



**MONTAN
UNIVERSITÄT**
WWW.UNILEOBEN.AC.AT

Montanuniversität Leoben

**Department Product Engineering
Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau**



**Entwicklung eines technologischen Verfahrens zur
Herstellung von Panzerschichten mit
Hartstoffpartikeln**

Diplomarbeit

Stefan Barwart

Leoben, 31. Mai 2011

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, die vorliegende Diplomarbeit

„Entwicklung eines technologischen Verfahrens zur Herstellung von Panzerschichten mit Hartstoffpartikeln“

eigenständig unter Zuhilfenahme der angeführten Quellen angefertigt zu haben.

Leoben, 31. Mai 2011

Stefan Barwart

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meines Studiums Montanmaschinenwesen mit Schwerpunkt Computational Design am Department Product Engineering, Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, an der Montanuniversität Leoben in Kooperation mit der Materials Center Leoben Forschung GmbH und der Firma Komptech GmbH.

Dem Leiter des Lehrstuhls, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Wilfried Eichlseder danke ich für die Schaffung der Voraussetzungen zur Durchführung dieser Arbeit und für seine Unterstützung.

Der Firma Komptech GmbH, im Speziellen Herrn Dipl.-Ing. Dr. Christian Oberwinkler, und der Materials Center Leoben Forschung GmbH für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit.

Mein besonderer Dank gilt Frau Dipl.-Ing. Dr. Kerstin Chladil und Herrn Dipl.-Ing. Martin Leitner für die Betreuung und Förderung, die mir im Laufe der Arbeit entgegengebracht wurde.

Herrn Dipl.-Ing. Dr. Istvan Godor, Dipl.-Ing. Dr. Michael Stoschka, Herrn Dipl.-Ing. Michael Thaler und Herrn Dipl.-Ing. Bernd Maier danke ich für die Durchsicht und ihre Unterstützung.

Mein Dank gilt auch allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls, die mich in meiner Tätigkeit gefördert haben.

Kurzfassung

Schneidezähne in Zerkleinerungseinheiten für die Wiederverwertung anfallender Rohstoffe müssen enorm hohe mechanische und abrasive Belastungen ertragen. Um möglichst lange Standzeiten bei geringem Verschleiß zu gewährleisten, werden solche Werkzeuge an der Eingriffsoberfläche gepanzert. Die in Vorversuchen getesteten Panzerungen bestehen aus einer eisenbasierenden Schweißnaht und eingestreuten Hartstoffpartikeln. Dieser Materialverbund in Form einer harten verschleißfesten Auftragschweißung an der Zahnschneidspitze des zähen Schneidezahns kommt den gestellten Anforderungen an Verschleiß und mechanischer Belastung nahe. Mit dem „Einstreuselverfahren“ lassen sich hochabrasionsbeständige Panzerungen verwirklichen, welche den schlagenden Beanspruchungen von Schneidwerkzeugen in der Holz- und Müllaufbereitungsbranche bestmöglich standhalten. Charakterisierend für dieses Schweißverfahren ist die Einbringung von pulver- bis kornförmigen Hartstoffen in das noch flüssige Schweißbad.

Für die in dieser Arbeit geforderten Schweißuntersuchungen wurde daher zunächst ein Versuchsaufbau zur Einbringung von Hartstoffen realisiert. Die Probeschweißungen zeigen, dass die Art des verwendeten Zusatzwerkstoffes und die eingestreute Hartstoffmenge einen starken Einfluss auf den Schweißprozess ausüben. Durch eine umfangreiche Parameterstudie an ebenen Probeplatten sind prozesssichere Schweißparameter für multiple Kombinationen von Zusatzwerkstoff und Hartstoff ausgearbeitet worden. Begleitende Gefügeanalysen und Härtemessungen bilden die Grundlage für eine Charakterisierung der lokalen Eigenschaften in der Schweißnaht. Weiterführende Vergleiche der heterogenen Schweißzusätze, eine Bewertung der Makrorisse und der Verteilung der eingebrachten, partikelförmigen Hartphasenanteile in der geschweißten Verbindung stellen einen wesentlichen Beitrag für die Auswahl der Panzerung dar. Eine nachfolgende methodische Auswertung liefert den tendenziellen Zusammenhang zwischen den einstellbaren Schweißparametern und dem daraus resultierenden Schweißergebnis. Eine Übertragung der an den Probeplatten gefundenen Schweißparametersätze ist auf den Schneidezahn als Grundlage für die experimentellen Untersuchungen von Verschleiß und Schwingfestigkeitsverhalten durchgeführt worden.

Abstract

Shredding-tools of crushing-units are mainly used for the recycling of solid waste. They are exposed to enormous local mechanic and abrasive loads. One method to improve the durability is to apply hard facing to the teeth cutting surfaces. Hard faced layers consist of iron based welding combined with tungsten carbides. These carbide particles should be spread homogenously into the molten ductile iron matrix leading to a ductile and most abrasive resistant filler metal. The generated composite, which is added on the substrate by an overlay-welding, relates to the requirements in practice, which should combine an optimum of low costs and sufficient fatigue-wear-life. Hard faced shredding-tools, which are highly resistant to abrasion and impact loads, can be easily manufactured with this particle-based dispersive method. The verified insertion of the hard particles into the filler-metal is therefore essential for the welding-process.

It is well known from literature that these complex surfaces exhibit extreme brittle structures and get easily affected by cracks already at manufacturing stage. These cracks can lead increased rupture failure of the cutting-tools. The work focuses on the examination of extensive studies to determine the influence of the filler-material and the hard-tungsten particles to achieve an optimized most-homogenous welding-process. Thus different filler-composites, depending on the filler-material itself, the amount and distribution of the tungsten carbides and the different welding process parameters, were investigated as string bead technique on plain steel plates. A specific conveyer technique was build-up to achieve a continuous flow of the hard-phase particles as auxiliary weld unit. To rank the weld matrix, extensive metallographic analysis, macro-hardness measurements and topographical assessments were done. The optimized weld process lead to a most homogeneous distribution of the hard faced tungsten particles and a minimized occurrence of surface cracks. It has to be stated that the given results are only valid for this specific material and weld process combination. Finally, the optimized weld process was transferred from test plates to industrial chopping teeth's with complex geometry.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
2. Aufgabenstellung	3
3. Zielsetzung.....	4
4. Stand der Technik	5
4.1. Auftragschweißen	5
4.2. Verschleißschutzwerkstoffe.....	5
4.2.1. Hartlegierungen auf Eisenbasis.....	5
4.2.2. Eisenarme Hartlegierungen.....	5
4.3. Hartstoffe	6
4.4. Schweißverfahren zur Herstellung von Panzerungen.....	6
4.4.1. Gasschmelzschweißen	6
4.4.2. Gas-Pulver-Schweißen	7
4.4.3. Lichtbogenhandschweißen.....	7
4.4.4. Unterpulverschweißen.....	8
4.4.5. Metalldrahtlichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode	8
4.4.6. Wolfram-Inertgasschweißen.....	9
4.4.7. Plasmaschweißen	9
4.4.8. Laserauftragsschweißen	10
4.4.9. Thermisches Spritzen.....	10
4.4.10. Metallschutzgasschweißen	11
5. Verwendete Materialien und Zusätze	13
5.1. Grundwerkstoff.....	13
5.1.1. Baustahl S355JR	13
5.1.2. Vergütungsstahl 27MnCrB5-2	13
5.2. Schweißzusatz.....	14
5.2.1. UTP A DUR 650.....	14
5.2.2. DURMAT FD 601	14
5.2.3. DURMAT OA	15
5.3. Hartstoffe	16
5.3.1. Metallischer Hartstoff – DURMAT WC-IV	17
5.3.2. Nichtmetallischer Hartstoff – Siliziumkarbid SiC	19
6. Schweißversuchsaufbau	20
6.1. Schweißapparat	20
6.2. Schweißstisch.....	20
6.3. Karbidzuführung und Dosierung.....	21
6.3.1. Karbidzuführung.....	21
6.3.2. Dosierung.....	23
6.4. Schweißvorrichtung für Sichelzähne	25

7.	Schweißversuchsdurchführung	28
7.1.	Schweißversuchsdurchführung an Probeplatten	28
7.1.1.	Gefügeaufnahmen UTP A DUR 650.....	31
7.1.2.	Gefügeaufnahmen UTP A DUR 650 mit Wolframkarbideinstreuung.....	32
7.1.3.	Härtemessung von UTP A DUR 650 Panzerungen	35
7.1.4.	Gefügeaufnahmen UTP A DUR 650 mit Siliziumkarbideinstreuung.....	36
7.1.5.	Härtemessung von UTP A DUR 650 Panzerungen mit Siliziumkarbid.....	37
7.1.6.	Gefügeaufnahmen DURMAT FD 601	38
7.1.7.	Härtemessung von DURMAT FD 601 Panzerungen	38
7.1.8.	Gefügeaufnahmen DURMAT FD OA.....	39
7.1.9.	Härtemessung von DURMAT FD OA Panzerungen	40
7.2.	Schweißversuchsdurchführung an Sichelzähnen	41
8.	Einflussparameter der Auftragschweißung	44
8.1.	Schweißspezifische Parameter	44
8.2.	Einfluss Streckenenergie.....	47
8.3.	Einfluss Karbideinstreuung.....	51
9.	Prüfstandversuche	54
9.1.	Verschleißuntersuchungen an Sichelzähnen.....	54
9.1.1.	Versuchsaufbau Verschleißprüfstand.....	54
9.1.2.	Auswertung und Ergebnisse.....	57
9.2.	Kurzzeitfestigkeitsuntersuchungen an Sichelzähnen	59
9.2.1.	Versuchsaufbau Prüfstand	59
9.2.2.	Auswertung und Ergebnisse.....	62
10.	Zusammenfassung und Ausblick	64
11.	Literaturverzeichnis.....	65
12.	Anhang.....	67
12.1.	Hartstofftabellen	67
12.2.	Probenlisten.....	69
12.3.	Zusammenstellungszeichnung Fördereinheit.....	74

1. Einleitung

Die Wiederverwertung anfallender recycelbarer Stoffe stellt in der heutigen Zeit ein wichtige Ressource von Rohstoffen dar. Nicht nur die klassischen Abfälle wie Papier, Altmetall und Altglas lassen sich fast zur Gänze recyceln. Eine zunehmende Bedeutung erlangt die Wiederverwertung von Bioabfällen, Grünschnitt und den Abfällen der Forstwirtschaft. Einerseits werden diese Abfallstoffe aufbereitet um hochqualitativen Kompost zu erhalten, andererseits um Biomasse zur thermischen Nutzung bereitzustellen. Durch den vermehrten Einsatz von Holz als CO₂ neutraler Energieträger bekommt die Bau-, Möbel- und Papierindustrie vermehrte Konkurrenz bei der Beschaffung dieser Rohstoffe. Da ein nicht geringer Teil des Baumes aus Astwerk besteht, ist eine Verwendung dieses Materials für die Energiegewinnung verwertbar. Durch die hohen Ansprüche an die Biomasse für die thermische Energiegewinnung sind jedoch Aufbereitungsmaßnahmen zur Verwendung erforderlich.

Weiters sind durch strengere gesetzliche Regelungen Umstände entstanden, die eine Nachbehandlung von Abfall, im speziellen Fall Produktionsreste, Gewerbemüll und Sperrmüll, erforderlich machen. Dieser Abfall kann nach dem Sortieren direkt recycelt oder der thermischen Verwertung zugeführt werden.

Der erste Schritt in der Aufbereitung ist die mechanische Zerkleinerung des Abfalls. Um eine wirtschaftliche Zerkleinerung vorzunehmen ist der Einsatz von Sondermaschinen erforderlich. Durch die inhomogene Zusammensetzung des Abfalls, der teilweise mit Fremdkörpern durchsetzt ist, ist der Einsatz von massiven Maschinen mit enormer Leistung erforderlich. Für die Zerkleinerung von Grünmüll, Wurzelstöcken und leichtem Industrieabfall hat sich ein langsam laufender Zweiwellenzerkleinerer mit gegenläufig drehenden und mit Schneidezähnen, in diesem Fall als Sichelzähne ausgeführt, bestückten Walzen bewährt (Abb. 1.1). Auf diese Sichelzähne treten im Betrieb enorme Beanspruchungen in Form von abrasiven Verschleiß und schlagartiger dynamischer Beanspruchung auf.



Abb. 1.1: Blick in den Zerkleinerungsraum eines Zweiwellenzerkleinerers [1]

2. Aufgabenstellung

Im Betrieb einer Zerkleinerungsmaschine haben die Werkzeugkosten als standzeitabhängige Größe einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtkosten. Neben den reinen Kosten der Sichelzähne des Zweiwellenzerkleinerers sind die Stillstandszeiten für den Wechsel dieser Werkzeuge erheblich. In Abb. 2.1 ist ein geschmiedeter Sichelzahn der Firma Komptech GmbH dargestellt. An den Zähnen ist in kurzer Zeit ein starker Verschleiß der Zahnspitze im Betrieb ersichtlich. Ursache dafür sind Störstoffe, welche sich im zu zerkleinerndem Abfall befinden, als Beispiel ist das Zerkleinern von Wurzelstöcken zu nennen. Dort treten diese Störstoffe in Form von Sand und Gestein auf, beim Aufbereiten von holzigem Abbruchmaterial können dies zudem metallische Störstoffe im Zerkleinerungsgut befinden. Dem reinen Verschleiß ist mit einer härteren Oberfläche des Sichelzahns entgegenzutreten. Durch die grundlegende Funktionsweise dieser Zweiwellenzerkleinerer tritt zudem starke schlagende Beanspruchung an den Sichelzähnen auf. In Kombination der beiden Beanspruchungen muss der Zahn sowohl eine hohe Härte sowie Zähigkeit aufweisen. Dieser Widerspruch der mechanischen Eigenschaften ist am Sichelzahn, unter Einbeziehung wirtschaftlicher Aspekte, zu realisieren.

Ein Materialverbund in Form einer harten Auftragschweißung an der Zahnspitze des zähen Grundmaterials des Sichelzahns kommt den Anforderungen sehr nahe. Um an der hochbeanspruchten Zahnspitze ein Ablösen der Hartauftragung bei schlagender Beanspruchung zu verhindern ist eine Auftragschweißung zu wählen, die verschleißfest und schlagbeständig ist. Hier bietet sich ein Schweißverfahren an, welches Hartstoffe in einer zähen Grundmatrix verwirklicht. Dieses Verfahren wird als „Einstreuselverfahren“ bezeichnet. Charakterisierend für dieses Schweißverfahren ist die Einbringung von körnigen Hartstoffen in die noch flüssige Schweißnaht. Diese Schweißnaht zeichnet sich durch eine zähe Matrix mit eingelagerten Hartpartikeln aus. Vorversuche an extern hergestellten Sichelzähnen, welche nachfolgend als Benchmark Sichelzähne bezeichnet werden, zeigten ein vielversprechendes Potential auf.



Abb. 2.1: Sichelzahn eines Zweiwellenzerkleinerers ohne Verschleißschicht (Komptech)

3. Zielsetzung

Im Zuge dieser Diplomarbeit soll ein Konzept für die technisch-wirtschaftliche Fertigung von Panzerungen an Sichelzähnen erarbeitet werden. Im Fokus stehen die Optimierung des Schweißprozesses und die Auswahl von geeigneten Zusatzwerkstoffen zur Erzeugung einer höchstabrasions-beständigen Panzerung. Durch die Erhöhung der Standzeit aufgepanzelter Sichelzähne sind trotz höheren Herstellungskosten, hervorgerufen durch den Einsatz hochwertiger Schweißzusatzwerkstoffe und des Schweißprozesses, wirtschaftliche Vorteile zu lukrieren.

Für die Schweißtechnologie ist eine Ausarbeitung und Realisierung eines Versuchsaufbaus zur Einbringung von Hartstoffen notwendig, welche in späterer Folge auf eine Serienfertigung übertragbar sein soll. Durch eine Parameterstudie an ebenen Platten sind Schweißparameter für die jeweiligen Schweißzusatzwerkstoffe zu erstellen und anschließend auf den definierten Probekörper, in diesem Fall den Sichelzahn, zu übertragen. Für eine Charakterisierung der lokalen Eigenschaften sind begleitende Gefügeanalysen und Härtemessungen durchzuführen und in die laufenden Probeschweißungen fortwährend einzubinden.

Um eine optimale Kombination von Zusatzwerkstoff und Hartstoffeinbringung zu erhalten, sind einzelne Serien der gepanzerten Sichelzähnen auf Verschleiß und Schwingfestigkeitsverhalten auf eigens dafür entwickelten Prüfständen zu vergleichen. Nach Auswahl der Parameter können weiterführende Untersuchungen auf dem Gebiet des Verschleißes mittels einer Nullserie im realen Betrieb getestet und analysiert werden.

4. Stand der Technik

4.1. Auftragschweißen

Unter Auftragschweißen versteht man das Beschichten eines Werkstücks durch Schweißen. Erfolgt die Auftragschweißung mit gegenüber dem Grundwerkstoff vorzugsweise verschleißbeständigerem Auftragwerkstoff, so spricht man von Panzerungen bzw. vom Schweißpanzern [2]. Die Motivation eine Auftragschweißung durchzuführen, ist zu einem in der wirtschaftlichen Betrachtung, wie auch in der konstruktiven Hinsicht zu finden. Die wirtschaftliche Betrachtung, umfasst die bei Abrasionsbeanspruchung höhere Lebensdauer mit Auftragpanzerungen gegenüber dem reinen Grundwerkstoff. Zudem lassen sich mit der Kombination von Stählen und Panzerungen Materialverbunde verwirklichen, welche zielgenau den Ansprüchen, wie z.B. Härte und Zähigkeit, gerecht werden. Dadurch sind kostengünstige Fertigungsverfahren möglich, die mit eigenschaftsähnlichen homogenen Werkstoffen nur bedingt oder mit sehr hohen technischen und finanziellen Mitteln realisierbar wären. Eine zusätzliche Bedeutung gilt insbesondere der Reparaturschweißung mit Panzerschichten.

4.2. Verschleißschutzwerkstoffe

4.2.1. Hartlegierungen auf Eisenbasis

Die DIN 8555 [3] teilt die auf Eisen basierenden Auftragschweißzusatzwerkstoffe, in 10 Kategorien ein. Diese Einteilung erfolgt unter Berücksichtigung der typischen Einsatzfälle und der Werkstofftypen [4]. Zudem erfolgt speziell in der DIN EN 14700 [5] eine Normung der Schweißzusätze zum Hartauftragen. Bei den Zusätzen mit Eisen-Matrix heben sich Chrom (Cr), Wolfram (W), Molybdän (Mo) und Vanadium (V) als Karbid- oder Hartphasenbildner hervor. Zusätzlich können Metalloide mit den Elementen Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Bor (B) als harte Verbindungen vorliegen. Eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Matrix kann durch Zulegieren von Mangan (Mn) und Nickel (Ni) erzielt werden. Die Hartphasen werden entweder direkt aus der Schmelze ausgeschieden, oder als Hartstoffe der Schmelze zugeführt. Je nach Einsatzgebiet dient die Eisenmatrix als Stütze und Träger der Hartphasen bzw. als Bindephase bei sehr hohen Hartstoffanteilen. Die chemische Zusammensetzung der Schweißzusatzwerkstoffe ist mit jener der härtbaren Stähle vergleichbar [6]. Durch eine Wärmebehandlung der Auftragung können Eigenschaften der Hartlegierung bzw. Matrix den Anforderungen angepasst werden. Eine nachträgliche Wärmebehandlung am geschweißten Werkstück kann zu enormen Eigenspannungen führen, welche eine Rissinitiierung zur Folge haben kann. Es ist sinnvoll die Wärmebehandlung, in den meisten Fällen ein Glühen, Härten und Anlassen, im Zuge der Abkühlung der Schweißnaht an der Atmosphäre vorzunehmen. Hierbei eignen sich insbesondere lufthärtende Schweißzusatzwerkstoffe.

4.2.2. Eisenarme Hartlegierungen

Unter eisenarmen Hartlegierungen sind Nickel und Kobaltbasislegierungen als die bedeutendsten Legierungen zu nennen. Bei den Kobaltbasishartlegierungen sind Chrom, Wolfram, Bor und Kohlenstoff, wie auch Kobalt selbst, für die Bildung von Hartphasen verantwortlich. Kobalthartlegierungen zeichnen sich durch eine gute Korrosionsbeständigkeit gegenüber Eisenbasishartlegierungen aus. Hartlegierungen auf Nickelbasis treten als System in der Form von Ni-Cr-B-Si auf, mit Hartphasen, die primär als Nickelboride bzw. auch als

Chromboride vorhanden sind. Nickelhartlegierungen sind hauptsächlich als Pulver erhältlich, welche als solche aufgeschweißt werden.

4.3. Hartstoffe

In technischen Anwendungen können die eingesetzten Hartstoffe in Karbide, Nitride, Boride, Silicide und Oxide eingeteilt werden. Die im Anhang befindliche Liste von Hartstoffen beinhaltet die wichtigsten Vertreter aus den jeweiligen Gruppen. Alle angeführten Härtewerte in den im Anhang befindlichen Tabellen (Tab. 12.1 bis Tab. 12.5) sind für Raumtemperatur angegeben [4,7].

4.4. Schweißverfahren zur Herstellung von Panzerungen

Für das Auftragschweißen bieten sich eine Vielzahl von Schweißverfahren an. Das zu wählende Schweißverfahren richtet sich nach wirtschaftlichen, wie auch nach technischen Gesichtspunkten. Zu den wirtschaftlichen Aspekten zählen neben den Anlagenkosten auch die Kosten für den Schweißzusatz und die Auftragsrate. Zum Auftragschweißen von Hartschichten eignen sich im Allgemeinen alle Schmelzschweißverfahren und Metallspritzverfahren. Bei großflächigen Auftragungen werden vorzugsweise Verfahren mit hohem Mechanisierungsgrad eingesetzt. Um mit einer oder wenigen Lagen einen ausreichenden Schutz gegen Verschleiß erreichen, ist die Vermischung von Auftrags- und Grundwerkstoff (Aufschmelzgrad) klein zu halten. In Abb. 4.1 sind Werte für den Aufschmelzgrad verschiedener Schweißverfahren dargestellt [9].

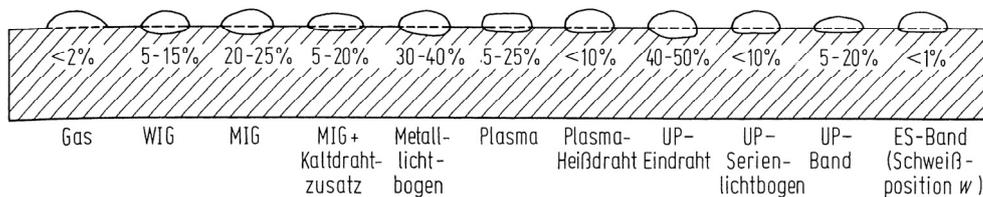


Abb. 4.1: Vermischung von Grund- und Auftragwerkstoff in Abhängigkeit vom angewendeten Schweißverfahren [9]

4.4.1. Gasschmelzschweißen

Bei diesem Schweißverfahren wird thermische Energie aus der Verbrennung von Gasen als Quelle herangezogen. Die Schweißgase sind Sauerstoff und ein Brenngas, wofür Acetylen, Wasserstoff, Propan und auch Erdgas verwendet werden. In mobilen Anlagen sind die Schweißgase in Gasflaschen gespeichert. In stationären Großanlagen wird Sauerstoff in Flaschenbündel und in Flüssiggastanks gelagert. Das Brenngas wird in Flaschenbündel bereitgestellt, im Fall von Acetylen kann es auch vor Ort in Großentwicklern erzeugt werden. Anlagen mit Erdgasbetrieb können direkt mit der Erdgasleitung gespeist werden. Das Gasschmelzschweißen, auch Autogenschweißen genannt, wird hauptsächlich manuell angewandt. Dazu wird mit Hilfe eines Handbrenners und der Schweißdüse (Mundstück) die Flamme händisch über das zu schweißende Areal positioniert (Abb. 4.2). Der Schweißzusatz, meistens in Stabform, wird dabei manuell zugeführt, siehe Abb. 4.3. Das Autogenschweißen eignet sich bei kleinen Stückzahlen und speziellen Anwendungen, welche eine geringe Vermischung von Grund- und Auftragwerkstoff erfordern. Das Gasschmelzschweißen ist schwer automatisierbar, dadurch wird es fortlaufend durch andere Auftragsschweißverfahren ersetzt [9, 10].

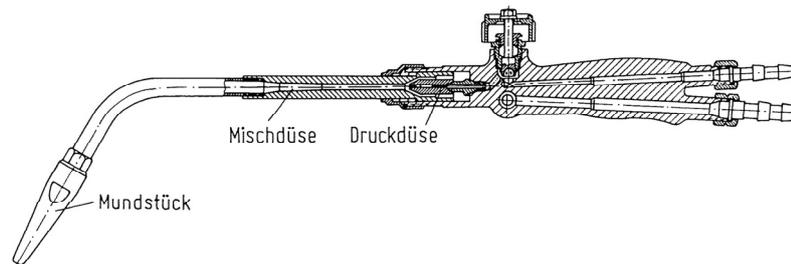


Abb. 4.2: Handbrenner beim Autogenschweißen [9]

4.4.2. Gas-Pulver-Schweißen

Nachdem das Werkstück bis zum Anschmelzen erwärmt wurde, wird aus einem kleinen Behälter, der Bestandteil des Schweißbrenners ist, siehe Abb. 4.3 (Nr. 2), Metallpulver auf die zu beschichtende Stelle aufgeblasen und eingeschmolzen. Das Verfahren ist für kleinflächige Beschichtungen bis zu einer Dicke von 2 mm geeignet [11].

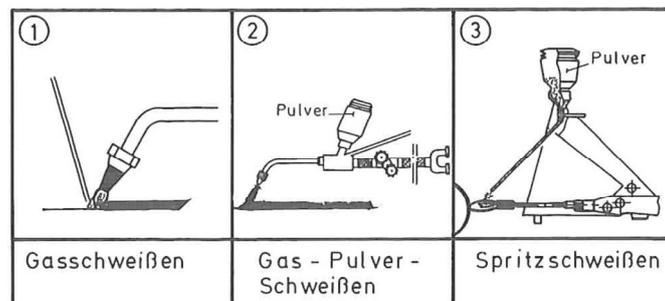


Abb. 4.3: Auftragschweißverfahren mit thermischer Energiequelle [4]

4.4.3. Lichtbogenhandschweißen

Das Lichtbogenhandschweißen ist ein universelles Schweißverfahren, welches sich auch zum Auftragschweißen eignet. Es gibt eine Vielzahl von Schweißzusatzwerkstoffen für die gängigen schweißbaren Grundwerkstoffe. Anwendung findet das Lichtbogenhandschweißen bei kleinen Losgrößen und bei Montage- bzw. Reparaturschweißungen. Das Verfahren weist einen hohen Aufschmelzgrad auf. Um die Eigenschaften der Panzerung nicht durch Vermischung mit dem Grundwerkstoff zu mindern, ist eine mehrlagige Schweißung anzustreben. Zudem ist es möglich mit diesem Verfahren in Zwangslagen gewölbte und kleine Flächen aufzupanzern. Die Schweißung erfolgt ausschließlich von Hand mittels Elektrodenhalter und umhüllter Stabelektrode (Abb. 4.4, Nr. 4). Dadurch ergibt sich geringe Aufschmelzleistung und eine schlechte Automatisierbarkeit [4, 9, 10].

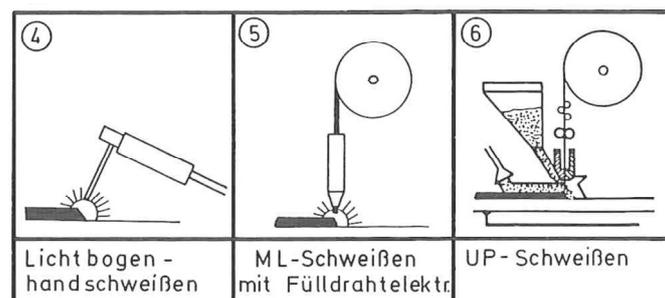


Abb. 4.4: Auftragschweißverfahren mit elektrischer Energiequelle [4]

4.4.4. Unterpulverschweißen

Für großflächige Aufpanzerungen von Verschleißschutzschichten bietet sich das Unterpulverschweißen, kurz UP-Schweißen an (Abb. 4.5, Nr. 6). Hierbei wird der Schweißzusatz, die Elektrode, kontinuierlich zugeführt. Der Lichtbogen wird vom Schweißpulver geschützt, welches vorab auf das Werkstück aufgetragen wird, siehe Abb. 4.5. Das restliche Schweißpulver wird anschließend abgesaugt, aufbereitet und dem Kreislauf wieder zugeführt. Das UP-Verfahren mit Drahtelektrode wird wegen des bei Schweißpanzerungen unerwünscht hohen Aufschmelzgrades beim Auftragschweißen höchstabrasionsbeständiger Legierungen wenig eingesetzt [4].

Durch die Verwendung von Bandlektroden für die flächige Auftragschweißung lässt sich der Aufschmelzgrad deutlich reduzieren. Wenn höchstabrasionsbeständige Panzerungen hergestellt werden sollen, eignet sich auch der Einsatz von Füllbandlektroden. Dieses Schweißverfahren ist im hohen Maß automatisierbar. Dadurch lassen sich hohe Abschmelzleistungen und Dicken von Panzerungen erzielen. Gegenüber stehen die hohen Anlagenkosten und die sehr schlechte Flexibilität der Anlagen auf sich ändernde Geometrien und Bauteilabmessungen [4, 9, 10].

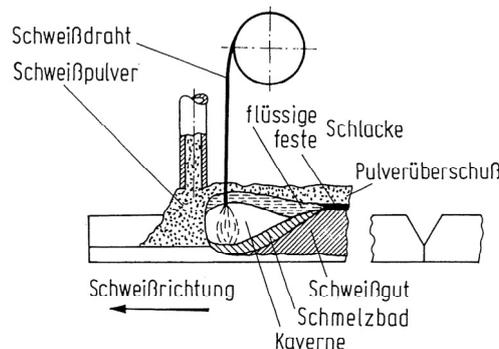


Abb. 4.5: Unterpulverschweißen [9]

4.4.5. Metalldrahtlichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode

Das auch besser bekannt unter dem englischen Begriff „Open Arc Welding“ genannte Verfahren, verwendet wie auch das UP-Verfahren oder das Lichtbogenhandschweißen Schweißpulver um den Lichtbogen zu schützen. Im Falle des „Open Arc Verfahrens“ wird das Schweißpulver im Inneren der Drahtelektrode dem Schweißprozess zugeführt (Abb. 4.4, Nr.5). Für hoch- und höchstlegierte Auftragschweißungen sind auch Doppelmantel-Fülldrahtelektroden verfügbar, welche im Kern noch zusätzliche Legierungselemente in Pulverform beinhalten. Dies ist nötig, da solche Legierungssysteme in Massivdrähten kaum mehr realisierbar sind. Es sind mit ähnlichen Anlagenkosten für das Metalldrahtlichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode wie für Anlagen für das Schutzgasschweißen zu rechnen, da diese Technologie mit den gleichen Anlagen betrieben werden kann. Eine gute Automatisierbarkeit bei mittleren Abschmelzleistungen und eine Einsparung der Kosten für das Schutzgas sind Vorteile des Verfahrens. Durch den hohen Aufschmelzgrad sind mehrlagige Schweißungen vorzuziehen, um die Eigenschaften der Panzerung besser einstellen zu können. Zu erwähnen ist zudem die gute Eignung für Reparatur- und Montageschweißungen, da durch die innere Zufuhr des Schweißpulvers kein Verblasen des Schutzgases auftreten kann wie z.B. bei Metallschutzgasschweißungen [4, 9, 10].

4.4.6. Wolfram-Inertgasschweißen

Der Lichtbogen beim Wolfram-Inertgasschweißen, kurz WIG-Schweißen, bildet sich zwischen Werkstück und einer sich nicht abschmelzenden Elektrode, ausgeführt in Form einer Wolframnadel, siehe Abb. 4.6. Eine Schutzgaswolke aus Helium oder Argon schützt den Lichtbogen und das aufgeschmolzene Metall. Beim manuellen WIG-Schweißen wird der stabförmige Zusatzwerkstoff seitlich in den Lichtbogen zugeführt und abgeschmolzen. Mit hohem technischen Aufwand sind auch vollautomatisierte Schweißungen möglich. Das Wolfram-Inertgasschweißen zeichnet sich durch einen geringen Energieeintrag in den Grundwerkstoff aus. Dadurch ergibt sich ein sehr geringer Aufschmelzungsgrad, welcher für das Auftragschweißen von Panzerungen wünschenswert ist. Da die Aufschmelzleistungen gering sind, ist es nicht für großflächige Anwendung geeignet. Anwendung findet dieses Verfahren bei kleinen Bauteilabmessungen und Auftragungen wie z.B. auf Schneidkanten.

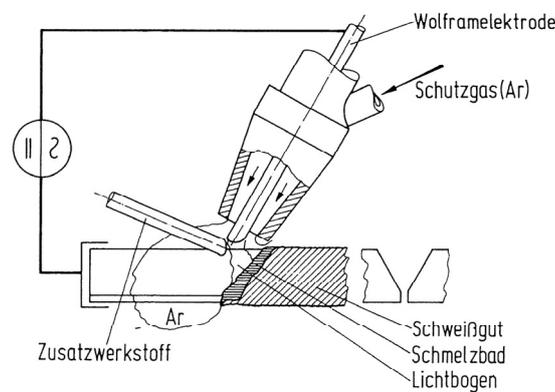


Abb. 4.6: Wolfram-Inertgasschweißen [9]

4.4.7. Plasmaschweißen

Als Wärmequelle dient ein hochoverhitztes thermisches Plasma. Dieses Plasmagas ist in der Regel Argon, welches leicht ionisierbar ist und eine niedrige Spannung benötigt, um die Plasmasäule aufrecht zu erhalten. Infolge seiner geringen Wärmeleitfähigkeit entsteht ein Lichtbogen mit einem schmalen, konzentrierten heißen Kern. Zum Schutz der Schweißstelle vor Oxidation und zur Kühlung wird konzentrisch zum Plasmastrahl ein Schutzgas zugeführt. Die Anlage besteht aus der Schweißstromquelle und einem Brenner. Man unterscheidet zwischen Plasmastrahl- und Plasmalichtbogenschweißung. Beim Plasmalichtbogenverfahren brennt ein Lichtbogen zwischen der Wolframelektrode und dem Werkstück.

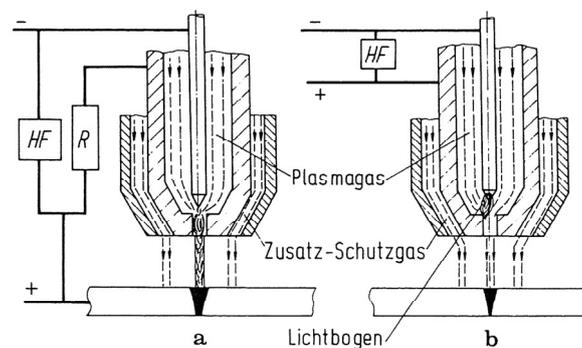


Abb. 4.7: Plasmaschweißen: a Plasmalichtbogenschweißen; b Plasmastrahlschweißen [9]

Beim Plasmastrahlschweißen brennt ein Lichtbogen nur zwischen Wolframelektrode und der Innenwand einer wassergekühlten, eingeschnürten Plasmadüse [9]. Für die Schweißung von gepanzerten Schichten stehen das Plasma Pulver Schweißen, wie auch das Plasma-Draht-Auftragschweißen zu Verfügung. Beim Plasma Pulver Schweißen wird zwischen dem Plasmastrahl und dem Schutzgas ein Metallpulver eingebracht, welches im Plasmastrahl aufschmilzt und sich auf die Oberfläche absetzt (Abb. 4.9, Nr.8). Beim Plasma-Draht-Auftragschweißverfahren wird, ähnlich dem WIG-Verfahren, seitlich der stabförmige Zusatzwerkstoff zugeführt. Das Plasma-Schweißverfahren zeichnet sich durch einen sehr geringen Aufschmelzungsgrad aus und ist dadurch für höchstabrasionsbeständige Panzerungen geeignet.

4.4.8. Laserauftragsschweißen

Ein sehr hochtechnisiertes Auftragschweißverfahren für Verschleißschutzschichten stellt das Laserauftragsschweißen dar. Es zeichnet sich durch einen sehr genau einstellbaren Wärmeeintrag aus und daraus resultierend eine geringe Vermischung von Grund- und Zusatzwerkstoff. Zudem lassen sich mit den hohen erreichbaren Energiedichten hochschmelzende Werkstoffe auftragen. Nachteilig wirken sich die hohen Investitions- und Betriebskosten und die geringe Aufschmelzleistung aus. Eine Verbesserung der Produktivität des Schweißverfahrens zum Auftragschweißen kann durch den Einsatz von nichtpunktförmigen Laserstrahlen erreicht werden. Laserauftragsschweißungen werden bei Großserien von Bauteilen mit geringen Abmessungen und sehr feinen Schichtstärken angewendet.

4.4.9. Thermisches Spritzen

Unter thermischem Spritzen versteht man das Aufbringen von Schichten mit Hilfe von thermischer und kinetischer Energie. Die thermische Energie wird für die Aufschmelzung der Zusatzwerkstoffe benötigt. Beschleunigte, technische Gase dienen als Energieträger für die kinetische Komponente dieser Verfahren. In Abb. 4.8 sind die gängigsten thermischen Spritzverfahren nach DIN EN 657 [12] angeführt. Mit dem Thermischen Spritzen lassen sich eine Vielzahl von metallischen und auch nichtmetallischen Werkstoffkombinationen herstellen. Nachteilig wirkt sich die geringe Kanten-, Punkt- und Schlagbelastbarkeit von thermisch gespritzten Schichten aus [13].

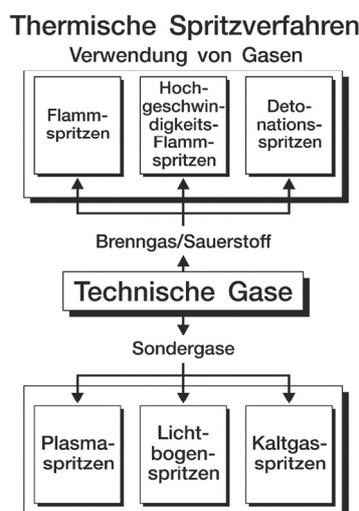


Abb. 4.8: Thermische Spritzverfahren [13]

4.4.10. Metallschutzgasschweißen

Beim Metallschutzgasschweißen (MSG) wird der Lichtbogen und das Schmelzbad von einem Schutzgas umgeben, (Abb. 4.9 Nr. 9 und Abb. 4.10). Die Drahtelektrode ist zugleich abschmelzender Zusatzwerkstoff und Lichtbogenträger. Es gibt mehrere Varianten des MSG-Schweißens. Das Metall-Inertgasschweißen (MIG) verwendet als Schutzgas ein inertes Gas wie z.B. Argon, Helium oder ein Mischgas aus beiden. Sind dem Schutzgas Sauerstoff oder CO₂ beigemischt, spricht man von einem Aktiv-Gas und das Verfahren wird demnach Metall-Aktivgasschweißen (MAG) genannt. Das zu wählende Verfahren bzw. Gas richtet sich nach dem zu verschweißenden Grund- und Zusatzwerkstoff [9].

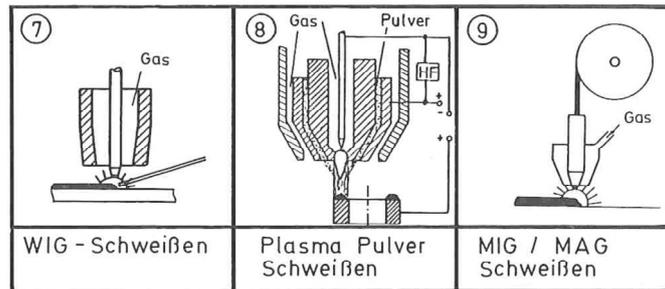


Abb. 4.9: Auftragschweißverfahren mit Schutzgas und elektrischer Energiequelle [4]

Als Drahtelektroden eignen sich sowohl Massivdrähte als auch Fülldrähte von 0,8 mm bis 2,4 mm Durchmesser. Die neuesten Entwicklungen tendieren zu den Fülldrähten mit Inhaltsstoffen zur besseren Verschweißung und mit Legierungselementen zur Einstellung eines speziellen Schweißgefüges. Diese Technik wird vermehrt in der Auftragsschweißung von hochabstrahlbeständigen Panzerungen verwendet [4, 9].

Anwendungen des Metallschutzgasschweißens findet man in nahezu allen Bereichen. Diese Verbreitung verdankt das Verfahren der leichten Handhabung und Automatisierbarkeit. Es können sehr leicht Industrieroboter oder andere automatisierte Manipulatoren mit einem Schweißbrenner bestückt werden. Für das großflächige und zeitlich langandauernde Schweißen sind jedoch Geräte zu verwenden, welche den thermischen Belastungen standhalten. Zudem sind mit elektronisch geregelten Geräten Sonderschweißverfahren möglich, welche sich positiv auf das Schweißergebnis auswirken. Hierbei ist das Impuls-Lichtbogenschweißen als mögliches Schweißverfahren zu nennen.

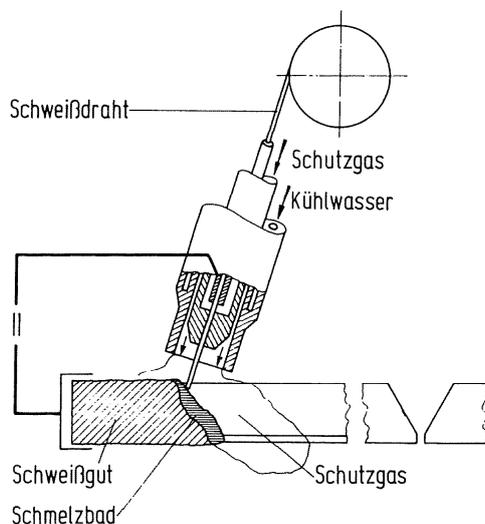


Abb. 4.10: Metallschutzgasschweißen [9]

Neben dem Schweißen mit konstantem Strom und Drahtvorschub, dem sogenannten Standardprogramm, besteht auch die Möglichkeit mit einem sogenannten Pulsprogramm zu arbeiten. Im Rahmen dieses Programmes werden Stromstärke, Impulsform und Impulsfrequenz variiert, siehe Abb. 4.11 [9, 10].

Vorteile sind sowohl die verminderten Schweißspritzerbildung, als auch für die Auftragsschweißung wichtiger geringer Einbrand und daraus resultierender geringer Aufschmelzgrad. Wird zudem noch der Drahtvorschub variiert, spricht man vom Cold-Metal-Transfer-Verfahren (CMT-Verfahren) [14]. Bei diesem Verfahren wird der Grundwerkstoff kaum aufgeschmolzen und es ergibt sich eine Bindungsform deren Eigenschaften denen des thermischen Spritzen von Metallen ähnelt. Die nachfolgenden Versuche werden allesamt mit dem Metallschutzgasschweißen durchgeführt.

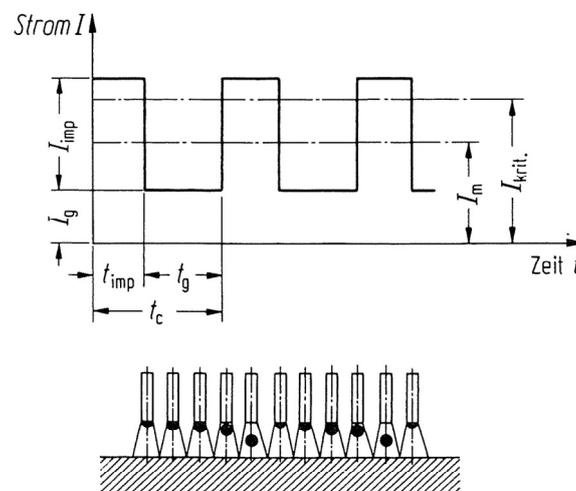


Abb. 4.11: Stromverlauf und Tropfenablösung beim Impulsschweißen [9]

5. Verwendete Materialien und Zusätze

5.1. Grundwerkstoff

Als Werkstoff von Abrasionsverschleiß ausgesetzten aufgeschweißten Bauteilen und Strukturbauteilen kommen alle gängigen schweißgeeigneten Werkstoffe zum Einsatz, welche anschließend oder in vorhergegangenen Arbeitsgängen aufgepanzert werden oder worden sind. Eine Möglichkeit stellt die Verwendung von Baustählen nach DIN EN 10025-2[15] dar. Als Beispiel sind die Stahlsorten *S235* und *S355* zu nennen. Wenn höhere Ansprüche an Festigkeit oder anderen mechanischen oder chemischen Eigenschaften auf den Grundwerkstoff bestehen, ist der Einsatz von höherlegierten Werkstoffen zu empfehlen.

5.1.1. Baustahl S355JR

S355JR (1.0045) ist ein hochfester schweißbarer Baustahl, welcher beruhigt vergossen geliefert wird. Der Kohlenstoffgehalt ist wegen der Aufhärtung bei Schweißungen bewusst niedrig auf 0,2 % (Tab. 5.1) bei Wanddicken unter 30 mm gehalten [16]. Die höhere Festigkeit erhält dieser Werkstoff durch Zulegieren von vorzugsweise 1,2 % Mangan. Da Mangan und Kohlenstoff die Härtungsneigung fördert, kann es bei größeren Wanddicken erforderlich sein, vor dem Schweißen vorzuwärmen [17].

Der Baustahl *S355* gilt als Standardwerkstoff für mittlere und hohe Belastungen im Stahl-, Kran-, und Brückenbau. Die unproblematische Schweißbarkeit in Verbindung mit geringen Werkstoffkosten und umfangreichen Lieferformen machen diesen Stahl vielseitig einsetzbar. Um Strukturbauteile vor Abrasionsverschleiß zu schützen ist es zweckmäßig, gefährdete Stellen aufzupanzern. Zudem sind aufgepanzerte Verschleißbleche mit *S355* als Trägermaterial auf dem Markt erhältlich.

C	Si	Mn	Cu	P	S	N	Fe
<0,2	<0,55	<1,6	<0,55	<0,03	<0,03	<0,012	Rest

Tab. 5.1: Chemische Zusammensetzung *S355JR* in Gew.- % [16]

5.1.2. Vergütungsstahl 27MnCrB5-2

Der Werkstoff *27MnCrB5-2 (1.7182)* ist ein mit geringem Prozentsatz Bor legierter Vergütungsstahl. Dieser Stahl ist problemlos härtbar bzw. vergütbar. Das Einsatzgebiet reicht von Stanzwerkzeugen, Messer, Sägeblätter über Verschleißteile wie Baggerzähnen bis zu Pflugscharen in der Landwirtschaft. Es sind Härten bis 53 HRC an der Oberfläche möglich [18, 19].

C	Si	Mn	Cr	P	S	B	Fe
0,24-0,3	<0,4	1,1-1,4	0,3-0,6	<0,035	<0,04	0,0008-0,005	Rest

Tab. 5.2: Chemische Zusammensetzung *27MnCrB5-2* in Gew.- % [19]

Dieser Werkstoff ist bedingt schweißgeeignet und kann aber im Fall von dicken Bauteilen mit Hilfe einer Vorwärmung mit den meisten Schweißverfahren verarbeitet werden. Bei Wandstärken unter 20 mm Dicke, ist ein Schweißen ohne Vorwärmung möglich [18]

5.2. Schweißzusatz

Die Wahl des Zusatzwerkstoffes zum Auftragen von höchstabrasionsbeständigen Verschleißschutzschichten richtet sich nach folgenden Gesichtspunkten:

- zu erzielende mechanische Eigenschaften der Panzerung
- Verschleißart und zu erzielender Verschleißbeständigkeit
- Schichtdicke
- Schweißverfahren
- Grundwerkstoff
- Wirtschaftlichkeit

Unter Einbeziehung der oben genannten Punkte sind nachfolgende Schweißzusatzwerkstoffe ausgewählt und bereitgestellt worden. Diese Zusatzwerkstoffe werden sowohl als Hartauftrag als auch für Anwendungen als Matrixwerkstoff für zusätzlich eingebrachte Karbide verwendet.

5.2.1. UTP A DUR 650

Dieser verkupferte Massivdraht zum MAG-Schweißen für hochverschleißfeste Auftragungen steht mit dem Durchmesser von $1,2\text{ mm}$ den Schweißversuchen zur Verfügung. Er zeichnet sich durch gute Schweißigenschaften, gleichmäßige Raupenbildung und sehr leichte Schlackenentfernbarkeit aus. Der UTP A DUR 650 wird für das MAG Auftragschweißen an Bauteilen mit einer hohen Schlag- und Abrasionsbeständigkeit vom Hersteller empfohlen. Weiters ist eine Bearbeitung durch Schleifen möglich. Es ist eine Härte von $55 - 60\text{ HRC}$ des reinen Schweißgutes erzielbar. Die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes ist in Tab. 5.3 ersichtlich [20].

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Fe
0,36	1,1	0,4	5,2	1,4	0,3	1,3	Rest

Tab. 5.3: UTP A DUR 650 Schweißgutrichtanalyse in Gew.- % [20]

5.2.2. DURMAT FD 601

Der als Alternative zum UTP A DUR 650 eingesetzte Schweißzusatzwerkstoff ist ein mit C, Cr, Mn, Mo, W, V legierter Fülldraht für abrasionsbeständige und zähnharte Panzerungen. Die Zusammensetzung ist der Schweißgutrichtanalyse aus Tab. 5.4 zu entnehmen. Die Anwendung umfasst das Auftragschweißen von Baggerzähnen, Brecherbacken, Prallplatten und alle Bau- und Maschinenteile, welche neben Reibverschleiß auch Schlagbeanspruchungen unterliegen. Die Warmfestigkeit ist bis zu einer Temperatur von 500°C gegeben. Eine zusätzliche Härtesteigerung kann durch ein Anlassen erzielt werden. Es lässt sich eine Härte von $56 - 60\text{ HRC}$ erreichen. Dieser Zusatzwerkstoff steht mit Durchmesser $1,6\text{ mm}$ zu Verfügung [21].

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Fe
0,5	1	3	6	1,6	1,5	1	Rest

Tab. 5.4: DURMAT FD 601 Schweißgutrichtanalyse in Gew.- % [21]

5.2.3. DURMAT OA

Diese Fülldrahtelektrode auf Eisenbasis ist mit Wolframschmelzkarbid gefüllt. Anwendungsbereiche dieses Schweißzusatzwerkstoffes sind Bauteile, welche extremen abrasiven Verschleiß ausgesetzt sind und mit teil- oder vollautomatisierten Anlagen aufgeschweißt werden. Die Schweißnaht erzielt eine Härte von bis zu 66 HRC . Die Wolframschmelzkarbide weisen eine Härte von ca. $2360\text{ HV}_{0,1}$ auf. Der Hersteller empfiehlt ein Schweißen mit Kurzlichtbogen, um ein Aufschmelzen der Karbide, welche sich im Kern des Fülldrahtes befinden, zu vermeiden [21]. In der REM-BSD-Aufnahme, BSD-Aufnahmen werden auch als Massenkонтрастbilder bezeichnet, sind die Wolframschmelzkarbide in einem Kornbereich von $0,01$ bis $0,2\text{ mm}$ zu sehen, siehe Abb. 5.1.

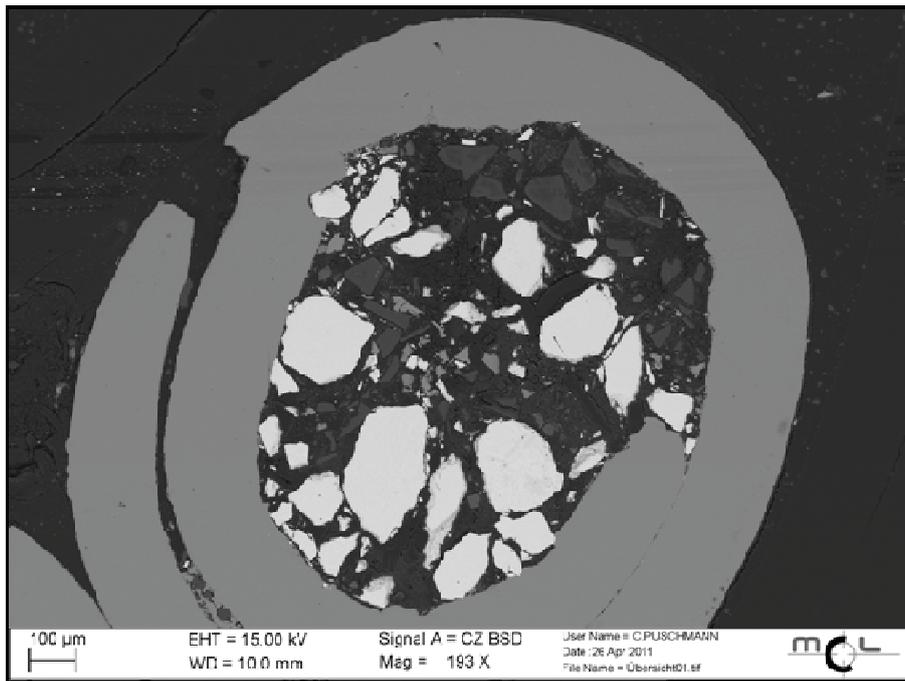


Abb. 5.1: REM-BSD-Aufnahme Querschnitt Schweißzusatzwerkstoff DURMAT FD OA

Zusätzlich zu den Wolframschmelzkarbiden sind in der Füllung die Legierungselemente Chrom und Mangan enthalten. Zur Verbesserung der Schweißigenschaften und zur Schlackebildung sind Silizium und Kalzium im Schweißpulver enthalten.

5.3. Hartstoffe

Durch das Einbringen von Hartstoffen bzw. Hartphasen in die Schweißnaht können die Eigenschaften der Panzerung gezielt verändert werden. Die wichtigsten Auswahlkriterien für Hartphasen sind:

- Härte
- Bruchzähigkeit
- Korngröße

Zudem ist darauf zu achten, dass die extern zugeführten Hartstoffe sich gut mit der Matrix binden und kein zu starkes Aufschmelzen der Hartphasen vorliegt. Dies kann wiederum zu einem ungewollten Auflegieren der Matrix führen. Gegen den furchenden Verschleiß spielen die Härte der Hartphasen und die Bruchzähigkeit eine entscheidende Rolle. Weiters ist auch auf die Korngröße und die Verteilung der Hartstoffe Rücksicht zu nehmen. In Abb. 5.2 (a) ist die Spannbildung durch ein Abrasivmedium am Bauteil mit einer zu feinen Hartphasenkörnung ersichtlich. Durch Steigerung des Hartphasenkorngehalts kann auch bei sehr kleinen Korngrößen des Hartstoffes eine Erhöhung des Furchwiderstandes erfolgen. Durch eine ungünstige Verteilung der Hartstoffe kann es lokal zu Auswaschungen des Matrixwerkstoffs kommen, siehe Abb. 5.2 (c).

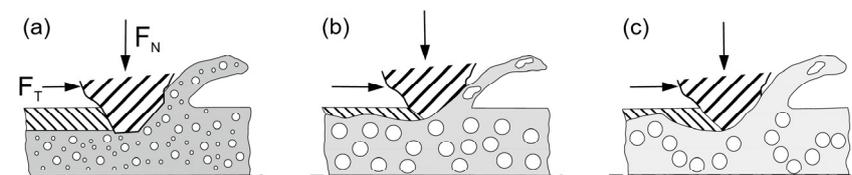


Abb. 5.2: Bauteilverschleiß beim Furchen mit Abrasivkorn; (a) zu kleines Korn, (b) optimale Korngröße, (c) schlechte Korngrößenverteilung, F_N = Normalkraft, F_T = Tangentialkraft [6, 22]

Durch einen zu hohen Anteil an Hartstoffen kann es gegebenenfalls zu Ausbrechungen dieser kommen. Die Bruchfestigkeit sinkt tendenziell mit steigendem mittlerem Hartstoffdurchmesser bei gleichem Hartstoffgehalt, siehe Abb. 5.3. Durch größeren mittleren Hartphasengehalt steigt die Bruchzähigkeit der Verschleißschichten, da im Normalfall die Matrix weicher und zäher als die Hartphasen ist [22].

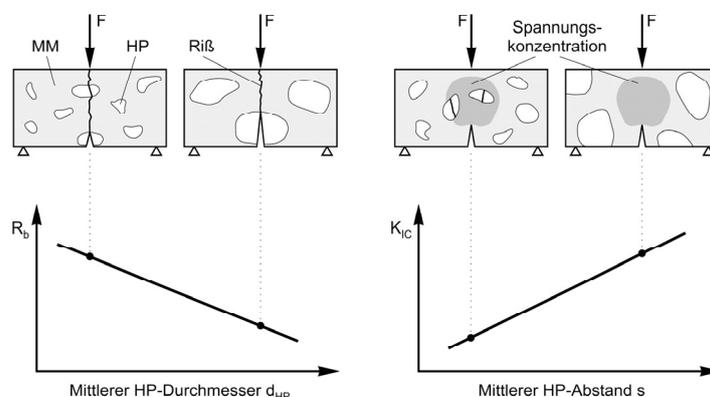


Abb. 5.3: Darstellung der Biegebruchfestigkeit R_b und Bruchzähigkeit K_{IC} in Abhängigkeit von Hartphasengröße und Abstand bei konstantem Gehalt [6, 22]

5.3.1. Metallischer Hartstoff – DURMAT WC-IV

Wolframkarbid (WC) ist einer der wichtigsten Vertreter der metallischen Hartstoffe. Da WC in reiner Form spröde ist, wird es hauptsächlich in gebundener Form in einer Kobalt-Matrix eingesetzt. Diese gebundene Form des Wolframkarbids ist unter dem gebräuchlichen Namen Hartmetall bekannt. Das verwendete Wolfram-Sinterkarbid besitzt einen optimalen Gehalt von Kobalt-Bindemittel (Tab. 5.5). Dadurch kann eine genau definierte Abstimmung von Härte, Form und Zähigkeit erfolgen, die einen hohen Verschleißwiderstand garantiert.

C	Co	Ta	Ti	W
5,3-5,8	6,0-10,0	<0,5	<0,5	Rest

Tab. 5.5: DURMAT WC-IV chemische Zusammensetzung in Gew.- % [21]

Die Dichte des eingesetzten Wolfram-Sinterkarbids liegt bei $14,2 - 14,8 \text{ g/cm}^3$, bei einem Schmelzpunkt von ca. 2800°C . Die Karbidgröße liegt zwischen $0,7$ und $1,7 \text{ mm}$ [21].

Zudem ist der Einsatz von bereits verschlissenen oder gebrochenen Hartmetallwerkzeugen möglich. Diese müssen im Vorfeld sortiert, gebrochen und gesiebt werden. Die im Anschluss durchgeführte Analyse zeigt keine gravierenden Unterschiede zwischen dem DURMAT WC-IV Wolfram-Sinterkarbid und dem recycelten Hartmetall. Geringe Unterschiede sind in der Mikrostruktur des Hartmetalles (Abb. 5.4 und Abb. 5.5) ersichtlich. Die chemische Zusammensetzung ist in Tab. 5.6 ersichtlich und zeigt qualitativ die Unterschiede der einzelnen Inhaltsstoffe. Die in der REM-EDX-Auswertung erlangten Kohlenstoffgehalte sind nur qualitativ verwertbar.

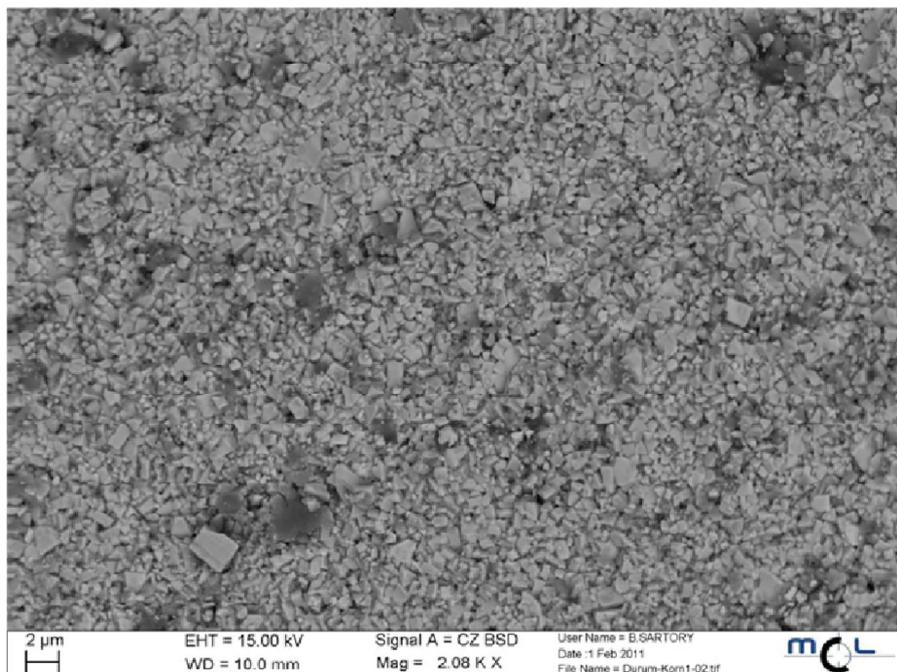


Abb. 5.4: DURMAT WC-IV REM-Aufnahme der Makrostruktur

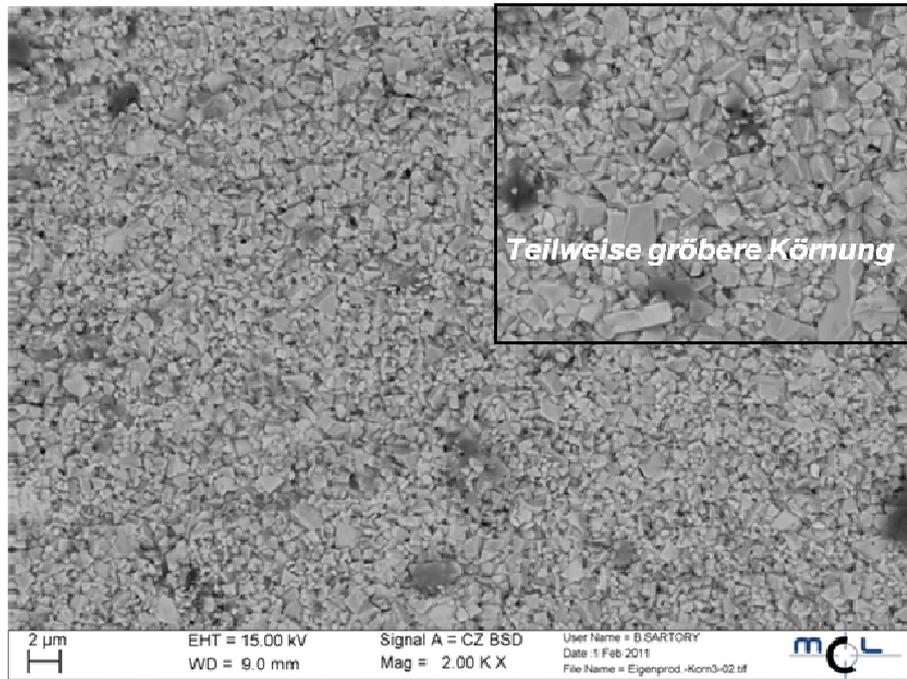


Abb. 5.5: WC aus recycelten Hartmetall-Wendepfatten REM-Aufnahme der Makrostruktur

Element	Wt %	At %
CK	4,11	35,96
	6,79	51,71
	5,31	42,15

Mittelwert **5,40**
STABW **1,34**

Element	Wt %	At %
CK	4,29	35,79
	10,64	60,08
	8,02	52,90

Mittelwert **7,65**
STABW **3,19**

WM	88,33	50,53
	91,38	45,45
	86,68	44,91

Mittelwert **88,80**
STABW **2,38**

WM	85,34	46,55
	80,44	29,66
	83,80	36,10

Mittelwert **83,19**
STABW **2,51**

CoK	7,57	13,51
	1,83	2,84
	8,00	12,94

Mittelwert **5,80**
STABW **3,44**

CoK	10,38	17,66
	8,92	10,26
	8,18	11,00

Mittelwert **9,16**
STABW **1,12**

Tab. 5.6: REM-EDX-Auswertung der Hartmetallproben, rechts DURMAT WC-IV, links aufbereitete Hartmetall-Wendepfatten

5.3.2. Nichtmetallischer Hartstoff – Siliziumkarbid SiC

Als zweiter Hartstoff dient Siliziumkarbid, ein Vertreter der nichtmetallischen Hartstoffe. Siliziumkarbid besitzt eine Zersetzungstemperatur von 2760°C [7]. Aufgrund seiner hohen Härte wird SiC hauptsächlich in der Schleifmitteltechnik eingesetzt. Zudem gibt es Sonderanwendungen von SiC wie z.B. als Gleitringe für Gleitringdichtungen. Das im Zuge dieser Versuchsreihe verwendete Siliziumkarbid besitzt eine Körnung von $1,05 - 1,6 \text{ mm}$. Bei genauerer Betrachtung der Hartstoffe sind Porositäten im Korn erkennbar, siehe Abb. 5.6, welche sich negativ auf das Schweißergebnis auswirken können.

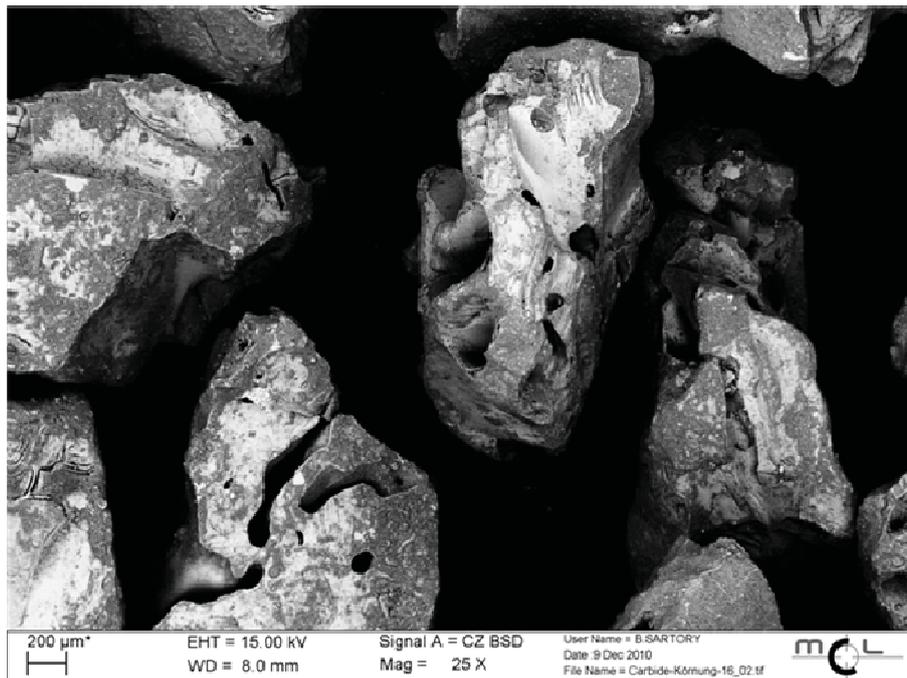


Abb. 5.6: SiC-Korn in der REM-Aufnahme

6. Schweißversuchsaufbau

6.1. Schweißapparat

Für die Versuchsschweißungen wurde eine digitale MIG/MAG Stromquelle der Firma Fronius mit der Bezeichnung „TransPuls Synergic 4000“ verwendet. Mit dieser Anlage können verschiedene Schweißverfahren wie das MIG/MAG-Schweißen, das MIG/MAG-Impulslichtbogenschweißen, als auch Sonderanwendungen wie z.B. das MIG-Löten durchgeführt werden. Zusätzlich ist ein Bedienpanel „RCU 5000i“ im Einsatz. Es steht jeweils ein Schlauchpaket für das Handschweißen und für das automatisierte Schweißen zu Verfügung. Mit der digitalen Stromquelle ist es möglich, auf den Anwendungsfall optimierte Schweißprogramme für verschiedene Schweißzusatzwerkstoffe und Schweißprozesse einzusetzen.

6.2. Schweißtisch

Um ein reproduzierbares Schweißergebnis zu erhalten, ist die Verwendung eines teilautomatisierten Schweißtisches unumgänglich, daher sind die Schweißversuche ausschließlich am Schweißtisch durchgeführt worden. Der Schweißtisch verfügt über eine linear verfahrbare Aufspannfläche, welche stufenlos über einen Drehstrommotor angetrieben ist. Zusätzlich ist auf der Tischplatte eine, von Hand verstellbare, Halterung für den Maschinenschweißbrenner installiert, siehe Abb. 6.1.

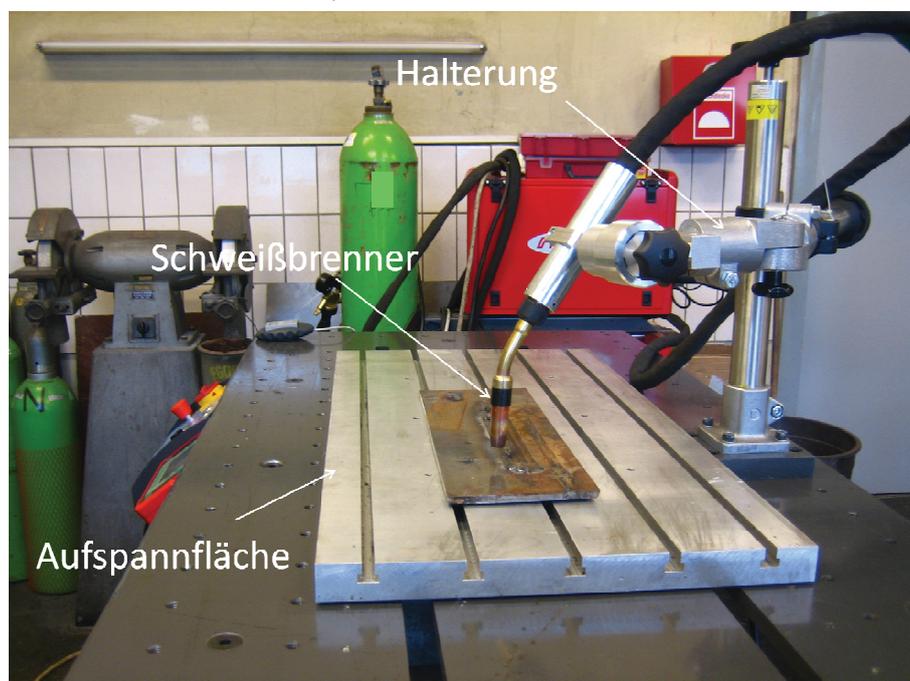


Abb. 6.1: Schweißtisch mit Aufspannfläche, Maschinenschweißbrenner und Schweißbrennerhalterung

Der Schweißtisch besitzt zusätzlich Gewindebohrungen am Grundrahmen, um Versuchsaufbauten und Vorrichtungen befestigen zu können. In die Aufspannfläche sind T-Nuten eingearbeitet, um die Proben bzw. die Probenhalterungen zu fixieren. Am Bedienpult des Schweißtisches besteht neben der Tischsteuerung die Möglichkeit, den Schweißapparat über eine Schnittstelle fernzusteuern.

6.3. Karbidzuführung und Dosierung

Bei dem sogenannten „Einstreuselverfahren“ werden zusätzlich Hartstoffe dem Schweißprozess zugeführt. Bei diesem Verfahren ist es notwendig diese Hartstoffe zielgenau in das flüssige Metall einzubringen.

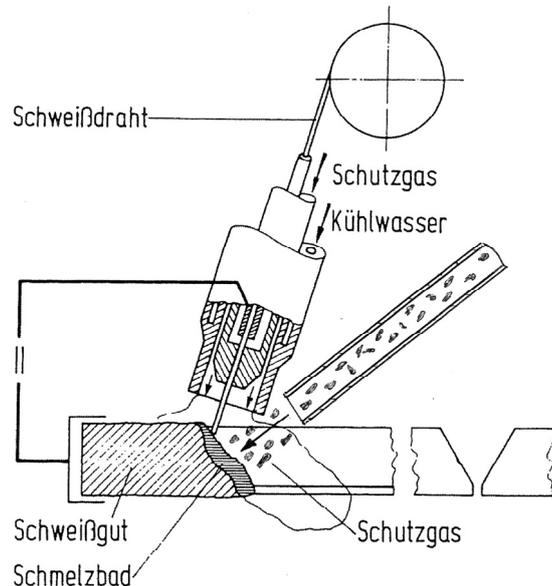


Abb. 6.2: Schematische Darstellung des „Einstreuselverfahrens“ beim MSG-Schweißen [9]

Um dieses Verfahren prozesssicher anwenden zu können, wird sowohl eine sichere Zuführung der Karbide in das Schmelzbad, als auch eine genaue Dosierung der Hartstoffkörner benötigt. Der Transport von der Dosiereinheit zur Karbidzuführung kann sowohl mittels Schwerkraftförderung (durch Einrieseln), als auch mittels einer pneumatischen Förderung erfolgen.

6.3.1. Karbidzuführung

Es sind zwei Varianten der Karbidzuführung im Einsatz. Die erste Variante wird als „Karbiddüse“ bezeichnet (Abb. 6.2) und ist als zusätzliche Düse um die Schutzgasdüse ausgeführt. Die Zuführung erfolgt vor dem Schmelzbad entgegen der Schweißrichtung. Der gesamte Austrittsquerschnitt der Düse entspricht einem Kreisring, der sich dabei einstellende Querschnitt des Karbidstroms nimmt nur ein Kreisringsegment in Anspruch. Die „Karbiddüse“ selber wird über eine Klemmschraube am Schweißbrenner befestigt. Das Anschlussstück an die Karbiddüse ist als Präzisionshydraulikrohr mit Aussendurchmesser *15 mm* ausgeführt, welches wiederum am anderen Ende mit einem Hydraulikschlauch verbunden ist. Durch die Klemmverbindung von Zuführdüse und Schweißbrenner kann eine optimale Position der Karbidzuführung eingestellt werden. Die Positionierung erfolgt durch eine axiale Verschiebung der Schweißdüse am Brenner. Bei dieser Variante besteht noch Optimierungspotential durch Geometrieänderungen des Austrittsquerschnittes. Dies wiederum kann z.B. durch das Anbringen von Leitblechen erfolgen. Es wurde vorwiegend mit der Schwerkraftförderung in den Versuchen operiert.

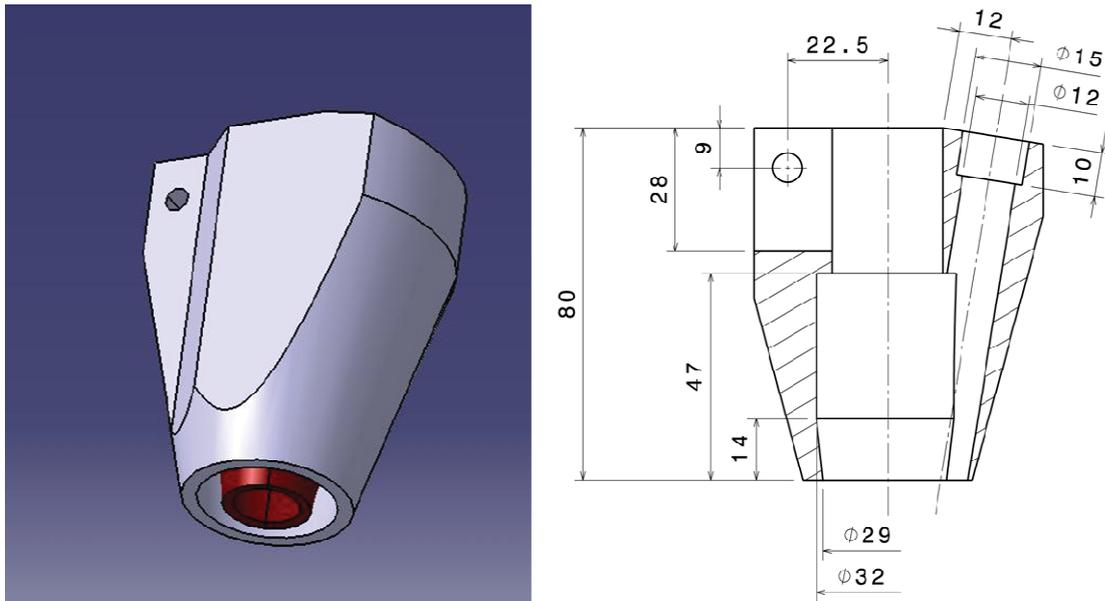


Abb. 6.3: Ausführung der Karbidzuführung als "Karbiddüse"

Die zweite Variante, siehe Abb. 6.4, der Karbidzuführung ist als sogenanntes „Einblasrohr“ ausgeführt. Diese Konstruktion zeichnet sich sowohl durch einen einfachen Aufbau, als auch durch eine schmalere Bauweise aus. Die schmalere Bauweise ist beim Auftragschweißen auf die Sichelzähne in der Schweißvorrichtung vorteilhaft, wobei die Einstellung durch das axiale Verschieben des Klemmhalters am Schweißbrenner erfolgt. Zusätzlich kann durch Verschiebung des Blasrohrs der Auftreffpunkt der Karbide einfach eingestellt werden.

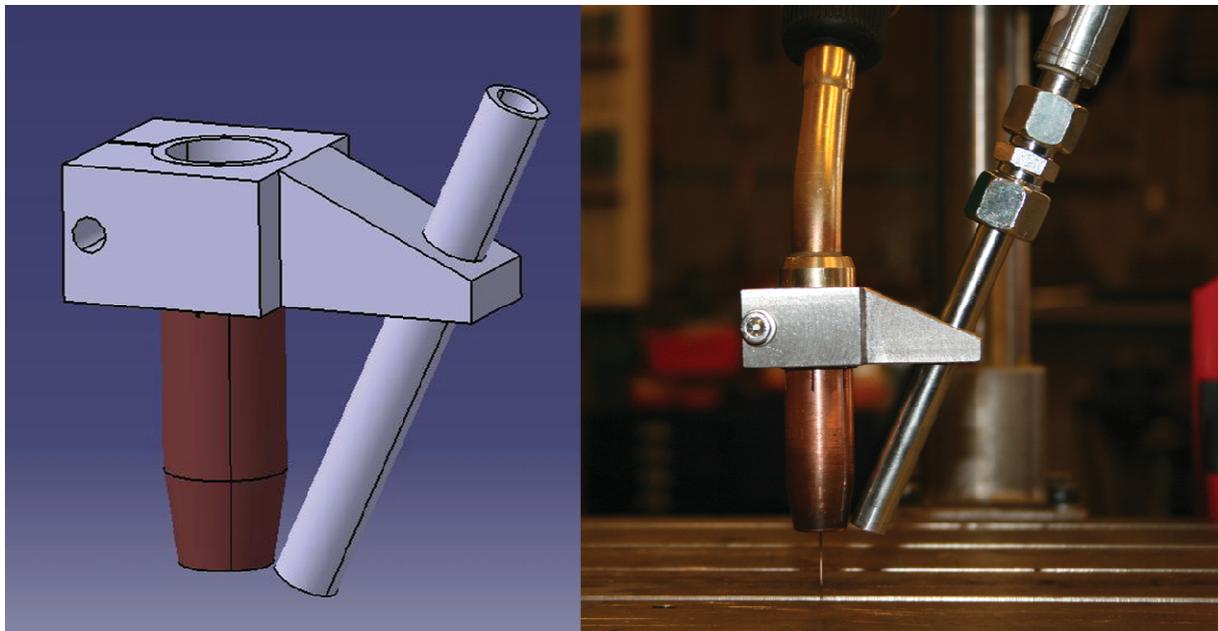


Abb. 6.4: Ausführung der Karbidzuführung als "Einblasrohr"

Das Blasrohr selbst ist aus einem handelsüblichen Präzisionshydraulikrohr gefertigt. Der Transportschlauch und die Anschlussverschraubungen sind aus handelsüblichen Hydraulikkomponenten zusammengestellt. Es ist ratsam alle metallischen Oberflächen, welche sich unmittelbar im Prozessumfeld befinden, mit keramischen Oberflächenschichten zu versehen, um Anhaftungen von Schweißspritzern zu vermeiden.

Da die Option einer pneumatischen Förderung bzw. eine pneumatische Unterstützung der Schwerkraftförderung beibehalten werden soll, ist ein Zwischenschalten einer Übergabedüse erforderlich, siehe Abb. 6.5. Diese Übergabedüse hat die Aufgabe, die vom Dosierer kommenden Hartstoffe ohne Widerstand in den Schlauch überzuführen, und wenn benötigt, die Hartstoffpartikel an das gasförmige Transportmedium zu übergeben. Als gasförmiges Transportmedium wird Schutzgas verwendet, welches bei Bedarf zugeschaltet werden kann.



Abb. 6.5: Übergabedüse mit Förderschlauch, Übergabetrichter und Gasschlauch

6.3.2. Dosierung

Um eine gleichbleibende Qualität der Auftragschweißung zu gewährleisten ist ein konstanter und in der Menge regulierbarer Förderstrom nötig. Die Dosierung kann durch folgende Prinzipien durchgeführt werden:

- Förderband
- Schneckenförderer
- Vibrorinne

Aus Kostengründen und der relativen einfachen Fertigung ist die Dosierung in Form einer Schneckenförderung ausgeführt. Die genauen technischen Details sind den im Anhang befindlichen Zeichnungen zu entnehmen. Da zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung die Förderschnecke laut Zeichnung nicht vorhanden war, erfolgt die Versuchsdurchführung mittels einer Vorserienschnecke, siehe Abb. 6.6, links. Die Fertigung der Vorserienschnecke erfolgt aus einem Betonbohrer im Durchmesser 32 mm , welcher zweigängig, spiralförmig genutet ist. Für die Herstellung wurde die Wendel des Bohrers herausgeschnitten und anschließend der Lagersitz spanend gefertigt. Die Förderschnecke ist mit Wälzlagern gelagert. Durch die Förderung einer bestimmten Körnung von $0,7$ bis $1,2\text{ mm}$ ist mit wenig Fein- und Feinstmaterial zu rechnen. Die Abdichtung zwischen Lagerung und Förderraum ist mittels eines Wellendichtrings ausgeführt. Die Förderschnecke, siehe Abb. 6.6 rechts, besitzt eine eingängige Wendel. Am hinteren Ende Richtung Schneckenlagerung, ist die Schnecke nach einem förderfreien Bereich mit einer gegenläufigen Wendel ausgeführt, um ein Anstauen von Fördergut an das Gehäuse zu verhindern.

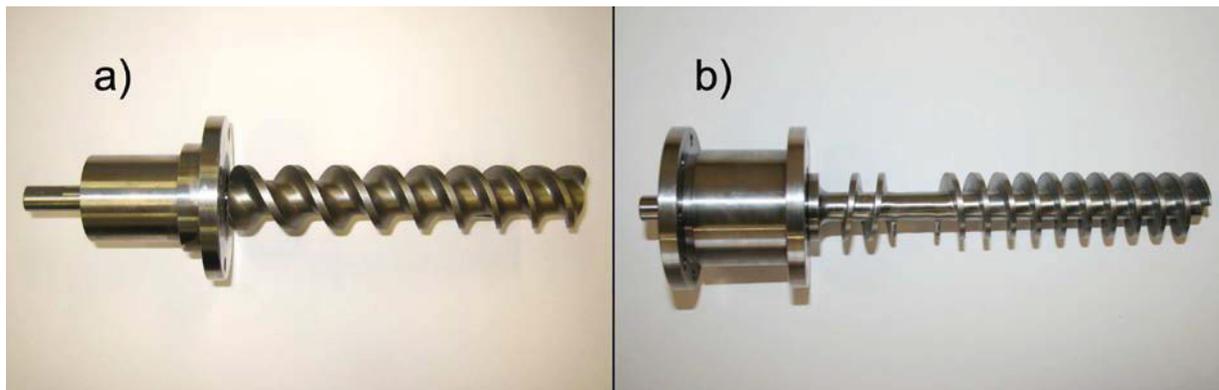


Abb. 6.6: a) Vorserienschnecke, b) Förderschnecke

Der Antrieb der Fördereinheit erfolgt über einen Gleichstrom-Getriebemotor mit einer Leistung von $21,2\text{ W}$. Als Motor wurden zwei unterschiedliche Modelle verwendet um ein breites Förderspektrum abdecken zu können:

- Motor 1 Abtriebsdrehzahl von 8 bis 28 U/min
- Motor 2 Abtriebsdrehzahl von $1,5$ bis 6 U/min

Die Steuerung der Drehzahl erfolgt durch Variation der Motorspannung. Die jeweils erforderliche Motorspannung wird mit Hilfe einer stufenlos regelbaren Spannungsquelle bereitgestellt. Der operative Einstellbereich der Motorspannung liegt zwischen $4,5$ und 15 V , welche aber im Einsatz geringfügig unterschritten werden muss.

Förderstrom Schneckenförderer

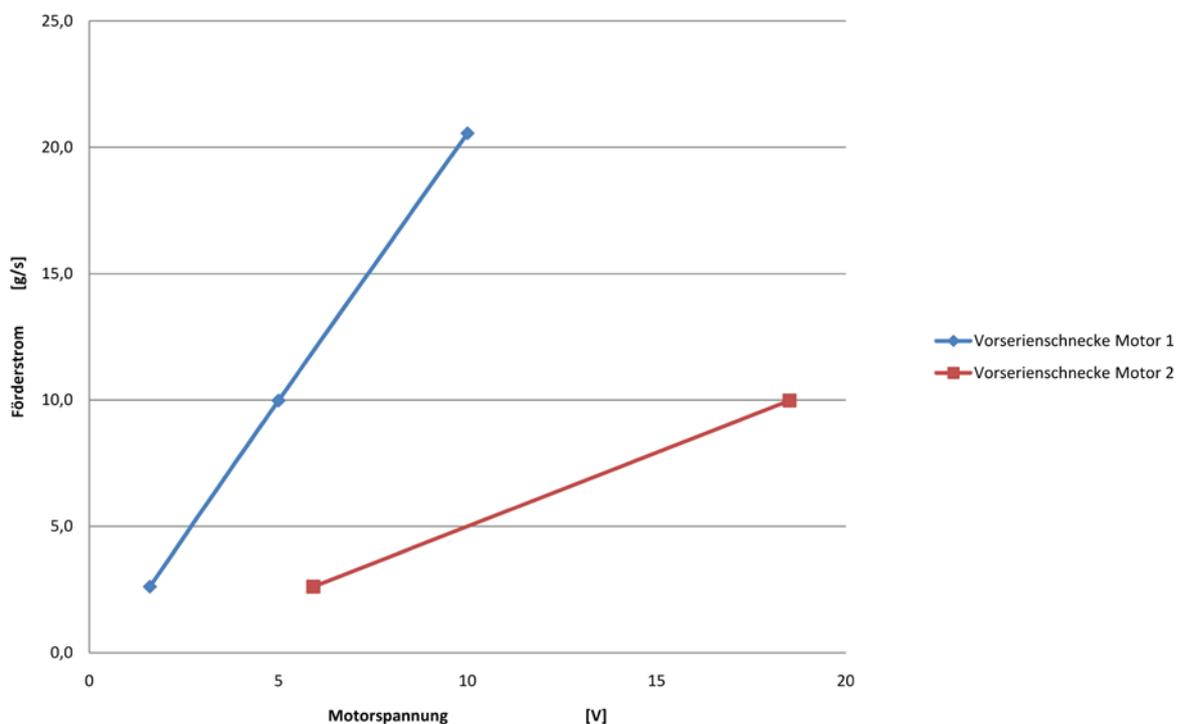


Abb. 6.7: Förderstrom in Abhängigkeit zur eingestellten Motorspannung

Der in Abb. 6.7 dargestellte Förderstrom wurde anhand von Messungen ermittelt. Die Übertragung des Motormoments auf die Förderschnecke erfolgt über eine Klauenkupplung. Die komplette Fördereinheit ist zentral mit Hilfe einer Konsole über der Rennereinheit

angeordnet. Um Blockaden der Hartstoffe zu verhindern, muss die Anordnung so erfolgen, dass das Fördergut ohne Umlenkungen im Schlauch von der Dosiereinheit zur Karbidzuführung gelangt. Es muss jedoch noch eine seitliche Positionierung des Schweißbrenners inklusive Karbidzuführung, relativ zur Schweißrichtung, möglich sein. In Abb. 6.8 ist die Montage der Dosiereinheit und die Konsole ersichtlich.



Abb. 6.8: Fördereinheit mit Antriebsmotor auf Konsole montiert

6.4. Schweißvorrichtung für Sichelzähne

Für die automatisierte Auftragschweißung der Sichelzähne ist eine wiederholgenaue Positionierung jedes einzelnen Zahns notwendig. Es gibt zwei verschiedene Ansätze um dies zu bewerkstelligen. Bei der ersten Methode wird jeder Zahn einzeln aufgeschweißt. Die zweite Methode umfasst eine definierte Aneinanderreihung der Zähne um in einem Arbeitszug mehrere Sichelzähne zu panzern. Anschließend werden die Zähne wieder getrennt. Um den Arbeitsschritt „Trennen“ ökonomisch auszuführen, ist es möglich die Zähne auseinander zu brechen. Für die Versuchsdurchführung ist eine Schweißvorrichtung in Verwendung, welche die Sichelzähne paarweise anordnet. Ein Paar besteht aus einem linken und einem rechten Zahn.

Die Schweißvorrichtung kann insgesamt sechs Sichelzähne aufnehmen, je drei linke und drei rechte Zähne, siehe Abb. 6.9. Die Sichelzähne werden so angeordnet, dass die zu schweißenden Flächen in einer Ebene liegen. Um dies zu erreichen, müssen die einzelnen Zähne einen Neigungswinkel von 12° aufweisen.

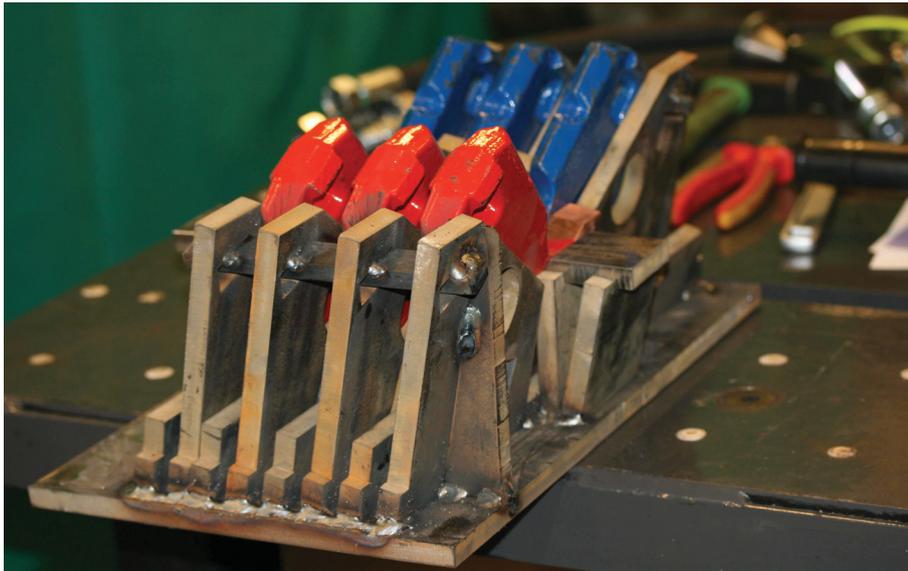


Abb. 6.9: Schweißvorrichtung für 6 Sichelzähne

Um die thermische Belastung an den Zahnspitzen möglichst gering zu halten, sind Kühlplatten im mittleren Bereich der Vorrichtung angebracht. Die Kühlplatten aus Kupfer, sind so in die Schweißvorrichtung integriert, dass sie zudem als Anschlag für die Positionierung der Sichelzähne wirken (Abb. 6.10).

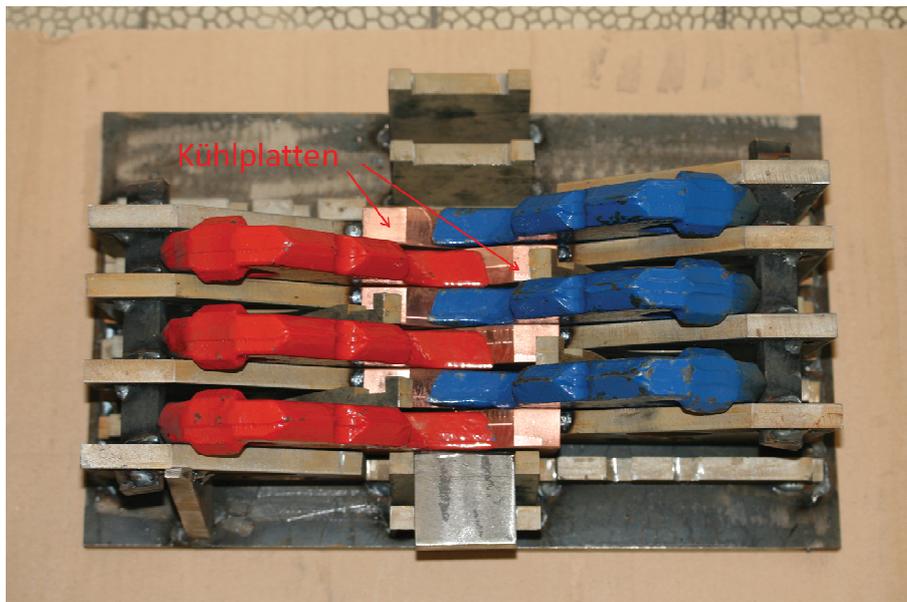


Abb. 6.10: Sichelzahnordnung in der Schweißvorrichtung mit Kühlplatten

Da der Schweißprozess ca. 3 cm Vorlaufweg benötigt und auf den Sichelzähnen ein Schweißende unerwünscht ist, sind für die Auftragschweißungen Start- und Auslaufbleche vorgesehen. Die Sichelzähne werden in der Schweißvorrichtung mit Keilen fixiert. Durch das Beilegen von Kupferblechen (Abb. 6.11) zwischen den Zähnen lässt sich eine Sollbruchfläche erzeugen, wodurch eine glatte und geometrisch exakte Bruchfläche entsteht. Für die Serienfertigung mit hohen Stückzahlen ist jedoch das händische Einrichten und Beilegen der Kupferbleche zwischen den Zähnen unerwünscht. Für die Serienfertigung sind permanente Trennstege vorteilhaft, welche aus Kupfer, Keramik bzw. aus einem mit Keramik beschichteten Werkstoff bestehen können. Diese Trennstege können in den Kühlkörper eingearbeitet werden bzw. an der Schweißvorrichtung befestigt werden.

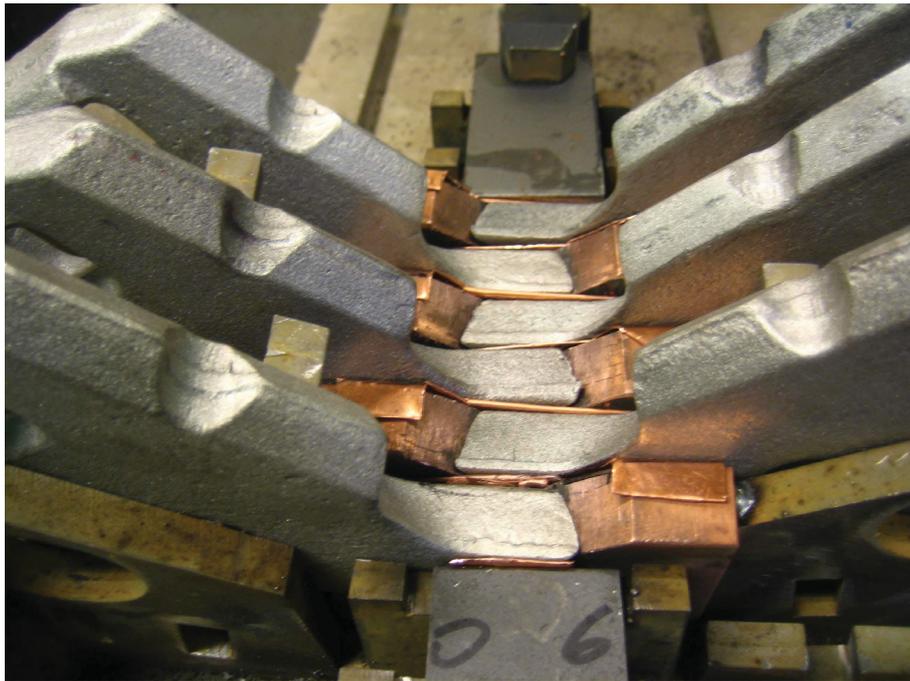


Abb. 6.11: Sichelzahnordnung mit beigelegten Trennblechen aus Kupfer

Eine Erweiterung der Schweißvorrichtung zur Kapazitätserhöhung der Sichelzähne ist aus wirtschaftlicher Sicht für die Auslastung eines Schweißroboters empfehlenswert. Dazu kann sowohl die Anzahl der Zähne in einer Schweißvorrichtung, als auch die Anzahl von Schweißvorrichtungen erhöht werden. Da das Rüsten der Vorrichtung einige Zeit in Anspruch nimmt, ist die Verwendung eines Paletten-Wechselsystems anzudenken.

7. Schweißversuchsdurchführung

7.1. Schweißversuchsdurchführung an Probeplatten

Um die Prozessparameter für die Schweißung der Sichelzähne zu erlangen, sind vorweg Schweißuntersuchungen auf Probeplatten durchgeführt worden. Die Probeplatten haben eine Abmessung von $800 \times 500 \times 8 \text{ mm}$ und sind aus dem Werkstoff 27MnCrB5-2 im vergüteten Zustand in Verwendung. Zudem stehen Bleche aus $S355\text{JR}$ in der Dimension $600 \times 400 \times 12 \text{ mm}$ zur Verfügung. Die Bleche werden auf der Aufspannfläche so fixiert, dass sich kein Verzug durch die entstehenden Schweißspannungen ergibt. Dies ist notwendig, um einen konstanten Abstand der Schweißdüse und Kontaktrohr von 20 mm zur Werkstückoberfläche einzuhalten. Die einzelnen Probeschweißungen werden über die Länge der Probeplatte ausgeführt. Zwischen den einzelnen Schweißungen ist ein Abstand von rund 20 mm einzuhalten, siehe Abb. 7.1.

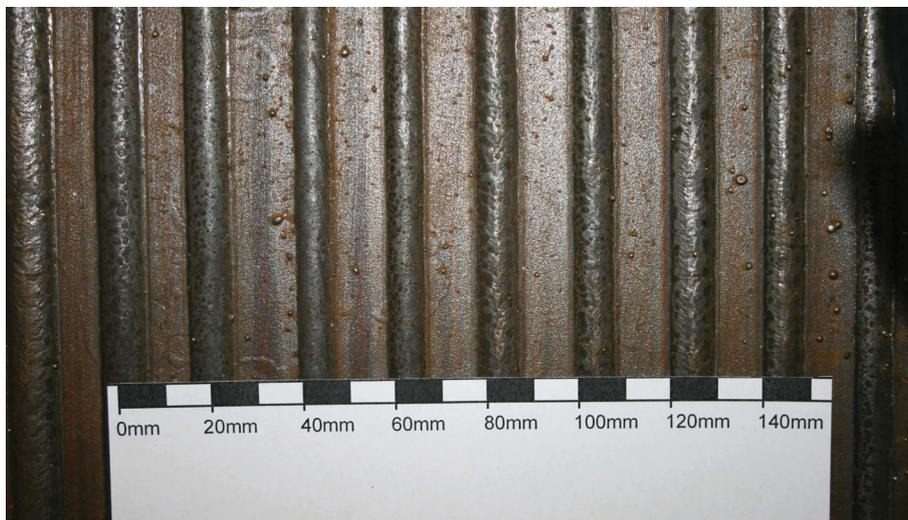


Abb. 7.1: Probeplatte mit Versuchsschweißungen

Die Schweißparameter werden für jede einzelne Schweißnaht konstant gehalten. Die veränderlichen Parameter für den Schweißprozess sind folgende:

- Schweißgeschwindigkeit v $[\text{m}/\text{min}]$
- Schweißstrom I $[\text{A}]$
- Schweißspannung U $[\text{V}]$
- Drahtvorschub v_d $[\text{m}/\text{min}]$
- Pulskorrektur $[-]$
- Lichtbogenkorrektur $[\%]$
- Schweißprogramm $[-]$
- Pulsprogramm $[-]$
- Karbid-Einstreuung $[\text{g}/\text{s}]$

Eine genaue Auflistung der Schweißparameter und deren genauen Werte sind der Probenliste, im Anhang Tab. 12.6 - Tab. 12.10, zu entnehmen. Anschließend an die Schweißung werden die Probeplatten zerschnitten, um weitere metallographische und mechanische Untersuchungen durchzuführen. Um das Gefüge bei der Aufbereitung nicht zu verfälschen, wurde bei der Probenentnahme eine Methode angewendet, welche keinen thermischen und mechanischen

Einfluss ausübt. Ein Sägen mit handelsüblichen Bimetallsägebändern auf einer Bandsäge kann durch die hohe Härte der Schweißraupe, wie auch durch die zusätzlich eingebrachten Karbide nicht erfolgen. Da die Plattenabmessungen für viele Nasstrennmaschinen zu groß sind, bietet sich das Wasserstrahltrennverfahren an. Eine Verwendung von Blechstreifen mit 30 mm Breite erleichtert die Handhabung. In Abb. 7.2 ist ein Auszug der Versuchsschweißungen an den Blechstreifen exemplarisch dargestellt. Zudem wird der Wärmeeintrag in einem solchen Blechstreifen nicht durch vorhergegangene Schweißungen beeinflusst. Bevor eine Schweißung auf die definierte Werkstückgeometrie (Sichelzahn) erfolgt, werden die geeigneten Parameter auf den Probeplatten bzw. den Blechstreifen ermittelt.



Abb. 7.2: Schweißproben auf Blechstreifen

Die für die metallographischen Analysen benötigten Proben, wurden aus den geschweißten Probeplatten bzw. den Probenstreifen entnommen. Wenn Proben aus den geschweißten Sichelzähnen zur Analyse vorgesehen sind, ist ein Zuschneiden dieser und eine Warmeinbettung zur metallographischen Inspektion empfehlenswert, siehe Abb. 7.3b rechts. Das Zuschneiden der Probenstreifen auf eine max. Probenlänge von 60 mm erfolgte auf einer Nasstrennmaschine.

Die Proben wurden metallographisch geschliffen und poliert und mit dem Ätzmittel Nital mit einer Ätzdauer von vier Sekunden geätzt. Das Ätzmittel Nital 5% besteht aus einer 65% igen Salpetersäure in alkoholischer Lösung (95 ml Ethanol / 5 ml Salpetersäure). Um das hochlegierte Schweißnahtgefüge sichtbar zu machen (z.B. Probe 71) wurde mit dem Ätzmittel Lichtenegger & Bloech mit einer Ätzdauer von 15 sek geätzt. Dieses Ätzverfahren schreibt 100 ml destilliertes Wasser, 20 g Ammoniumhydrogendifluorid und $0,5\text{ g}$ Kaliumdisulfid vor. Je nach anzustrebendem Ergebnis wurden stereomikroskopische und auflichtmikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Untersuchungen mit 300 facher bis 3000 facher Vergrößerung werden mit einem Rasterelektronenmikroskop vollzogen.

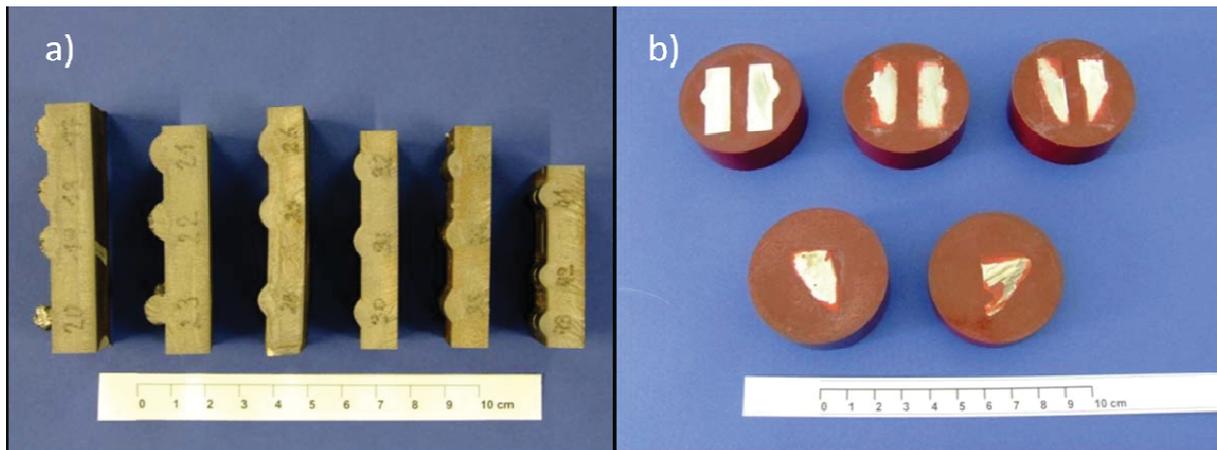


Abb. 7.3: Proben für die metallographischen Analysen

In erster Linie dienen die Gefügeuntersuchungen der Schweißungen zur Charakterisierung der Panzerungen und zur Bestimmung der Schweißnahtgeometrie, sowie der chemischen Analyse von Schweißgut und Grundwerkstoff. Durch den Vergleich der Schweißnahtgefüge können Rückschlüsse auf den Schweißprozess und die Schweißparameter gezogen werden.

Im Rahmen der metallographischen Untersuchungen wurden Härteprüfungen an den Schweißproben durchgeführt. Da die Härte eines Werkstoffes im engen Zusammenhang mit dem Verschleißwiderstand steht, stellt die Härtemessung ein wichtiges Instrument zur Charakterisierung von Verschleißschutzschichten dar. Die in der Literatur angegebenen Werte für verschleißfeste Auftragschweißungen sind größtenteils nach dem Härteprüfverfahren Rockwell HRC nach EN ISO 6508 angegeben. Ein weiteres gebräuchliches Verfahren zur Härtebestimmung von Hartschichten stellt das Vickers Verfahren nach EN ISO 6507 dar. Zudem sind neben Makro- auch Mikromessungen möglich. Um die Werte der Härteprüfung nach Rockwell auf die der Prüfung nach Vickers überzuführen, ist die Anwendung der Norm EN ISO 18265 zweckmäßig. Alle durchgeführten Messungen sind in Anlehnung der in Abb. 7.4 dargestellten Spur erstellt worden. Die einzelnen Härteeindrücke sind in einem Abstand von $0,5\text{ mm}$ angeordnet. Startpunkt der Härteeindrucks spur ist nahe der Schweißnahtoberfläche und endet im Grundwerkstoff mit Einbeziehung der Wärmeeinflusszone.

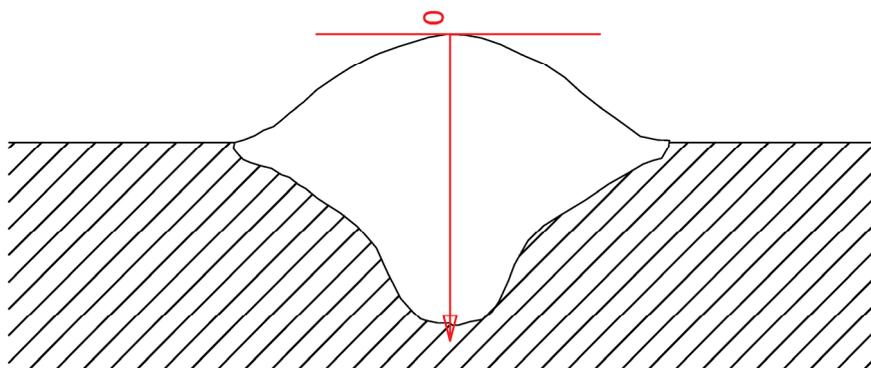


Abb. 7.4: schematische Darstellung der Spur der Härtemesspunkte

7.1.1. Gefügeaufnahmen UTP A DUR 650

Der problemlos verschweißbare Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650 ist für Anwendungen mit hohen Schlag- und Abrasionsbeanspruchungen empfohlen. Diese Kombination der Belastung stellt hohe Ansprüche an den Schweißzusatzwerkstoff und im Speziellen an das Gefüge der Schweißnaht. Die, in Abb. 7.5 rechts, dargestellte Gefügeaufnahme zeigt eine bainitisch-martensitische Struktur mit Restaustenit. Diese Gefügeeinstellung ist für den empfohlenen Einsatzbereich geeignet und ist laut H. Uetz [4] in die Gruppe der niedriglegierten Vergütungsstähle bis 1 % Kohlenstoff mit angelassenem Martensit oder feinem Perlit abrasionsbeständiger Eisenwerkstoffe einzuteilen. Die bainitisch-martensitische Phase dieses Werkstoffs ist maßgeblich für die Härte der Schweißnaht verantwortlich, welche den Verschleißwiderstand wiedergibt.

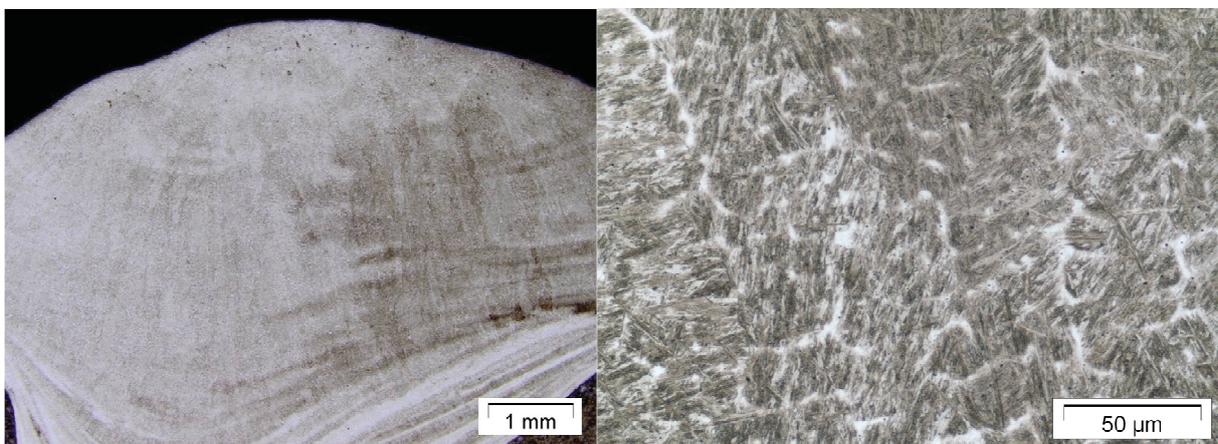


Abb. 7.5: Schweißnahtgefüge der Probe 26, Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650, Streckenenergie 8,1 kJ/cm

Durch die Veränderung der Streckenenergie lassen sich keine wesentlichen Veränderungen der Gefügeausbildung erkennen. In dem in Abb. 7.5 rechts abgebildeten Gefüge lässt sich, wie auch bei der Probe 26, eine bainitisch-martensitische Struktur mit Restaustenit erkennen. Wesentlichen Einfluss auf das Gefüge hat die Aufmischung des Grundwerkstoffs mit dem Schweißzusatzwerkstoff.

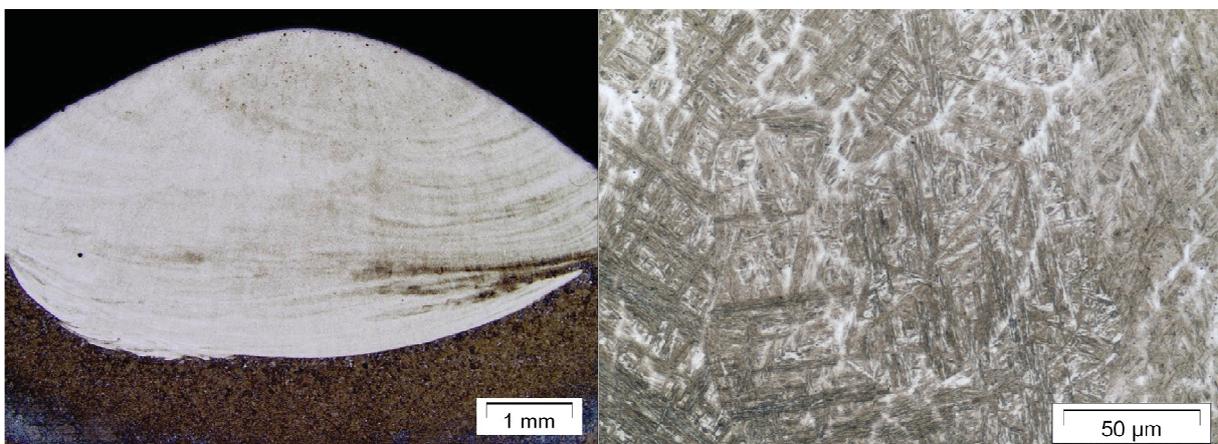


Abb. 7.6: Schweißnahtgefüge der Probe 35, Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650, Streckenenergie 4,4 kJ/cm

7.1.2. Gefügeaufnahmen UTP A DUR 650 mit Wolframkarbideinstreuung

Durch den Einsatz von Wolframkarbid mit Kobaltbindung ist ein Ergebnis, welches der Zielvorgabe entspricht realisierbar. In Abb. 7.7 rechts ist ein großteils martensitisches Gefüge mit Restaustenit erkennbar. Durch die Zugabe der Hartstoffe mit einer Körnung von 0,7 bis 1,2 mm wird das Wolframkarbid teilweise im Randbereich aufgeschmolzen (siehe weiße Bereiche rund um die Karbide). Das Gefüge der Matrix in nicht unmittelbarer Nähe eines Karbids ist mit dem Gefüge der Schweißung mit der Probennummer 26 vergleichbar (Abb. 7.5).

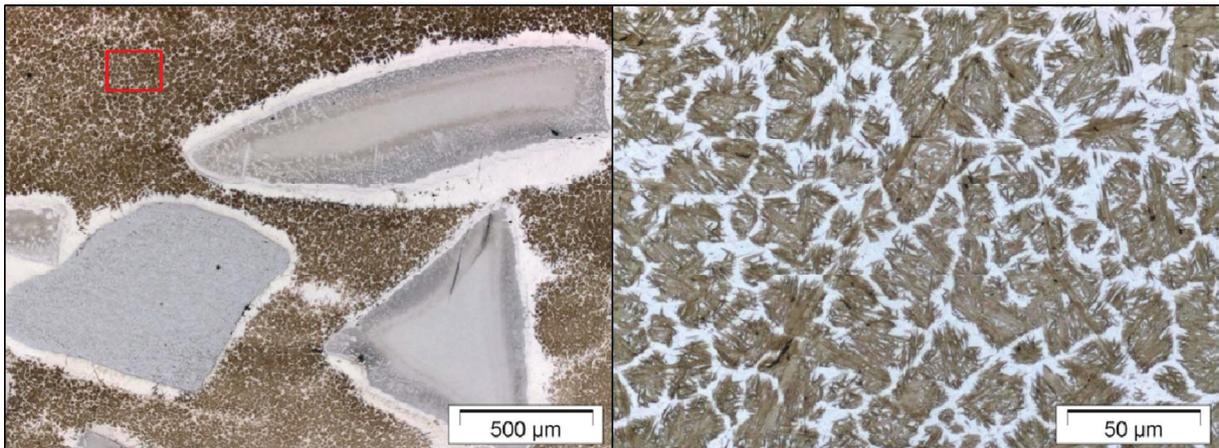


Abb. 7.7: Matrixgefüge der Schweißnaht Probennummer 64, Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650 mit WC, Streckenenergie 6,9 kJ/cm

Durch das partielle Aufschmelzen der Wolframkarbide im Lichtbogen und durch das Einbetten in der flüssigen Eisenbasismatrix, kommt es auch zur Eindiffusion von Eisen in das Wolframkarbidkorn. In Abb. 7.8 links, ist eine dendritische Struktur des eindiffundierten Bereichs im Inneren des WC-Korns ersichtlich. Im rechten Teil des Bildes sind die einzelnen Phasen dieses Bereichs im Massenkontrastbild im vergrößerten Maßstab abgebildet.

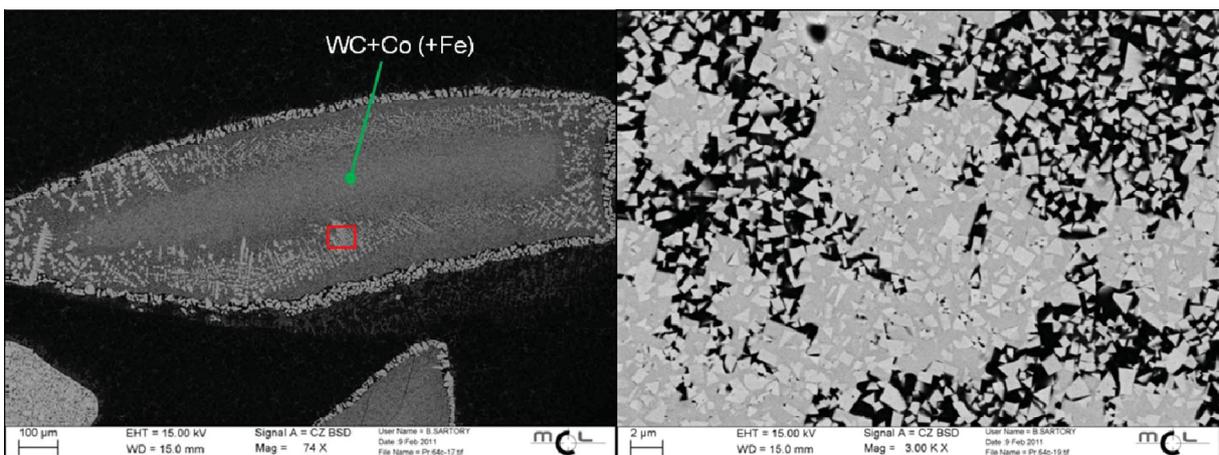


Abb. 7.8: REM-BSD-Aufnahme des Gefüges eines eingeschweißten Wolframkarbidkorns, Probennummer 64

Das Ergebnis der EDX Analyse ist Abb. 7.9 zu entnehmen. Im Vergleich zur EDX-Analyse des reinen Hartstoffs, siehe Tab. 5.6, sind erhöhte Eisengehalte inmitten des Wolframkarbidkorns zu detektieren. Je nach Konstellation sind Eisengehalte von 4 %

(Massenprozent) bis 65 % detektierbar. Zusätzlich zum Eisen ist Chrom feststellbar, welches ebenfalls durch Diffusion in das Korninnere gelangt. Die in Abb. 7.8 schwarz dargestellte Bereiche sind hoch eisenhaltig Phasen im Hartmetallkorn (mit gelber Umrandung). Die hellen Bereiche sind Wolframkarbide mit ca. 4 % eindiffundierten Eisen, in Abb. 7.9 grün umrandet. Weiters sind graue Bereiche erkennbar, welche Eisen und Chrom Anteile besitzen und teilweise Kobalt beinhalten, mit roter Umrandung in Abb. 7.9 markiert. Zur EDX-Analyse in Abb. 7.9 ist zu erwähnen, dass die angegebenen Kohlenstoffgehalte nur zum qualitativen Vergleich herangezogen werden dürfen und nicht quantitativ den realen Kohlenstoffgehalt der jeweiligen Phase widerspiegelt.

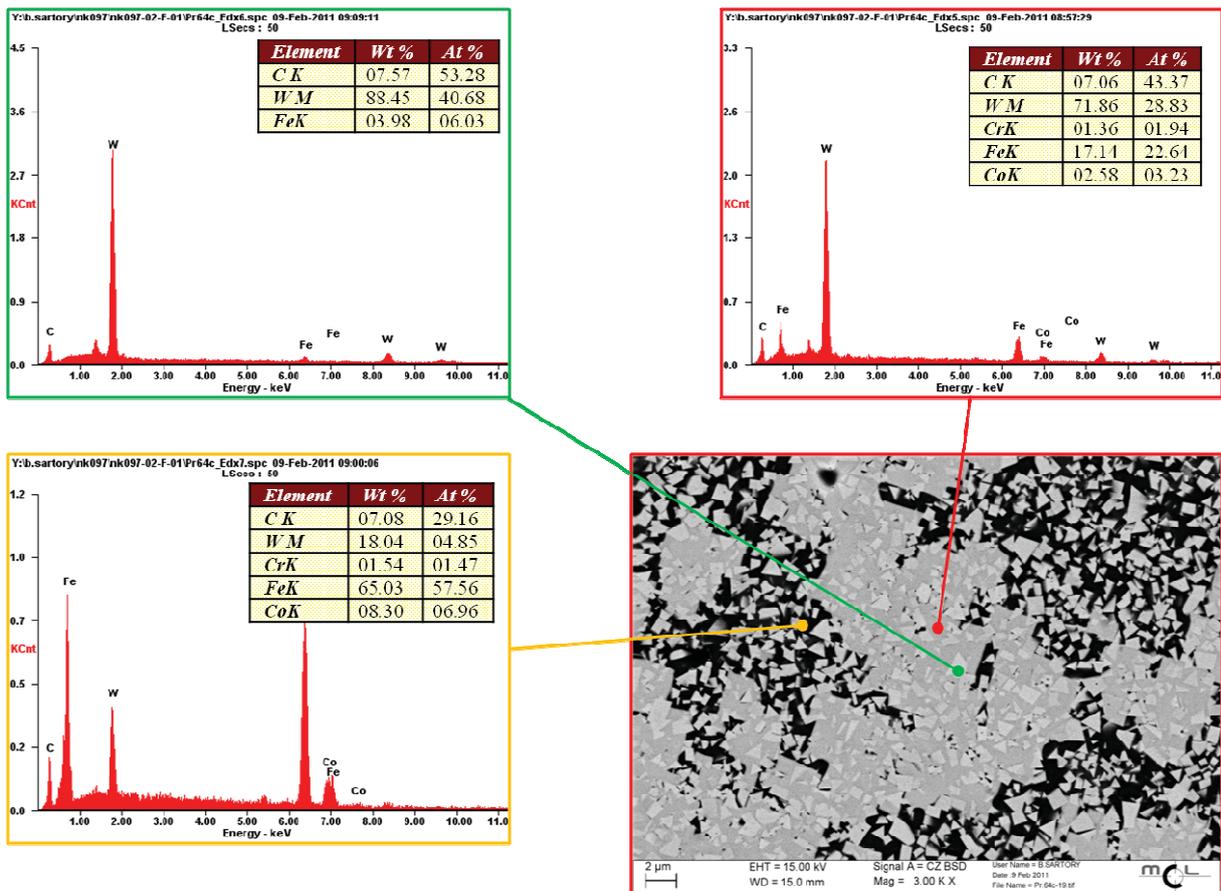


Abb. 7.9: EDX-Analyse des Karbids der Probe 64, aus Abb. 7.8

Für die mechanischen Eigenschaften der Panzerung spielt die Anbindung der Hartstoffe und der Matrix eine wichtige Rolle. Um ein Herausbrechen der Hartstoffkörner aus der Matrix zu verhindern muss eine hohe Festigkeit der Bindung vorhanden sein. Die Einflusszone des Karbids auf die Grundmatrix beginnt ca. 100 μm vor dem Wolframkarbid. In diesem Bereich sind Veränderungen des Matrixgefüges erkennbar. In Abb. 7.7 sind diese Bereiche als helle Höfe um das eigentliche Wolframkarbidkorn ersichtlich. In Abb. 7.10, eine Massenkonastrastaufnahme des gleichen Bereichs, ist der Übergangsbereich von Matrixwerkstoff auf das Karbidkorn klar zu erkennen. Die dunklen Bereiche stellen Phasen geringerer Masse dar, in diesem Fall ein banitisch-martensitisches Matrixgefüge mit Restaustenit (Fe-basierend) und die hellen Bereiche Phasen mit hoher Masse (hoher Anteil an W). Zusätzlich sind primär dendritisch erstarrte Bereiche feststellbar, siehe Abb. 7.10 gelb umrandet.

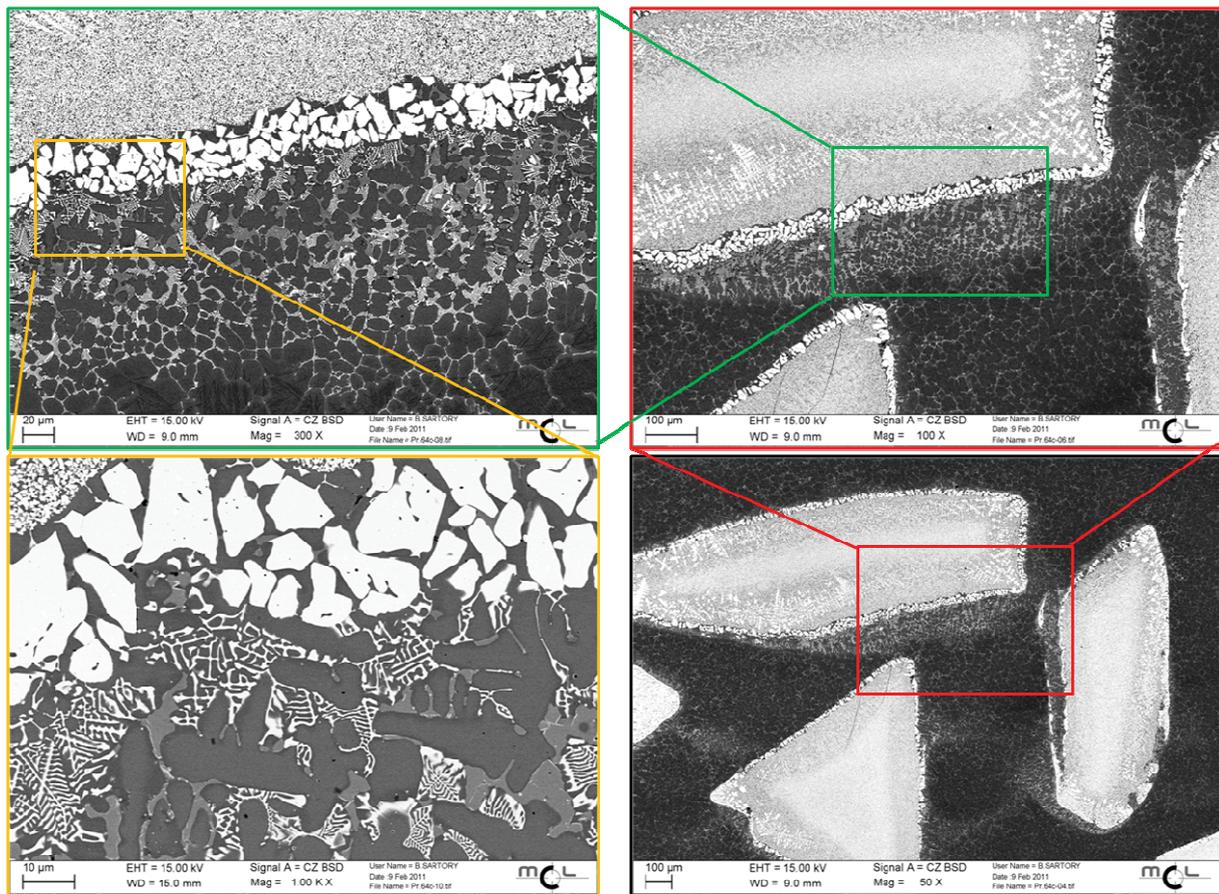


Abb. 7.10: REM-BSD-Aufnahme des Bereichs der Anbindung der Matrix mit dem Karbidkorn, Probe 64

Durch das gleichzeitige Aufschmelzen von Wolframkarbid und Schweißzusatzwerkstoff im Lichtbogen, kommt es zu hochlegierten Phasen am Übergang von Matrix zum WC-Korn in der Schweißnaht, welche den Übergangsbereich bilden. Diese Phasen können sich in der Zusammensetzung in Form von M_3C , M_6C , M_7C_3 oder $M_{23}C_6$ ausbilden. M steht in der Strukturformel für Metall und C für Kohlenstoff. In Abb. 7.11 ist mit Hilfe der EDX-Analyse eine genauere Betrachtung der Übergangszone erfolgt. Die hellen Phasen bestehen aus Wolframkarbid mit Eisenanteilen, welches durch Diffusion hinzugekommen ist (blau). Die grün, blau und gelb markierten Phasen sind hochwolframhaltige Eisenlegierungen die eine Ähnlichkeit mit dem Gefüge eines Schnellarbeitsstahls aufweisen.

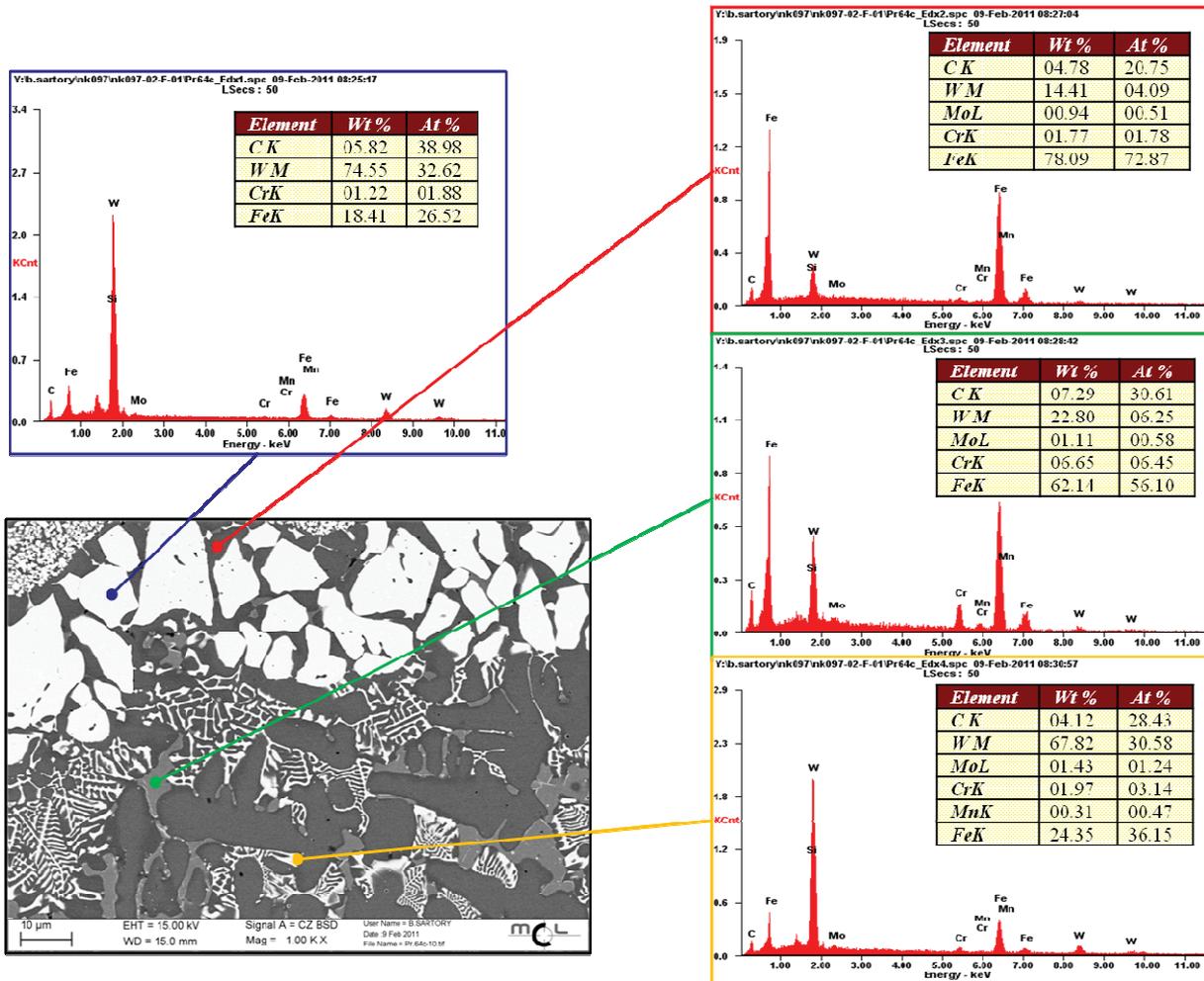


Abb. 7.11: EDX-Analyse des Übergangsbereich von Wolframkarbidkorn zur Matrix

7.1.3. Härtemessung von UTP A DUR 650 Panzerungen

Für das reine Schweißgut des UTP A DUR 650 Zusatzwerkstoffs ist eine Härte von 55 – 60 HRC vom Hersteller angegeben. Mit Hilfe der Umrechnungstabelle nach EN ISO 18265 entspricht dieser Wert einer Vickershärte von 610 bis 710 HV1. Mit den einlagigen Probeschweißungen auf Probleplatten und aufgrund des Aufmischungsgrads ist dieser Wert nicht erzielbar (ca. 510 HV1). Durch die Zugabe von Wolframkarbid mit dem Einstreusverfahren bildet sich das Matrixgefüge ähnlich dem Gefüge ohne Einstreuung aus. Im Härteverlauf kann aber eine Steigerung der Matrixhärte auf ca. 650 bis 680 HV1 festgestellt werden, siehe Abb. 7.12. Dieser Anstieg kann durch das Zulegieren von Wolframkarbid und durch den veränderten thermischen Bedingungen erklärt werden. Die Härtesprünge von 1200 HV1 und 1500 HV1 sind den Hartstoffen zuzuordnen, welche in der Matrix eingelagert sind. Da das in Verwendung befindliche Wolframkarbid eine Kobaltbindung aufweist, sind tendenziell die reinen Härtewerte von Wolframkarbid von ca. 2080 HV0,05 nicht erreichbar.

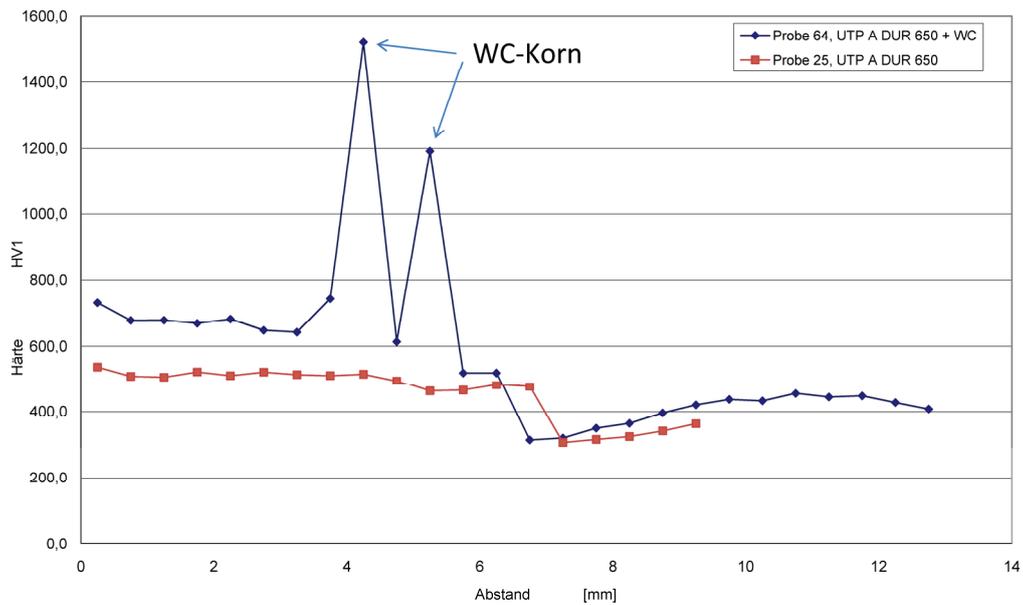


Abb. 7.12: Härteverlauf der Probe 25 und Probe 64 mit Karbideinstreuung, Zusatzwerkstoff UTO A DUR 650 mit Wolframkarbid

7.1.4. Gefügeaufnahmen UTP A DUR 650 mit Siliziumkarbideinstreuung

In der Gefügeaufnahme der Probe 17 ist ein primär dendritisch erstarrtes Gefüge ersichtlich, welches einen hohen Siliziumgehalt aufweist und es sind nur sehr wenige SiC-Körner erkennbar. Der hohe Siliziumgehalt ist auf die Zersetzung des Siliziumkarbids im Lichtbogen bei ca. 2760°C zurückzuführen. Im Schlibfbild der Abb. 7.13 rechts, sind Martensitnadeln im Gefüge erkennbar. Aufgrund der Zersetzung im Lichtbogen, sind ausschließlich Siliziumkarbidkörner an der Oberfläche erkennbar. Diese Körner fallen nach der Prozesszone des Lichtbogens auf die noch teigige Schweißnaht und werden eingebettet.

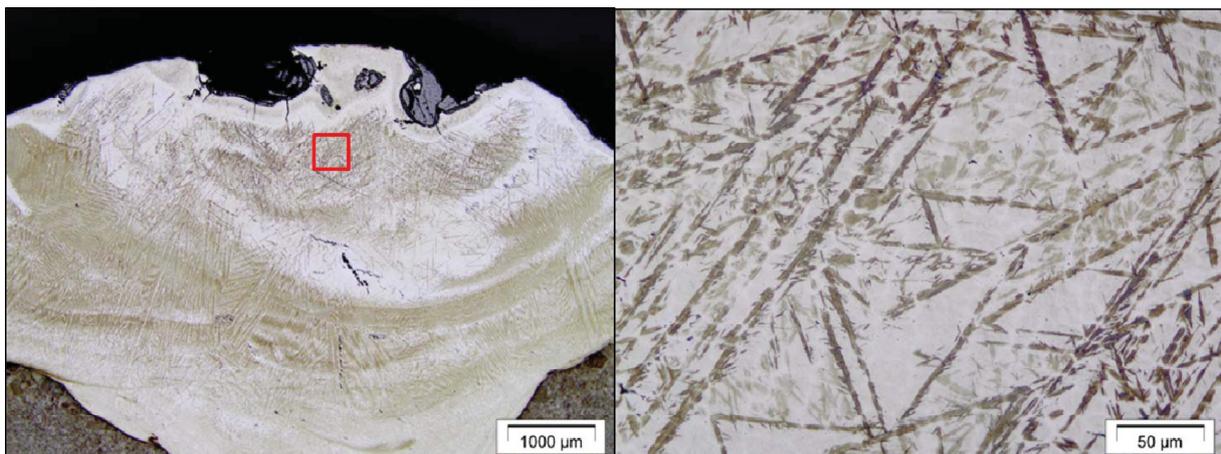


Abb. 7.13: Schweißnahtgefüge der Probe 17, Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650 mit SiC, Streckenenergie $6,9 \text{ kJ/cm}$

7.1.5. Härtemessung von UTP A DUR 650 Panzerungen mit Siliziumkarbid

Durch die Einstreuung von Siliziumkarbid kann der Härteverlauf der Auftragsschweißungen stark beeinflusst werden. In Abb. 7.14 sind die Härteverläufe der Proben 21, 22 und 23 ersichtlich. Bei den Proben 22 und 23 ist dem Schweißprozess Siliziumkarbid zugegeben worden. Durch die Zugabe von Siliziumkarbid und dessen Zersetzung und damit hochlegierenden Einfluss des Gefüges kann eine Steigerung der Härte um 300 HV1 auf insgesamt knapp über 800 HV1 erzielt werden, was einem Härtegrad von 64 HRC entspricht. Die Härtesteigerung an der Oberfläche der Schweißnaht von ca. 980 HV1 ist mit dem Vorhandensein eines nicht vollständig aufgelösten Siliziumkarbids an der Oberfläche zu erklären. Bei diesen Schweißungen, welche in Abb. 7.14 aufgeführt sind, ist der Grundwerkstoff S355JR. Als Vergleich ist in Abb. 7.14 der Härteverlauf einer Schweißung ohne Karbideinstreuung mit der Probennummer 21 aufgetragen.

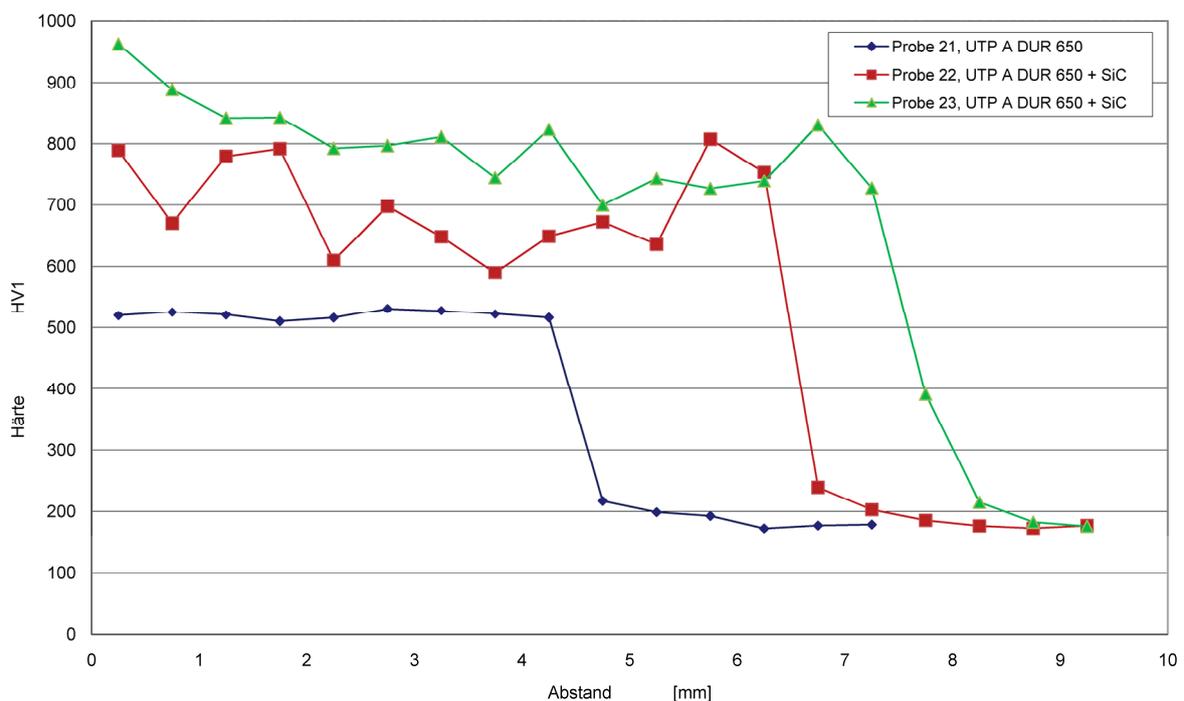


Abb. 7.14: Härteverlauf der Probe 21 (ohne SiC), Probe 22 und 23 mit Siliziumkarbideinstreuung, Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650

Durch die Zugabe von Siliziumkarbid in den Schweißprozess ist nicht das gewünschte Ergebnis einer zähen Matrix mit eingelagerten Hartstoffen erreichbar. Durch das Nichterreichen der Zielvorgabe werden weitere Durchführungen von Auftragsschweißungen mit dieser Kombination und eine weitere mechanische Prüfung solcher Panzerungen nicht durchgeführt.

7.1.6. Gefügebildungen DURMAT FD 601

Der Fülldraht weist ein ähnliches bainitisch-martensitisches Gefüge mit Restaustenit auf, wie der zuvor beschriebene äquivalente Massivdraht UTP A DUR 650, siehe Abb. 7.15. Da bei der Fülldrahttechnologie das Drahröhrchen aus niedrig legiertem Stahl besteht, werden die Legierungselemente und die nichtmetallischen Schweißzusätze in Pulverform im Innern des Fülldrahts dem Schweißprozess zugeführt. Beim Massivdraht sind alle Legierungselemente homogen im Schweißdraht verteilt, so ist auch eine homogene Verteilung der Legierungselemente zu erwarten. Beim Fülldraht kann durch einen unruhigen Schweißprozess bzw. Lichtbogenabbrand zu lokalen Anhäufungen von Legierungselementen, zu sogenannten Seigerungen, kommen.

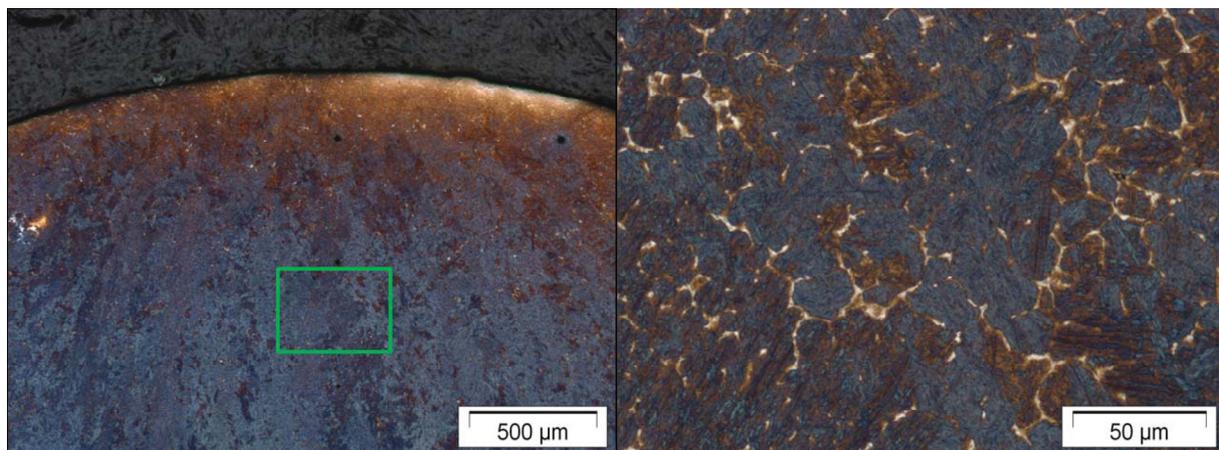


Abb. 7.15: Schweißnahtgefüge der Probe 71, Zusatzwerkstoff DURMAT FD 601 Streckenenergie 5,9 kJ/cm

7.1.7. Härtemessung von DURMAT FD 601 Panzerungen

Der dem Massivdraht UTP DUR A 650 äquivalente Fülldraht DURMAT FD 601 ist vom Hersteller mit einer Härte von 56 – 58 HRC angegeben. Umgerechnet nach EN ISO 18265 entspricht dieser Wert einer Vickershärte von 615 – 654 HV1. Der Härteverlauf der Probe 71, siehe Abb. 7.16, weist eine maximale Härte von 688 HV1 auf. Mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche steigt die Härte kontinuierlich und ab ca. 1 mm Abstand von der Oberfläche kann ein Härteniveau von ca. 660 HV1 gehalten werden. Nahe der Wärmeeinflusszone kann ein starker Härteeinbruch auf 300 HV1 detektiert werden. Durch die Einstreuung von Wolframkarbid mit Kobaltbindung kann die maximale Härte der Schweißnaht erheblich gesteigert werden. In der in Abb. 7.16 aufgetragenen Härtespur der Probe 76, ist ein Wolframkarbid mit einer Härte von ca. 980 HV1 gemessen. Dieser Wert ist durch das Messen des Wolframkarbids im Randbereich zurückzuführen, welches ähnlich wie in Abb. 7.8 eine Diffusion von Eisen in das Gefüge aufweist. Die Matrixhärte der Probe 76 weist ähnliche Härtewerte auf wie die der Probe 71 ohne Karbideinstreuung. Für die Erklärung des Härteniveaus von 500 HV1 inmitten der Schweißnaht ist eine genauere Betrachtung der Härtespur an der Probe erforderlich. Diese Härteeindrücke befinden sich im Übergangsbereich von der Matrix zu einem Wolframkarbid. Es wird vermutet, dass aufgrund des hohen Legierungsgehaltes eine martensitische Umwandlung unterdrückt wird und ein austenitisches und damit weiches Gefüge vorliegt. Für die Einschätzung des Einflusses dieses Härteabfalls auf die mechanischen Eigenschaften sind weiterführende Untersuchungen notwendig.

Einheitlich ist bei allen durchgeführten Schweißungen mit Grundwerkstoff $27MnCrB5-2$, der Härteabfall in der Wärmeeinflusszone auf einen Härtewert von 300 HV1 und der flache Härteanstieg auf 400 HV1 mit einer benötigten Wegstrecke von 2 mm .

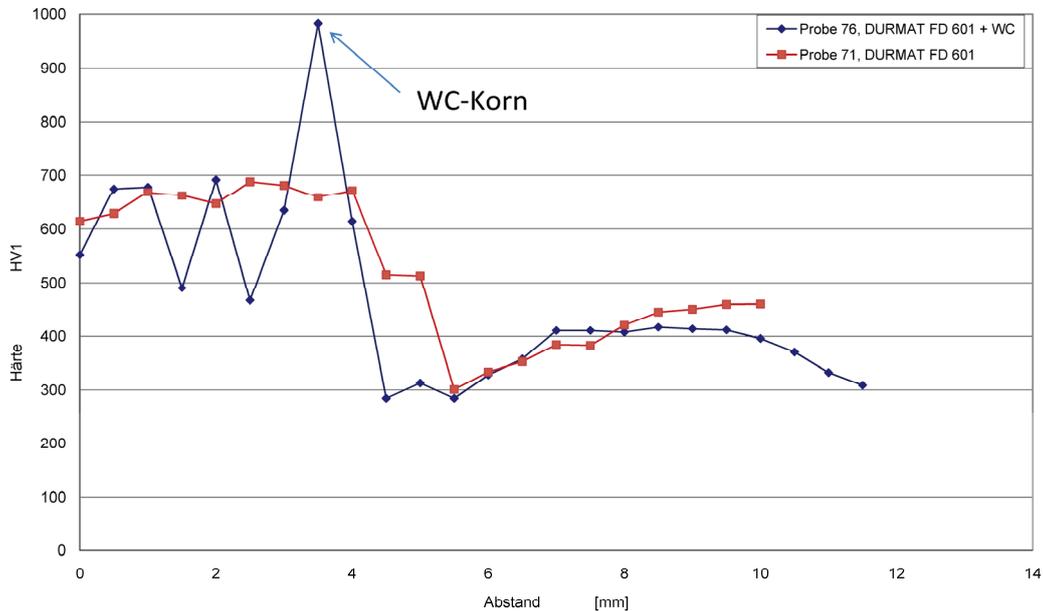


Abb. 7.16: Härteverlauf der Probe 71 und der Probe 76 mit Karbideinstreuung, Zusatzwerkstoff DURMAT FD 601

7.1.8. Gefügeaufnahmen DURMAT FD OA

In dem in Abb. 7.17 abgebildeten Schweißnahtschliff einer mit DURMAT FD OA geschweißten Panzerung ist ein primär dendritisches erstarrtes Gefüge ersichtlich, welches mit Wolfram hochlegiert ist. Dieses Wolfram ist durch die vollständige Aufschmelzung der Wolframschmelzkarbide im Lichtbogen als Legierungselement dem Gefüge zugeführt worden. Die Aufschmelzung der Karbide ist auf den hohen Schweißstrom zurückzuführen. Die hohe Einstellung des Schweißstroms war aber notwendig um eine zufriedenstellende Bindung zum Grundwerkstoff sicherzustellen. Um das gewünschte Gefüge mit fein verteilten Wolframschmelzkarbiden in einer zähen Matrix zu erlangen, sind Versuchsschweißungen mit modifizierten Schweißprogrammen oder anderen Schweißverfahren nötig.

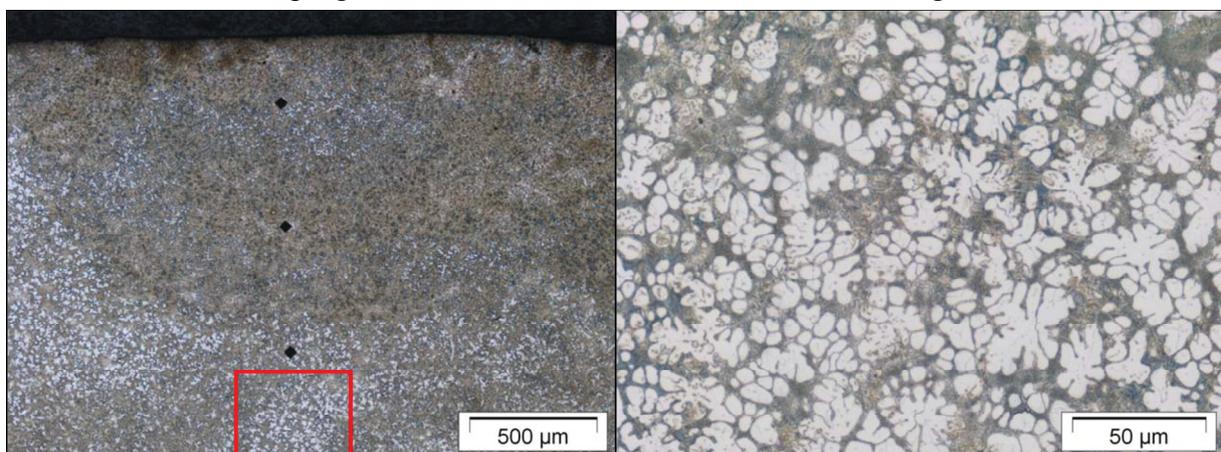


Abb. 7.17: Schweißnahtgefüge der Probe 70, Zusatzwerkstoff DURMAT FD OA

7.1.9. Härtemessung von DURMAT FD OA Panzerungen

Die Schweißungen mit diesem Zusatzwerkstoff gestalten sich insofern schwierig, da dieser Fülldraht sehr sensibel auf Prozesseinstellungen und äußere Einflüsse reagiert. Nur durch die Erhöhung der Streckenenergie, insbesondere des Schweißstroms, kann die Schweißung prozesssicherer durchgeführt werden. Dies hat zur Folge, dass die im Fülldraht DURMAT FD OA eingelagerten Karbide vollständig im Lichtbogen aufschmelzen und als Legierungselemente für die Matrix dienen. Durch die vollständige Aufschmelzung der Wolframkarbide ist das Ziel eine zähe Matrix mit homogen fein verteilten Karbiden zu erhalten nicht mehr realisierbar. Die dem Herstellerdatenblatt entnommenen Härtewerte von 64 - 66 HRC des reinen Schweißguts, entsprechen einer Vickershärte von 800 bis 864 HV1, sind somit nicht mehr erreichbar. Der in Abb. 7.18 dargestellte Härteverlauf der Probe 70, weist eine maximale Härte von 770 HV1. Es ist aber nur eine durchschnittliche Härte von ca. 670 HV1 in der Schweißnaht erreichbar. Bei der Probe 85 ist in Abb. 7.18 eine durchschnittliche Härte knapp an der 800 HV1 Grenze erkennbar. Dies ist aber nur erreichbar, da bei der Probe 85 mit dem Einstreuselverfahren agiert wurde und zusätzlich Wolframkarbid der Schweißnaht zugeführt wurde. Durch die Zugabe wird der Schweißprozess sehr unruhig und es tritt starke Porenbildung in der Schweißnaht auf. Es sind weitere Schweißversuche mit veränderten Schweißparametern notwendig um das gewünschte Gefüge einzustellen. Durch die optimale Einstellung des Gefüges der Auftragschweißung könnte wiederum die Härte der Verschleißschicht erhöht werden.

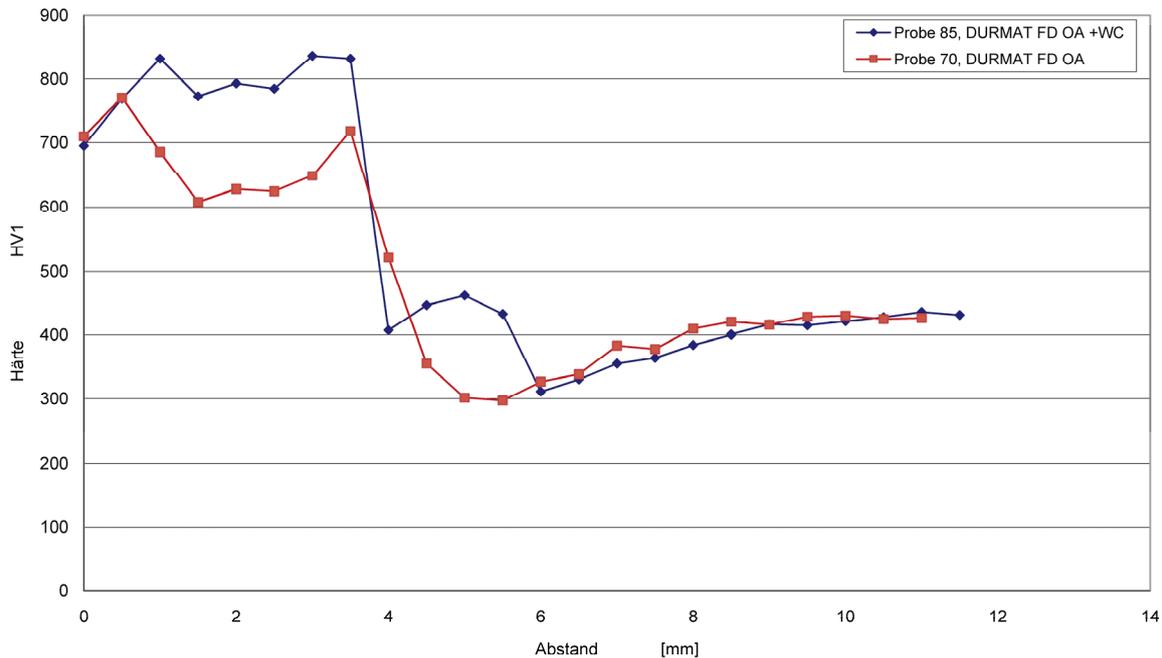


Abb. 7.18: Härteverlauf der Probe 70 und der Probe 85 mit Karbideinstreuung, Zusatzwerkstoff DURMAT FD OA

7.2. Schweißversuchsdurchführung an Sichelzähnen

Vor den Schweißversuche an den sandgestrahlten Sichelzähnen werden die zuvor geschweißten Probebleche genauer analysiert. Die optischen Auswahlkriterien vor Ort sind eine gleichmäßige Schweißraupe ohne Ablösungen vom Grundmaterial und ein geringer Einbrand bzw. ein geringer Endkrater. Weiters wird bei den Schweißproben mit zusätzlicher Karbideinstreuung die Karbidverteilung und Karbidmenge begutachtet. Dies geschieht im Zuge der Probenpräparation für die weiteren metallographischen Untersuchungen, mit einem oder mehreren Längs- und Querschnitten durch die Schweißnaht. Die anschließenden metallographischen Untersuchungen beinhalten Gefügeauswertung und Härtemessungen an den auf Probeblechen geschweißten Versuchen. Bei den Versuchsschweißungen mit zusätzlicher Karbideinstreuung ist eine gleichmäßige Karbidverteilung mit nur einer geschweißten Naht nicht oder nur schwierig erreichbar. In den Schlifften mit einer einzelnen Schweißnaht ist ein Absinken der Karbide im Schmelzbad erkennbar, siehe Abb. 7.19. Eine gleichmäßigere Verteilung der Hartstoffe ist zum Einen durch eine optimierte Einstreuung erzielbar. Die wirkungsvollste Methode um eine optimale Verteilung herzustellen, stellt aber das Mehrlagenschweißen am Sichelzahn dar. Hiermit ist eine gute Verteilung der extern zugeführten Hartphasen möglich. Ein Nachteil ist die dabei starke veränderte Zahngeometrie (Aufbau) durch eine Mehrlagenschweißung. Abhilfe schafft eine nebeneinander Schweißen mit seitlicher Überlappung der Schweißnähte, womit eine geringe absolute Schichtdicke mit guter Hartstoffverteilung erreicht wird. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit einer möglichst geringen gerade noch technisch realisierbaren Streckenenergie die besten Ergebnisse erzielt werden können. Alle Schweißungen auf Sichelzähnen sind mit fünf, sich überlappenden, Schweißnähten ausgeführt. Die Schutzgasdüse bzw. das Kontaktrrohr des Maschinenschweißbrenners ist 20 mm über der zu schweißenden Oberfläche zu positionieren. Der Maschinenschweißbrenner ist senkrecht zur schweißenden Oberfläche auszurichten. Die Karbidzuführung erfolgt entgegen der Schweißrichtung vor dem Schweißbrenner, siehe Abb. 7.20. Schleppendes oder stechendes Schweißen verändert die Karbidverteilung in der Schweißnaht beim automatisierten Einstreuselverfahren. Um vergleichbare Versuchsschweißungen zu erhalten wurde diese Einstellungen konstant gehalten.

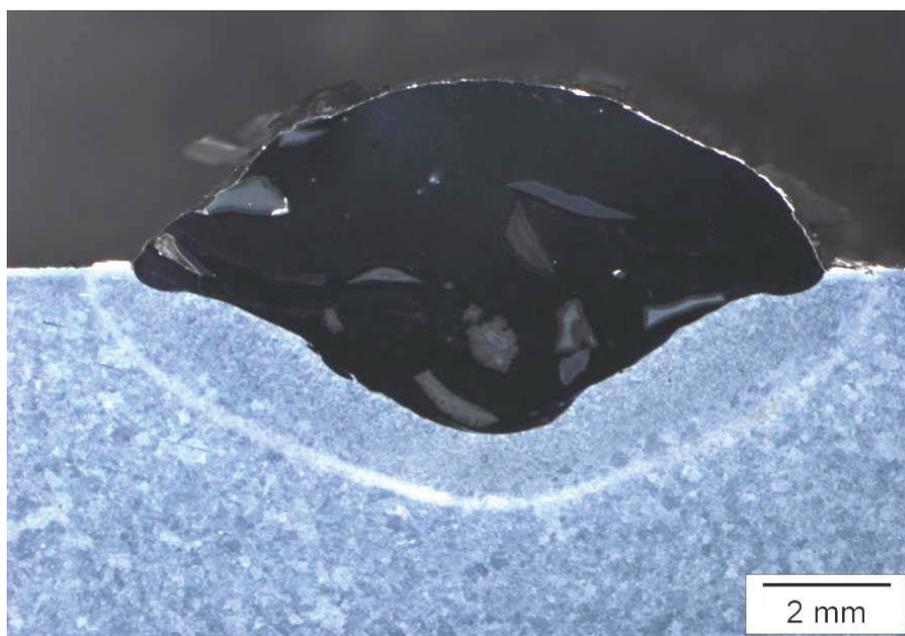


Abb. 7.19: Schliffbild der Probe 64a, Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650 mit Karbideinstreuung

Ein Entfernen der überschüssigen Hartstoffkörner kann durch manuelles Abkehren oder Abblasen mit Druckluft erfolgen. In der Serienfertigung ist ein Abblasen durch Druckluft dem Abkehren vorzuziehen. Eine zusätzliche Möglichkeit besteht darin, die überschüssigen Hartstoffkörner aufzusaugen und dem Kreislauf zurückzuführen.



Abb. 7.20: Positionierung des Maschinenschweißbrenners und Schweißvorrichtung

In Folge der Ergebnisse der optischen und metallographischen Auswahlverfahren werden folgende Materialkombinationen für das Auftragschweißen der Sichelzähne diskutiert:

	ohne WC-Karbideinstreuung	mit WC-Karbideinstreuung
DUR 650	Proben-Nr.: 81	Proben-Nr.: 84
FD 601	Proben-Nr.: 71	Proben-Nr.: 76
FD OA	Proben-Nr.: 70	Proben-Nr.: 85

Tab. 7.1: Versuchsschweißungen

Die aufgeschweißten Zähne mit dem Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650 stehen im direkten Vergleich mit dem Zusatzwerkstoff FD 601. Durch eine erste optische Begutachtung der Schweißresultate scheidet die gepanzerten Sichelzähne mit der Konfiguration Schweißzusatz FD OA mit zusätzlicher Karbideinstreuung (Abb. 7.21) für die weiteren experimentellen Prüfungen aus. Grundlage für diesen Ausschluss sind die schon bei der Schweißung bemerkbaren schlechten Schweißigenschaften der Kombination Schweißzusatz und Karbideinstreuung. Zudem weisen die aufgepanzerten Zähne mit der Probennummer 85 starke Porenbildung, ein Auflösung der Karbide des Fülldrahtes, wie in Abb. 7.17 ersichtlich und eine schlechte Bindung zum Grundwerkstoff auf. Durch die einzeln fixierten Sichelzähne in der Schweißvorrichtung kommt es zu einer starken Ausbildung von Schweißeigenstressungen, welche eine Initiierung von Oberflächenrissen zu Folge haben.



Abb. 7.21: UTP A DUR 650 aufgepanzerte Sichelzähne mit Karbideinstreuung, Proben-Nr.: 84

Speziell bei den Schweißzusatzwerkstoffen DURMAT FD 601 mit Karbideinstreuung und beim Zusatzwerkstoff DURMAT FD OA mit und ohne Karbideinstreuung sind vermehrt Risse zu detektieren, siehe Abb. 7.22. Nachdem Auftragschweißen der Sichelzähne, werden die aufgepanzerten Zähne aus der Form gehoben. Anschließend können die Zähne gebrochen werden. Um eine saubere Bruchfläche zu erlangen, sind Trennbleche aus Kupfer unerlässlich (siehe Kap. 6.4). Wenn Kupferanhaftungen von den Trennblechen unerwünscht sind, ist ein Planschleifen der Zähne zu empfehlen. Durch die bei der Schweißung entstandenen Risse, welche sich in den Trennflächen bilden, können die Zähne ohne größere Probleme aus der Schweißvorrichtung gehoben werden. Es ist empfehlenswert zwischen Start- bzw. Endblech und dem Sichelzahn auch ein Trennblech aus Kupfer zu positionieren. Da hier ein größeres Spaltmaß zwischen dem Sichelzahn und dem Endblech vorliegt, kann es durch den nächsten Arbeitsschritt, dem Auseinanderbrechen, zu einem Ausbruch am Zahn führen, welcher den Sichelzahn qualitativ mindert.

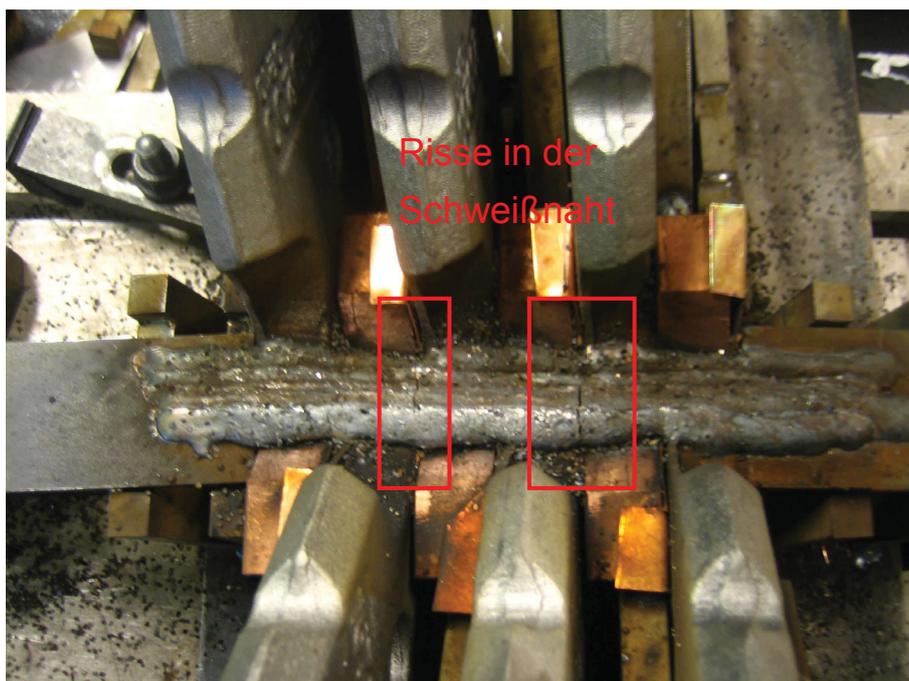


Abb. 7.22: DURMAT FD 601 aufgepanzerte Sichelzähne mit Karbideinstreuung, Proben-Nr.: 76.

8. Einflussparameter der Auftragschweißung

8.1. Schweißspezifische Parameter

Die wichtigsten schweißspezifischen Parameter sind Schweißstrom, Schweißspannung, Drahtvorschub und Schweißgeschwindigkeit. Im engen Zusammenhang stehen Schweißstrom und Schweißspannung. Über diese zwei Parameter wird die Art des Lichtbogens beschrieben.

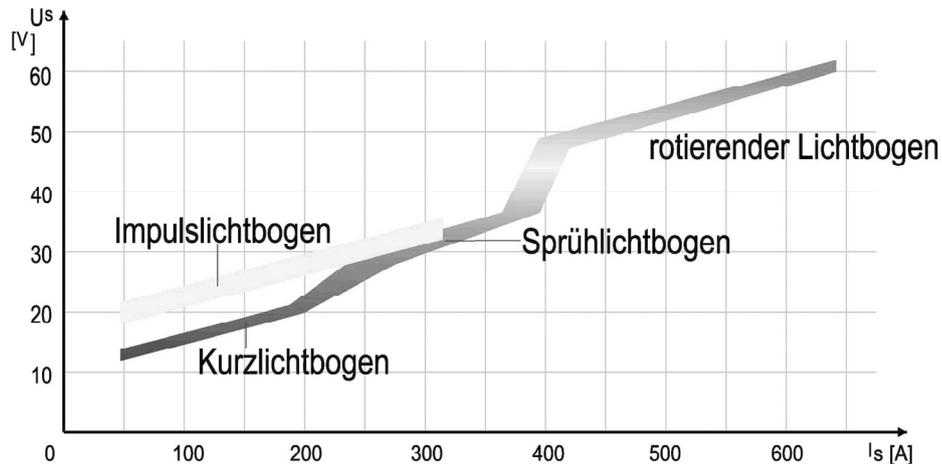


Abb. 8.1: Lichtbogenarten in Abhängigkeit von Spannung und Strom [23]

In Abb. 8.1 sind die möglichen Lichtbogenarten in Abhängigkeit von Schweißstrom und Schweißspannung dargestellt. Für das Auftragschweißen von höchstabrasionsbeständigen Werkstoffen bzw. für das Aufpanzern mit dem Einstreuselverfahren ist laut Literatur das Schweißen mit Kurzlichtbogen oder Impulslichtbogen besonders geeignet [21]. Speziell beim Schweißen von Fülldrähten mit Karbiden im Kern, ist ein Arbeitsbereich in den unteren Spannungs- und Strombereichen empfehlenswert, da durch die kurzzeitige Aufschmelzung im Kurz- bzw. Impulslichtbogen, die im Fülldraht eingearbeiteten Karbide nur geringfügig aufschmelzen. Beim Kurzlichtbogenschweißen erlischt der Lichtbogen und der Werkstoff geht kurzzeitig in den Kurzschluss über, dann zündet der Lichtbogen wieder und bleibt eine kurze Zeit stabil bis der Zusatzwerkstoff wieder das Werkstück berührt und in den Kurzschluss übergeht (Abb. 8.2).

Zu den oben beschriebenen Parametern werden Zusätzliche benötigt. Für eine Inverterstromquelle sind bis zu 30 Parameter einstellbar. Um die Handhabung zu erleichtern wird im Synergic-Betrieb der Schweißmaschine gearbeitet. In dieser Betriebsart wird mit Hilfe von vorprogrammierten, vom Bediener wählbaren, Schweißprogrammen gearbeitet. Diese Schweißprogramme sind auf die verwendeten Draht/Gaskombinationen abgestimmt. Vom Benutzer sind weder Schweißspannung noch Schweißstrom einzustellen. Der primäre Einstellungsparameter an der Schweißstromquelle im Synergic-Betrieb ist die Drahtvorschubgeschwindigkeit. In Verbindung mit dem richtig gewählten Schweißprogramm ist eine schnelle und wiederholgenaue Einstellung des Schweißprozesses möglich [24].

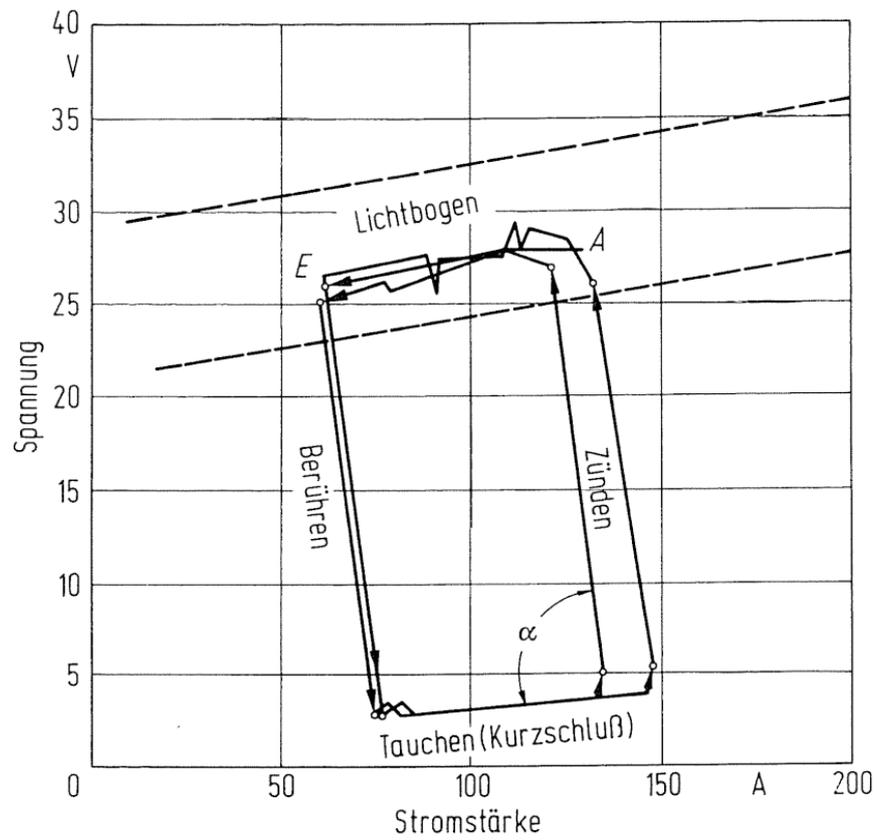


Abb. 8.2: Kurzschlusszyklen beim MAG-Schweißen im U-I-Diagramm [9]

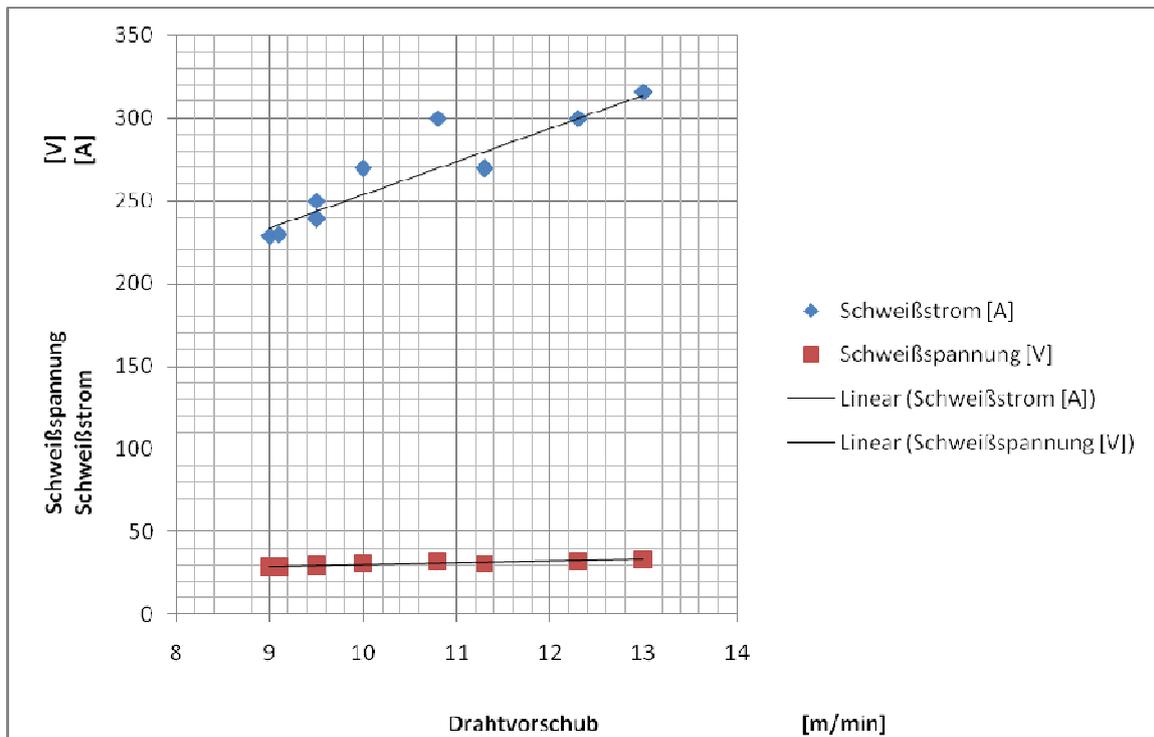


Abb. 8.3: Verwendetes Schweißprogramm für den Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650

Für die Beurteilung und den Vergleich der Schweißparameter werden der Aufmischungsgrad und die geometrischen Abmessungen der Schweißnähte herangezogen. Der Aufmischungsgrad ist größtenteils verfahrensabhängig, und kann durch eine Variation der Schweißparameter beeinflusst werden.

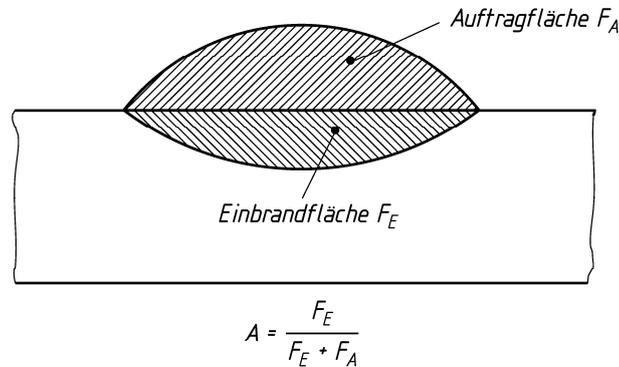


Abb. 8.4: Definition des Aufmischungsgrades [13]

Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erzielen, ist es notwendig, den Aufmischungsgrad von Schweißungen mit oder ohne Karbide getrennt voneinander zu betrachten. Neben dem Aufmischungsgrad sind die geometrischen Abmessungen der Schweißnähte eine Möglichkeit um Schweißparameter miteinander zu vergleichen. Hierzu werden von den Schweißnähten Querschliffe gefertigt, welche anschließend unter dem Stereomikroskop vermessen werden.

Im gleichen Arbeitsschritt kann auch der Aufmischungsgrad, mit dem Messen der Teilflächen F_E und F_A , siehe Abb. 8.4, bestimmt werden. Die geometrischen Abmessungen zur Auswertung der Probeschweißungen auf Platten, werden nach Abb. 8.5 definiert:

- Länge 1: horizontale Ausdehnung der sichtbaren Wärmeeinflusszone
- Länge 2: Breite der Schweißnaht
- Länge 3: Überhöhung der Schweißnaht
- Länge 4: Vertikale Ausdehnung der sichtbaren Wärmeeinflusszone
- Länge 5: Tiefe der Schweißnaht

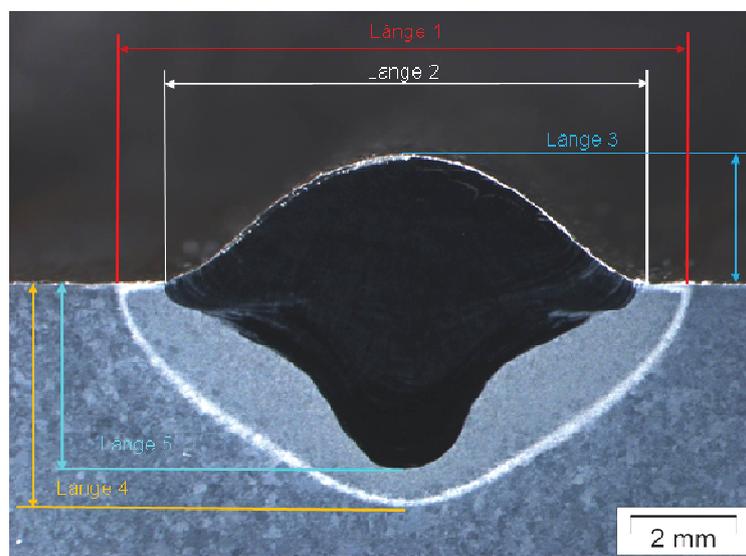


Abb. 8.5: Definition der geometrischen Abmessungen der Schweißnaht

8.2. Einfluss Streckenenergie

Um Schweißungen mit unterschiedlichen Schweißparametern gegenüber stellen zu können, wird die Streckenenergie E eingeführt. Die Streckenenergie ist jene Energie, welche der Schweißbraupe je Längeneinheit zugeführt wird.

$$E = \frac{U * I}{v} \quad \text{Glg. (8.1)}$$

In den vorab getätigten Schweißversuchen auf Probeplatten sind neben den grundlegenden Parametereinstellungen auch der Zusammenhang von Streckenenergie und Aufmischungsgrad erarbeitet worden. Im Allgemeinen ist feststellbar, dass sich mit steigender Streckenenergie der Aufmischungsgrad erhöht. Die in Abb. 8.6 dargestellten Proben weisen alle denselben Grundwerkstoff $27MnCrB5-2$ und Schweißzusatzwerkstoff UTP A DUR 650 auf. Es ist zu erwähnen, dass diese Schweißserie mit Hilfe des Synergic-Betriebs erstellt ist und dass durch die automatische Regelung von Strom und Spannung in Abhängigkeit der Drahtvorschubgeschwindigkeit eine Abflachung der Kennlinie erfolgt. Diese Abflachung hat die größere Zuführung von Schweißdraht als Grundlage. Bei konstant gehaltenem Drahtvorschub und sukzessiver Erhöhung der Streckenenergie ist ein höherer Wärmeeintrag in den Grundwerkstoff und dadurch ein höherer Aufmischungsgrad zu prognostizieren.

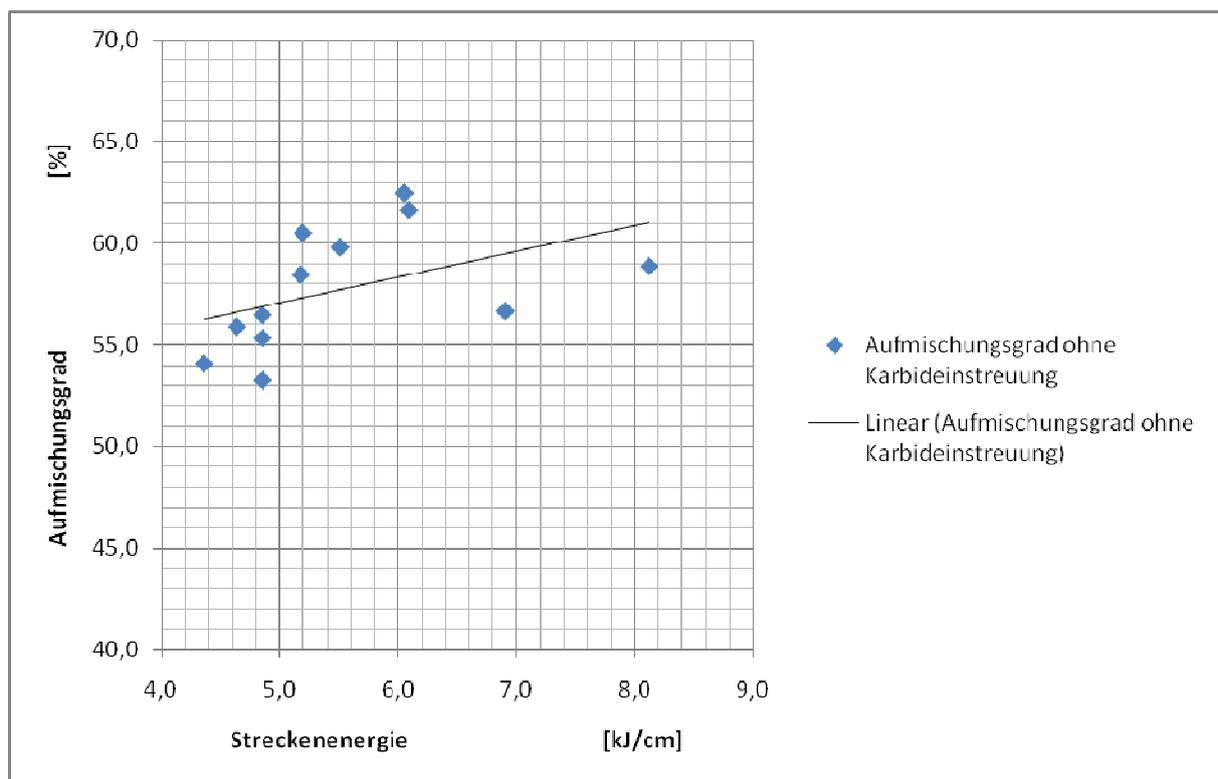


Abb. 8.6: Einfluss der Streckenenergie auf den Aufmischungsgrad, UTP A DUR 650

Bei den Schweißnahtabmessungen ist ebenfalls ein linearer Zusammenhang mit der Streckenenergie als Näherung erkennbar. Gemäß Abb. 8.7 sind die Auswirkungen einer Erhöhung der Streckenenergie in der horizontalen Ausdehnung von Schweißnaht und Wärmeeinflusszone (WEZ) wie auch in der Höhe der Schweißnaht detektierbar. Ein geringerer Einfluss ist auf die vertikale Ausdehnung der Wärmeeinflusszone und der Schweißnahttiefe gegeben.

Der merkliche Anstieg von horizontaler Ausdehnung der WEZ, Schweißnaht und Schweißnahthöhe ist durch die Synergic-Schweißung erklärbar, da durch eine Erhöhung der Streckenenergie mittels Spannungs- und Stromerhöhung eine automatische Erhöhung des Drahtvorschubes erfolgt. Diese Daten sind aus der Kombination von Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650 und Grundwerkstoff 27MnCrB5-2 ermittelt. Durch den Einsatz der Fülldrahttechnologie können die Schweißnahtabmessungen gezielt beeinflusst werden. Mit dem UTP A DUR 650 äquivalenten Fülldraht DURMAT FD 601 ist mit derselben eingebrachten Streckenenergie von $5,9 \text{ kJ/cm}$, ein wesentlich besseres Schweißergebnis in Bezug auf die geometrischen Schweißnahtabmessungen erzielbar. Wie in Abb. 8.8 zu erkennen ist, kann durch den Einsatz des Fülldrahts die maximale Schweißnahttiefe erheblich verringert werden. Der Aufmischungsgrad kann dadurch von $59,8 \%$, bei der Schweißung mit Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650 mit der Probennummer 81 ermittelt, auf $44,6 \%$ mit der Fülldrahttechnologie (Probe 71) gesenkt werden. Im Allgemeinen ist die Auftragschweißung von höchstabrasionsbeständigen Werkstoffen mit geringer Streckenenergie durchzuführen. Hauptgrund ist der schon erwähnte Aufmischungsgrad. Zudem ist eine zu große thermische Belastung des Grundwerkstoffs zu vermeiden.

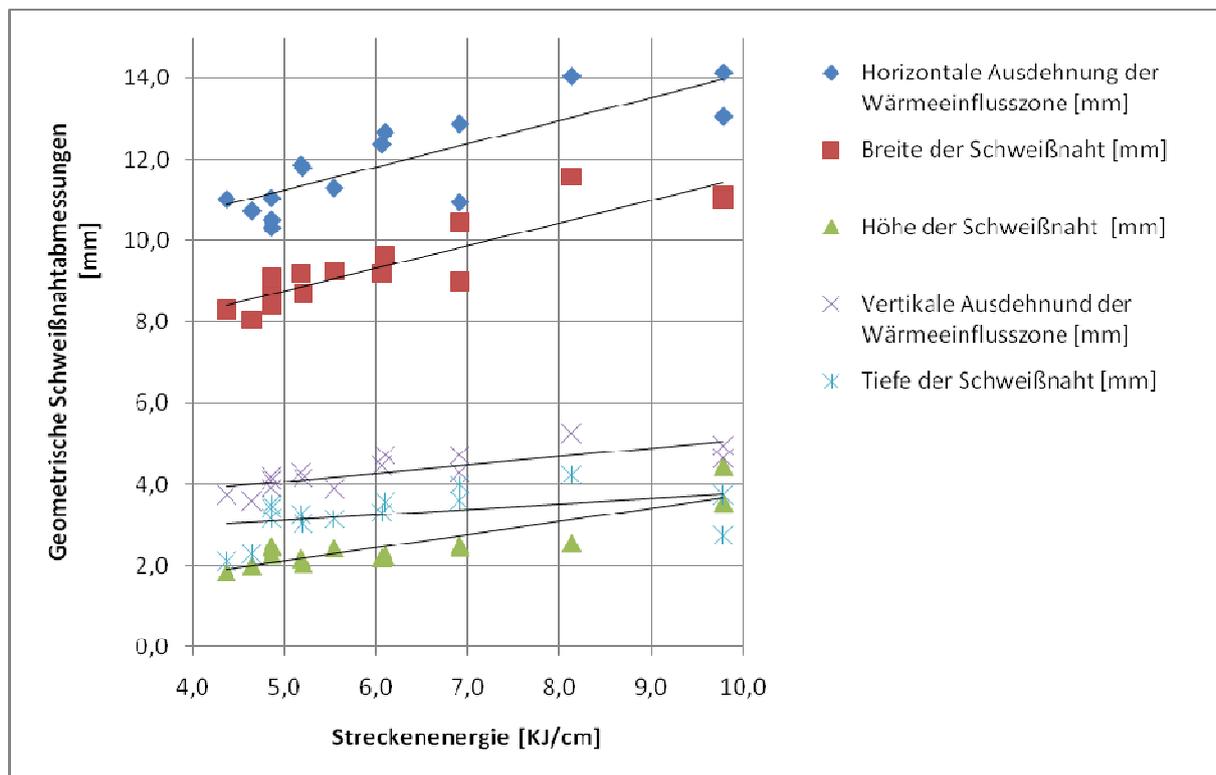


Abb. 8.7: Einfluss der Streckenenergie auf die geometrischen Schweißnahtabmessungen, Schweißzusatz UTP A DUR 650

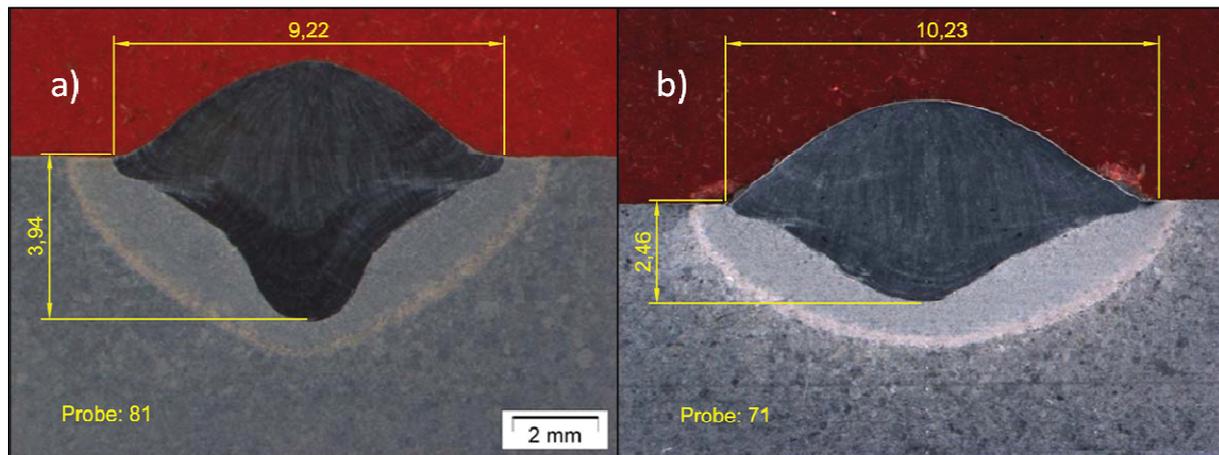


Abb. 8.8: Gegenüberstellung von a) Probe 81 mit DUR 650 und b) Probe 71 mit DURMAT FD 601, Streckenenergie 5,9 kJ/cm

Die zum Auftragschweißen bestimmten Sichelzähne stehen alle im wärmebehandelten Zustand zu Verfügung. Ein zu starker Wärmeeintrag kann zu einer großen ausgeprägten Wärmeeinflusszone führen, welche den mechanischen Eigenschaften des zuvor wärmebehandelten Sichelzahns nicht mehr entspricht. Im Einsatz können daraus unzulässige plastische Verformungen durch Festigkeitsverringerungen und starker abrasiver Verschleiß durch den Verlust der Härte resultieren. Wenn Fülldrähte mit Karbidfüllung oder anderen Hartstofffüllung in Verwendung sind, ist darauf zu achten, dass diese nicht zur Gänze im Lichtbogen aufgeschmolzen werden, sondern in Form von Körnern in der Matrix verbleiben. Eine zu geringe Streckenenergie kann zu einer schlechten Bindung zum Grundwerkstoff führen. Zudem muss eine metallische Bindung zwischen eingelagertem Hartstoff und der Schweißnahtmatrix bestehen.

Durch die unterschiedliche Wärmeeinbringung durch die Variation der Streckenenergie lässt sich die Härte der Schweißnaht tendenziell beeinflussen. Durch die Verringerung der Streckenenergie von 6,9 kJ/cm auf 5,5 kJ/cm, kann eine Härtesteigerung von ca. 30 HVI vernommen werden. Diese Abhängigkeit der Härte von der Streckenenergie kann bei Schweißungen mit Impulsprogrammen beobachtet werden, bei Schweißungen im Standardbetrieb ist ein solches Verhalten nicht detektierbar. Durch den Einsatz einer geringeren Streckenenergie ist ein geringerer Abfall der Härte in der Wärmeeinflusszone erkennbar, welcher sich schneller in Abhängigkeit des Abstands auf den ursprünglichen Härtewert einstellt.

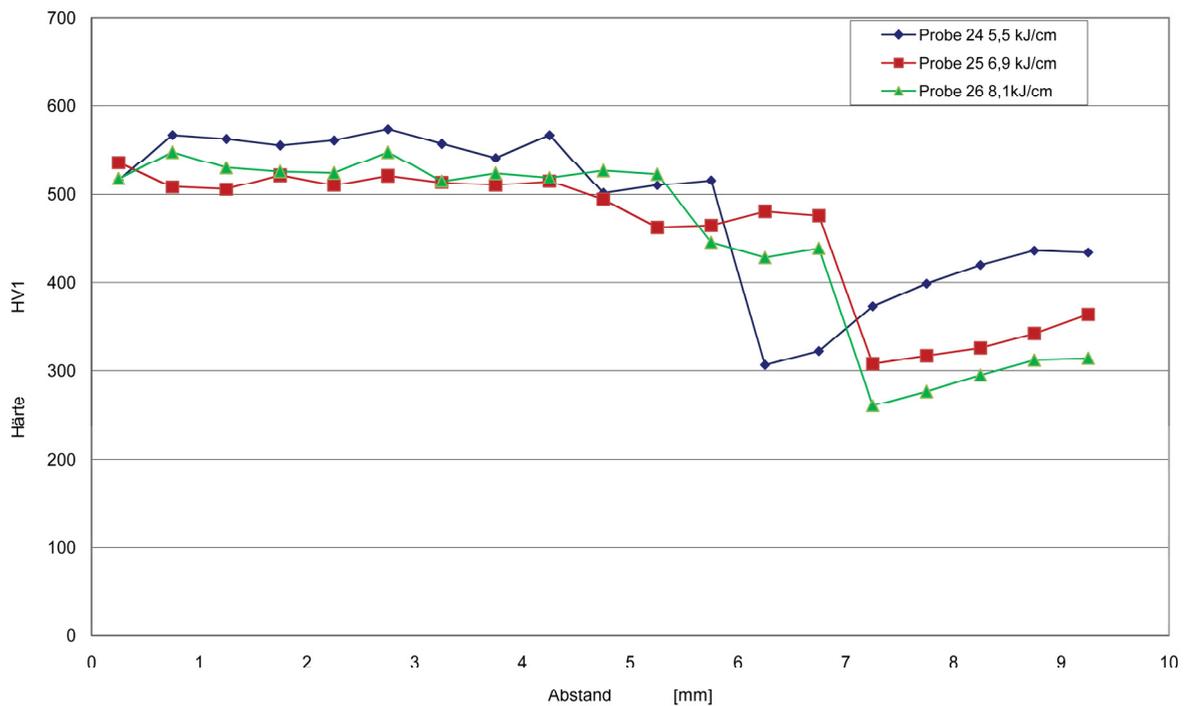


Abb. 8.9: Einfluss der Streckenenergie auf den Härteverlauf der Proben 24, 25 und 26, Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650

Alle Proben für die Gegenüberstellung der Härte in Abb. 8.9 weisen denselben Grundwerkstoff *27MnCrB5-2* und verwendeten Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650 auf. Die Position der Wärmeeinflusszone der Schweißung kann anhand des Härteabfalls bestimmt werden. Im Bereich der WEZ ist eine Härte von *300 HV1* messbar, der vergütete Grundwerkstoff weist eine Härte von rund *400 HV1* auf.

8.3. Einfluss Karbideinstreuung

Durch das angewendete „Einstreuselverfahren“ mit den in das flüssige Schmelzbad eingebrachten Hartstoffen kommt es zu starken Einflüssen auf den Schweißprozess. Durch das temporäre Aufschmelzen der eingesetzten Wolframkarbide bzw. in den ersten Versuchen mit Siliziumkarbid im Lichtbogen, kommt es bei gleicher Streckenenergie zu einer geringeren Aufschmelzung des Grundwerkstoffs. Bei einer zu geringen Streckenenergie bzw. einer zu hohen Einstreudichte kommt es zu keiner Bindung mit dem Grundwerkstoff. In Abb. 8.10 sind zwei Schweißproben mit ähnlicher Streckenenergie und unterschiedlicher Siliziumkarbid-Einstreumenge gegenübergestellt. Durch die zu geringe Streckenenergie, bei der Probe 20, kommt es nur noch zu einer sehr geringen Aufschmelzung des Grundwerkstoffs. Durch eine Erhöhung der Streckenenergie und einer Anpassung der Einstreuung kann die Anbindung am Grundwerkstoff verbessert werden, siehe Abb. 8.10 a).

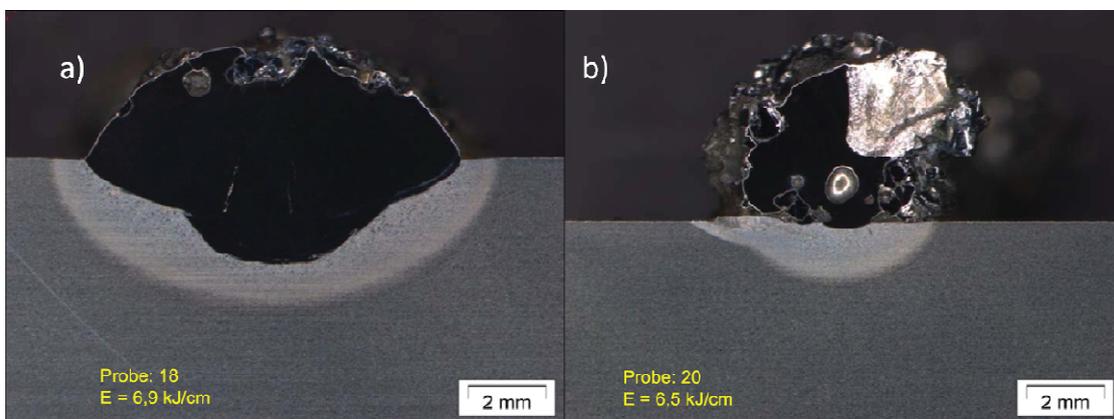


Abb. 8.10: Schweißnaht mit UTP A DUR 650 und unterschiedlicher Siliziumkarbid-Einstreumenge, a) Streckenenergie von 6,9 kJ/cm, b) Streckenenergie von 6,5 kJ/cm

Durch die Einstreuung von Siliziumkarbid in den Lichtbogen kommt es zur Zersetzung der Hartpartikel und dadurch zu einer starken Aufgliederung der Matrix. Weiters treten an der Stelle ehemaliger Karbide vermehrt Poren auf. Beim Zuführen von Wolframkarbid in die Schweißnaht wird dieses nur partiell aufgeschmolzen. Diese Energie muss zusätzlich bei der Einstellung des Schweißprozesses berücksichtigt werden. Einen weiteren Einfluss auf das Schweißergebnis hat die Art der Einstreuung. In Abb. 8.11 sind Schweißungen mit selber Streckenenergie und unterschiedlichen Einstreuverfahren gegenübergestellt.

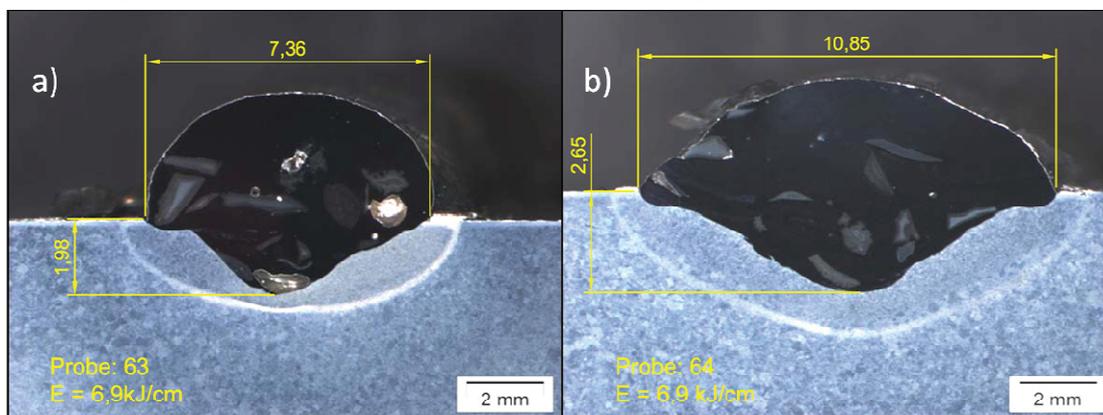


Abb. 8.11: Vergleich unterschiedlicher Einstreuverfahren, UTP A DUR 650 mit Wolframkarbid-Einstreuung a) Vorab auf das Blech Aufgetragen, b) mittels Einblasrohr

Die Probeschweißung mit der Probennummer 63 wird mit vorab auf das Blech aufgestreuten Karbiden durchgeführt. Durch diese Herstellungsmethode ist eine starke Konzentration von Karbiden im Bereich der Einbrandfläche festzustellen. Zudem weist diese Probe einen kerbscharfen Nahtübergang zum Grundwerkstoff auf. Dieser Nahtübergang kann bei einer zyklischen Belastung als potentieller Anrissort dienen. Bei einer mehrlagigen Schweißung kann eine solch steile Schweißnahtflanke mit teilweisen Hinterschneidungen zu Bindefehlern und teilweise auch zu Porenbildung führen. Durch eine definierte Einstreuung der Karbide mit einer Karbidzuführung kann ein wesentlich besseres Ergebnis erzielt werden. Die in Abb. 8.11 dargestellten Probe 64 weist eine deutlich homogenere Verteilung der Wolframkarbide auf. Eine vollständig über den ganzen Querschnitt verteilte Karbideinstreuung kann durch den Dichteunterschied von flüssiger metallischer Schmelze auf Eisenbasis und den Wolframkarbiden in einer Schweißnaht nicht hergestellt werden. Um eine annähernd gleichmäßige Verteilung zu erlangen, ist wie bereits erwähnt eine Mehrlagenschweißung erforderlich. Beim Vergleich von zwei Schweißnähten, mit und ohne Karbideinstreuung, kann eine Veränderung der geometrischen Abmessungen beobachtet werden. Bei den in Abb. 8.12 dargestellten Proben mit den Nummern 81 und 84 handelt es sich um Schweißungen mit dem Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650 mit dem Grundwerkstoff $27MnCrB5-2$. Bei den Proben 81 und 84 liegt die Streckenenergie bei $5,5$ und $5,8$ kJ/cm .

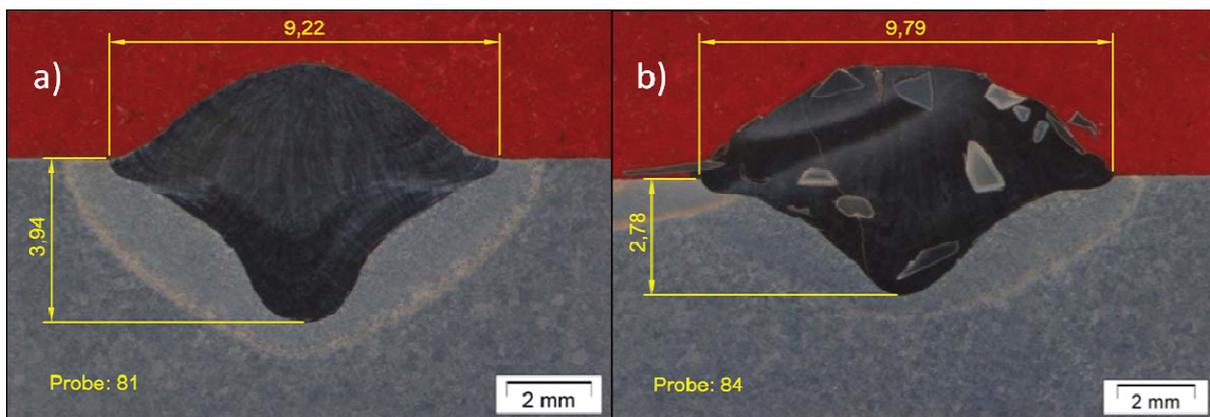


Abb. 8.12: Vergleich der geometrischen Abmessungen mit und ohne Karbideinstreuung, Streckenenergie a) $5,5$ kJ/cm , b) $5,8$ kJ/cm

Bei der Probe 84 mit Karbideinstreuung ist die Streckenenergie geringfügig um $0,8$ kJ/cm höher, da dies bei Schweißungen mit Karbideinstreuung die Prozesssicherheit erhöht. Bei Probe 84 ist ein Karbidförderstrom von $2,51$ g/s eingestellt und das „Einblasrohr“ in Verwendung. Trotz der geringfügig höheren Streckenenergie weist die Probe mit der Nummer 84 eine um $29,4\%$ geringere Tiefe der Schweißnaht auf, als die der Probe 81. Die Schweißnahtbreite erhöht sich um $0,57$ mm auf $9,79$ mm . Die breitere Schweißnaht lässt sich durch den höheren Drahtvorschub und durch das zusätzlich eingebrachte Volumen der Wolframkarbide erklären. Der Aufmischungsgrad der Probe 84 weist einen Wert von $39,2\%$, der der Probe 81 von $59,8\%$ auf. Erweitert man die in Abb. 8.6 dargestellte Beziehung von Aufmischungsgrad und Streckenenergie ohne Karbideinstreuung mit den Werten mit einer Karbideinstreuung, kann man eine signifikante Abweichung des Aufmischungsgrads zu geringeren Werten hin erkennen (Abb. 8.13). Durch den Einsatz von Fülldrähten ist auch beim Einstreuselverfahren eine Optimierung des Schweißprozesses möglich. In Abb. 8.14 sind Längsschliffe der Proben 76 und 84 gegenübergestellt. Die Zahnproben tragen die gleiche Nomenklatur wie die entsprechenden Einzelproben.

Mit fünf sich überlappenden Schweißraupen lässt sich bei Verwendung des Fülldrahts DURMAT FD 601 mit Karbideinstreuung ein Aufmischungsgrad von 19 % erreichen. Die gleiche Schweißung mit UTP A DUR 650 ergibt einen Aufmischungsgrad von 36 %.

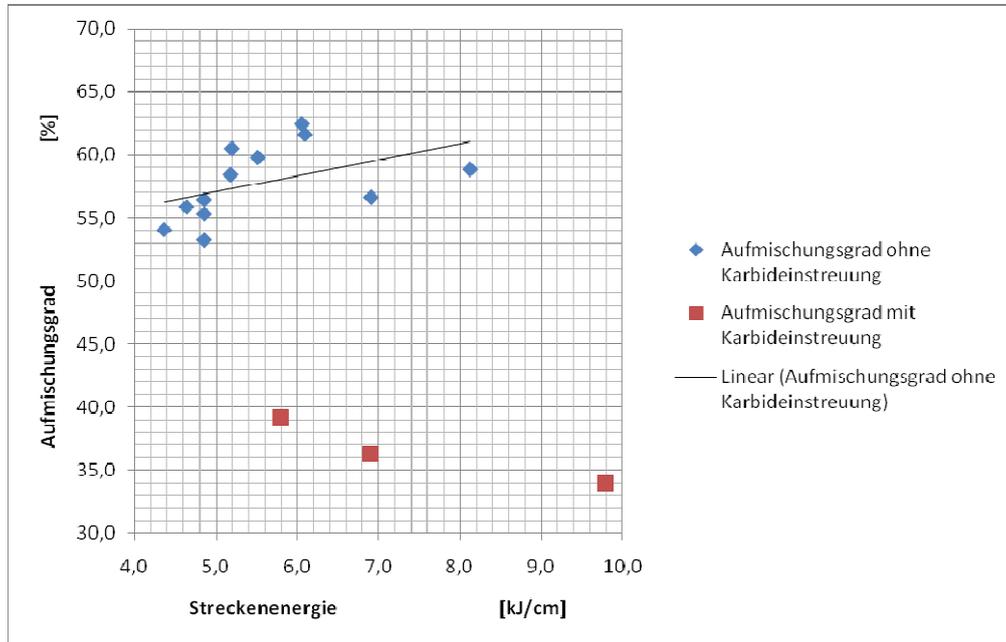


Abb. 8.13: Einfluss der Streckenenergie auf den Aufmischungsgrad, Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650

Die Schweißungen in Abb. 8.14 können insofern miteinander verglichen werden, da ihre Schweißnahtfläche im Längsschnitt des Sichelzahns mit $112,5 \text{ mm}^2$ und $119,1 \text{ mm}^2$ vergleichbar sind. Die aus der Schweißung resultierenden Streckenenergien von $5,8 \text{ kJ/cm}$ bei der Sichelzahnprobe 84 und $5,9 \text{ kJ/cm}$ bei der Schweißung auf Sichelzähnen mit der Nummer 76 sind ebenfalls ähnlich. Auffallend sind bei der Sichelzahnprobe die unterschiedlichen Tiefen der einzelnen Schweißraupen. Bei der Sichelzahnprobe 76 ist der Einbrandverlauf sehr konstant in der Tiefe, dagegen sind im Schlibbild der Probe 84 tiefe Einbrände jeder Schweißraupe ersichtlich. Erwähnenswert sind die unterschiedlichen Wolframkarbidanteile in der Schweißung. Mit dem Fülldrahtzusatzwerkstoff DURMAT FD 601 lassen sich tendenziell höhere Karbidanteile in der Schweißnaht verwirklichen. Dies ist auf den feineren Tropfenübergang beim Schweißen mit Fülldrähten zurückzuführen.

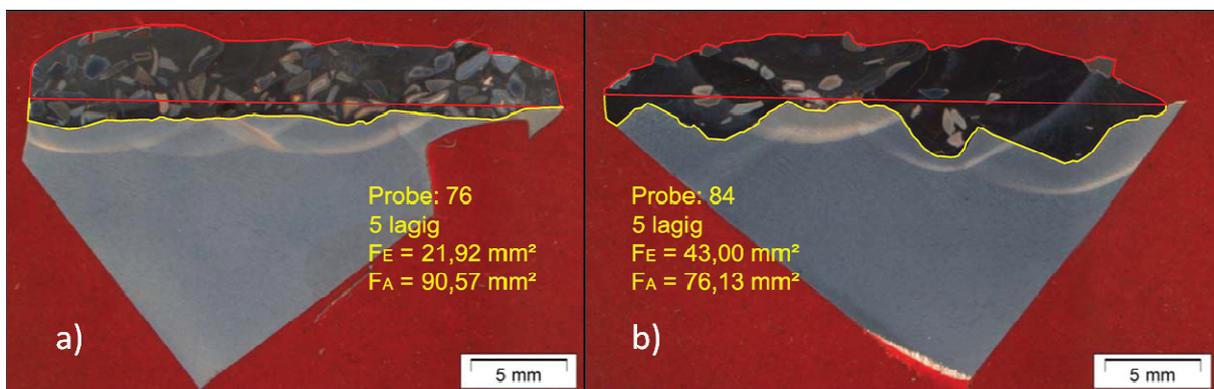


Abb. 8.14: Gegenüberstellung der Längsschliffe von karbidaufgeschweißter Sichelzähnen a) mit Fülldraht und b) mit Massivdraht (Zahnspitzen zueinander positioniert)

9. Prüfstandversuche

Für die Auswahl der Schweißzusatzwerkstoffe und für die Optimierung des Schweißprozesses sind Prüfstandversuche an den geschweißten Sichelzähnen unerlässlich. Im realen Betrieb sind die Sichelzähne einer komplexen mechanischen und abrasiven Belastung ausgesetzt, welche nur unter enormen Aufwand in Prüfanlagen reproduziert werden kann. Für die durchzuführenden Untersuchungen an den geschweißten Sichelzähnen wurde die reale Beanspruchung in ihre zwei dominierenden Arten zerlegt:

- Verschleißuntersuchungen an Sichelzähnen
- Schwingversuche um die schlagende zyklische Beanspruchung im realen Betrieb zu verifizieren.

Um die Versuche mit den Ergebnissen im realen Betrieb vergleichen zu können ist eine Kombination aus beiden Beanspruchungsarten zu berücksichtigen.

Durch die Eigenheiten der Formgebung der Sichelzähne sind keine auf dem Markt befindlichen Prüfmaschinen für die anstehenden Versuche ohne Adaption einsetzbar. Für jeden der zwei Versuchsarten sind eigene Prüfstände und Aufbauten erforderlich.

9.1. Verschleißuntersuchungen an Sichelzähnen

9.1.1. Versuchsaufbau Verschleißprüfstand

Das Ziel der Verschleißuntersuchungen ist es, den im realen Betrieb auftretende Verschleiß an den Sichelzähnen in wenigen Stunden oder Tagen unter Laborbedingungen reproduzierbar nachprüfen zu können. Da die Dimension der Sichelzähne und die aufgetragenen Panzerungen für höchste Ansprüche ausgelegt sind, ist eine massive Konstruktion des Prüfstands unerlässlich (Abb. 9.1). Der Prüfstand ist als Rührwerk ausgeführt, die Sichelzähne rotieren auf einer Kreisbahn im Verschleißmaterial. Die Sichelzähne werden auf der Aufspanscheibe angeschraubt. Die Aufspanscheibe rotiert mit einer Drehzahl von $44,4 \text{ U/min}$. Angetrieben wird der Verschleißprüfstand von einem Asynchrontriebemotor mit einer Leistung von $7,5 \text{ kW}$. Das maximal aufzubringende Moment an der Aufspanscheibe beträgt 1564 Nm . Ausgelegt ist dieser Prüfstand für die Aufnahme von sechs Sichelzähnen. Je drei sind alternierend nach innen und nach außen geneigt. Dies soll ein Freifahren der Spur im Verschleißmaterial verhindern. Bei den Vorversuchen sind aber ausschließlich die nach außen geneigten Montageplätze mit Sichelzähnen bestückt, um eine gleiche zurückgelegte Distanz der Zahnspitzen im Verschleißmaterial zu gewährleisten.

Beim Zerkleinern von Holzigen Altstoffen können Fremdstoffe wie z.B. Gestein oder metallische Verunreinigungen in Kontakt mit den Sichelzähnen treten. Ein solcher Fremdeinschluss bzw. Fremdkörper erhöht den abrasiven Verschleiß am Sichelzahn. Um die Werkzeugstandzeit zu erhöhen, sind die Schneidwerkzeuge auf solche Störstoffe auszulegen und daher wurde als Verschleißmaterial harte abrasionsverschleißfördernde Materialien für die Untersuchungen verwendet.

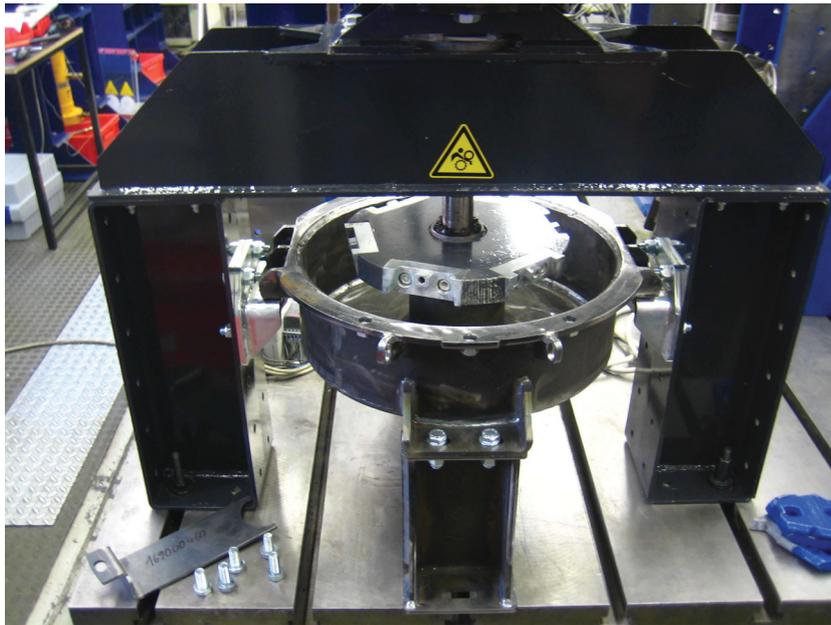


Abb. 9.1: Verschleißprüfstand mit Aufspanscheibe, Trog und Rahmenkonstruktion [25]

Erste Versuche mit Stahlschrot, welche für Strahlanlagen für die Oberflächenbehandlung ursprünglich bestimmt ist, zeigen ein nicht zufriedenstellendes Ergebnis. Die Sichelzähne, welche zwölf Stunden im Versuch mit Stahlschrot geprüft worden sind, zeigen nur minimale Verschleißanzeichen. Um den Verschleiß quantitativ zu erfassen, wird der Gewichtsverlust pro Prüfeinheit gemessen und dokumentiert.

Nach den ersten Erkenntnissen des Vorversuchs wurde Verschleißmaterial von Stahlschrot auf Granitkiesel mit einer Korngröße von 25 bis 40 mm umgestellt. Mit dem Granitkiesel ist im Vergleich zu den Versuchen mit Stahlschrot ein deutlicher Verschleiß zu detektieren. Für eine weitere Versuchsreihe war als Verschleißmaterial Quarzit in Verwendung. Der zur Verfügung stehende Quarzit besitzt eine Korngröße von 20 bis 60 mm. Im Vergleich zum Granit zeichnet sich der Quarzit durch eine höhere Härte aus, aus ersten Beobachtungen ist aber ein schnelleres Brechen des Quarzits gegenüber dem Granit feststellbar. In Abb. 9.2 ist die benötigte Füllhöhe von stückigem Verschleißmaterial abgebildet. Diese Füllhöhe wird benötigt, da durch die Zerkleinerung das Schüttvolumen des Verschleißmaterials verringert wird, aber ein Fahren der Zahnspitzen im Quarzit während der gesamten Prüfzeit gewährleistet werden muss. Beim Anfahren des Versuchs mit neu gewechseltem Verschleißmaterial ist darauf zu achten, dass es nicht zu Blockaden kommt. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, ist ein mehrmaliges Wechseln des Verschleißmaterials nötig. Durch den Zerkleinerungseffekt verringert sich die Korngröße auf ca. 20 mm. Die größte Veränderung des Verschleißmaterials kann in den ersten Minuten ab Versuchsstart vernommen werden. In dieser Zeit wird der Großteil des Quarzits gebrochen. Bei fortgeschrittener Versuchsdauer kann nur noch ein Rühren bzw. ein Umpflügen des gebrochenen und teilweise schon gemahlene Quarzit durch die Sichelzähne detektiert werden. Zudem kommt es sehr schnell zu Verschiebungen des Verschleißmaterials zu Positionen im Trog, welche nicht mehr von den Sichelzähnen erfasst werden können. Es ist auch Absinken von noch stückigem Quarzit feststellbar.

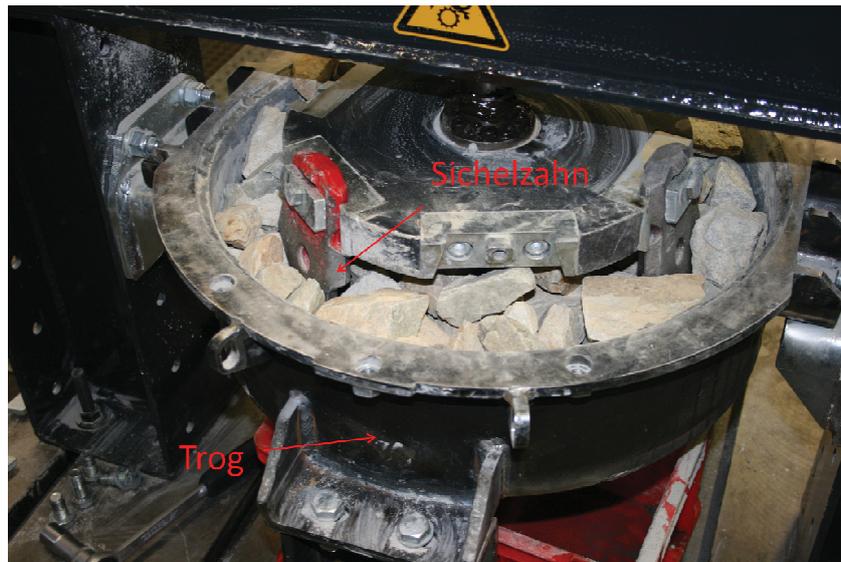


Abb. 9.2: Aufgeschraubter Sichelzahn mit Quarzit als Verschleißmaterial [25]

Um eine bessere Ausnutzung des Verschleißmaterials zu erzielen und den Verschleiß an den Sichelzähnen zu erhöhen wurde seitlich an der Trogwand eine Brecherbarriere eingeschweißt. Zusätzlich wurde vor der Brecherbarriere eine zweite Barriere eingebaut worden, welche das sich in Bewegung befindliche Verschleißmaterial bremsen soll. Dies hat den Zweck, dass die Sichelzähne das Verschleißmaterial mit mehr Gegendruck verdrängen und gegebenenfalls nochmal brechen. Wichtig ist das Einstellen des richtigen Spaltmaßes zwischen Sichelzahn und Brecherbarriere. Eine Kollision von einem Sichelzahn und der Brecherbarriere muss im Vorfeld ausgeschlossen werden. Durch diese Maßnahme konnte eine Erhöhung des Verschleißes gemessen werden. Um die Prüfzeiten weiter zu senken, war die Montage weiterer Brecherbarrieren zweckdienlich. Diese sollten aber beidseitig angebracht werden, um einen gleichmäßigen Verschleiß der Sichelzähne zu erhalten. Durch den Einsatz anderer Verschleißmittel, kann der Prüfablauf und die Prüfzeit weiter beeinflusst werden.

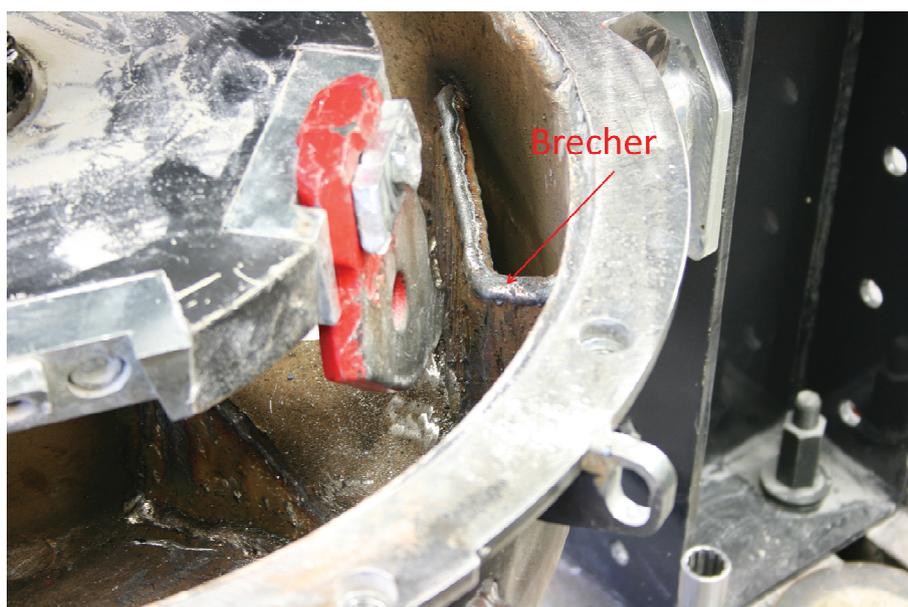


Abb. 9.3: Brecherbarriere im Trog des Verschleißprüfstands [25]

9.1.2. Auswertung und Ergebnisse

In Abb. 9.4 ist der Massenverschleiß Δm von zwei Versuchsserien über die Anzahl der Schotterwechsel aufgetragen. Die in Abb. 9.4 verwendeten Verschleißmaterialien sind Hüttenschlacke, genauer LD-Schlacke und Quarzit. Die strichliert dargestellten Verschleißkurven sind der ersten Versuchsserie zuzuordnen. Die zweite Versuchsserie ist mit Volllinien im Diagramm dargestellt. Die erste Versuchsserie ist nach acht Schotterwechseln beendet worden. Der durchschnittliche Verschleiß eines nicht aufgeschweißten Zahns mit Quarzit als Verschleißmittel beläuft sich auf 4 g pro Schotterwechsel. Durch den Einsatz der Brecherbarriere kann der Verschleiß pro Füllung um 1 g auf 5 g gesteigert werden. Bei den aufgeschweißten Zähnen ist ein Verschleiß ohne Brecher von durchschnittlich 2 g pro Schotterwechsel gemessen worden. Durch die Brecherbarrieren ist auch bei aufgeschweißten Zähnen eine Verschleißsteigerung von 1 g festzustellen. Diese Werte sind sowohl bei den Benchmarkzähnen als auch bei den Eigenanfertigungen zu beobachten. Die erste Versuchsserie ist, bis auf anders gekennzeichnet, mit Quarzit als Verschleißmaterial geprüft. Die zweite Versuchsserie wurde mit LD-Schlacke angefahren. Durch einen abflachenden Verschleißverlauf der zweiten Versuchsserie ist wieder ein Wechsel auf ein mineralisches Verschleißmittel wie Granit oder Quarzit angedacht. Weiters ist der Einsatz zusätzlicher Brecherbarrieren geplant.

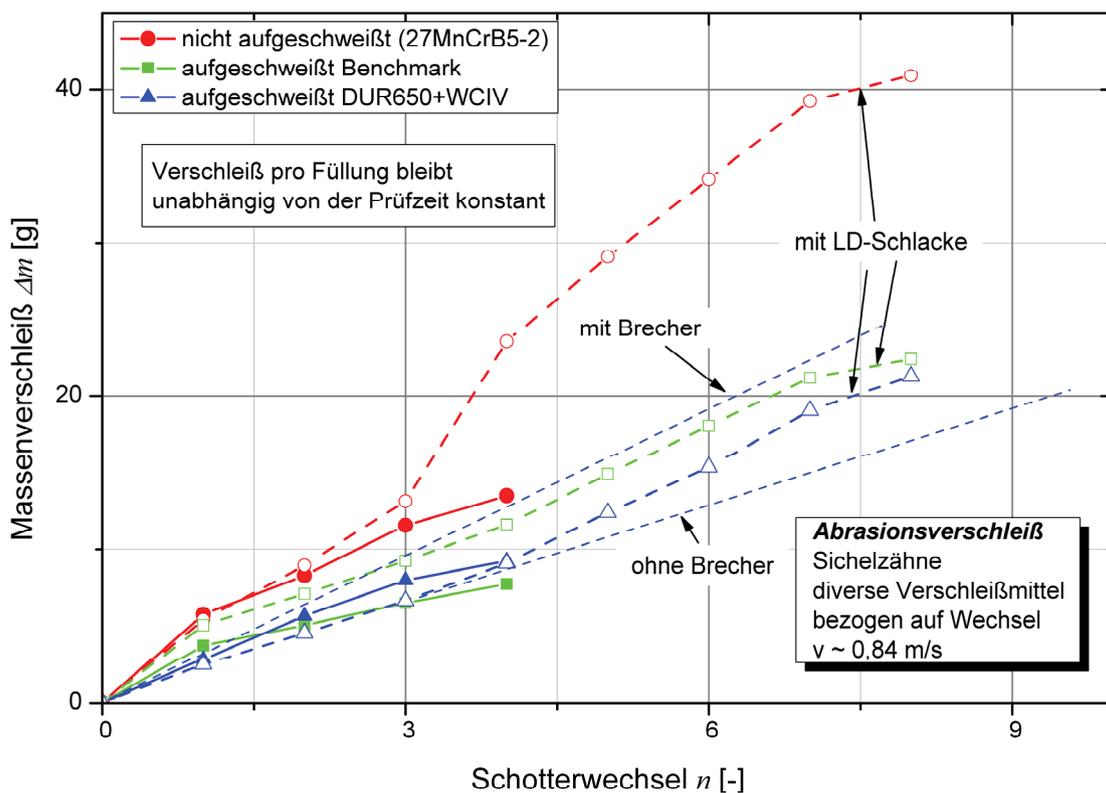


Abb. 9.4: Ergebnisse der ersten (strichliert) und zweiten (Volllinie) Versuchsserie an geschweißten Sichelzähnen [25]

Zusätzlich zur Verschleißbestimmung mit Hilfe der Gewichtserfassung der geprüften Sichelzähne, wird eine optische Bewertung der Zähne durchgeführt. Erste Ansätze den Verschleiß der Zähne quantitativ über ein optisches Verfahren zu erfassen, erwies sich

aufgrund der Dreidimensionalität des Verschleißes am Zahn nicht zielführend. In Abb. 9.5 sind drei Sichelzähne der ersten Versuchsserie gegenübergestellt.

Bei allen Sichelzähnen ist nach der ersten Begutachtung, beim ersten Schotterwechsel, ein Verschleiß an der Schneidkante erkennbar. Bei den aufgepanzerten Sichelzähnen sind bei der ersten Begutachtung teilweise Abplatzungen der Panzerung an den Kanten detektierbar. Die ausgeprägte, raue Oberfläche, durch teilweise herausragende Karbide zurückzuführen, wird durch Verschleiß geglättet. Beim Benchmark Sichelzahn ist durch die spitze Zahnform ein frühes Abbrechen der Schneidecken erkennbar. Bei den weiteren Begutachtungen im Prüfbetrieb ist es zu keinen weiteren Ablösungen der Panzerung gekommen. Nach einer Prüfzeit von 41 h sind erste Verschleißerscheinungen bemerkbar. Nach 282 h Prüfzeit ist ein ausgeprägter Verschleiß am ungepanzerten Zahn erkennbar, siehe Abb. 9.5 rechts oben. Es ist eine starke Verrundung der Zahnspitze erkennbar. Diese Geometrieänderung infolge des Verschleißes, ruft höhere Schnittkräfte am Zahn hervor. Bei den aufgepanzerten Zähnen sind kaum Verschleißerscheinungen an der Zahnspitze erkennbar. Jedoch ist mit zunehmender Prüfdauer ein Hinterschleifen der Schweißnaht im Grundmaterial an diesen Zähnen erkennbar. Das Hinterschleifen wirkt sich auf die Festigkeit negativ aus, da der Stützquerschnitt der Schweißnaht geschwächt wird. Dadurch können bei hohen Schnittkräften plastische Verformungen der Zahnspitze bzw. deren Bruch eintreten. Für die weiteren Auftragschweißungen ist eine optimierte flachere Form der Schweißnaht anzustreben. Die hohe Schichtdicke des Zahns mit UTP A DUR 650 und Wolframkarbid mit Kobaltbindung in Abb. 9.5, zeigt keine verschleißtechnischen Vorteile gegenüber dem Benchmark-Zahn. Durch eine optimierte Schweißparameterwahl und mehrlagiger Schweißung sollten jedoch gepanzerte Zähne, welche der Zielvorgabe entsprechen, realisierbar sein. Der Einsatz von Hüttenschlacke zur Erhöhung von Verschleiß hat sich nicht behaupten können. Zurzeit wird mit einem Satz Sichelzähne ein Prüfprogramm mit neun Füllungen, das entspricht acht Schotterwechsel, zu je zwölf Stunden gefahren. Es ist zu überprüfen in wie weit die Prüfzeit je Schotterwechsel verringert werden kann um noch ein aussagekräftiges Resultat zu erhalten.

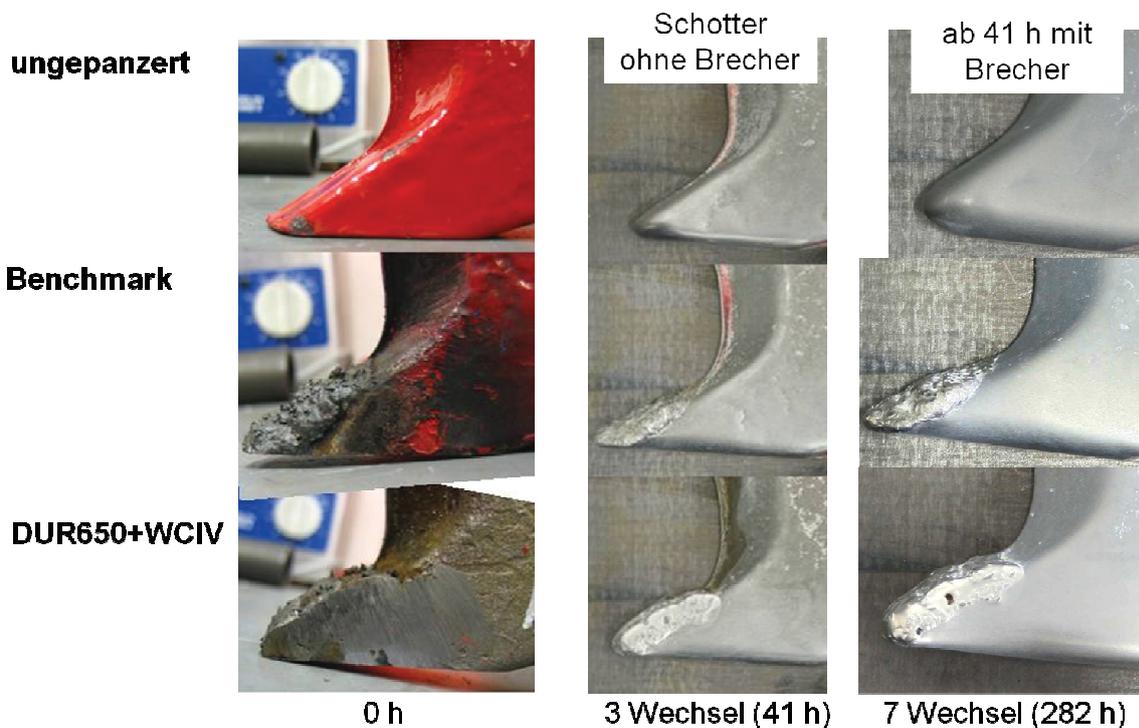


Abb. 9.5: Optischer Vergleich der Zahnspitzen nach dem Verschleißversuch der ersten Versuchsserie

[25]

9.2. Kurzzeitfestigkeitsuntersuchungen an Sichelzähnen

9.2.1. Versuchsaufbau Prüfstand

Auf die Sichelzähne wirken im realen Betrieb enorme Schlagbeanspruchungen. Um diese Beanspruchungen reproduzierbar am Sichelzahn prüfen zu können, ist folgender Prüfprozess erarbeitet worden. Als maßgeblich schädigende Belastung des Zahns wird die Biegebeanspruchung der Zahnspitze festgelegt. Im realen Betrieb tritt diese Belastung beim Eindringen der Zahnspitze in das zu zerkleinernde Material auf. In Abb. 9.6 ist der Angriffspunkt der Prüfkraft mittels Druckstück auf den Sichelzahn ersichtlich. An den aufgeschweißten Zähnen kann es wegen den geometrischen Abweichungen der Schweißnaht zu Verschiebungen des Kraftangriffspunkts kommen. Um diese Verschiebung zu vermeiden kann ein Planschleifen der Schweißnahtoberfläche erfolgen. Durch das Planschleifen wird das Ergebnis jedoch beeinflusst da vorhandene Kerben und Anrisse an der Schweißnahtoberfläche beseitigt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung von unterschiedlichen Kraftangriffspunkten ist der Einsatz von einem gegenüber der Schweißnaht weicherem Druckstück. Bei dieser Ausführung werden Unebenheiten der Zahnpanzerung vom Druckstück ausgeglichen, bis vom Druckstück die Prüfkraft vollflächig übertragen wird. Durch eine geometrische Vermessung des Angriffspunkts am Druckstück kann mit Hilfe einer Korrekturrechnung die wirklich vorhandene Spannung im Querschnitt berechnet werden. Zum Vergleich der einzelnen Sichelzähne miteinander wird diese ermittelte Spannung im Prüfquerschnitt herangezogen. Ein weiterer Einfluss hat die Schweißnahtdicke auf das Prüfergebnis. Durch das Auftragschweißen am Sichelzahn wird der Querschnitt des Zahns verändert. Um die erzielten Ergebnisse untereinander vergleichen zu können, ist eine mechanische Bearbeitung der aufgezpanzten Sichelzähne auf eine Normgeometrie möglich. Eine weitere Vorgehensweise ist die Erfassung des tatsächlichen Prüfquerschnitts und die Berechnung der Spannung in diesem Prüfquerschnitt.

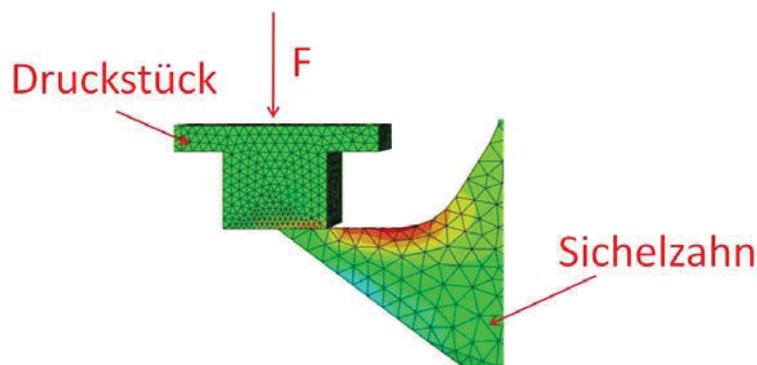


Abb. 9.6: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus (mit Sichelzahn und Druckstück) und numerische Simulation der Beanspruchung [25]

Für die Untersuchung der Kurzzeitfestigkeit wird ein vordefiniertes Lastkollektiv verwendet. Die Prozessführung mit Lastkollektiv ist in Abb. 9.7 ersichtlich. In der ersten Phase (fünf Stufen) der Prüfung wird die Oberfläche des Druckstücks an die des Sichelzahns angeglichen. Pro Prüfstufe ist eine Lastspielzahl von 10.000 Zyklen vorgesehen. Ist die maximale Lastspielzahl pro Stufe erreicht, wird in die nächste höhere Lastkollektivstufe gewechselt. Bei Erreichen der 120 kN Stufe wird der Versuch weitergeführt, bis eine Gesamtprüfdauer von sechs Stunden erreicht ist. Beim Abbruch des Versuchs bei der Gesamtprüfdauer wird der Versuch als Durchläufer gewertet.

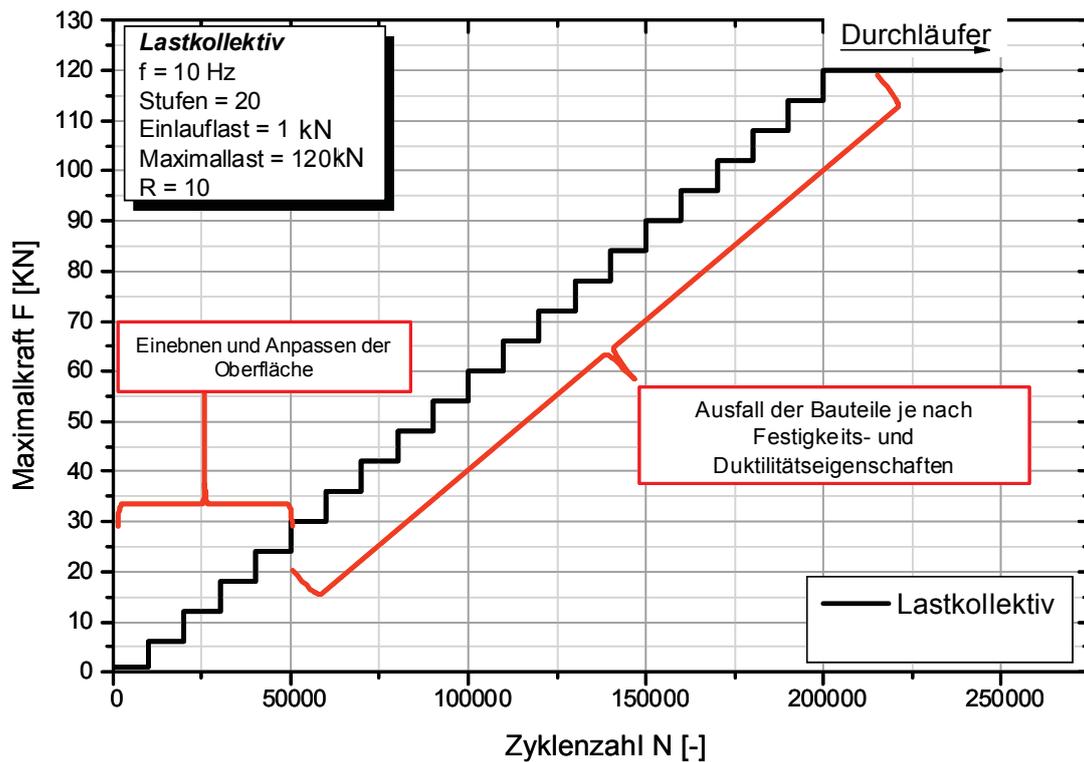


Abb. 9.7: Prüfablauf [25]

Die Einspannvorrichtung des Sichelzahns, siehe Abb. 9.8, ist der Konstruktion der realen Einspannung nachempfunden. Der Zahn ist von unten in die Einspannvorrichtung einzuschieben und zu verschrauben. Anschließend wird der Sichelzahn mit der Einspannvorrichtung unter dem Druckstück positioniert und auf das Aufspannfeld geschraubt, siehe Abb. 9.9. Die Aufnahme des Druckstücks ist mit einer Flanschverbindung am Hydropulszylinder befestigt. Zur Aufnahme von seitlichen Kräften wird die Kolbenstange mittels einer Linearführung geführt.

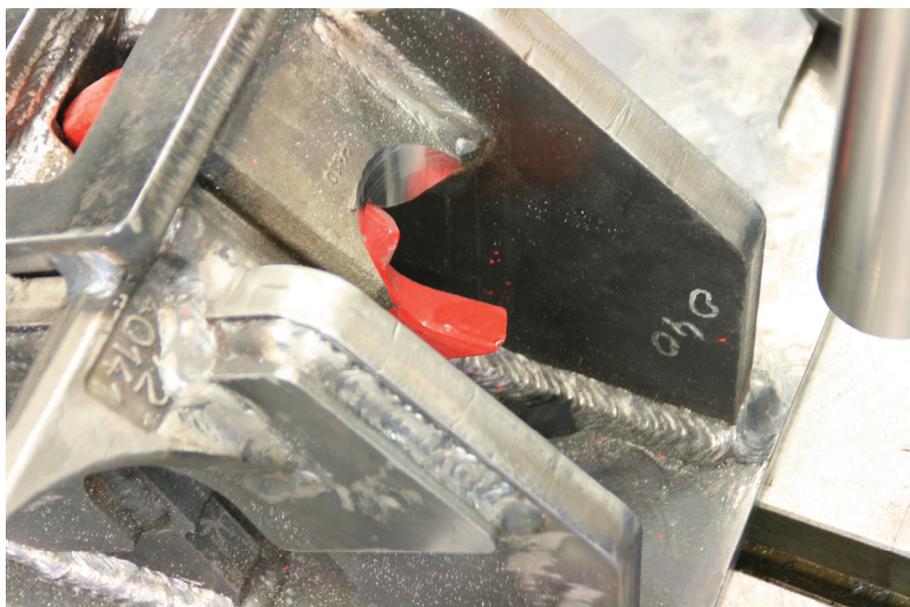


Abb. 9.8: Einspannvorrichtung des Sichelzahns [25]

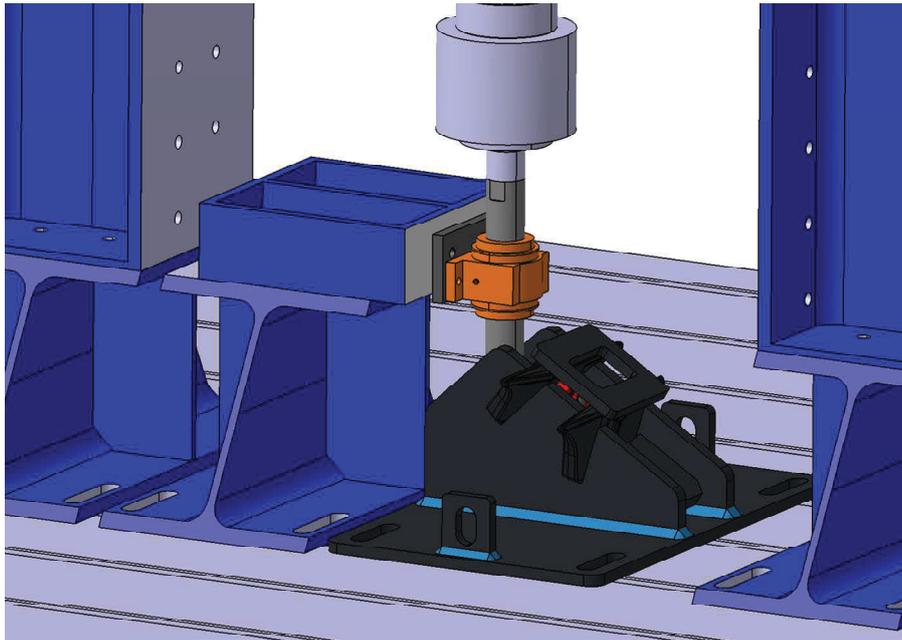


Abb. 9.9: Aufbau mit Linearführung und Kolbenstange [25]

Der Grundrahmen der Prüfanordnung ist als U-förmiger Rahmen ausgeführt und am Aufspannfeld verschraubt. Die Linearführung mit Konsole ist ebenfalls am Aufspannfeld befestigt und muss vor der Inbetriebnahme justiert werden. In Abb. 9.10 ist die Prüfanordnung inklusive der geführten Kolbenstange des Hydropulszylinders ersichtlic. Zurzeit ist eine Prüfung von zwei Sichelzähnen pro Druckstück möglich. Ziel einer Optimierung ist die Erhöhung der Anzahl der durchführbaren Versuche pro Druckstück.

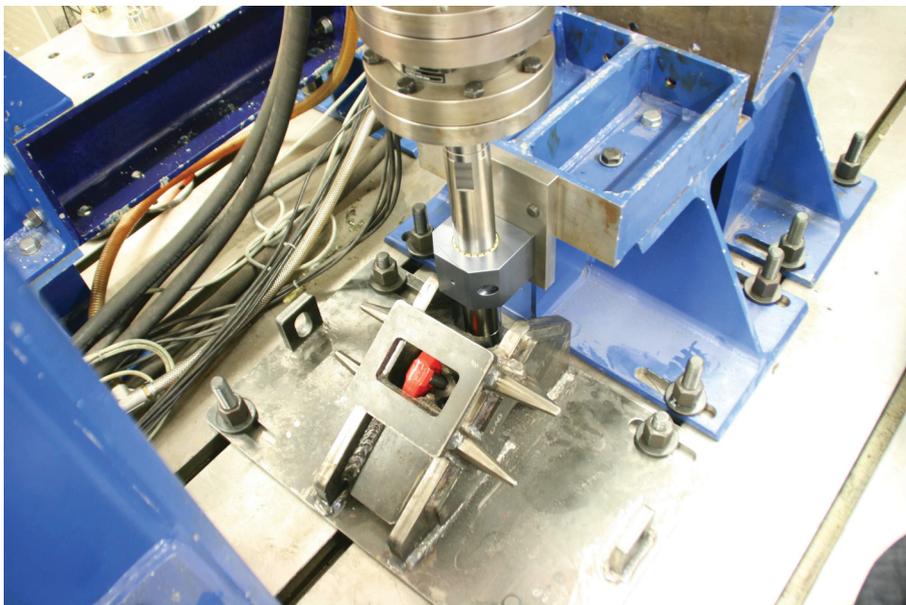


Abb. 9.10: Prüfanordnung für die Festigkeitsuntersuchungen [25]

9.2.2. Auswertung und Ergebnisse

In ersten Versuchen ist ein ungepanzertes Sichelzahn, ein Benchmark Sichelzahn und ein gepanzertes Sichelzahn mit Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650 und Wolframkarbid mit Kobaltbindung geprüft worden. Die erzielten Ergebnisse sind in Abb. 9.11 ersichtlich. Beim ungepanzten Sichelzahn wurde eine ertragbare Zykluszahl von 80002 Lastwechsel erreicht. Anzumerken ist, dass der Bruch unmittelbar beim Wechsel der Lastkollektivstufe erfolgte. Die somit erreichte Lastkollektivstufe neun besitzt eine maximale Kraft von 48 kN. Im Vergleich zum ungepanzten Sichelzahn weisen die gepanzerten Sichelzähne eine geringere ertragbare Zykluszahl auf. Bei den zwei geprüften Varianten von aufgeschweißten Sichelzähnen ist ein Versagen in der Lastkollektivstufe sieben mit einer maximalen Kraft von 36 kN aufgetreten. Der Benchmarkzahn weist eine ertragbare Zykluszahl von 69186 Lastwechsel auf. Der aufgeschweißte Sichelzahn mit UTP A DUR 650 erreichte eine um 6171 Lastwechsel geringere Lebensdauer.

Anhand dieser ersten Versuche sollten für die weiteren Untersuchungen eine Optimierung des Lastkollektivs durchgeführt werden. Da mit einem Versagen der ungepanzten Zähne in der jetzigen Stufe neun zu rechnen ist, kann mit einer Reduktion der Maximallast und Beibehaltung der Stufenanzahl eine besser Auflösung der Ergebnisse erzielt werden. Ziel dieser Optimierung des Lastkollektivs ist eine bessere Vergleichbarkeit der geprüften Zähne. Für die anschließende Prüfung der Versuchsserien sind mehrere Sichelzähne eines Typs zu prüfen, um eine statistisch gesichertes Ergebnis zu erhalten. Durch die unterschiedlichen geometrischen Abmessungen der Panzerungen an den Sichelzähnen eines Typs kann es zu erheblichen Schwankungen der Lebensdauer kommen. Um die Treffsicherheit zu verbessern können die unter Abschnitt 8.2.1 genannten Methoden zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse bzw. der Sichelzähne selbst angewandt werden.

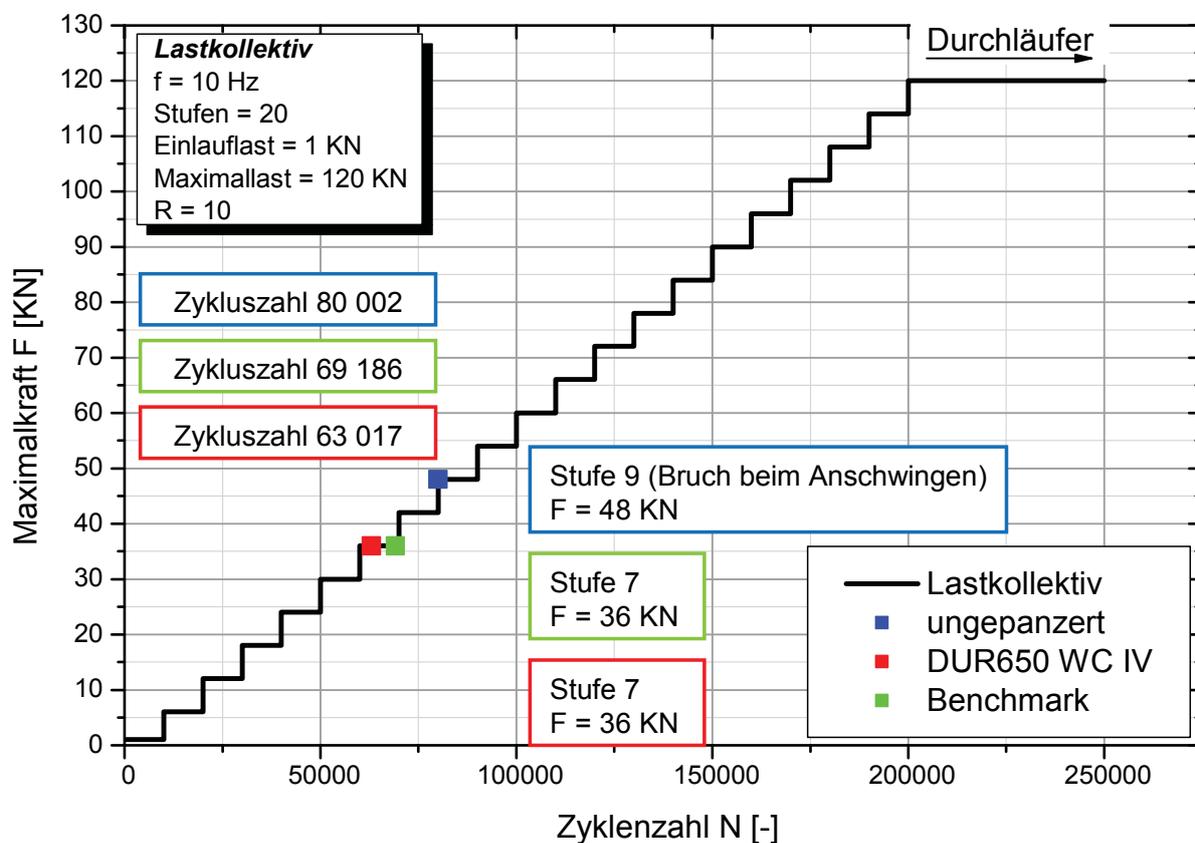


Abb. 9.11: Ergebnis des Vorversuchs der Kurzzeitfestigkeitsuntersuchung [25]

Um genauere Aussagen über die Rissinitiierung und den Bruchverlauf zu erhalten, ist eine Bruchflächenanalyse zusätzlich zu den Ergebnissen in Abb. 9.11 durchzuführen. In Abb. 9.12 ist das Versagensbild des ungepanzerten Zahns mit jenem des aufgepanzerten Zahns mit Zusatzwerkstoff UTP A DUR 650 und Wolframkarbid mit Kobaltbindung gegenübergestellt. Bei genauerer Betrachtung der Bruchflächen ist bei beiden Zähnen der Bruch im Bereich der Kontaktstelle zwischen Zahn und Druckstück initiiert worden. Beim ungepanzerten Zahn ist das Risswachstum in Krafrichtung und senkrecht zur Krafrichtung erfolgt, beim gepanzerten Zahn erfolgte das Risswachstum in Krafrichtung. Durch die im Gegensatz zum Grundwerkstoff 27MnCrB5-2 harte Schweißmatrix mit Karbiden ist ein schnelleres Risswachstum zu erwarten. In der Bruchfläche des aufgepanzerten Sichelzahns sind keine Bindefehler oder Poren ersichtlich. Durch das Brechen der Zähne nach dem Auftragschweißen sind die Seitenflächen des Sichelzahns zerklüftet, dieser Umstand kann zu einer Rissinitiierung führen. Der im Vorversuch verwendete aufgepanzerte Sichelzahn ist an den Seitenflächen plangeschliffen worden, siehe Abb. 9.12.

Ungepanzert

**Aufgepanzert mit
DUR650+WC IV**

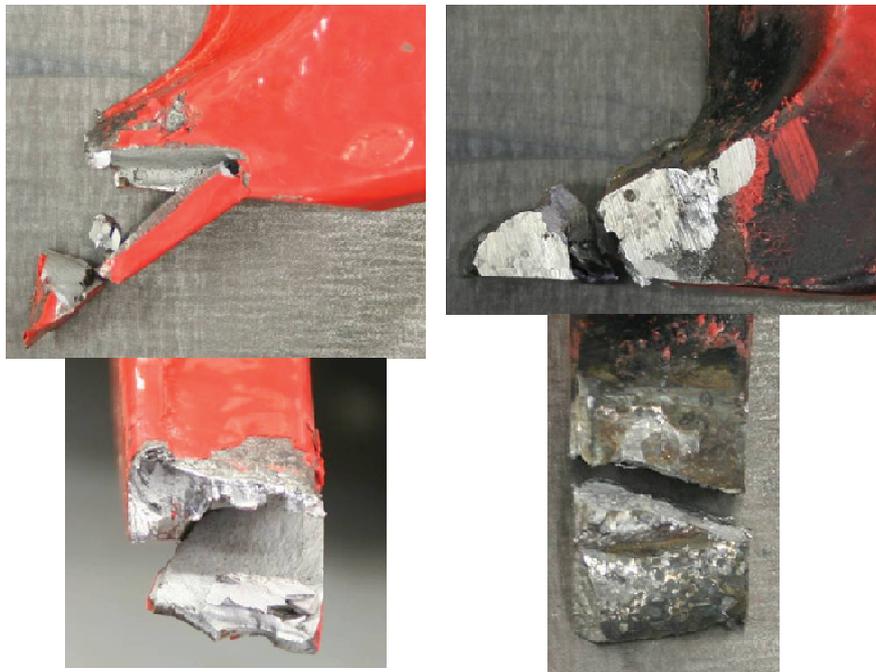


Abb. 9.12: Versagensbilder der Zähne nach der Kurzzeitfestigkeitsuntersuchung [25]

10. Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Einstreuselverfahren lassen sich hochabrasionsbeständige Panzerungen verwirklichen, welche den schlagenden Beanspruchungen von Schneidwerkzeugen in der Holz- und Müllaufbereitungsbranche standhalten. Die im Zuge dieser Untersuchung verarbeiteten Schweißzusatzwerkstoffe zeigen auch bei ähnlicher chemischer Zusammensetzung erhebliche Unterschiede im Schweißverhalten. Tendenziell ist bei einem gewünscht hohen Hartstoffanteil in der Schweißnaht die Fülldrahttechnologie zu bevorzugen und bei geforderter starker Bindung der Schweißnaht an das Grundmaterial ist die Massivdrahttechnologie anzuwenden. Essenziell für die Qualität der Schweißnaht ist ein kontinuierlicher Förderstrom der Hartstoffe, da es sonst bei zu starken Schwankungen zu Bindefehlern in der Schweißnaht oder es zu einem ungenügendem Aufschmelzen zwischen Schweißnaht und Grundwerkstoff kommen kann. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass Siliziumkarbid wegen des niedrigen thermischen Zersetzungspunkts ungeeignet für dieses Schweißverfahren als Hartstoff ist, hingegen erwiesen sich die Versuche mit Wolframkarbideinstreuung als zielführend. Die komplexen mechanischen und abrasiven Beanspruchungen im realen Betrieb wurden mit Hilfe von zwei unterschiedlichen Prüfmethode unter Laborbedingungen simuliert. Zur Untersuchung der abrasiven Beanspruchung steht ein Verschleißprüfstand und zur Analyse des Betriebsfestigkeitsverhalten ein Hydropulszylinder samt Einspannvorrichtung für den Sichelzahn zur Verfügung. Durch eine Kombination dieser beiden Beanspruchungsarten kann ein Rückschluss auf das reale Betriebsverhalten getroffen werden.

Für die Serienanwendung dieser Schweißtechnologie sind umfangreiche Untersuchungen nötig, da die Wahl der Zusatzwerkstoffe bzw. der Hartstoffe einen starken Einfluss auf den Schweißprozess ausübt. Ein weiterer Ansatzpunkt um die Prozesssicherheit zu gewährleisten, besteht in der Optimierung von Dosierung und Zuführung der Hartstoffpartikel. Der zurzeit im Einsatz befindliche Versuchsaufbau für die Einstreuung der Hartstoffe mittels einer Förderschnecke ist für die Serienfertigung nur bedingt geeignet, da durch die Implementierung der Einheit auf einen Industrieroboter lange Förderwege vom Dosierer zur Zuführung verwirklicht werden müssen, die einen kontinuierlichen einstellbaren Förderstrom erschweren. Durch die geometrisch anspruchsvolle Form der Sichelzähne sind für eine wirtschaftliche Fertigung der Panzerungen Konzepte für die Aufspannung zu erarbeiten, welche eine vollautomatisierte Fertigung erlauben. Für die Auswahl der Schweißzusatzwerkstoffe für die Serienproduktion der aufgepanzerten Sichelzähne sind weitere Untersuchungen auf dem Gebiet des Verschleißverhaltens und der Kurzzeitfestigkeit durchzuführen. Nach der Auswertung dieser Ergebnisse sind die Sichelzähne für eine Vorserie anzufertigen und diese im Zweiwellenzerkleinerer im realen Betrieb zu prüfen.

Weiteres Entwicklungspotential liegt in der Wahl des Grundwerkstoffs. Der zurzeit im Einsatz befindliche Sichelzahn ist ein durch Schmieden hergestelltes Bauteil aus einem Vergütungsstahl mit der Bezeichnung *27MnCrB5-2*. Ein alternativer Ansatz zur Herstellung kann ein Gießen der Sichelzähne aus bainitischem Gusseisen darstellen, der anschließend aufgeschweißt oder ohne Aufschweißung verwendet wird („Austempered Ductile Iron“ kurz ADI [26-28]).

Mit der Option auf die Sichelzähne eine zusätzliche höchstabrasionsbeständige schlagfeste Panzerung aufzubringen, wird das Einsatzspektrum dieser Schneidwerkzeuge erweitert und stellt eine technologische Erneuerung auf dem Gebiet der Schneidwerkstoffe für die Abfallnachbehandlung dar.

11. Literaturverzeichnis

- [1] Komptech, Crambo Universalzerkleinerer für Grünschnitt und Holz, Komptech GmbH A-8130 Frohnleiten, www.komptech.com, 2011.
- [2] DIN 1910, Blatt 1: Schweißen – Begriffe und Einteilung der Schweißverfahren, 1983.
- [3] DIN 8555, Teil 1: Schweißzusatzwerkstoffe zum Auftragschweißen - Bezeichnung/Technische Lieferbedingungen, 1983.
- [4] H. Uetz: Abrasion und Erosion, 1. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1983.
- [5] DIN EN 14700: Schweißzusätze - Schweißzusätze zum Hartauftragen, 2005-08.
- [6] H. Berns: Hartlegierungen und Hartverbunde, 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
- [7] C. Friedrich, G. Berg, E. Broszeit, C. Berger: Datensammlung zu Hartstoffeigenschaften, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 28,59-76 (1997), VCH Verlagsgesellschaft mbH, D-69451 Weinheim, 1997.
- [8] F. Schreiber: Verschleißschutz durch Auftragschweißen: Werkstoffwahl und Anwendungstechnik, DURUM Verschleiss-Schutz GmbH, Willich, www.durmat.com, 2011.
- [9] J. Ruge: Handbuch der Schweißtechnik, Band II: Verfahren und Fertigung, Dritte, neubearbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1993.
- [10] U. Fischer: Fachkunde Metall, A-50., neubearbeitete und erweiterte Auflage als Ausgabe für Österreich, Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer GmbH & Co, Haan-Gruiten, 1991.
- [11] G. Spur, T. Stöferle: Handbuch der Fertigungstechnik, Band 4/1 Abtragen und Beschichten, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1987.
- [12] DIN EN 657: Thermisches Spritzen - Begriffe, Einteilung, 2005-06.
- [13] H. J. Fahrenwaldt, V. Schuler: Praxiswissen Schweißtechnik, Werkstoffe, Prozesse, Fertigung, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006.
- [14] G. Trommer: CMT-Schweißprozess in der Praxis, rgt Redaktionsbüro Gerd Trommer, Fronius International, Wels, www.fronius.com, 2011.
- [15] DIN EN 10025-2: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle, 2005.
- [16] U. Fischer: Tabellenbuch Metall, 44., neu bearbeitete Auflage, Ausgabe für Österreich, Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, Haan-Gruiten, 2008.
- [17] J. Ruge: Handbuch der Schweißtechnik, Band I: Werkstoffe, Dritte, neubearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1991.
- [18] Docol Härtbare Stähle - Borstähle, Kaltgewalztes Härtbares Stahlblech, SSAB Swedish Steel GmbH, Düsseldorf, www.ssab.de, 2011.

- [19] Werkstoff-Datenblatt Saarstahl - 27MnCrB5-2, Saarstahl AG 66330 Völklingen, www.saarstahl.de, 2011.
- [20] UTP Handbuch, Schweißzusatzwerkstoffe für Unterhalt, Reparatur und Fertigung, UTP Schweißmaterial GmbH, D-79189 Bad Krozingen, www.utp.de, 2011.
- [21] DURUM, Auftragschweißwerkstoffe, Durmat Werkstoffe für den Verschleißschutz, DURUM Verschleiß-Schutz GmbH, D-47877 Willich-Schiefbahn, www.durmat.com, 2011.
- [22] H. Berns, W. Theisen: Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen, 4. bearbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [23] T. Ederl: Einsatz moderner Schweißstromquellen beim roboterunterstützten Schweißprozess, Fronius International, Wels, www.fronius.com , 2011.
- [24] H. Hackl: Einfluss der Stromquellentechnologie auf die Schweißergebnisse beim Schutzgasschweißen, Fronius International, Wels, www.fronius.com, 2011.
- [25] A. Mösenbacher, C. Feyerer: Verschleißverhalten von Panzerungen auf Sichelzähnen für Zerkleinerungsanlagen, Bericht Komptech, Montanuniversität Leoben, 2011.
- [26] Böhler Welding Group: Reparaturschweißen von Gusseisen, Böhler Welding Group Schweiz AG CH-8304 Wallisellen, www.bohlerweldinggroup.com, 2008.
- [27] J. Gründling, C. Bartels, U. Schliephake, CLAAS GUSS GmbH: ADI - Leichtbau mit Gusseisen, Konstruktion Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe, Sonderdruck aus Heft 6, 2003 / Heft 7-8, 2004.
- [28] C. Bartels: Was sich biegt, bricht nicht, Werkstoffe Entwicklungstendenzen, Antriebstechnik 12, 2006.

12. Anhang

12.1. Hartstofftabellen

Material	Vickershärte HV0,05	Material	Vickershärte HV0,05
<i>Karbide</i>			
Borkarbid BC	3700 HV0,1	Siliziumkarbid SiC	2508
Chromkarbid	Cr ₃ C ₂ 2280	Tantalkarbid	TaC 1787
	Cr ₇ C ₃ 2200		Ta ₂ C 1714
	Cr ₂₃ C ₆ 1650	Titankarbid	TiC 3200
Eisenkarbid Fe ₃ C	1100 HV0,1	Vanadinkarbid	VC 2944
Hafniumkarbid HfC	2700		V ₂ C 2000
Molybdänkarbid	MoC	Wolframkarbid	WC 2080
	Mo ₂ C 1950		W ₂ C 1990
Niobkarbid	NbC 2400	Zirkonkarbid ZrC	2560
	Nb ₂ C 2123		

Tab. 12.1: Karbidische Hartstoffe [4,7]

Material	Vickershärte HV0,05	Material	Vickershärte HV0,05
<i>Nitride</i>			
Aluminiumnitrid AlN	1200 HV0,1	Siliziumnitrid Si ₃ N ₄	1700 HV0,1
Bornitrid (CBN) BN	5000 - 8000 HV0,1	Tantalnitrid	TaN 3240 HV0,1
Hafniumnitrid HfN	2000		Ta ₂ N 3000 HV0,1
Niobnitrid	NbN 2123	Titannitrid TiN	2450
	Nb ₂ N 2120	Zirkonnitrid ZrN	1988 HV0,03

Tab. 12.2: Nitridische Hartstoffe [4,7]

Material	Vickershärte HV0,05	Material	Vickershärte HV0,05
<i>Oxide</i>			
Aluminiumoxid Al ₂ O ₃	1920	Siliziumoxid SiO ₂	1100 HV0,1
Berylliumoxid	BeO 770 HV0,1	Titanoxid	TiO 1900 HV0,1
	BeAl ₂ O ₄ 1870 HV0,1		TiO ₂ 1180 HV0,1
Magnesiumoxid	MgO 760 HV0,1	Zirkonoxid ZrO ₂	1600
	MgAl ₂ O ₄ 1280 HV0,1		

Tab. 12.3: Oxidische Hartstoffe [4,7]

Material		Vickershärte HV0,05	Material		Vickershärte HV0,05
<i>Boride</i>					
Chromborid	CrB	2140	Titanborid	TiB	2800
	CrB ₂	2250 HV0,1		TiB ₂	3480
Eisenborid	FeB	1400 HV0,1		Ti ₂ B	2500
				Ti ₂ B ₅	3000
Hafniumborid	HfB	1700 HV0,1		Vanadiumborid	VB
	HfB ₂	2900 HV0,1	VB ₂		2080
Molybdänborid	MoB	2500 HV0,1	V ₃ B ₂		2200
	Mo ₂ B	2500 HV0,1	V ₂ B ₅		2350
	Mo ₂ B ₅	3220 HV0,1	Wolframborid	WB	3750
	Mo ₃ B ₂	2300		W ₂ B	2350
		W ₂ B ₅		2700	
Niobborid	NbB	2200	Zirkonborid	ZrB ₂	2200
	NbB ₂	2600			
	Nb ₃ B ₂	2060			
	Nb ₃ B ₄	2290			
Tantalborid	TaB	3130			
	TaB ₂	2200			
	Ta ₂ B	2200			
	Ta ₃ B ₂	2770			
	Ta ₃ B ₄	3350			

Tab. 12.4: Boridische Hartstoffe [4,7]

Material		Vickershärte HV0,05	Material		Vickershärte HV0,05
<i>Silicide</i>					
Chromsilizid	CrSi	1000	Vanadinsilizid	VS ₂	960 HV0,1
	CrSi ₂	1100		V ₃ Si	1500 HV0,1
	Cr ₃ Si	1000		V ₅ Si ₃	1500 HV0,1
	Cr ₅ Si ₃	1280	Wolframsilizid	WSi ₂	1090 HV0,1
Molybdänsilizid	MoSi ₂	1290		W ₅ Si ₃	770 HV0,1
	Mo ₃ Si	1310	Zirkonsilizid	ZrSi	1100
	Mo ₅ Si ₃	1170		ZrSi ₂	1030
Tantalsilizid	TaSi	1200 HV0,1		Zr ₂ Si	1230
				Zr ₃ Si ₂	1300
Thoriumsilizid	ThSi	1120 HV0,1		Zr ₆ Si ₅	1400
Titansilizid	TiSi				
	TiSi ₂	892 HV0,1			
	Ti ₅ Si ₃	986 HV0,1			

Tab. 12.5: Silizidische Hartstoffe [4,7]

12.2. Probenlisten

Probennummer	Grundmaterial	Schweißzusatz	Drahtdurchmesser [mm]	Schweißgeschwindigkeit [Hz]	Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Schweißstrom [A]	Schweißspannung [V]	Streckenenergie [J/m]	Drahtvorschub [m/min]	Pulskorrektur	Schweißprogramm	Pulsprogramm	Carbidhöhe [mm]	Einstreuung Karbide [g/s]	Carbidverfahren	Bemerkungen
1	S355J0	UTP DUR650	1,2	20	0,96	230	28,9	415438	9	0	Puls	A DUR600				
2	S355J0	UTP DUR650	1,2	20	0,96	270	30,7	518063	11,3	0	Puls	A DUR600				
3	S355J0	UTP DUR650	1,2	20	0,96	300	32,5	609375	12,3	0	Puls	A DUR600				
4	S355J0	UTP DUR650	1,2	20	0,96	330	33,6	693000	14,3	0	Puls	A DUR600				
5	S355J0	UTP DUR650	1,2	20	0,96	330	33,2	684750	12	0	Standard	A DUR600				
6	S355J0	UTP DUR650	1,2	20	0,96	300	32,3	605625	10,8	0	Standard	A DUR600				
7	S355J0	UTP DUR650	1,2	20	0,96	270	30,8	519750	10	0	Standard	A DUR600				
8	S355J0	UTP DUR650	1,2	20	0,96	250	29,7	464063	9,5	0	Standard	A DUR600				
9	S355J0	UTP DUR650	1,2	20	0,96	230	26,3	378063	7,6	0	Standard	A DUR600				
10	S355J0	UTP DUR650	1,2	15	0,72	230	28,9	553917	9	0	Puls	A DUR600				
11	S355J0	UTP DUR650	1,2	15	0,72	250	29,6	616667	10,3	0	Puls	A DUR600				
12	S355J0	UTP DUR650	1,2	15	0,72	270	30,7	690750	11,3	0	Puls	A DUR600				
13	S355J0	UTP DUR650	1,2	15	0,72	300	32,5	812500	12,3	0	Puls	A DUR600				
14	S355J0	UTP DUR650	1,2	15	0,72	250	29,7	618750	9,5	0	Standard	A DUR600				
15	S355J0	UTP DUR650	1,2	15	0,72	270	30,8	693000	10	0	Standard	A DUR600				
16	S355J0	UTP DUR650	1,2	15	0,72	260	30,4	658667	9,8	0	Standard	A DUR600	4		Aufgestreut	
17	S355J0	UTP DUR650	1,2	15	0,72	270	30,7	690750	11,3	0	Puls	A DUR600	3		Aufgestreut	
18	S355J0	UTP DUR650	1,2	15	0,72	270	30,8	693000	10	0	Standard	A DUR600	3		Aufgestreut	
19	S355J0	UTP DUR650	1,2	15	0,72	270	30,7	690750	11,3	0	Puls	A DUR600	3		Aufgestreut	schleppend geschw.
20	S355J0	UTP DUR650	1,2	15	0,72	260	30,1	652167	11	0	Puls	A DUR600			Düse	

Tab. 12.6: Probenliste Nr.: 1-20

Probennummer	Grundmaterial	Schweißzusatz	Drahtdurchmesser [mm]	Schweißgeschwindigkeit [Hz]	Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Schweißstrom [A]	Schweißspannung [V]	Streckenenergie [J/m]	Drahtvorschub [m/min]	Pulskorrektur	Schweißprogramm	Pulsprogramm	Carbidhöhe [mm]	Einstreuung Karbide [g/s]	Carbidverfahren	Bemerkungen
21	S355J0	UTP DUR650	1,2	10	0,48	260	30,1	978250	11	0	Puls	A DUR600				
22	S355J0	UTP DUR650	1,2	10	0,48	260	30,1	978250	11	0	Puls	A DUR600		3	Aufgestreut	
23	S355J0	UTP DUR650	1,2	10	0,48	260	30,1	978250	11	0	Puls	A DUR600		5	Aufgestreut	
24	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	15	0,72	230	28,9	553917	9,1	0	Puls	A DUR600				
25	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	15	0,72	270	30,7	690750	11,3	0	Puls	A DUR600				
26	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	15	0,72	300	32,5	812500	12,3	0	Puls	A DUR600				
27	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	15	0,72	270	30,8	693000	10	0	Standard	A DUR600				
28	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	15	0,72	250	29,7	618750	9,5	0	Standard	A DUR600				
29	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	15	0,72	220	23	421667	6,8	0	Standard	A DUR600				
30	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	20	0,96	250	29,7	464063	9,5	0	Standard	A DUR600				
31	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	20	0,96	300	32,3	605625	10,8	0	Standard	A DUR600				
32	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	20	0,96	270	30,8	519750	10	0	Standard	A DUR600				
33	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	20	0,96	300	32,5	609375	12,3	0	Puls	A DUR600				
34	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	20	0,96	270	30,7	518063	11,3	0	Puls	A DUR600				
35	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	20	0,96	240	29,1	436500	9,5	0	Puls	A DUR600				
36	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	25	1,2	240	28	336000	8,6	0	Standard	A DUR600				
37	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	25	1,2	270	30,8	415800	10	0	Standard	A DUR600				
38	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	25	1,2	300	32,3	484500	10,8	0	Standard	A DUR600				
39	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	25	1,2	330	33,2	547800	12,1	0	Standard	A DUR600				
40	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	15	0,72	250	29,7	618750	9,5	0	Standard	A DUR600				1 lagig, 4 breit

Tab. 12.7: Probenliste Nr.:21 - 40

Probennummer	Grundmaterial	Schweißzusatz	Drahtdurchmesser [mm]	Schweißgeschwindigkeit [Hz]	Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Schweißstrom [A]	Schweißspannung [V]	Streckenenergie [J/m]	Drahtvorschub [m/min]	Pulskorrektur	Schweißprogramm	Pulsprogramm	Carbidhöhe [mm]	Einstreuung Karbide [g/s]	Carbidverfahren	Bemerkungen
41	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	27	1,3	316	33,2	485704	13	0 Puls		A DUR600				
42	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	27	1,3	316	33,2	485704	13	5/2,5 Puls		A DUR600				
43	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	27	1,3	316	33,2	485704	13	5/2,5 Puls		A DUR600				
44	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	27	1,3	239	29,1	321986	9,5	-4 Puls		A DUR600				
45	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	27	1,3	316	33,2	485704	13	-4 Puls		A DUR600				
46	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	27	1,3	292	29,1	393389	12	-4 Puls		A DUR600				
47	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	30	1,44	316	33,2	437133	13	-4 Puls		A DUR600				
48	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	30	1,44	292	32	389333	12	-4 Puls		A DUR600				
49	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	30	1,44	292	32	389333	12	-3 Puls		A DUR600				
50	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	30	1,44	292	32	389333	12	-2 Puls		A DUR600				
51	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	35	1,68	292	32	333714	12	-2 Puls		A DUR600				
52	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	35	1,68	316	33,2	374686	13	-2 Puls		A DUR600				
53	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	35	1,68	328	33,5	392429	14	-2 Puls		A DUR600				
54	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	35	1,68	328	33,5	392429	14	-1 Puls		A DUR600				
55	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	35	1,68	328	33,5	392429	14	0 Puls		A DUR600				
56	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	35	1,68	316	33,2	374686	13	0 Puls		A DUR600				1 lagig, 4 breit
57	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	35	1,68	316	33,2	374686	13	-1 Puls		A DUR600				
58	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	35	1,68	316	33,2	374686	13	-3 Puls		A DUR600				
59	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	30	1,44	316	33,2	437133	13	-3 Puls		A DUR600				
60	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	15	0,72	270	30,7	690750	11,3	0 Puls		A DUR600				

Tab. 12.8: Probenliste Nr.:41 - 60

Probennummer	Grundmaterial	Schweißzusatz	Drahtdurchmesser [mm]	Schweißgeschwindigkeit [Hz]	Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Schweißstrom [A]	Schweißspannung [V]	Streckenenergie [J/m]	Drahtvorschub [m/min]	Pulskorrektur	Schweißprogramm	Pulsprogramm	Carbidhöhe [mm]	Einstreuung Karbide [g/s]	Carbidverfahren	Bemerkungen
61	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	15	0,72	270	30,7	690750	11,3	0	Puls	A DUR600			Einblasrohr	
62	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	15	0,72	270	30,7	690750	11,3	0	Puls	A DUR600			Einblasrohr	
63	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	15	0,72	270	30,7	690750	11,3	0	Puls	A DUR600	3		Aufgestreut	
64	27MnCrB5-2	UTP DUR650	1,2	15	0,72	270	30,7	690750	11,3	0	Puls	A DUR600			Einblasrohr	
65																
66																
67																
68																
69																
70	27MnCrB5-2	DURMAT OA	1,6	12	0,58	273	25,3	719469	4,8	0	Puls	FCW Metall				6 Zähne
71	27MnCrB5-2	DURMAT FD 601	1,6	15	0,72	270	26,5	596250	6	0	Puls	FCW Hardfacing				6 Zähne
72	27MnCrB5-2	DURMAT FD 601	1,6	15	0,72	270	26,5	596250	6	0	Puls	FCW Hardfacing		2,34	Einblasrohr	S2/M2/4V
73	27MnCrB5-2	DURMAT FD 601	1,6	15	0,72	270	26,5	596250	6	0	Puls	FCW Hardfacing		2,34	Einblasrohr	S2/M2/4V
74	27MnCrB5-2	DURMAT FD 601	1,6	15	0,72	270	26,5	596250	6	0	Puls	FCW Hardfacing		2,51	Einblasrohr	S2/M2/4,3V
75	27MnCrB5-2	DURMAT FD 601	1,6	15	0,72	282	24,6	578100	6	0	Puls	Do*11		2,34	Einblasrohr	S2/M2/4V
76	27MnCrB5-2	DURMAT FD 601	1,6	15	0,72	290	24,7	596917	6,3	0	Puls	Do*11		2,51	Einblasrohr	S2/M2/4,3V 9 Zähne
77	27MnCrB5-2	DURMAT FD 601	1,6	15	0,72	296	24,8	611733	6,5	0	Puls	Do*11		2,63	Einblasrohr	S2/M2/4,5V
78	27MnCrB5-2	DURMAT FD 601	1,6	15	0,72	292	24,3	591300	6	0	Puls	Do*60		2,34	Einblasrohr	S2/M2/4V
79	27MnCrB5-2	DURMAT FD 601	1,6	15	0,72	301	24,8	622067	6,3	0	Puls	Do*60		2,51	Einblasrohr	S2/M2/4,3V
80	27MnCrB5-2	DURMAT FD 601	1,6	15	0,72	308	23	590333	6	0	Puls	Do*70		2,34	Einblasrohr	S2/M2/4V

Tab. 12.9: Probenliste Nr.:61 - 80

12.3. Zusammenstellungszeichnung Fördereinheit

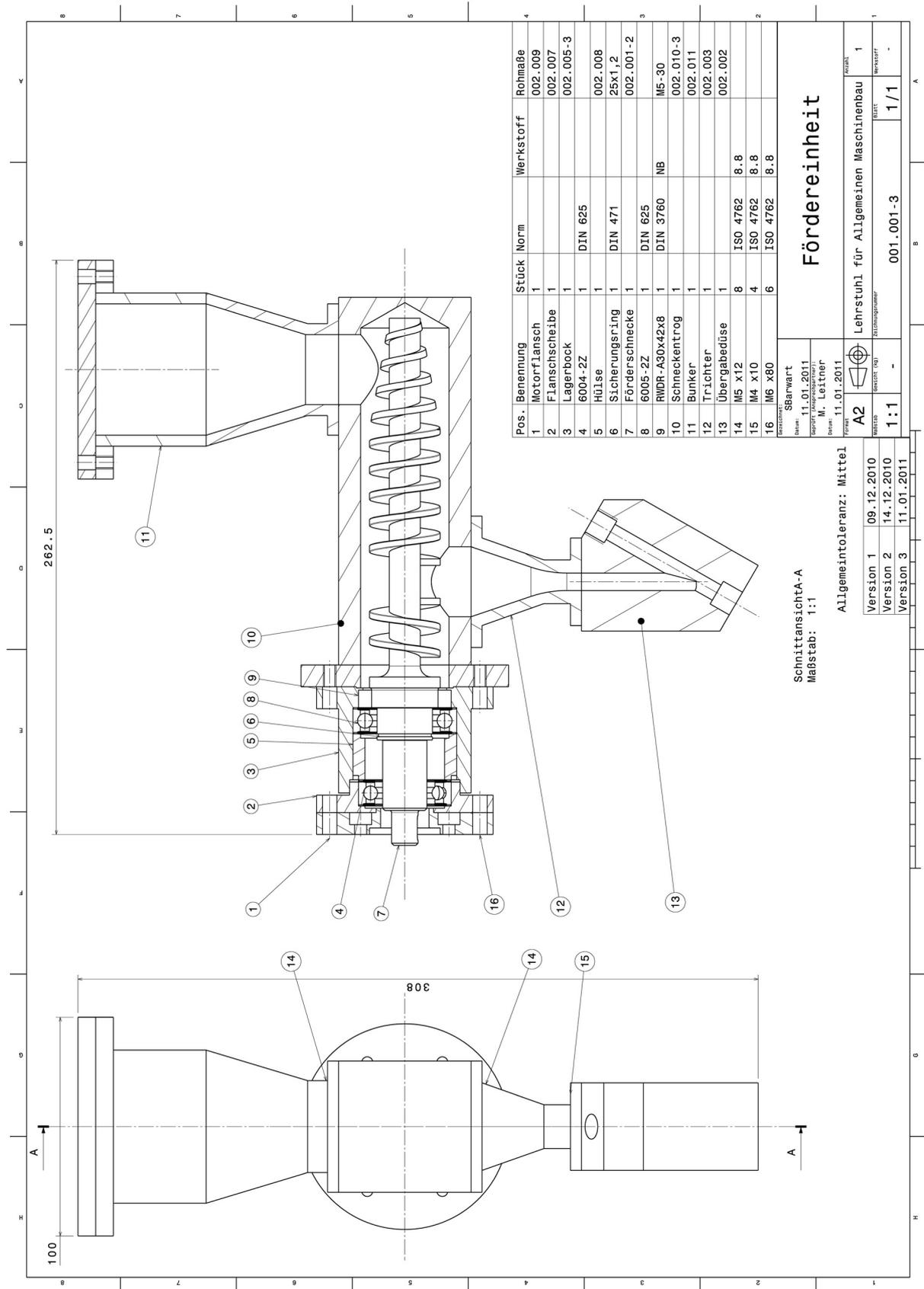


Abb. 12.1: Zusammenstellungszeichnung Fördereinheit