durch die Wärmeenergie, die durch das Plasmagas auf das Werkstück übertragen werden muss.

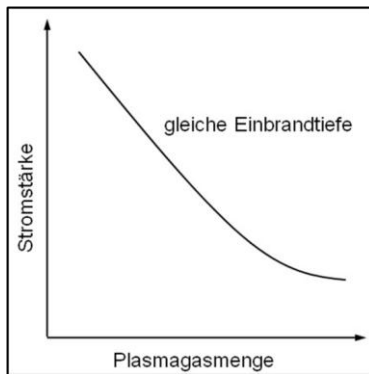


Bild 59: Schematischer Zusammenhang zwischen Stromstärke und Plasmagas

Durch die Erhöhung der Stromstärke bei gleichbleibender Plasmagasmenge sollte grundsätzlich die Einbrandtiefe zunehmen. Bei guten Schweißergebnissen, mit einer gewissen Stromstärke in Verbindung mit dem Druck des Plasmagases, könnte durch die Erhöhung des Schweißstroms, eine größere Vorschubgeschwindigkeit erreicht werden. Nachdem die Stromstärke auf 140 A und die Schweißgeschwindigkeit auf 1,5 m/min gesteigert wurde, stellte sich keine wesentliche Vergrößerung der Rundung ein (Bild 60).

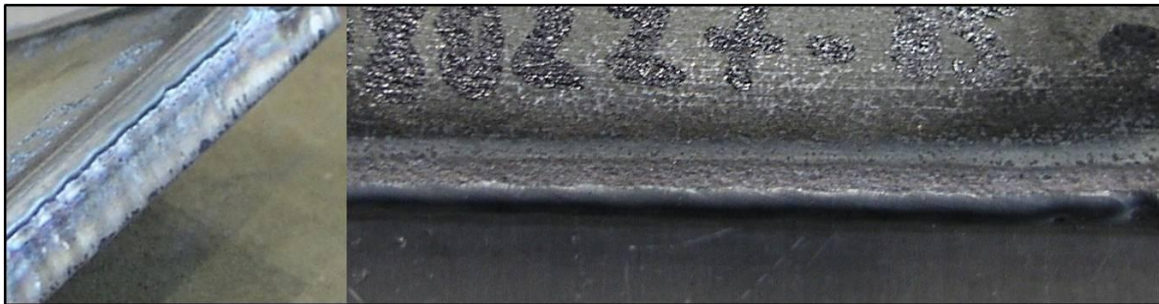


Bild 60: Schweißnaht der Oberkante bei einem Brennerwinkel α von 45°

Das Umschmelzen folgt anderen Gesetzen als denen des Schweißens. Die Plasmagasmenge musste erhöht werden, damit die hohen Energien mehr Energieträger zu Verfügung haben, um diese bei der Rekombination auf dem Grundwerkstoff freiwerden zu lassen. Die hohe Plasmagasmenge besitzt höhere kinetische Energie, die das verflüssigte Kantenmaterial wegbläst. Damit dieser kinetische Energieanteil keinerlei Einfluss auf das Ergebnis hat, wurde eine Möglichkeit gefunden über eine Winkelstellung des Brenners diesen Anteil am Blech vorbeizuleiten. Mittels einer Vergrößerung des Brennerwinkels α bestand die Möglichkeit, die kinetische Energie des Plasmagases und somit die Blasenbildung zu verringern (Bild 61).

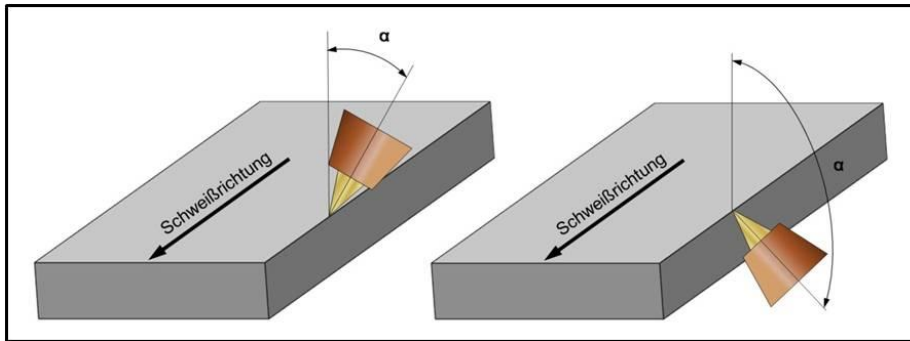


Bild 61: Veränderung des Brennerwinkel α

Dabei wurde der Brenner im Laufe der Versuche von anfänglichen 45° auf einen Winkel α von 110° gedreht (Bild 62). Aufgrund der Winkeländerung war es möglich, die Stromstärke sowie die Plasmagasdurchsatz soweit zu erhöhen, dass bei einer maximalen Geschwindigkeit von $1,5 \text{ m/min}$ ein Radius von $2,0 \text{ mm}$ erreicht werden konnte.



Bild 62: Plasmalichtbogen bei Brennerwinkel α : 45° (li.), 110° (re.)

Um eine Geschwindigkeitserhöhung zu erreichen laut Vorgaben der Werften von bis zu 4 m/min konnte aufgrund der durch den Brenner eingeschränkten Stromstärke von 150 A nur über die Plasmagasart höhere Energien auf das Grundmaterial übertragen werden. Damit wurde der Wasserstoffanteil auf 15% erhöht. Diese Erhöhung ist für den Prozess ein Maximum, da sich mit einer Wasserstoffhöhung das Zündverhalten des Plasmagases verschlechtert. Somit konnte bei Brennerhaltung aus Bild 61 rechts kombiniert mit 15% Wasserstoffanteil im Argon als Plasmagas eine Bearbeitungsgeschwindigkeit von $2,5 \text{ m/min}$ mit einem Radius von 2 mm erreicht werden. Diese Brennerhaltung schränkt den Einsatz in der Praxis ein. Daraufhin wurde ein Optimum zwischen Brennerhaltung möglichst von oben, hoher Wasserstoffanteil, höchstmögliche Plasmagasmenge und hohe Stromstärke gefunden. An weiteren Untersuchungen durch Parametervariation und Winkeleinstellungen konnte eine Brennerstellung von oben mit einem Winkel $\beta=30^\circ$ und einem Winkel $\alpha=5-10^\circ$ gefunden werden (Bild 63). Dabei konnte die Geschwindigkeit von $2,5 \text{ m/min}$ eingehalten werden.

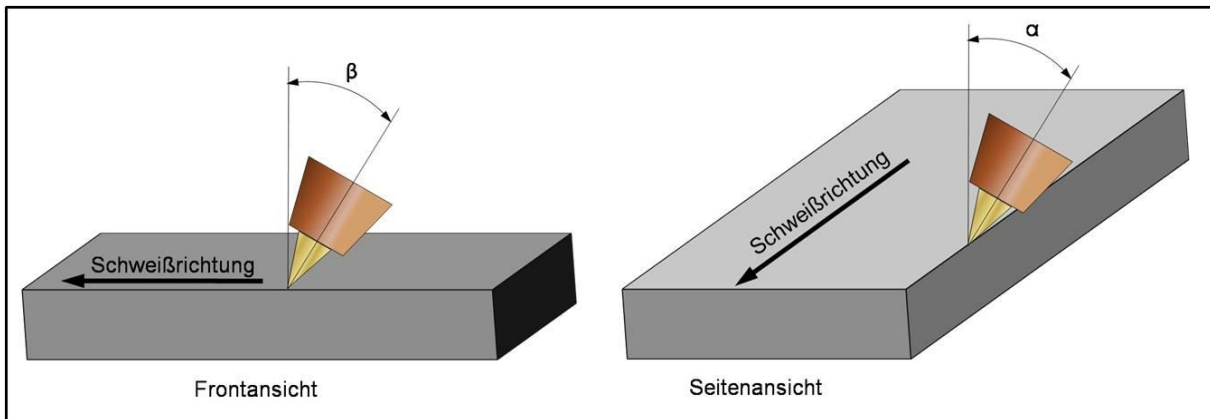


Bild 63: Schematische Darstellung der Winkel

In Bild 64 sind die Ergebnisse der optimierten Brennerstellung für die Oberkante dargestellt. Die Unterkante bleibt mit den aus Bild 56 und Bild 58 dargestellten Winkleinstellung bei erhöhten Wasserstoffanteilen mit 2 m/min bei einem Radius von 1,7 mm ein Optimum.



Bild 64: Ergebnis der optimierten Brennerstellung

Somit kann die Ober- und Unterkante von oben bearbeitet werden. Die Oberkante wird mit einem Plasmastrahl, der mit der kinetischen Energie auf das Blech trifft, bearbeitet und die Unterkante wird von oben mit einem Plasmastrahl, dessen kinetische Energie an dem Blech vorbeigeleitet wird, bearbeitet.

Der Lichtbogen konnte durch die Plasmastromquelle gepulst werden, dabei konnten Pulsfrequenz, Pulsdauer und Ströme als Parameter eingestellt werden. Die Pulsung des Lichtbogens ermöglicht eine verbesserte Schmelzgutbeeinflussung. Diese kann bei Überkopfschweißungen, sowie bei steigenden und fallenden Positionen zum Einsatz kommen. Die Pulsung bringt geringere Energien in das zu bearbeitende Blech, so dass die Geschwindigkeiten, aufgrund der nur vorhandenen 150 A, verringert werden mussten. Die dabei entstandene Umschmelzkante besitzt eine sehr gleichmäßige Schuppung (Bild 65), die laut Farbapplikateur nach dem Strahlen für eine zum Lackieren optimale Oberflächenstruktur ergibt.



Bild 65: Kantenumschmelzung mittels gepulsten Lichtbogen mit $R=2\text{ mm}$ und $v=1,5\text{ m/min}$

Weitere Modulationen des Lichtbogens konnten durch Gasvariationen erreicht werden. Somit konnten verschiedene Gaskombinationen auf Einsatzfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit getestet werden. Dabei wurden mehrere Argongemische untersucht, wie zum Beispiel Argon mit 3% Sauerstoff oder mit 30% Helium. Diese Plasmagasgemische wurden mit allen anderen Argongemischen als Schutzgas kombiniert. In Bild 66 sind Beispiele von umgearbeiteten Kanten mit anderen Gaskombinationen dargestellt, die in Größe und Bearbeitungsgeschwindigkeit keine signifikanten Unterschiede zum Argon-Wasserstoff-Gemisch zeigen. Das Argon-Wasserstoff-Gemisch konnte zusätzlich die besten Ergebnisse liefern, wenn Argon-Wasserstoff als Schutzgas zur zusätzlichen Strahlfokussierung eingesetzt wurde.

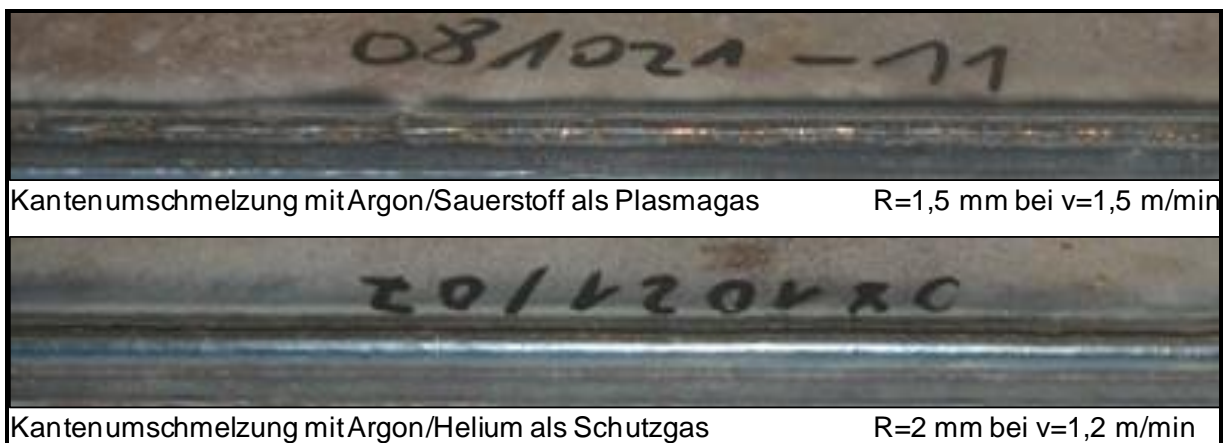


Bild 66: Kantenumschmelzungen mit unterschiedlichen Gasvariationen

Für die Zuarbeit zur statistischen Versuchsplanung wurden alle Parameter bis auf Bearbeitungsgeschwindigkeit, Plasmagasmenge und Stromstärke festgelegt. Dabei sollten Bleche liegend und stehend mit fallender und steigender Bearbeitungsrichtung umgeschmolzen werden. Die flexiblen Parameter wurden in einem vorgegebenen Bereich variiert. Dabei wurden 27 Versuche pro Bearbeitungslage und einmal für 1 mm und 2 mm Radius durchgeführt und dabei die Radien vermessen, um den Einfluss eines jeden Parameters genau zu bestimmen.



Bild 67: Kantenumschmelzung mit fallender Bearbeitungsrichtung

Die Versuche mit stehenden Blechen für die steigende und fallende Position konnte mit ähnlichen Parametern durchfahren werden wie die horizontale Position. Die verschiedenen Winklereinstellungen konnten auch für diese Varianten erfolgreich getestet werden. Die Nahtform in Bild 67 weist eine abgeflachte Form auf, die sich in keiner Brennerposition vermeiden ließ. Mögliche Ursache ist das vorlaufende Schmelzbad durch die Schwerkraft. Abhilfe konnte hierbei der pulsende Lichtbogen geben, der an werftähnlichen Konturen im Zusammenspiel mit allen Positionen zum Einsatz kam.

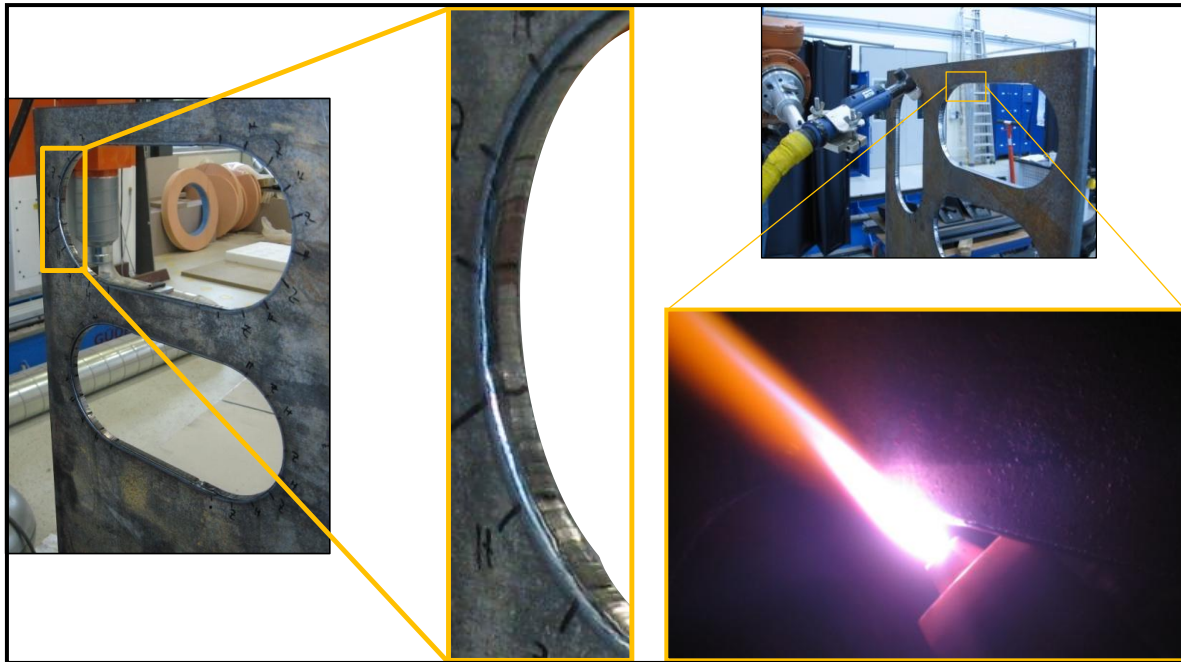


Bild 68: Bearbeitung von stehenden Blechen mit vertikalen und horizontalen Mannlöchern

In dem Bild 68 sind Beispiele von maßstabsgetreuen Originalkonturen dargestellt, an denen ein Szenario durchgeföhren wird. Dabei wurden die Varianten in horizontaler und vertikaler Stellung beachtet. In dem Teilbild unten rechts ist der Lichtbogen dargestellt, wie er seine kinetische Energie vorbeilenkt und der Lichtbogenansatzpunkt genau die Kante zum Umschmelzen trifft. Bei der dargestellten Blechstellung kann mit dem Plasmaschweißbrenner von beiden Seiten mit gleicher Brennerhaltung abgeföhren werden. Eine weitere Variante ist, dass der Brenner von einer Seite an die Kontur geföhrt wird. Dabei wird der Plasmabrenner an die zweite hintere Kante in die Kontur geföhren, um die Kante, wie die Bearbeitung der Unterkante am liegenden Blech, zu bearbeiten. An diesen Konturen konnte die komplette Einsatzfähigkeit des Verfahrens dargestellt werden, da hier alle Kantenpositionen und alle Kantenlagen im Zusammenspiel abgeföhren werden konnten.

Eine weitere Lichtbogenmodulation ist der Gebrauch des indirekten Lichtbogens einer umgebauten Plasmaschneidanlage von der Firma Kjellberg mit neu entwickelten Brennerkomponenten (Bild 69).



Bild 69: Brenner PB-S75 WI mit indirektem Lichtbogen und neuen Komponenten

Die Düsen und Katoden wurden dem indirekten Lichtbogen angepasst. Nach anfänglichen sogenannten Auswaschungen am Düsenaustritt beim Zünden des Lichtbogens konnte durch Veränderung der Düsengeometrie die Kühlleistung verbessert werden (Bild 70), so dass die Auswaschungen ausblieben und die Standzeiten erhöht wurden.



Bild 70: Neue Düsen mit ersten Auswaschungen und deren Weiterentwicklung

Der indirekte Lichtbogen erwies sich als nicht ausreichende Wärmequelle zum Umschmelzen der Kanten. Mit sehr langsamer Bearbeitungsgeschwindigkeit von $v = 0,25 \text{ m/min}$ bei $I = 40 \text{ A}$ und 40% Wasserstoffanteil Rest Argon gelang die Umschmelzung mittels indirektem Verfahren, die jedoch für den praktischen Anwendungsfall nicht ausreichend ist.



Bild 71: Kantenumschmelzung mittels indirektem Lichtbogen

Einen erneuten Umbau der Plasmastromquelle von der Firma Kjellberg auf das direkte Verfahren mit gleichem Brenner, der für das indirekte Verfahren eingesetzt wurde, erzeugte ein Plasmaschweißlichtbogen mit geringer kinetischer Energie. Mit dem Brenner und einem direkten Lichtbogen wurde ein ähnliches Prüfprogramm abgefahren wie mit dem Plasmaschweißprozess der PMI 500 von SBI GmbH. Dabei konnten aus den Erfahrungen der vorhergehenden Untersuchungen die aussichtsreichsten Versuche getestet werden. Dabei wurden die Szenarien Abfahren der Oberkante (Bild 72) und Abfahren der Unterkante bei vollvollständiger Bewegungsfreiheit des Brenners getestet. Aufgrund der sehr hohen Energieübertragung durch den mit 40% hohen Wasserstoffanteil konnten sehr hohe Geschwindigkeiten erreicht werden.

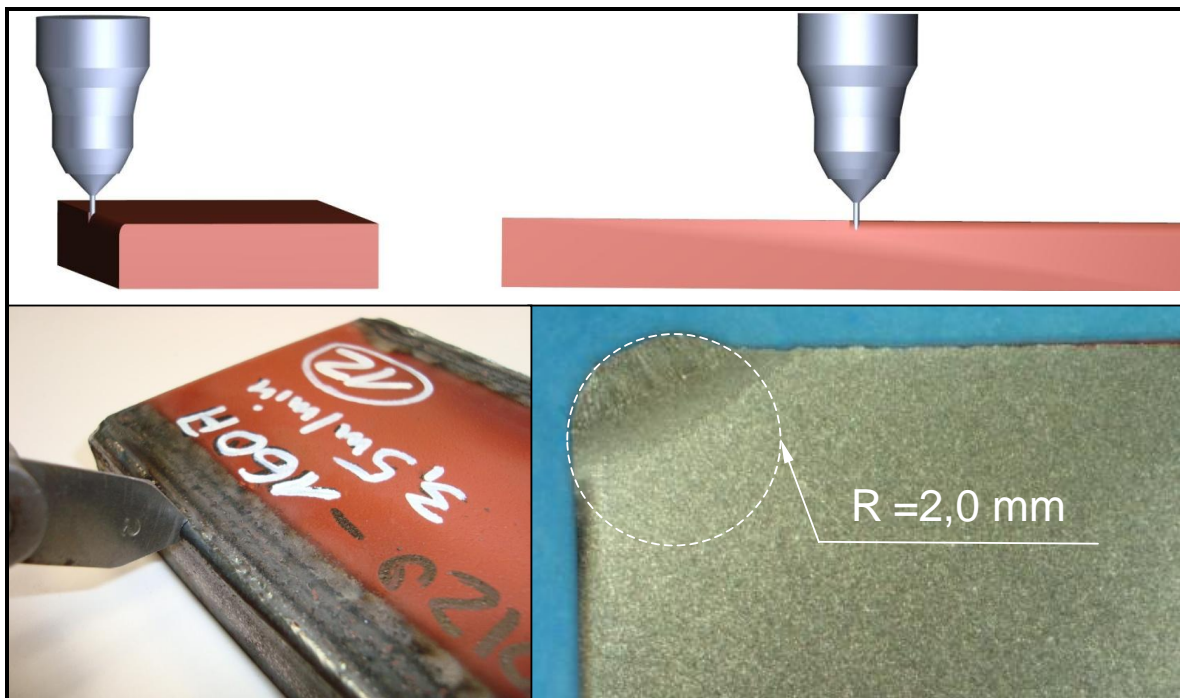


Bild 72: Brennerzustellung und Ergebnis mit Schliff

Die Geschwindigkeit von 3,5 m/min entspricht etwa den Vorgaben der Werften und ist über eine Stromstärkenerhöhung weiter steigerbar. Für die derzeit verwendete Stromquelle sind mit den eingestellten 160 A die Endparameter erreicht.

Aufgrund der Einteilung in die Schweißverfahren wurden Härtewerte ermittelt. Dabei spielt die Abkühlgeschwindigkeit bei den kleinen Aufschmelzbereichen gegenüber dem Restblech eine entscheidende Rolle. Die sehr konzentrierte Energieeinbringung durch den eingeschnürten Lichtbogen sorgt dabei für eine weitere Erhöhung der Abkühlgeschwindigkeiten. Beim Einsatz von GL A Stahl mit üblichen niedrigen Kohlenstoffgehalten konnten keinerlei Aufhärtungen festgestellt werden. Auch der Vergleich unterschiedlicher Verfahren, wie WIG- und Plasmaschweißen, konnte an diesem Stahl keine Aufhärtungen erzeugen (Diagramm 2). An geschnittenen und gehobelten Fasen entstand bei keiner projektbezogenen Stahlsorte mit geringem oder höherem Kohlenstoffanteil eine kritischere Härtezone gegenüber einem Schnitt. Zum Vergleich wurden Härteverläufe an geschnittenen Kanten herangezogen (Diagramm 1).

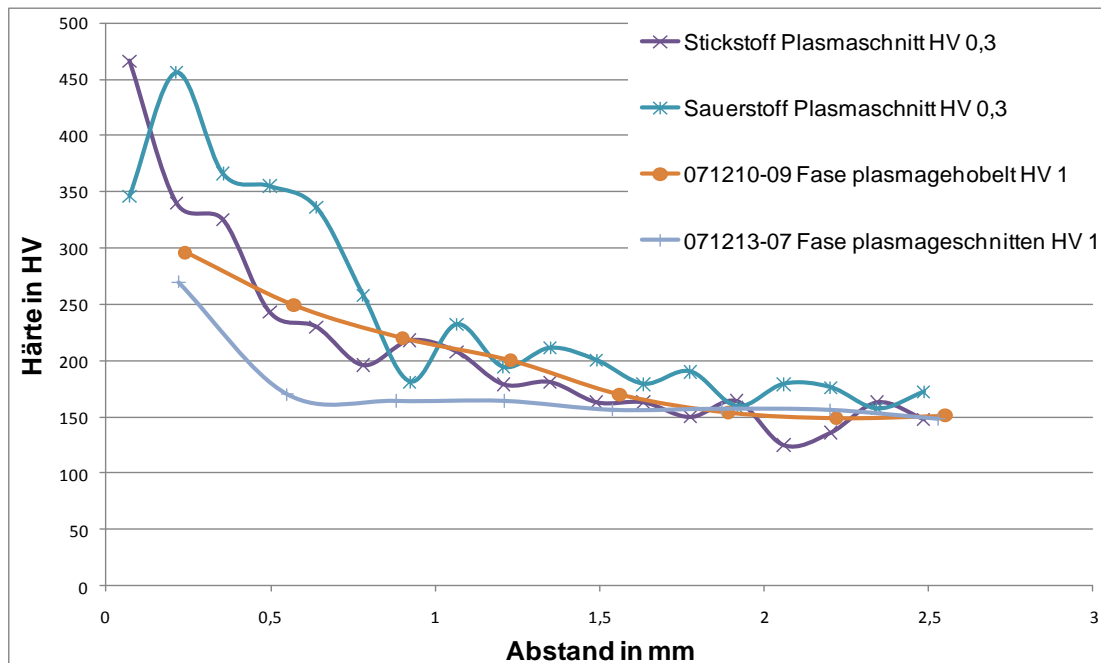


Diagramm 1: Härteverläufe an Schnitte und Fasen unterschiedlicher Verfahren

Die im Projekt avisierte Stahlsorte GL A36 konnte mit Streckenenergie- und Radienvariationen am Plasmaschweißprozess überprüft werden. Dabei ergaben diese Prüfungen einen Härtewert über den geforderten Werten von 380 HV. (Diagramm 2)

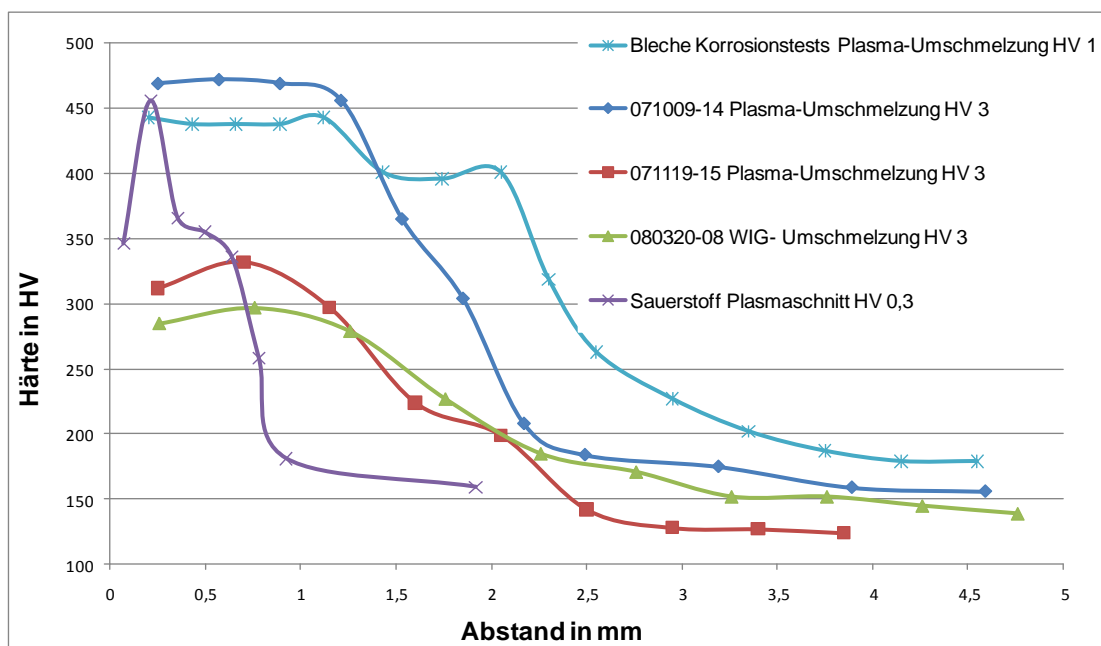


Diagramm 2: Einblick in die Härteverläufe unterschiedlicher Stähle und Verfahren

Um das Wegblasen des Schmelzgutes zu verhindern, wurde die kinetische Energie an dem Blech vorbeigeleitet. Damit wurde verhindert, dass die Isothermen des Lichtbogens das Blech neben dem Schmelzgut erwärmt. Dadurch blieb der Schmelzgutnebenbereich kalt und konnte die Abkühlgeschwindigkeit noch weiter erhöhen. Bei einem kohlenstoffhaltigen Stahl führt eine hohe Abkühlgeschwindigkeit zu Martensitbildung

und Aufhärtungen. Besonders der kleine Aufschmelzbereich im Bezug zum Restblech führt weiterhin zu einem schnellen Wärmeabtransport und damit zu höheren Abkühlgeschwindigkeiten. Die Streckenenergie konnte nur geringfügig erhöht werden, da das Schmelzgut nicht mehr händelbar wurde und damit zu groß und zu flüssig wurde. Das flüssige Schmelzgut lief der Schwerkraft folgend von der Kante weg. Die Veränderung der Brennerstellung mit einem auf das Blech gerichteten Plasmastrahl konnte durch die Einschnürung des Lichtbogens keine weitere Nahtnebenbereichserwärmung und damit keine Verringerung der Abkühlgeschwindigkeiten bewirken. In Tabelle 10 sind Untersuchungen an einer Stahlsorte mit Streckenenergievariationen dargestellt, um zu zeigen dass die Möglichkeiten der Veränderungen in Streckenenergieeinbringung keinerlei Veränderungen in den Spitzenhärten einbringen. Weiterhin sind mehrere Stahlsorten dargestellt und in Verbindung mit der Streckenenergie die Kohlenstoffäquivalente aufgenommen. Dabei wurde festgestellt, dass ab einem Kohlenstoffäquivalent über 0,2 zu Aufhärtungen an dem Umschmelzgut für dieses Verfahren kommt. Abschließend sind die Kohlenstoffgehalte der Faktor mit dem größten Einfluss auf die Härte. In Zusammenhang mit einem höheren Gehalt an Kohlenstoff zeigt das Verhältnis zwischen Umschmelzgut und nicht erwärmten Restblech einen weiteren großen Einflussfaktor. Der eingeschnürte Lichtbogen und die damit verringerte Erwärmung des Nebenbereichs besitzt einen geringeren Einfluss ist aber vorhanden und sollte bei jeder Anwendung mit betrachtet werden.

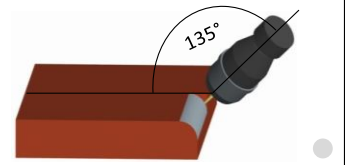

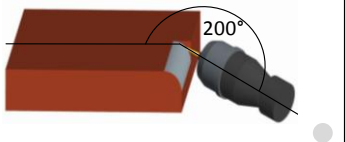
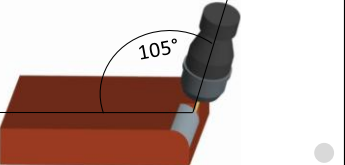

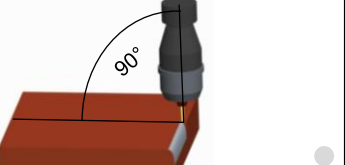
Tabelle 10: Zusammenstellung Streckenenergie, Härtewerte, Kohlenstoffäquivalent

Proben der 2. Auslagerung (Material TKMS)							
Probennummer horizontal von oben	max. Stromstärke [A]	max. Spannung [V]	Geschwindigkeit [mm/min]	ermittelte Streckenenergie [kJ/cm]	Härte SG	Härte GW	CET
IV	99,9	35,2	2000	1,1	448 HV1	180 HV10	0,31
XIII	125,0	35,1	2000	1,3	438 HV1	180 HV10	0,31
XV	124,8	38,1	2000	1,4	446 HV5	180 HV10	0,31
X	100,1	36,9	1500	1,5	470 HV1	180 HV10	0,31
III	124,7	35,6	1500	1,8	443 HV5	180 HV10	0,31
XII	125,0	36,3	1500	1,8	439 HV5	180 HV10	0,31
VI	99,6	34,8	1000	2,1	438 HV1	180 HV10	0,31
XVIII	150,1	37,8	1500	2,3	475 HV1	180 HV10	0,31
XIV	150,0	40,1	1500	2,4	428 HV1	180 HV10	0,31
XXVII	149,9	40,7	1500	2,4	504 HV1	180 HV10	0,31
Proben aus Vorversuchen							
081017-01	* (**)	*	*		220 HV3	120 HV3	0,12
071119-15u	150 (**)	38	1000	3,4	330 HV3	130 HV3	0,18
080320-08	250	20	1300	2,3	300 HV3	145 HV3	0,18
081007-03	* (**)	*	*		240 HV3	130 HV3	0,19
080312-14	110	35	1000	2,3	440 HV1	170 HV1	0,29
071009-14	80 (**)	*	600		480 HV3	160 HV3	0,29
(TKMS) 2.Auslagerung	150	40	2000	1,8	460 HV10	180 HV10	0,31
(FSG) 1.Auslagerung	130 (**)	38	800	2,5	440 HV1	180 HV1	0,32
* keine Werte aufgenommen (**) 5% Wasserstoffgehalt im Plasmagas							

Nach Versuche mit Vorwärmung wurde der GL A 36 mit einer Vorwärmtemperatur von 200-250° umgearbeitet ohne die kritischen Härtewerte zu erreichen. Die Anwendbarkeit einer Vorwärmstation muss noch geprüft werden. Die Anwendung des Verfahrens am GL A Stahl ist ohne zusätzliche Wärmeinbringung möglich.

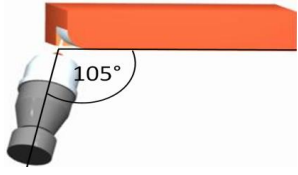
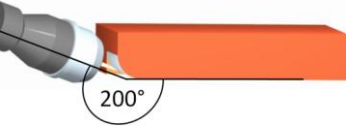

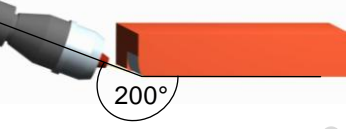
In den folgenden Tabellen (Tabelle 11, Tabelle 12, Tabelle 13, Tabelle 14, Tabelle 15, Tabelle 16, Tabelle 17) sind aufgrund der Vielzahl aller überprüften Konzepte alle Brennerstellungen und Anstellungen an Unterkante und Oberkante mit dem Plasmaschweißen, Plasmaschneiden und die Kombination aus beiden Verfahren dargestellt. Dabei wurden die Konzepte beurteilt und mit Farben nach der Einsatztauglichkeit gekennzeichnet.

Tabelle 11: Plasmaschweißen 1

Grund-konzept	Nr.	Brenner-anstellung	Abbildung	Bauteil-lage	Bedingung	Bewertung
Nachträgliche Bearbeitung Oberkante	1	135 und 60 stechend		waage-recht	• Kein Abräumen der Schlechteile notwendig	• Gut anwendbar durch Bearbeitung von oben $v = 1,5 \text{ m/min}$ 
	2	200 und 60 stechend		waage-recht	• Keine Kammpalette • Abräumen der Schlechteile erforderlich	• Kaum anwendbar im Schiffbau (Brenner steht teilweise unterhalb der Werkstückunterkante) $v = 2,5 \text{ m/min}$
	3	105 und 60 stechend		waage-recht	• Kein Abräumen der Schlechteile notwendig	• Gut anwendbar durch vereinfachte Brennerhaltung $v = 2,5 \text{ m/min}$ höhere Sicherheit durch direkte Lichtbogenrichtung auf die Kante 
	4	90		waage-recht	• Kein Abräumen der Schlechteile notwendig	• Gut anwendbar durch gerade Brennerhaltung • Keine komplizierten Führungsmaschinenbewegung • Keine Vorwärmung • Plasmagas drückt Schmelze auf die Schnittfläche • Kein Vorwegschieben der Oxide

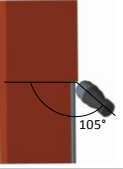
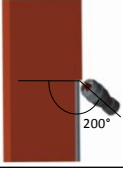
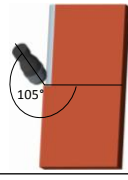
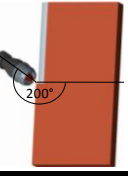
● Einsatzfähigkeit, ● bedingte Einsatzfähigkeit, ● keine Einsatzfähigkeit nachgewiesen

Tabelle 12: Plasmaschweißen 2

Grund-konzept	Nr.	Brenner-anstellung	Abbildung	Bauteil-lage	Bedingung	Bewertung
Nachträgliche Bearbeitung Unterkannte	5	105 und 60 stechend		waage-recht	<ul style="list-style-type: none"> Keine Kammpalette Abräumen der Schlechteile erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> Kaum anwendbar im Schiffbau (Brennerteile komplett unterhalb der Werkstückunterkante) $v = 2,0 \text{ m/min}$
	6	200 und 60 stechend		waage-recht	<ul style="list-style-type: none"> Brenner oberhalb der Blechunterkante Abräumen erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> Gut anwendbar durch die Bearbeitung von oben $v = 2,0 \text{ m/min}$ Brenner oberhalb der Blechunterkante 
	7	200		waage-recht	<ul style="list-style-type: none"> Brenner oberhalb der Blechunterkante Abräumen erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> Gut anwendbar durch gerade Brennerhaltung von oben Keine Vorwärmung Kein Vorwegschieben der Oxide

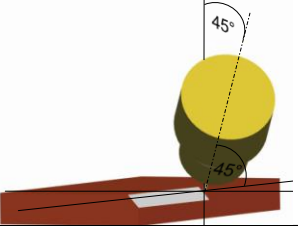
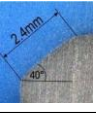
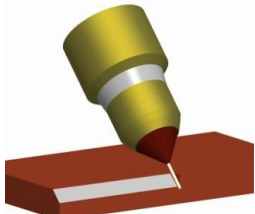
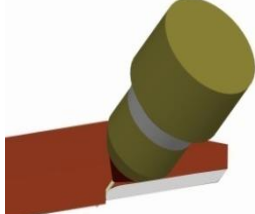

● Einsatzfähigkeit, ● bedingte Einsatzfähigkeit, ● keine Einsatzfähigkeit nachgewiesen

Tabelle 13: Plasmaschweißen 3

Grund-konzept	Nr.	Brenner-anstellung	Abbildung	Bauteil-lage	Bedingung	Bewertung
nachträgliche Bearbeitung steigend	8	105 und 60 stechend		senk-recht	Freie Zugänglichkeit	<ul style="list-style-type: none"> Möglichkeit einseitiger Bearbeitung beider Kanten durch den Gebrauch beider Varianten Variante 6 äußere Kante und Variante 7 innere Kante $v = 2,0 \text{ m/min}$ möglich
	9	200 und 60 stechend		senk-recht		
nachträgliche Bearbeitung fallend	10	105 und 60 stechend		senk-recht	Freie Zugänglichkeit	<ul style="list-style-type: none"> Fallnaht abgeflachte Form bei hohen Geschwindigkeiten Möglichkeit einseitiger Bearbeitung beider Kanten durch den Gebrauch beider Varianten Variante 8 äußere Kante und Variante 9 innere Kante $v = 2,0 \text{ m/min}$ möglich
	11	200 und 60 stechend		senk-recht		

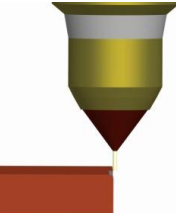

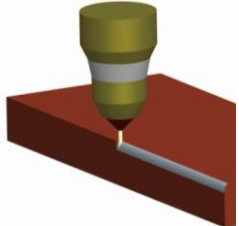

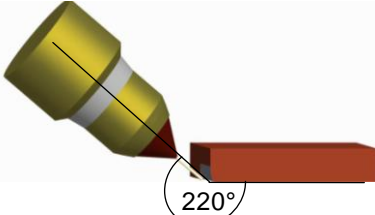
● Einsatzfähigkeit, ● bedingte Einsatzfähigkeit, ● keine Einsatzfähigkeit nachgewiesen

Tabelle 14: Plasmaschneiden 1

Grund-konzept	Nr.		Abbildung	Bedingung	Bewertung
nachträgliche Bearbeitung	Oberkante	1	Ähnlich dem Fugenhobeln 	• Brennerstellung um jeweils 45° geneigt und angestellt	• Erreichen einer Fase durch geringe kinetische und elektrische Energie • schnelles Verfahren • Bearbeitung auf Brenntisch möglich • Geschwindigkeit leistungsabhängig 
		2	Anfasen mit 45° Brennerstellung 	• Ausführung eines Schnittes	• Fasenwinkel 45° • alle Fasengrößen und Winkel möglich • Geschwindigkeit leistungsabhängig
	Unterseite	3	Anfasen mit 45° Brennerstellung 	• Ausführung eines Schnittes • Abräumen bei Bearbeitung der Unterseite	• Fasenwinkel 45° • alle Fasengrößen und Winkel möglich • Geschwindigkeit leistungsabhängig 

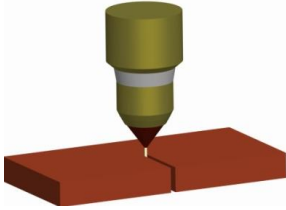

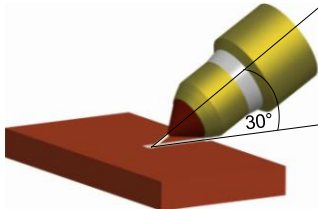

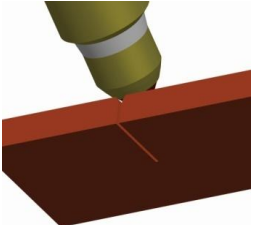
● Einsatzfähigkeit, ● bedingte Einsatzfähigkeit, ● keine Einsatzfähigkeit nachgewiesen

Tabelle 15: Plasmaschneiden 2

Grund-konzept	Nr.		Abbildung	Bedingung	Bewertung
nachträgliche Bearbeitung	Oberkante	4	Ähnlich dem Umschmelzen 	• Großer Brenner mit weichem Lichtbogen geringfügig seitlich neben dem Blech angesetzt	• Unregelmäßig ausgebildete Kante • Abhängig von der Rotation des Lichtbogens 
		5	Ähnlich dem Umschmelzen 	• Brenner mit neuer Düse und geringer kinetischer Energie auf das Blech gerichtet	Rundung erzielt bei • indirektem Lichtbogen $v = 0,5 \text{ m/min}$ • direktem Lichtbogen $v = 3,5 \text{ m/min}$ mit ca. 1-2 mm auf dem Blech der Gutseite 
	Unterseite	6	Ähnlich dem Umschmelzen 	• Brenner mit neuer Düse und geringer kinetischer Energie auf das Blech gerichtet • Abräumen erforderlich	• Rundung erzielt bei direktem Lichtbogen $v = 3,5 \text{ m/min}$

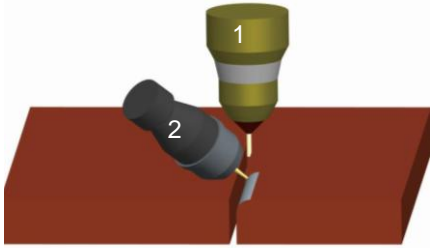

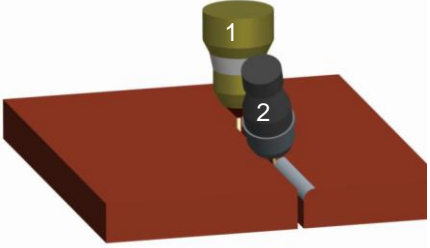

● Einsatzfähigkeit, ● bedingte Einsatzfähigkeit, ● keine Einsatzfähigkeit nachgewiesen

Tabelle 16: Plasmaschneiden 3

Grund-konzept	Nr.	Brenner-stellung	Abbildung	Bedingung	Bewertung
Bearbeitung während des Zuschnitts	Oberkante	7 senkrecht			<ul style="list-style-type: none"> Keine Verrundung der Kante möglich Leichte Anrundung gemäß DVS-Merkblatt durch Düsenvergrößerung und Abstandserweiterung 
		8 stechend		• 30° Brenneranstellung	<ul style="list-style-type: none"> Ballige Form der Oberkante durch Anstellung der Brenners und großen Düsendurchmesser Derzeit bei 1 m/min 
	Unterseite	9 senkrecht oder stechend			<ul style="list-style-type: none"> Zuschnitt mit senkrechter bzw. stechender Haltung bringt keine Verrundung der Unterseite

● Einsatzfähigkeit, ● bedingte Einsatzfähigkeit, ● keine Einsatzfähigkeit nachgewiesen

Tabelle 17: Kombination Plasmaschneiden und Plasmaschweißen

Grund-konzept	Nr.	Brenner-stellung	Abbildung	Bedingung	Bewertung
Bearbeitung während des Zuschnitts	Oberkante	1 Brenner 1 senkrecht Brenner 2 135 und 60 stechend		<ul style="list-style-type: none"> Abräumen der Altteile erforderlich Abstand der Prozesse ab 60 mm ohne Beeinflussung 	<ul style="list-style-type: none"> Ausnutzung der Schneidtemperatur Lichtbogen setzt an beide Kanten an 2,5 m/min Kreisgeometrien mit zusätzlicher Zustellachse bearbeitbar 
		2 Brenner 1 senkrecht Brenner 2 105 und 60 stechend		<ul style="list-style-type: none"> Abstand der Prozesse ab 60 mm ohne Beeinflussung 	<ul style="list-style-type: none"> Ausnutzung der Schneidtemperatur 2,5 m/min Kreisgeometrien mit zusätzlicher Zustellachse bearbeitbar 

● Einsatzfähigkeit, ● bedingte Einsatzfähigkeit, ● keine Einsatzfähigkeit nachgewiesen

2.2.6 Entwicklung von Anlagenkonzepten zur Einbindung spezieller Plasmaschneidsysteme in bestehende Anlagen (AP 460)

Mit denen aus dem Arbeitspaket 110, 120, 130 ermittelten Einsatzmöglichkeiten und aus dem Projektverlauf ermittelte Ergebnisse konnten 3 Anlagenkonzepte präferiert werden. Im Sektionsbau in dem die vorgefertigten Bauteile zusammengefügt werden und eine gewisse Vorausrüstung stattfindet, kann ein Kantenbearbeitungsprozess integriert werden. Dabei können Schweißroboter, die von oben für steigende oder fallende Kehlnähte zuständig sind, für einen Einsatz der Kantenbearbeitung an Wasserlaflöcher und Mannlöcher eingesetzt werden. Die Schwierigkeit dabei besteht in der Positionierung der Bauteile und des Bearbeitungswerkzeuges zu den Kanten. Ohne ein Kantenerkennungssystem kommt das Anlagenkonzept Sektionsbau nicht aus. Das Anlagenkonzept wurde vom Konsortium für das Plasmaschweißverfahren nicht vorgesehen. Ein weiteres Anlagenkonzept ist die dem Zuschnitt nachgelagerte Bearbeitung auf dem Brenntisch. Die Platten werden zugeschnitten und mittels zusätzlichen Arbeitsschrittes an der Oberkante über einen modifizierten Plasmaschneidkopf bearbeitet. Die Einbindung des neuen Plasmaschneidkopfes in die Kantenbearbeitung ist durch eine Wechselkopfeinrichtung über Bajonettverschluss möglich, da dieselbe Stromquelle vom Schneidvorgang genutzt werden kann. Das vordere kurze Schlauchpaket nach der Mischeinheit wird durch ein neues mit Wechselkopfeinrichtung ersetzt. Desweiteren werden zwei Wechselköpfe benötigt, wobei einer zum Schneiden und einer zum Umschmelzen eingesetzt wird. Nach dem Zuschnitt fährt die CNC-Zuschnittanlage zur Wechselstation, ähnlich wie bei einem Verschleißwechsel, dort wird der Kopf automatisiert oder manuell gewechselt und fährt mit den entsprechenden Files zur Kantenbearbeitung. Eine Automatisierung des Wechsels ist mit der neuen Anlage der Firma Kjellberg möglich. Durch die Plattenbewegung des thermischen Einflusses beim Plasmaschneiden wurde die nachträgliche Bearbeitung auf dem Brenntisch derzeit ausgeschlossen. Das Ausrichten und Einlesen der Platten und danach mit einer Kantenverfolgung geführten Kantenumschmelzung erschweren den Prozess zusätzlich und kosten durch zusätzliche Arbeitsschritte Belegungszeit. Ein weiterer wichtiger Punkt die Kantenbearbeitung nicht auf dem Schneidarbeitsplatz durchzuführen, ist die Blockierung der Anlage für weitere Zuschnittaufgaben. Die Bearbeitung der Kanten sollte nach Möglichkeit nach abgeräumten Schlechtteilen erfolgen, was wiederum zu einem weiteren Arbeitsschritt führt. Die Unterkante kann in diesem Fall nur bearbeitet werden, wenn die Schlechtteile geräumt sind und die Platte um ein Abstand von mindestens 5 mm angehoben wird, damit der Plasma-schweißlichtbogen die Kammpaletten nicht mit den Kanten verschweißen kann. Das Verfahren kann ohne Kollision des Brenners mit der Kammpalette die Kanten von oben bearbeiten. Der erfolgversprechendste Einsatz der Plasmaschweißtechnologie könnte in der Einbindung bestehender Profilschneidanlagen (Bild 10) erfolgen. Der Vorteil bei der Profilschneidanlage gegenüber allen anderen Einsatzbereichen liegt darin, dass ein Schneidroboter im Einsatz ist, eine Drehvorrichtung für den Werkzeugwechsel am Roboter vorhanden ist, die Profile über Stempel in ihrer

Lage gehalten werden, die Abfallbleche nach unten rausfallen, die Unterkante frei zugänglich ist, und die Konturen klein und ohne hohe Geschwindigkeiten bearbeitet werden können. Dabei müssen nach dem Umbau des Wechselwerkzeugsystems die TCP (tool center point) zueinander abgestimmt werden. Der TCP des Schweißbrenners muss so eingestellt werden, dass er die gleiche Kontur an der Kante mit seiner Werkzeugorientierung abfahren kann.

2.2.7 Experimentelle Untersuchungen zur Einbindung der entwickelten bzw. adaptierten Systeme in Standard-Schneidanlagen (AP 470)

Aus Vorüberlegungen und Voruntersuchungen erfolgreich getestete Szenarien, präferierte das Konsortium die Einbindung der Systeme in die Profilschneidanlagen. Darauf konnten Konturen bestimmt werden, die der Plasmaschweißbrenner bearbeiten muss. Die Geraden als einfachste Kontur konnte mit den Parametern aus vorangegangenen Arbeitspaketen erfolgreich getestet werden (Bild 73). Der erste Arbeitsschritt ist das Schneiden mit 2 m/min. Darauf wurde der Plasmaschweißbrenner geschwenkt und mit 2 m/min an der Oberkante und mit 1,8 m/min an der Unterkante umgearbeitet werden. Das Blech wurde über die Kammpalette angebracht, da im Profiluschnitt die Zugänglichkeit vollständig gegeben ist und hier ein werftnaher Einsatz nachgestellt werden soll.

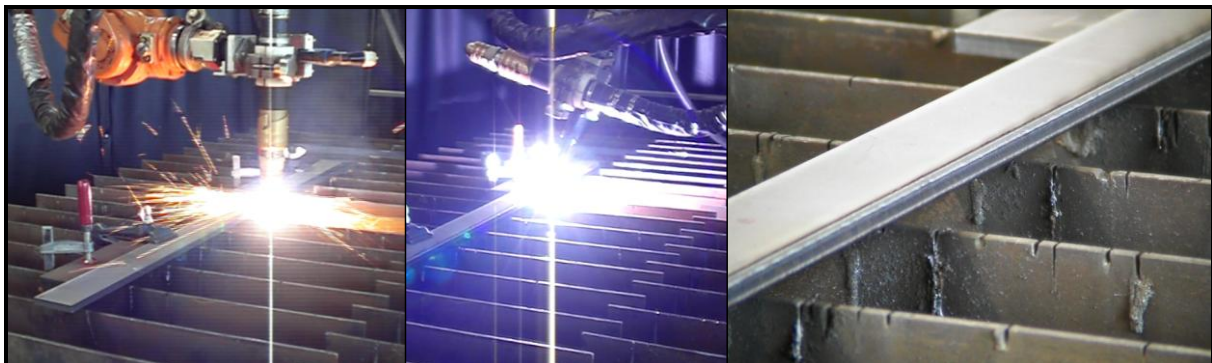


Bild 73: Untersuchungen an geraden Konturen zur Einbindung entwickelter Systeme

Die zu bearbeitenden Radien wiesen $R=20\text{ mm}$ auf. Die derzeit erfolgreich getesteten und über die Brennergeometrie und -haltung möglichen Radien waren $R=35\text{ mm}$.

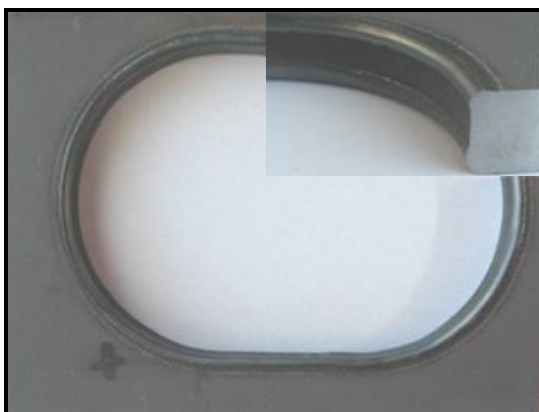


Bild 74: Wasserlauföcher mit $R=35\text{ mm}$



Bild 75: Brenner von oben an der Unterkante

Um an entsprechende Radien $R=20$ mm mit dem Brenner von oben die Unterkante zu bearbeiten Bild 74, musste die Brennerform geändert werden.

Die Düsen spitze wurde mit längeren Düsen versehen (Bild 76), damit sich der Brenner in dem Radius ohne Kollision (Bild 75) leichter drehen kann. Erschwerend kommt die stechende Brennerhaltung dazu.



Bild 76. Unterschied der Düsengeometrie mit Verschmelzung an den langen Düsen

Die längeren Düsen brachten einen größeren Abstand zwischen Kante und Brenner, konnten die Wärme nicht ausreichend abführen, so dass es zu Verschmelzungen kam. Diese Verschmelzung in Bild 76 dargestellt störten den Plasmastrahl erheblich und das Ergebnis. Eine weitere Möglichkeit die Geometrie von oben mit dem Plasmaschweißbrenner zu bearbeiten, war die Änderung der Brennerstellung. Dazu wurde auch zum Entlasten der Schlauchpakete die Brennerstellung stechend auf gerade Brennerstellung umgestellt. Die Schmelze wird dabei von dem kinetischen Anteil und der Schwerkraft auf die Schnittfläche gedrückt und bildet eine neue Kante an der Oberfläche und eine tropfenförmige Ausbildung anstelle der Rundung. Die Bearbeitung der Unterkante hingegen war erfolgreich. Somit konnte an der Oberkante die herkömmlich stechende Brennerhaltung und an der Unterkante die gerade Brennerhaltung mit den kurzen gut gekühlten Düsen eingesetzt werden. In Bild 77 sind drei gewünschte Geometrieformen nacheinander als Demonstrator und Abschluss des Arbeitspaketes erfolgreich abgearbeitet.



Bild 77: Demonstratorblech mit derzeit verwendeten Geometrien

2.2.8 Anwendungserprobung und Feldversuche unter werftnahen Bedingungen (AP 480)

Um eine ständige Qualitätskontrolle durchführen zu können, wurden mit Hilfe eines Laserscannersystems die bearbeiteten Kanten aufgenommen, vermessen und mit den manuell gemessenen Stellen verglichen, um eine Einschätzung über die Genauigkeit des Verfahrens geben zu können Bild 78. Dieses Verfahren könnte in der Erprobungsphase beim Einsatz auf der Werft die ständige Überwachung der bearbeiteten Kante übernehmen. Für die Qualitätskontrolle während des Betriebes ist dieses System in der Anschaffung zu teuer und die Auswertung sehr zeitaufwendig.

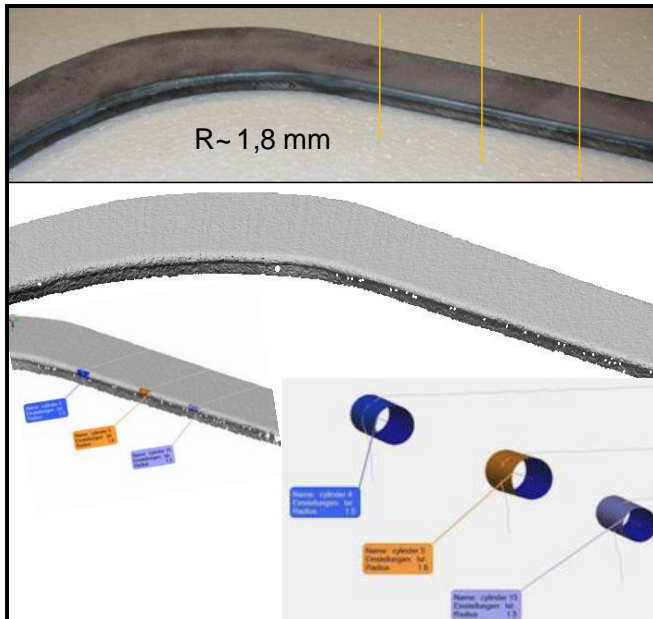


Bild 78: Möglichkeit der Qualitätskontrolle der bearbeiteten Kanten

Für eine möglichst gute Vorhersage zu dem Kantenradius konnte die statistische Versuchsplanung erfolgreich durchgeführt, verifiziert und abgeschlossen werden. Die Parameter können mit einer guten Sicherheit so eingestellt werden, dass der gewünschte Radius an der Kante vorhanden ist.

Die Einbindung der thermischen Kantenbearbeitung in die Profilschneidanlage wurde von der Flensburger Schiffbaugesellschaft (FSG) für das Plasmaschweißen bevorzugt. Die FSG lieferte 10 Profilstücke mit je einem Meter, um die Auswahl geeigneter Zuschnittgeometrien zu bearbeiten. Die Schnittstellenabsprache erfolgt über eine Bibliothek, die bei Aufruf der einer bestimmten Geometrie das dementsprechende Programm zum Kantenbearbeiten aufruft. Die TCP wurden in der Vorbereitung aufeinander abgestimmt und bleiben in dieser Stellung. Die Geometrie wird nach dem Schnitt, der mit Aufmaß für die Schnittfuge geschnitten wurde, mit der entsprechenden Brennerorientierung für Ober- und Unterkante wiederum abgefahren. Die aus dem Arbeitspaket 470 ermittelten Parameter wurden auf die Profilstücke übertragen. In Bild 79 ist der in die Profilschneidaufgabe integrierte thermische Kantenumschmelzprozess das Plasmaschweißen dargestellt. Die Profile wurden nach Originalstücken und Originalgeometrien bearbeitet.

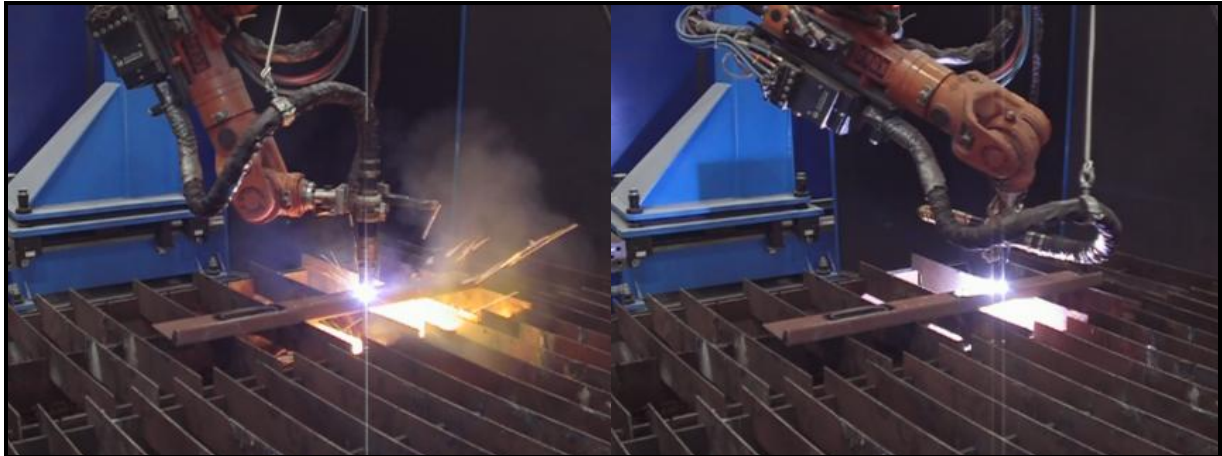


Bild 79: Schneidroboter mit appliziertem Plasmabrenner zum thermischen Bearbeiten

Nach jeweils 6 bearbeiteten Geometrien wurden die Profile getauscht und die bearbeiteten Kanten vermessen und beurteilt. Die Verschleißteile wurden auf Einsatztauglichkeit überprüft und bei Bedarf nachgearbeitet oder ausgewechselt. Dabei ist die Einschaltdauer der Anlage zu berücksichtigen. Bei durchgehender Bearbeitung müssen die Stromstärken angepasst werden, damit der Brenner kontinuierlich ohne größere Pausen arbeiten kann. Die Verschleißteile unterliegen bei Beachtung der vom Hersteller empfohlenen Einschaltdauer keinem größeren Verschleiß, als vom Hersteller angegeben. Die Umsetzung der Parameterstudien und die experimentelle Untersuchungen zur Einbindung der entwickelten bzw. adaptierten Systeme auf werftgetreue Materialien, Werkstücke und Geometrien konnten werftnah erfolgreich und zufriedenstellend dargestellt werden (Bild 80).

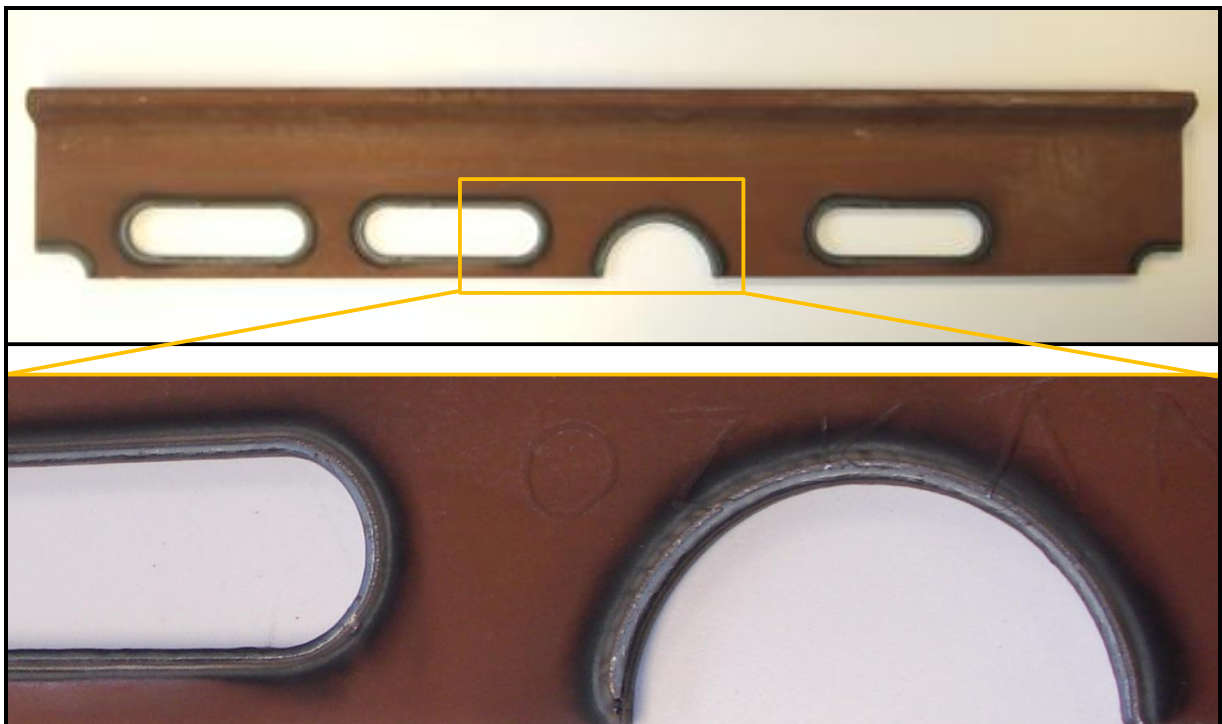


Bild 80: Demonstratorbauteil für das thermische Kanterunden mit dem Plasmaschweißverfahren in der Profilschneidanlage

2.3 Voraussichtlicher Nutzen

Der Nutzen des Forschungsvorhabens ist grundsätzlich in Verbindung mit dem Gesamtziel der Verbundvorhaben, ein wettbewerbsfähiges Konzept für den Einsatz der thermischen Verfahren zum Kantenbearbeiten als Lackiervorbereitung zu entwickeln, zu sehen. Das abgeschlossene Teilforschungsprojekt stellt zusammen mit den Forschungsvorhaben der Verbundprojektpartner einen wichtigen Beitrag zum Erreichen des Gesamtforschungsziels dar.

Im Teilprojekt wurde 1 von 3 thermischen Verfahren, mit dem Schwerpunkt die Schnittkanten für eine optimale Lackiervorbereitung automatisiert und thermisch so zu bearbeiten, dass die Kanten den scharfen Anforderungen und Neuerungen der IMO standhalten, weiterentwickelt und verifiziert.

Die ermittelten Ergebnisse der Forschungsstelle und Verbundprojektpartner stellen die Grundlage für eine Zulassung dieses Verfahrens für alle Anwender aus der metallverarbeitenden Industrie dar. Durch die verfahrensspezifischen „edge treatment process procedure“ konnte in Zusammenarbeit mit dem DNV ein „approval in principle“ erarbeitet werden. Dies zeigt die Wichtigkeit, aufgrund der aktuellen IMO-Vorschriften, das Verfahren für die Industrie zur Verfügung zu stellen.

Der vom DNV ausgestellte Brief stellt die Voraussetzung für weitere Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der thermischen Kantenbearbeitung für die beschichtungsgerechte Lackiervorbereitung. Ausgehend von den erarbeiteten wissenschaftlichen und technischen Wissen und Erfahrungen aus dem Bekas-Thema, ergeben sich auf dem Gebiet der Plasmastrahltechnik neue Forschungsansätze für das Plasmaschweißen sowie für das Plasmaschneiden und stellt die Basis für langfristige Forschungsaktivitäten und Dienstleistungen dar. Die gesammelten Erfahrungen zur statistischen Versuchsplanung werden in weitere Forschungsaktivitäten mit einfließen.

So konnte das Wissen für Themen zur thermischen Nahtvorbereitung an Schnittkanten in horizontaler Lage mittels Plasmastrahlsystem auf regionalen Werften umgesetzt werden. In weiteren anlaufenden Forschungsthemen in Zusammenarbeit mit zwei regionalen Firmen konnten Wissen und Erfahrungen zum Plasmaschweißverfahren ausgetauscht und genutzt werden.

Durch die Erschließung neuer internationaler Märkte sowie die Inanspruchnahme entsprechender industrieller Dienstleistungen wird die regionale Schiffbau- und Zulieferindustrie langfristig gestärkt und die Schaffung neuer Arbeitsplätze gefördert.

2.4 Paralleler Fortschritt anderer Stellen auf dem Forschungsgebiet

Während der Projektlaufzeit konnten, aufgrund der Nachfrage einiger Werften und Bekanntgabe der Problematik über Veröffentlichungen, Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bei Schleifmaschinenhersteller für den Automaten- und Handbetrieb festgestellt werden. So wurden die Schleifautomaten so modifiziert, dass ein optimaler Rundungseffekt eintritt. Die Handschleifmaschinenhersteller entwickelten

Radienschneidplatten, um kleinere Wasserlauflöcher zu bearbeiten. Weiterhin läuft ein Projekt, um diese Radienschneidgeräte automatisiert einsetzen zu können. Eine weitere Neuerung während des Projektes entwickelte die Firma ESAB-Cutting Systems. Die Firma ESAB-Cutting Systems entwickelten das eigentliche Abfallprodukt, die Anrundung der Oberkante während des Zuschnittes, weiter, um eine nach Forderung der IMO gerechte Kante mit Radius $r=2$ mm herstellen zu können.

2.5 Veröffentlichung der Ergebnisse

Zur Präsentation der Ergebnisse wurde innerhalb der Projektlaufzeit eine Veröffentlichung im DVS-Berichte Band 250 durchgeführt, die mit einem Vortrag auf einer Tagung abgeschlossen wurde. Der Vortrag wurde auf der „Große Schweißtechnische Tagung“ in Dresden gehalten. Weiterhin fand eine Veröffentlichung in der einschlägig bekannten Zeitschrift „Der Praktiker“ statt. Im Jahresbericht des Fraunhofer Institutes IPA in Stuttgart für das Jahr 2009 und im Jahresbericht des Fraunhofer Anwendungszentrums in Rostock für das Jahr 2007/2008 wurden Ergebnisse der Arbeitskomplexe von dem Verbundvorhaben BeKaS veröffentlicht. Im Nachgang des Vorhabens sind gezielte Veranstaltungen, insbesondere im Hinblick auf eine nachhaltige Verwertung der Ergebnisse in weiteren Vorhaben, durch die Forschungsstelle und die Projektpartner geplant.

3 Zusammenfassung

Ausgehend vom Gesamtziel des Verbundvorhabens, der Schaffung der verfahrenstechnischen Voraussetzung für eine weitgehende Substitution der klassischen manuellen spanenden Kantennachbearbeitung an werftspezifischen Bauteilen durch eine hocheffektive thermische Bearbeitung mittels Laser oder Plasma in Erwartung spezifischer Vorteile, erfolgt im vorliegenden Teilprojekt durch die Entwicklung eines thermischen Kantenbearbeitungsprozess mittels Plasmastrahlverfahrens. Das integrierte Plasmastrahlverfahren arbeitet gegenüber dem derzeit eingesetzten manuellen Verfahren mit höheren Bearbeitungsgeschwindigkeiten berührungslos, reproduzierbar und automatisiert. Mit ausreichend dimensionierten Stromquellen und Brennvvarianten können Standzeiten erhöht werden, so dass der Verschleißmittelanteil bedeutend gering wird.

Weiterhin konnten aus dem Gesamtziel in diesem Teilprojekt Bearbeitungszenarien unter werftnahen Bedingungen mittels thermischen Prozess getestet und eine Prozessintegration nachgewiesen werden. Durch die angestrebte Prinzipzulassung AiP (Approval in Principle) konnte eine Verfahrensankennung durch den DNV erreicht werden. Aufgrund durchgeführter statistische Versuchspläne konnten Zusammenhänge zwischen Parametern und Zielgröße Radius hergestellt und verifiziert werden.

Für korrosionstechnische Untersuchungen wurden Parameter optimiert und eine Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit gegenüber herkömmlich hergestellten Kanten nachgewiesen. Die angestrebten Kosten Nutzen Analyse einer optimalen Prozessintegration erfolgte an potentiellen Einsatzszenarien mittels Plasmaschweißverfahrens zur Kantenbearbeitung am Beispiel der Profilschneidanlage. Die daraus resultierenden Anforderungen an Anlagentechnik, Logistik und Arbeitsvorbereitung unter den Bedingungen verschiedener Schiffstypen und Werften wurden zusammengetragen und in einem Lastenheft dokumentiert.

Angesichts vergleichsweise hoher Lohnkosten in Deutschland tragen die Ergebnisse dieses Vorhabens entscheidend dazu bei, dass die deutsche Schiffbauindustrie die tendenziell wachsenden Anforderungen von Seiten der Reedereien und der IMO an den Korrosionsschutz und damit an die Oberflächenvorbereitung auch zukünftig kostendeckend und in hoher Qualität erfüllen kann.

Literaturverzeichnis

- [1] IMO: Performance standard for protective coatings for dedicated seawater ballast tanks in all types of ships and double-side skin spaces of bulk carriers, IMO-Resolution MSC 81/WP.13, Annex 3

- [2] DIN EN ISO 12944-3,
Beschichtungsstoffe Korrosionsschutz von Stahlbauten durch
Beschichtungssysteme Teil 3, Arten von Oberflächen und
Oberflächenvorbereitung, 1998,

- [3] DVS Merkblatt 2103,
Unregelmäßigkeiten und deren Ursache beim Plasmaschneiden von
metallischen Werkstoffen, 1994,

- [4] Firmenprospekt GÜDEL GmbH
Katalog: GÜDEL-ROBOTICS-KUKA;
www.gudel.com

- [5] KUKA Roboter GmbH
Technical Data KR 15/2;
www.kuka.com

- [6] Firmenprospekt Kjellberg Finsterwalde Elektroden und Maschinen GmbH
Plasmaschneidanlage HiFocus 160i;
www.kjellberg.de

- [7] Firmenprospekt Kjellberg Finsterwalde Elektroden und Maschinen GmbH
Plasmaschneidanlagen Fine Focus 800 & Fine Focus 1600;
www.kjellberg.de

- [8] Krink,V., Laurisch, F., Simler, H.
Hi Focus Technologie erweiterte Anwendungsbeispiele des Plasmaschneidens;
Vortrag Kjellberg 2005

- [9] Firmenprospekt BOSCHERT GmbH + CO. KG
Plasma – eine Alternative zum Laser?;
www.boschert.de

- [10] Krink,V., Laurisch, F., Simler, H.
Beitrag zur Technologie des Sauerstoff-Plasmaschneidens;
Internationale Schneidtechnische Tagung, 1997

-
- [11] Irmer, W., Mair, H.
Metallurgische Veränderungen des Schnittkantenmaterials und deren
Auswirkungen auf die Weiterverarbeitung der Schnittkanten;
Internationale Schneidtechnische Tagung, 1997
- [12] Schiffbautechnische Gesellschaft, Fachausschuss „Werkstoffe und Korrosion“,
Korrosionsschutz für Schiffe und Seebauwerke,
Hamburg, Schiffbautechnische Gesellschaft, 1987,
- [13] Germanischer Lloyd,
VI Ergänzende Vorschriften und Richtlinien, Teil 9, Werkstoffe und
Schweißtechnik, Kapitel 6, Richtlinien für Korrosionsschutz und
Beschichtungssysteme, 2006,
- [14] Verband für Schiffbau und Meerestechnik,
Fertigungsstandard des deutschen Schiffbaus,
Hamburg, 2006

Anhang

Schneiddaten		080213-01		Beurteilung		Auszug aus DIN EN ISO 9013:2002 (D) als Hilfestellung	
Schneidvariante	Sauerstoff			Wellige Schnittfläche			
Plasmatechnologie	HiFocus F - Baustahl			Schmelzperlen			
Schneidbrenner	Plasmagas mit Wirbelgas			Bart			
Einsatzszenario	A1			Oxidschicht			
Schneidbrenner	Plasmagas mit Wirbelgas			Winkelabweichung			
Düsenkappe	R 2114x-1,4 mm			Fugenform			
Düsenkappe	R 3008			Schnitttuge			
Katode	R 012x			Rechtwinkligkeitsabweichung			
Distanzring	Z 111 A			Rillentiefe			
Gasführung	Z 111			Rillenbreite			
Wirbelgaskappe	Z 4140			Rillennachlauf			
Schutzkappe	Z 501			gemittelte Rauhtiefe			
Plasmagas	PG	PG1:	Air	PG2:	Sauerstoff		
Wirbelgas	WG	WG1:	Sauerstoff	WG2:	Stickstoff		
Plasmagasdruck	p _{PG}	PG1:	6,0	PG2:	6,0		
Wirbelgasdruck	p _{WG}	WG1:	6,0	WG2:	6,0		
Plasmagasdurchflussmenge	Q _{PL}	PG1:	40,0	PG2:	75,0		
Wirbelgasdurchflussmenge	Q _{WG}	WG1:	20,0	WG2:	75,0		
Brennerhaltung		-I					
Kante/Schnittfläche		Oberkante					
Parameter							
Blechdicke	d	10,0		mm			
Stromstärke	I	130,0		A			
Spannung	U	-		V			
Schneidgeschwindigkeit	v _s	2,0		m/min			
Lichtbogenlänge	l	-		mm			
Abstand in z-Richtung, Blechoberfläche zu Brenner	z	3,0		mm			
Zundhöhe	z _s	5,0		mm			

Anhang 1: Datenblatt mit Beurteilungskriterien für das Plasmaschneidverfahren