

Raphaela Rauter, BSc.

Laserauftragschweißen von
Wolframkarbidschichten in Nickelbasismatrizen
zur Herstellung verschleißfester Beschichtungen
von Warmformwerkzeugen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christof Sommitsch
Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion (FSI)
Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Dipl.-Ing. Robert Vollmer

Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion (FSI)
Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Graz, August 2016

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/ Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

AFFIDAVIT

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/ resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from sources used. The text document uploaded in TUGRAZonline is identical to the present master thesis.

Raphaela Rauter

Graz, August 2016

DANKSAGUNG

Ich bedanke mich bei allen Mitarbeitern am Institut, die mir bei der Durchführung meiner Masterarbeit mit ihrem fachkundigen Wissen zur Seite gestanden sind.

Dazu zählt vor allem mein Betreuer Robert Vollmer, der aufgrund seiner Erfahrung eine kompetente Rundumstütze in allen fachlichen Fragen darstellte. Nicht zu verachten ist Philipp Schwemberger, der mich mit vielen Hilfestellungen im Bereich der praktischen und theoretischen Arbeit mit der DMD-Maschine unterstützt hat. Heinz Fasching, Nino Müllner und Patrick Lichtenegger ist für die Zerspanungsarbeit, die sie mit meinen Proben in der Werkstatt hatten, herzlich gedankt.

Großer Dank gebührt meinem Freund Christoph und meiner Familie, v.a. meinen Eltern Emil und Brigitte Rauter und meinen Geschwistern Rebecca und Richard für ihre immerwährende Unterstützung.

KURZFASSUNG

In Fahrzeugkarosserien werden, um die Sicherheit der Insassen zu gewährleisten, höchstfeste Strukturbauteile verbaut. Diese werden durch Warmumformung von presshärtbaren Stahlplatten in speziellen Formhärteformen gefertigt.

Eingesetzte Werkzeuge müssen, um die geforderten Stückzahlen der Strukturbauteile fertigen zu können und den Wartungsaufwand minimal halten zu können, verschleißfest ausgelegt werden. Mit Hilfe des Verfahrens Laserauftragschweißen ist es möglich, beliebige Metallpulver auf Werkzeugoberflächen aufzuschweißen, um auf diese Weise verschleißfeste Beschichtungen herzustellen.

Im Rahmen der Arbeit wird eine fertigungsgerechte Strategie erarbeitet, um mittels Laserauftragschweißen Wolframkarbide in einer Nickelbasismatrix auf einen Warmarbeitsstahl aufzubringen. Da die Zerspanung von Wolframkarbidbeschichtungen einen enormen Arbeitsaufwand darstellt, soll die aufgetragene verschleißfeste Beschichtung nach dem Laserauftragschweißprozess so nahe wie möglich an das geforderte Endmaß herankommen.

Zur Entwicklung einer endmaßnahen Beschichtungsstrategie werden eigens für den Versuch entwickelte Probenkörper diverser Substratwerkstoffe mit verschiedenen Nickelbasispulverlegierungen beschichtet. Als Substrate werden die Werkstoffe 1.1730, 1.7131 und 1.2343 verwendet, die Nickelbasispulverlegierungen Ni25, Ni40, Ni50, NiBSi kommen zum Einsatz. Die Proben werden nach dem Laserauftragschweißprozess gesichtet und anschließend durch zerspanende Bearbeitung in die Form von Prüfkörpern gebracht. Vor der Durchführung der zerstörenden Haftfestigkeits- und Scherfestigkeitsversuche wird die Härte der Beschichtung gemessen.

Anhand der Auswertung der Ergebnisse der Härtemessung und der zerstörenden Prüfungen wird mittels statistischer Methoden eruiert, welche Schweißparametersätze auf welchen Kombinationen aus Substrat und Nickelbasispulverwerkstoff geeignet bzw. ungeeignet sind.

Geeignete Parametersätze aus Substrat und Nickelbasislegierung werden zur Herstellung weiterer Probenkörper herangezogen. Auf die durch zerspanende Bearbeitung geebneten Nickelbasisflächen der Probenkörper werden in einer weiteren Versuchsreihe Wolframkarbidbeschichtungen mit verschiedenen Parametersätzen geschweißt. Aus dem so entstandenen Schichtaufbau werden Proben entnommen und Schliffbilder erstellt. Die Auswertung der Schliffbilder zeigt die Qualität der Anbindung der Wolframkarbid-Nickelbasispulverbeschichtung am Substrat.

Unter Beachtung der Ergebnisse sämtlicher durchgeführter Untersuchungen wird der geeignetste Schweißparametersatz von Nickelbasispulvermetall und Wolframkarbidbeschichtung auf Proben mit 3D Geometrien aufgetragen. Mithilfe optischer Methoden wird die Höhe der Beschichtung vermessen, um die erreichte Bearbeitungszugabe zu beurteilen. Anschließend wird die Wolframkarbidbeschichtung eines Prüfkörpers mit 3D Geometrie einer Testbearbeitung in einem Hochleistungsbearbeitungszentrum unterzogen.

Zur Veranschaulichung der Forschungsergebnisse werden Radien eines realen Warmformwerkzeugs, welches für das Presshärten von B-Säulen eingesetzt wird, mit einem geeigneten Parametersatz aus Nickelbasispulvermetall und Wolframkarbiden beschichtet.

ABSTRACT

To ensure the safety of car occupants, press hardened structural components are installed in car bodies. Press hardened components are produced by a hot forming process supported by a hydraulic press.

Tools must be designed wear resistant to hot form plates. Using the technique of laser cladding, it is possible to weld any metal powder on hot forming tools, to produce improved, wear resistant coatings.

The aim of the work is to develop a strategy to get final dimensions after coating tungsten carbides in a nickel based matrix on radii of hot forming tools, which are used to produce press-hardened components, like B-pillar in automotive industry.

For this purpose different substrate materials (1.1730, 1.7131, 1.2343) are coated with various nickel based alloy powders (Ni25, Ni40, Ni50, NiBSi). The samples are sighted after the laser cladding process then they are brought in the shape of test specimens by metal cutting to measure the hardness and to carry out adhesion strength tests and shear strength tests.

The results of the destructive tests are evaluated by statistical methods to check, which welding parameter sets are suitable or not on whom combinations of substrate and nickel-based powder material.

Suitable parameter sets of substrate and nickel-based alloys are used to weld more test samples. The nickel-based coatings are machined to get plane surfaces, after this process tungsten carbides are welded onto the surfaces with various parameter sets. Specimens are taken of samples, which consist of different layers, to carry out examinations by light microscope. The evaluation of the cross-section of these micro sections shows the quality of the connection between the tungsten-nickel-based powder coatings to the substrate.

Considering the results of all executed tests, the most suitable welding parameters set of nickel-based metal powder and tungsten carbide is cladded onto samples with radii shaped geometries to produce final dimensions on radii as practical as possible. With use of optical methods, the height of the coating is measured to evaluate the quality of the achieved final dimensions. Subsequently, the tungsten carbide coating on radii undergoes a test s processing in a machining centre.

To demonstrate the results of the research work, radii of a real hot forming tool which should be used for the press hardening of B-pillars, get coated with a suitable parameter set of nickel-based metal powder and tungsten carbides.

INHALT

1.	Einleitung.....	1
2.	Stand der Technik.....	2
2.1.	Lasertechnik	2
2.2.	Lasermaterialbearbeitungsverfahren	5
2.3.	Additive Manufacturing	6
2.4.	Tribologie	6
2.5.	Reibung	7
2.5.1.	Arten der Reibung	9
2.6.	Zusammenhang Reibung – Verschleiß.....	10
2.7.	Verschleiß.....	10
2.7.1.	Abrasion	11
2.7.2.	Triboreaktionen	11
2.7.3.	Oberflächenzerrüttung.....	12
2.7.4.	Adhäsion.....	12
2.7.5.	Ablation	12
2.8.	Auftragschweißen.....	13
2.9.	Manuelles Auftragschweißen	13
2.10.	Laserauftragschweißen	14
2.11.	Anlagentechnik.....	16
2.12.	Praxisbeispiel – Reparatur beschädigter Bauteile	17
2.13.	Presshärten.....	17
2.13.1.	Indirektes Presshärten.....	18
2.13.2.	Direktes Presshärten	18
2.14.	Schweißprozesskenngrößen	19
2.14.1.	Aufmischen bzw. Aufmischungsgrad.....	19
2.14.2.	Eigenspannungen.....	20
2.15.	Laserauftragschweißen von funktionell graduierten Schichten.....	22
2.16.	Statistische Versuchsplanung und Auswertung.....	23
3.	Aufgabenstellung.....	25
4.	Prozessparameter	27
4.1.	Werkstoffparameter	28
4.1.1.	Substratwerkstoffe.....	28
4.1.2.	Beschichtungswerkstoff – Metallpulver.....	29
4.1.3.	Wolframkarbide.....	30

4.2.	Vorbehandlung des Substrats	30
4.2.1.	Wärmebehandlungsprozess	30
4.2.2.	Sandstrahlen	30
4.2.3.	Vorwärmen	30
4.3.	Schweißparameter	31
4.3.1.	Streckenenergie	31
4.3.2.	Pulverförderrate	32
4.3.3.	Schutzgasparameter	32
4.3.4.	Düsenparameter	32
4.3.5.	Geometrieparameter	33
5.	Verwendete Untersuchungsmethoden	34
5.1.	Sichtprüfung	34
5.2.	Stereomikroskop	35
5.3.	Lichtmikroskop	35
5.4.	Härtemessung	36
5.5.	Haftfestigkeitsversuch	37
5.6.	Scherfestigkeitsversuch	38
6.	Versuchsablauf	40
6.1.	Ermittlung der Pulverförderrate	43
6.2.	Linienproben	43
6.3.	12Flächenproben	46
6.4.	Zylinderproben	48
6.5.	1Flächenproben	49
6.6.	Linienproben aus Wolframkarbiden auf Nickelbasisflächen	50
6.7.	Wolframkarbidflächen auf Nickelbasisflächen	52
6.8.	Radius-Doppelradiusprobe	52
7.	Auswertungen	54
7.1.	Statistische Auswertung der Härte und Haftfestigkeit der 12Flächenproben	54
7.1.1.	Ni25	54
7.1.2.	Ni40	59
7.1.3.	Ni50	62
7.1.4.	NiBSi	64
7.1.5.	Resümee der Analyse sämtlicher durchgeführter Haftfestigkeitsversuche	68
7.2.	Zylinderproben – Scherfestigkeitsversuche	70
7.3.	Untersuchung der Schichtaufbauten bestehend aus 1.7131/Ni25-Ni40-NiBSi/Wolframkarbiden	72
7.4.	Höhenvermessung Wolframkarbidschicht	73

7.5.	Lichtmikroskopische Untersuchung der Wolframkarbidbeschichtung	74
7.5.1.	Ni25	76
7.5.2.	Ni40	78
7.5.3.	NiBSi	80
7.6.	Härtemessung einer ausgewählten Probe (HV 0,1).....	81
7.7.	Lichtmikroskopische Betrachtung der Kombination 1.2343/Ni25.....	83
7.8.	Vermessung der Höhe der Wolframkarbidschicht einer Radius-Doppelradiusprobe	84
7.9.	Einfachradius.....	85
7.10.	Doppelradius	87
7.11.	Ergebnisse der Höhenvermessung.....	89
8.	Ausblick.....	91
8.1.	Mechanische Nachbearbeitung einer Radius-Doppelradiusprobe durch +GF+	91
8.2.	Reales Warmformwerkzeug	92
9.	Zusammenfassung	94
	Abbildungsverzeichnis	98
	Tabellenverzeichnis	100
	Literaturverzeichnis	101

1. EINLEITUNG

Im Bereich des Leichtbaus im Fahrzeugkarosseriebau wird es immer wichtiger, Gewicht einzusparen und gleichzeitig die Sicherheit für Fahrzeuginsassen zu verbessern. Strukturbauteile in der Fahrzeugkarosserie (z.B. die B-Säule) werden daher aus hoch- und höchstfesten Stählen hergestellt, um bei Crashes die Insassensicherheit zu gewährleisten.

Die B-Säule nimmt bei Seitenkollisionen mit einem anderen Fahrzeug bzw. Hindernis mehr als 80% der absorbierten Energie auf. Einerseits ist gefordert, dass die B-Säule sehr biegesteif ist, andererseits müssen die Anbindungsstellen an andere Karosseriebauteile zur Energieabsorption weich ausgeführt sein. Des Weiteren muss ein Knicken der B-Säule verhindert werden, um Insassen bei einer Kollision vor Verletzungen zu schützen. Diese Anforderungen werden durch den Einsatz ultrahochfester (UHSS) Werkstoffe im Bereich der Strukturbauteile erzielt. Durch Verwendung von pressgehärteten Strukturbauteilen konnten 25kg Gewicht beim VW Passat B6 im Vergleich zu seinem Vorgängermodell B5 eingespart werden. Im Bereich der B-Säule beträgt die Gewichtseinsparnis durch die Verwendung höchstfester Werkstoffe 4,6kg bei gleichzeitiger Vereinfachung des Aufbaus. (Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung 2007, S. 51) Typische Bauteile, neben der B-Säule, die durch Presshärten hergestellt werden, sind die A-Säule, der Dachrahmen, Stoßfänger.

Da Presshärten automatisiert eingesetzt werden kann und bei pressgehärteten Bauteilen aus höchstfesten Platinen Verstärkungen nicht mehr erforderlich sind, reduziert sich neben dem Gewicht auch die Fertigungszeit und somit die Produktionskosten, was das Verfahren besonders wirtschaftlich und wettbewerbsfähig macht. Um aus Platinen Bauteile presshärten zu können, sind aufgrund der Festigkeit der verwendeten Werkstoffe besonders verschleißfeste Werkzeugoberflächen notwendig.

Mit Hilfe des Verfahrens Laserauftragschweißen (andere Bezeichnungen sind: Laser Cladding, Laser Metal Deposition – LMD, Direct Metal Deposition – DMD) können beliebige Metallpulver auf Substratwerkstoffe zur Herstellung einer verschleißresistenten Beschichtung aufgetragen werden. Im Rahmen der Masterarbeit soll eine möglichst verschleißresistente und endmaßnahe Beschichtungsstrategie für Warmformwerkzeuge entwickelt werden. Dazu werden in Versuchsreihen geeignete Schweißparametersätze von Substratwerkstoff, Nickelbasismatrix und Wolframkarbidbeschichtung ermittelt. Zur Anwendung kommen Werkstoffkombinationen aus den Substraten 1.1730, 1.7131 und 1.2343, auf welche Wolframkarbidbeschichtungen in Nickelbasismatrix Ni25, Ni40, Ni50 und NiBSi eingebettet werden. Da die weitere mechanische Bearbeitung der harten Wolframkarbidbeschichten äußerst aufwendig und schwierig ist, wird die Schweißstrategie möglichst endmaßnahe entwickelt, d.h. das Übermaß nach dem Laserauftragschweißprozess soll so gering wie möglich gehalten werden.

Die Qualität der Anbindung der Beschichtung am Substrat wird anhand Sichtprüfung, Härtemessung, zerstörenden Haftfestigkeits- und Scherfestigkeitsprüfungen untersucht und mittels statistischer Methoden ausgewertet, des Weiteren kommen Makroskopie und Lichtmikroskopie zum Einsatz.

Geeignete Kombinationen der Beschichtungsstrategie aus Substrat, Nickelbeschichtung und Wolframkarbiden werden auf dreidimensionale Konturen aufgetragen, die Höhe des Auftrags wird ermittelt und analysiert. Im Anschluss wird eine Testbearbeitung der Beschichtung einer dreidimensionalen Kontur vorgenommen. Zuletzt wird ein geeigneter Schweißparametersatz auf Radien eines Warmformwerkzeuges zur Herstellung von B-Säulen aufgetragen.

2. STAND DER TECHNIK

Zunächst wird ausgehend von den Grundlagen der Lasertechnik auf Anwendungen des Lasers in der Materialbearbeitung eingegangen. Im Speziellen wird das Verfahren Laserauftragschweißen erklärt, seine Einsatzgebiete in der Technik werden vorgestellt. Im Rahmen der Betrachtung des Laserauftragschweißverfahrens ist es unumgänglich, die tribologischen und fügetechnischen Hintergründe zu betrachten. Da die Durchführung sämtlicher Versuchsreihen mit Hilfe von Design of Experience geplant und ausgewertet werden, werden zur Anwendung gekommene statistische Methoden kurz vorgestellt.

2.1. LASERTECHNIK

Vor rund hundert Jahren wurde durch Albert Einsteins Arbeit „Energieaustausch durch Strahlung“ erstmals die stimulierte Emission beschrieben, die unter dem Akronym LASER (engl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation bzw. dt. Licht angeregter, Strahlung emittierender Resonator) bekannt ist. Seit den 1960er Jahren wird daran geforscht, den Laser in der Materialbearbeitung als Werkzeug einzusetzen. Einsatzgebiete des Lasers in der Materialbearbeitung sind Bohren, Schneiden, Schweißen, Löten, Härten, Beschichten, schichtweises Auftragen. Die einzelnen Laserarbeitsverfahren können in der Fertigungstechnik unterteilt werden in:

Materialeigenschaftsverändernde Verfahren

Hierbei sollen das Materialvolumen und die Werkstückgeometrie durch Bearbeitungen wie Härten, Oberflächenbehandlung, Umformen und Biegen, Umschmelzen, Beschriften erhalten bleiben.

Trennende Verfahren

Material wird durch trennende Verfahren wie Schneiden, Abtragen, Bohren, Warmzerspannung entfernt, um die Form bzw. Geometrie gezielt abzuändern bzw. um einzelne Formelemente einzubringen.

Fügende Verfahren

Um Bauteile zu verbinden, wird das Volumen des Materials durch Schweißen oder Löten lokal erweicht.

Auftragende und generierende Verfahren

Es werden Schichten von Material aufgetragen, um die Eigenschaften der Oberfläche für den jeweiligen Anwendungsfall zu optimieren. Beschichtungen werden mit Metallpulver oder Draht bzw. durch Verfahren wie Lasersintern, Stereolithographie, Dünnbeschichten hergestellt. (Bliedner et al. 2013)

Lasermaterialbearbeitungsanlagen sind sehr kostenintensiv in der Anschaffung und komplex im Aufbau, daher müssen Bediener sehr gut geschult sein, um mit ihnen arbeiten zu können. Da trotz der hohen Investitionskosten die Vorteile überwiegen, werden Lasermaterialbearbeitungsanlagen häufig eingesetzt. Die Bearbeitung erfolgt berührungslos, d.h. es tritt kein Werkzeugverschleiß auf, die Parameter des Laserstrahls können je nach Anwendung flexibel eingestellt werden. Aufgrund geringen Wärmeeintrags kommt es kaum zu Verzug, die sich ausbildende Wärmeeinflusszone ist klein, obwohl das Verfahren gleichzeitig hohe Energiedichte aufweist. Mit Hilfe des Lasers sind nahezu alle Werkstoffe bearbeitbar. Laserstrahlung ist, im Gegensatz zu thermischen Strahlungsquellen, spektral

scharf und fokussierbar. Diese Eigenschaften stellen die Grundlagen der Lasermaterialbearbeitungsverfahren dar. Ein großer Vorteil ist, dass das Werkzeug Laser nicht verschleißt. Elektromagnetische Strahlung wird mit Hilfe des Welle-Teilchen Dualismus beschrieben, ausgehend davon ist es möglich, Laserprozesse darzustellen. Die Ausbreitung von Licht als Welle basiert auf elektrodynamischen Grundgleichungen nach Maxwell. Licht ist eine transversale elektromagnetische Welle, welche mit Hilfe der aufeinander normal stehenden Vektoren \vec{E}_F (elektrische Feldstärke) und \vec{H} (magnetische Feldstärke) darstellbar ist. (Bliedtner et al. 2013)

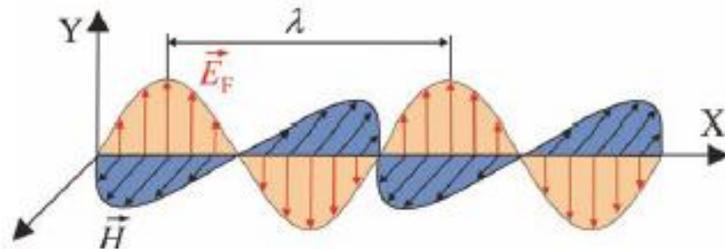


Abbildung 1: Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung (Bliedtner et al. 2013)

Die elektrische und die magnetische Feldstärke schwingen periodisch mit derselben Frequenz, sie pflanzen sich mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c in die gleiche Richtung fort. Das Produkt aus Wellenlänge λ und Frequenz ν ergibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit c . Im Vakuum nimmt c den Wert der Lichtgeschwindigkeit, $299792458 \frac{m}{s}$ an, in optischen Medien ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit c' kleiner als die Lichtgeschwindigkeit und hängt von der Brechzahl n ab. Laut Einstein besteht Licht aus Energiequanten (Photonen), die abhängig von ihrer Frequenz unterschiedliche Energie aufweisen. Die Energie E eines Photons wird in der Lasertechnik in eV (Elektronenvolt) angegeben, $1 eV$ entspricht $1,602 \cdot 10^{-19} J$.

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot \nu$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s \dots \text{Plancksches Wirkungsquantum}$$

Um den Grundaufbau des Lasers zu verstehen, wird auf die Entstehung elektromagnetischer Strahlung eingegangen. Ein Atom besteht aus einem schweren, positiv geladenen Atomkern, in dem sich Neutronen und Protonen befinden, dieser wird von leichten, negativ geladenen Elektronen in mehreren geschlossenen Bahnen umkreist. Den Elektronenbahnen werden je nach Abstand zum Atomkern verschiedene Energieniveaus $E_1, E_2 \dots$ zugewiesen. Die Elektronen streben danach, von einem höheren Energiezustand E_2 in Form einer Dipolschwingung zu einem tieferen Energiezustand E_1 zu gelangen.

$$f = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

Anhand dieser atomaren Zusammenhänge ist es möglich, die Wechselwirkungsprozesse Emission und Absorption zu erklären. In Abbildung 2 ist der Ablauf von Absorption, spontaner und induzierter Emission schematisch dargestellt, anschließend sind diese Prozesse theoretisch erklärt.

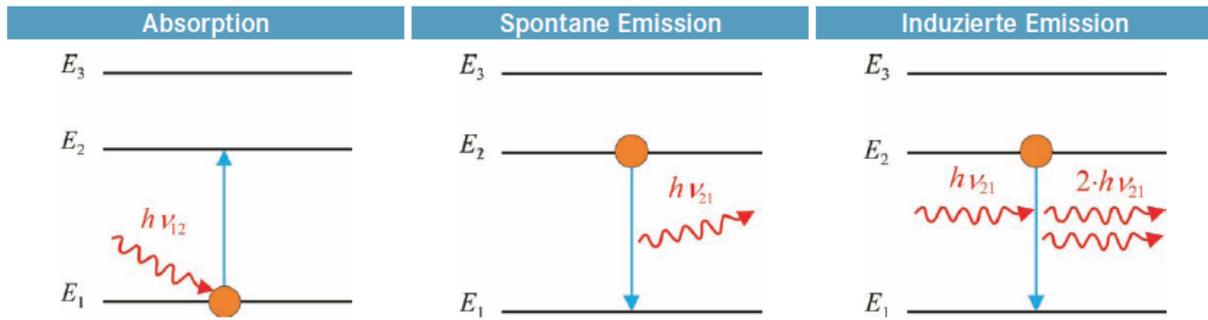


Abbildung 2: Absorption, spontane und induzierte Emission (Bliedtner et al. 2013)

Absorption

Das atomare System wird durch z.B. Strahlung oder Elektronenstoß von einem energetisch tieferen Zustand in einen energetisch höheren Zustand gebracht. Dazu muss die Resonanzbedingung $\nu \cdot h = E_2 - E_1$ des Strahlungsfeldes erfüllt sein. Beim Übergang in ein höheres Energieniveau wird die elektromagnetische Welle geschwächt.

Spontane Emission

Ein atomares System kehrt nach einer bestimmten Verweilzeit von selbst vom angeregten Energiezustand E_2 in den Grundzustand E_1 zurück. Bei spontaner Emission entsteht inkohärente Strahlung, weil der Zeitpunkt der Emission, die Phase der ausgesandten elektromagnetischen Welle, die Polarisations- und die Emissionsrichtung zufällig sind. Für den Übergang zwischen den Energieniveaus gilt die Resonanzbedingung.

Induzierte Emission

Es wird, unter der Voraussetzung, dass die Resonanzbedingung erfüllt ist, ein äußeres Strahlungsfeld auf ein angeregtes atomares System aufgebracht. Angeregte Atome geben ihre freiwerdende Energie phasenrichtig an ankommende elektromagnetische Wellen ab, man spricht somit von kohärenter Strahlung.

Damit Laserstrahlung entstehen kann, ist induzierte Emission, welche kohärente Strahlung erzeugt, nötig. Das ausgesandte Photon und das einfallende Strahlungsfeld besitzen gleiche Frequenz, Phasenlage, Ausbreitungs- und Polarisationsrichtung, dies ist in Abbildung 2 rechts veranschaulicht. Elektromagnetische Strahlung lässt sich in atomaren Systemen, Molekülen aber auch Festkörpern erzeugen, alle Systeme, die elektromagnetische Strahlung emittieren, bilden die Grundlage für laseraktive Medien.

Ein Laser besteht aus den drei Grundbausteinen laseraktives Medium, Pumpe und Resonator.

Laseraktives Medium

Laseraktive Medien werden generell in drei Gruppen unterteilt:

1. Gase (CO_2 -Molekül, He-Ne, Excimere)
2. Festkörper (Nd:YAG, Ti:Saphir, Yb- oder Er-dotierte Glasfasern)
3. Halbleiter (GaAs, ZnSe, GaNi)

Betrachtet man das elektromagnetische Spektrum, so decken die Wellenlängen der verschiedenen laseraktiven Medien den Bereich zwischen infrarotem Licht bis hin zum ultravioletten Licht ab. Je kürzer die Wellenlänge des verwendeten Mediums ist, desto höher ist die Frequenz und desto höher ist

die Wahrscheinlichkeit, dass es zu spontaner Emission kommt. Daher muss die erforderliche Pumpleistung der verbauten Pumpe auf das verwendete laseraktive Medium abgestimmt sein.

Pumpen

Mit Hilfe der Pumpe wird Anregungsenergie in das laseraktive Medium zugeführt, um eine Besetzungsinversion zu erreichen. Es gibt verschiedene Formen der Anregung: Stoßanregung, Stromdurchgang in einem pn-Übergang, optische und chemische Pumpen. Je nach verwendetem laseraktivem Medium ist eine spezielle Pumpe erforderlich.

Resonator

Das laseraktive Medium wird zwischen Spiegeln angeordnet. Zwischen den Spiegeln kommt es durch Rückkopplung zur Erhöhung des Strahlungsfeldes. Bei Resonatoren aus zwei Spiegeln wird meist ein vollständig reflektierender Spiegel und ein teildurchlässiger Spiegel verwendet. Je nach Lagertyp weisen die verwendeten Spiegel entsprechende Durchlässigkeit auf. Der Resonator engt die spektrale Verteilung ein, diese kann unter der Ausbildung von Eigenschwingungen jedoch verstärkt werden. Die Eigenschwingungen (bzw. Moden) charakterisieren die Eigenschaften des Laserstrahls.

Damit ein Laserstrahl emittiert werden kann, sind neben stimulierter Emission noch weitere Laserbedingungen, wie das Anschwingen, erforderlich. Dazu muss der Anteil induziert emittierter Photonen höher sein als der Anteil spontan emittierter Photonen, die Strahlungseigenschaften des Systems werden durch stimulierte Emission bestimmt. Um Anschwingen zu erreichen, muss eine Besetzungsinversion erzeugt werden. (Bliedner et al. 2013)

2.2. LASERMATERIALBEARBEITUNGSVERFAHREN

Mittels des Werkzeuges „Laser“ ist es möglich, auf vielfältige Methoden Material rasch und präzise zu bearbeiten. Lasergestützte generative Fertigungsverfahren gewinnen im Produktentstehungsprozess zunehmend an Bedeutung. In der Praxis werden die Fertigungsverfahren durch Lasermaterialbearbeitung in drei Gruppen eingeteilt:

Abtragende und trennende Verfahren

Bei abtragenden und trennenden Verfahren wird Material entfernt, z.B. durch Bohren, Abtragen, Reinigen, Gravieren, Trimmen, Schneiden. Generell wird zwischen thermischen und athermischen Verfahren unterschieden, der Abtrag des Materials wird durch die flüssige und/oder verdampfende Phase bestimmt. Die Energie des Laserstrahls trifft auf der Bauteiloberfläche auf und führt hier zu lokaler Verdampfung, wobei sich die eigentliche Verdampfungszone etwa $0,1\mu\text{m}$ unter der Oberfläche ausbildet. Das schmelzflüssige Material wird durch den hohen Dampfdruck im kurzzeitigen überhitzten Zustand aus der Wärmeeinflusszone (WEZ) mit großer Geschwindigkeit ausgetrieben. Gezieltes Abtragen wird bei Mikrobearbeitung von Bauteilen eingesetzt. Beim Abtragen durch Strukturieren werden in einer Werkstückoberfläche periodisch wiederkehrende Geometrien generiert, um das tribologische Verhalten von lokal auf Reibung belasteten Stellen eines Bauteils zu verbessern.

Schmelzende und eigenschaftsändernde Verfahren

Die Konturen des Werkstücks und die Materialmenge bleiben bei schmelzenden Verfahren größtenteils erhalten. Hierzu zählen fügende Verfahren (Schweißen, Löten), Warmzerspannung und auch oberflächenbehandelnde Verfahren wie Härten, Glasieren, Legieren, Beschichten und Funktionalisieren. Das Verfahren Laserstrahlschweißen kommt in der Praxis häufig zum Einsatz, weil

hiermit Platinen oder artfremde Werkstoffe bei geringem Verzug gefügt werden können, des Weiteren ist das Verfahren in der industriellen Fertigung gut automatisierbar.

Auftragende und generierende Verfahren

Das Ziel generierender Verfahren ist die schichtweise Erhöhung der Materialmenge, um einen Auftrag zu erhalten. Zu den generierenden Verfahren zählen Stereolithografie, Lasersintern, Layer Lamine Manufacturing, des Weiteren kommen die Verfahren Beschichten und Formauftragen mit Draht oder Pulver zum Einsatz.

2.3. ADDITIVE MANUFACTURING

Lasergestützte generative Fertigungsverfahren (Additive Manufacturing) werden im Bereich des Rapid Prototyping immer wichtiger. Mittels vorhandener CAD Daten ist es einfach, unkompliziert und kostengünstig möglich, Formen mittels chemischer oder physikalischer Prozesse in Werkstücke zu implementieren, um schnell einen Prototypen zu bauen. Generative Fertigungsverfahren zählen zu urformenden Verfahren, obwohl zur Erzeugung des Produktes keine speziellen Werkzeuge nötig sind. In der Praxis kommen Verfahren des Rapid Prototyping häufig zum Einsatz, um in den verschiedenen Phasen des Produktentstehungsprozesses einerseits laufend die Funktionen des Produkts überprüfen zu können und andererseits etwaige Fehler rasch auffinden zu können. Durch die Überwachung der einzelnen Produktionsschritte werden Produktentwicklungszeiten minimiert und dadurch wird der erfolgreiche und zeitnahe Markteintritt (time to market) des Produkts sichergestellt. Laserauftragschweißen zählt zu den generativen Verfahren des Rapid Prototyping.

2.4. TRIBOLOGIE

Das Wort Tribologie hat seinen Ursprung im Griechischen (griechisch tribein: reiben). Tribologie umfasst die Lehre von Reibung, Verschleiß und Schmierung und wird als interdisziplinäre Wissenschaft in den Fachgebieten Chemie, Physik, Werkstofftechnik und Ingenieurwissenschaft behandelt. Erst seit der Mitte des 20. Jahrhunderts wurden die oft gravierenden Auswirkungen von Reibung und Verschleiß auf technischen Oberflächen und in Maschinen als volkswirtschaftlich wichtig erkannt. Bei Umformprozessen etwa kommt es zu großen Reibkräften, welche Verschleiß verursachen. Seither befasst sich die Forschung im Interesse der Wirtschaft intensiv mit der Entwicklung von Konzepten zur Minimierung von Reibung und Verschleiß, sowie mit der Entwicklung funktioneller und verschleißfester Oberflächen in technischen Bauteilen und Anwendungen. In sämtlichen Bereichen der Technik können Relativbewegungen nur durch Kontakte eines Körpers mit einem festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörper ausgeführt werden, welche unweigerlich zu Reibung und Verschleiß, den sogenannten Systemeigenschaften, führen. (Czichos 2010)

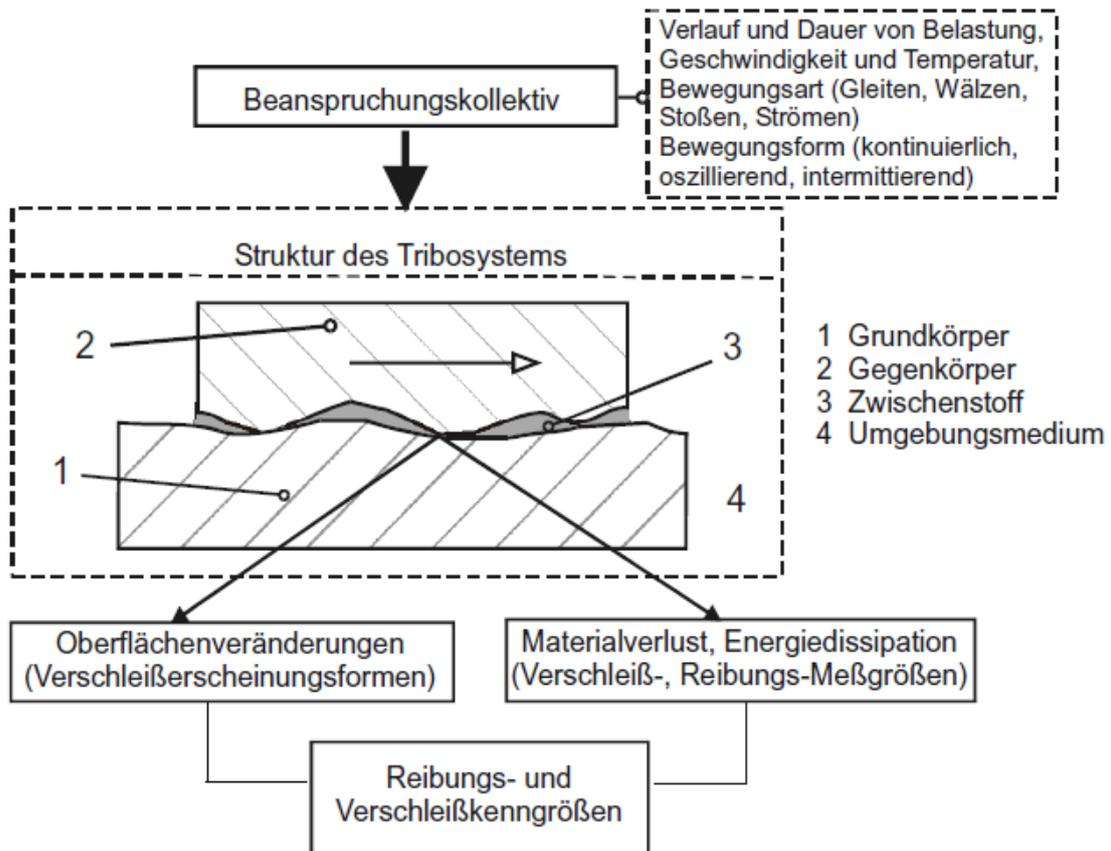


Abbildung 3: Tribologisches System (Gesellschaft für Tribologie 2002)

Im tribologischen System (siehe Abbildung 3) sind alle an einer tribologischen Beanspruchung beteiligten stofflichen Komponenten, ihre Eigenschaften und Auswirkungen, erfasst. Zur Struktur des Tribosystems zählen Grundkörper, Gegenkörper, Zwischen- und Umgebungsmedien. Durch Beanspruchung in Form einer Relativbewegung des Gegenkörpers am Grundkörper werden Reibungs- und Verschleißerscheinungen hervorgerufen. Das Belastungskollektiv fasst Dauer und Verlauf der Belastung sowie ihre Bewegungsform (periodisch, wechselnd, Spitzenbelastungen), die Art der Bewegung (gleiten, walzen, strömen, stoßen) und Temperatur und Geschwindigkeit zusammen. Im Kontaktbereich der beiden Körper kommt es aufgrund tribologischer Beanspruchung zu einer Veränderung der Oberfläche und zu verschleißbedingtem Materialverlust. (Gesellschaft für Tribologie 2002)

2.5. REIBUNG

Reibung ist keine Werkstoffeigenschaft, sondern eine Systemeigenschaft. Sie tritt in allen Vorgängen in Natur und Technik auf, ist in bewegten Systemen aber fast immer unerwünscht, da durch Reibung die Funktion von Maschinen verschlechtert wird. Reibung bewirkt, neben Energieverlust, auch Temperaturerhöhungen im System, welche in der Folge zu Verschleiß führen können. Es wird bei störenden Bewegungswiderständen versucht, Reibung durch präventive Maßnahmen wie Schmierung mit Öl oder Fett entgegenzuwirken. Bei Bauteilen wie Bremsen ist Reibung ein wesentlicher Faktor für die ordnungsgemäße und zuverlässige Funktion der kraftschlüssigen Verbindung. Die Normalkraft F_N verhält sich direkt proportional zur Reibkraft F_R , dieser Zusammenhang wird durch das Coulombsche Reibungsgesetz dargestellt. (Sommer et al. 2014)

$$F_R \leq \mu \cdot F_N$$

Die dimensionslose Reibungszahl μ hängt von der Art der Beanspruchung und der tribologischen Struktur der Reibpartner ab. Das Coulombsche Reibungsgesetz gilt nur bedingt, die Grenzen werden zwischen der Betrachtung der geometrischen Kontaktfläche und der Betrachtung der wahren Kontaktfläche gezogen. Zwischen Reibpartnern kommt es aufgrund chemischer und physikalischer Wechselwirkungen zu Oberflächen- und Werkstoffveränderungen in den Oberflächengrenzschichten. Die Beanspruchung metallischer Kontaktbereiche findet nur in einem kleinen Kontaktbereich zwischen den Partnern, der sogenannten „wahren Kontaktfläche“, statt. Von der wahren Kontaktfläche wird in der Tribologie die „geometrische Kontaktfläche“ unterschieden, welche scheinbar auftritt. Aufgrund dieser Unterscheidung wird das Coulombsche Reibungsgesetz einerseits bestätigt, andererseits muss es korrigiert werden. Das Auftreten von Normalkräften zwischen den Partnern führt zu einer elastisch-plastischen Deformation der Oberfläche, es vergrößert sich hierbei die wahre Kontaktfläche so lange sie dieser Belastung gerade noch standhält. Wird die Normalkraft erhöht, so bilden sich bis zur selben Grenzlast wiederum neue Kontaktflächen, die nominelle Flächenpressung bleibt konstant. Solange die Flächenpressung konstant ist, ist auch die Reibungszahl μ konstant, unter dieser Voraussetzung kann im betrachteten Lastbereich das Coulombsche Reibungsgesetz angewandt werden. Durch Betrachtung realer Oberflächen mit Hilfe des Rasterkraftmikroskops wurde festgestellt, dass die Reibungskraft von der wahren Kontaktfläche abhängt. Bei Untersuchungen mit dem Rasterkraftmikroskop können Oberflächen im atomaren Bereich betrachtet werden, somit ist es möglich, im elastischen Bereich die reale Kontaktfläche und die Reibung zu messen. In den Kontaktbereichen der Adsorptions- und Reaktionsschichten der Oberflächen bilden sich Adhäsionsbrüche durch die von der Elektronenstruktur abhängigen Bindungstypen aus, welche des Weiteren für die Festigkeit der Bindung verantwortlich sind. Vielfach treten mehrere Bindungstypen gemeinsam in verschiedenen großen Anteilen auf. Durch die Reibung kommt es zur Beanspruchung der Oberfläche und damit zur beginnenden Zerstörung der Grenzschichten. Im atomaren Bereich entstehen Bindungen unterschiedlicher Festigkeit, welche unter anderem von der Festkörperstruktur, Bewegung, Belastung und der Beschaffenheit und Anzahl der Kontaktflächen abhängt. Durch die Relativbewegung zwischen den Reibpartnern werden Kontaktflächen abgeschert, wieder neu gebildet und anschließend wieder abgeschert. Reibung wird als eine Energieform verstanden und besteht neben dem Adhäsions- und Deformationsanteil aus einem Bruchanteil. (Sommer et al. 2014)

$$W_R = W_{Ad} + W_{Def} + W_{Bruch}$$

Diese Anteile ändern sich während des Reibungsvorganges durch Überlagerung während der Beanspruchung ständig. Bei Gleitreibungsprozessen wird aus der Reibungsenergie W_R eine mittlere Reibungskraft F_R entlang des Gleitweges s bestimmt. (Sommer et al. 2014)

$$W_R = \int F_R ds$$

2.5.1. ARTEN DER REIBUNG

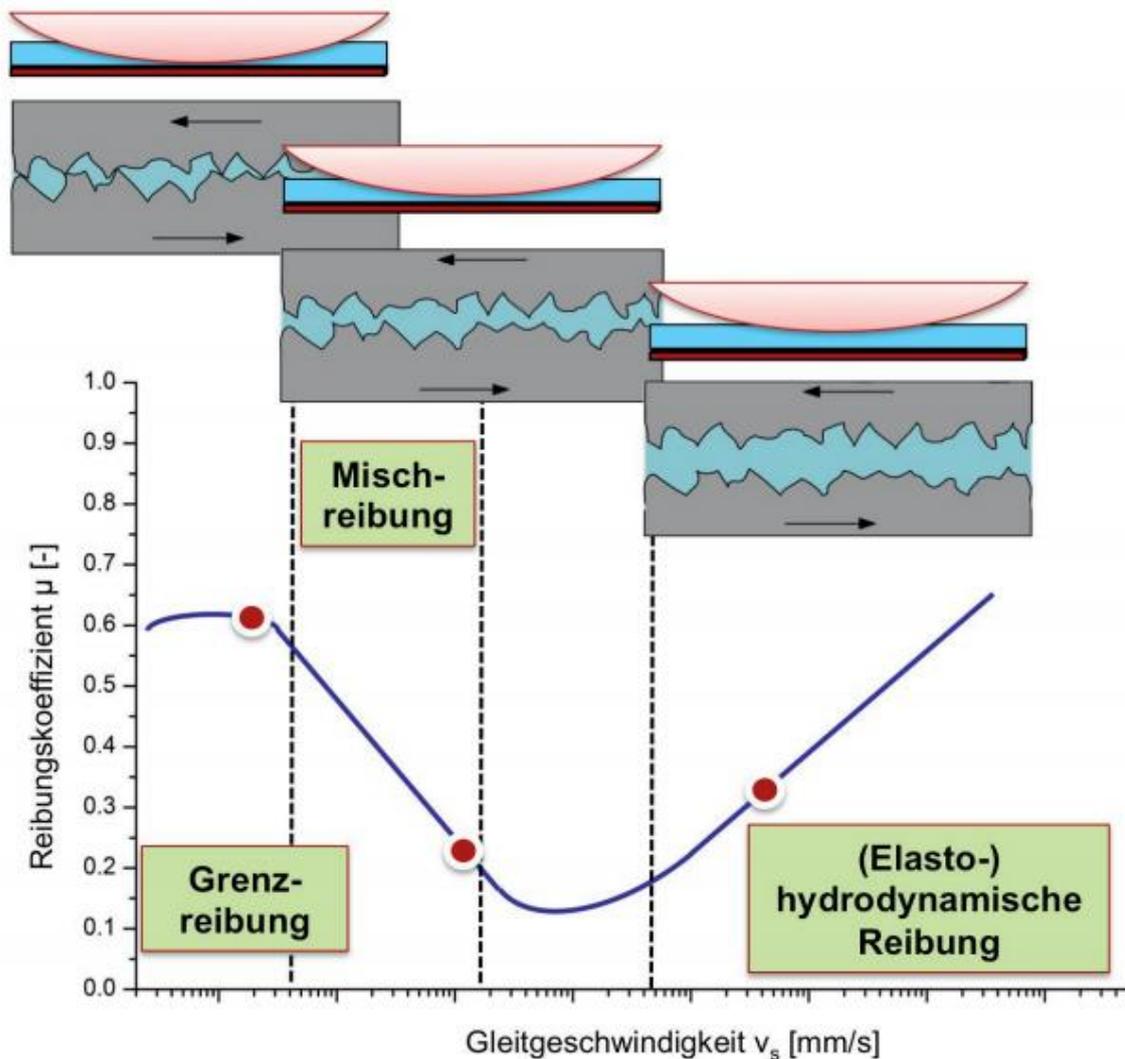


Abbildung 4: Stribeckkurve (Anton Paar)

Die Stribeckkurve gibt den Reibbeiwert bzw. die Reibungszahl als Funktion der Geschwindigkeit an. In Abbildung 4 sind die drei grundlegenden Zustände Grenzreibung, Mischreibung und hydrodynamische Reibung (Flüssigkeitsreibung) zu eingeteilt. Festkörperreibung bzw. Haftreibung: Bei Haftreibung findet keine Relativbewegung statt ($v_s = 0$).

- Grenzreibung: Hierbei handelt es sich um eine Art der Festkörperreibung, bei der die Oberflächen der beteiligten Reibungspartner mit einem molekularen Grenzfilm bedeckt sind.
- Mischreibung: Bei Mischreibung existieren gleichzeitig Festkörper- und Flüssigkeitsreibung.
- Flüssigkeitsreibung: Die Reibung findet in einem flüssigen Film statt, der die beteiligten Reibpartner voneinander trennt. Ist der trennende Film gasförmig, so spricht man von Gasreibung.

Reibung ist als treibende Kraft für Umformprozesse unbedingt nötig, als Nachteile sind die beim Prozess entstehende Wärme und der daraus resultierende Verschleiß zu nennen. Das eingesetzte Schmiermittel beeinflusst einen Umformprozess enorm, konstante Dosierung des geeigneten Schmiermittels ist wichtig. Umformprozesse, wie z.B. Tiefziehen liegen im Bereich der Grenz- bzw. Mischreibung. (Czichos 2010)

2.6. ZUSAMMENHANG REIBUNG – VERSCHLEIß

Damit es zu Verschleiß kommt, muss Reibung herrschen, für Reibung ist Verschleiß jedoch nicht zwingend nötig. Reibung und Verschleiß zählen zu den technologischen Kennwerten, hängen von vielen einzelnen Parametern ab, die aber oftmals unbekannt sind. Aus diesem Grund kann man keinen allgemein geltenden Zusammenhang zwischen Reibung und Verschleiß herstellen. Die umfassende Betrachtung von Reibung und Verschleiß, sowie von Verschleißmechanismen ist wichtig, da Bauteile vorausschauend zu fertigen und entsprechend ihrer Funktion einzusetzen sind. In der Technik ist es seit geraumer Zeit immer wichtiger geworden, etwaige Ausfallskriterien eines Bauteils von vornherein auszuschließen und Schadensfälle so minimal wie möglich zu halten um einerseits Kosten zu minimieren, aber andererseits die Sicherheit zu erhöhen und die Ausfallrate zu verkleinern. Diese Disziplin Mikrotribologie befasst sich mit der Untersuchung der Werkstoffmikrostruktur von technischen Oberflächen. Folgende, in Abbildung 5 dargestellten, metallphysikalischen Merkmale haben Einfluss auf Kontakte von Wirkflächen. (Czichos 2010)

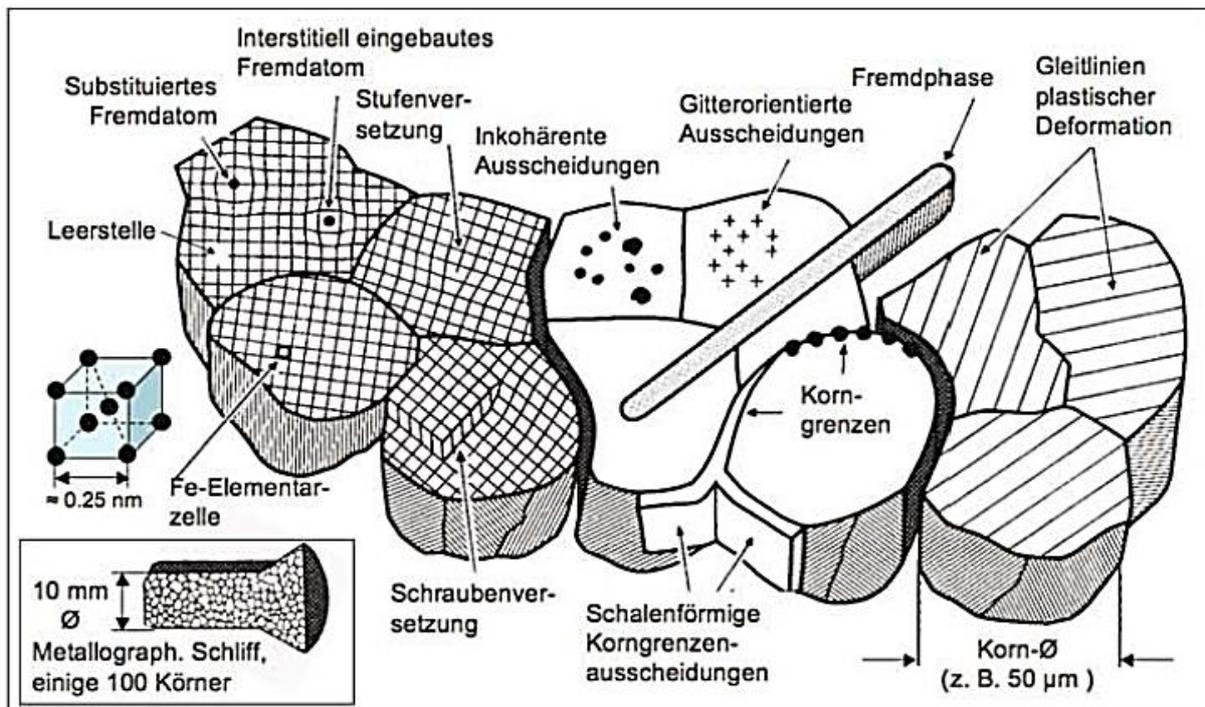


Abbildung 5: Metallphysikalische Merkmale in der Mikrotribologie (Czichos 2010)

Mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops (REM) werden die grundlegend auftretenden Verschleißmechanismen von Oberflächen untersucht.

2.7. VERSCHLEIß

Durch Kontakt und Relativbewegungen des Gegenkörpers wird der Grundkörper tribologisch beansprucht, diese mechanischen Belastungen führen zwingend zum Materialabtrag. Verschleiß ist im Allgemeinen unerwünscht, da mit ihm eine Wertminderung und Funktionsbeeinträchtigung einhergeht. (Gesellschaft für Tribologie 2002)

Während des Verschleißvorgangs laufen chemische und physikalische Prozesse ab, diese werden unter dem Begriff „Verschleißmechanismen“ zusammengefasst. Diese Prozesse lösen Wechselwirkungen aus und führen zu Stoff- und Formänderungen von Grund- und Gegenkörper. Durch die Berührung

von Grund- und Gegenkörper nimmt die Anzahl der Mikrokontakte kontinuierlich zu, die wahre Kontaktfläche vergrößert sich annähernd linear mit der einwirkenden Normalkraft F_N entlang des Gleitweges s . Das Verschleißvolumen ergibt sich somit zu: (Czichos 2010)

$$W_V = k \cdot F_N \cdot s$$

k ist die Verschleißrate, bzw. der Verschleißkoeffizient und gibt den bei konstanter Last nach einem bestimmten Gleitweg Volumenverlust pro Lasteinheit an. Um je nach Anwendungsfall bzw. Einbaulage des Bauteils mit Hilfe einer Werkstoffwahl einen geeigneten Werkstoff auswählen zu können, ist es nötig, ausreichende Kenntnisse über Verschleißmechanismen zu besitzen. In Abbildung 6 sind die vorkommenden Verschleißmechanismen Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung (Ermüdung), tribochemische Reaktion (Tribooxidation) in ihrer Erscheinungsform dargestellt. (Czichos 2010)

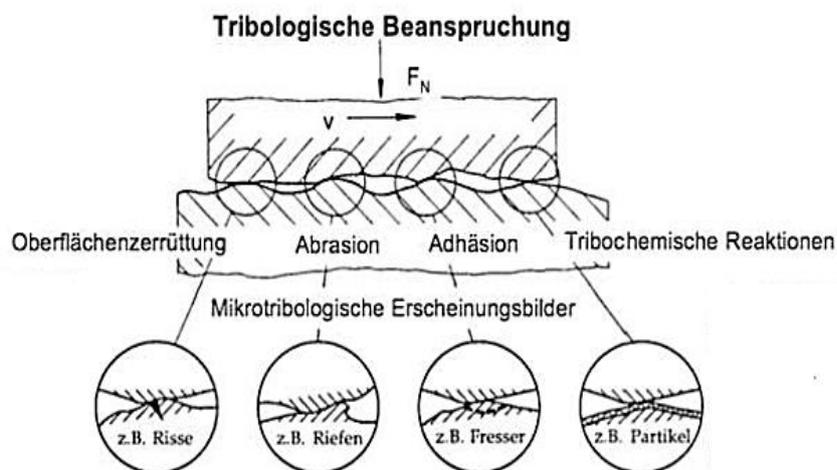


Abbildung 6: Verschleißmechanismen (Czichos 2010)

2.7.1. ABRASION

Bei Abrasion dringen verfestigte Partikel unter Last in Festkörper ein und gleiten über deren Oberflächen, es kommt zu einer ritzenden Beanspruchung. Dabei kommt es bei duktilen Werkstoffen zu Mikroverformung und Mikrozerspanung, bei spröden Werkstoffen können diese Prozesse zu Mikrobrechen führen. Das Tribosystem und die Härte der Abrasivstoffe bestimmen, bedingt durch die Kinematik des Kornes und seinen Gleitweg, die Art des Verschleißes. Wirkt der Abrasivstoff in gebundener Form als Gegenkörper, so führen diese Körner bei Tangentialbeanspruchung den längsten Gleitweg aus. Sind Abrasivkörner lose oder wirken sie als Zwischenstoffe, so führen sie auch Rollbewegungen aus, weshalb die Gleitwege auf reine Druckprozesse minimiert werden. Somit kommt es nicht zu Mikrozerspanung, der Abtrag ähnelt einem Läppvorgang. Das Erscheinungsbild der Oberfläche ist durch Riefen, Druckstellen, Wälle, Ausbrüche und eingebetteten Stücken von Abrasivstoffen bzw. Verschleißpartikeln gekennzeichnet. (Sommer et al. 2014)

2.7.2. TRIBOREAKTIONEN

Zwischen Festkörper, Schmiermittel und Umgebung kommt es, bedingt durch tribologische Beanspruchung, zu chemischen Reaktionen. Häufig kommt es etwa durch den Sauerstoff der Umgebungsatmosphäre zu Tribooxidation. Ist eine Oberfläche plastisch verformt, kommt es zu einer beschleunigten Oxidation. (Sommer et al. 2014)

2.7.3. OBERFLÄCHENZERRÜTTUNG

Werden Oberflächen von Festkörpern zyklisch belastet, so kommt es zu Oberflächenzerrüttung. Plastische Deformation führt zu Anrissen, welche sich ausbreiten und bei fortgesetzter Beanspruchung zu Ausbrechungen führen. Anfällig für Oberflächenzerrüttung sind v.a. wechselnde Zug- und Druckspannungen bei Wälzkontakten, hierbei treten Normal- und Tangentialkräfte auf, welche zu Werkstoffzerrüttung führen. Die Lage der Maximalspannungen bestimmt den Schadensort. Bei elastohydrodynamischen Kontakt liegt das Maximum der Spannung unterhalb der Oberfläche. Solange Schmierung vorliegt, breiten sich Risse im Werkstoff unter der Oberfläche aus. Bei Misch- oder Grenzreibung gehen die Risse jedoch von der Werkstoffoberfläche aus und wachsen unter bestimmten Winkeln ins Innere des Werkstoffes hinein. Je länger und zyklischer die Beanspruchung andauert, desto schneller kommt es zu einer Schädigung der Oberfläche. Werden Kontaktflächen metallischer Festkörper nicht geschmiert, so kommt es bei Gleitvorgängen zu Delamination. Dabei bilden sich in verformten Randzonen zuerst Risse, aus denen sich parallel zur Gleitfläche Risse entwickeln. Aus den verformten Zonen brechen plättchenförmige Verschleißpartikel heraus. Bei Bauteilen ist es wichtig, durch eine entsprechende Dauerfestigkeitsberechnung eine entsprechende Dimensionierung zu bestimmen, um Oberflächenzerrüttung zu vermeiden. (Sommer et al. 2014)

2.7.4. ADHÄSION

Aufgrund der Oberflächenrauheit technischer Oberflächen sind diese nie ideal glatt, es kommt zur Kraftübertragung an lokalen Kontaktstellen. Schub- und Normalbeanspruchungen in der Oberfläche verursachen elastisch-plastische Verformungen, die Oberflächenschichten werden somit zerstört. Die Kontaktstellen entwickeln sich nun zu metallisch blanken Kontaktbereichen, welche, verursacht durch atomare Bindungen, feste Verbindungen eingehen. Dieser Prozess der Entstehung der Haftbrücken ist unter dem Begriff „Adhäsion“ bekannt. Im Vakuum bildet sich besonders hohe Adhäsion aus. Je nach Festigkeit der sich ausbildenden Adhäsion kommt es entweder zur Trennung in der Bindungsebene der beiden Werkstoffe, oder im Grundwerkstoff einer der beiden Werkstoffe. Wenn diese Trennung nicht in der Bindungsebene passiert, kommt es zu einem Werkstoffübertrag und somit zu Verschleiß. Adhäsive Verschleißformen sind etwa Riefen, Scherwaben, Materialübertrag, Schubriss, Gefügemwandlungen und plastische Verformungen, hervorgerufen wird Adhäsion durch Fressen (lokale Mikroverschweißungen). Adhäsion kann durch einen Schmierfilm zwischen den beiden Werkstoffen vermieden werden. Verschiedene Werkstoffkombinationen (Metall/Kunststoff, Kunststoff/Kunststoff, Keramik/Kunststoff, Keramik/Keramik) können Adhäsion aufgrund ihrer verschiedenen Strukturen ebenfalls verringern. Heterogene Gefüge aus karbidreichen Werkstoffen sind nicht besonders anfällig für Adhäsion, weil beim Zusammentreffen der Karbide kaum Gefahr möglicher Mikroverschweißungen gegeben ist. Die Neigung zur Adhäsion hängt auch von der Gitterstruktur der Metalle ab. Kubisch flächenzentrierte kfz Metalle (Al, Au, Ag, Cu, Ni, Pt) neigen eher zur Ausbildung von Adhäsion als kubisch raumzentrierte krz Metalle (Fe, Mo, Ta, W) oder hexagonale Metalle (Be, Cd, Co, Mg, Zn). Der Grund für die große Neigung zur Adhäsion kfz Metalle liegt am Gitter: Sie haben innerhalb ihrer Gitterstruktur mehr Gleitmöglichkeiten als krz oder hexagonale Metalle. (Sommer et al. 2014)

2.7.5. ABLATION

Der Materialverlust entsteht infolge großer Leistungsdichten bei hohen Temperaturen. Von Ablation betroffene Werkstoffe weisen eine hohe Verdampfungswärme, aber eine niedrige Wärmeleitfähigkeit auf, daher tritt Ablation in der Praxis selten auf. (Sommer et al. 2014)

2.8. AUFTRAGSCHWEIßEN

Mit Hilfe des Verfahrens „Auftragschweißen“ wird die Oberfläche eines Werkstücks beschichtet. Das Verfahren wird eingesetzt, um Oberflächen zu reparieren oder um einen Werkstoffverbund mit einer funktionalen Oberfläche zu erzeugen. Ein Hauptziel ist es, durch Aufbringen eines geeigneten Auftragwerkstoffs auf den Substratwerkstoff den Widerstand gegen Verschleiß und Korrosionsangriff des jeweiligen Werkstücks bzw. Werkzeugs zu erhöhen und zu verbessern. Durch Auftragschweißen ist es möglich, die Dicke des aufgetragenen Schweißguts je nach Anwendung des Bauteils zu variieren. Es werden Schichten erzeugt, die extremen Belastungen standhalten können (Schlag-, Stoß-, Biegebeanspruchungen). Als weiteren Vorteil ist zu nennen, dass es möglich ist, auch auf flächenmäßig große Bauteile Schichten durch Auftragschweißen aufzubringen. Das Verfahren ist auf nahezu alle metallischen Substratwerkstoffe anwendbar. (Fahrenwaldt und Schuler)

Auftragschweißen wird in vier verschiedene Teilbereiche gegliedert:

Panzern

Der Auftragwerkstoff ist verschleißfester als der Substratwerkstoff. Ziel einer Panzerung ist es, den Verschleißwiderstand zu erhöhen, um eine Verschleißschutzschicht herzustellen. Substrat- und Auftragwerkstoff sind nicht artgleich.

Plattieren

Der Auftragwerkstoff ist chemisch beständiger als der Substratwerkstoff, die beiden Werkstoffe sind nicht aus demselben Material. Durch Plattierungen wird verbesserter Korrosionsschutz erzielt.

Pufferschichten

Können zwei artverschiedene Werkstoffe durch Schweißen nicht miteinander verbunden werden, wird durch Puffern eine Zwischenschicht erzeugt, welche eine beanspruchungsgerechte Bindung gewährleistet.

Formgebendes Auftragschweißen

Auf einen Substratwerkstoff wird ein artgleicher Auftragwerkstoff aufgetragen, dadurch werden definierte Konturen erzeugt. (Fahrenwaldt und Schuler)

Auftragschweißen zählt zu den generierenden Verfahren, je nach Anforderung an die Arbeitsaufgabe kommt manuelles oder automatisiertes Laserauftragsschweißen zum Einsatz.

2.9. MANUELLES AUFTRAGSCHWEIßEN

Das Verfahren ist ähnlich dem des Schmelzschweißens mit Zusatzwerkstoff, dieser muss jedoch beim manuellen Auftragschweißen keinen breiten Fügspalt auffüllen. Mit Hilfe des Zusatzwerkstoffes wird eine definierte Form auf die Oberfläche des Werkstücks aufgebracht. Der Zusatzwerkstoff in Drahtform mit einem Durchmesser von $0,15 \div 0,6 \text{ mm}$ wird vom Schweißer manuell zur Bearbeitungsstelle gebracht. Der Laserstrahl schmilzt den Drahtwerkstoff auf, der aufgeschmolzene Draht verbindet sich mit dem angeschmolzenen Substratwerkstoff, die Schmelze erstarrt wieder. Auf diese Art werden Punkte, Linien und Flächen in der gewünschten Form und in der geforderten Anzahl von Schichten aufgeschweißt. Die Abschirmung des Arbeitsprozesses gegenüber Luftzufuhr wird durch einen Gasstrom aus Argon gewährleistet. Manuelles Auftragschweißen kommt dort zum Einsatz, wo Material aufgrund Verschleißes bzw. durch Beschädigung fehlt. Zuerst wird der

beschädigte bzw. der auszubessernde Bereich des Bauteils abgeschliffen und gereinigt. Danach wird vom Schweißer neues Material aufgetragen, anschließend wird durch Fertigungsverfahren wie Fräsen, Drehen, Schleifen oder Erodieren die ursprüngliche, gewünschte Form wiederhergestellt. Diese Reparaturarbeiten wurden, bevor es Arbeitsverfahren mit Laser gab, mit z.B. dem WIG Verfahren erledigt. Mit Wolframinertgasschweißen ist genaues Arbeiten jedoch nicht möglich, da das Werkstück durch den Lichtbogen großflächig erwärmt wird und es dadurch leicht zu Verzug kommen kann. Eine weitere Schwierigkeit ist, dass der Lichtbogen tiefe Spalten und Innenkanten des Werkstücks nicht erreichen kann, da er von den Wänden aufgrund Reflexion abgelenkt wird. Im Gegensatz dazu erwärmt der Laserstrahl das Werkstück gezielt und lokal. Nur wenige Millimeter von der zu schweißenden Stelle entfernt bleibt das Werkstück kalt. Dadurch ist es möglich, ohne Verzug und ohne Einbrand auftragzuschweißen. Innenliegende Kanten und tiefe Bohrungen können mit dem Laserstrahl problemlos angesteuert und erreicht werden. Bei präziser Einstellung des Lasers hält sich die Nachbearbeitung in Grenzen. Um ein Volumen von mehreren Kubikzentimetern an Material herzustellen, wird in der Praxis automatisiertes Laserauftragschweißen anstatt manuellem Laserauftragschweißen verwendet, da manuelle Verfahren zu lange dauern. Manuelles Laserauftragschweißen wird an Handarbeitsplätzen durchgeführt. Die Schweißmaschinen sind kompakt, es ist möglich, kleine Bauteile zu bearbeiten und reparieren. Der geübte Schweißer betrachtet die zu bearbeitende Stelle durch ein Stereomikroskop und fertigt die Auftragsschweißung an. Für das Bearbeiten von Bauteilen mit Abmessungen von mehreren Metern sind die Bearbeitungsoptiken frei stehend und beweglich ausgeführt. Flexibel einsetzbar ist die handgeführte Bearbeitungsoptik, diese eignet sich sehr gut für Auftragschweißen an großen Bauteilen, setzt aber viel Erfahrung und großes Geschick des Schweißers voraus.

2.10. LASERAUFTRAGSCHWEIßEN

Für den Begriff Laserauftragschweißen bzw. englisch Laser Cladding gibt es verschiedene Bezeichnungen zB. Direct Metal Deposition (DMD) oder Laser Metal Deposition (LMD).

Beim automatisierten Laserauftragschweißen wird das Werkstück vom Laserstrahl lokal erwärmt, dieser erzeugt auf der Oberfläche ein Schmelzbad. Aus einer Düse wird feines Metallpulver direkt in das Schmelzbad gesprüht. Dieser Zusatzwerkstoff schmilzt unter Schutzgasatmosphäre im Schmelzbad auf und verbindet sich mit dem Substratwerkstoff, das aufgetragene Material weist eine Dicke im Bereich von $0,2\div 1$ mm auf. Der Prozess des automatisierten Laserauftragschweißens ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt. (Buchfink und Leibinger-Kammüller 2006)

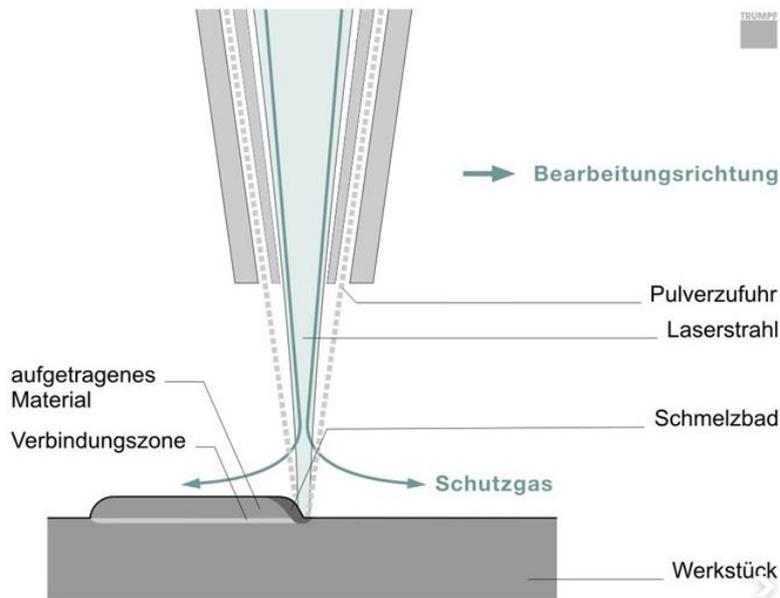


Abbildung 7: Automatisiertes Laserauftragschweißen (Buchfink und Leibinger-Kammüller 2006)

Je nach Anwendungsfall kann eine beliebige Anzahl von Schichten in der benötigten Höhe übereinander aufgetragen werden. Es ist möglich, Linien, Bahnen, Flächen (auch Freiformflächen) und 3D-Strukturen aufzutragen, die gewünschte Geometrie muss zuerst mit Hilfe eines geeigneten Softwaretools programmiert werden. Ziel des automatisierten Laserauftragschweißens ist, wie auch beim manuellen Auftragschweißen, die Reparatur beschädigter Oberflächen bzw. die Veredelung von Oberflächen zum Erreichen einer Schutzschicht in Bezug auf Korrosion oder Verschleiß. Der Vorteil des Prozesses ist, dass die geforderten Geometrien und Strukturen gezielt in der benötigten Höhe und Form mit geeigneten und qualitativen Werkstoffen auf die Oberfläche aufgetragen werden können. Da der Auftragprozess mittels eines genau fokussierbaren Laserstrahls ausgeführt wird, hält sich der auf den Substratwerkstoff wirkende Wärmeeintrag, welcher in weiterer Folge zu Verzug führen würde, in Grenzen. Die gewünschte Oberflächenkontur aus einem teuren Werkzeugstahl wird auf einen Grundkörper mit geeigneten Werkstoffeigenschaften für die jeweilige Anwendung aufgebracht. Um wirtschaftlich zu arbeiten, werden zum Teil kostengünstige Substratwerkstoffe eingesetzt. Generell können die Werkstoffe nach Belieben kombiniert werden. Nachdem die Geometrie mittels Laser mit Übermaß auf die Oberfläche aufgetragen wurde, wird die endgültige Form anhand zerspanender Bearbeitungsverfahren (v.a. Fräsen, Schleifen) hergestellt. Die Auftragsraten von DMD-Anlagen können bis zu $600 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}}$ betragen. Substratwerkstoff und aufgetragener Werkstoff können aus verschiedenen Werkstoffen bestehen, der Zusatzwerkstoff kann aus mehreren Komponenten gemischt werden und wird zumeist in Pulverform zugeführt. Als Schutzgas wird meist Argon und Helium verwendet. Konkrete Anwendungen von Laserauftragschweißen im Maschinen-, Werkzeug- und Anlagenbau sind:

- Spritzgusswerkzeug: Der Werkzeugkörper besteht aus einem gut leitenden Werkstoff (z.B. Kupfer), welches Wärme besonders gut ableitet. Die formgebende Oberfläche des Werkzeugs wird daher mit verschleißresistentem Werkstoff beschichtet, um einerseits die Zykluszeit zu reduzieren und andererseits die Standzeit des Werkzeugs zu erhöhen. Die Verknüpfung der Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit und Verschleißfestigkeit führen zu sogenannten funktionell graduierten Beschichtungen.
- Bestehende Werkzeuge können bei Änderung des Designs durch Auftragschweißen modifiziert werden. Somit müssen nicht ständig neue Werkzeuge hergestellt werden, es werden nur die nötigen Veränderungen am Werkzeug realisiert, um Kosten, Zeit und Ressourcen zu sparen.

- Beschädigte Komponenten an Maschinen werden durch Auftragschweißen kostengünstig repariert.
- Im Chemie- und Anlagenbau wird DMD eingesetzt, um Korrosionsschutzschichten zu erzeugen.

(Buchfink und Leibinger-Kammüller 2006)

2.11. ANLAGENTECHNIK

In Abbildung 8 ist die Laserauftragschweiß-Anlage „Trumpf TrumaForm DMD 505“, welche in der Werkstatt des Instituts für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion steht und mit welcher sämtliche Beschichtungen aufgeschweißt werden, zu sehen. Die Anlage verfügt über einen CO₂ Laser mit einer maximalen Leistung von 3200W. Der Resonator ist in zwei übereinander liegende Quadrate gefaltet, zur Umlenkung des Laserstrahls stehen acht Umlenkspiegel, ein Rückkoppelspiegel und ein Auskoppelspiegel zur Verfügung. Der erzeugte Laserstrahl weist nach dem Resonator einen Durchmesser von 15mm auf, mit Hilfe eines adaptiven Cu-Spiegels kann die Lage des Fokus in Laserstrahlrichtung im Intervall [-20mm; +20mm] eingestellt werden. Das Metallpulver, welches die Beschichtung erzeugt, lagert in einem hermetisch abgeschlossenen Behälter (Abbildung 8, rechts). Die Metallpulverpartikel fließen schwerkraftbedingt in einen Trichter, diese werden durch eine rotierende Welle angetrieben und anschließend mit einem Trägergasgemisch aus Argon und Helium versetzt. Das Gemisch aus Metallpulver und Trägergas gelangt anschließend in die Düse. Für das Schweißen sämtlicher Beschichtungen wird die am Institut entwickelte 4-Strahldüse verwendet (siehe Abbildung 8, Mitte).



Abbildung 8: Links: Laseranlage Trumpf DMD 505, 5-Achsen-CNC, 3200 Watt CO₂-Laserzelle; Mitte: 4-Strahldüse; Rechts: hermetisch abgedichteter Pulverbehälter

Links in Abbildung 8, am schwenkbaren Seitenarm, befindet sich die Steuerungseinrichtung der Anlage. Die Steuerung sämtlicher Programme erfolgt im NC Code mit Siemens SINUMERIK. Ausgehend von der Steuerungseinrichtung kann mit den fünf Achsen der Anlage verfahren werden. Rechts darunter befindet sich der PC zur Überwachung der Einstellungen des Lasers. Hinter der geschlossenen Türe ist die Laserzelle, in welcher der Prozess des Laserauftragschweißens erfolgt. Die Auftragsschweißeinheit besteht aus dem Pulverförderungssystem und dem Laserbearbeitungskopf mit inkludierter Pulverdüse und Schutzgaszufuhr.

2.12. PRAXISBEISPIEL – REPARATUR BESCHÄDIGTER BAUTEILE

Zur Veranschaulichung der Theorie wird im folgenden Verlauf ein Beispiel aus der Praxis für die Reparatur mit Hilfe des Verfahrens Laserauftragschweißen gezeigt. Die Welle einer Pumpe weist, bedingt durch die zyklische Belastung im Betrieb, ein eingelaufenes Wellenende, eine ausgeschlagene Passfedernut sowie eingelaufene Dichtflächen auf. Mittels Laserauftragschweißen ist es möglich, die beschädigten Bereiche lokal zu reparieren. Ein geeigneter Zusatzwerkstoff (hier Stellite) wird ausgewählt und nach Reinigung der beschädigten Oberflächen direkt auf diese aufgetragen. Stellite sind Hartlegierungen auf Chrom-Cobalt Basis und werden als Beschichtungswerkstoffe bevorzugt bei Bauteilen eingesetzt, die einer hohen Verschleißbelastung (Wellen) ausgesetzt sind. Nach dem Auftragschweißen werden die Passfedernut und die Dichtflächen passungsgenau durch mechanische Bearbeitung wiederhergestellt. Selbst Schweißungen mit geringen Schichtdicken können so realisiert werden, ohne dass der ursprüngliche Querschnitt beträchtlich geschwächt wird. Durch diese Reparaturmöglichkeit ist es möglich, dass Bauteile schnell wieder in Einsatz gebracht werden können, somit ist Ressourcen- und Kostenersparnis gegeben. In Abbildung 9 ist der Reparaturvorgang einer Passfedernut links und einer Dichtungsfläche rechts schrittweise dargestellt. (Marcomin 2016)

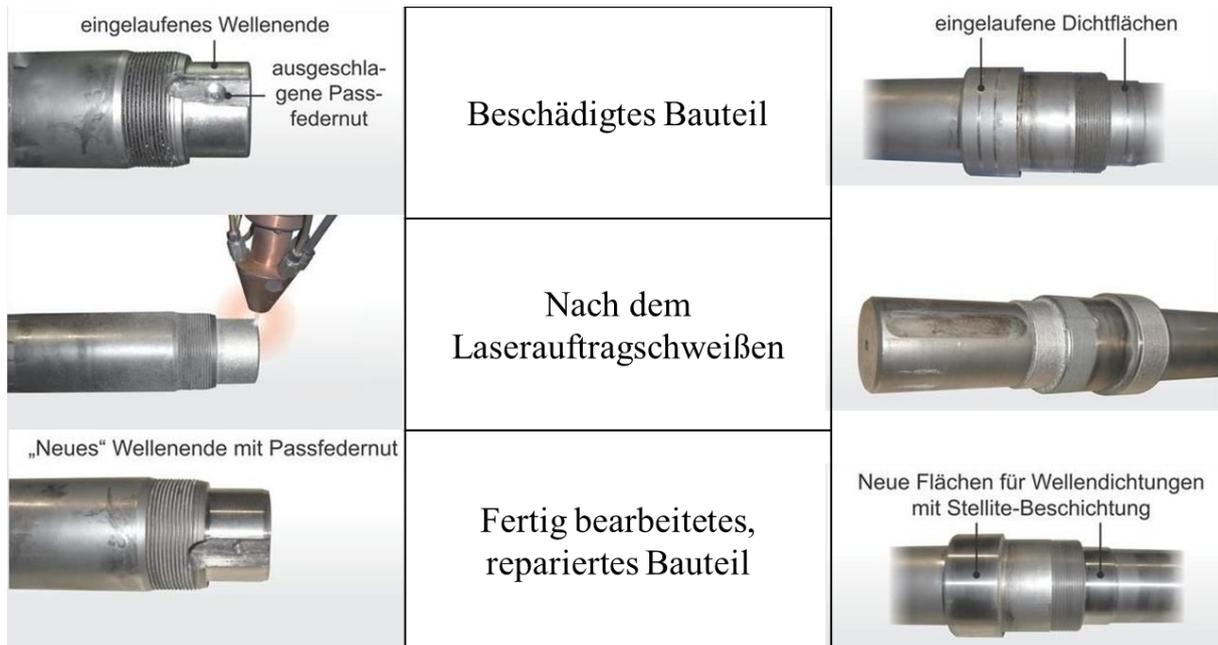


Abbildung 9: Reparatur einer Pumpenwelle mittels Laserauftragschweißen (Marcomin 2016)

2.13. PRESSHÄRTEN

Mit dem Verfahren Laserauftragschweißen werden in der Praxis Oberflächen von warmfesten Werkzeugen, die zur Umformung pressgehärteter Bauteile verwendet werden, beschichtet, um eine verschleißfeste Werkzeugoberfläche zu erhalten. Bei Presshärten handelt es sich um ein Blechwarmumformverfahren zur Herstellung von Bauteilen aus hoch- und höchstfesten Blechen, sogenannten Platinen. Pressgehärtete Bauteile werden vor allem im Automobilbau für sicherheitsrelevante Komponenten wie Längsträger, A-Säulen und B-Säulen im Fahrzeug verbaut und verbinden daher die Eigenschaften Leichtbau, Werkstofftechnik, Werkzeugbau mit Insassensicherheit im Fahrzeug.

Man unterscheidet zwischen indirektem und direktem Presshärten:

2.13.1. INDIREKTES PRESSHÄRTEN

Das Blech wird im weichen und kalten Zustand zur gewünschten Endgeometrie umgeformt. Das kaltumgeformte Bauteil wird auf ca. 900°C erwärmt und dadurch austenitisiert, im erwärmten Zustand kommt es zur Fixierung der Bauteilgeometrie (Formhärten). Anschließend erfolgt die Abschreckung zwischen gekühlten Werkzeugen, das Bauteil wird gehärtet. Indirektes Presshärten ist mit hoher Maßgenauigkeit möglich, das Verfahren ist aufwendig und wird daher bei geringen Fertigungsstückzahlen eingesetzt.

2.13.2. DIREKTES PRESSHÄRTEN

Die Umformung des zuvor auf 900°C erhitzen und dadurch austenitisierten Blechs und das anschließende Abschrecken in einem gekühlten Werkzeug erfolgt in einem Arbeitsschritt. Nach dem Abschrecken werden die Bauteile zugeschnitten und erhalten somit ihre endgültige Kontur. Direktes Presshärten kommt bei einfachen Bauteilgeometrien und hohen Stückzahlen zum Einsatz. Die in die Umformung integrierte Wärmebehandlung erzeugt ein martensitisches Gefüge, sodass pressgehärtete Bauteile Zugfestigkeiten bis zu $1800 \frac{N}{mm^2}$ aufweisen. Diese Bauteile werden als crashrelevante Strukturbauteile (A- und B-Säulenverstärkung, Stoßfänger) im Karosseriebau verbaut. (Fraunhofer IWU)

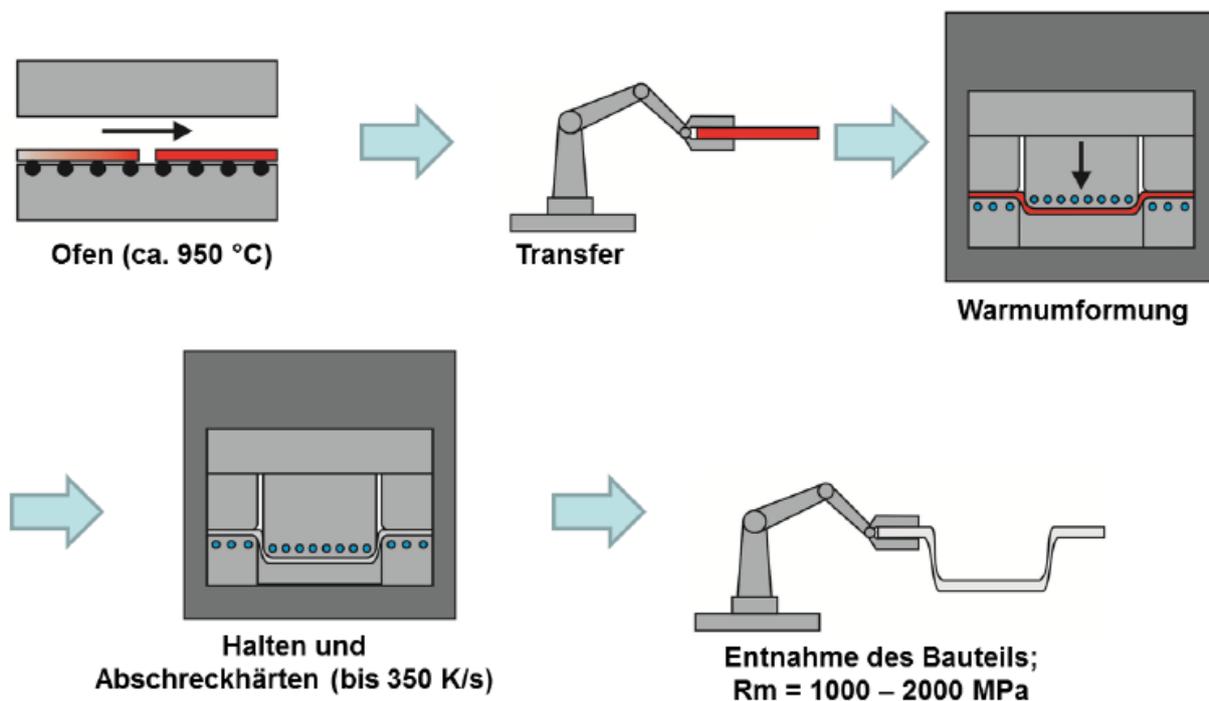


Abbildung 10: Prozessablauf des direkten Presshärtens (Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP 2013)

In Abbildung 10 ist der Prozessablauf des direkten Presshärtens dargestellt. Zuerst werden Platinen mit ferritisch-perlitischem Ausgangsgefüge im Ofen über die AC_3 -Temperatur erwärmt (austenisiert). Der Ofen kann als Durchlaufofen, stationärer Induktionsofen oder Kammerofen ausgelegt sein. Nach dem Aufheizvorgang wird die Platine mittels Roboter oder manuell aus dem Ofen entnommen und in das Presswerkzeug eingelegt. Die Platine wird sofort nach dem Einlegen durch den Schließvorgang der hydraulischen Presse zu einem Blechbauteil umgeformt. Da der Umformvorgang bei hohen Temperaturen stattfindet, sind die Umformkräfte gering. Nach dem Umformen wird das Bauteil im

geschlossenen Presswerkzeug für maximal 20 Sekunden gehalten. Das Presswerkzeug ist von Kühlkanälen, durch welches ein geeignetes Kühlmittel fließt, durchzogen. Das Blechbauteil wird entweder homogen oder partiell mit einer Abschreckrate im Bereich von $27 - 350 \frac{K}{s}$ gekühlt. Das umgeformte, abschreckgehärtete Bauteil wird nach dem Ablauf der Haltezeit aus dem Werkzeug entnommen und weist martensitisches Gefüge auf, welches homogen ausgebildet sein kann, bzw. partiell aus weicheren Bereichen mit Mischgefügen (Perlit, Bainit, Ferrit, Ledeburit) besteht. Das martensitische Gefüge ist für die große Härte des Bauteils verantwortlich. (Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP 2013)

Bei Bedarf bzw. je nach Anwendungsfall kann die Oberfläche des pressgehärteten Bauteils bei beiden Verfahren nachbehandelt werden, dies ist mit zusätzlichen Ressourcen in Bezug auf Zeit und Kosten verbunden.

2.14. SCHWEIßPROZESSKENNGRÖßEN

2.14.1. AUFMISCHEN BZW. AUFMISCHUNGSGRAD

Ziel des Laserauftragschweißens ist es, metallische Werkstoffe mit einem artfremden oder artgleichen Zusatzwerkstoff zu beschichten, um eine Oberfläche mit gewünschten Schichteigenschaften zu erhalten. Beim Anschmelzen des Grundwerkstoffes entsteht eine Zone, in der sich Grund- und Zusatzwerkstoff vermischen. Um die Eigenschaften des Metallpulvers an der Oberfläche zu erhalten, werden beim Auftragsschweißen Aufmischungsgrade von 5-10% angepeilt, bei Verbindungsschweißverfahren sind die erzielten Aufmischungsgrade wesentlich höher.

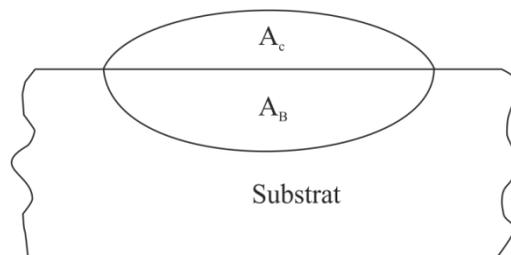


Abbildung 11: Aufmischungsgrad

Der Aufmischungsgrad A wird mit Hilfe der Formel $A = \frac{A_B}{A_B + A_C}$ berechnet. Mit größer werdendem Aufmischungsgrad ist der Übergang vom Beschichten zum Legieren fließend. Bei schlecht kombinierbaren Materialien kommt es bei hohen Aufmischungsgraden zur Bildung intermetallischer Phasen und zur Verschwendung von Energie, daher ist beim Laserauftragschweißen darauf zu achten, dass der Aufmischungsgrad so gering wie möglich gehalten wird. Bei einem hohen Aufmischungsgrad wird viel Energie in das Aufschmelzen des Grundwerkstoffes investiert, welche somit für den Aufbau der Spur nicht mehr genutzt werden kann, des Weiteren kommt es zu erhöhter Wärmeeinbringung, welche in Folge zu Verzug führt. Aus wirtschaftlicher Sicht ist es somit sinnvoll, beim Auftragsschweißen mit kleinen Aufmischungsgraden zu arbeiten, wobei hier die Gefahr der mangelnden Spurhaftung gegeben ist. Wird der Grundwerkstoff nicht angeschmolzen, weil die Energie dafür nicht ausreicht, so kommt es zu Lunkerbildung, welche die Haftfestigkeit der Beschichtung am Grundwerkstoff negativ beeinflusst. (Walter 2007)

2.14.2. EIGENSPANNUNGEN

Eigenstressen (residual stress), sind mechanische Spannungen, die in einem im Gleichgewicht befindlichen Körper ohne Einwirkung äußerer Kräfte und Momente vorhanden sind. ($\sum F = 0$ und $\sum M = 0$). Sie sind nicht sichtbar, aber wirken sich auf das Festigkeitsverhalten eines Bauteils aus. Eigenstressen liegen entweder als Zug- oder Druckspannungen vor und beeinflussen die Eigenschaften der Beschichtung. Durch Kontraktionsspannungen (Zugspannungen $\sigma > 0$) kommt es zum Zusammenziehen der Schicht, bei Dilatationsspannungen (Druckspannungen $\sigma < 0$) strebt die Schicht danach, sich auszudehnen. Man unterscheidet innere Spannungen generell zwischen artfremden und arteigenen Spannungen, wobei die arteigenen inneren Spannungen unabhängig vom Substratwerkstoff sind und nach dem Ablösen einer Beschichtung vom Substrat in der Beschichtung vorhanden bleiben. Durch das Zusammenwirken von Beschichtungs- und Substratwerkstoff kommt es zur Ausbildung artfremder innerer Spannungen. Innere Spannungen werden, um sie genauer beschreiben zu können, in Eigenstressen 1., 2. und 3. Art eingeteilt. (Kanani 2007)

Eigenstressen 1. Art:

Hierbei handelt es sich um Makrospannungen, die über mehrere Körner konstant sind. Diese Spannungen wirken über Bereiche $> 1\text{mm}$, die Maßänderung ist makroskopisch messbar.

Eigenstressen 2. Art:

Diese Mikrospannungen wirken über kleinere Kornbereiche zwischen $0,5\mu\text{m}$ und 1mm und sind innerhalb des Kornbereichs konstant. Eigenstressen 2. Art sind makroskopisch nicht messbar, da sie im Werkstoff meist statistisch verteilt sind.

Eigenstressen 3. Art:

Art wirken innerhalb eines Kornes, also im atomaren Bereich $< 0,5\mu\text{m}$. Es kommt hier zur Ausbildung typischer Gitterfehler (Einlagerung von Fremdatomen, Leerstellen, Stufen- und Schraubenversetzungen, Einschlüsse, Ausscheidungen, Mikrorisse)

In einem Bauteil kommt es zur Überlagerung der verschiedenen Arten von Eigenstressen (siehe Abbildung 12) im Bereich mehrerer Körner.

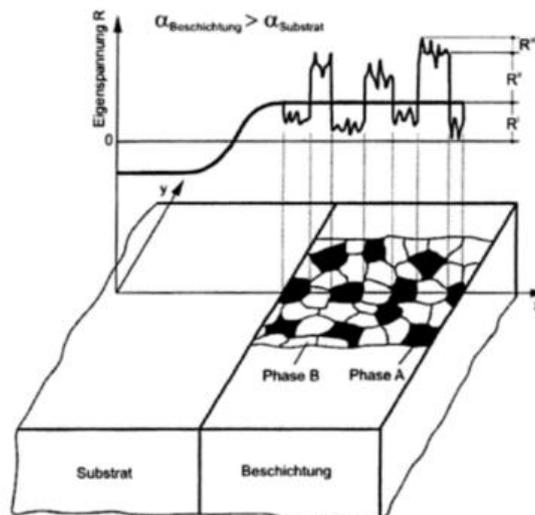


Abbildung 12: Eigenstressen in der Beschichtung (Kanani 2007)

Durch die auftretenden Eigenspannungen in einer technischen Oberflächenbeschichtung werden Eigenschaften wie Härte, Duktilität, Korrosionsverhalten der Beschichtung und die Haftfestigkeit zwischen Substrat und Beschichtung der Oberfläche bestimmt. Die Entstehung von Eigenspannungen ist auf mechanische, thermische oder metallurgische Beanspruchungen des Bauteils zurückzuführen. Beim Schweißvorgang wird das Bauteil im Bereich der Schweißnaht lokal erwärmt, bei der anschließenden Abkühlung kommt es zur Plastifizierung des Bauteils, welche im weiteren Verlauf zu einer Behinderung der Wärmedehnung und zur Entstehung von Eigenspannungen führt. Die Bildung von Eigenspannungen startet ab dem Erreichen der Maximaltemperatur und dauert bis zur vollständigen Abkühlung des Bauteils an. Je größer die Formänderung des Bauteils behindert wird, desto stärker bilden sich die Eigenspannungen aus, sie erreichen ihren Maximalwert vor Erreichen der Streckgrenze des Werkstoffes, nähern sich dieser asymptotisch an und überschreiten sie niemals.

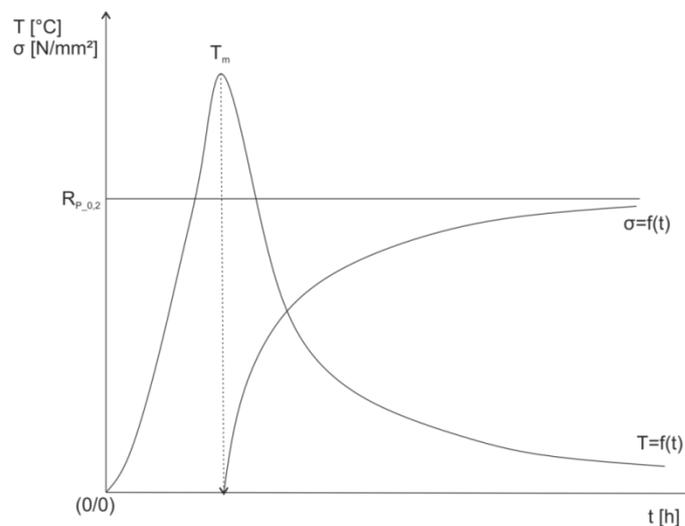


Abbildung 13: Entstehung von Eigenspannungen in Abhängigkeit der Temperatur

Durch ungleichmäßige und zu schnelle Abkühlung des Bauteils nach dem Schweißen wird die Entstehung von Eigenspannungen gefördert und begünstigt. Bei der Verbindung von Werkstoffen mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten ist die Gefahr der Ausbildung von Eigenspannungen erhöht. (Kanani 2007)

Eine Forschergruppe aus München hat prozessbegleitendes dynamisches Spannen zur Verringerung von schweißbedingten Eigenspannungen beim Laserstrahlschweißen untersucht. Einspannvorrichtungen zum Niederhalten des zu schweißenden Bauteils führen zu geringem schweißbedingtem Verzug, daher sind Richtarbeiten nach dem Fügen nötig. Da sich Verzug und Eigenspannungen konträr verhalten, ist eine gleichzeitige Reduktion beider Parameter nur bedingt möglich. Mithilfe FE-Simulation und experimentell wurde gezeigt, dass sich bei zeitlich ändernden Einspannbedingungen schweißbedingter Verzug und Eigenspannungen gleichzeitig reduzieren lassen. Hierbei wurden aufgeprägte Kräfte der Niederhalteeinrichtung auf das Bauteil während des Schweißens zeitlich an die schweißbedingte Verformung angepasst, um Verzug und Eigenspannungen zu minimieren und Nachbehandlungen zu vermeiden. Dynamisches Spannen während des Schweißvorgangs unterstützt die Winkelverformung, damit beim Abkühlen in Folge keine Eigenspannungen ausgebildet werden und Verzug minimiert wird. (iwb 2015)

2.15. LASERAUFTRAGSCHWEIßEN VON FUNKTIONELL GRADUIERTEN SCHICHTEN

Amado et al. (2012) haben mit drei verschiedenen Metallpulvern, die jeweils verschiedene Chromanteile aufweisen, NiCr-Wolframkarbidsschichten mithilfe von Laserauftragsschweißen hergestellt. Erkenntnis der Versuche war, dass die Rissanfälligkeit mit der Härte der Metallmatrix, also mit dem Chromanteil der Legierung zusammenhängt. Je härter das Metallpulver, desto höher ist die Neigung zur Ausbildung von Rissen. Um rissfreie Schichten zu erhalten, muss der Chromanteil des Metallpulvers unter 8% betragen, die Härte des Pulvers muss im Bereich von 300HV liegen und das Substrat muss mit 400°C vorgewärmt werden. Das Ziel dieser Arbeit war es, Schichten mit denselben Anforderungen in Bezug auf Härte und Rissfreiheit, jedoch ohne Vorwärmung, herzustellen, um Kosten und Zeit zu sparen. Für das Auftragsschweißen wurde ein Nd:YAG Laser verwendet, die Stahlplatten wurden vor dem Laserauftragsschweißen sandgestrahlt, um eine Oberflächenrauheit von $R_a \approx 8\mu\text{m}$ zu erhalten. Das Metallpulver NiCrBSi bzw. Deloro 30 und die Wolframkarbide WOKA 3303 werden in zwei verschiedenen Hopper (Pulverlagergefäßen) gelagert und auf dem Weg zum Laserstrahl in definierten Verhältnissen vermischt, die Beschichtung wird anschließend etwa 5mm dick in einer oder zwei Lagen aufgetragen. Beschichtungen, welche aus einer Schweißlage bestehen, wurden mit verschiedenen Wolframkarbidkonzentrationen des Metallpulvers geschweißt. Bei Beschichtungen, die aus zwei Schweißlagen bestehen, wurde die Wolframkarbidkonzentration des Metallpulvers in der inneren Schicht variiert und in der äußeren Schicht fix mit 60 Gewichtsprozent eingestellt. Die gründliche Untersuchung der geschweißten Proben ergab, dass in Beschichtungen mit zwei Schweißlagen mit einer Wolframkarbidkonzentration von 15% in der inneren Schicht keine oberflächlichen Risse nachgewiesen wurden. Es ist somit möglich, Beschichtungen mit Wolframkarbiden in nickelbasierten Metallmatrizen ohne Vorwärmen herzustellen. Die Arbeit nimmt jedoch keine Rücksicht auf die Haftfestigkeit zwischen Beschichtung und Substratwerkstoff. Es wird beschrieben, dass die „gute Anbindung“ auf einer lichtmikroskopischen Ansicht zu sehen ist, überprüft wurde diese jedoch nicht. (Amado et al. 2012)

Zhenda et al. (1996) haben mit Hilfe des Verfahrens Laserauftragsschweißen einen Wolfram-Nickel-Verbund auf AISI 1020 (= Ck20) aufgetragen, um die Verschleißfestigkeit der Oberfläche zu verbessern. Als Laser wurde ein CO₂ Laser mit einer Nennleistung von 3000 W verwendet. Verschleißtests führten zu hoher Verschleißfestigkeit der Verbundbeschichtung, das verschlissene Volumen wird nach einer Formel berechnet. Das Verschleißverhalten hängt von der Mikrostruktur des Gefüges und deren Eigenschaften ab. Die Wolframpartikel haben eine niedrige Adhäsion gegenüber der metallischen Gegenfläche. Untersuchungen der verschlissenen Oberfläche des Gegenkörpers nach dem Verschleißtest zeigen die Schärfe und Rauheit der Gegenfläche, welche aus Werkzeugstahl mit einer Rockwellhärte von 60 HRC besteht, diese Gegenfläche kann nicht leicht zerstört werden. Die untersuchte hohe Verschleißfestigkeit der Deckschicht ist das Resultat der Ni-Cr-B-Si Matrix, der einheitlichen Verteilung der Wolframpartikel und der guten metallischen Bindung zwischen Nickelbasislegierung und Wolframpartikel, welche durch den Laserauftragsschweißprozess hergestellt wurde.

Przybyłowicz und Kusiński (2001) haben Schichten aus Wolframkarbiden in Nickelbasis- bzw. Cobaltbasislegierungen auf Substrate aufgebracht. Die Strategie wurde hinsichtlich des Auflösungsgrades der Karbide in der Matrix optimiert. Je länger das Laserauftragsschweißen bedingt durch die Vorschubgeschwindigkeit dauert, desto mehr Wolframkarbide lösen sich in der Matrix auf. Des Weiteren wurden hier die Wolframkarbide und das Matrixmaterial vor dem Auftragen vermischt. Die Anbindung der Beschichtung am unlegierten Stahlsubstrat bezeichnen die Autoren als ideal,

Untersuchungen diesbezüglich wurden jedoch nicht durchgeführt. Bei optimalen Prozessparametern wird eine rissfreie und nicht poröse Oberfläche erzielt.

Aus der Literaturrecherche wurden Inputs für die Schweiß- und Prüfstrategie der mit LMD hergestellten gradierten Schichten generiert.

2.16. STATISTISCHE VERSUCHSPLANUNG UND AUSWERTUNG

Statistische Versuchsplanung ist ein Werkzeug zur Verbesserung von technischen Produkten und Prozessen. Alle Änderungen von Prozessparametern haben einen bestimmten Einfluss auf die Ergebnisse. Um diese bestimmen und ihren Einfluss analysieren zu können, ist eine genau geplante Herangehensweise an das Problem erforderlich. Datenanalyse, Recherche und „Trial and Error Methoden“ allein reichen nicht mehr aus, um Verbesserungen des Prozesses zu erwirken. Gezielte Versuchsplanung ist auch unter „Design of Experiments – DoE“ bekannt und führt im Idealfall zu guten und wiederholbaren Verbesserungen eines Prozesses. Bei der mehrfachen Wiederholung eines bestimmten Versuches kommt es aufgrund schwankender Versuchsbedingungen (z.B. Werkstoff, Umgebungstemperatur, Maschineneinstellungen, Bedienerfehler) zu verschiedenen, streuenden Versuchsergebnissen. Aus diesem Grund ist es nötig, die Abwicklung der Versuche statistisch zu planen und auszuwerten, um aus den durchgeführten Versuchen konkrete Aussagen tätigen zu können. Da Versuche teuer und zeitaufwendig sind, ist es wichtig, den Umfang der durchzuführenden Versuche so gering wie möglich und gleichzeitig so genau wie nötig zu gestalten. Mittels statistischer Methoden werden durchgeführte Versuche ausgewertet, das Ergebnis der Auswertung führt zu phänomenologischen Modellen, die den Zusammenhang zwischen vorab festgelegten Einflussgrößen und den erhaltenen Zielgrößen beschreibt. (Kleppmann 2013)

In Tabelle 1 sind die am meisten verwendeten Begriffe in der statistischen Versuchsplanung anschaulich erklärt.

Tabelle 1: Wesentliche Begriffe in der Versuchsplanung (Kleppmann 2013)

Begriff	Erklärung
Zielgröße	Beschreibt das Ergebnis des Versuchs.
Einflussgrößen	Beeinflussen Versuchsergebnisse möglicherweise
Steuergößen	Einflussgrößen, die auf einen bestimmten Wert eingestellt werden (Prozessparameter).
Störgrößen	Einflussgrößen, die nicht vorgegeben werden können.
Faktor	Das sind die für den Versuch wesentlichen Einflussgrößen.
Faktorstufen	Werte, die die ausgewählten Faktoren im Versuch annehmen sollen.
Quantitative Faktoren	Numerische Faktoren: Werden mithilfe von Zahlenwerten auf einer Skala beschrieben (Temperatur, Druck).
Qualitative Faktoren	Kategorische Faktoren: Hier gibt es nur Beschreibungen oder Bezeichnungen ohne Messskalen (Anlagenbeschreibung des Herstellers).

Mithilfe eines Versuchsplans wird festgestellt, welche Faktoren den Prozess wesentlich beeinflussen und wie groß der lineare Effekt der Faktoren auf die gewünschten Zielgrößen ist. Ausgehend vom bisher besten Fertigungsprozess wird ein Bereich von Faktorstufen betrachtet, der symmetrisch dazu liegt. Um zu einer Verbesserung des Prozesses zu gelangen, wird als erste Stufe der bisherige Zustand genommen, als zweite Stufe wird ein Wert in die vermutlich bessere Richtung des Prozesses verwendet. Ist der Abstand der Stufenwerte eines Faktors zu gering, so wird der Effekt des Faktors durch Zufallsstreuung verdeckt, liegen die Stufenwerte jedoch zu weit auseinander, wird der Zusammenhang unzureichend genau beschrieben. Die Verwendung eines geeigneten Abstands

zwischen den Stufenwerten eines Faktors ist von wesentlicher Bedeutung für den Erfolg der Versuchsergebnisse. Um die Zufallsstreuung so gering wie möglich zu halten, werden Störgrößen soweit es möglich ist, konstant gehalten (z.B. konstante Raumtemperatur). Einige Störgrößen können vorab nicht festgelegt werden, daher werden sie während der Versuchsdurchführung erfasst und dokumentiert, um ihren Einfluss nachträglich erkennen zu können. Um den Versuchsplan zu optimieren, müssen das Untersuchungsziel, die Anzahl der Faktoren und die Anzahl der Stufen je Faktor vorab so genau wie gewünscht definiert werden. (Kleppmann 2013)

Zur Auswertung der umfangreichen Versuchsreihen werden v.a. Wechselwirkungsdiagramme, Fehlerbalkendiagramme basierend auf ANOVA (engl. analysis of variance, dt. Varianzanalyse), Boxplots und Paretodiagramme verwendet, da mit Hilfe dieser statistischen Methoden anschauliche Aussagen in Bezug auf die zu betrachtenden Ziele möglich sind.

3. AUFGABENSTELLUNG

Um für die Warmumformung von pressgehärteten Bauteilen verschleißfeste Werkzeugoberflächen herzustellen, werden Wolframkarbidbeschichten in Nickelbasismatrizen mittels Laserauftragschweißen auf verschiedene Substratwerkstoffe aufgebracht. Die Nickelschicht fungiert dabei als Zwischenlage. Der Fertigungsprozess, um zur geforderten Endgeometrie der verschleißfesten Beschichtung des Werkzeuges zu gelangen, besteht aus mehreren Stufen. Im ersten Schritt wird der Nickelbasiswerkstoff auf das Substrat aufgeschweißt. Anschließend wird die Nickelbeschichtung zerspannt, um eine glatte Oberfläche zu erhalten, auf diese wird die Wolframkarbidbeschichtung mit Hilfe des Laserauftragschweißprozesses aufgetragen. Die Wolframkarbidbeschichtung wird durch zerspannende Bearbeitung auf die Höhe des geforderten Endmaßes gebracht. Da Wolframkarbidbeschichtungen aufgrund ihrer Härte sehr schwer bearbeitbar sind, muss die Bearbeitungszugabe zur Herstellung des Endmaßes so gering wie möglich gehalten werden.

Mithilfe der statistischen Versuchsplanung wird ein Ablauf generiert, um verschiedene Kombinationen aus Substratwerkstoffen, Nickelbasispulver und Wolframkarbidbeschichtungen zu testen. Ziel ist es, eine endmaßnahe Beschichtungsstrategie zu entwickeln, um eine verschleißfeste Oberfläche zu erhalten.

Um eine ideale Beschichtungsstrategie zur partiellen Beschichtung von Warmformwerkzeugen zu erhalten, werden Linienproben, ebene Flächenproben und 3D Geometrien geschweißt. Zuerst soll die Qualität der Anbindung des Nickelbasiswerkstoffs an den Substratwerkstoff durch eine Versuchsreihe optimiert werden. Hierzu werden durch Parametervariation 16 einzelne Linien eines Nickelbasispulvers auf ein Substrat geschweißt. Durch mikroskopische Vermessung der Querschnitte der Schweißraupen und Sichtprüfung werden geeignete Parametersätze für das Auftragen von Flächen bestimmt.

Anschließend werden sogenannte 12Flächenproben mit Hilfe des Verfahrens Laserauftragschweißen hergestellt, getestet werden vier Beschichtungswerkstoffe auf drei Substratwerkstoffen. 12Flächenproben bestehen aus je viermal drei Flächen, welche mit demselben Parametersatz aus den Nickelbasismetallpulvern Ni25, Ni40, NiBSi und Ni50 auf die Substratwerkstoffe 1.1730, 1.7131 und 1.2343 aufgetragen werden. Pro Kombination Substrat/Nickelbeschichtung werden mehrere Proben mit verschiedenen Parametern hergestellt, um eine Versuchsmatrix zu erhalten. Variiert werden die Parameter Vorwärmtemperatur des Substrats, Vorschubgeschwindigkeit, Pulverförderate, Spurüberlappung, Fokusverschiebung, Anzahl der Schweißlagen.

Nach dem Schweißen werden die Proben der optischen Sichtprüfung unterzogen, anschließend werden die 12Flächenproben durch zerspannende Bearbeitung in die Form der Prüfkörper gebracht. Auf jeder Fläche werden drei Härtemesswerte aufgenommen, anschließend wird der Prüfkörper der zerstörenden Haftfestigkeitsprüfung unterzogen, dabei wird die zur Haftfestigkeit äquivalente Größe Zugkraft aufgenommen. Des Weiteren wird die Bruchfläche analysiert, um zu überprüfen, wo der erzwungene Bruch eintritt. Das Ziel ist, dass der Bruch im Übergangsbereich Beschichtung/Substrat eintritt. Die zerstörende Haftfestigkeitsprüfung wird durchgeführt, da in vorangegangenen Arbeiten (Amado et al. 2012) der mit Laserauftragschweißen hergestellte Schichtaufbau nur lichtmikroskopisch untersucht und auf dieser Grundlage die Qualität der Beschichtung beurteilt wurde. Zerstörende Prüfung der Anbindung fand nicht statt.

Nach der Auswertung der Zugversuchsreihe wird mit einem geeigneten Nickelbasispulverparametersatz eine einzelne Fläche auf Substratwerkstoffe aufgeschweißt. Durch

zerspanende Bearbeitung werden zunächst ebene Oberflächen hergestellt, um auf diesen Wolframkarbidflächen mit verschiedenen Parametersätzen aufzutragen.

Zu verwendende Parametersätze für das Aufschiessen von Wolframkarbidflächen wurden wiederum durch das Schweißen verschiedener Wolframkarbid – Linien evaluiert, anschließend werden die erreichten Höhen der einzelnen geschweißten Flächen aus Wolframkarbiden vermessen. Mit Hilfe von Erosion werden aus dem Schichtaufbau, bestehend aus Substrat, Nickelbasisbeschichtung und Wolframkarbidschicht, Proben gewonnen, in Kunststoff eingebettet und Schliffbilder hergestellt.

Die entstandenen Schliffe werden nach dem Ätzen makroskopisch und lichtmikroskopisch untersucht. Betrachtet werden dabei v.a. die beiden Anbindungszonen Substrat/Nickelbasisbeschichtung und Nickelbasisbeschichtung/Wolframkarbidschicht, des Weiteren werden Fehler in der Verbindung detektiert.

Das Ziel der Arbeit ist es, die Qualität der Anbindung der Beschichtung auf das Substrat zu maximieren, Zielgröße ist die Maximierung der Haftfestigkeit bzw. Scherfestigkeit. Die Versuchsergebnisse werden durch die Schweißparameter (Fokusverschiebung, Pulverfördertrate, Vorschubgeschwindigkeit, Spurüberdeckung) und die Werkstoffparameter (Substrat, Pulver) massiv beeinflusst. Anhand der statistischen Auswertung der gemessenen Härte, der durch die Haftfestigkeitsprüfung erhaltenen Zugkräfte und der Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchung der Schliffbilder werden geeignete Schweißparametersätze für das Herstellen einer endmaßnahen Wolframkarbidbeschichtung in einer gut an das Substrat angebundenen Nickelbasisbeschichtung bestimmt.

Um die Ergebnisse der Zugversuche zu bestätigen, werden ausgewählte Schweißparametersätze des zu verwendenden Nickelbasismetallpulvers auf zylinderförmige Proben des Substrats aufgetragen, daraus Probenkörper gedreht und auf Scherung beansprucht. Ziel ist, dass der durch Scherbelastung erzwungene Bruch in der Anbindungszone Substrat/Nickelbeschichtung eintritt. Nach dem Abschluss der Versuche soll eine Korrelation zwischen Haftfestigkeit und Scherfestigkeit vorliegen.

Da in der Praxis zu beschichtende Werkzeugoberflächen nicht geometrisch eben sind, wird eine ausgewählte Kombination aus Substrat/Nickel- und Wolframkarbidbeschichtung mit geeigneten Schweißparametern auf Radien einer mehrfach gekrümmten 3D Probe aufgetragen. Das erreichte Aufmaß der Beschichtungshöhe der Radien wird vermessen, die Beschichtung wird einer zerspanenden Testbearbeitung unterzogen.

Am Ende der Arbeit wird ein reales Warmformwerkzeug, welches für das Presshärten von B-Säulen eingesetzt werden soll, mit einer Wolframkarbidschicht in einer Nickelbasismatrix beschichtet, um das Verhalten der Beschichtung unter Realbedingungen zu demonstrieren.

4. PROZESSPARAMETER

Die Prozessparameter beim Laserauftragschweißen beeinflussen die Gestalt und die Eigenschaften der Oberflächenbeschichtung wesentlich. Mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung werden die Prozessparameter der zu schweißenden Proben variiert, um evaluieren zu können, mit welchen Einstellungen die geforderten Qualitätseigenschaften bestmöglich erreicht werden können. Die Beschichtung wird hinsichtlich Härte, Qualität der Anbindung an das Substrat und erreichbare Schichthöhe optimiert.

Aus den durchgeführten Versuchen und deren Auswertung ergibt sich, welche Kombinationen aus Substrat, Pulver und Vorwärmtemperatur zu guten bzw. zu mangelhaften Ergebnissen (Rissbildung, unzureichende Anbindung) führen. Zu den Prozessparametern zählen Werkstoffparameter, Vorbehandlung und Schweißparameter, diese sind in Abbildung 14 dargestellt.

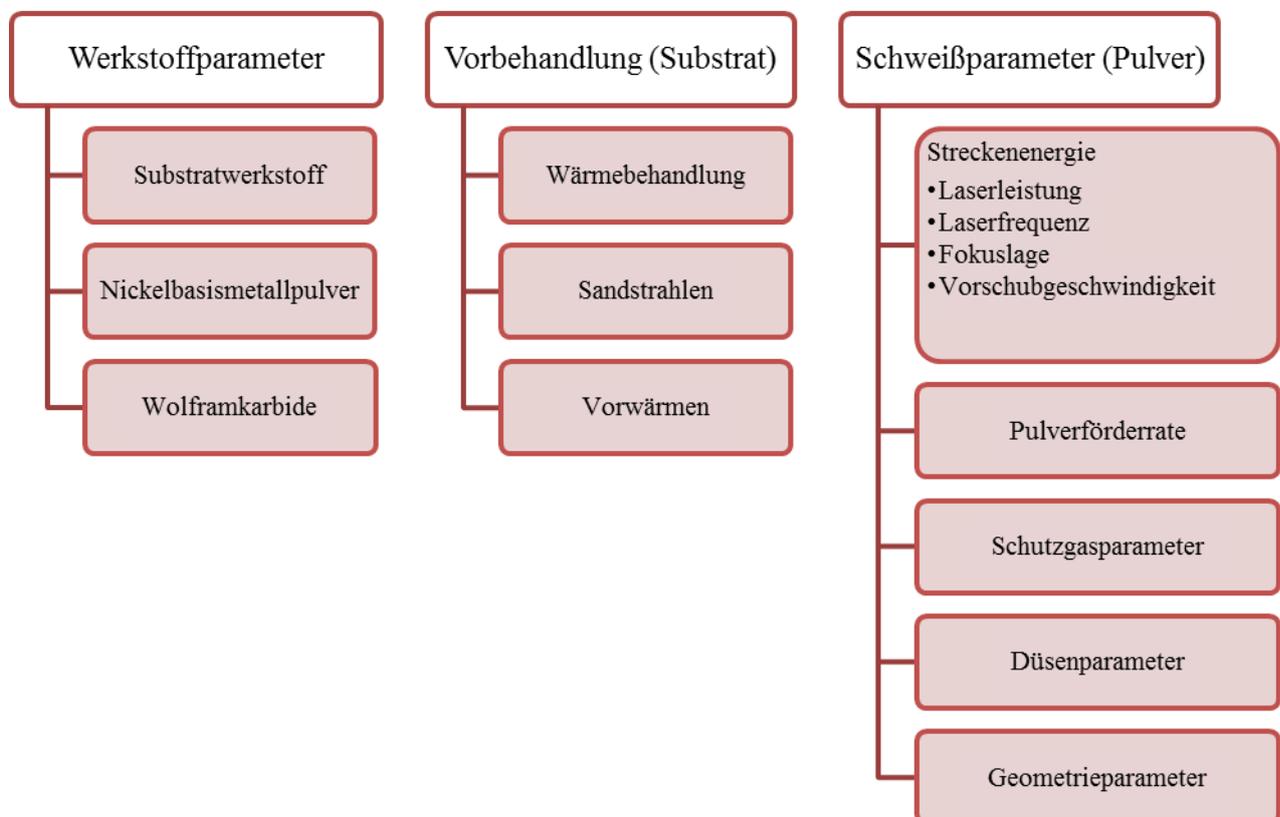


Abbildung 14: Prozessparameter beim Laserauftragschweißen

Des Weiteren wäre es möglich, LMD-Beschichtungen durch Verfahren wie Kugelstrahlen, Richten oder Spannungsarmglühen nachzubehandeln, diese Methoden kamen im Rahmen der Masterarbeit jedoch nicht zum Einsatz.

In den folgenden Kapiteln wird vertieft auf jene Prozessparameter eingegangen, welche beim Schweißen der einzelnen Proben variiert wurden. Einige Parameter wurden aufgrund der Erfahrung aus vorangegangener wissenschaftlicher Arbeit nicht variiert, z.B. die Parameter des Schutzgases.

4.1. WERKSTOFFPARAMETER

Zu den Werkstoffparametern zählen die Eigenschaften des Substratwerkstoffs, des Beschichtungswerkstoffs auf Nickelbasis sowie der Wolframkarbide.

4.1.1. SUBSTRATWERKSTOFFE

Substratwerkstoffe werden vom Lieferanten in Blockform geliefert, die für die Versuche benötigte Probenform wird durch mechanische Bearbeitung hergestellt. Für die Versuchsreihen werden die Stahlwerkstoffe 1.1730, 1.2343 und 1.7131 verwendet, daher wird auf die Eigenschaften dieser Stähle eingegangen.

Tabelle 2: Substratwerkstoffe (meusbürger)

Werkstoffnummer	Bezeichnung		Richtanalyse		Festigkeit [N/mm ²]	Wärmeleitfähigkeit [W(mK)]
	DIN					
1.1730	DIN	C 45 U	C	0,45	≈ 640	50 bei 20°C
	AFNOR	XC 48	Si	0,30		
	UNI		Mn	0,70		
	AISI	1045				
1.2343	DIN	X 38 CrMoV 51	C	0,38	≈ 780	27 bei 200°C
	AFNOR	Z 38 CDV 5	Si	1,00		
	UNI	X 37 CrMoV 51 KU	Mn	0,40		
	AISI	H 11	Cr	5,30		
			Mo	1,20		
			V	0,40		
1.7131	DIN	16 MnCr 5	C	0,16	≈ 600	44 bei 20°C
	AFNOR	16 MC 5	Si	0,25		
	UNI		Mn	1,15		
	AISI	5115		0,95		

1.1730

Dieser unlegierte, flammhärtbare Werkzeugstahl ist gut zerspanbar, daher wird er nahezu universell im Maschinenbau eingesetzt. Er wird für die Fertigung von ungehärteten Bauteilen im Werkzeug- und Vorrichtung-, Platten- und Rahmenbau verwendet. (meusbürger)

1.2343

Es handelt sich hierbei um einen hochlegierten Warmarbeitsstahl mit hoher Zähigkeit und guter Warmfestigkeit. Der Stahl ist warmrissunempfindlich und seine Wärmeleitfähigkeit ist gut. Als nachteilig ist zu erwähnen, dass dieser Werkstoff äußerst korrosionsempfindlich ist, bei der Bearbeitung ist daher auf durchgehenden Korrosionsschutz zu achten. 1.2343 wird für Formplatten und Formeinsätze von Druckgussformen Kunststoffwerkzeugen verwendet. Der Werkstoff ist sehr gut polier- und ätzbar, auch Bearbeitung durch Erodieren und Nitrieren ist möglich. Ein bedeutendes

Anwendungsgebiet für 1.2343 stellen Werkzeuge im Warmumformbereich dar, da der Stahl durch die Berührung des Werkzeugs mit heißen Werkstoffen neben allgemeinen Belastungen auch thermischen Beanspruchungen des Prozesses standhalten muss. (Böhler - Edelstahl)

1.7131

Dieser legierte Einsatzstahl wird für Bauteile verwendet, die vorwiegend auf Verschleiß beansprucht werden, zB. Führungsteile, Kerneinsätze und Maschinenbauteile mit hoher Oberflächenhärte und Kunstharzpressformen für die Verarbeitung von Duro- und Thermoplasten. Bearbeitung durch Polieren, Ätzen und Erodieren ist möglich. Hartverchromen ist empfehlenswert, dadurch werden die Verschleißfestigkeit und die Korrosionsbeständigkeit erhöht. Dieser Werkstoff wurde als Substrat für die Versuchsreihe „Wolframkarbidflächen auf Nickelbasisflächen“ verwendet, da er bei eisenbasierten Beschichtungen zu guten Ergebnissen der Haftfestigkeit geführt hat. Außerdem weist der Werkstoff gute Erodierfähigkeiten auf, daher ist Probengewinnung gut möglich. (meusburger)

4.1.2. BESCHICHTUNGSWERKSTOFF – METALLPULVER

Auf den jeweiligen Substratwerkstoff wurden verschiedene Metallpulver auf Nickelbasis aufgeschweißt. Getestet wurden die Pulver *Ni25*, *Ni40*, *Ni50* und *NiBSi* der Firma nt Systemlösungen.

In Tabelle 3 sind die Eigenschaften der Metallpulver vermerkt.

Tabelle 3: Eigenschaften der verwendeten Metallpulver (Nt Systemlösungen 2016)

Markenname	Schweißgut-Richtanalyse [%]	Härte	Anwendung und Eigenschaften
Ni25	C < 0,5 Si 2,5 B 1,7 Fe < 1,0	25 HRC	Wie NT® Ni40, aber aufgrund der höheren Anteile an C und B gesteigerte Härte von 25 HRC.
Ni40	C 0,25 Si 3,5 B 1,3 Cr 6,0 Fe 2,0	42 HRC	NT® Ni40 bietet bei hoher Stoßfestigkeit einen sehr guten Schutz gegen abrasiven und fressenden Verschleiß sowie Korrosion und weist zudem eine sehr gute Bearbeitbarkeit auf. Auftragungen von Flächen oder Kanten an Gesenken, Glasformen sowie auf Armaturen, Pumpenkolben und Führungen.
Ni50	C 0,45 Si 3,8 B 2,3 Cr 11 Fe 2,5	52 HRC	Eine selbstfließende NiCrBSi-Hartlegierung, die das Auftragen korrosions- und verschleißbeständiger Schichten ermöglicht. Maschinell noch bearbeitbar.
NiBSi	C < 0,03 Si 3,0 B 3,0 Fe < 0,4	50 HRC	Chromfreie Nickelhartlegierung mit guten Benetzungs- und Fließeigenschaften. Sehr gut geeignet als Matrixwerkstoff für Pseudolegierungen (Verstärkung durch Karbide)

Die verwendeten Pulver von nt Systemlösungen wurden vorlegiert, d.h. sie wurden aus einer Legierungsschmelze durch Verdüsung hergestellt.

4.1.3. WOLFRAMKARBIDE

Wolframkarbide bestehen aus den chemischen Elementen Wolfram und Kohlenstoff. Sie wurden erstmals 1914 hergestellt, die Härte erreicht bis zu $2300HV$, damit handelt es sich nach dem Diamanten um das zweithärteste vorkommende Material. Für das Auftragen sämtlicher Wolframkarbidbeschichtungen wird das Pulver NT®-WSC sphärisch vom Hersteller Systemlösungen verwendet. Wolframkarbid weist auch bei höheren Temperaturen große Härte auf, ist sehr verschleißfest und kann nur durch Erodieren oder mit Hilfe von Diamantwerkzeugen unter beachtlichem Werkzeugverschleiß zerspannt werden. Daher ist es besonders wichtig, die Höhe der Wolframkarbidbeschichtung mit möglichst geringem Materialüberschuss zu entwickeln, um den notwendigen Nachbearbeitungsaufwand so gering wie möglich zu halten. Wolframkarbidbeschichtungen kommen häufig bei hochbelasteten Zerspanungs- und Umformwerkzeugen zum Einsatz. Oftmals wird eine Wolframkarbidbeschichtung mit Hilfe von Pulverflammspritzen oder Hochgeschwindigkeitsflammspritzen auf die Oberfläche aufgebracht. (Fiehl + Cremer)

4.2. VORBEHANDLUNG DES SUBSTRATS

Um die vorherrschenden Schweißbedingungen gezielt zu manipulieren, wird der Substratwerkstoff durch Wärmebehandlungsprozesse, Sandstrahlen oder Vorwärmen vorbehandelt.

4.2.1. WÄRMEBEHANDLUNGSPROZESS

Wärmebehandlungsmethoden werden durchgeführt, um das Gefüge eines metallischen Werkstoffs durch Temperaturänderung zu verändern und dadurch bestimmte erwünschte Werkstoffeigenschaften zu erzielen. Zu den bekannten Wärmebehandlungsmethoden zählen die Verfahren Weichglühen, Spannungsarmglühen und Vergüten. Beim Weichglühen werden die Zerspanbarkeit und die Kaltverformbarkeit von Metallen verbessert. Der Werkstoff wird erhitzt, bis er glüht und auf dieser Temperatur gehalten, bis die Gefügeumwandlung vollständig abgeschlossen ist. Durch Spannungsarmglühen bei etwa $600^{\circ}C$ werden innere Spannungen im Werkstoff durch plastisches Fließen abgebaut. Die Kombination aus Härten und darauffolgendem Anlassen wird in der Werkstofftechnik als Vergüten bezeichnet und kommt häufig zum Einsatz. Ziel der Vergütung eines Werkstoffs ist die Gefügeänderung des Metalls und die Verbesserung von Härte und Zähigkeit.

4.2.2. SANDSTRAHLEN

Dieses Verfahren stellt eine Oberflächenbehandlung durch Einwirken von Strahlgut (in dem Fall Quarzsand) auf ein Bauteil dar. Sand wird mit Druckluft auf die Oberfläche der auftragzuschweißenden Grundwerkstoffe geblasen, um die Oberflächenqualität zu verbessern. Dadurch wird die Wärmeeinbringung des Laserstrahls beim Schweißen gesteigert und die Absorption vergrößert. Der Sand raut die Oberfläche auf, wirkt abrasiv, damit ist die Oberfläche vor Verunreinigungen und Korrosion geschützt.

4.2.3. VORWÄRMEN

Sehr viele Proben des Grundwerkstoffs wurden vor dem Laserauftragschweißen auf $250^{\circ}C$ oder $400^{\circ}C$ auf einer für diesen Vorgang vorgesehenen Heizplatte aus Kupfer (siehe Abbildung 15) vorgewärmt.

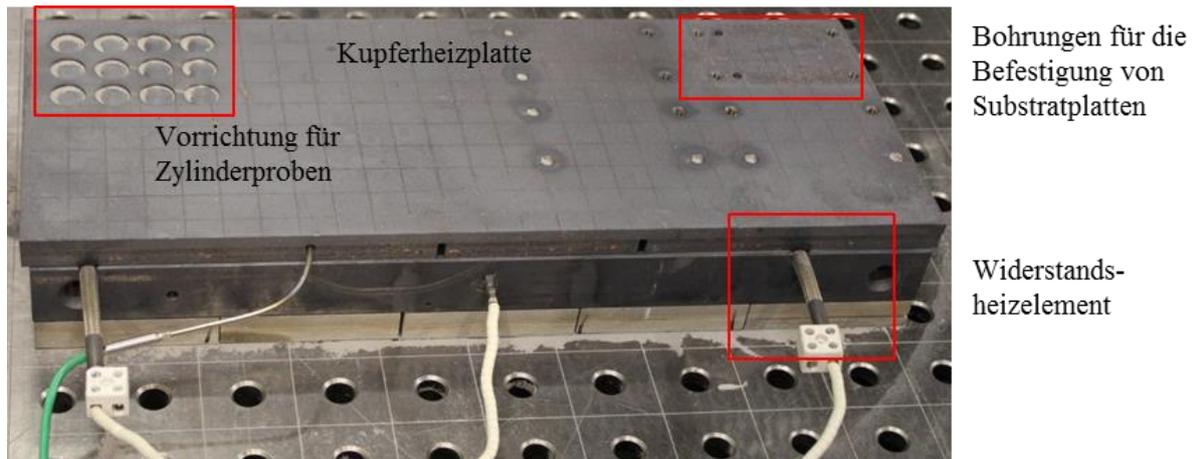


Abbildung 15: Kupferheizplatte

Substratwerkstoffe werden vorgewärmt, um Aufhärtungen im Gefüge durch die schnelle Abkühlung des Bereiches neben der WEZ nach dem Schweißprozess zu vermeiden. Der Kohlenstoff im Stahlwerkstoff bewirkt, dass Stahl beim Schweißen in der WEZ sehr harte Gefügebestandteile ausbildet. Je schneller der Bereich neben der Schweißnaht abkühlt, desto höher sind die, in der WEZ entstehenden, Aufhärtungen. Um die Bildung von Aufhärtungen zu vermeiden, wird der Bereich neben der Schweißnaht vor dem Schweißen gleichmäßig auf eine Vorwärmtemperatur erwärmt. Je höher die Vorwärmtemperatur des Stahls gewählt wird, desto langsamer kühlt er nach dem Schweißen ab, und desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich spröde, aufgehärtete und rissanfällige Bereiche bilden. Zur Bestimmung der Vorwärmtemperatur werden in der Praxis je nach Kohlenstoffgehalt und dem Gehalt der verschiedenen Legierungselemente verschiedene Formeln und Abschätzmethode herangezogen. Das Kohlenstoffäquivalent fasst die Wirkung der einzelnen chemischen Elemente eines Stahls zusammen. Mit Hilfe des Kohlenstoffäquivalents und der Blechdicke des zu schweißenden Bauteils wird aus Diagrammen aus der Literatur die benötigte Vorwärmtemperatur grob abgeschätzt. In der Praxis liegen die Vorwärmtemperaturen für die verschiedenen Stähle zwischen 100°C und 400°C, um Rissbildung und Aufhärtungen im Bereich der Schweißnaht zu vermeiden. Vorwärmen von Bauteilen kostet Zeit und Geld. Diese Kosten verteuern die Herstellung des Bauteils. Im Gegensatz dazu muss jedoch bedacht werden, dass die mechanische und oft manuelle Nachbearbeitung etwaiger Risse, sowie durch unzureichende Vorbehandlung notwendiges Nachschweißen Kosten verursacht, welche wesentlich höher sind, als der Prozess der Vorwärmung. (voestalpine 2014)

4.3. SCHWEIßPARAMETER

4.3.1. STRECKENENERGIE

Unter der Streckenenergie E_S wird der pro Wegeinheit eingebrachte Energieanteil in $\frac{J}{mm}$ verstanden. Durch Reflexion des Laserstrahls am Metall wird ein Teil der Energie verloren und somit nicht ins Schmelzbad eingetragen.

Laserleistung P_L

Die Laserleistung ist eine Größe, die den Prozess wesentlich beeinflusst, aber nicht mit anderen Prozessgrößen zusammenhängt. Je nach Verfahren und in Abhängigkeit des Substratwerkstoffs und des verwendeten Metallpulvers muss die Laserleistung adaptiert werden. Für die Bearbeitung von Metallen, die eine höhere Absorption aufweisen, ist eine geringere Laserleistung nötig als für Metalle

mit niedriger Absorption. Bei sämtlichen geschweißten Linienproben wurde die Laserleistung vorerst im Intervall von 70 – 100% der erzielbaren Laserleistung von 3200W in 10% Abständen variiert, um zu entscheiden, mit welcher Laserleistung Flächen aufgeschweißt werden. Zumeist wird die Laserleistung jedoch so groß wie möglich eingestellt, um den Materialauftrag zu maximieren.

Laserfrequenz f_L

Die Laserfrequenz kann bei der Anlage zwischen 100 und 100 000 Hz variiert werden, sie kann die Strömung des Schmelzbades und das Ergebnis des Schweißauftrags beeinflussen. Aufgrund der langjährigen Erfahrung der Institutsmitarbeiter mit der Anlage wird die Laserfrequenz zumeist im Bereich von ~5000 Hz eingestellt.

Fokuslage Δf_B

Durch Fokussieren wird der Laserstrahl auf einen Brennfleck gebündelt. Mit Hilfe eines adaptiven Spiegels wird die Lage des Fokus des Laserstrahls eingestellt, diese Einstellung wird als Fokuslage Δf_B bezeichnet. Anhand der Fokuslage kann die mittlere Leistungsdichte berechnet werden. Je stärker der Laserstrahl fokussiert wird, desto kleiner ist der Fokusbereich und desto höher ist die Leistungsdichte im Fokus.

Vorschubgeschwindigkeit v

Die Vorschubgeschwindigkeit in $\frac{mm}{min}$ gibt an, wie schnell sich der Laserstrahl bewegt. Sie kann beliebig eingestellt werden. Bei sämtlichen aufgeschweißten Linien und Flächen wurde der Vorschub im Bereich von 300 bis 1000 $\frac{mm}{min}$ variiert, da sich durch aufgrund der eingestellten Vorschubgeschwindigkeit die Höhe des Materialauftrags ergibt.

4.3.2. PULVERFÖRDERRATE

Die Pulverfördertrate bzw. Auftragsrate F_P gibt an, wie viel Pulver pro Zeiteinheit aufgetragen wird. Sie wird in $\frac{g}{min}$ angegeben und beeinflusst die Fertigungsgeschwindigkeit und die Gestalt der Schweißraupe enorm. Sie wird für jedes aufzutragende Metallpulver gesondert vor dem LMD-Prozess ermittelt.

4.3.3. SCHUTZGASPARAMETER

Die Zusammensetzung des Schutzgases bzw. Pulverfördergas ist für das Ergebnis der Gestalt der Schweißnaht wichtig. Aus Erfahrungswerten ist ein gut funktionierender Parametersatz der Zusammensetzung der Schutzgasatmosphäre aus Helium und Argon bekannt, dieser wird für das Schweißen sämtlicher Proben verwendet und nicht verändert. Das Schutzgas hat die Aufgabe, das Schmelzbad vor Verunreinigungen abzusichern.

4.3.4. DÜSENPARAMETER

Zum Schweißen sämtlicher Flächen wurde eine 4-Strahldüse verwendet. Diese wurde im Rahmen von vergangenen Institutsarbeiten entwickelt, konstruiert und gebaut und somit an die bestehende Anlage von Trumpf angepasst. Der Vorteil liegt hier in der idealen Verteilung des Metallpulvers im Schmelzbad. Der Winkel zwischen der Achse der Düse und der auftragzuschweißenden Probe wird als Anstellwinkel bezeichnet. Bei ebenen Proben steht die Düse normal im Abstand von 12mm auf die Substratplatte. Bei Beschichtung von Radien ist dies natürlich nicht möglich, der Düsenkopf bewegt sich während des Auftragschweißens mit der Radiuskontur mit.

4.3.5. GEOMETRIEPARAMETER

Spurgeometrie

Unter Spurgeometrie versteht man die Form und das Erscheinungsbild der mittels Laser generierten Spuren. Das Idealziel wäre, Spuren zu erzeugen, die eine ebene und glatte Oberflächenqualität besitzen, sodass keine mechanische Nachbearbeitung notwendig ist. In der Praxis weisen die Schweißbahnen typische halb-elliptischen Erscheinungsformen auf. Bei mehrlagigen Schweißaufbauten ergibt sich eine systematische Oberflächenrauigkeit.

Spurabstand S_L – Spurüberlappungsfaktor O_L

Spurabstand und Spurüberlappungsfaktor werden in Prozent angegeben und ergänzen sich zusammen auf 100%. Mit Hilfe der Optimierung des Spurüberlappungsfaktors zwischen zweier Schweißbahnen wird versucht, die Oberfläche der Beschichtung möglichst eben zu gestalten, um die mechanische Nachbearbeitung zur Erzielung einer ebenen Fläche zu minimieren. Der Optimierungsprozess benötigt viel Erfahrung und muss für die meisten Kombinationen der verwendeten Schweißparameter neu definiert werden.

Anzahl der Schweißlagen

Zum Ermitteln der idealen Beschichtungshöhe in Bezug auf die Anbindung ans Substrat und die Nahtform werden bis zu fünfzig Beschichtungen bei Variation der Schweißparameter geschweißt.

Schweißstrategie

Mithilfe der Schweißstrategie wird gesteuert, mit welcher Bewegungsabfolge die Beschichtung aufgetragen wird. Zumeist wird eine Beschichtung durch mäanderförmige Bewegung der Düse erstellt. Es ist aber auch möglich, Flächen spiralförmig von außen nach innen oder umgekehrt aufzuschweißen.

5. VERWENDETE UNTERSUCHUNGSMETHODEN

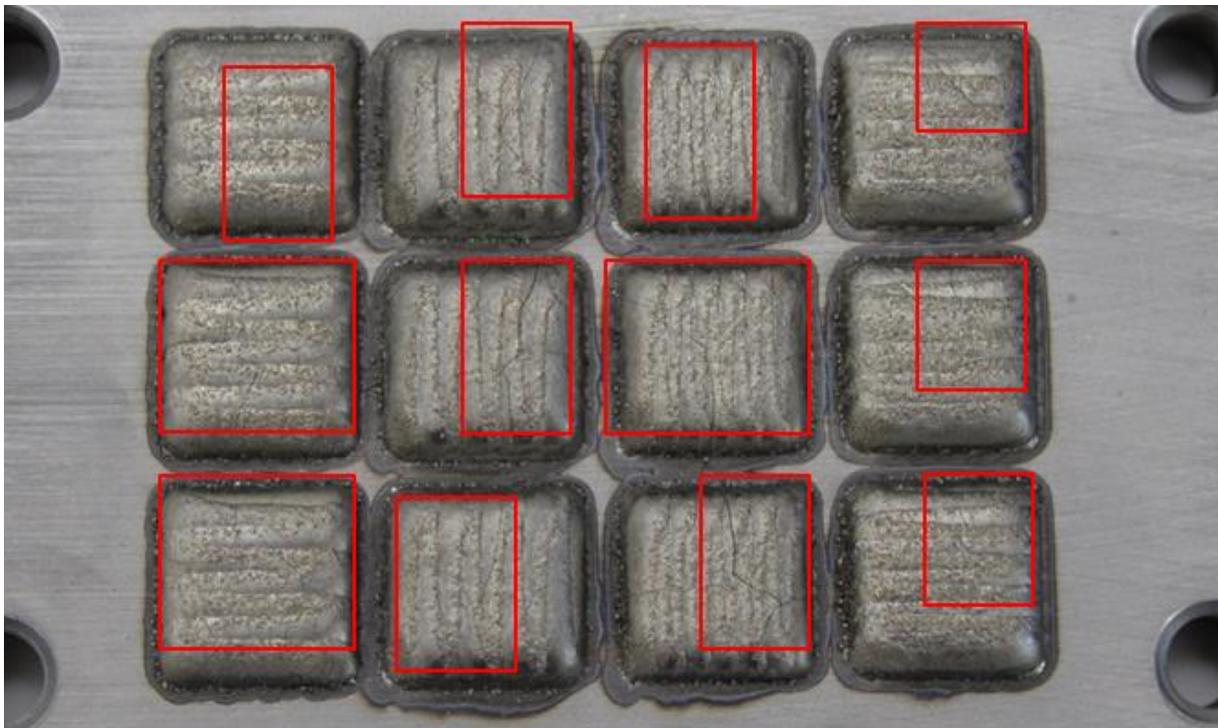
Die geschweißten Proben werden verschiedenen Untersuchungsmethoden unterzogen, dabei sollen Risse und Unregelmäßigkeiten in der Beschichtung und deren Oberfläche detektiert werden. Ein weiteres und sehr wichtiges Ziel der zerstörenden Untersuchungsmethoden ist es, die Anbindung der Beschichtung am Substrat zu testen.

Einige Untersuchungen werden am unbearbeiteten Probenkörper durchgeführt, dazu zählen die visuelle Begutachtung der Probe nach dem LMD-Prozess, Stereomikroskopie und die Farbeindringprüfung. Für die Härtemessung und die zerstörenden Haftfestigkeits- sowie Scherfestigkeitsversuche werden die Prüflinge durch Zerspannung in die Gestalt der Probenkörper gebracht. Um lichtmikroskopische Untersuchungen durchführen zu können, werden Schlitze erstellt.

5.1. SICHTPRÜFUNG

Die Sichtprüfung wird in sämtlichen Bereichen der metallverarbeitenden Forschung, Entwicklung und Industrie angewandt. Nach der Fertigstellung der Beschichtung einer Probe werden die auftraggeschweißte Zone und der oberflächliche Übergangsbereich zum Substratwerkstoff eingehend, z.T. mit Hilfe einer Lupe, betrachtet.

Mit dem Auge sichtbare Risse können auf diese Art sofort lokalisiert werden. Je nach Kombination von Substrat, Metallpulver und Vorwärmtemperatur sind keine bis deutlich mit dem Auge sichtbare Risse auf den Beschichtungen erkenntlich (Abbildung 16).



Probe Nr. 118: 1.1730; Ni40 3-5 Lagen, 20°C Vorwärmung

Abbildung 16: Sichtprüfung einer 12Flächenprobe nach dem LMD-Prozess: auf allen zwölf Flächen sind Risse sichtbar

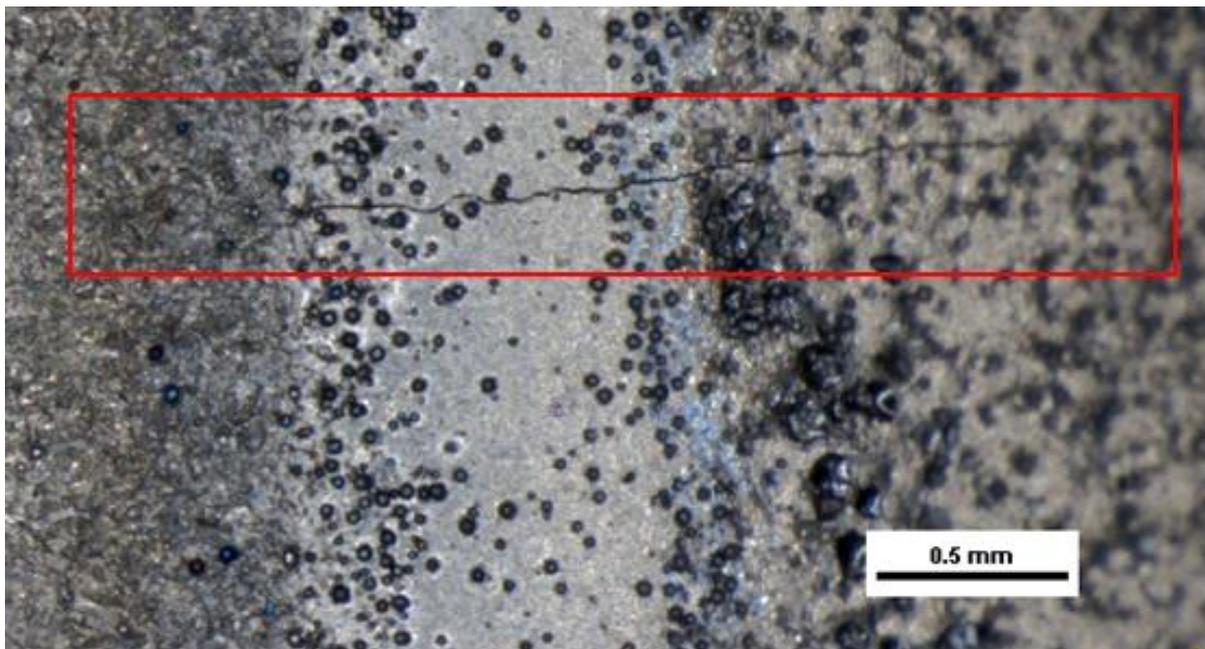
Die Sichtprüfung dient nicht allein der Detektion von Rissen, mit Hilfe dieser Methode kann die Ausbildung der Geometrie der aufgeschweißten Fläche, v.a. die Höhe und Regelmäßigkeit des Auftrags, rasch beurteilt werden.

Im Anlassfall folgt die Optimierung bzw. verbesserte Anpassung der Schweißparameter im NC-Programm zum Schweißen der nächsten Probe.

5.2. STEREOMIKROSKOP

Am Institut befindet sich das Stereomikroskop SMZ 1270 von Nikon. Beim Stereomikroskop gibt es, im Gegensatz zum Lichtmikroskop, für beide Augen einen getrennten Strahlengang, daher sehen beide Augen des Betrachters das zu untersuchende Objekt aus einem anderen Winkel, es entsteht ein räumliches Bild.

Mit Hilfe des Stereomikroskops werden die Querschnitte, Höhen und Breiten der Schweißbahnen der aufgetragenen Linien vermessen, um aus den Vermessungen geeignete Schweißparameter für das Schweißen der verschiedenen Flächenproben abzuleiten. Fertig geschweißte Flächenproben, bei denen mit Hilfe der Sichtkontrolle keine Risse festgestellt wurden, wurden unter dem Mikroskop betrachtet, um die Oberfläche auf Risse zu sichten.



Probe Nr. 153; Feld 2: 1.7131; WSC (400°C) in Ni40 (400°C) - Matrix

Abbildung 17: Stereomikroskopische Aufnahme eines Risses

In Abbildung 17 ist ein oberflächlicher Riss zu sehen, der sich, beginnend in Feld 2 der aufgeschweißten Wolframkarbidsschicht (rechts in der Abbildung) über die Ni40-Beschichtung hinweg bis in das Substratmaterial fortsetzt.

5.3. LICHTMIKROSKOP

Für die lichtmikroskopische Untersuchung des Gefüges und des Schichtaufbaus ist es nötig, Schliffbilder der zu untersuchenden Proben anzufertigen. Nach dem Ätzen des Schliffbildes mit

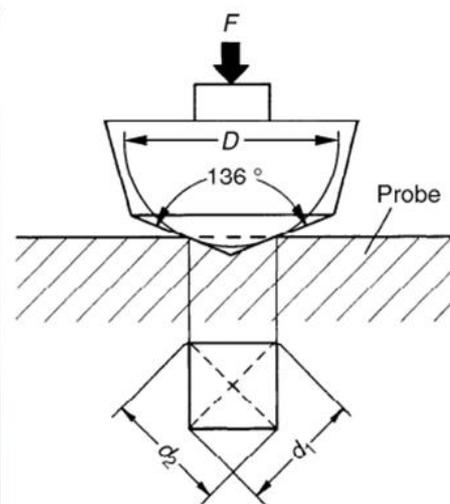
geeigneten Ätzmitteln ist es möglich, den zu untersuchenden Bereich bis zu 1000fach zu vergrößern. Mit Hilfe des Lichtmikroskops wird v.a. die Anbindung des Nickelbasispulvers an das Substrat untersucht, des Weiteren werden die Ausbildung der WEZ und des Schichtaufbaus sowie etwaige Schweißfehler und die Welligkeit der entstandenen Oberfläche betrachtet.

5.4. HÄRTEMESSUNG

Generell wird in der Metallkunde zwischen statischen und dynamischen Härteprüfungen unterschieden, zu den statischen Härteprüfverfahren zählen die drei Verfahren nach Brinell, Rockwell und Vickers. Um die Härte einer metallischen Oberfläche zu messen, wird ein genormter Prüfkörper unter bestimmten Bedingungen in das zu prüfende Werkstück gedrückt, bei jedem Verfahren weist der verwendete Prüfkörper eine andere Geometrie auf und die Prüfkraft wird dementsprechend ausgewertet. Somit lässt sich zusammenfassen, dass Härte der Widerstand ist, den ein Werkstoff dem Eindringen des Prüfkörpers entgegensetzt. Die Härtemessung der Proben erfolgt nach dem Verfahren nach Vickers. Auf den zwölf Oberflächen der 12Flächenproben wurden je drei Härtewerte für die Ermittlung des arithmetischen Mittelwerts der Härte einer Fläche mit dem Krautkrämer Härtemessgerät mit einem HV5 Prüfkopf aufgenommen (siehe Abbildung 18 links).



Härtemessgerät Krautkrämer mit HV5 Prüfkopf am Institut



Vickershärtemessung nach
DIN EN ISO 6507 - 1

Abbildung 18: Links: Härtemessgerät; Rechts: Vickershärtemessung (Macherauch und Zoch 2011)

Die Vorgehensweise der Härtemessung nach Vickers ist in DIN EN ISO 6507-1 definiert. Bei der Härtemessung nach Vickers kommt als Eindringkörper eine regelmäßige vierseitige Pyramide mit einer quadratischen Grundfläche zum Einsatz (siehe Abbildung 18 rechts). Der Winkel zwischen zwei Seitenflächen der Pyramide ist genormt mit 136° . Der Prüfkopf wird mit einer definierten Prüfkraft normal schwingungs- und stoßfrei für eine kurze Zeitspanne auf die Oberfläche gedrückt, anschließend wird der Prüfkopf nach oben gehoben. Es verbleibt eine quadratische Fläche mit den Diagonalen d_1 und d_2 als Eindruck am Prüfling. Der für die Berechnung der Kraft herangezogene Wert der Diagonale d wird wie definiert als der Mittelwert der Diagonalen $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$. Bei Abweichungen der Diagonalen um mehr als 5% vom Mittelwert ist die Messung ungültig, das Krautkrämer Messgerät gibt dies sofort an, die manuelle Messung kann wiederholt werden.

Als Prüflast wurde für sämtliche Härtemessungen HV5 verwendet. Die Ziffer 5 kennzeichnet dabei die Prüfkraft in Kilopond. Die Härte errechnet sich aus dem Quotienten aus Prüflast F und Fläche A des Quadrats.

$$HV = \frac{1}{g} \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin\left(\frac{136}{2}\right)}{d^2} \approx 0,18903 \frac{F}{d^2}$$

5.5. HAFTFESTIGKEITSVERSUCH

Unter Haftfestigkeit versteht man die Kraft, die notwendig ist, um den metallischen Überzug vom Grundwerkstoff, welcher Metall oder Kunststoff sein kann, zu trennen. (Kanani 2007, S.9)

Der Prüfaufbau zum Haftfestigkeitsversuch wurde im Rahmen der Bachelorarbeit von Pototschnigg (2014) am Institut entwickelt. Mittels einer hydraulischen Presse wird eine Kraft auf die Beschichtung einer Fläche aufgebracht, um einen Bruch der Beschichtung vom Substrat zu erzwingen (siehe Abbildung 19). Dabei wird die Kraft mit einer Kraftmessdose und einem Wegmesssystem erfasst und mit Hilfe der Software Dewesoft aufgezeichnet.

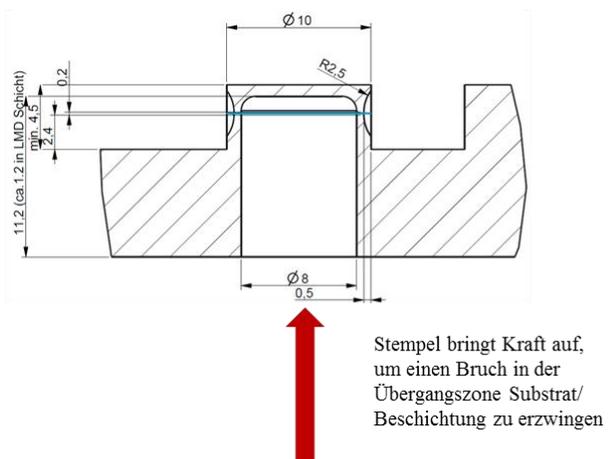
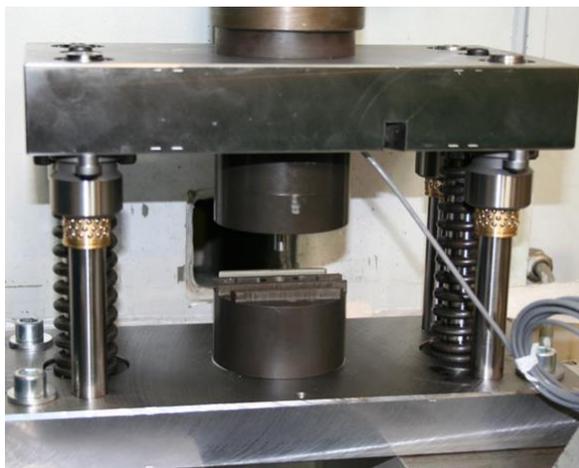


Abbildung 19: Prüfaufbau Haftfestigkeitsversuch

Um die Haftfestigkeit zwischen Substratwerkstoff und Pulverbeschichtung bestimmen zu können, werden die geschweißten 12Flächenproben zu den Probenkörpern abgefräst, um den Versuch durchführen zu können. Ziel ist es, einen Bruch in der Grenzfläche zwischen Substrat und Pulver zu erzwingen. Die Betrachtung der Bruchfläche und die für das Zerstören der Probe benötigte Zugkraft lassen Rückschlüsse auf die Qualität der Anbindung zu. Je nach Kombination von Substrat, Pulverbeschichtung und Schweißparametern ergeben sich somit verschieden gute Haftfestigkeiten zwischen den beiden Materialien.

In der Praxis ist die Haftfestigkeit von Beschichtungen von großer Bedeutung. Lösen sich Beschichtungen, so ist die die eigentliche Funktion des Bauteils nicht mehr gegeben. Die besten und teuersten Überzüge sind nutzlos, wenn sie nicht ausreichend am Substrat haften, da ihre eigentliche Funktion ja zumeist den Schutz vor Verschleiß bzw. Korrosion darstellt. Die Prüfung der Haftfestigkeit von Beschichtungen am Substrat ist eine große Herausforderung in der Materialwissenschaft, da die Messergebnisse von vielen äußeren Einflüssen abhängen. Es gibt keine ausreichend entwickelten Prüfungen für die Haftfestigkeit eines Bauteils, somit kann vielfach nach einer Haftfestigkeitsprüfung nicht mehr als die Aussage „Haftfestigkeit ausreichend bzw. Haftfestigkeit nicht ausreichend“ getätigt werden. Das Ergebnis einer Haftfestigkeitsprüfung führt zu

keiner Aussage zu den Bindungsmechanismen zwischen Substratwerkstoff, Beschichtung und der Wirkung der Beschichtung.

Als eine Fehlerquelle für unzureichende Haftung der Beschichtung am Substratwerkstoff ist mit Sicherheit mangelnde Reinigung und Vorbehandlung der Oberfläche zu nennen. In der Praxis weisen Substrat und Beschichtung oftmals sehr unterschiedliche chemische, thermische, physikalische und mechanische Eigenschaften auf, weshalb die Werkstoffpartner verschieden auf äußere Einflüsse reagieren können. Des Weiteren sind gerade beschichtete Bauteile extremen Belastungen ausgesetzt, was für die oft nur wenige Millimeter dicke Beschichtung eine Herausforderung ist. Es ist noch nicht vollständig erforscht, warum es zur Haftung kommt. Vermutungen legen nahe, dass der Mechanismus der Haftung bei Metall/Metall Partnern aufgrund der metallischen Bindung zustande kommt. Mit Hilfe der Diffusionstheorie ist Haftung zwischen zwei Metallen erklärbar. Bei Metall/Kunststoffverbund bewirken van-der-Waals'sche Bindungskräfte Haftung. Kanani (2007)

Die Haftung zwischen Substratwerkstoff und der Beschichtung kann durch Mikroaufrauung der zu beschichtenden Oberfläche erheblich verbessert werden. Mikroaufrauung bewirkt eine Vergrößerung der Oberfläche der Kontaktfläche, daher kommt es zu einer besseren Einkopplung der Laserstrahlung in das Werkstück. Mikroaufrauung von Oberflächen wird in der Praxis durch Sandstrahlen erzielt. In der Praxis liegt für den Haftfestigkeitsversuch kein eindimensionaler Spannungszustand vor, daher ist das Resultat des Versuchs auch keine Spannung, bzw. kein Festigkeitswert in $\frac{N}{mm^2}$. Da sich die Haftfestigkeit proportional zur Zugkraft verhält, wird als Ergebnis des Haftfestigkeitsversuchs die Zugkraft angegeben. (Vollmer 2016)

5.6. SCHERFESTIGKEITSVERSUCH

Der Scherfestigkeitsversuch wird am selben Prüfstand wie der Haftfestigkeitsversuch durchgeführt, der Prüfkopf ist jedoch ein anderer. Um die Versuche durchführen zu können, müssen die zylinderförmigen Proben durch Drehen in die Form der Prüfkörper gebracht werden. Ziel ist es, eine Abscherung der Beschichtung durch das Aufbringen einer Kraft im Übergangsbereich Substrat/Beschichtung zu erzielen. Die zur Abscherung der Beschichtung notwendige Kraft wird mit der Software Dewesoft aufgezeichnet. Es ist darauf zu achten, dass die Probe während des Versuches fest eingespannt ist und sich nicht bewegen kann, um korrekte Scherkräfte zu ermitteln.

In der Materialtechnik drückt die Scherfestigkeit die Belastungsfähigkeit eines Werkstoffes auf Abscheren aus.

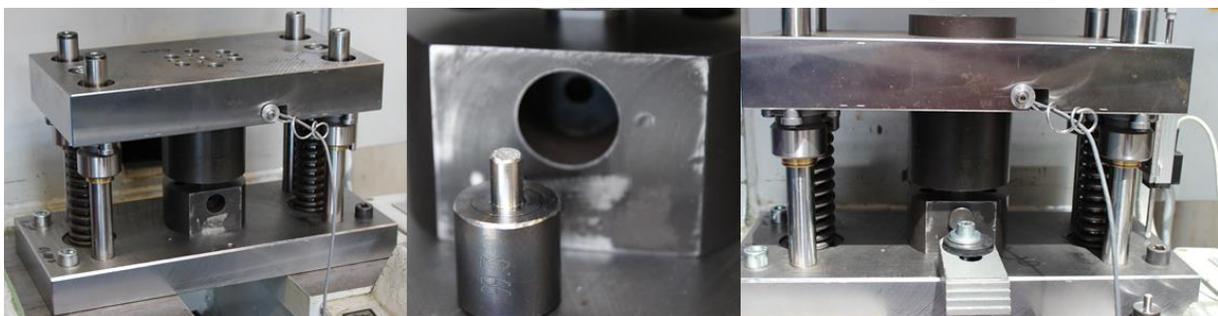


Abbildung 20: Links: Scherfestigkeitsprüfstand; Mitte: Probenkörper vor dem Scherversuch; Rechts: im Prüfstand fixierter Probenkörper

Die Scherfestigkeitsversuche werden zur Bestätigung der Ergebnisse der Haftfestigkeitsversuche ausgewählter Beschichtungskombinationen durchgeführt. Bei Scherfestigkeitsversuchen wird gleich

wie bei Haftfestigkeitsversuchen der Übergangsbereich zwischen Substrat und Beschichtung getestet. Anhand der Ergebnisse beider Versuche wird im direkten Vergleich überprüft, ob zwischen Haftfestigkeit und Scherfestigkeit ein Zusammenhang besteht.

6. VERSUCHSABLAUF

In Rahmen der Versuche werden vier verschiedene Nickelbasislegierungen Ni25, Ni40, Ni50 und NiBSi auf die Substratwerkstoffe 1.1730, 1.7131 und 1.2343 aufgetragen. Die Prozessparameter, mit denen die Nickelbasislegierungen auf die Substrate geschweißt werden, werden variiert. Die Substratkörper für die ebenen Versuche weisen die Abmessungen 100 x 65 x 10 mm auf und haben vier Bohrungen, die zur Befestigung der Probe auf einer Heizplatte während des Auftragschweißens dienen. Auf den Probenkörpern werden zuerst Linien oder zwölf Flächen einer Nickelbasislegierung mit verschiedenen Schweißparametern aufgetragen, um eine ausführliche Versuchsmatrix zu erhalten.

Die Beschichtung der fertigen Probenkörper wird mit den beschriebenen Untersuchungsmethoden untersucht, dabei wird die Härte der Beschichtung gemessen und die Haftfestigkeit zerstörend geprüft. Die Auswertung der Ergebnisse der Untersuchungen mithilfe statistischer Methoden führen zu geeigneten und weniger geeigneten Parametersätzen. Innerhalb des Prozessfensters werden Zylinderproben für die Scherfestigkeitsprüfungen geschweißt, diese werden durchgeführt, um die Ergebnisse der Haftfestigkeitsprüfung bestätigen oder widerrufen zu können.

Mit den für geeignet befundenen Parametersätzen der Nickelbasispulvermetalle wird eine Fläche auf einen Substratwerkstoff geschweißt, auf diese werden nach mechanischer Bearbeitung verschiedene Parametersätze von Wolframkarbidflächen aufgetragen. Aus den Proben werden Schriffe erstellt und lichtmikroskopisch untersucht. Die erzielten Höhen der Wolframkarbid-schichten werden vermessen.

Dieser Versuchsablauf dient dazu, einen geeigneten Schweißparametersatz zu ermitteln, um ein reales Warmformwerkzeug zu beschichten (siehe Abbildung 21).

Der Beschichtungsprozess läuft folgendermaßen ab: Zuerst wird mit ein Parametersatz einer Nickelbasispulvermetalllegierung mit beliebiger Vorwärmtemperatur auf das Substrat aufgetragen. Anschließend wird durch Zerspanung eine glatte Oberfläche erzeugt. Im nächsten Schritt erfolgt bei gewünschter Vorwärmtemperatur der Auftrag der Wolframkarbid-schicht, hier wird eine geringe Bearbeitungszugabe in der Höhe des Auftrags berücksichtigt. Anschließend wird die Wolframkarbid-schicht auf das geforderte Endmaß abgefräst.

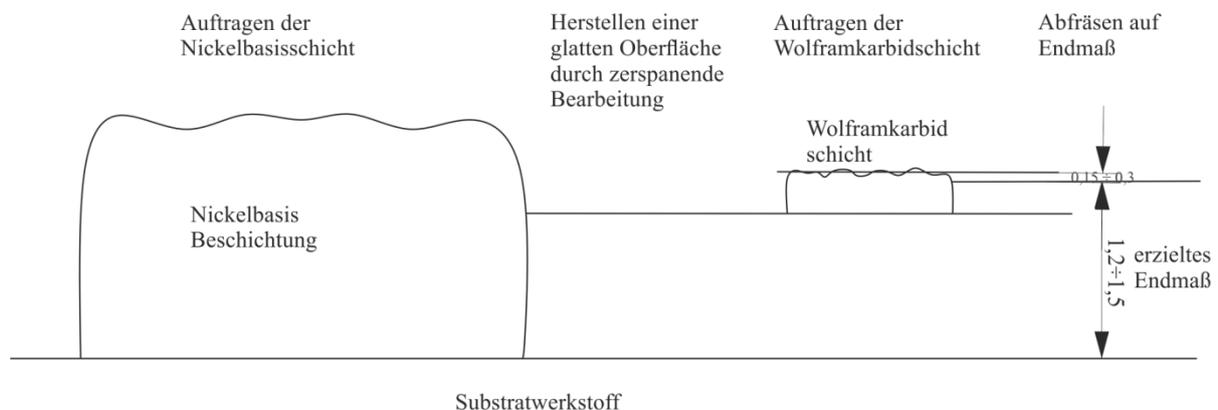


Abbildung 21: Strategie zur Herstellung einer endmaßnahen Beschichtung

Ziel ist, dass die fertige Wolframkarbid-schicht aufgrund des Werkzeugverschleißes bei Zerspanung so wenig wie möglich nachbearbeitet werden muss und das Endmaß mithilfe des LMD-Prozesses so

genau wie möglich erzeugbar ist. Die Höhe der Wolframkarbidschicht soll zwischen 0,15 und 0,3 mm betragen, um ideale Einbettung in der Nickelbasismatrix zu gewährleisten.

Mit der am besten geeigneten Kombination aus Substrat- und Pulverwerkstoff werden Radien von vier Radius-Doppelradiusproben und Radien von Segmenten eines Realwerkzeuges beschichtet.

Im folgenden Kapitel ist der Versuchsablauf chronologisch dokumentiert, zur besseren Übersicht ist der Versuchsablauf in Abbildung 22 mit Hilfe eines EPC-Modells abgebildet.

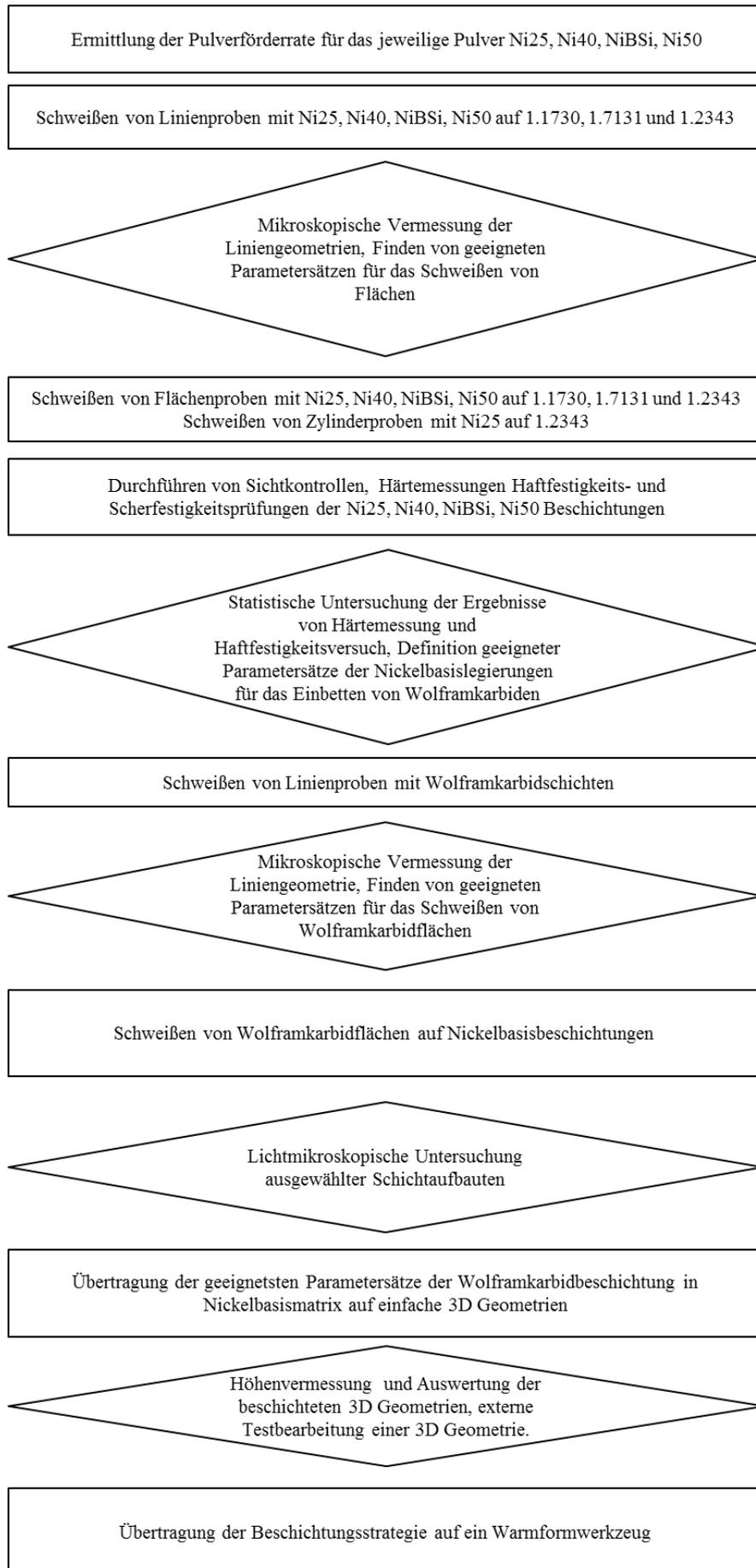


Abbildung 22: Chronologischer Versuchsablauf nach dem EPC-Modell

6.1. ERMITTLUNG DER PULVERFÖRDERRATE

Um abschätzen zu können, welches von Trumpf (Hersteller der Laserauftragsmaschine) vorgegebene Rezept für die Erstellung des Schweißauftrags verwendet werden sollte, muss vor dem Auftragschweißen die Pulverfördertrate des zu verwendenden Metallpulvers ermittelt werden.

Hierfür wird die Pulvermenge in $\frac{g}{min}$ bei den Drehzahlen 1000, 1250, 1500, 1750 und 2000 rpm der Pulverförderwelle mit Hilfe einer Waage bestimmt.

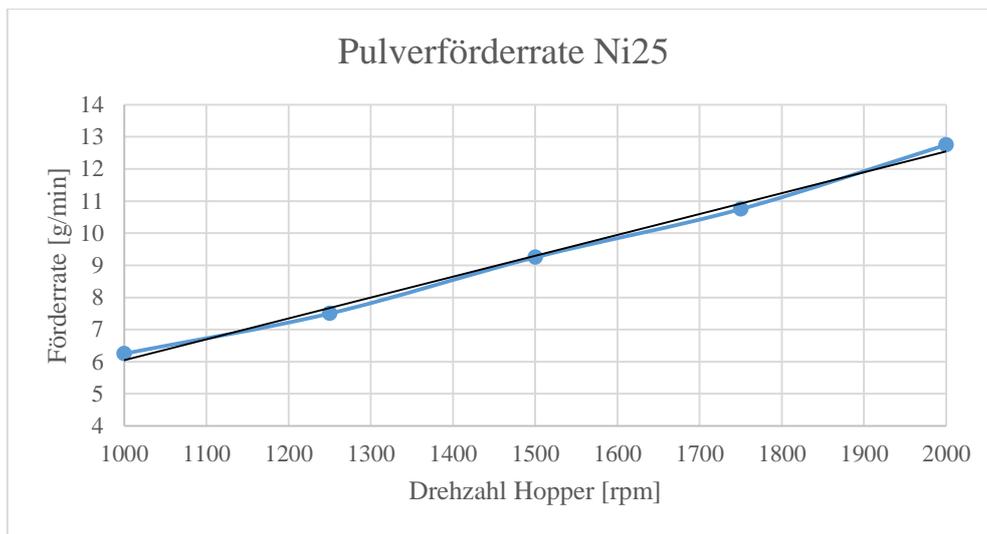


Abbildung 23: Ermittlung der Pulverfördertrate am Beispiel Ni25

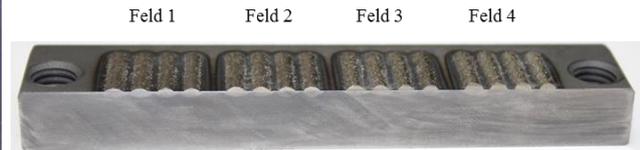
Die ermittelten Wertepaare werden im Diagramm eingetragen (siehe Abbildung 23), mittels Regression wird die lineare Kennlinie gebildet. Trumpf stellt zwischen der Drehzahl, mit welcher die Förderwelle für den Pulvertransport angetrieben wird, und der Pulverfördertrate in $\frac{g}{min}$ einen Zusammenhang her und bezeichnet diesen als Rezept. Durch Vergleich mit den von Trumpf angegebenen Rezepten für die jeweilige Pulverfördertrate wird bestimmt, welches Rezept für das Auftragen der jeweiligen Nickelbasisbeschichtung verwendet wird.

6.2. LINIENPROBEN

Mit jedem verwendeten Pulver werden zuerst sogenannte Linienproben mit verschiedenen Parametern geschweißt. Diese bestehen aus vier Feldern zu je vier Linien, wobei jede Linie verschiedene Schweißparameter (Vorschubgeschwindigkeit, Laserleistung, Fokusslage) aufweist. Außerdem wird die Vorwärmtemperatur bei den einzelnen Proben variiert. Auf diese Weise ist es möglich, mit nur einer Probe 16 Linien mit 16 verschiedenen Parametersätzen zu erhalten.



Probe Nr. 131: 1.1730; 16 Linien NiBSi, 250°C Vorwärmung



Probe Nr. 136: 1.1730; 16 Linien Ni25, 20°C Vorwärmung

Abbildung 24: Linienproben

In Abbildung 24 ist links eine unbearbeitete Linienprobe direkt nach dem Schweißprozess dargestellt. Nach dem Schweißen werden Linienproben mit Hilfe einer Trennscheibe normal zu den aufgetragenen Linien durchtrennt, geschliffen und geläppt (siehe Abbildung 24 rechts). Es ist ersichtlich, dass sich die Querschnittsflächen je nach eingestellten Schweißparametern in ihrer Form wesentlich voneinander unterscheiden. Bei Betrachtung der Querschnitte von links nach rechts fällt auf, dass die Schweißaufträge immer höher werden. Grund dafür ist, dass in den vier Feldern von links außen beginnend die Vorschubgeschwindigkeiten von anfangs $300 \frac{mm}{min}$ auf schlussendlich $600 \frac{mm}{min}$ in $100 \frac{mm}{min}$ Schritten erhöht wurden. Bei niedrigen Geschwindigkeiten ist ein größerer Auftrag möglich, bei höheren Geschwindigkeiten ist der Auftrag naturgemäß flacher. Die Linien werden in vier Felder von links nach rechts nummeriert: 1_1, 1_2, 1_3; 1_4, 2_1, 2_2, ... Die erste Ziffer kennzeichnet die Nummer des Feldes, die zweite Ziffer ist die Nummer der Linie im Feld von links nach rechts. In Tabelle 4 sind die für das Schweißen von in Abbildung 24 rechts dargestellter Linienprobe verwendete Schweißparameter eingetragen. Diese Probe wurde bei Raumtemperatur geschweißt.

Tabelle 4: Schweißparameter der Linienprobe 136

Linien-Nr.	v [mm/min]	Δf_B [mm]	P_L [W]
1_1	300	-5	3200
1_2		0	
1_3		5	
1_4		10	
2_1	400	-5	
2_2		0	
2_3		5	
2_4		10	
3_1	500	-5	
3_2		0	
3_3		5	
3_4		10	
4_1	600	-5	
4_2		0	
4_3		5	
4_4		10	

Zweck des Schweißens der Linienbahnen ist es, geeignete Parametersätze für das Schweißen der 12Flächenproben zu finden. Um die Qualität der Geometrie der erzeugten Schweißbahnen beurteilen

zu können, werden die Höhen, Breiten und Querschnittsflächen der geschweißten Linien mikroskopisch gesichtet und vermessen.

Die Ergebnisse der Vermessung der einzelnen Linien können jedoch nicht direkt auf die auftragzuschweißenden Flächen übertragen werden, da sich die Schweißbahnen einer Fläche überlappen und die damit einhergehende Spurüberlappung zu berücksichtigen ist. Würde die Einstellung der Bahnhöhe von Linienproben direkt auf die Parametersätze der zu schweißenden Flächenproben übertragen werden, ergäbe sich bei Flächenproben zwangsläufig durch die Überlappung der Bahnen ein größerer und unerwünschter Materialauftrag.

Es gilt daher, die Spurüberlappung O_L zweier übereinander liegender Schweißbahnen beim Schweißen von Flächen durch eine empirisch entwickelte Formel zu berücksichtigen, um so die zu erwartende Höhe h des Auftrags bei Flächen abschätzen zu können.

Dabei wird folgendermaßen vorgegangen:

Die Querschnittsfläche A_C und die maximal erreichte Höhe h_1 einer einzelnen aufgeschweißten Bahn wird durch Vermessung mithilfe des Mikroskops ermittelt.

Die Breite B der zu schweißenden Fläche besteht aus n sich überlappenden Bahnen, der Bahnmittenabstand zwischen zwei Schweißlinien wird mit d_l bezeichnet.

$$n = \frac{B}{d_l}$$

Die Anzahl n der Bahnen ist unbekannt, da die DMD – Maschine diesen Wert in Abhängigkeit der gewünschten Breite B der Fläche, des NC-Programms und dem verwendeten Rezept für das jeweilige Pulver automatisch berechnet.

Eine fertig auftraggeschweißte Fläche soll eine mittlere Höhe h erreichen, welche vorab wie gewünscht einstellbar sein soll. Dazu wird der empirische Zusammenhang aufgestellt:

$$h \cdot B = n \cdot A_C$$

Durch Einsetzen von n kürzt sich die Breite B aus der Formel, die zu erreichende Höhe der Fläche kann nun mithilfe des Bahnmittenabstands zweier Schweißlinien „eingestellt“ werden:

$$h = \frac{A_C}{d_l}$$

Der Bahnmittenabstand d_l wird über die korrelierende Größe Spurüberlappungsfaktor O_L zweier sich überlappender Bahnen wie gewünscht eingestellt und steuert gemeinsam mit der Fläche A_C einer Bahn die zu erreichende Höhe. O_L wird im Rahmen der Versuchsreihen im Bereich von 40÷60% eingestellt. Die geometrischen Zusammenhänge, um die empirische Abschätzung der Höhe durchführen zu können, sind in Abbildung 25 graphisch dargestellt.

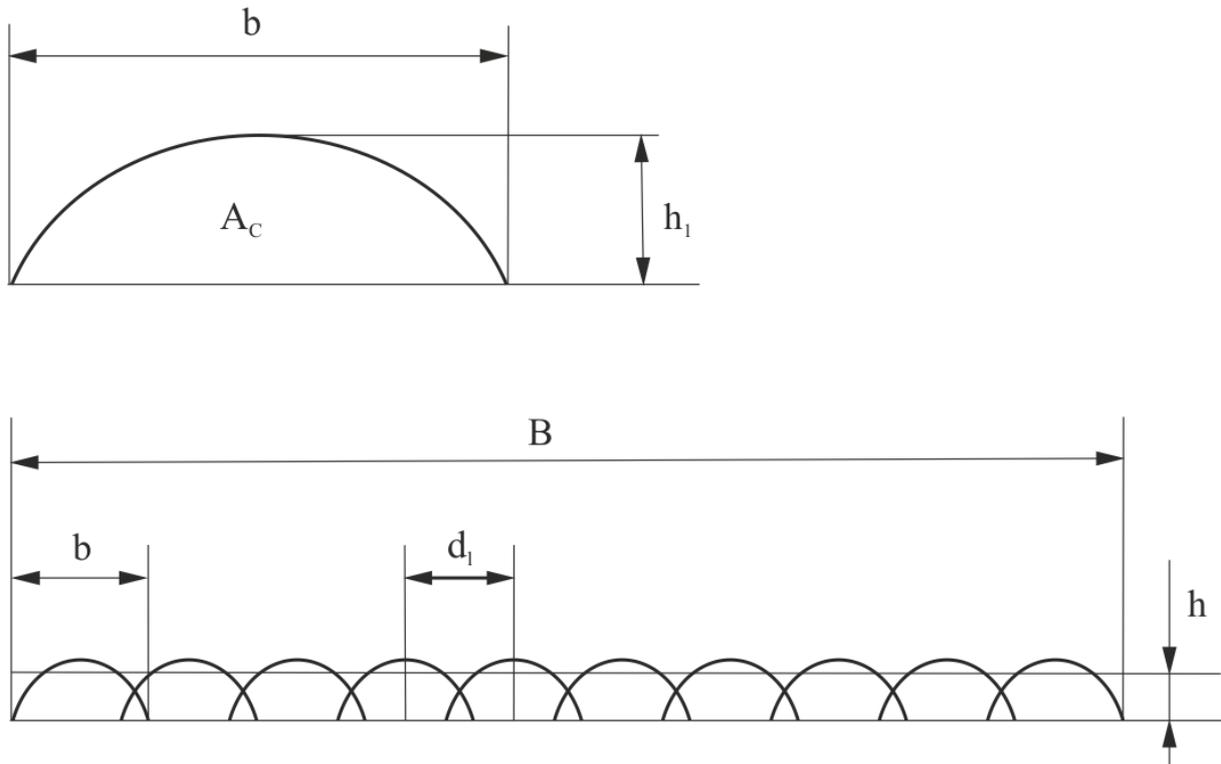


Abbildung 25: Oben: Geometrie einer Schweißbahn; Unten: Geometrie einer geschweißten Fläche

Die entwickelte Vorgehensweise, um die gewünschte Höhe der geschweißten Fläche vorab einstellen zu können, hat sich in der Praxis als ausreichend genau erwiesen.

6.3. 12FLÄCHENPROBEN

Die für das Schweißen der 12Flächenproben verwendeten Schweißparameter wurden aus der Vermessung der Linienproben entnommen.



Probe Nr. 165: 1.1730; 12Flächen NiBSi, 400°C Vorwärmung

4 1	3 1	2 1	1 1
4 2	3 2	2 2	1 2
4 3	3 3	2 3	1 3
Proben-			und
Werkstoffnummer			

Einheitliche Beschriftung einer 12Flächenprobe

Abbildung 26: 12Flächenprobe

In Abbildung 26 ist exemplarisch eine 12Flächenprobe ersichtlich. Diese Probe wurde auf 400°C vorgewärmt, das Substrat ist 1.1730, die Flächen wurden mit NiBSi einlagig aufgetragen. 12Flächenproben bestehen aus vier Feldern zu je drei Flächen (Nummerierung siehe Abbildung 26 rechts). Die drei Flächen werden mit denselben Parametern geschweißt. Durch die drei mit dem gleichen Parametersatz geschweißten Flächen stehen für die im weiteren Versuchsablauf statt findenden Härtemessungen und die Haftfestigkeitsprüfung drei Probenkörper pro Parametersatz zur Verfügung, um daraus eine statistische Aussage tätigen zu können. Die zwölf Flächen werden bei jeder Probe nach einem anderen stochastischem Muster geschweißt, um hier durch Randomisierung mögliche periodisch auftretende Fehler der Pulverzufuhr und des Lasers ausschließen zu können. Je nach verwendetem Pulver, eingestellten Schweißparametern und der Anzahl der Schweißlagen ergeben sich unterschiedlich hohe Flächen. Bei einigen Kombinationen aus Substrat-, Pulverwerkstoff und Vorwärmtemperatur sind direkt nach dem Schweißen mit freiem Auge zumindest 5mm lange Haarrisse auf der beschichteten Fläche erkennbar. Diese Kombinationen werden für weitere Versuche nicht mehr weiter betrachtet, da dies aufgrund der aufgetretenen Risse nicht möglich ist.

Die geschweißten 12Flächenproben werden für die durchzuführende Härtemessung und die Haftfestigkeitsversuche aufgrund des schweißbedingten Verzugs auf der Unterseite durch Fräsen geebnet. Die 12Flächen werden wie folgt zu zylinderförmigen Prüfkörpern gefräst. Genau an den Stellen der zwölf Zylinder werden Löcher von unten in die Proben gebohrt. Der Stempel des Haftfestigkeitsprüfstandes greift von unten an und drückt, bedingt durch die Presskraft, von innen auf die Fläche, um den Bruch zu erzielen. In Abbildung 27 ist ein aus einer 12Flächenprobe gefertigter Prüfkörper von oben und von vorne zu sehen. Der Übergangsbereich zwischen Substrat und Nickelbeschichtung ist ersichtlich.

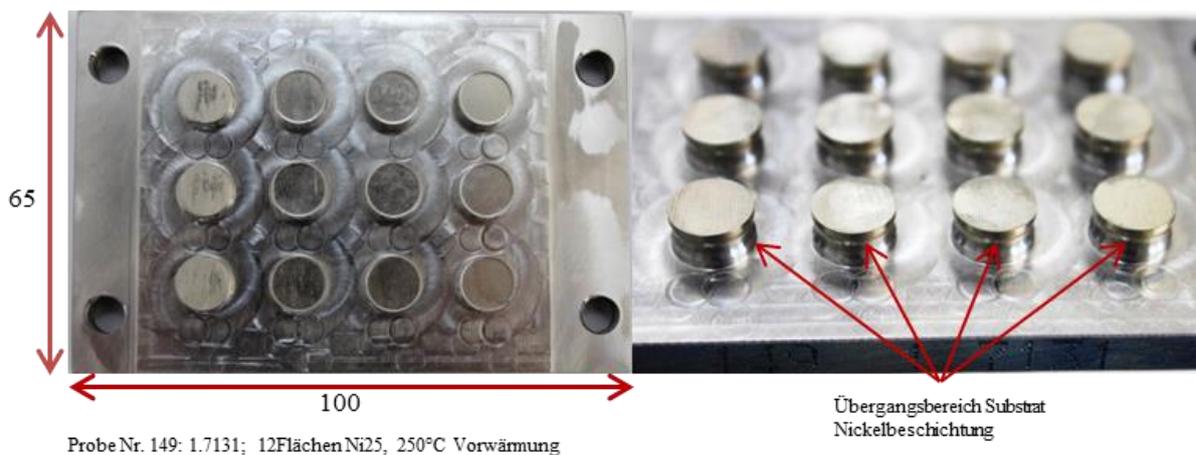


Abbildung 27: Prüfkörper einer 12Flächenprobe

Bevor die zerstörenden Haftfestigkeitsversuche gemacht werden können, wird die Härte der einzelnen Flächen auf drei Stellen direkt auf der abgefrästen Oberfläche der zwölf Prüfkörper gemessen. Die Gestalt der Prüfkörper ist je nachdem, ob mehrere oder nur eine Schweißlage auf das Substrat aufgetragen wurden, in Abhängigkeit des erreichten Schweißauftrags, konstruktiv anders gestaltet. Ziel ist es, den Bruch des Materials im Übergangsbereich zwischen Substrat- und Beschichtungswerkstoff zu erzwingen. Es soll vermieden werden, dass der Bruch an der Unterkante des Substratwerkstoffes eintritt oder nur die „Kappe“ des aufgeschweißten Pulverwerkstoffes abbricht, da so keine Aussage über die Haftung des Pulverwerkstoffes am Substratwerkstoff getätigt werden kann.

Einige Proben konnten aufgrund der Härte des verwendeten Pulverwerkstoffs nicht zerspanend zu den Probenkörpern bearbeitet werden, siehe exemplarisch in Abbildung 28. Die Haftfestigkeit der aufgeschweißten Nickelbasislegierung ist hier zu gering, diese Parametersätze werden für weitere Versuche nicht herangezogen und verworfen.

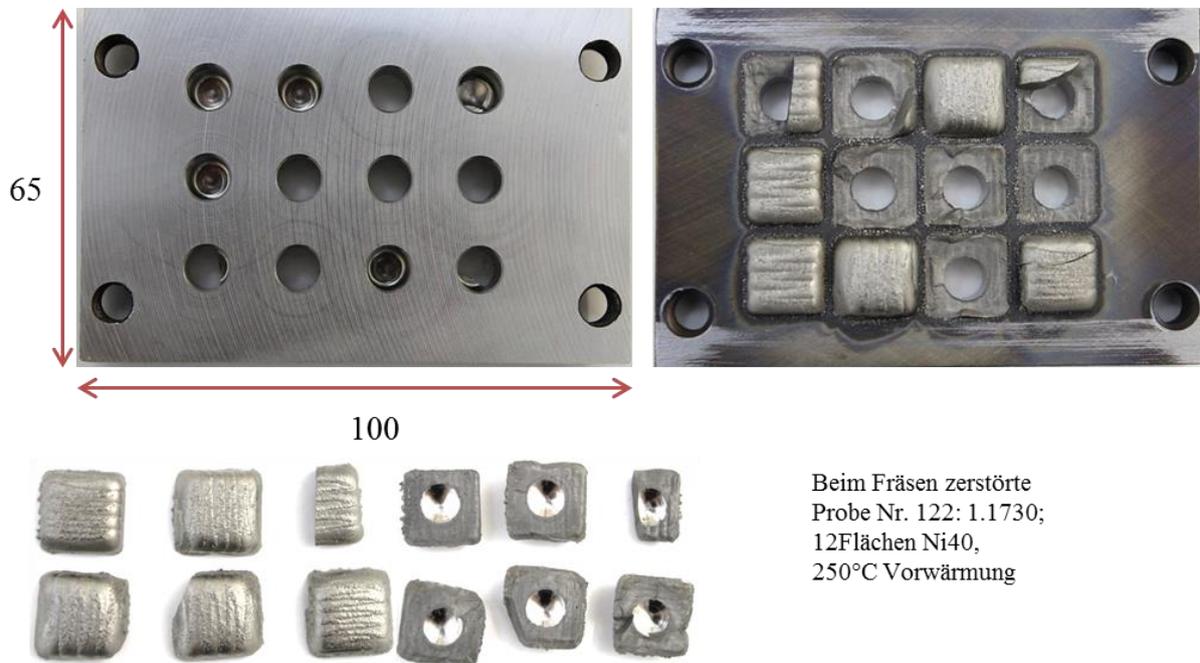
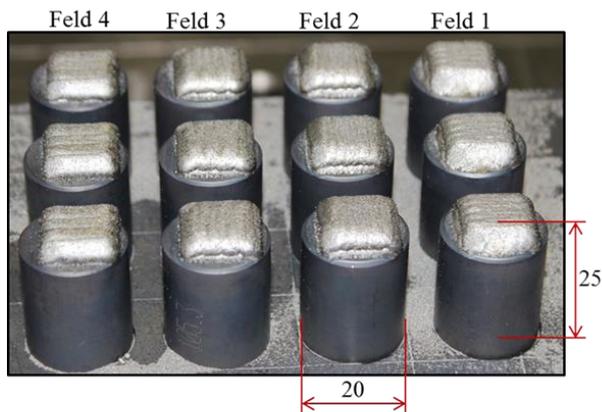


Abbildung 28: Bei Zerspanung zerstörte 12Flächenprüfkörper

Der Substratwerkstoff der Probe in Abbildung 28 ist 1.1730, die zwölf Flächen wurden mit Ni40 bei 250°C 2-4 lagig aufgebracht. Die zerspanende Bearbeitung zu den Probenkörpern sollte durchgeführt werden, war jedoch aufgrund der Härte von Ni40 erfolglos.

6.4. ZYLINDERPROBEN

Die Auswertungen der Härtemessung und der Haftfestigkeitsversuche der 12Flächenproben haben geeignete und ungeeignete Parametersätze weitgehend eingeschränkt. Um für die Ergebnisse aus den Haftfestigkeitsversuchen ein Vergleichskriterium zu erlangen, soll die Scherkraft im Übergangsbereich Substrat/Beschichtung ermittelt werden. Als Substratwerkstoff in Zylinderform kommt der Warmarbeitsstahl 1.2343 zum Einsatz, auf diese zylinderförmigen Körper werden Schichten aus Ni25 aufgebracht. In dieser Analyse werden neun verschiedene Parametersätze von Ni25, d.h. 27 Proben auf Zylinderkörper geschweißt, um die Scherkraft mit der Zugkraft aus dem Haftfestigkeitsversuch vergleichen zu können. In Abbildung 29 sind zwölf Zylinderproben zu sehen, wobei mit vier verschiedenen Parametersätzen (Feld 1 bis 4) je drei Proben geschweißt wurden.



Nach dem Schweißen:
Zylinderproben Nr. 105: 1.2343; Ni25, 400°C Vorwärmung,



Fertig gedrehte Proben für die Scherfestigkeitsversuche

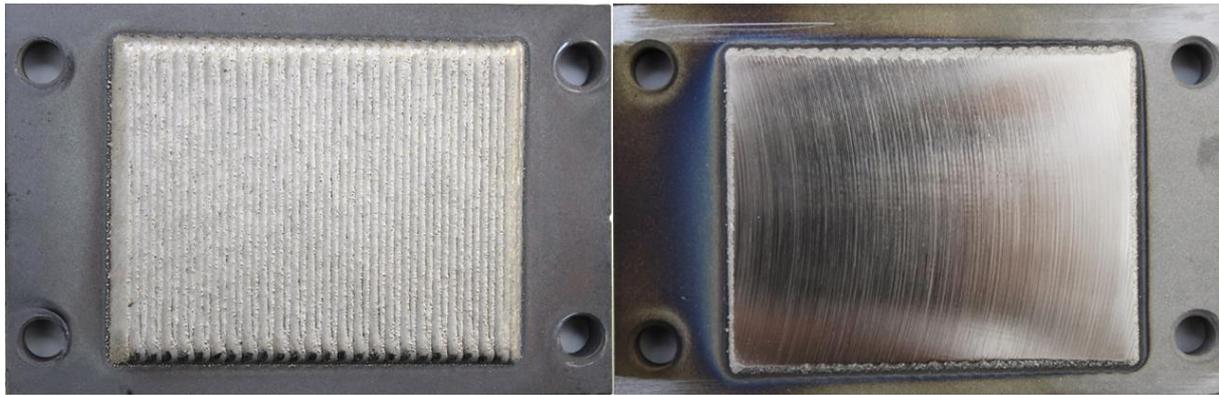
Abbildung 29: Zylinderproben

Um die Scherfestigkeit am Prüfstand testen zu können, werden die Zylinderkörper durch Drehen in die Form der Probenkörper gebracht (siehe Abbildung 29, rechts). Der Durchmesser des kleinen Zylinders beträgt hierbei 6mm, die Höhe ist 5mm Substrat plus die Beschichtungshöhe der Nickelbasislegierung. Nach dem Einlegen und Fixieren der Probe wird mithilfe der hydraulischen Presse im Übergangsbereich zwischen Substrat und Beschichtung eine Kraft aufgebracht, sodass die Beschichtung abgeschert wird, dabei wird die maximale Scherkraft aufgezeichnet. Die Analyse der Bruchfläche lässt auf die Qualität der Anbindung der Schweißverbindung schließen.

6.5. 1FLÄCHENPROBEN

1Flächenproben werden geschweißt, um auf ihnen nach dem Ebnen der aufgetragenen Nickelbasisbeschichtung Flächen mit Wolframkarbiden einschmelzen zu können. Anhand der Untersuchungen bezüglich Härte und Haftfestigkeit der geschweißten 12Flächenproben kann vorab abgeschätzt werden, welche Kombination aus Substratwerkstoff, Pulvermetall und Vorwärmtemperatur zu einer rissfreien und verschleißresistenten Oberfläche führen werden. Zum Schweißen der 1Flächenproben werden der beste Parametersatz und die beste Kombination aus Substrat- und Beschichtungswerkstoff verwendet. Einige Werkstoffkombinationen werden für die Fertigung der 1Flächenproben ausgeschlossen, weil ihre Ergebnisse hinsichtlich Haftfestigkeit und Härte nicht ausreichend gut waren, bzw. aufgrund der Härte der Beschichtung gar nicht auf Härte und Haftfestigkeit getestet werden konnten.

Dieser Selektionsprozess aus den Erkenntnissen der untersuchten 12Flächenproben führt zu einigen wenigen Kombinationen aus Substrat, Pulver und Schweißparameter, welche für das Schweißen der 1Flächenproben in Frage kommen. In Abbildung 30 ist links eine fertig geschweißte 1Flächenprobe vor der weiteren Bearbeitung zu sehen. Die Fläche wurde beginnend von rechts oben nach links unten aufgeschweißt. Um die Wolframkarbide auf die Nickelbasisschicht auftragen zu können, muss die aufgeschweißte Fläche mechanisch abgefräst werden, im rechten Teil der Abbildung ist eine fertig bearbeitete Fläche zu sehen.



Nach dem Schweißen:
1Flächenprobe Nr. 153: 1.7131;Ni40, 400°C Vorwärmung, 1 Lage

Nach dem Fräsen:
1Flächenprobe Nr. 142: 1.7131;Ni25, 20°C Vorwärmung, 1 Lage

Abbildung 30: 1Flächenprobe

In Summe wurden 13 1Flächenproben mit in Tabelle 5 vermerkten Werkstoff- und Schweißparameterkombinationen gefertigt. In den grünen Rechtecken sind die Schweißparametersätze nach Verwendungszweck markiert.

Tabelle 5: Werkstoff- und Schweißparameter der 1Flächenproben, Verwendungszweck

Substrat	Pulver	T_{VW} [°C]	Stück	Anzahl Lagen	v [mm/min]	Δf_B [mm]	F_P [g/min]	P_L [W]	f_L [Hz]	
	Ni25	20	2	1	400	0				→ WSC Linien
		20	2	1	300	0				
1.7131		250	2	1	300	0	9,25	3200	5000	→ WSC Flächen
	Ni40	400	2	1	400	0				
	NiBSi	400	2	1	400	0				
1.2343	Ni25	400	1	1	400	5	7,5			→ Schliffbild der Anbindung
			2	2	600	-5				

6.6. LINIENPROBEN AUS WOLFRAMKARBIDEN AUF NICKELBASISFLÄCHEN

Nach dem Fräsen und vor dem Auftragen der Wolframkarbidschicht werden die Oberflächen durch Sandstrahlung behandelt. Um ideale Schweißparameter für das Aufschweißen der Wolframkarbidlinien zu evaluieren, werden Wolframkarbidlinien auf die abgefrästen und sandgestrahlten 1Flächenproben aufgeschweißt. Auf der 1Flächenprobe aus Ni25 (Abbildung 31) wurden 14 Linien mit jeweils verschiedenen Schweißparametern aufgebracht.



Probe Nr. 144: 1.7131; 14 Linien WSC, 20°C Vorwärmung in Ni25 Matrix

Abbildung 31: WSC Linienprobe auf Ni25 – Beschichtung

In Tabelle 6 sind die Parameter der Wolframkarbidlinien eingetragen. Von rechts nach links besteht jedes Feld aus vier Linien, welche wieder von rechts beginnend von 1 bis 4 nummeriert werden. Aus Platzgründen auf der Nickelbasisfläche fehlt im ersten Feld die erste Linie und im vierten Feld die vierte Linie, es stehen somit 14 Linien mit verschiedenen Parametersätzen zur Verfügung. Die Schweißparameter wurden hinsichtlich Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit und Fokuslage variiert.

Tabelle 6: Schweißparameter Linienprobe 144

Linien-Nr.	v [mm/min]	Δf_B [mm]	P_L [W]
1_1	-	-	--
1_2	300	20	2240
1_3			
1_4			
2_1	400		2560
2_2			
2_3			
2_4			
3_1	500		2880
3_2			
3_3			
3_4			
4_1	600		3200
4_2			
4_3			
4_4	-	-	-

Nach dem Aufbringen der Wolframkarbidlinien wird die Probe normal zu den Linien durchtrennt, um die Schweißraupengeometrie nach der mechanischer Bearbeitung des Querschnitts von Hand (schleifen und läppen) unter dem Mikroskop betrachten zu können (siehe Abbildung 31, links). Mit freiem Auge ist ersichtlich, dass die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit mit einer kleinen Querschnittsfläche und geringen Höhe des Auftrags einhergeht.

6.7. WOLFRAMKARBIDFLÄCHEN AUF NICKELBASISFLÄCHEN

Aus der Vermessung der Linien haben sich geeignete und weniger geeignete Parametersätze für das Auftragen der Wolframkarbidschicht ergeben.

Die vier am ehesten geeigneten Kombinationen von Wolframkarbiden wurden für das Auftragen von vier Flächen auf die Nickelbasisfläche ausgewählt. In Abbildung 32 ist exemplarisch eine derartige Probe zu sehen, auf das Substrat 1.7131 wurde einflächig die Nickelbasislegierung Ni25 bei 250°C aufgetragen, auf die abgefräste und sandgestrahlte Fläche wurden vier Flächen aus Wolframkarbiden mit verschiedenen Parametersätzen bei 400°C Vorwärmung aufgetragen.



2	1
4	3
Proben- und Werkstoffnummer	

Einheitliche Beschriftung einer
12Flächenprobe

4 Flächen auf 1Flächenprobe Nr. 146: 1.7131; Ni25 bei 250°C
Vorwärmung, WSC 400°C Vorwärmung

Abbildung 32: Probe 146: Substrat: 1.7131, 1Fläche: Ni25 (250°C), vier Flächen WSC (400°C)

In Summe wurden sechs Proben dieser Art geschweißt. Die Schweißparameter sind in Tabelle 12 auf S. 73 eingetragen, da hier die lichtmikroskopische Untersuchung durchgeführt wird. Für das Aufschweißen der Wolframkarbide auf die Nickelbasisfläche wurden zwei verschiedene Parametersätze verwendet, d.h. dasselbe Programm wurde auf alle drei verwendeten Nickelbasislegierungen (Ni25, Ni40 und NiBSi) je einmal aufgeschweißt, um Vergleiche zwischen dem Verhalten der Wolframkarbidbeschichtung und den verschiedenen Nickelbasislegierungen anstellen zu können.

6.8. RADIUS-DOPPELRADIUSPROBE

In der Praxis werden Konturen nicht nur auf geometrisch ebene Flächen aufgetragen werden, die Konturen werden zumeist eine radienähnliche Geometrie aufweisen. Daher wird zur Erprobung des Verfahrens auf nicht ebenen Flächen eine Beschichtung mit Hilfe eines geeigneten Parametersatzes auf Radiusproben aus 1.2343 aufgebracht. Um eine radiusförmige Geometrie zu aufzuschweißen, werden eigens dafür Prüfkörper gefertigt, diese weisen einen einfachen Radius und einen Doppelradius auf. Auf die Radiusproben werden zwei Lagen Ni25 und eine Lage Wolframkarbide aufgetragen. In Abbildung 33 ist eine fertig geschweißte Radiusprobe zu sehen. Das Fertigungsprinzip bei der dreidimensionalen Probe ist gleich wie bei ebenen Proben. Im Bereich des Doppelradius kommt es zu einer Spurüberhöhung bzw. zu einer Aufdickung der Beschichtung. Mit Hilfe der Software GOM Inspect wird diese Aufdickung vermessen. (siehe Kapitel 7.8, S.84).

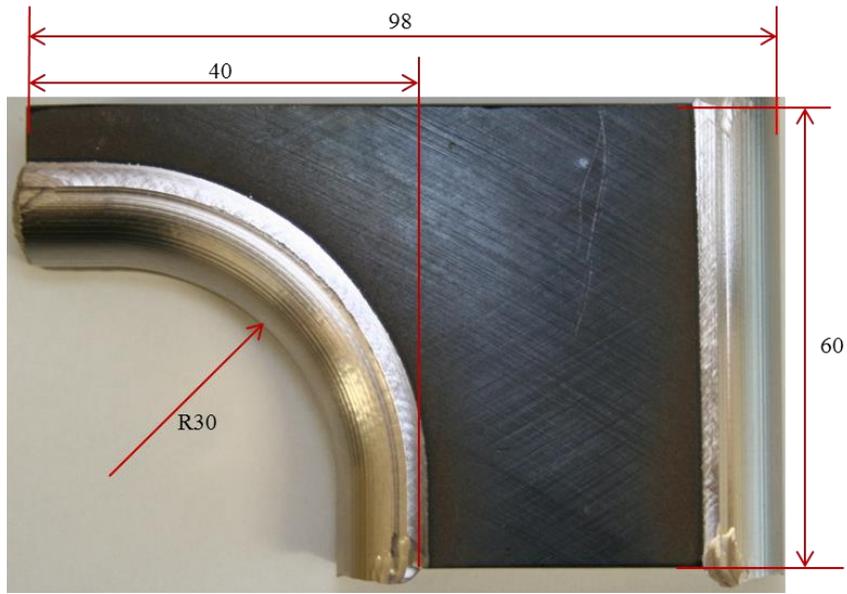


Abbildung 33: Probe 238: Radius-Doppelradiusprobe, Beschichtung: WSC in Ni25 Matrix

7. AUSWERTUNGEN

7.1. STATISTISCHE AUSWERTUNG DER HÄRTE UND HAFTFESTIGKEIT DER 12FLÄCHENPROBEN

Mit Hilfe der Auswertung der Geometrien der Linienproben werden geeignete Schweißparametersätze für das Herstellen der 12Flächenproben festgelegt. Im Rahmen der Arbeit werden verschiedene Kombinationen aus Substratwerkstoffen und Pulverwerkstoffen bei verschiedenen Schweißparametern getestet.

Die geschweißten Flächen werden nach dem Schweißen optisch auf Risse geprüft, anschließend werden aus ihnen die Probenkörper gefertigt. Pro Fläche werden mit Hilfe des Härtemessgerätes drei Messwerte für die Härte aufgenommen, der arithmetische Mittelwert dieser drei Messwerte wird für die statistische Auswertung herangezogen.

Die Haftfestigkeit der Anbindung Beschichtung/Substrat wird am Haftfestigkeitsprüfstand ermittelt. Bei dieser zerstörenden Prüfung wird einerseits die Zugkraft, die für das Auseinanderreißen der Verbindung nötig ist, angegeben, andererseits wird anhand der Betrachtung des zerstörten Übergangsbereiches zwischen Substrat und Nickelbasisbeschichtung die Qualität der Anbindung überprüft.

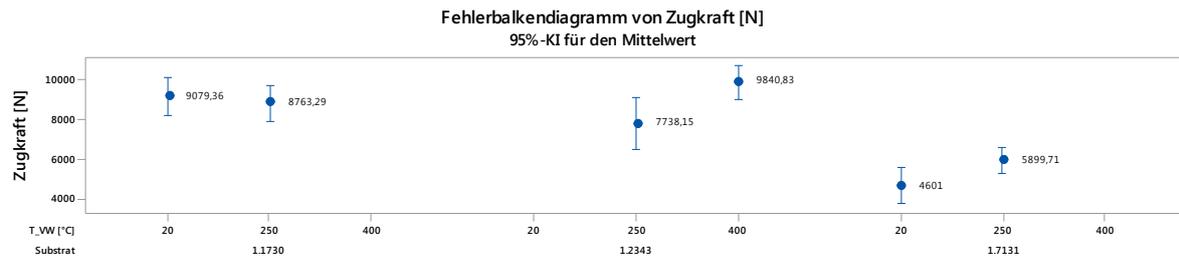
Neben dem Mittelwert der Härte und der gemessenen Zugkraft stehen für die statistische Auswertung mit Minitab die verwendeten Schweißparameter Vorschubgeschwindigkeit v , Vorwärmtemperatur T_{VW} , Bahnüberlappungsgrad O_L , Pulverförderrate F_P , Fokusverschiebung Δf_B , Laserleistung P_L und Laserfrequenz f_l zur Verfügung.

Zum Schweißen der 12Flächenproben wurden keine Wolframkarbide verwendet, da die Versuchsreihe „12Flächenproben“ lediglich dazu dient, die Qualität der Anbindung der Beschichtung am Substrat zu überprüfen.

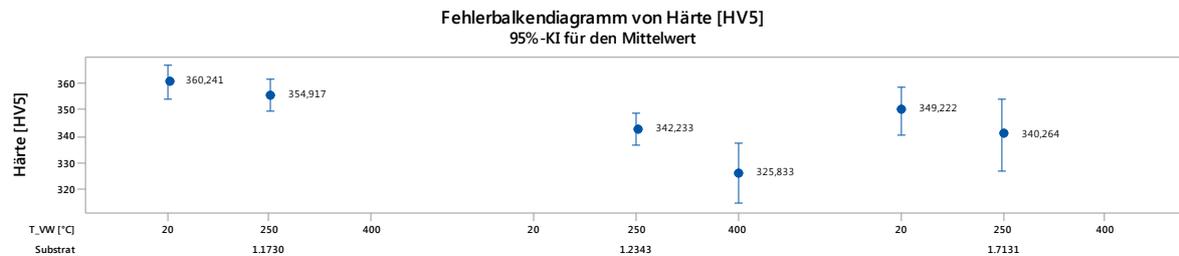
7.1.1. Ni25

Mit Ni25 wurden in Summe 15 12Flächenproben geschweißt, die drei Substrate 1.1730, 1.2343 und 1.7131 wurden verwendet, es stehen daher die Ergebnisse von 192 Versuchen zur Auswertung der Ni25-Beschichtung zur Verfügung.

Das Ziel der Haftfestigkeitsversuche ist es, eine Nickelbasisbeschichtung zu finden, die sehr gut am Substrat hält. Gute Anbindung der Beschichtung am Substrat zeichnet sich durch eine möglichst hohe Zugkraft auf. Bei hoher gemessener Zugkraft liegt zumeist geringe Härte der Beschichtung vor. Der Einfluss der Vorwärmtemperatur auf Zugkraft und Härte ist im direkten Vergleich der verschiedenen Substrate bei 144 Versuchen im Fehlerbalkendiagramm skizziert.



Zum Berechnen der Intervalle wurden die individuellen Standardabweichungen verwendet.



Zum Berechnen der Intervalle wurden die individuellen Standardabweichungen verwendet.

Abbildung 34: Fehlerbalkendiagramm der Härte und Zugkraft Ni25 auf 1.1730, 1.2343 und 1.7131 aus 144 Versuchen

Um die Zugkraft und die Härte vergleichen zu können, wurde in einer ersten Versuchsreihe für jedes verwendete Substrat 16 Parametersätze in drei Wiederholungen getestet. Es ergeben sich somit 144 Werte für die Härte und die Zugkraft. (siehe Abbildung 34). Die Substrate 1.1730 und 1.7131 wurden bei den Temperaturen 20°C und 250°C geschweißt, der Warmarbeitsstahl 1.2343 wurde auf 250°C und 400°C vorgewärmt. In Tabelle 8 sind Parametervariationen dieser Studie dargestellt. Die Laserleistung betrug bei allen Proben 3200W, die Tastfrequenz wurde mit 5000 Hz eingestellt.

Tabelle 7: Erklärung von verwendeten Abkürzungen

Abkürzung	Erklärung
T _{VW} [°C]	Vorwärmtemperatur
v [mm/min]	Vorschubgeschwindigkeit
O _L [%]	Spurüberlappungsfaktor
F _P [g/min]	Pulverförderrate
Δf _B [mm]	Fokuslage des Laserstrahls

In Tabelle 7 sind sämtliche verwendete Abkürzungen ausgeschrieben. Die genaue Definition der Abkürzungen werden in Kapitel 4 erläutert.

Tabelle 8: Parametersätze für die zwölf zu vergleichenden Proben

Substrat	Parameter-satz	T_{VW} [°C]	Anzahl der Lagen	v [mm/min]	O_L [%]	F_P [g/min]	Δf_B [mm]
1.1730 1.2343 1.7131	1_1	20 (1.1730 & 1.7131); 400 (1.2343)	2	400	40	7,5	5
	1_2		3	600	40		-5
	1_3		3	400	60		-5
	1_4		4	600	60		5
1.1730 1.2343 1.7131	2_1	20 (1.1730 & 1.7131); 400 (1.2343)	2	400	40	9,25	-5
	2_2		3	600	40		5
	2_3		3	400	60		5
	2_4		4	600	60		-5
1.1730 1.2343 1.7131	3_1	250	3	400	40	7,5	-5
	3_2		4	600	40		5
	3_3		4	400	60		5
	3_4		5	600	60		-5
1.1730 1.2343 1.7131	4_1	250	2	400	40	9,25	5
	4_2		3	600	40		-5
	4_3		3	400	60		-5
	4_4		4	600	60		5

Da je zwei Proben des Substrats 1.1730 und 1.7131 mit den identen Parametern geschweißt wurden, sind die Ergebnisse der 96 Versuche direkt vergleichbar.

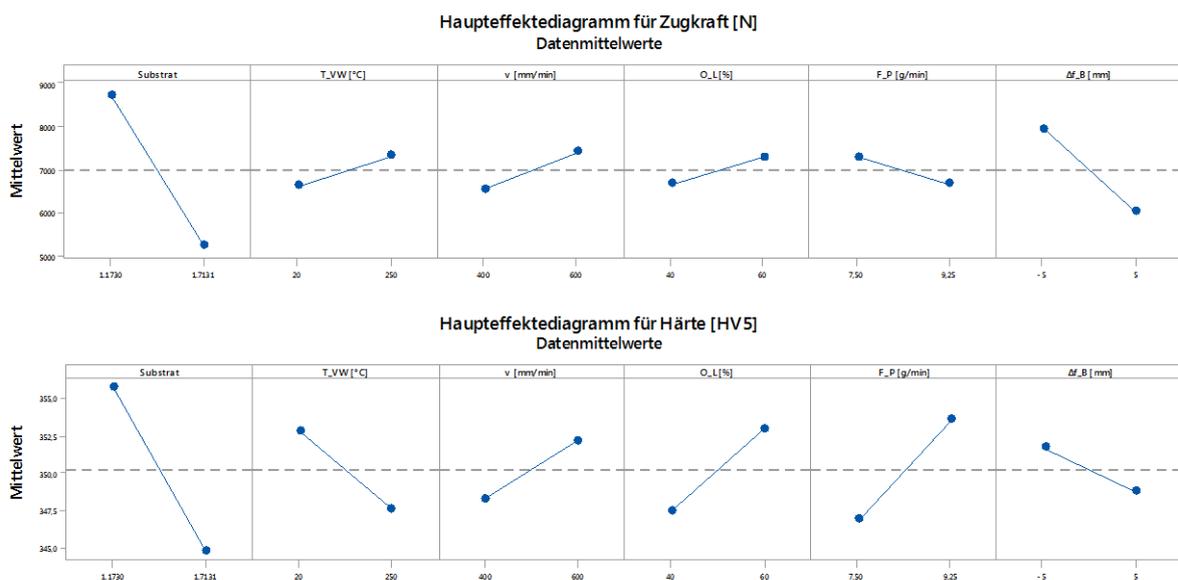


Abbildung 35: Haupteffektdiagramm für 1.1730 und 1.7131

Im Haupteffektdiagramm für die Zugkraft und die Härte der Substrate 1.1730 und 1.7131 in Abbildung 35 ist eindeutig ersichtlich, dass das Substrat den größten Einfluss auf die Zugkraft und die Härte hat. Für die Zugkraft ist die eingestellte Fokuslage, für die Härte die eingestellte Pulverförderrate von großer Bedeutung.

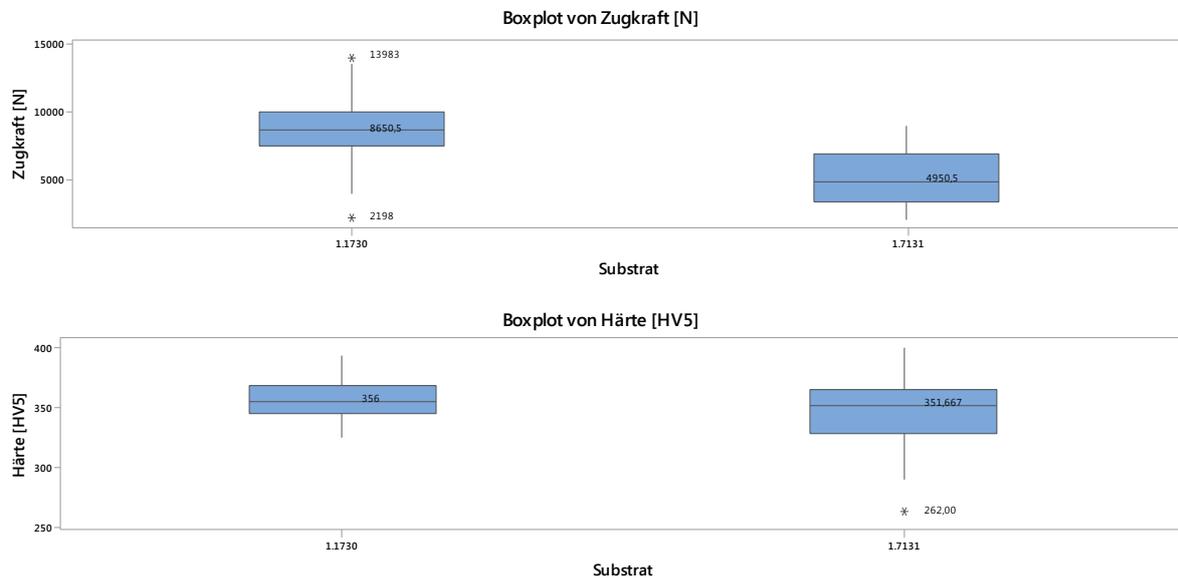


Abbildung 36: Boxplot für Zugkraft und Härte für 1.1730 und 1.7131

Aus dem oberen Boxplotdiagrammen in Abbildung 36 ist ersichtlich, dass sich bei den auf 1.1730 getesteten Parametern höhere Zugkräfte ergeben, dies bedeutet, dass die Ni25-Beschichtung am Substrat 1.1730 besser hält. Bei 1.1730 wurden zwei Ausreißer vermerkt, diese sind jedoch bei 48 ausgewerteten Proben nicht weiter relevant. Der Median der Zugkraft von 1.1730 stellt entspricht dem 1,75-fachen der Zugkraft von 1.7131.

Die Boxplots der arithmetischen Mittelwerte der drei gemessenen Härten der ausgewerteten 96 Versuche beider verwendeten Substrate ist im unteren Diagramm in Abbildung 36 dargestellt. Der Median 1.1730 und 1.7131 unterscheidet sich lediglich um 5 HV5, bei 1.7131 kommt es zu größerer Streuung der Härte, des Weiteren ist ein einziger Ausreißer vermerkt. Das unterste und oberste Quartil bei 1.7131 ist wesentlich größer als die vergleichbaren Quartile bei 1.1730. Werden für die Auswertung der Boxplots der gemessenen Härtewerte beider getesteten Substrate Messfehler und -toleranzen berücksichtigt, lässt sich zusammenfassen, dass der Median für die Härte bei beiden Substraten nahezu ident ist.

In erster Linie ist das Ziel der Auswertung, einen hinsichtlich der Anbindung Substrat/Nickelbasislegierung geeigneten Parametersatz zu finden. Durch die Vorwärmung des Substrats konnte die Härte von Ni25 auf jeden Fall gesteigert werden, gibt doch der Hersteller 25HRC (~270 HV) für Ni25 an. Die Entwicklung der Härte der Nickelbeschichtung ist jedoch nicht primär zu betrachten, da die benötigte Härte über die Wolframkarbide erreicht wird.

Da die mit Abstand am höchsten ausgebildete Zugkraft mit dem Substrat 1.2343 bei 400°C Vorwärmung erhalten wurde (siehe Abbildung 34), werden zur Absicherung der Ergebnisse drei weitere Proben der Kombination 1.2343 und Ni25 bei 400°C mit angepassten Schweißparametern hinsichtlich Vorschubgeschwindigkeit, Fokuslage und Spurüberlappungsfaktor geschweißt, um 36 weitere Versuchsdatensätze mit 1.2343 zur Verfügung zu haben.

In Abbildung 37 sind relevante Haupteffekte für das Verhalten von Zugkraft und Härte für alle 84 Schweißversuche (60 bei 400°C und 24 bei 250°C) auf 1.2343 dargestellt.

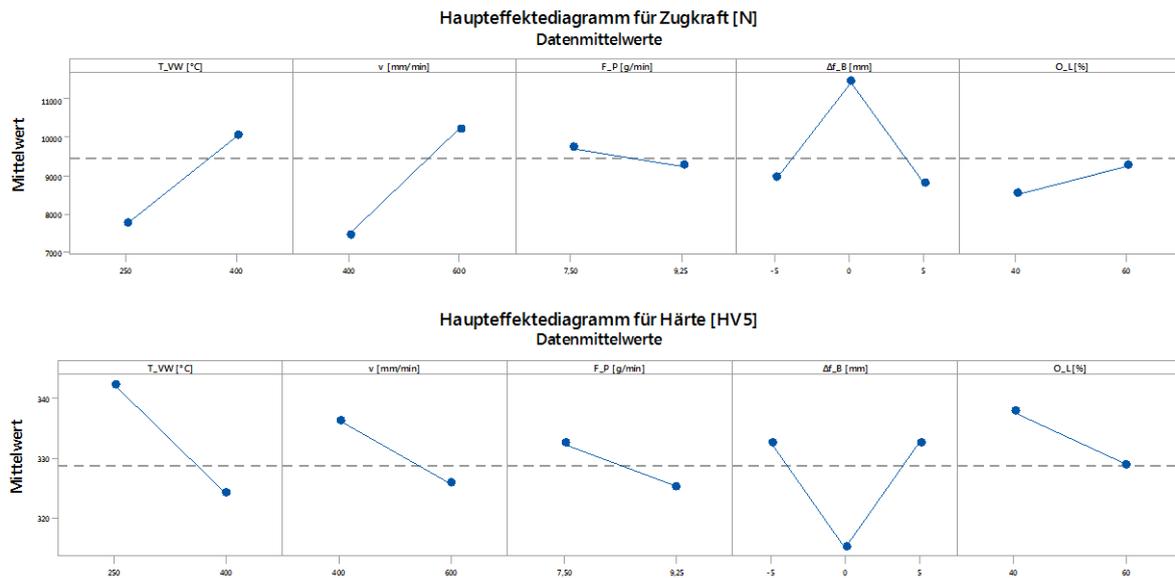


Abbildung 37: Haupteffektdiagramm für 1.2343 aus 84 Versuchen.

Es zeigt sich, dass die Vorwärmtemperatur und die Vorschubgeschwindigkeit den größten Einfluss auf Zugkraft und Härte haben. Des Weiteren fällt auf, dass $\Delta f_B = 0\text{mm}$ großen Effekt bewirkt. Da die Zugkraft über alle Versuche gesehen bei 400°C die besten Werte aufweist, wird für die 60 Proben, die bei 400°C Vorwärmung geschweißt wurden, ein Streudiagramm erstellt (siehe Abbildung 38).

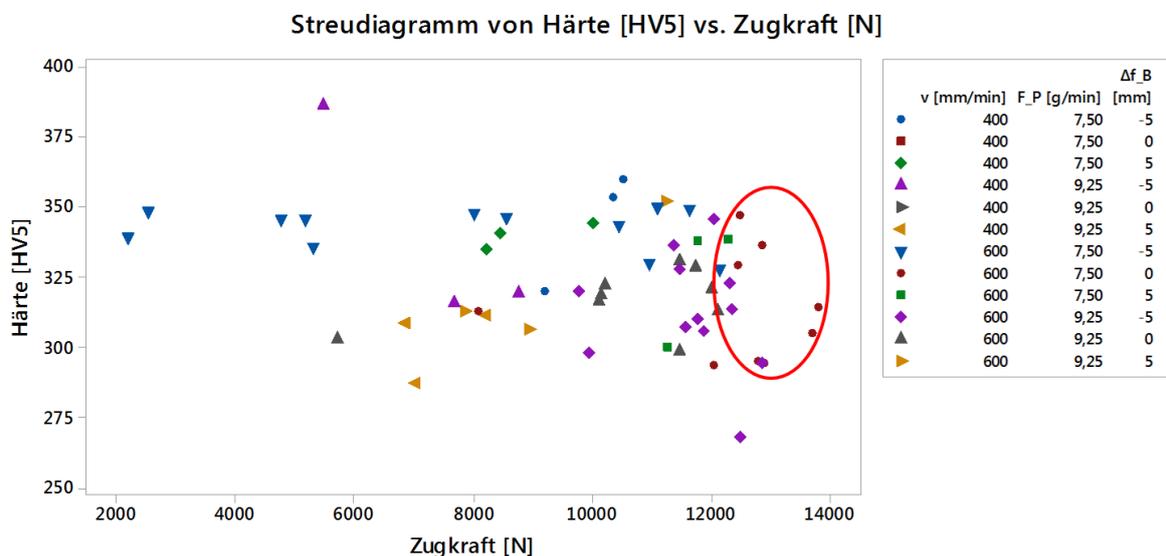
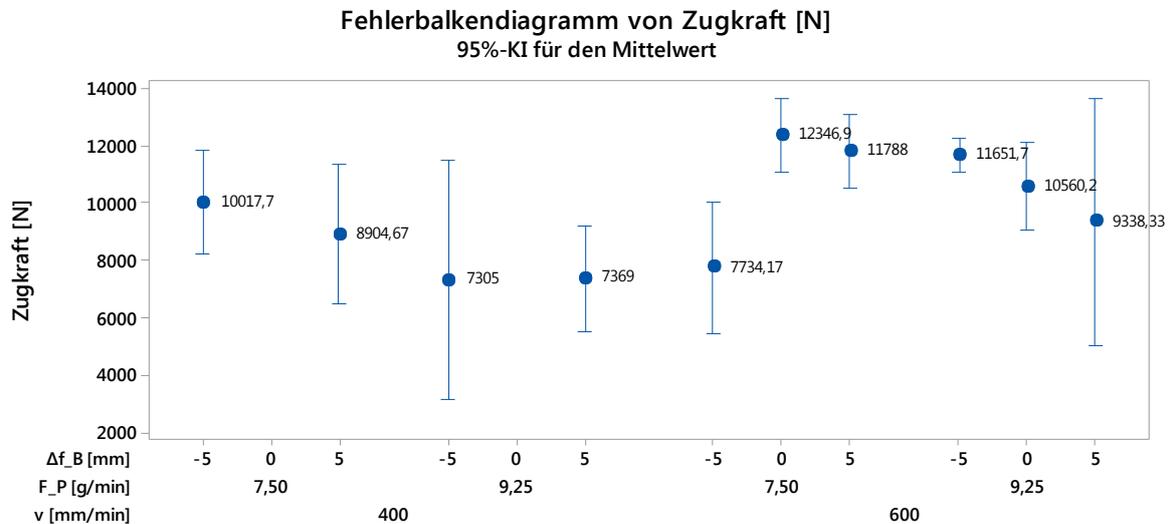


Abbildung 38: Streudiagramm für 60 Versuche 1.2343 bei 400°C Vorwärmung

Die besten Zugkräfte werden bei den Parameterkombinationen $v = 600 \frac{\text{mm}}{\text{min}} / F_P = 7,5 \frac{\text{g}}{\text{min}} / \Delta f_B = 0\text{mm}$ (rote Punkte) und $v = 600 \frac{\text{mm}}{\text{min}} / F_P = 9,25 \frac{\text{g}}{\text{min}} / \Delta f_B = -5\text{mm}$ (lila, auf den Kopf gestellte Quadrate) erzielt. Die gemittelte Härte der meisten Versuche liegt im Intervall [290HV5; 350HV5], es gibt je einen Ausreißer nach oben und nach unten.

Zugkräfte sämtlicher Kombinationen der Parametersätze aus Δf_B , F_P und v des Substrates 1.2343 bei 400°C Vorwärmung sind für die Zugkraft im Fehlerbalkendiagramm in Abbildung 39 veranschaulicht.



Zum Berechnen der Intervalle wurden die individuellen Standardabweichungen verwendet.

Abbildung 39: Fehlerbalkendiagramm für 60 Versuche 1.2343 bei 400°C Vorwärmung

Aus dem Fehlerbalkendiagramm für Beschichtungen von Ni25 auf dem bei 400°C vorgewärmten Substratwerkstoff 1.2343 ist abzulesen, dass bei höherer Vorschubgeschwindigkeit höhere Zugkräfte bei geringer Streuung um den Mittelwert erzielbar sind (ausgenommen ist die Kombination $v = 600 \frac{mm}{min} / F_P = 9,25 \frac{g}{min} / \Delta f_B = 5mm$).

Resümee Ni25:

Unabhängig von den eingestellten Schweißparametern, weisen mit Ni25 hergestellte Beschichtungen keine sichtbaren oberflächlichen Risse nach dem LMD-Prozess auf und sind gut zerspanbar. Diese Eigenschaft ist wichtig, da Wolframkarbidschichten nur auf geebnete Nickelbasisbeschichtungen aufgebracht werden können. Die erzielbare Härte ist im Vergleich zu Ni40, Ni50 oder NiBSi niedrig, im Gegensatz dazu ist aber die erzielte Zugkraft am besten.

Das eigentliche Ziel der zerstörenden Haftfestigkeitsprüfung ist es, einen Parametersatz zu finden, der gute Anbindung der Beschichtung am Substrat gewährleistet. Je höher die Zugkraft im Übergangsbereich Ni25/Substrat ist, desto besser ist die Anbindung. Vorwärmung des Substrates 1.2343 auf 400°C und hohe Vorschubgeschwindigkeiten führen zum besten Ergebnis, daher wird dieser Pfad der Kombination 1.2343+Ni25+400°C Vorwärmung weiter verfolgt.

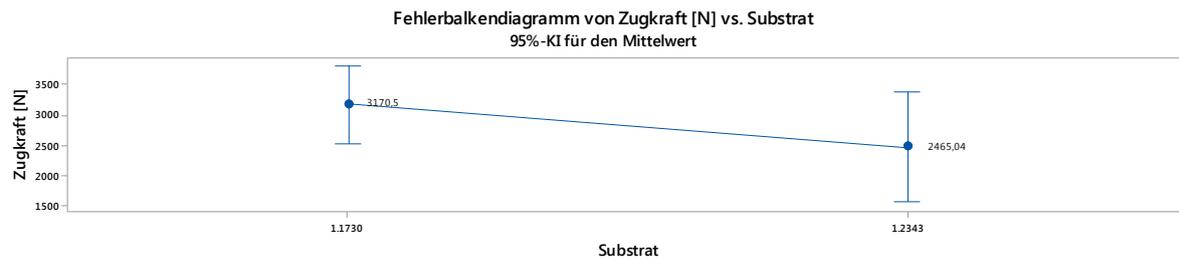
7.1.2. Ni40

Mit dem Pulver Ni40 wurden in Summe neun 12Flächenproben geschweißt. Es wurde sieben Mal das Substrat 1.1730 und zweimal das Substrat 1.2343 verwendet. Bei den auf 1.1730 geschweißten Proben wurde die Vorwärmtemperatur variiert, mehrere Lagen Ni40 wurden bei Umgebungstemperatur, 250°C und 400°C aufgetragen. Die getesteten Schweißparametersätze wurden je drei Mal wiederholt. Auf das Substrat 1.2343 wurde Ni40 bei 400°C einlagig aufgeschweißt. Ni40 hat lt. Hersteller eine Härte von 42HRC.

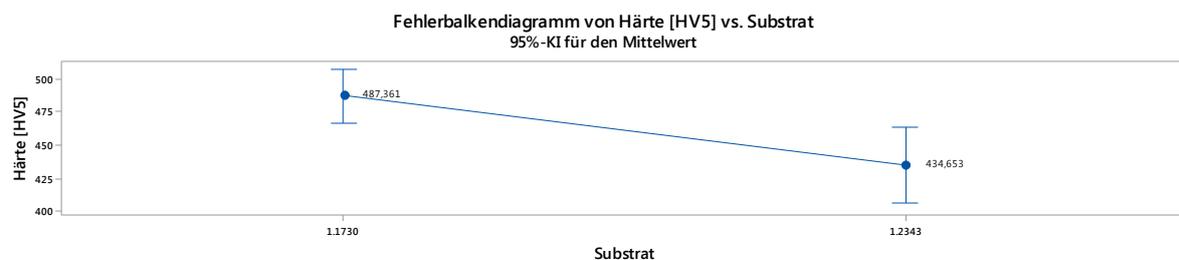
Zur Auswertung können jedoch nur sechs der neun Proben herangezogen werden, da drei 12Flächenproben mit dem Substrat 1.1730 nicht zerspanend zu den Prüfkörpern bearbeitet werden

konnten (siehe Abbildung 28). Diese Tatsache zeigt, dass die Härte von Ni40 beachtlich größer ist, als die Härte von Ni25.

Aus den 48 Versuchen der Kombination Ni40 auf 1.1730 und den 24 Versuchen auf 1.2343 werden das Fehlerbalkendiagramm für die Zugkraft und die Härte erstellt (siehe Abbildung 40). Das 95%-Konfidenzintervall um den geschätzten Mittelwert von Zugkraft und Härte weist bei 1.1730 einen höheren Wertebereich auf. Dem muss entgegen gehalten werden, dass etliche derjenigen 12Flächenproben aus 1.1730, die die Gestalt der Prüfkörper erlangt haben, sichtbare Risse in der kreisförmigen Oberfläche aufweisen, und daher 1.1730 als Substratwerkstoff für Warmformwerkzeugen nicht in Frage kommt.



Zum Berechnen der Intervalle wurde die zusammengefasste Standardabweichung verwendet.



Zum Berechnen der Intervalle wurde die zusammengefasste Standardabweichung verwendet.

Abbildung 40: Fehlerbalkendiagramm der Härte und Zugkraft Ni40 auf 1.1730 und 1.2343

1.1730 und Ni40:

Die Auswertung für die vier 12Flächenproben mit dem Substratwerkstoff 1.1730 wird nicht durchgeführt, da von den möglichen 48 Flächen, die zur Analyse bereit stehen, zehn Flächen sichtbare Risse, Ausbröckelungen und zum Teil sogar Löcher in der Oberfläche aufweisen. Da 20,8% der zur Auswertung verfügend stehenden Flächen beschädigt sind, können die Härtemessung und die durchgeführten Haftfestigkeitsversuche keine richtigen Resultate bringen und würden die Ergebnisse der Auswertungen verfälschen. Aus diesem Grund wird die Werkstoffkombination 1.1730/Ni40 nicht weiter verfolgt.

1.2343 und Ni40:

Ni40 wurde am Substrat 1.2343 bei 400°C Vorwärmung aufgetragen. Auf der Oberfläche der 24 entstandenen Flächen sind keine Risse ersichtlich, auch die Herstellung der Prüfkörper ist problemlos möglich. Da auch die runden Flächen der Prüfkörper keine Beschädigungen aufweisen, wird eine Auswertung vorgenommen. Um die Effekte, die Härte und Zugkraft am meisten beeinflussen, abzubilden, wird für die 24 Versuche ein Paretdiagramm angefertigt.

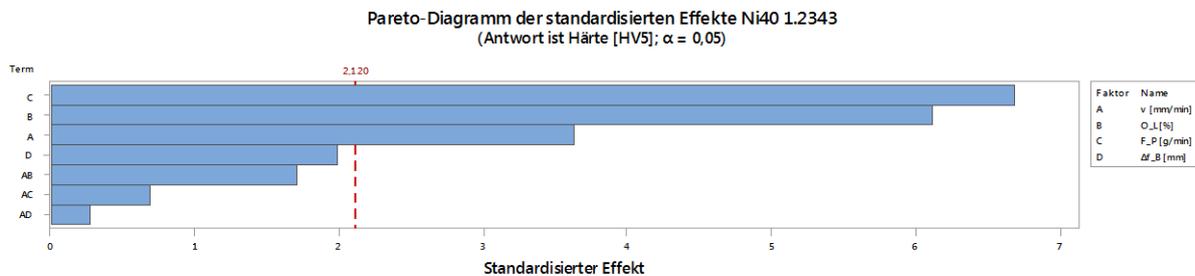
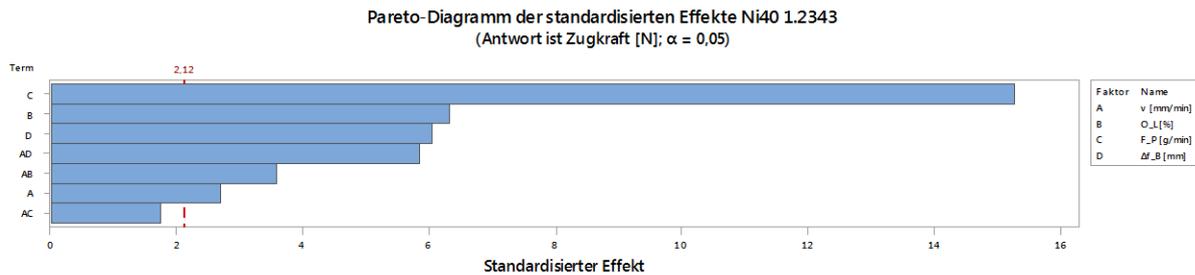


Abbildung 41: Paretodiagramm Zugkraft und Härte für 1.2343 und Ni40

Aus Abbildung 41 ist ersichtlich, dass Zugkraft und Härte hauptsächlich von der Pulverförderrate und dem Spurüberlappungsfaktor beeinflusst werden, daher wird die nähere Betrachtung mithilfe von Fehlerbalkendiagrammen vorgenommen (Abbildung 42).

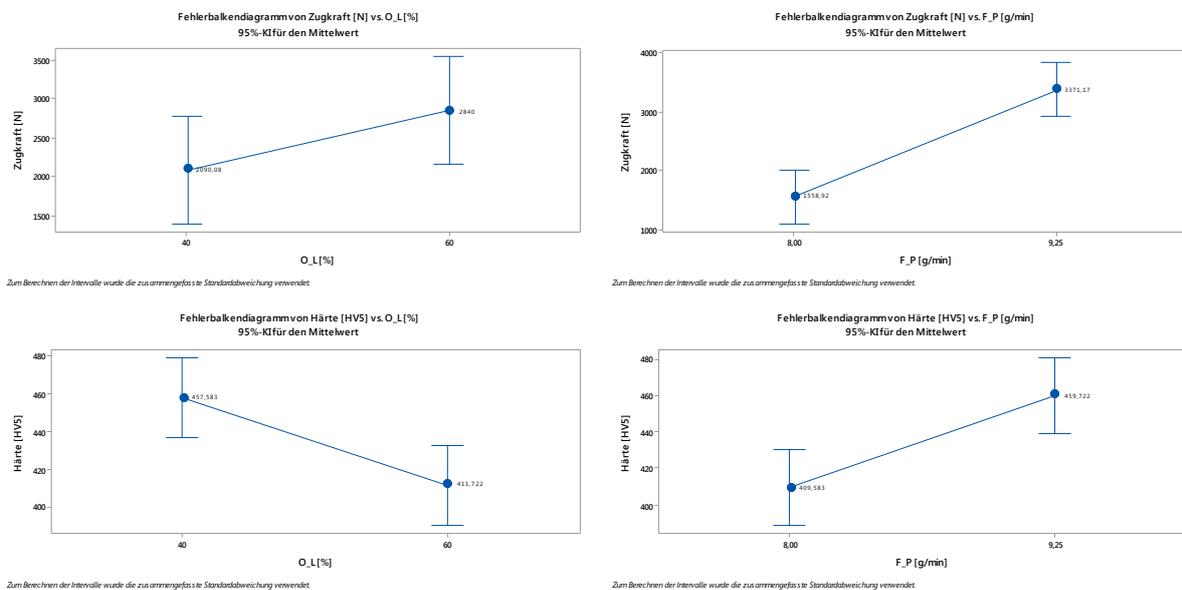


Abbildung 42: Fehlerbalkendiagramme für den Einfluss der Effekte Spurüberlappungsfaktor und Pulverförderrate auf Härte und Zugkraft bei 1.2343 und Ni40

Eine Erhöhung der Pulverförderrate bewirkt mehr Pulverauftrag und führt zu einem Anstieg von Härte und Zugkraft. Die Vergrößerung des Spurüberlappungsfaktors von 40 auf 60% bewirkt neben einem Anstieg der Zugkraft einen Abfall der Härte. Aus N=24 Versuchen der Kombination 1.2343 und Ni40 wurden zur allgemeinen Einschätzung des Verlaufs von Härte und Zugkraft Boxplots erstellt.

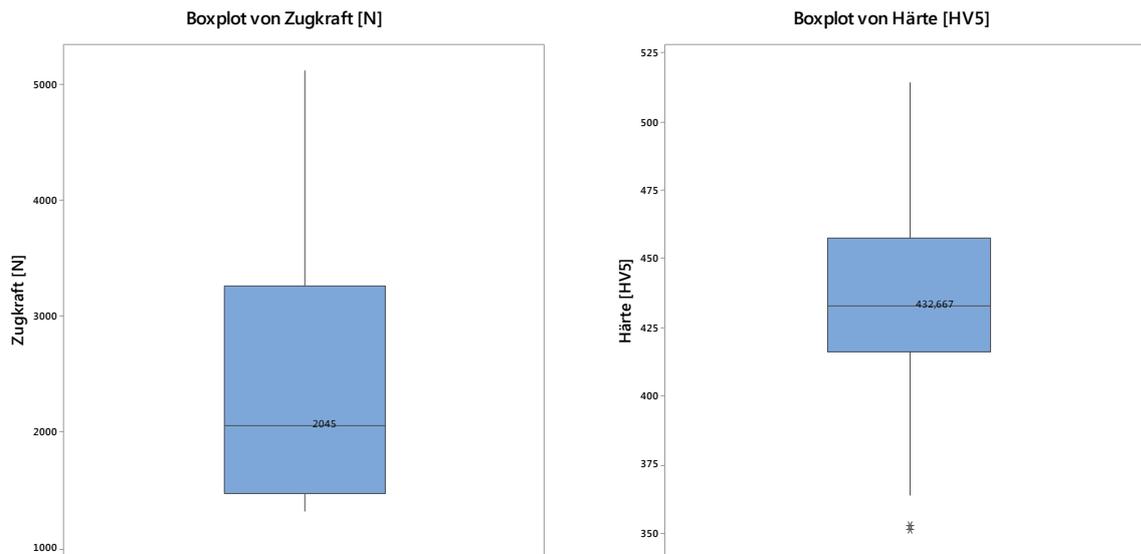


Abbildung 43: Boxplot für Zugkraft und Härte von 1.2343 und Ni40

Der Median der Zugkraft stellt sich bei 2045N ein, 75% aller Werte für die Zugkraft sind kleiner als 3262N. Im Vergleich zur Kombination 1.2343 und Ni25 ist die Zugkraft bei 1.2343 und Ni40 um ein Vielfaches, nämlich 70%, kleiner. Vor dem untersten Quartil der Härte sind zwei Ausreißer aus 24 Proben vermerkt.

Resümee Ni40:

Die Tatsache, dass von den ursprünglich neun zur Haftfestigkeitsprüfung vorgesehenen 12Flächenproben nur sechs zur Auswertung herangezogen werden konnten, spricht für sich. Drei Proben aus 1.1730 wurden bei der zerspanenden Bearbeitung völlig zerstört. Nach der Analyse der sechs für die Auswertungen zur Verfügung stehenden Proben werden sämtliche Kombinationen aus 1.1730 und Ni40 verworfen, da die Oberflächen dieser 12Flächenproben Risse und Ausbröckelungen aufweisen. Übrig bleiben nur zwei Proben der Kombination 1.2343 und Ni40, wobei im Vergleich zu den mit Ni25 geschweißten Proben die bei Ni40 erhaltenen Zugkräfte deutlich schlechter sind. Ni40 wird nicht als Nickelbasismatrix am Realwerkzeug dienen, da aufgrund der großen Härte die Anbindung ans Substrat nicht ideal gegeben ist, Ni40 ist demnach ein hartes und sprödes Material. Für Forschungszwecke werden Wolframkarbidschichten in Ni40-Matrizen dennoch lichtmikroskopisch untersucht werden, hier wird lediglich ein Parametersatz weiter verfolgt.

7.1.3. Ni50

Das Pulver Ni50 weist lt. Hersteller nt Systemlösungen eine Härte von $52HRC \approx 549HV$ auf. Es wurde aus den Erfahrungen der zuvor geschweißten Proben mit dem PulverNi40 erwartet, dass eine mit Ni50 beschichtete Oberfläche aufgrund der hohen Härte Risse aufweisen wird. Für erste Versuche mit Ni50 wurde der Kaltarbeitsstahl 1.1730 verwendet. Mit dieser Kombination wurden drei 12Flächenproben geschweißt. Bei den einzelnen Parametersätzen wurde die Vorwärmtemperatur T_{vW} , die Schweißgeschwindigkeit v und der Spurüberlappungsgrad O_L , sowie die Fokusverschiebung Δf_B variiert. Die Laserleistung P_L betrug bei sämtlichen Versuchen 3200W, die Laserfrequenz f_L wurde ebenso nicht verändert und auf konstante 5000 Hz eingestellt.

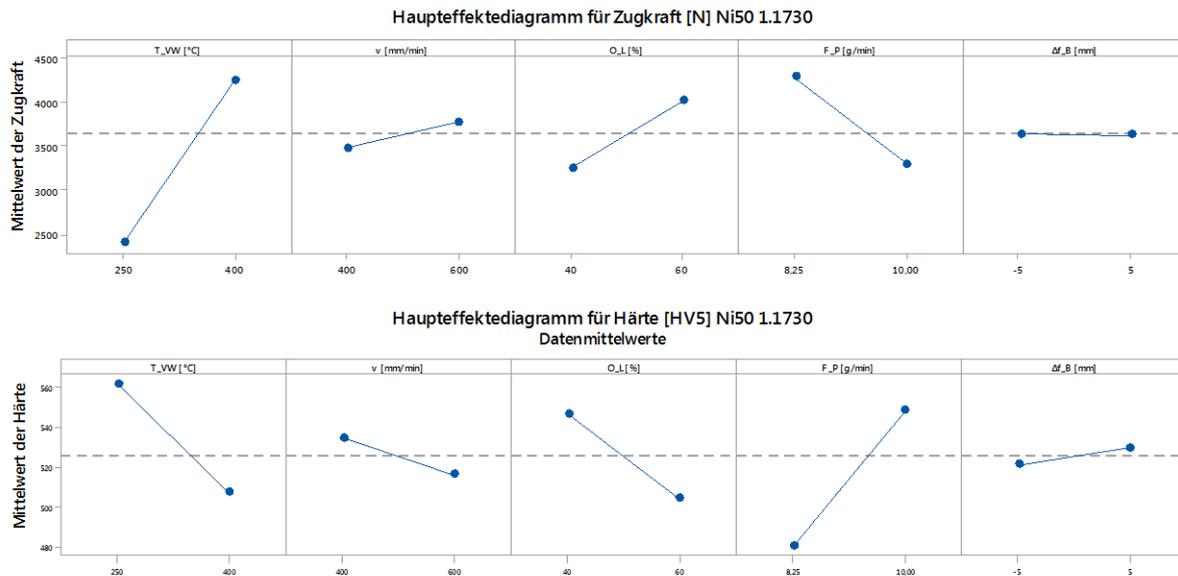


Abbildung 44: Haupteffektdiagramm Zugkraft und Härte für 1.1730 und Ni50

In Abbildung 44 sind die Haupteffektdiagramme für die Härte und die Zugkraft bei Ni50 von 36 Versuchen zu sehen. Im direkten Vergleich fällt auf, dass die Fokusverschiebung und die Vorschubgeschwindigkeit kaum die zu erzielenden Eigenschaften beeinflussen. Die Vorwärmtemperatur, Pulverförderrate und Spurüberdeckung beeinflussen die erzielbare Härte und die Zugkraft wesentlich, aber gegensätzlich. Der Mittelwert der Härte liegt bei 525HV5, der der Zugkraft liegt bei 3636N.

Mit Hilfe von Pareto-Diagrammen, die auf einem faktoriellen Versuchsplan basieren, werden die Effekte, die Härte und Zugkraft am meisten beeinflussen, herausgearbeitet (siehe Abbildung 45). Es ergibt sich, dass die Zugkraft in erster Linie von der Vorwärmtemperatur, dem Spurüberlappungsfaktor und diesen beiden Effekten in Kombination beeinflusst wird. Die Härte wird von der Pulverförderrate, dieser in Kombination mit der Vorschubgeschwindigkeit und dem Spurüberlappungsfaktor hauptsächlich beeinflusst. Als Resümee kann festgehalten werden, dass die Vorwärmtemperatur beide Größen, Zugkraft und Härte der Beschichtung, beeinflusst.

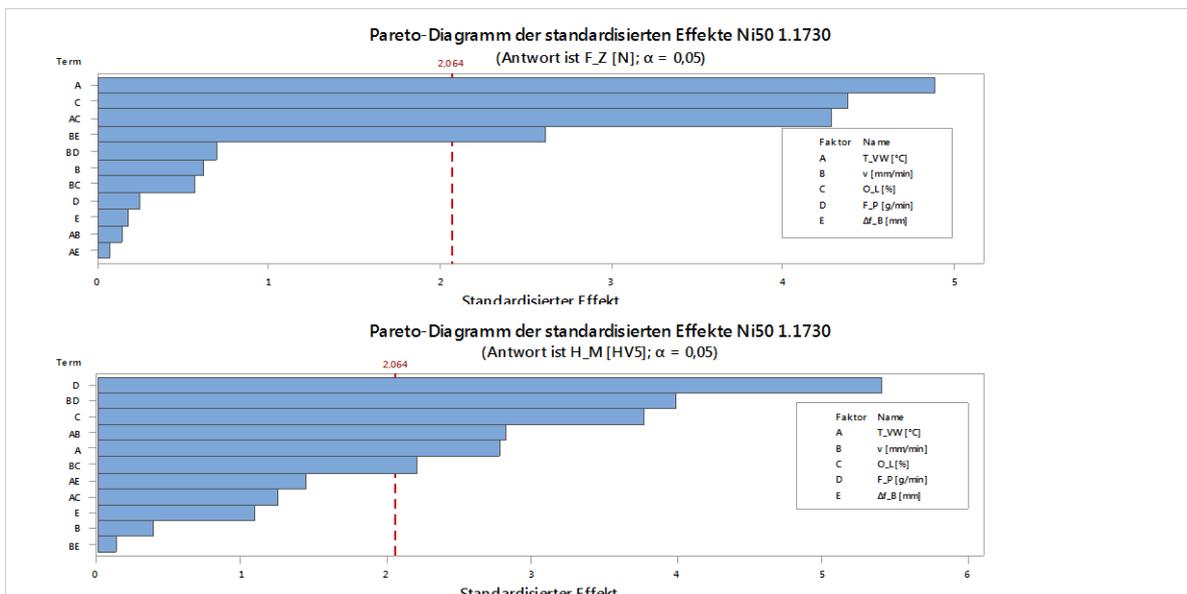
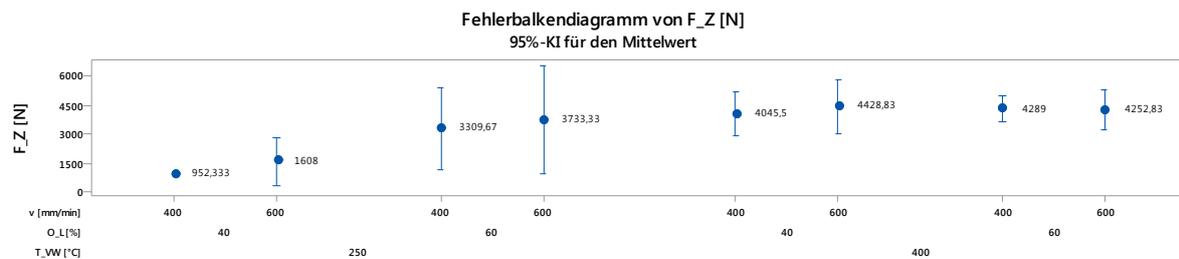
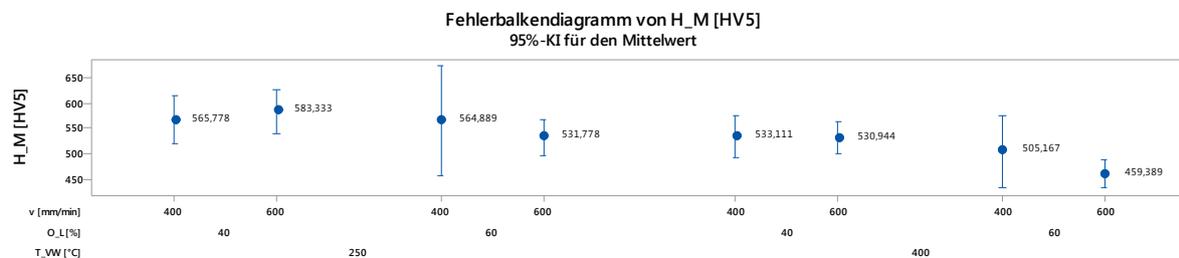


Abbildung 45: Paretodiagramm Zugkraft und Härte für 1.1730 und Ni50 aus 36 Versuchen

Die Bearbeitung zu den Probenkörpern war nicht einfach, nicht immer konnten die Probenkörper wie geplant gefertigt werden, des Weiteren war der Werkzeugverschleiß bei der Herstellung der Probenkörper aufgrund der Härte der Beschichtung beachtlich. Zum Teil waren in den Oberflächen der Zugkörper ausgeprägte Risse zu sehen. Die Zugkraft als Resultat der Haftfestigkeitsprüfung ist nicht allein für die Bewertung der Qualität der Anbindung heranzuziehen. Vielmehr muss auch die Bruchfläche und der Ort des Bruches betrachtet werden. Zum Teil wurde der Riss nicht in der Anbindungszone zwischen Substrat und Beschichtung erwirkt, sondern nur im Substrat bzw. nur im Beschichtungswerkstoff.



Zum Berechnen der Intervalle wurden die individuellen Standardabweichungen verwendet.



Zum Berechnen der Intervalle wurden die individuellen Standardabweichungen verwendet.

Abbildung 46: Fehlerbalkendiagramm Zugkraft und Härte für 1.1730 und Ni50 aus 36 Versuchen

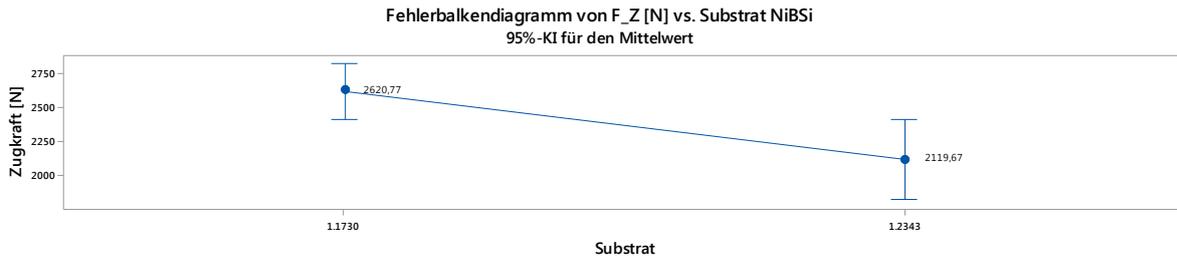
Um darzustellen, in welchem Bereich sich die mit Ni50 erzielbaren Zugkräfte und arithmetischen Mittelwerte der Härte einstellen, wird ein Fehlerbalkendiagramm erstellt (Abbildung 46).

Resümee Ni50:

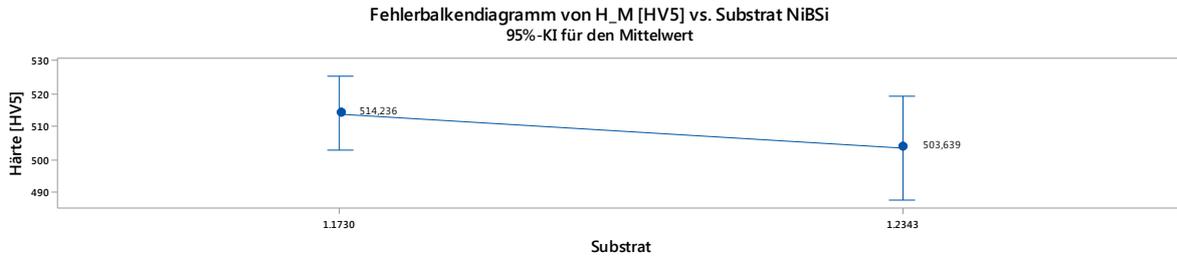
Die Befürchtung aus der Auswertung der Beschichtung mit Ni40, dass sich in den beschichteten Flächen aus Ni50 aufgrund der gesteigerten Härte im Vergleich zu Ni40 Risse ausbilden werden, hat sich bewahrheitet. Aus diesem Grund wurde die Versuchsreihe mit Ni50 aufgrund der schlechten Anbindung ans Substrat, Rissanfälligkeit und Sprödigkeit nicht weiter fortgeführt. Ni50 ist nicht die ideale Nickelbasislegierung zur Einbettung von Wolframkarbiden, das Pulver wird von der weiteren Versuchsreihe (Kapitel 7.5, S. 74) ausgeschlossen.

7.1.4. NiBSi

In Summe wurden sechs Substrate mit NiBSi beschichtet, viermal wurde 1.1730 verwendet, zwei Mal wurde auf 1.2343 zurückgegriffen, es stehen 24 Parametersätze mit je drei Wiederholungen zur Auswertung zur Verfügung. Zwei Proben des Substrats 1.1730 wurden mit 250°C Vorwärmung und zwei mit 400°C Vorwärmung geschweißt. Die Flächen, die mit nur 250°C Vorwärmtemperatur auf 1.1730 aufgetragen wurden, wiesen nach dem Schweißen Risse auf, daher wurde 1.2343 gleich mit 400°C vorgewärmt. In einer ersten Auswertung werden das 95%-Konfidenzintervall für die Härte und die Zugkraft für beide verwendeten Substrate in einem Fehlerbalkendiagramm betrachtet (siehe Abbildung 47).



Zum Berechnen der Intervalle wurde die zusammengefasste Standardabweichung verwendet.



Zum Berechnen der Intervalle wurde die zusammengefasste Standardabweichung verwendet.

Abbildung 47: Fehlerbalkendiagramm Zugkraft und Härte 1.1730 und 1.2343 NiBSi aus 72 Versuchen

Aus den 48 Versuchen mit 1.1730 ergibt sich für die Zugkraft ein Intervall im Bereich von [2409N; 2831N], der Schätzwert für den Mittelwert der Zugkraft liegt bei 2620N. Die Härte stellt sich im Intervall von [503HV5; 525HV5] ein, der Schätzwert des Mittelwertes im 95%-Konfidenzintervall liegt bei 514HV5.

24 Versuche der Kombination NiBSi mit 1.2343 stehen für eine erste Auswertung zur Verfügung. Dabei wird analog zu 1.1730 ein 95%-Konfidenzintervall um den geschätzten Mittelwert gebildet. Für die Härte ergibt sich damit ein Intervall [487HV5; 519HV5] mit dem Mittelwert von 503HV5, die Zugkraft stellt sich bei 2119N mit im Intervall [1821N; 2417N] ein.

Aus den Fehlerbalkendiagrammen der ersten 72 Versuche mit der Nickelbasislegierung NiBSi auf zwei verschiedenen Substraten wird zusammengefasst, dass weder Härte noch Zugkraft extremen Schwankungen unterliegen. Die Härte stellt sich bei beiden Substraten bei etwa 510HV5 ein, das entspricht auch dem angegebenen Härtewert (50HRC) des Herstellers des Metallpulvers, d.h. der Laserauftragschweißprozess wirkt sich nicht wesentlich auf die Härte von NiBSi aus. Auffallend ist, dass das 95%-Konfidenzintervall um den geschätzten Mittelwert bei beiden zu untersuchenden Qualitätsmerkmalen, Härte und Zugkraft, bei 1.1730 höher liegt als bei 1.2343. Dem ist entgegenzuhalten, dass die Beschichtungen auf 1.1730 eher zur Rissbildung neigen als auf 1.2343.

Um weitere Auswertungen vornehmen zu können, werden im Folgenden die für das Schweißen der 12Flächenproben mit NiBSi verwendeten Substrate 1.1730 und 1.2343 getrennt voneinander untersucht.

1.1730:

Im Pareto Diagramm (siehe Abbildung 48) ist der Einfluss der Faktoren Vorwärmtemperatur, Vorschubgeschwindigkeit, Spurüberlappungsfaktor, Pulverfördertrate und Fokusverschiebung auf die Härte und die Zugkraft von NiBSi auf 1.1730 von 48 Versuchen abgebildet.

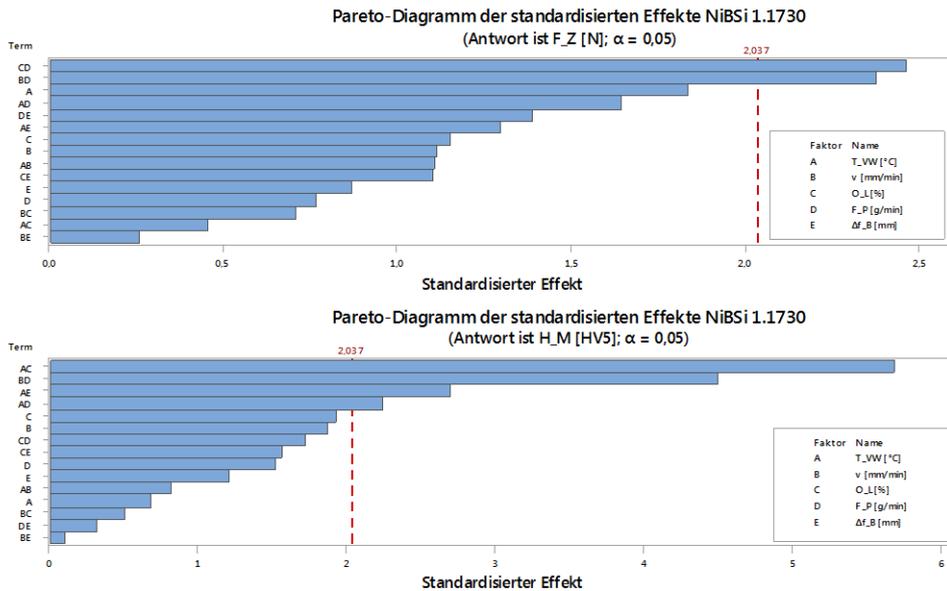


Abbildung 48: Paretodiagramm Zugkraft und Härte für 1.1730 und NiBSi (Nur 1.1730 und NiBSi)

Als wesentliche Aussage wird abgeleitet, dass die Vorwärmtemperatur in Kombination mit dem Spurüberlappungsfaktor die Härte extrem beeinflusst. Die Zugkraft wird von Pulverfördererrate und Spurüberlappung am meisten beeinflusst. In diesem Diagramm kristallisiert sich deutlich heraus, dass zumeist zwei Faktoren gemeinsam als Effekt auf Härte und Zugfestigkeit wirken, dabei nimmt die Spurüberlappung großen Anteil an. Die Auswirkungen mehrerer Effekte werden in einem Fehlerbalkendiagramm verglichen (siehe Abbildung 49).

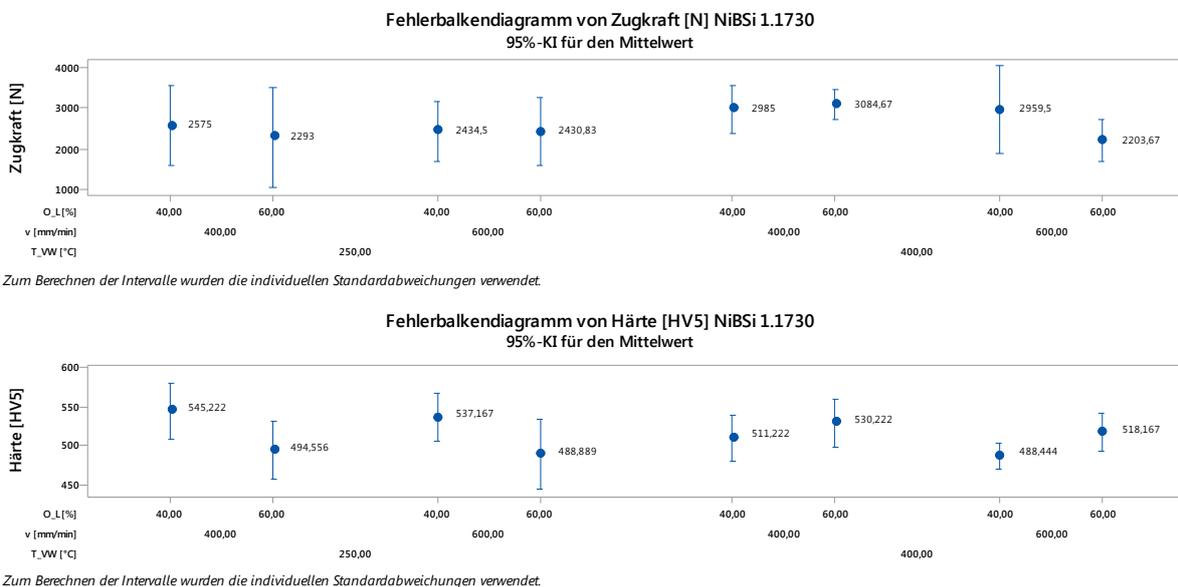


Abbildung 49: Fehlerbalkendiagramm Zugkraft und Härte 1.1730 NiBSi

In diesen Fehlerbalkendiagrammen wird das Verhalten der Härte und der Zugkraft von 48 Versuchen über die Faktoren Vorwärmtemperatur, Vorschubgeschwindigkeit und Spurüberlappungsfaktor dargestellt. Die Zugkraft ist bei 400°C Vorwärmtemperatur höher als bei 250°C, die erzielte Härte ist tendenziell bei 250°C Vorwärmung und geringer Spurüberlappung am größten. Zusammenfassend kann angemerkt werden, dass die Härte um den von nt Systemlösungen für das Metallpulver angegebenen Wert von 50HRC streut, bei niedrigen Vorwärmtemperaturen höher ist und mit der

Zunahme der Vorwärmtemperatur abnimmt, wohingegen die Zugkraft mit Erhöhung der Vorwärmtemperatur abnimmt.

1.2343:

Da das zu beschichtende Werkzeug im Bereich der Warmumformung eingesetzt wird, werden acht Parametersätze mit je drei Wiederholungen am Warmarbeitsstahl 1.2343 mit NiBSi aufgeschweißt.

Um darzustellen, welche der für das Schweißen verwendeten Faktoren einen Einfluss auf die Härte bzw. die Zugkraft haben, werden Paretdiagramme betrachtet (siehe Abbildung 50).

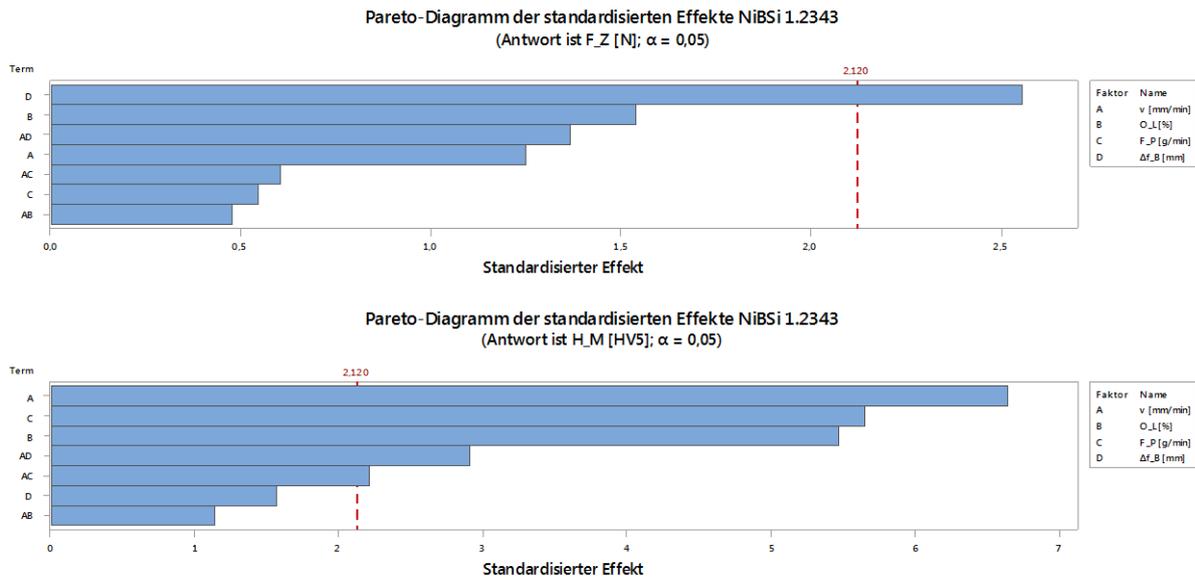
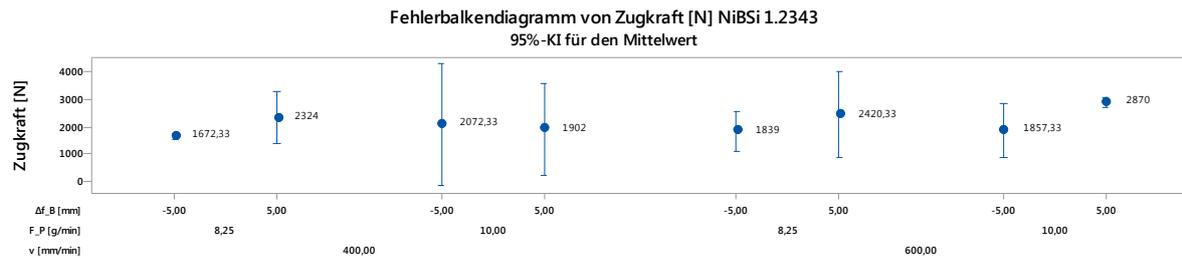
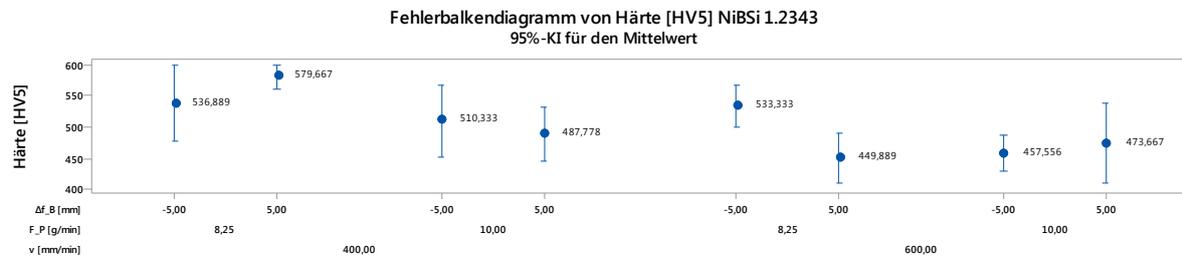


Abbildung 50: Paretdiagramm Zugkraft und Härte für 1.2343 und NiBSi 24 Versuche

Das Paretdiagramm zeigt, dass die Lage des Laserfokus einen wesentlichen Einfluss auf die Zugkraft hat. Für die Ausbildung der Härte sind alle standardisierten Effekte von Bedeutung. Die Zugkraft und die Härte werden bei gemeinsamer Betrachtung v.a. von der Fokusslage (Zugkraft) und der Vorschubgeschwindigkeit, sowie der Pulverförderrate (Härte) beeinflusst, daher werden diese Effekte für die Zugkraft und die Härte in einem Fehlerbalkendiagramm gegenübergestellt.



Zum Berechnen der Intervalle wurden die individuellen Standardabweichungen verwendet.



Zum Berechnen der Intervalle wurden die individuellen Standardabweichungen verwendet.

Abbildung 51: Fehlerbalkendiagramm Zugkraft und Härte 1.2343 NiBSi 24 Versuche

In Abbildung 51 ist ersichtlich, dass der Parametersatz, der zur höchsten Zugkraft führt, nicht zum höchsten Wert für die Härte führt und umgekehrt. Die Härtewerte für NiBSi liegen im Intervall von etwa [400HV5; 600HV5], die Streuung um die geschätzten Mittelwerte des 95%-Konfidenzintervall ist zumeist klein. Anders verhält sich die Zugkraft, hier weisen nur zwei Parametersätze eine geringe Streuung um den Mittelwert auf, die anderen Parametersätze streuen im Intervall mehrerer tausend Newton.

Resümee NiBSi:

Obwohl die Beschichtung am Substrat 1.1730 tendenziell höhere Werte für die Zugkraft und die Härte als die Beschichtung mit 1.2343 bewirkt, wird 1.1730 für weitere Versuche mit NiBSi nicht mehr in Betracht gezogen. 1.1730 wird in für Vorversuche verwendet, dieser Werkstoff ist für den Einsatz in Warmformwerkzeugen nicht geeignet. Die mit NiBSi beschichteten Proben aus 1.2343 weisen im Vergleich zu Ni25 sehr geringe Anbindungsfähigkeit auf. Die Härte ist groß, die Zugkraft verhältnismäßig niedrig.

7.1.5. RESÜMEE DER ANALYSE SÄMTLICHER DURCHGEFÜHRTER HAFTFESTIGKEITSVERSUCHE

In Abbildung 52 sind die Bruchflächen einiger Proben nach den Haftfestigkeitsversuchen dargestellt. Bei der Kombination Ni25 auf 1.2343 und bei NiBSi auf 1.1730 tritt der Bruch genau in der Übergangszone Substrat/Beschichtung ein, wie er sollte (grüne Rechtecke). In roten Rechtecken sind einige Brüche dargestellt, die nicht, wie zur Gewährleistung guter Anbindung der Beschichtung an das Substrat erforderlich, in der Übergangszone eintreten.

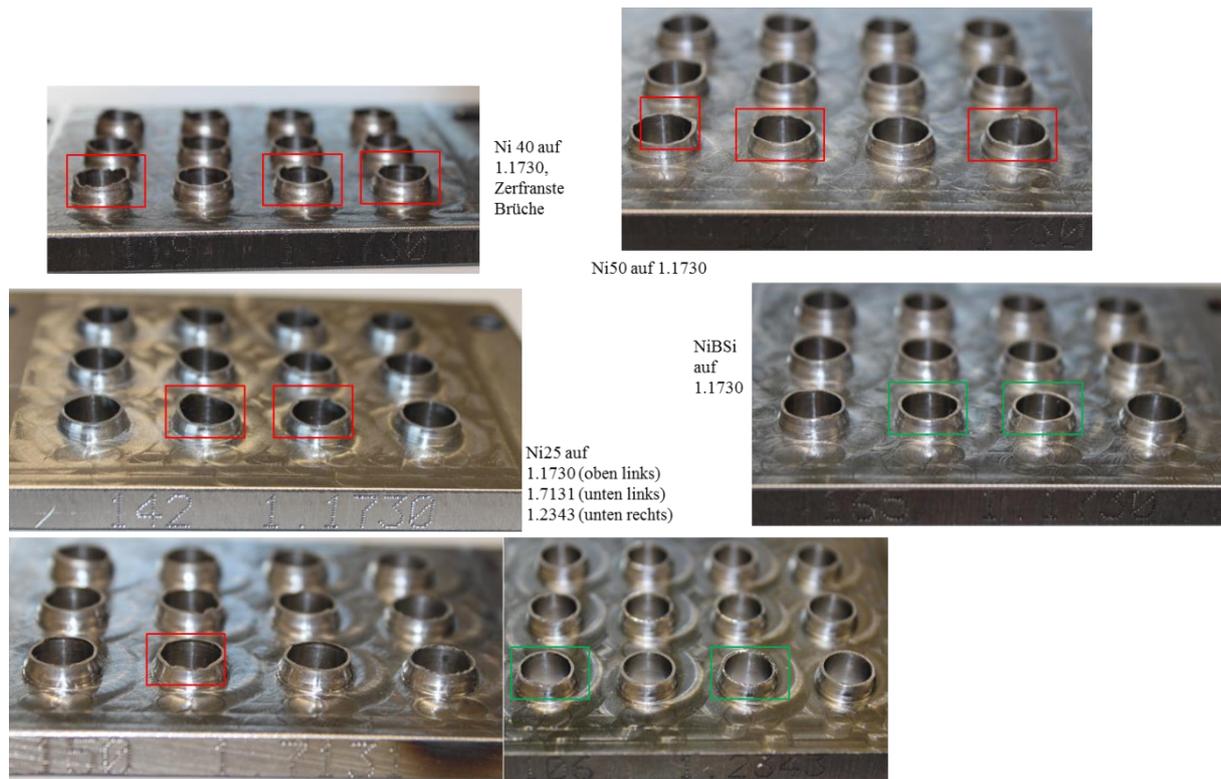
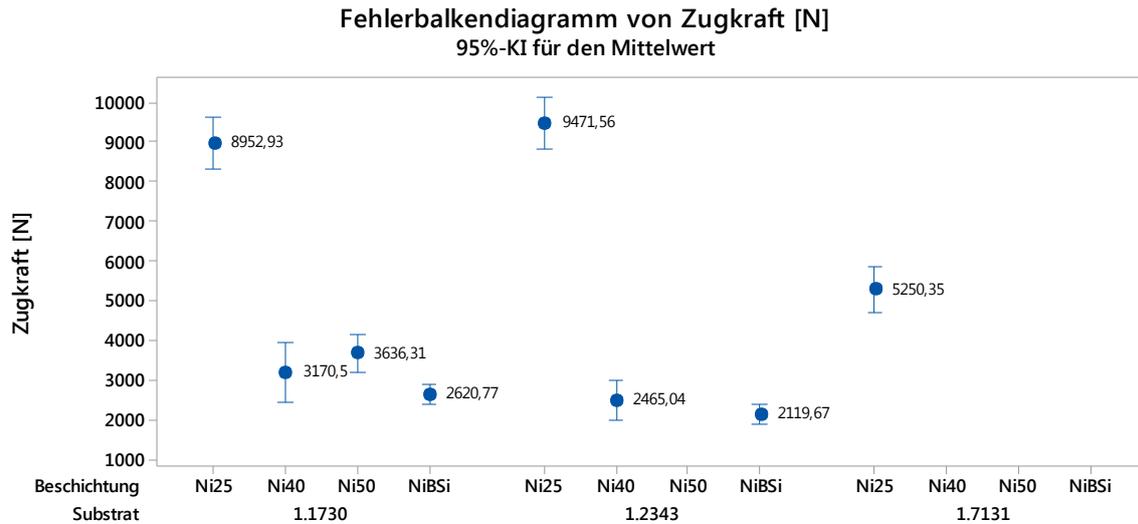


Abbildung 52: Zerstörte 12Flächenproben nach der Haftfestigkeitsprüfung

Die 12Flächenproben dienen in erster Linie dazu, die Haftfestigkeit der Beschichtung am Substrat zu ermitteln. Schon nach den obligatorischen Sichtkontrollen nach dem Aufschweißen der Flächen war klar, dass NiBSi und Ni50 aufgrund der Rissbildung für weitere Betrachtungen im Rahmen der Arbeit zur Ermittlung einer idealen Nickelbasismatrix nicht in Frage kommen werden. Einige Proben aus Ni40 konnten aufgrund von Rissen nicht zu den für die Haftfestigkeit notwendigen Prüfkörpern zerspannt werden. Im Vergleich der erzielten Zugkräfte stellt sich eindeutig heraus, dass Zugkräfte bei Beschichtungen aus Ni25 mit Abstand am besten sind (siehe Abbildung 53). In diesem Fehlerbalkendiagramm ist die erhaltene Zugkraft aller durchgeführten Haftfestigkeitsversuche dargestellt.



Zum Berechnen der Intervalle wurden die individuellen Standardabweichungen verwendet.

Abbildung 53: Fehlerbalkendiagramm der Zugkraft über alle ausgewerteten 372 Zugversuche

Generell wird der Blick bezüglich der Auswahl des Substrates auf den für Warmumformung geeigneten Werkstoff 1.2343 gelegt. Die Versuche mit dem Substrat 1.1730 und 1.7131 werden als Vorversuche durchgeführt. Die Tendenz, dass die Kombination 1.2343 und Ni25 geeignet ist, wird im Fehlerbalkendiagramm bestätigt.

7.2. ZYLINDERPROBEN – SCHERFESTIGKEITSVERSUCHE

Aus den ausgewerteten Zugversuchen ergibt sich, dass die Wolframkarbidschicht auf Realwerkzeugen jedenfalls in einer Ni25 – Matrix am auf 400°C vorgewärmten Warmarbeitsstahl 1.2343 eingebettet werden wird.

Um die Ergebnisse der Haftfestigkeitsversuche zu ergänzen und abzusichern, werden Scherfestigkeitsversuche durchgeführt. Die Probenkörper werden fest in die Prüfvorrichtung eingespannt, anschließend wird der Übergangsbereich zwischen Pulver- und Substratwerkstoff auf Scherung bis zum Bruch beansprucht.

In Summe wurden 27 Scherfestigkeitsversuche mit denselben Parametern der zuvor durchgeführten Haftfestigkeitsversuche durchgeführt, um direkte Vergleiche anstellen zu können, bzw. um die Ergebnisse der Scherfestigkeitsversuche mit denen der Haftfestigkeitsversuche vergleichen zu können.

Tabelle 9: Schweißparameter ausgewählter Proben 1.2343 und Ni25 für den Vergleich Haftfestigkeit – Scherfestigkeit

Probe	Feld	T _{VW} [°C]	Lagenanzahl	F _P [g/min]	v [mm/min]	Δf _B [mm]	O _L [%]	P _L [W]	f _L [Hz]
104	1	400	2	7,5	400	5	40	3200	5000
	2	400	3	7,5	600	-5	40		
	3	400	3	7,5	400	-5	60		
	4	400	4	7,5	600	5	60		
105	1	400	2	9,25	400	-5	40		
	2	400	3	9,25	600	5	40		
	3	400	3	9,25	400	5	60		
	4	400	4	9,25	600	-5	60		
99	3	250	3	9,25	400	-5	60		

Aus der Auswertung der Haftfestigkeitsversuche der Ni25-Versuche wurden der schlechteste und der beste Parametersatz in Bezug auf die Zugkraft ermittelt. Tendenziell weisen die Proben, bei denen die Vorschubgeschwindigkeit größer ist, eine bessere Zugkraft auf.

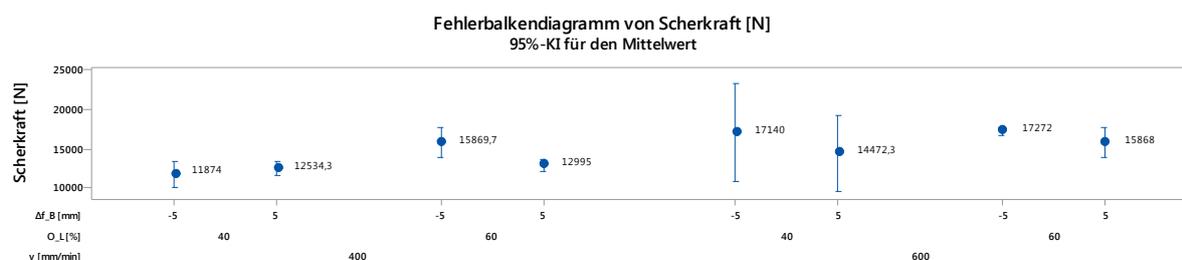
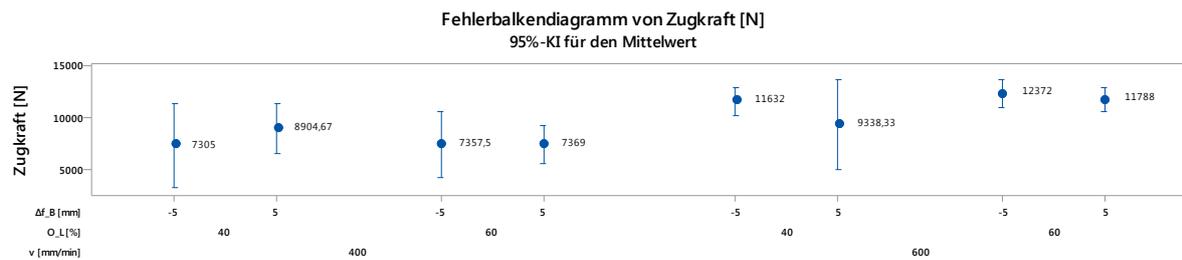


Abbildung 54: Fehlerbalkendiagramm Zugkraft und Scherkraft 1.2343, Ni25 aus 27 Versuchen

In Abbildung 54 wird das Verhalten von Zugkraft und Scherkraft derselben Parametersätze direkt verglichen. Bei Parametersätzen, bei denen die Zugkraft hoch war, war auch die Scherkraft hoch. Generell entspricht der Zahlenwert der Scherkraft einer Probe dem $1,2 \div 1,5$ –fachen der Zugkraft. Dieser Faktor wurde aus dem Mittelwert von 24 Proben ermittelt. Beachtet werden muss, dass sich die Querschnittsfläche bei Zug- und Scherversuch unterscheiden. Die Querschnittsfläche der Zugprobe ist kreisringförmig und $13,35\text{mm}^2$ groß, die Querschnittsfläche der Scherprobe ist kreisförmig und $28,27\text{mm}^2$ groß.

Ein Parametersatz, der besonders schlechte Zugkräfte aufgewiesen hat, wies jedoch umso bessere Scherkräfte auf, siehe Tabelle 10. Der Faktor zwischen Zug- und Scherkraft bei diesen Versuchen reist besonders aus.

Tabelle 10: Vergleich der Zugkraft und der Scherkraft Feld 3, Probe 99

Feld Nummer	Zugkraft [N]	Scherkraft [N]	Faktor
3_1	5574	13721	2,46
3_2	2967	16363	5,51
3_3	5551	13633	2,46

In Abbildung 55 sind die Bruchflächen von drei Proben eines verwendeten Schweißparametersatzes dargestellt.



Idealer Bruch in der Schweißverbindung

Kein reiner Bruch in der Schweißverbindungszone

Abbildung 55: Bruchflächen von Scherfestigkeitsproben

7.3. UNTERSUCHUNG DER SCHICHTAUFBAUTEN BESTEHEND AUS 1.7131/Ni25-Ni40-NiBSi/WOLFRAMKARBIDEN

Nach der Analyse der Ergebnisse der Haftfestigkeitsprüfungen wird auf 1.7131 eine Lage Ni25, Ni40 und NiBSi einflächig aufgetragen. Für diesen Beschichtungsvorgang wird immer dasselbe Programm verwendet, um für das Auftragen der Wolframkarbidsschichten auf den abgefrästen Nickelbasisbeschichtungen immer dieselben Ausgangsbedingungen zu schaffen.

1Flächenproben mit Ni50 werden für das Einbetten der Wolframkarbide nicht geschweißt, da die Haftfestigkeitsversuche gezeigt haben, dass die Anbindung am Substrat nicht gut gegeben ist. Die Härtemessungen ergaben, dass die Härte der Ni50 Beschichtung sehr groß ist, was die vor dem Auftragen der Wolframkarbidsschicht notwendige zerspanende Bearbeitung schwierig bis unmöglich macht. Zum Teil waren die Oberflächen der Prüfkörper von Rissen übersät, bzw. durch die Zerspanung kaputt.

Tabelle 11: Schweißparameter der Nickelbasispulver für das Schweißen der 1Flächenproben für das Auftragen der Wolframkarbide

Beschichtung	T_{VW} [°C]	F_p [g/min]	v [mm/min]	Δf_B [mm]	f_L [Hz]	P_L [W]
Ni25	250	9,25	400	0	5000	3200
Ni40	400					
NiBSi						

In Tabelle 11 sind die Schweißparameter, mit denen das jeweilige Nickelbasispulver einflächig auf 1.7131 aufgetragen wurde, vermerkt.

Vor dem Schweißen von Wolframkarbidflächen müssen mit Hilfe von Linienproben geeignete Schweißparameter gefunden werden. Dafür werden je 14 Linien mit verschiedenen Schweißparametersätzen von Wolframkarbiden auf geebnete und sandgestrahlte Flächen aus Ni25 auf 1.7131 aufgetragen, anschließend werden durch mikroskopische Vermessung der Querschnitte der Schweißraupen geeignete Parametersätze für das Auftragen von Wolframkarbidflächen bestimmt.

Die für das Auftragen der Wolframkarbidschichten verwendeten Schweißparameter sind in Tabelle 12 eingetragen.

Tabelle 12: Schweißparameter für das Auftragen der Wolframkarbidschichten

Programm	Feld	T _{VW} [°C]	F _P [g/min]	v [mm/min]	Δf _B [mm]	f _L [Hz]	P _L [W]
Ni25_1 Ni40_1 NiBSi_1	1	400	14,5	700	20	5000	3200
	2						
	3			800			
	4						
Ni25_2 Ni40_2 NiBSi_2	1			900			
	2						
	3			1000			
	4						

In Summe werden sechs 4Flächenproben mit zwei verschiedenen Programmen (_1, _2) geschweißt, durch die Variation der Vorschubgeschwindigkeit beim Schweißen der vier Flächen stehen 24 verschiedene Proben zur Verfügung. Die Nickelbasisfläche je zweier Proben ist Ni25, Ni40 bzw. NiBSi.

Aus diesen insgesamt erhaltenen 24 Parametersätzen werden Proben durch Erosion gewonnen, diese werden in Kunststoff eingebettet, anschließend werden Schliffbilder zur Analyse des Schichtaufbaus erstellt. Zuvor wird die erreichte Höhe der Wolframkarbidschicht ermittelt.

7.4. HÖHENVERMESSUNG WOLFRAMKARBIDSCHICHT

Mit Hilfe des Höhenmessgerätes werden pro Fläche sechs Messwerte für die Höhe der Wolframkarbidschicht aufgenommen, für jede Fläche wird der arithmetische Mittelwert ermittelt, im Diagramm in Abbildung 56 sind diese aufgetragen.

arithmetische Mittelwerte der erreichten Höhen der Wolframkarbidschicht

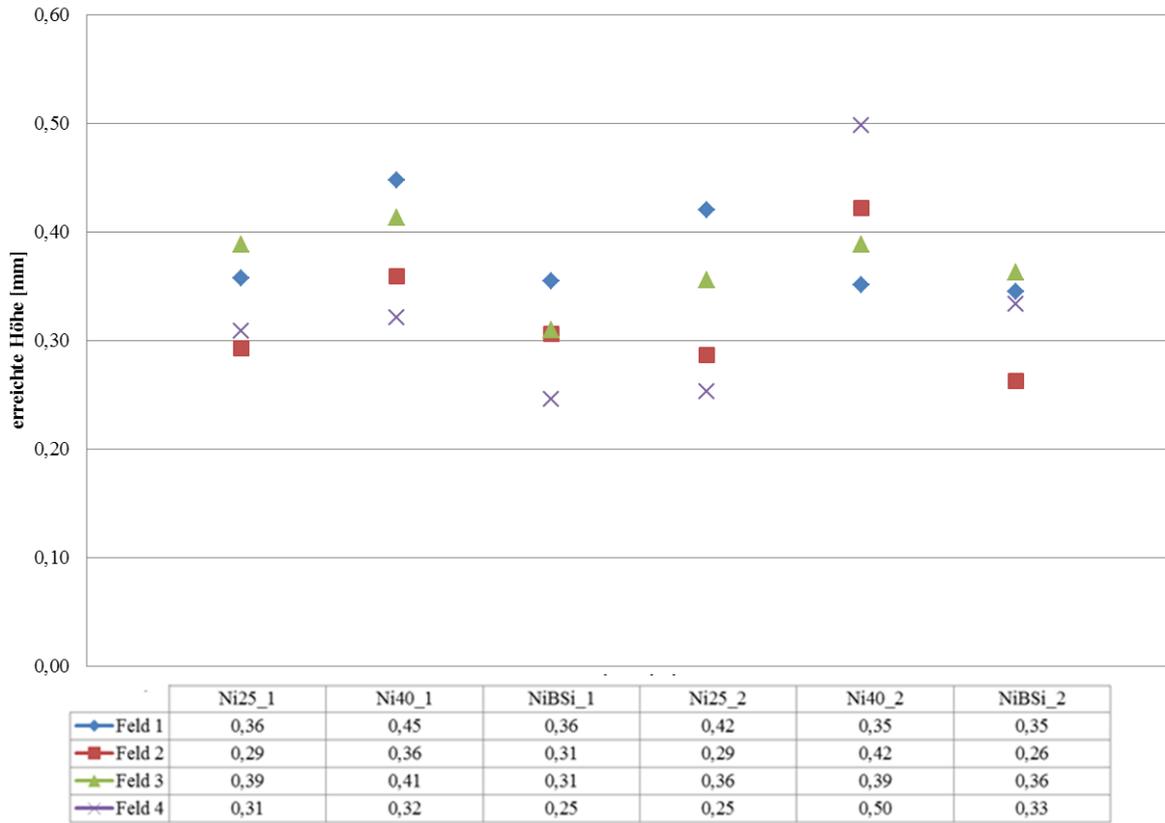


Abbildung 56: Arithmetische Mittelwerte der erreichten Höhen der Wolframkarbidschicht

Die erreichte Höhe liegt in den meisten Fällen im Intervall [0,3mm; 0,4mm]. Tendenziell kann jedoch zusammengefasst werden, dass bei hoher Vorschubgeschwindigkeit (Feld 4 bei Parametersatz _2) der Auftrag niedriger ausgebildet ist, bei geringer Vorschubgeschwindigkeit (Feld 1) kommt es zu höherem Auftrag. Einzig Feld 4 auf der Nickelbasisbeschichtung Ni40_2 stellt trotz der hohen Geschwindigkeit einen Ausreißer dar.

7.5. LICHTMIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNG DER WOLFRAMKARBIDBESCHICHTUNG

Die aus dem Beschichtungssystem 1.7131/Nickelbasispulver/Wolframkarbide bestehenden Schliffbilder werden lichtmikroskopisch und makroskopisch untersucht. In Summe stehen 24 verschiedene Kombinationen der Schweißparameter zur Auswertung zur Verfügung. Um das metallische Gefüge sichtbar zu machen, werden die Schliffe mit 3%igem Nital bei Raumtemperatur für acht Sekunden geätzt. 0,1 Liter 3%iges Nital besteht aus 3cm³ Salpetersäure und 97cm³ Alkohol. Beim Ätzen gilt es, einen zeitlichen Kompromiss zu finden, um einerseits das Gefüge der Wolframkarbide gut sichtbar zu machen, aber gleichzeitig den Grundwerkstoff aus Stahl durch den Ätzprozess nicht zu zerstören. Im folgenden Kapitel wird der Schichtaufbau der insgesamt 24 entstandenen Kombinationen makroskopisch und lichtmikroskopisch untersucht.

In Abbildung 57 ist das Gefüge der verwendeten Metallpulver Ni25, Ni40 und NiBSi in 1000facher Vergrößerung zu sehen. Im direkten Vergleich fällt auf, dass die Gestalt der Gefüge der einzelnen Metallpulver auf Nickelbasis trotz der ähnlichen chemischen Zusammensetzung große Unterschiede

aufweist. Ni40 hat im Vergleich zu Ni25 einen Chromanteil von 6%, der Siliziumanteil ist um 1% größer, der Boranteil um 0,4% geringer. Der Kohlenstoffanteil ist bei Ni25 mit ca. 0,5% doppelt so hoch wie bei Ni40. NiBSi ist chromfrei, der Kohlenstoff- und Eisenanteil ist verschwindend klein, die Fließeigenschaften sind gut, das Gefüge ist dendritisch. (Nt Systemlösungen)

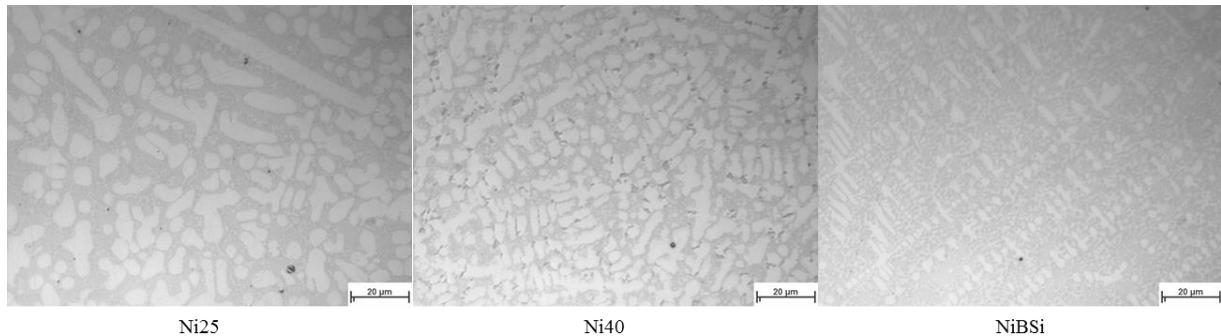


Abbildung 57: Vergleich Ni25 – Ni40 – NiBSi in 1000facher Vergrößerung, dendritische Gefügeausbildung

Um eine Aussage bezüglich des Werkstoffverhaltens tätigen zu können, werden immer zwei Proben mit gleichem Nickelbasiswerkstoff betrachtet. Es wird im Folgenden nicht auf alle 24 Schichtaufbauten eingegangen, einige exemplarische Untersuchungen werden gezeigt.

Die lichtmikroskopische Untersuchung der Schiffe ist wie folgt aufgebaut: In der Mitte liegt eine makroskopische Aufnahme der Probe, die roten Rechtecke zeigen die Stellen an, an denen lichtmikroskopische Untersuchungen durchgeführt wurden.

7.5.1. Ni25

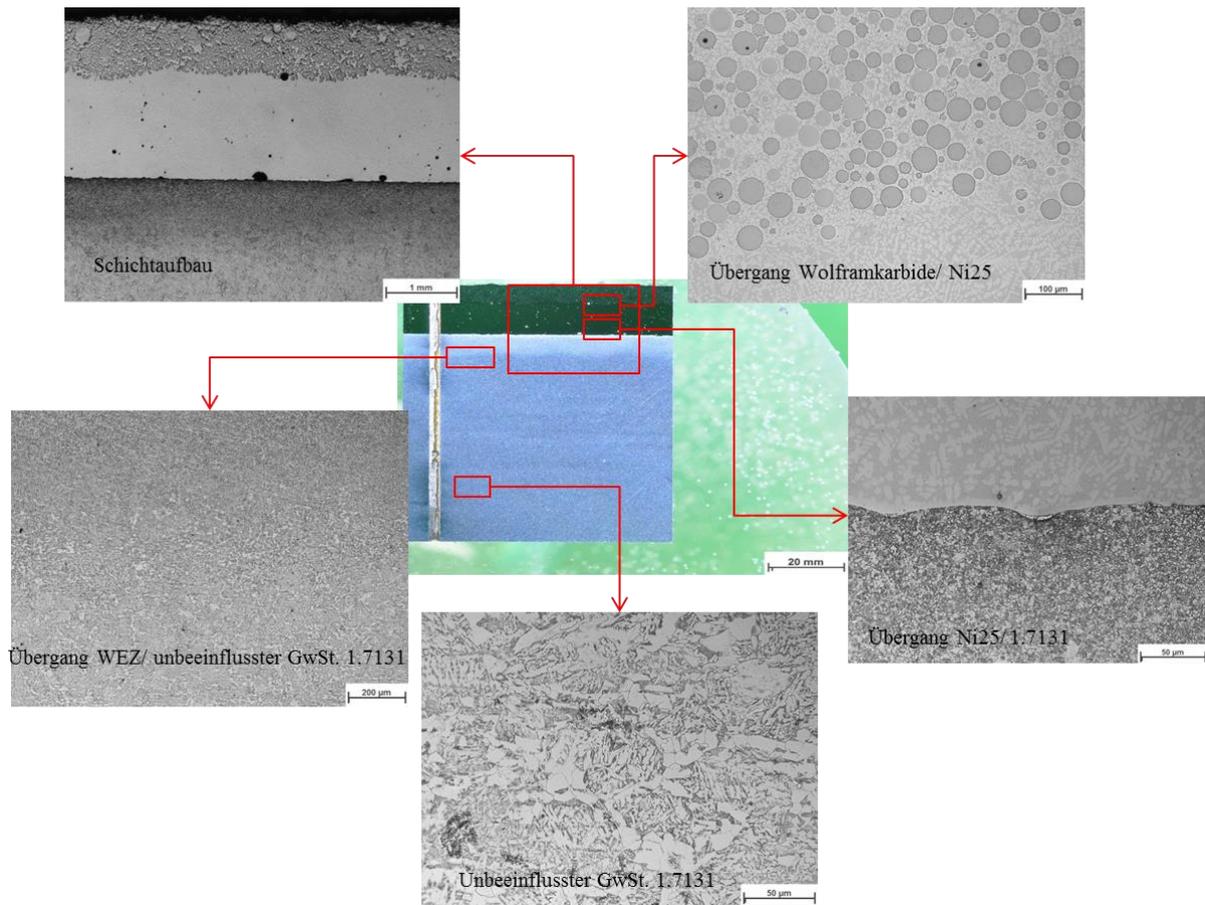


Abbildung 58: Ni25_1 Feld 1

In Abbildung 58 sind Schliffbilder des Feldes 1 ($v = 700 \frac{mm}{min}$) der Probe Ni25_1 dargestellt. Die niedrige Vorschubgeschwindigkeit bewirkt, dass die erreichte Höhe der Wolframkarbidbeschichtung im Intervall [0,343mm; 0,368mm] liegt. Dieser Auftrag ist für das gewünschte Endmaß etwas zu hoch.

Aus der Auswertung der Zugversuche ist bekannt, dass die Anbindung Ni25 an den Grundwerkstoff 1.7131 gut ist, die lichtmikroskopische Untersuchung bestätigt dies. In der makroskopischen Aufnahme in der Mitte der Abbildung ist die WEZ und der Übergang der Ni25 Beschichtung/Wolframkarbidschicht gut zu sehen. Rechts oben sind in Ni25 eingebettete Wolframkarbide dargestellt. Die Wolframkarbidschicht hat sich durch die verwendete Vorwärmtemperatur von 400°C ideal wie vorgesehen in die Ni25 Beschichtung eingeschmolzen. In der Kombination 1.7131/Ni25/Wolframkarbidschicht treten keine Risse oder sonstige Unregelmäßigkeiten auf.

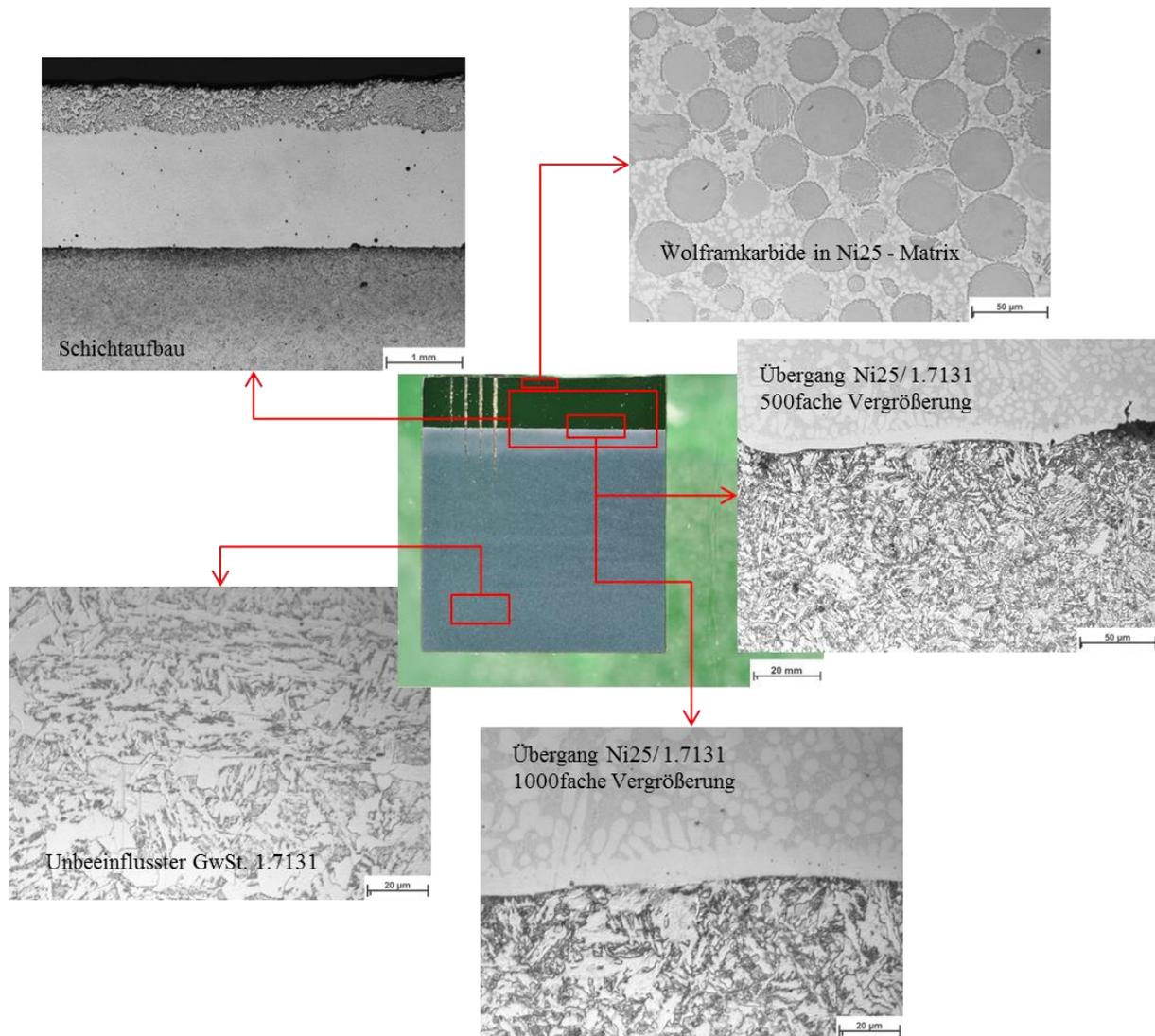


Abbildung 59: Ni25_2 Feld 4

Da die Höhe der Wolframkarbidschicht bei der Vorschubgeschwindigkeit $700 \frac{mm}{min}$ zu hoch für das gewünschte Endmaß ist, wird in Abbildung 59 auf das Schlibbild von Feld 4 ($v = 1000 \frac{mm}{min}$) eingegangen. Die Höhe der Wolframkarbidbeschichtung liegt im Intervall $[0,282mm; 0,309mm]$ und stellt sich aufgrund der höheren Vorschubgeschwindigkeit nur knapp über dem gewünschten Endmaß, welches im Bereich $[0,15mm; 0,25mm]$ liegen sollte, ein.

Die Betrachtung des Übergangsbereiches Ni25/1.7131 bestätigt, dass die Anbindung gut ist. Des Weiteren bilden sich bei Kombination dieser Beschichtungswerkstoffe keine Risse aus, Ni25 scheint aufgrund seiner Härte ideal zum Einbetten der Wolframkarbidbeschichtung zu sein, daher wird Ni25 als Matrixmaterial verwendet werden.

7.5.2. Ni40

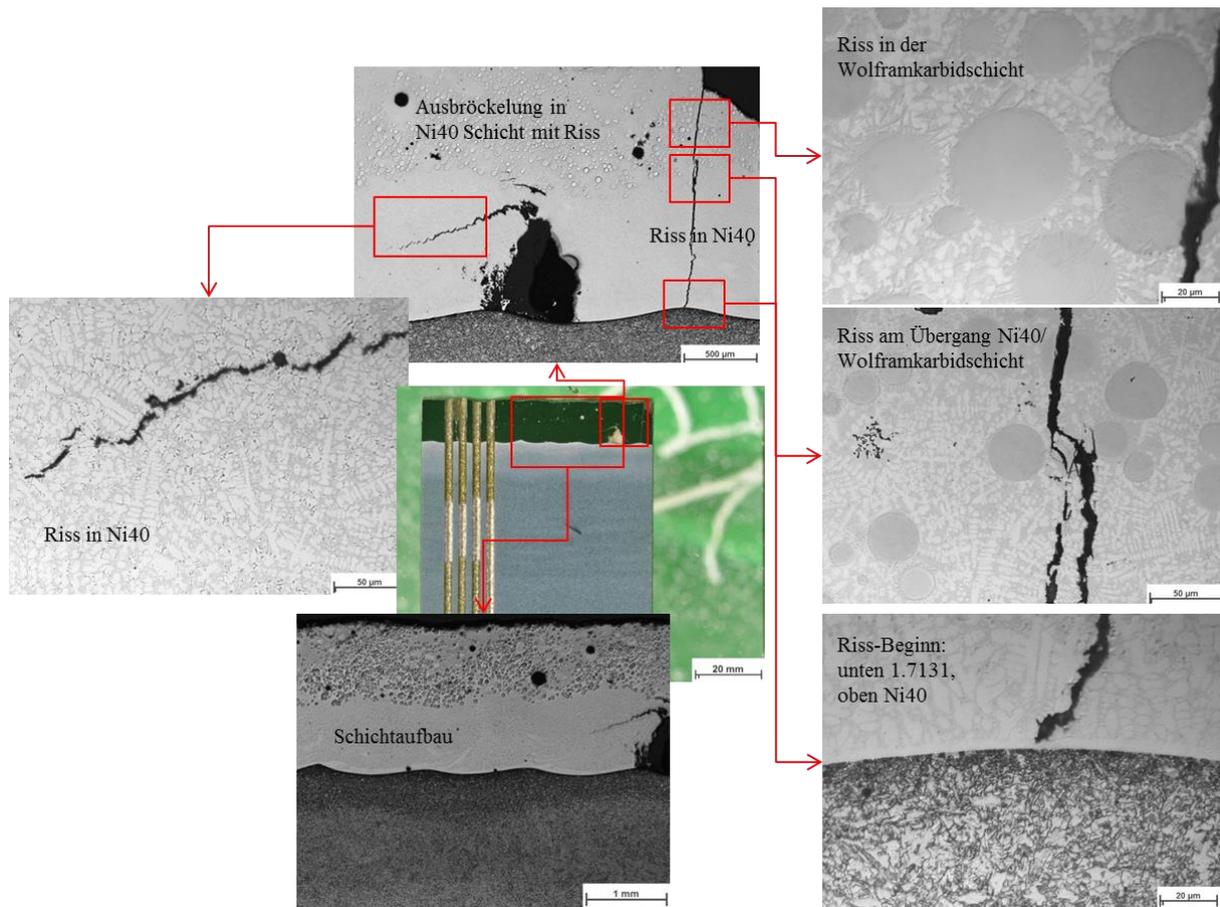


Abbildung 60: Ni40_1 Feld 4

Das Feld 4 des in Abbildung 60 gezeigten Schiffs wurde bei $v = 800 \frac{mm}{min}$ geschweißt. Aufgrund der Härte von Ni40 haben sich durch das Auftragen der Wolframkarbidschicht mit freiem Auge sichtbare Risse ausgebildet. Ein Riss pflanzt sich von der Wolframkarbidoberfläche durch die Ni40 Beschichtung bis zum Grundwerkstoff 1.7131 fort (siehe rechts in der Abbildung). Am Übergang der Ni40 Beschichtung zum Substrat ist eine Ausbröckelung von Ni40, deutlich sichtbar. Diese hat sich durch den Erosionsprozess, der nötig war, um die Probe gewinnen zu können, gebildet. Die erreichte Höhe der Wolframkarbidschicht liegt im Bereich $[0,295mm; 0,358mm]$, aufgrund der aufgetretenen Risse wird Ni40 nicht als Matrixmaterial weiter verwendet werden, die erreichte Höhe der Beschichtung ist daher zweitrangig,

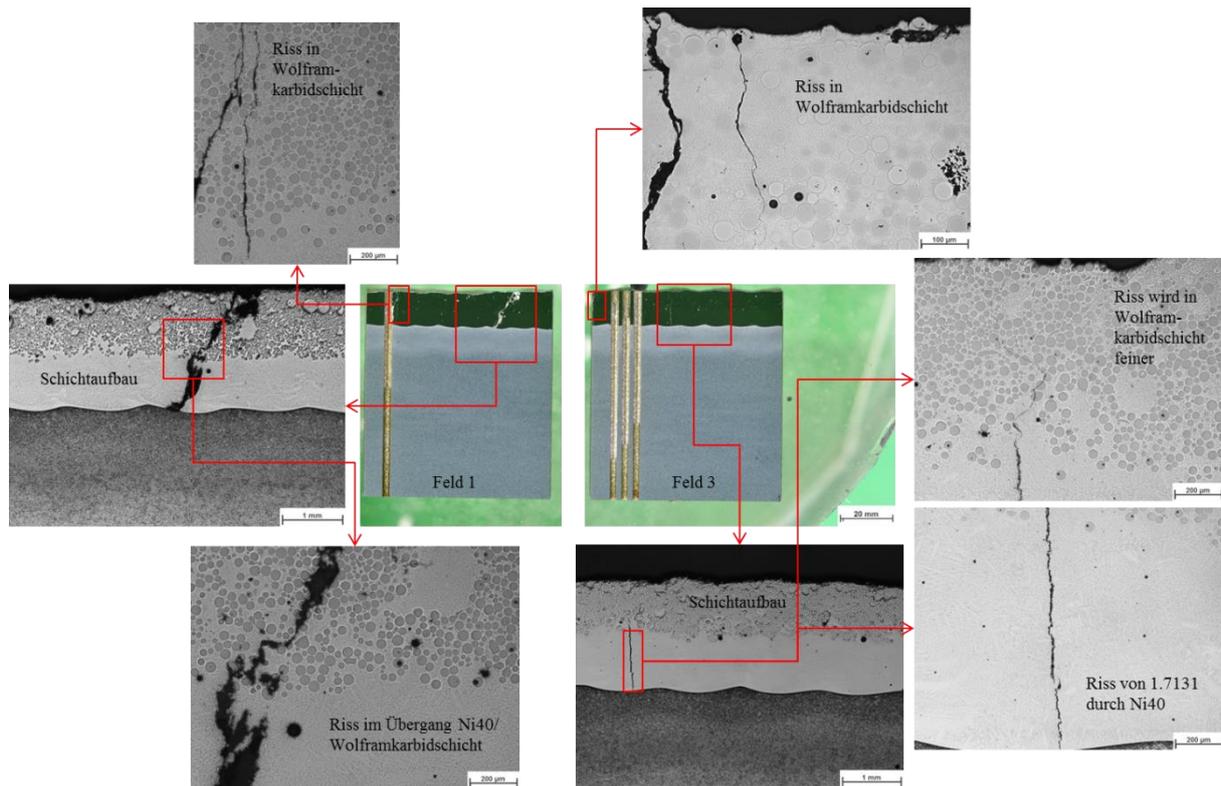


Abbildung 61: Ni40_2 Feld 1 und Feld 3

Besonders viele Risse im Schichtaufbau mit dem Matrixmaterial Ni40 sind in Abbildung 61 dargestellt. Feld 1 wurde mit $v = 900 \frac{mm}{min}$ geschweißt, die Höhen liegen im Bereich [0,285mm; 0,451mm], Feld 3 wurde mit $v = 1000 \frac{mm}{min}$ geschweißt, die erreichte Höhe beträgt zwischen [0,349mm; 0,48mm]. Hier stellt sich mit Zunahme der Vorschubgeschwindigkeit auch eine Zunahme der erreichten Schichtdicke ein. Ein Riss in Feld 3 beginnt in der Übergangszone 1.7131/Ni40 und verläuft sich in der Wolframkarbidschicht. Der dargestellte Riss in Feld 1 ist mit freiem Auge sichtbar und verläuft quer über den Schichtaufbau. Da in beiden betrachteten Feldern deutliche Risse ausgeprägt sind, ist die erreichte Höhe der Wolframkarbidbeschichtung irrelevant, Ni40 wird für Beschichtungsprozesse aufgrund seiner härtebedingt aufgetretenen Risse nicht weiter betrachtet.

7.5.3. NiBSi

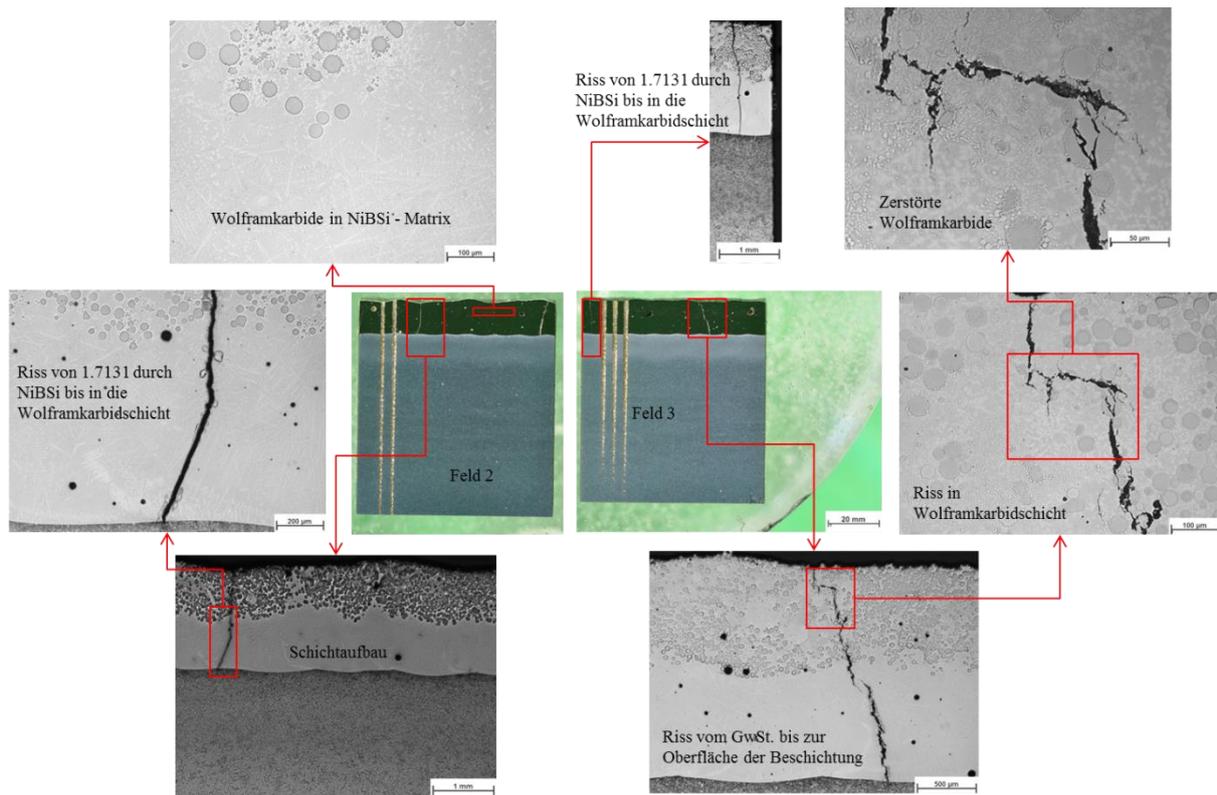


Abbildung 62: NiBSi_1 Feld 2 und Feld 3

In Abbildung 62 werden in NiBSi eingebettete Wolframkarbidschichten betrachtet.

Links sind lichtmikroskopische Aufnahmen von Feld 2 zu sehen, die Vorschubgeschwindigkeit für das Aufschweißen der Wolframkarbidbeschichtung betrug hier $v = 700 \frac{mm}{min}$, die Höhe stellt sich im Intervall $[0,278mm; 0,357mm]$ ein. Im Schichtaufbau tritt ein deutlich sichtbarer Riss auf, der sich von 1.7131 beginnend bis auf die Oberfläche der Wolframkarbidbeschichtung fortpflanzt.

Im rechten Bereich der Abbildung 62 ist das mit $v = 800 \frac{mm}{min}$ aufgeschweißte Feld 3 der Wolframkarbidschicht dargestellt. Die Höhe der Beschichtung nimmt bei Steigerung der Geschwindigkeit ab und liegt im Intervall $[0,26mm; 0,352mm]$. Zwei Risse verlaufen quer durch den gesamten Schichtaufbau.

Aufgrund der aufgetretenen Risse wird NiBSi als Beschichtungspulver trotz guter erreichter Endmaße der Höhen verworfen.

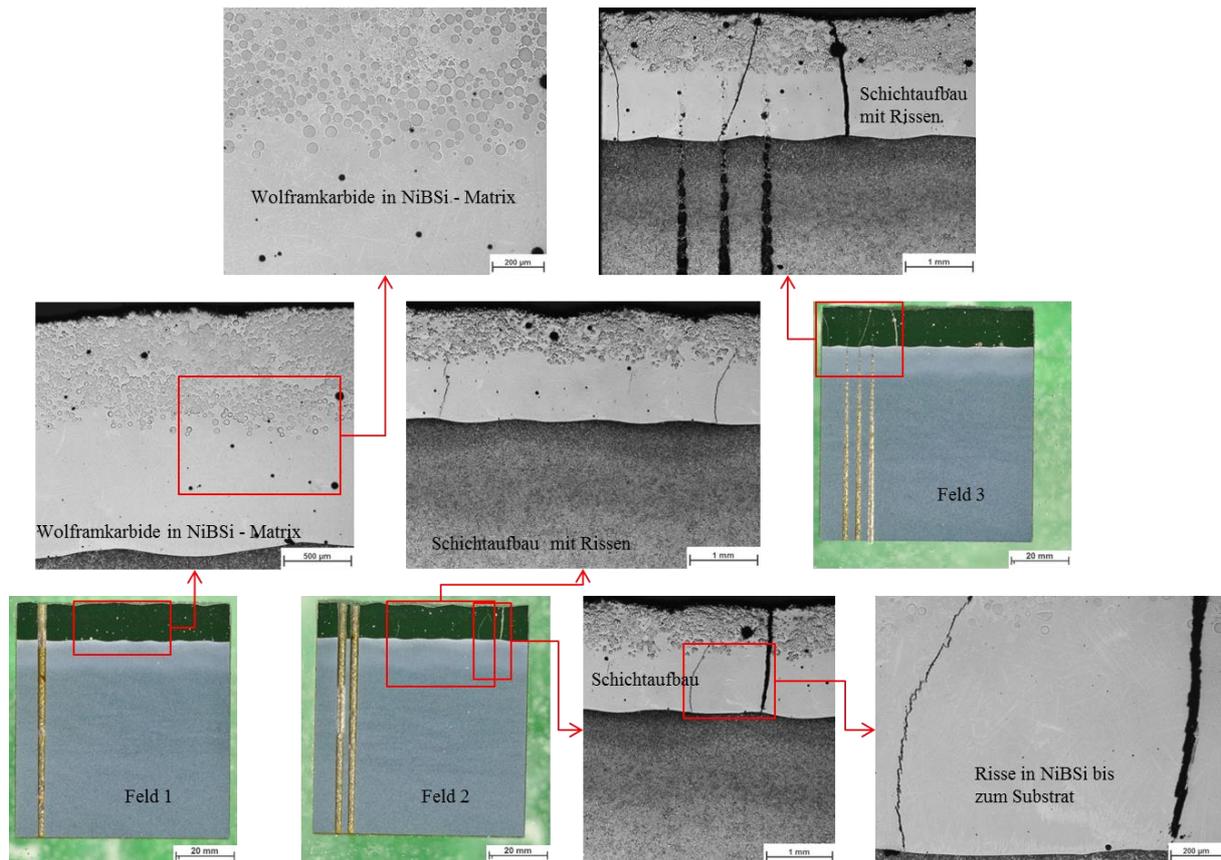


Abbildung 63: NiBSi_2 Feld1, Feld 2 und Feld 3

In Abbildung 63 sind drei Felder eines Schichtaufbaus 1.7131/NiBSi/WSC dargestellt.

Die beiden Felder 1 und 2 wurden bei $v = 900 \frac{mm}{min}$ geschweißt. In der lichtmikroskopischen Untersuchung von Feld 1 sind keine Risse zu sehen, die Wolframkarbide betten sich wie gewünscht in der NiBSi Matrix ein. Die Höhe der Wolframkarbidbeschichtung liegt im Intervall [0,332mm; 0,394mm].

Im Vergleich dazu zeigt sich in Feld 2 jedoch ob der gleichen Vorschubgeschwindigkeit ein ganz anderes Bild. Hier pflanzen sich Risse, beginnend in der Übergangszonen 1.7131/NiBSi bis hin zur Oberfläche der Wolframkarbidbeschichtung, fort. Das Intervall der erreichten Höhe beträgt hier [0,201mm; 0,323mm], dies ist ideal endmaßnah, aufgrund der Rissbildung in der Schicht ist das Höhenintervall hier jedoch sekundär.

Die Wolframkarbidbeschichtung in Feld 3 wurde bei $v = 1000 \frac{mm}{min}$ erzeugt. Die Höhen schwanken hier [0,262mm; 0,464mm], die Rissbildung ist enorm.

7.6. HÄRTEMESSUNG EINER AUSGEWÄHLTEN PROBE (HV 0,1)

Zur Anschauungszwecken wurde der Härteverlauf (HV 0,1) eines Schichtaufbaus einer ausgewählten Probe aufgenommen. Die Schweißparameter der Ni25 und Wolframkarbidbeschichtung der untersuchten Probe sind in Tabelle 13 eingetragen.

Tabelle 13: Schweißparameter der Probe für den Härteverlauf.

Substrat	Beschichtung	T_{vw} [°C]	F_p [g/min]	v [mm/min]	Δf_B [mm]	f_L [Hz]	P_L [W]
1.7131	Ni25	250	9,25	300	0	5000	3200
	WSC	400	14,5	900	20		

Durch das Einbetten der Wolframkarbide in die Nickelbasismatrix aus Ni25 soll die Beschichtung deutlich an Härte gewinnen. Der Cr-Mn legierte Einsatzstahl 1.7131 weist im Lieferzustand eine Härte von 220HV auf. Vor dem Auftragen der Nickelbasislegierung wird das Substrat auf 250°C vorgewärmt. Das Metallpulver Ni25 weist im Lieferzustand eine Härte von 25HRC (~270HV) auf, durch die Prozesskinetik (schnelles Abkühlen) konnte die Härte um etwa 100HV auf 370HV gesteigert werden. Die Härte der Beschichtung soll über die Wolframkarbidschicht erzeugt werden, die erlangte Härte von Substrat und Nickelbasisbeschichtung steht daher im Hintergrund.

In Abbildung 64 ist der Härteverlauf eines Schichtaufbaus bestehend aus dem Substrat 1.7131 und einer Wolframkarbidschicht in der Nickelbasismatrix Ni25 dargestellt. Die Höhe der gesamten Beschichtung beträgt etwa 2,1mm. In der Wolframkarbidschicht werden Ausreißer der Härtewerte bis zu 3000HV_{0,1} aufgenommen, immer dann, wenn bei der Härtemessung genau ein Wolframkarbid getroffen wurde. Die hohen Härtewerte können nicht als Ausreißer gewertet werden, da sie die Härte eines Karbides ausgeben. Aufgrund der Karbide gestaltet sich die Härtemessung im Bereich der Wolframkarbidschicht schwierig. Durch die sphärischen Karbide in der Wolframkarbidmatrix wird die benötigte Härte, um eine verschleißfeste Oberfläche zu erzielen, jedoch erreicht. Die Härte im Bereich der Matrix liegt unter 1000HV_{0,1}.

Substrat 1.7131, Wolframkarbide in Ni25 Matrix

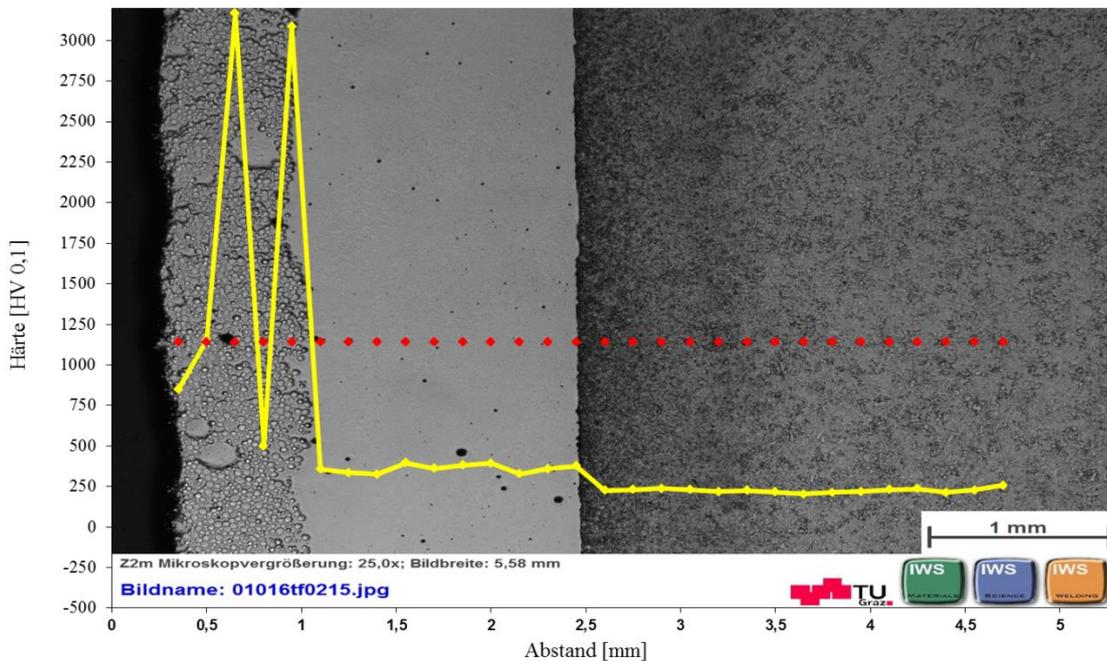


Abbildung 64: Härteverlauf: Substrat 1.7131: Wolframkarbide in Nickelbasismatrix Ni25

7.7. LICHTMIKROSKOPISCHE BETRACHTUNG DER KOMBINATION 1.2343/Ni25

Nach der Auswertung der Zugversuche mithilfe der statistischen Methoden und anhand der lichtmikroskopischen Betrachtung der Schlibfbilder werden die Nickelbasispulver Ni40 und NiBSi zur Herstellung einer endmaßnahen Wolframkarbidbeschichtung verworfen, da sich in der Anbindungszone Risse ausgebildet haben, die die Qualität der Beschichtung nicht gewährleisten.

Da die Auswertung der Haftfestigkeitsprüfung eindeutig die Werkstoffkombination 1.2343/Ni25 präferiert, diese anhand der Ergebnisse der Scherfestigkeitsversuche bestätigt wurden und auch die lichtmikroskopische Betrachtung der Schlibfe für eine Ni25 Beschichtung spricht, wird im Folgenden der Schliff einer Ni25 Schicht auf 1.2343 analysiert. Die Kombination 1.2343/Ni25 ist am ehesten geeignet, um Warmformwerkzeugen zu beschichten.

Die Schweißparameter für die einflächige Beschichtung von 1.2343 mit Ni25 wurden anhand des Streudiagramms für 1.2343 und Ni25 (Abbildung 38) gewählt und sind in Tabelle 14 definiert.

Tabelle 14: Schweißparameter für das Auftragen der Ni25 Beschichtung auf 1.2343

Substrat	Beschichtung	T_{vw} [°C]	Lagenanzahl	F_p [g/min]	v [mm/min]	Δf_B [mm]	f_L [Hz]	P_L [W]
1.2343	Ni25	400	2	7,5	600	-5	5000	3200

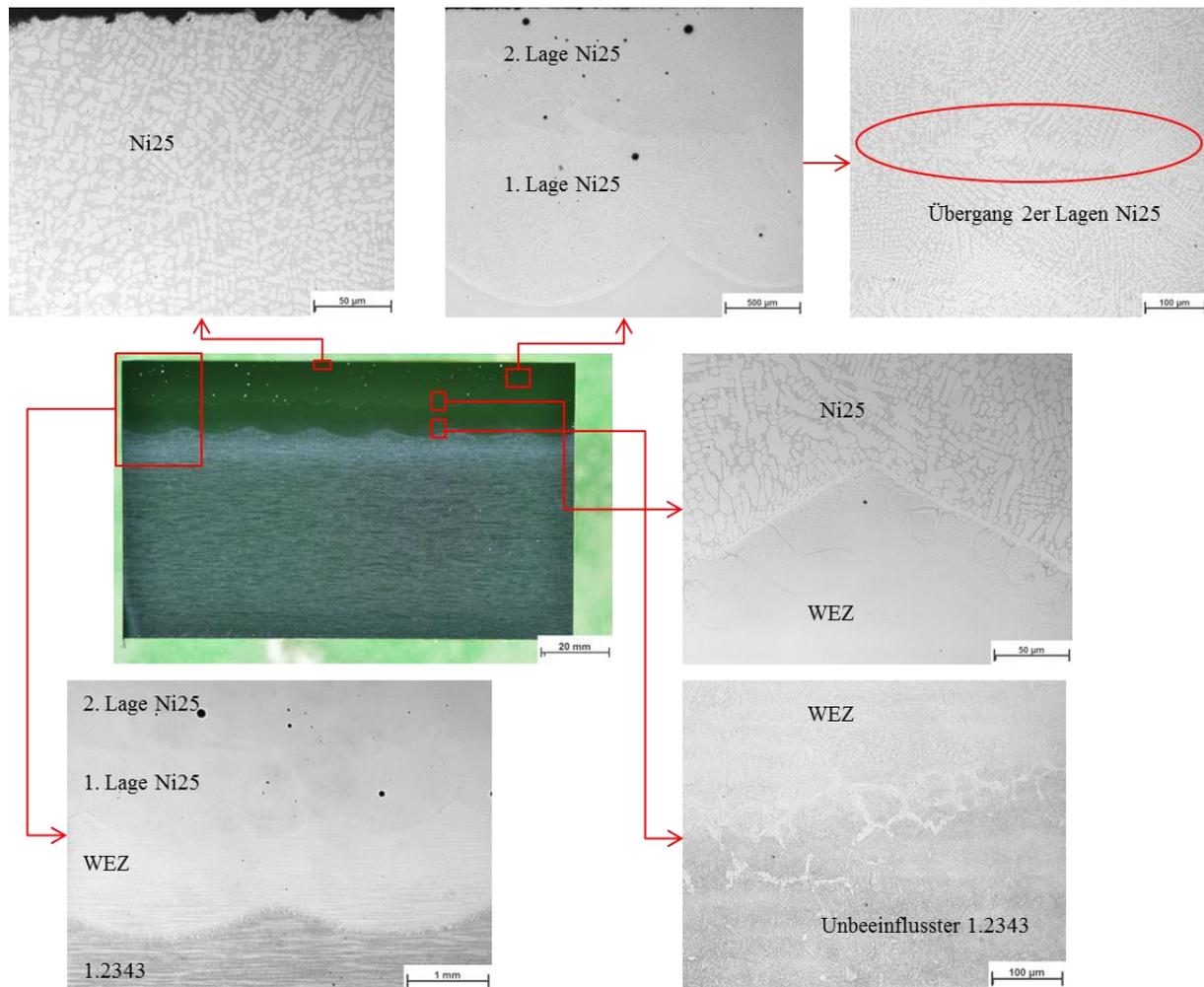


Abbildung 65: Zwei Lagen Ni25 auf 1.2343

In Abbildung 65 ist die lichtmikroskopische Analyse der Ni25 Beschichtung auf 1.2343 dargestellt. Links unten ist der gesamte Schichtaufbau dargestellt. Bei ausreichender Vergrößerung kann der Übergang zwischen den beiden Ni25 Lagen definiert dargestellt werden. Die Anbindung der Ni25 Beschichtung an das Substrat ist rissfrei, ausreichende Haftfestigkeit ist daher auch aus lichtmikroskopischer Sicht gegeben.

7.8. VERMESSUNG DER HÖHE DER WOLFRAMKARBIDSCHICHT EINER RADIUS-DOPPELRADIUSPROBE

Da real eingesetzte Werkzeuge Radien aufweisen, werden Radien einer Radius-Doppelradiusprobe mit einer Wolframkarbidschicht in Ni25-Matrix beschichtet. Die auf die Radien der Radius-Doppelradiusproben aufgeschweißten Lagen aus Ni25 und Wolframkarbiden werden optisch vermessen, der erzielte Auftrag wird mit Hilfe der Software GOM Inspect analysiert. Einfach- und Doppelradius einer Probe wurden getrennt voneinander untersucht. Um die erreichten Höhen zu vermessen, wurde folgender Strategie nachgegangen: Die erreichten Höhen im Bereich der aufgetragenen Flächen werden mithilfe von Schnitten entlang der erzeugten Konturen dargestellt. Die Software GOM Inspect erkennt den Schweißauftrag auf dem darunterliegenden CAD-Modell der Probe. Die Erzeugung einer Schnittlinie entlang des Radius dient zur Ermittlung der Höhe des Auftrags auf dieser Linie. Die Höhe wird über den Normalvektor, der aus dem Betrag der x, y und z-

Komponente des Auftrags an der Schnittlinie gebildet wird, bestimmt. In Abbildung 66 ist dieser Sachverhalt dargestellt.

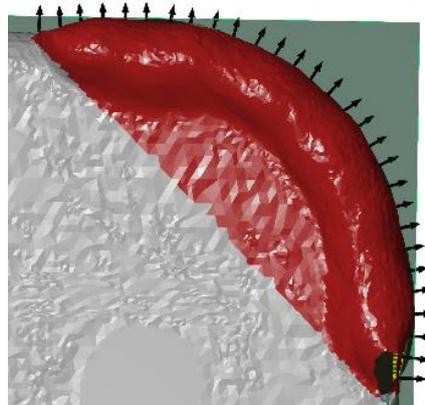


Abbildung 66: Normalvektoren entlang Einfachradius

In Summe wurden vier Radius-Doppelradiusproben geschweißt, im Folgenden wird auf die Höhenvermessung einer Probe eingegangen. Anmerkung: Unter Auftrag ist die Höhe über dem „Nullmaß“ bzw. dem geforderten Sollmaß gemeint. Die Bearbeitungshöhe bzw. Auftragshöhe wird benötigt, um die Geometrie mechanisch nachbearbeiten zu können.

7.9. EINFACHRADIUS

Zur Analyse des einfachen Radius wurden horizontale und radiale Schnitte erzeugt (siehe Abbildung 67).

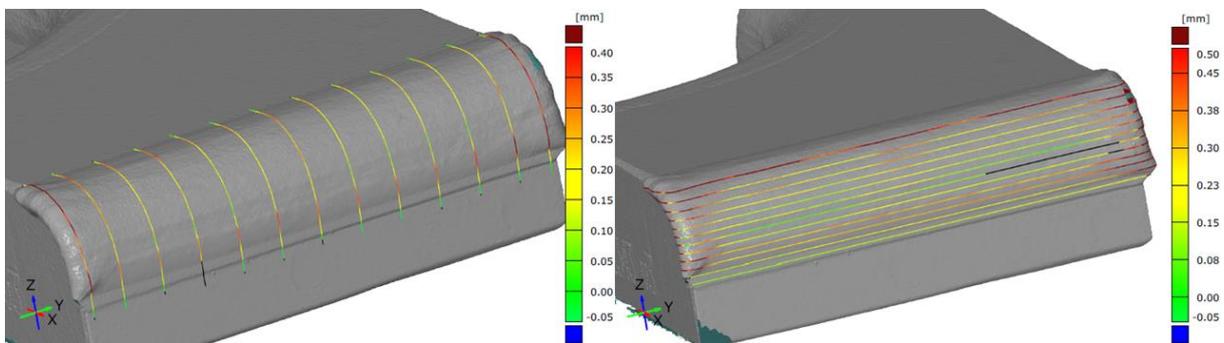


Abbildung 67: Schnitte zur Höhenvermessung des Einfachradius – links radiale Schnitte – rechts horizontale Schnitte

Die radialen Schnitte wurden, beginnend mit der Bezeichnung „Ebene Y 1.dXYZ“ bis zur „Ebene Y 13.dXYZ“ von rechts nach links im linken Bild der Abbildung 67, in 5mm Abständen gelegt, die beiden Schnitte am Rand weisen zu den jeweils vorletzten Linien 4mm Abstand auf. In Summe stehen 13 Schnitte zur Betrachtung zur Verfügung.

Die horizontalen Schnitte wurden ausgehend von der untersten Kante der Schweißnaht „Ebene Z R_2.dXYZ“ bis hin zur höchsten Ebene „Ebene Z R_13.dXYZ“ des Radius in 1mm Schritten gelegt. Es wurden zwölf Linien zum Vergleich der Höhe des Auftrags erzeugt. Die „Ebene Z R_1.dXYZ“ wurde als Referenzlinie in einer Ebene unter dem Schweißauftrag im Substratwerkstoff gelegt und wurde ausgeblendet, da sie für den Höhenvergleich nicht relevant ist.

Die farbliche Einfärbung der Schnittlinien spiegelt die Bearbeitungszugabe wider. So ist der Auftrag der beiden äußersten radialen Linien mit Abstand am höchsten. Im Bereich der horizontalen Linien ist

der Auftrag am oberen Ende des Radius am größten. Des Weiteren sieht man anhand der horizontalen Linien, wie schon in den radialen Schnitten, dass der Auftrag am Rand der Radien auch jeweils sehr hoch ist.

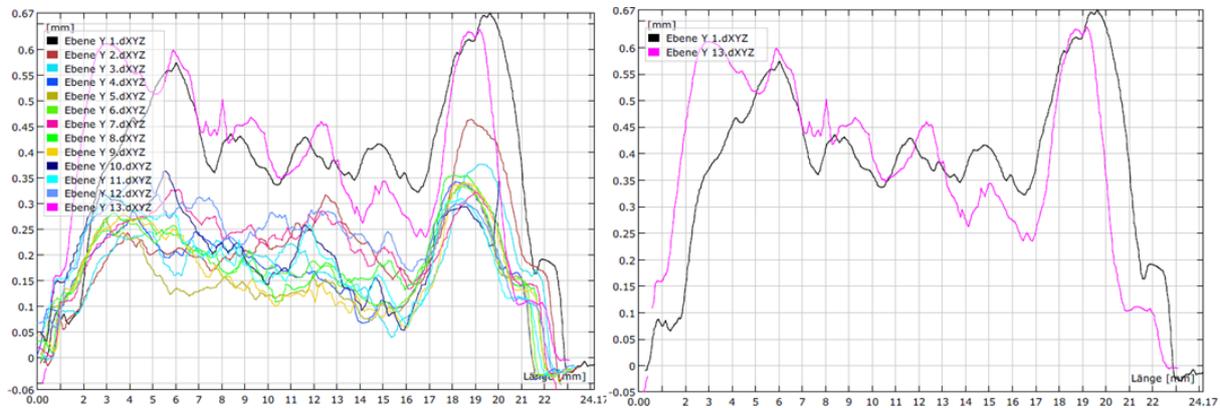


Abbildung 68: Einfachradius Höhen aus den Radialschnitten

In Abbildung 68 sind die Diagramme der Höhen der aufgetragenen Schicht entlang der Bogenlänge über dem Radius, beginnend von oben nach unten, dargestellt.

Links sind die Höhenverläufe aller 13 Linien dargestellt, es ist ersichtlich, dass sich der Auftrag bis zur Radiusbogenlänge von 16mm von oben verlaufend im Intervall [0,15mm; 0,25mm] einpendelt. Zwischen 18 und 19mm erreicht der Auftrag seinen Peak und pendelt sich bei [0,3mm; 0,35mm] ein. Die letzten zwei Millimeter des Auftrags liegen wieder im Intervall [0,15mm; 0,25mm]. Der Anstieg am Beginn und der Abstieg am Ende der Linien liegen darin begründet, dass die Schnitte immer ein Stück in die jeweilige Oberfläche des Substrats reichen, um sie zu „nullen“.

Im rechten Diagramm in Abbildung 68 sind die aufgetragenen Höhen der beiden äußersten Linien dargestellt. Die rosa Linie zeigt den Auftrag des am weitesten links liegenden Schnitts, die schwarze Linie zeigt den Auftrag des am weitesten rechts liegenden Schnitts im linken Bild in Abbildung 67. Es ist deutlich zu sehen, dass der Schweißauftrag am Rand des Radius wesentlich höher, zumeist doppelt so hoch ist, als in der Mitte des Radius. Der größte erreichte Auftrag ist größer als 0,6mm.

Der Grund für den enormen Schweißauftrag an den Rändern ist, dass hier zu Beginn der Schweißarbeit radiale Bahnen geschweißt wurden, um dadurch einen ausreichend definierten Kantenabschluss zu erhalten. Die Schweißbahnen am Einfachradius wurden anschließend von unten nach oben linienförmig aufgetragen. Durch die Schwerkraft kommt es während des Schweißprozesses zum Zusammenfließen des geschmolzenen Schweißgutes, worin sich der Peak des Auftrages zwischen Millimeter 18 und 19 begründet. Durch das nach unten fließen der oberen Schweißlagen kommt es im Bereich vor dem Peak [15mm; 17mm] zu einem leichten Untermaß. Der oberste Bereich des Radius weist kontinuierlich einen Auftrag von etwa 0,25mm auf, dies ist auch das Ziel.

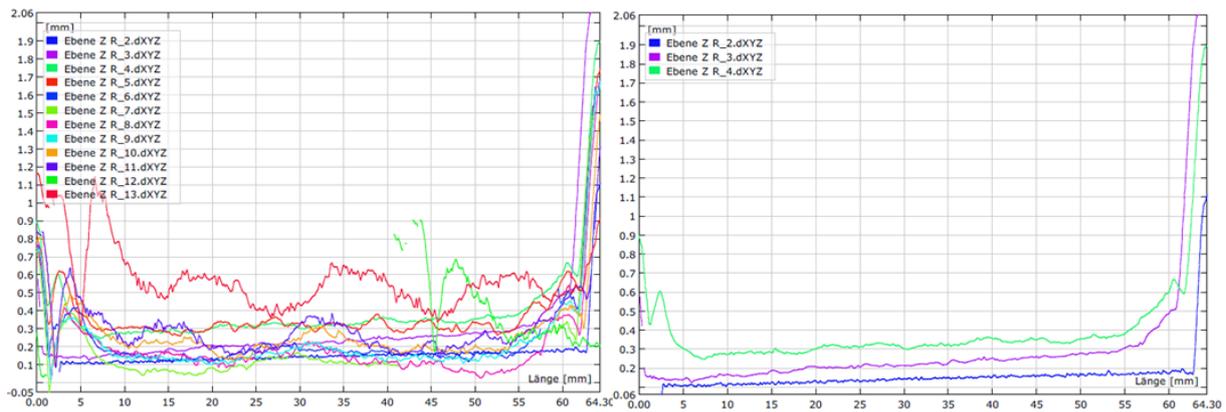


Abbildung 69: Einfachradius Höhen aus den horizontalen Schnitten

In Abbildung 69 sind die horizontalen Aufträge der dafür vorgesehenen Schnitte ausgehend von der linken Seite bis zur rechten Seite entlang der Länge des Einfachradius im rechten Teil der Abbildung 67 dargestellt.

Das linke Bild in Abbildung 69 zeigt den Auftrag aller durchgeführten Schnitte. Der Auftrag der „Ebene Z_R_13.dXYZ“ (in rot) ist mit Abstand am höchsten und ist zumeist doppelt so groß wie der Auftrag aller anderen Linien. Der Auftrag sämtlicher Linien mit Ausnahme der obersten Linie pendelt sich im Bereich [0,1mm; 0,3mm] ein. Die Linie der „Ebene Z_R_7.dXYZ“ kann nicht vollständig dargestellt werden, da in diesem Bereich Messpunkte fehlen.

Das rechte Diagramm in Abbildung 69 zeigt den Auftrag der ersten drei Linien beginnend von unten. Es ist gut ersichtlich, dass der Auftrag der untersten Linie „Ebene Z_R_2.dXYZ“ der geringste ist und dieser bei den beiden darauf liegenden Linien höher ausgeprägt ist. Der Grund dafür ist, dass die flüssige Schmelze während des Schweißprozesses aufgrund der Schwerkraft nach unten fließt. Da die Schweißbahnen von links nach rechts geschweißt wurden, ist der Auftrag von links nach rechts ansteigend.

7.10. DOPPELRADIUS

Um die erreichten Höhen im Bereich des Doppelradius zu vermessen, wurden horizontale und radiale Schnitte erzeugt.

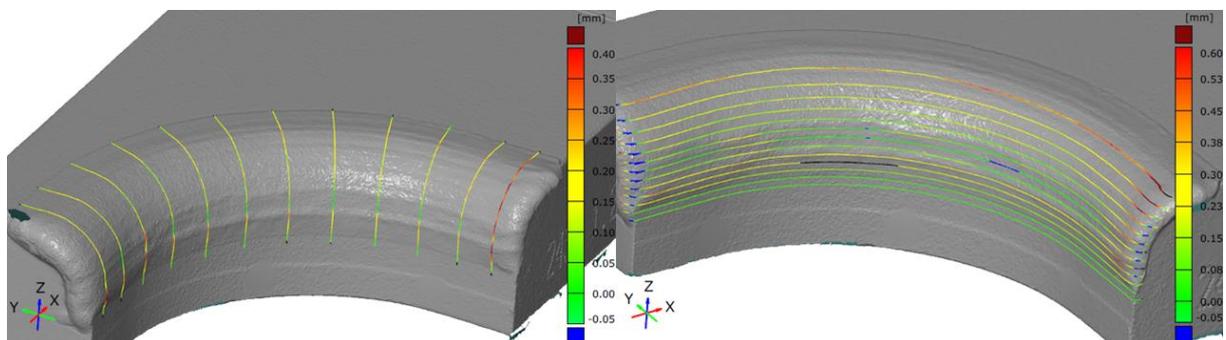


Abbildung 70: Schnitte zur Höhenvermessung des Doppelradius – links radiale Schnitte – rechts horizontale Schnitte

Da sich der Doppelradius über einen rechten Winkel erstreckt, werden die Schnitte radial und normal zum Auftrag erzeugt.

Die beiden äußersten radialen Schnitte wurden im Abstand 5mm parallel zum jeweils ersten dahinter liegenden Schnitt erzeugt. Die zehn dazwischen liegenden radialen Schnitte wurden in 10° Abständen bezüglich des Doppelradius erzeugt. Die Benennung der Schnitte erfolgt von rechts nach links im linken Bild der Abbildung 70, der erste Schnitt trägt die Bezeichnung „Schnitt 4 – Radial 0.dXYZ“, die Schnitte werden aufsteigend nummeriert.

Die Erstellung der horizontalen Schnitte (siehe Abbildung 70 rechts) erfolgt analog zu den der Einfachradien. Sie wurden ausgehend von der untersten Kante der Schweißnaht „Ebene Z DR_1.dXYZ“ bis hin zur höchsten Ebene „Ebene Z DR_13.dXYZ“ des Radius in 1mm Schritten gelegt, es stehen somit 13 zueinander parallele Schnitte zur Auswertung zur Verfügung.

Aus den Bildern der durchgeführten Schnitte am Doppelradius ist ersichtlich, dass eine radiale Linie und die oberste horizontale Linie den größten Materialauftrag aufweisen.

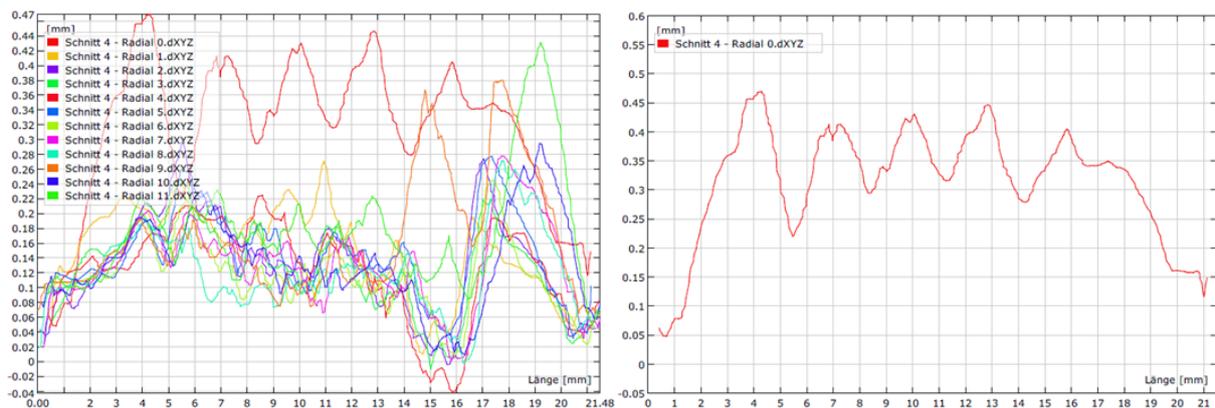


Abbildung 71: Doppelradius Höhen aus den Radialschnitten

In obiger Abbildung 71 sind die Höhenverläufe über die Bogenlänge des Doppelradius, von oben nach unten laufend, illustriert. Bei dem am weitesten rechts im linken Bildbereich liegenden Schnitt der Abbildung 70 beginnt die Benennung der Linien mit „Schnitt 4 – Radial 0.dXYZ“. Der Bereich von [2mm; 14mm] weist einen Auftrag zwischen im Intervall [0,1mm; 0,2mm] auf, dies ist der Auftrag, der auch erzielt werden sollte. Von [14mm; 16mm] erreicht der Auftrag Untermaß, um gleich danach Höhen >0,2mm zu erreichen. Das Schweißen der Linien wurde wiederum von unten nach oben vorgenommen, damit begründet sich auch der Verlauf des Auftrages. Beim Schweißprozess fließt die Schmelze aufgrund der Schwerkraft nach unten, daher steigt der Schweißauftrag ab 16mm an.

Im rechten Bereich der Abbildung 71 ist die Linie mit dem größten Auftrag gesondert dargestellt. Der Auftrag dieser Linie beträgt im Schnitt 0,35mm, das ist mehr als das doppelte des Soll-Ziels des Endmaßes. Der verhältnismäßig große Auftrag in diesem Bereich kommt zu Stande, weil die Schweißbahnen beginnend auf der linken Seite der Probe zur rechten Seite hin von oben nach unten geschweißt wurden. Des Weiteren wurde hier zur Begrenzung vor dem Schweißen der horizontalen Bahnen die radiale Kontur geschweißt. Diese beiden Faktoren bedingen den enormen Auftrag in diesem Bereich.

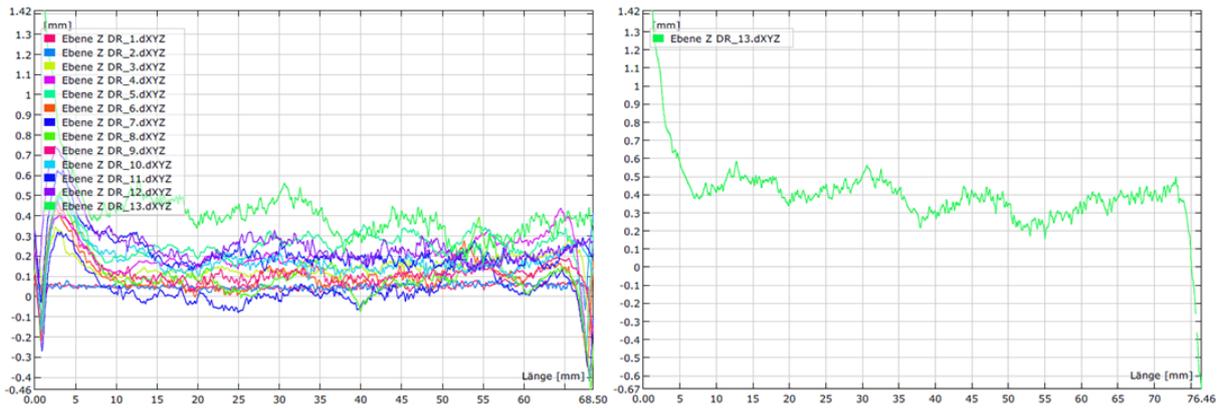


Abbildung 72: Doppelradius Höhen aus den horizontalen Schnitten

Der Auftrag am Doppelradius wurde auch horizontal vermessen. Hierzu wurden Schnitte von unten „Ebene Z DR_1.dXYZ“ nach oben gelegt, der Abstand zwischen den Schnitten wurde wiederum mit 1mm bestimmt.

Im linken Diagramm in Abbildung 72 ist der Höhenauftrag sämtlicher erzeugter Linien entlang der Länge des Radius dargestellt. Der Auftrag der untersten Linie ist am geringsten, er steigt bis hin zur obersten Linie an. Dieses Verhalten ist durch das Hinabfließen der Schmelze während des Schweißprozesses begründet. Im rechten Diagramm ist der größte Auftrag, nämlich derjenige des obersten Schnittes dargestellt. Dieser beträgt im Schnitt 0,45mm und ist damit dreimal so groß wie gewünscht.

Im Bereich der engsten Stelle des Doppelradius wurde ein deutlich höherer Auftrag vermutet, zu diesem ist es jedoch nicht gekommen.

7.11. ERGEBNISSE DER HÖHENVERMESSUNG

Aus der Auswertung der Diagramme der erstellten radialen und horizontalen Schnitte des Einfach- und des Doppelradius kann zusammengefasst werden:

Aufgrund der Schwerkraft fließt die flüssige Schmelze während des Schweißens nach unten und erstarrt an einem Ort, wo sie nicht sollte. Daher wird der Laserauftragschweißprozess bei zukünftigen Beschichtungen von 3D Geometrien nicht von oben nach unten oder umgekehrt, sondern entlang einer Horizontalebene geführt.

Obwohl die Höhe der Wolframkarbidschicht in den NC-Programmen basierend auf den Auswertungen der erreichten Schichthöhen der ebenen Proben angepasst wurde, ergibt sich nun in einigen Bereichen der Radien zu wenig und in anderen Bereichen zu viel Auftrag, das gewünschte Endmaß wird nicht auf allen Bereichen der aufgeschweißten Flächen ideal erreicht.

Die oberste Schicht, sowie derjenige Bereich eines Radius, der zum Ende der Schweißarbeit hin geschweißt wurde, weist ein deutlich zu großes Übermaß auf. Diese Tatsache ist in der immer größer werdenden Überlappung der aufgetragenen Schweißbahnen begründet.

Um den gewünschten Auftrag der Wolframkarbidschicht auf radienförmigen Geometrien konstant halten zu können, müsste die Höhe der aufzutragenden Schweißlagen und der Spurüberlappungsfaktor im Verlauf des Aufschweißvorgangs mitvermessen und sofort dynamisch angepasst werden können. Da diese Strategie nur einen Ausblick in die Zukunft darstellt, ist in Abbildung 73 eine verbesserte

Kontur des Radius im Querschnitt dargestellt, um dadurch einen konstante Beschichtungshöhe zu ermöglichen.

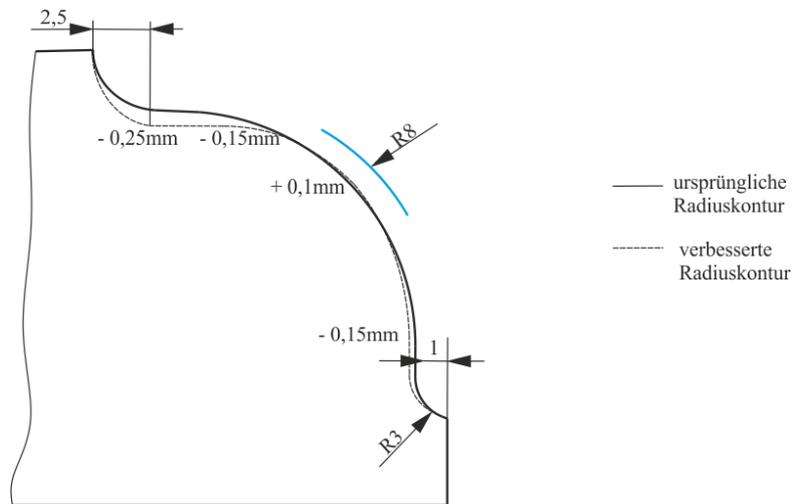


Abbildung 73: Ursprüngliche und verbesserte Radiuskontur

In erster Linie wurden Radien der Einfach-Doppelradiusproben beschichtet, um zu überprüfen, ob das Auftragen von Schichten auf nicht ebenen Flächen überhaupt möglich ist. Die in der Praxis zu beschichtenden Werkzeugoberflächen werden in der Regel nie geometrisch eben sein, sondern Radien und komplexe Geometrien, zum Teil auch Freiformflächen aufweisen.

Aufgrund der Erkenntnis, dass das Beschichten von Radien prinzipiell möglich ist, wird das Realwerkzeug, welches zum Presshärten von B-Säulen eingesetzt werden wird, mit Wolframkarbiden in Ni25 Matrix beschichtet.

8. AUSBLICK

Nach dem Auftragen von funktionellen Schichten aus Wolframkarbiden muss es möglich sein, diese mechanisch zu bearbeiten, da es technologisch und prozesstechnisch nicht möglich ist, exakt endmaßnah auftragzuschweißen.

8.1. MECHANISCHE NACHBEARBEITUNG EINER RADIUS-DOPPELRADIUSPROBE DURCH +GF+

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde eine Radius-Doppelradiusprobe von der Firma Georg Fischer mechanisch zerspant. Ziel ist es, mittels der vertikalen Hochgeschwindigkeitsmaschine HSM 400U LP die Radien endmaßnah zu bearbeiten und dabei bestmögliche Ergebnisse der Merkmale Oberflächenqualität, Genauigkeit und Bearbeitungsdauer zu erhalten. Die Testbearbeitung soll zeigen, ob und wie gut die mit Wolframkarbiden beschichteten Radien mechanisch bearbeitbar sind.

Das Material im Bereich des Doppelradius wird mit Hilfe eines Kugelfräasers im Gleichlauf mit 6366 min^{-1} von unten nach oben abgetragen. Um die während des Zerspanungsprozesses entstehende Wärme möglichst gut abzuleiten, wird eine Emulsion als Kühlschmiermittel verwendet.

Im Bereich des einfachen Radius wird ein eigens für die Hartmetallbearbeitung vorgesehener Kugelfräser im Gleichlauf mit einer maximalen Drehzahl von $20\,000 \text{ min}^{-1}$ eingesetzt. Das Material wird von unten nach oben im Gleichlauf unter Verwendung der minimal nötigen Schmierung abgetragen, um die Reibung zu reduzieren und die damit verbundene Wärmeentwicklung gering zu halten.

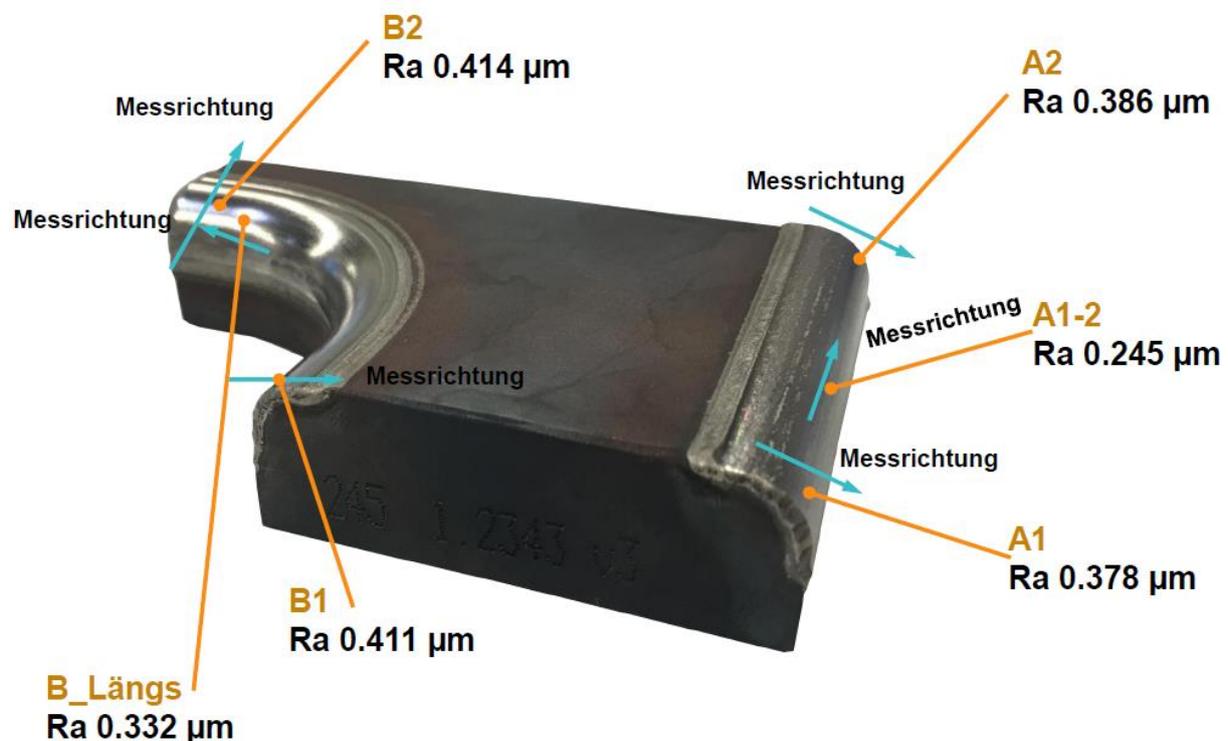


Abbildung 74: Oberflächenqualität der Radius-Doppelradiusprobe nach der mechanischen Bearbeitung (Kaeser 2016)

Die Bearbeitungszeit für das Schruppen und anschließende Schlichten der beiden Radien beträgt sechs Minuten. Nach der mechanischen Bearbeitung wird der Mittenrauwert R_a ermittelt. Tendenziell ist der erreichbare Mittenrauwert am einfachen Radius von besserer Qualität als der am Doppelradius (siehe Abbildung 74).

$$R_{a_Doppelradius} > R_{a_Einfachradius}$$

Resümee der Testbearbeitung:

Die Bearbeitung der Wolframkarbidschicht im Hochgeschwindigkeitsmaschinenzentrum HSM 400U LP ist möglich. Die bestmöglich erreichbare Oberflächengüte R_a beträgt $0,25\mu\text{m}$. Die verwendeten Fräser weisen aufgrund der Hartmetallzerspanung hohen Verschleiß auf. Durch Anwendung anderer Werkzeuge bzw. Verbesserung der verwendeten Prozessparameter kann der Bearbeitungsvorgang hinsichtlich Werkzeugverschleißes optimiert werden. Hierfür sind jedoch weitere umfassende Versuchsreihen nötig. Für die stetige Anwendung in der Praxis ist der Werkzeugverschleiß momentan zu hoch. (Kaeser 2016)

8.2. REALES WARMFORMWERKZEUG

Derselbe Parametersatz, der für die Beschichtung der Radius-Doppelradiusproben verwendet wurde, wird auf Radien am zweiteiligen realen Warmformwerkzeug aus 1.2343 aufgetragen (siehe Tabelle 15). Das Werkzeug soll in weiterer Folge für das Presshärten von Platinen zur Herstellung B-Säulen eingesetzt werden.

Tabelle 15: Schweißparameter für die Beschichtung des Realwerkzeuges

Ort	Beschichtung	T_{VW} [°C]	F_p [g/min]	v [mm/min]	Δf_B [mm]	f_L [Hz]	P_L [W]
Kantenabschluss aller Kanten	Ni25	300	9,25	400	-5	5000	1600
Layer 1 und 2 alle Radien	Ni25	300	7,5	600	-5	5000	3200
Layer Wolframkarbide	WSC	300	14,5	1000	20	5000	3200

Vor dem Auftragen der Ni25 Schichten auf sämtlichen Radien wird das Werkzeug im Ofen auf 300°C vorgewärmt, die Platte, auf der das Werkzeug während des LMD-Prozesses aufliegt, wird ebenfalls auf 300°C vorgewärmt, um eine möglichst konstante Temperatur während des Schweißvorgangs zu gewährleisten. Anschließend werden die Radien des Werkzeugs Schritt für Schritt beschichtet.

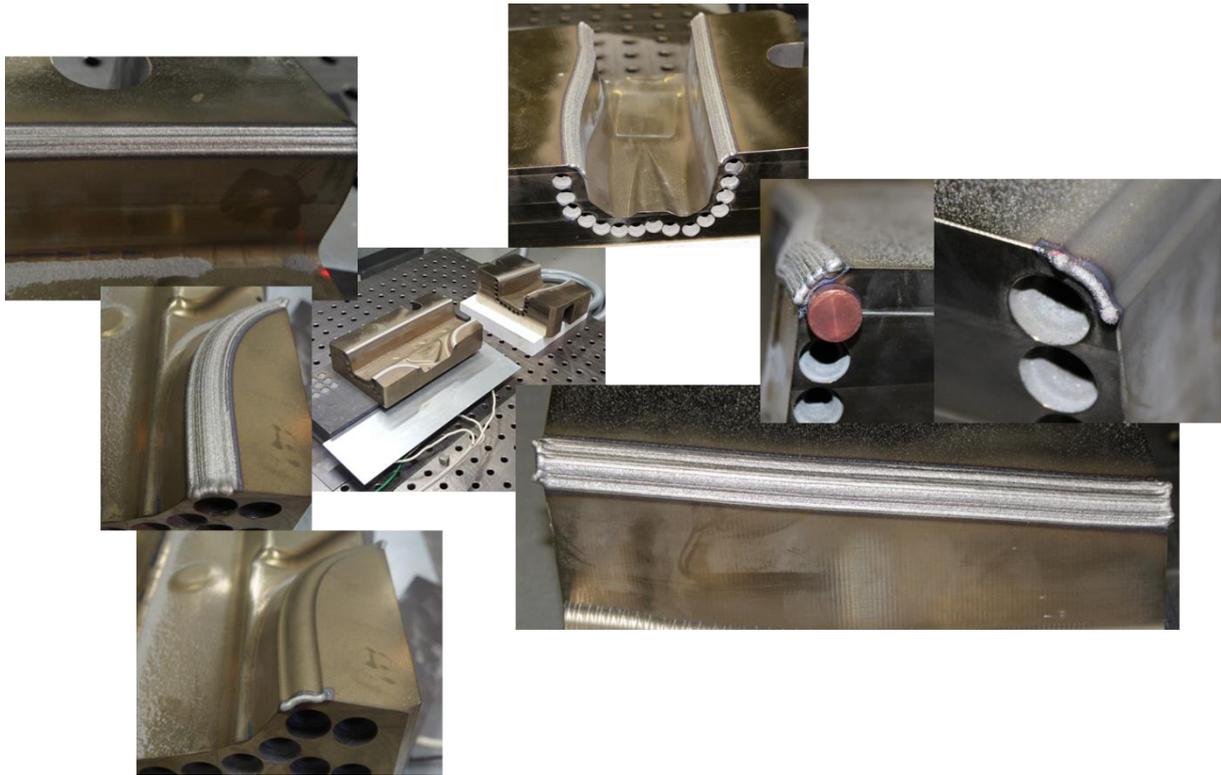


Abbildung 75: Fertig beschichtete Radien der beiden Segmente des Realwerkzeugs

9. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der Masterarbeit war es, eine Strategie für das Auftragen von verschleißfesten Wolframkarbidbeschichtungen in Nickelbasismatrizen auf Substraten zu entwickeln.

Die fertige Wolframkarbidschicht soll aufgrund des hohen Werkzeugverschleißes bei Zerspanung kaum nachbearbeitet werden müssen, das Endmaß der Beschichtung soll mit einer geringen Bearbeitungszugabe mithilfe des LMD-Prozesses erzeugbar sein. Die Höhe der Wolframkarbidschicht soll zwischen 0,15 und 0,3 mm betragen, um ideale Einbettung der Wolframkarbide in der Nickelbasismatrix zu gewährleisten.

Zur Entwicklung der Schweißstrategie wurden die Metallpulver Ni25, Ni40, Ni50 und NiBSi mit verschiedenen Schweißparametersätzen linienförmig auf die Substrate 1.1730, 1.7131 und 1.2343 geschweißt. Anhand der Auswertung der vermessenen Geometrien der Linien wurden geeignete Kombinationen sämtlicher Parameter für das Schweißen von 12Flächenproben bestimmt. Die 12Flächenproben dienen zur Messung der Härte der Beschichtung und zur Ermittlung der Haftfestigkeit (über die korrelierende Größe Zugkraft) der Beschichtung am Substrat durch zerstörende Prüfung.

Die statistischen Auswertungen der Haftfestigkeitsversuche und der gemessenen Härten der Beschichtungen haben ergeben, dass Ni25 die beste Haftfestigkeit der getesteten Pulver an Substraten aufweist. Die größte Zugkraft wird bei Parametersätzen der Werkstoffpaarung Ni25 und 1.2343 erzielt.

Um das Ergebnis aus den Haftfestigkeitsversuchen abzusichern, werden mit ausgewählten Schweißparametersätzen von Ni25 zylinderförmige Proben des Werkstoffs 1.2343 geschweißt, um Scherfestigkeitsversuche durchzuführen. Die Ergebnisse der Scherfestigkeitsversuche werden statistisch ausgewertet, diese bestätigen die Tendenz geeigneter Parametersätze der Haftfestigkeitsversuche. Da die Beschichtungsstrategie zur Beschichtung von Warmformwerkzeugen entwickelt wird, und 1.2343 ein Warmarbeitsstahl ist, sind die Ergebnisse der Haft- und Scherfestigkeitsprüfung vorteilhaft.

Die Härte von Ni25-Beschichtungen ist im Vergleich zu den anderen verwendeten Beschichtungswerkstoffen niedriger, liegt jedoch nicht im Vordergrund der Optimierung, da die Härte der gesamten Beschichtung über die aufgetragene Wolframkarbidschicht erzielt wird.

Geeignete Schweißparametersätze der Nickelbasislegierungen Ni25, Ni40 und NiBSi werden auf 1.7131 aufgetragen, um nach zerspanender Bearbeitung Wolframkarbidschichten aufzutragen. Diese Schichtaufbauten werden lichtmikroskopisch und makroskopisch untersucht. Hierbei wurden neben der Geometrie der Schicht auch Risse detektiert. Die Auswertung der Schlitze hat ergeben, dass die Wolframkarbidschicht trotz Anpassung der Parameter eine wellige Oberfläche aufweist, die Bearbeitungszugabe der Beschichtung kann jedoch mit geeigneten Einstellungen der Schweißparameter erzielt werden. Die Anbindung von Ni25 ans Substrat ist gut und ohne Fehler gegeben, Ni40 und NiBSi weisen tiefe Risse, teils sogar Krater auf und werden daher als Matrixmaterial für die Wolframkarbidbeschichtung am Realwerkzeug verworfen. Die Schliffbilder zeigen, dass rissfreie Verbindungen nur mit Ni25 hergestellt werden können.

Anhand der Ergebnisse der statistischen Auswertungen und der Schliffbilder stellt sich heraus, dass die Nickelmatrix zum Einbetten der Wolframkarbide mithilfe Ni25 auf 1.2343 geschweißt wird.

Mit dem geeignetsten Schweißparametersatz der Werkstoffkombination 1.2343/Ni25 werden Radien sogenannter Einfach-Doppelradiusproben aus 1.2343 mit Ni25 beschichtet, anschließend werden Wolframkarbidschichten aufgetragen. Die Bearbeitungszugabe der Wolframkarbidbeschichtung auf den Radien wird optisch vermessen und ausgewertet. Aus der Analyse der Höhenvermessung der auf Radien erzeugten funktionellen Beschichtung ergibt sich eine verbesserte Kontur der Radien, um den gesamten Radius endmaßnah beschichten zu können.

Als Ausblick werden am Ende der Arbeit Radien eines realen-B-Säulen Werkzeugs aus 1.2343 mit Wolframkarbiden in einer Ni25-Matrix beschichtet. Dafür werden die am besten geeignetsten Schweißparametersätze aus Ni25 und 1.2343 verwendet. Erste Vorversuche mit diesem Werkzeug sind in der Planung.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A	$[\%]$	Aufmischungsgrad
A_B	$[mm^2]$	Querschnittsfläche der Vermischungszone
A_C	$[mm^2]$	Querschnittsfläche der einzelnen Schweißraupe
b	$[mm]$	Schweißlinienbreite
c	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Lichtgeschwindigkeit
d_L	$[mm]$	Bahnmittenabstand zwischen Schweißlinien
E_S	$\left[\frac{J}{mm}\right]$	Streckenenergie
\vec{E}_F	$\left[\frac{V}{m}\right]$	elektrische Feldstärke
Δf_B	$[mm]$	Brennweitenverschiebung
f_L	$[Hz]$	Tastfrequenz Laser
F_N	$[N]$	Normalkraft
F_P	$\left[\frac{g}{min}\right]$	Pulverförderrate
F_R	$[N]$	Reibkraft
h_1	$[mm]$	Schweißlinienhöhe
h_2	$[mm]$	Einbrandtiefe ins Substrat
\vec{H}	$\left[\frac{A}{m}\right]$	magnetische Feldstärke
k	$\left[\frac{m^3}{N \cdot mm}\right]$	Verschleißrate
O_L	$[\%]$	Bahnüberlappungsgrad
P_L	$[W]$	Laserleistung

s	$[m]$	Gleitweg
S_L	$[\%]$	Bahnabstandsfaktor
T_{VW}	$[^{\circ}C]$	Vorwärmtemperatur
v	$\left[\frac{mm}{min}\right]$	Vorschubgeschwindigkeit
v_s	$\left[\frac{mm}{s}\right]$	Gleitgeschwindigkeit
W_{Ad}	$[J]$	Adhäsionsanteil der Arbeit
W_{Bruch}	$[J]$	Bruchanteil der Arbeit
W_{Def}	$[J]$	Deformationsanteil der Arbeit
W_R	$[J]$	Reibungsarbeit
W_V	$[m^3]$	Verschleißvolumen
λ	$[\mu m]$	Wellenlänge
μ	$[-]$	Reibbeiwert

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung (Bliedtner et al. 2013).....	3
Abbildung 2: Absorption, spontane und induzierte Emission (Bliedtner et al. 2013).....	4
Abbildung 3: Tribologisches System (Gesellschaft für Tribologie 2002)	7
Abbildung 4: Stribeckkurve (Anton Paar).....	9
Abbildung 5: Metallphysikalische Merkmale in der Mikrotribologie (Czichos 2010)	10
Abbildung 6: Verschleißmechanismen (Czichos 2010)	11
Abbildung 7: Automatisiertes Laserauftragsschweißen (Buchfink und Leibinger-Kammüller 2006)..	15
Abbildung 8: Links: Laseranlage Trumpf DMD 505, 5-Achsen-CNC, 3200 Watt CO ₂ -Laserzelle; Mitte: 4-Strahldüse; Rechts: hermetisch abgedichteter Pulverbehälter.....	16
Abbildung 9: Reparatur einer Pumpenwelle mittels Laserauftragschweißen (Marcomin 2016)	17
Abbildung 10: Prozessablauf des direkten Presshärtens (Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP 2013)	18
Abbildung 11: Aufmischungsgrad	19
Abbildung 12: Eigenspannungen in der Beschichtung (Kanani 2007)	20
Abbildung 13: Entstehung von Eigenspannungen in Abhängigkeit der Temperatur	21
Abbildung 14: Prozessparameter beim Laserauftragschweißen.....	27
Abbildung 15: Kupferheizplatte.....	31
Abbildung 16: Sichtprüfung einer 12Flächenprobe nach dem LMD-Prozess: auf allen zwölf Flächen sind Risse sichtbar	34
Abbildung 17: Stereomikroskopische Aufnahme eines Risses	35
Abbildung 18: Links: Härtemessgerät; Rechts: Vickershärtemessung (Macherauch und Zoch 2011). 36	
Abbildung 19: Prüfaufbau Haftfestigkeitsversuch	37
Abbildung 20: Links: Scherfestigkeitsprüfstand; Mitte: Probenkörper vor dem Scherversuch; Rechts: im Prüfstand fixierter Probenkörper.....	38
Abbildung 21: Strategie zur Herstellung einer endmaßnahen Beschichtung	40
Abbildung 22: Chronologischer Versuchsablauf nach dem EPC-Modell.....	42
Abbildung 23: Ermittlung der Pulverfördertrate am Beispiel Ni25	43
Abbildung 24: Linienproben	44
Abbildung 25: Oben: Geometrie einer Schweißbahn; Unten: Geometrie einer geschweißten Fläche..	46
Abbildung 26: 12Flächenprobe	46
Abbildung 27: Prüfkörper einer 12Flächenprobe.....	47
Abbildung 28: Bei Zerspanung zerstörte 12Flächenprüfkörper	48
Abbildung 29: Zylinderproben.....	49
Abbildung 30: 1Flächenprobe	50
Abbildung 31: WSC Linienprobe auf Ni25 – Beschichtung.....	51
Abbildung 32: Probe 146: Substrat: 1.7131, 1Fläche: Ni25 (250°C), vier Flächen WSC (400°C)	52
Abbildung 33: Probe 238: Radius-Doppelradiusprobe, Beschichtung: WSC in Ni25 Matrix	53
Abbildung 34: Fehlerbalkendiagramm der Härte und Zugkraft Ni25 auf 1.1730, 1.2343 und 1.7131 aus 144 Versuchen.....	55
Abbildung 35: Haupteffektdiagramm für 1.1730 und 1.7131	56
Abbildung 36: Boxplot für Zugkraft und Härte für 1.1730 und 1.7131	57
Abbildung 37: Haupteffektdiagramm für 1.2343 aus 84 Versuchen.....	58
Abbildung 38: Streudiagramm für 60 Versuche 1.2343 bei 400°C Vorwärmung	58
Abbildung 39: Fehlerbalkendiagramm für 60 Versuche 1.2343 bei 400°C Vorwärmung.....	59
Abbildung 40: Fehlerbalkendiagramm der Härte und Zugkraft Ni40 auf 1.1730 und 1.2343	60
Abbildung 41: Paretodiagramm Zugkraft und Härte für 1.2343 und Ni40	61

Abbildung 42: Fehlerbalkendiagramme für den Einfluss der Effekte Spurüberlappungsfaktor und Pulverförderrate auf Härte und Zugkraft bei 1.2343 und Ni40	61
Abbildung 43: Boxplot für Zugkraft und Härte von 1.2343 und Ni40.....	62
Abbildung 44: Haupteffektdiagramm Zugkraft und Härte für 1.1730 und Ni50	63
Abbildung 45: Paretodiagramm Zugkraft und Härte für 1.1730 und Ni50 aus 36 Versuchen.....	63
Abbildung 46: Fehlerbalkendiagramm Zugkraft und Härte für 1.1730 und Ni50 aus 36 Versuchen ...	64
Abbildung 47: Fehlerbalkendiagramm Zugkraft und Härte 1.1730 und 1.2343 NiBSi aus 72 Versuchen	65
Abbildung 48: Paretodiagramm Zugkraft und Härte für 1.1730 und NiBSi (Nur 1.1730 und NiBSi) .	66
Abbildung 49: Fehlerbalkendiagramm Zugkraft und Härte 1.1730 NiBSi	66
Abbildung 50: Paretodiagramm Zugkraft und Härte für 1.2343 und NiBSi 24 Versuche	67
Abbildung 51: Fehlerbalkendiagramm Zugkraft und Härte 1.2343 NiBSi 24 Versuche	68
Abbildung 52: Zerstörte 12Flächenproben nach der Haftfestigkeitsprüfung	69
Abbildung 53: Fehlerbalkendiagramm der Zugkraft über alle ausgewerteten 372 Zugversuche.....	70
Abbildung 54: Fehlerbalkendiagramm Zugkraft und Scherkraft 1.2343, Ni25 aus 27 Versuchen	71
Abbildung 55: Bruchflächen von Scherfestigkeitsproben.....	72
Abbildung 56: Arithmetische Mittelwerte der erreichten Höhen der Wolframkarbidsschicht	74
Abbildung 57: Vergleich Ni25 – Ni40 – NiBSi in 1000facher Vergrößerung, dendritische Gefügeausbildung.....	75
Abbildung 58: Ni25_1 Feld 1	76
Abbildung 59: Ni25_2 Feld 4.....	77
Abbildung 60: Ni40_1 Feld 4.....	78
Abbildung 61: Ni40_2 Feld 1 und Feld 3.....	79
Abbildung 62: NiBSi_1 Feld 2 und Feld 3.....	80
Abbildung 63: NiBSi_2 Feld1, Feld 2 und Feld 3.....	81
Abbildung 64: Härteverlauf: Substrat 1.7131: Wolframkarbide in Nickelbasismatrix Ni25	82
Abbildung 65: Zwei Lagen Ni25 auf 1.2343.....	84
Abbildung 66: Normalvektoren entlang Einfachradius.....	85
Abbildung 67: Schnitte zur Höhenvermessung des Einfachradius – links radiale Schnitte – rechts horizontale Schnitte	85
Abbildung 68: Einfachradius Höhen aus den Radialschnitten	86
Abbildung 69: Einfachradius Höhen aus den horizontalen Schnitten	87
Abbildung 70: Schnitte zur Höhenvermessung des Doppelradius – links radiale Schnitte – rechts horizontale Schnitte	87
Abbildung 71: Doppelradius Höhen aus den Radialschnitten.....	88
Abbildung 72: Doppelradius Höhen aus den horizontalen Schnitten.....	89
Abbildung 73: Ursprüngliche und verbesserte Radiuskontur	90
Abbildung 74: Oberflächenqualität der Radius-Doppelradiusprobe nach der mechanischen Bearbeitung (Kaeser 2016).....	91
Abbildung 75: Fertig beschichtete Radien der beiden Segmente des Realwerkzeugs	93

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Wesentliche Begriffe in der Versuchsplanung (Kleppmann 2013).....	23
Tabelle 2: Substratwerkstoffe (meusburger)	28
Tabelle 3: Eigenschaften der verwendeten Metallpulver (Nt Systemlösungen 2016)	29
Tabelle 4: Schweißparameter der Linienprobe 136.....	44
Tabelle 5: Werkstoff- und Schweißparameter der 1Flächenproben, Verwendungszweck.....	50
Tabelle 6: Schweißparameter Linienprobe 144.....	51
Tabelle 7: Erklärung von verwendeten Abkürzungen	55
Tabelle 8: Parametersätze für die zwölf zu vergleichenden Proben.....	56
Tabelle 9: Schweißparameter ausgewählter Proben 1.2343 und Ni25 für den Vergleich Haftfestigkeit – Scherfestigkeit.....	71
Tabelle 10: Vergleich der Zugkraft und der Scherkraft Feld 3, Probe 99	72
Tabelle 11: Schweißparameter der Nickelbasispulver für das Schweißen der 1Flächenproben für das Auftragen der Wolframkarbide	72
Tabelle 12: Schweißparameter für das Auftragen der Wolframkarbidschichten	73
Tabelle 13: Schweißparameter der Probe für den Härteverlauf.	82
Tabelle 14: Schweißparameter für das Auftragen der Ni25 Beschichtung auf 1.2343	83
Tabelle 15: Schweißparameter für die Beschichtung des Realwerkzeuges.....	92

LITERATURVERZEICHNIS

Amado, J. M.; Montero, J.; Tobar, M. J.; Yáñez, A. (2012): Ni-based metal matrix composite functionally graded coatings. In: *Physics Procedia* (39), S. 362–367. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187538921202576X>, zuletzt geprüft am 16.12.2015.

Anton Paar: Tipps und Tricks von Joe Flow – Stribeck-Kurven: Ein leistungsfähiges Werkzeug für die Tribologie kurz erklärt. Hg. v. Anton Paar. Online verfügbar unter http://www.world-of-rheology.com/fileadmin/public/rheology/Tips_Tricks_Joe_Flow/XRRIA021DE-A_Joe_Flow_Stribeck_Curves.pdf.

Bliedtner, Jens; Müller, Hartmut; Barz, Andrea (2013): Lasermaterialbearbeitung. Grundlagen - Verfahren - Anwendungen - Beispiele ; mit 110 Tabellen sowie einer DVD. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl.

Böhler - Edelstahl: W300 Warmarbeitsstahl. Hg. v. Böhler. Online verfügbar unter <http://boehler.kunden.cmszwo.de/Info/W-Staehle/W300DE.pdf>, zuletzt geprüft am 23.06.16.

Buchfink, Gabriela; Leibinger-Kammüller, Nicola (Hg.) (2006): Werkzeug Laser. Ein Lichtstrahl erobert die industrielle Fertigung. 1. Aufl. Würzburg: Vogel.

Czichos, Horst (2010): Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Unter Mitarbeit von Karl-Heinz Habig. 3.Auflage. Berlin: Vieweg + Teubner.

Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung (Hg.) (2007): Neue Wege zum wirtschaftlichen Leichtbau. Innovative Lösungen zur Blechumformung und mechanischen Fügetechnik. Hannover: Druckteam GmbH.

Fahrenwaldt, Hans J.; Schuler, Volkmar.

Fiehl + Cremer: Oberflächentechnologie. Hg. v. Fiehl + Cremer GmbH + Co KG. Online verfügbar unter <http://www.fiehlcremer.de/metallspritzen/wolframcarbid.html>.

Fraunhofer IWU (Hg.): Presshärten. von Blechen und geschlossenen Profilen.

Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP (2013): Zerstörungsfreie Prüfung pressgehärteter Karosserieteile mit 3MA. Unter Mitarbeit von Christian Conrad, Rolf Kern, Harald Kopp und Bernd Wolter. Fraunhofer Institut.

Gesellschaft für Tribologie (Hg.) (2002): Arbeitsblatt 7 Tribologie: Verschleiß, Reibung. Definition, Begriffe, Prüfung. Unter Mitarbeit von Ludger Deters, Alfons Fischer, Erich Santner und Ulrich Stolz. Online verfügbar unter http://gft-ev.de/wp-content/uploads/2014/07/2002_AB_7_Tribologie.pdf.

iwb (2015): Prozessbegleitendes dynamisches Spannen zur Verzugs- und Eigenspannungsreduzierung beim Schweißen von Bauteilen. Hg. v. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften Technische Universität München. München. Online verfügbar unter <http://www.iwb.tum.de/DynSpann.print>.

Kaaser, Marco (2016): Testbearbeitung HSM 400U LP. TU Graz. Unter Mitarbeit von Radiusprobe Endgeometrie V1. Hg. v. +GF+. Georg Fischer. Nidau.

Kanani, Nasser (2007): Moderne Mess- und Prüfverfahren für metallische und andere anorganische Überzüge. Mit 174 Bildern und 23 Tabellen. Unter Mitarbeit von Thomas Asam, Gottfried Frankowski, Axel Fuhrmann, Stefan Gerhold, Corinna Harnisch, Dieter Klaffke et al. Renningen: expert verlag.

Kleppmann, Wilhelm (2013): *Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*. Praxisreihe Qualitätswissen. 8., überarbeitete Auflage. München: Hanser.

Macherauch, Ernst; Zoch, Hans-Werner (2011): *Praktikum in Werkstoffkunde*. 91 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik. 11. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

Marcomin, Stefano (2016): *Laser-Pulver-Auftragsschweißen*. Reitze ® Systemlieferant für Anlagentechnik. Bremen. Online verfügbar unter <http://www.reitze.com/de/service/lpa-schweissen/>, zuletzt geprüft am 25.04.2016.

meusburger: *Materialqualitäten*. Hg. v. Georg Meusburger. meusburger. Wolfurt. Online verfügbar unter http://www.meusburger.com/fileadmin/user_upload/dateien/materialqualitaeten/Materialqualitaeten_DE.pdf, zuletzt geprüft am 23.06.16.

NT Systemlösungen: *nt Metallpulver auf Nickelbasis*. NT Systemlösungen. Online verfügbar unter <http://www.nt-systemloesungen.de/index.php/de/produkt/pulverlegierungen/nickelbasis>, zuletzt geprüft am 23.06.16.

Pototschnigg, Daniel (2014): *Entwicklung eines Prüfstandes zur Ermittlung der Haftfestigkeit von mittels Laser auftraggeschweißten Beschichtungen*. Bachelorarbeit. TU Graz, Graz. Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion.

Przybyłowicz, J.; Kusiński, J. (2001): *Structure of laser clad tungsten carbide composite coatings*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 109 (1–2), S. 154–160. DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00790-1.

Robert Vollmer (2016): *Optimierung mittels Laserauftragsschweißen hergestellter Beschichtungen für die Blechumformung*. Dissertation. TU Graz, Graz. Werkzeugtechnik und Spanlose Produktion.

Sommer, Karl; Heinz, Rudolf; Schöfer, Jörg (2014): *Verschleiß metallischer Werkstoffe. Erscheinungsformen sicher beurteilen*. 2., korr. u. erg. Aufl. 2014. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2464-6>.

voestalpine (2014): *Vorwärmen - Wann? Wie hoch?* Hg. v. voestalpine. Wallisellen, zuletzt geprüft am 22.03.2016.

Walter, Jens (2007): *Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung*. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Online verfügbar unter <https://books.google.at/books?id=eOgYbuzBlNAC&pg=PA54&lpg=PA54&dq=Aufmischungsgrad&source=bl&ots=x9V6aVIIbT&sig=N82D6riyyQNkAtdN2i6djiyDzhQ&hl=de&sa=X&ved=0CDsQ6AEwBmoVChMI7ubB77OgxwIVwz0UCh1RDgtU#v=onepage&q=Aufmischungsgrad&f=false>, zuletzt geprüft am 25.08.2015.

Zhenda, Chen; Leong Chew, Lim; Ming, Qian (1996): *Laser cladding of WC • Ni composite*. In: *2nd International Conference on Production Engineering* 62 (4), S. 321–323. DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02428-4.