



Robert Vollmer, Dipl.-Ing.

# Optimierung mittels Laserauftragschweißen hergestellter Beschichtungen für die Blechumformung

## DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck †

Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion

Gutachter

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch

Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik



---

## Eidesstattliche Erklärung

### *Affidavit*

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 Dissertation identisch.

*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 the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present doctoral dissertation.*

Graz, am 04.02.2016

Unterschrift



---

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugtechnik und Spanlose Produktion an der Technischen Universität Graz durchgeführt. Das Verfassen einer Dissertation fordert, wie allgemein bekannt, vom Verfasser seinen Tribut. Wie immer es im Rahmen eines solchen Projekts Höhen und Tiefen gibt, überwiegen rückblickend gesehen die positiven Erinnerungen deutlich. Nicht zuletzt ist das der Unterstützung von vielen Menschen aus meinem persönlichen Umkreis geschuldet. Diesen möchte ich hiermit meinen ganz besonderen Dank aussprechen.

Der Abschluss dieser Arbeit ist überschattet durch den plötzlichen und unerwarteten Tod meines Betreuers, Vorgesetzten und Freundes Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck. Ihm gilt mein besonderer Dank für die gemeinsame Zeit am Lehrstuhl und für die Betreuung der Arbeit. Sein plötzlicher Abschied hat nicht nur eine große Lücke am Institut entstehen lassen, sondern er hinterlässt auch seine Frau Marit und die Kinder Elias und Max, welchen meine Anteilnahme gilt.

Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch möchte ich sehr dafür danken, dass er sich vorbehaltlos der weiteren Betreuung und Begutachtung der Arbeit gewidmet hat. Auch meinem Zweitgutachter Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt möchte ich herzlich für das Interesse und die Bereitschaft bedanken sich mit dieser Arbeit auseinander zu setzen.

Ebenfalls danken möchte ich allen meinen Institutskollegen, die mir stets hilfsbereit zur Seite gestanden sind und mich immer wieder mit guten Ideen, Gedanken und anderen Hilfestellungen versorgt haben. Besonders erwähnen möchte ich in diesem Zusammenhang Marina Kofler, Vladimir Boskovic, Philipp Schwemberger, Raphael Hatzer, Andreas Swoboda, Heinz Fasching, Nino Müllner, Patrick Lichtenegger, Daniela Neukam und Eva Keinrath. Ebenfalls gilt mein Dank auch den Studenten, welche ich im Rahmen des Studiums als Diplomanden bzw. Bakkalaureaten betreuen durfte. Sie waren für mich ebenfalls eine große persönliche Bereicherung.

Vor allem meiner Frau Sarah und meinen drei Kindern Samuel (4), Noah (2) und Hanna (1) möchte ich Danke sagen, dass sie mich nicht nur persönlich bereichert, sondern stets motiviert und zur Fertigstellung der Dissertation unterstützt haben. Durch nichts auf der Welt kann man besser Abschalten und auf andere Gedanken gebracht werden. Auch meinen Eltern, Schwiegereltern und Geschwistern möchte ich herzlich danken für die vielen kleinen und großen Hilfestellungen während dieser Zeit, ohne die es faktisch nicht möglich gewesen wäre, die Arbeit fertig zu stellen.



---

## Kurzfassung

Durch den Einsatz von höchstfesten und ultrahochfesten Blechwerkstoffen im Bereich der Fahrzeugindustrie werden die Herausforderungen für Lösungen der Werkzeugsysteme, die für die Herstellung solcher Teile benötigt werden, immer größer. Zum einen gilt es die Anforderungen hinsichtlich Werkzeugverschleiß, tribologischer Oberflächeneigenschaften, kurzer Herstellzeiten und Änderungsmöglichkeiten im Design möglichst geringen Herstellkosten gegenüberzustellen. Zum anderen gilt es ein Umdenken im klassischen Werkzeugbau von neuen Prozesslösungen mit innovativen Fertigungsverfahren durchzusetzen. Eine Möglichkeit besteht in der Anwendung des Laserauftragschweißens von Werkzeugwirkflächen im Bereich der Blechumformung. Lange Zeit war der Prozess des Schweißens in diesem Produktionszweig nicht gerne gesehen. Relativ neue Methoden wie das Laserschweißen, haben jedoch die Qualität der gefertigten Beschichtungen soweit verbessert, dass diese nun für diesen Bereich der Produktionstechnik nutzbar gemacht wurden. Im ersten Schritt werden neue Schweißoptiken und –düsen entwickelt, welche die Qualität der Schweißergebnisse signifikant verbessern. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich im Weiteren mit der Entwicklung von Beschichtungssystemen für Werkzeugoberflächen, welche vor allem für die Verarbeitung von austenitischen Edelstählen und ultrahochfesten Stählen in der Warmumformung zum Einsatz kommen. Um das Fenster der Prozessparameter richtig einstellen und optimieren zu können, wird zudem eine Methode zur quantitativen Bewertung solcher Schichten im Hinblick auf die Werkzeugtechnik entwickelt. Ein geeignetes Werkzeug hierfür ist die statistische Versuchsplanung, welche Qualitätsmerkmale einer Beschichtung wie Härte und Haftfestigkeit auf dem Substrat beurteilen und optimieren kann. Des Weiteren besteht die Möglichkeit Beschichtungswerkstoffe spezifischen tribologischen Verschleißuntersuchungen mit einem speziell dafür entwickelten Tribometer zu unterziehen und auszuwerten. Eine Besonderheit des Laserauftragschweißverfahrens liegt im komplexen 3-dimensionalen Aufbau von Strukturen (ähnlich dem Rapid Prototyping), welche Lösungen wie zum Beispiel die Herstellung oberflächennaher Kühlkanäle ermöglicht. Diese werden speziell bei Werkzeugen für die Warmumformung benötigt. Konzepte und Lösungen für diese Ansätze werden in dieser Arbeit ebenfalls erarbeitet und getestet.



---

## Abstract

The usage of advanced and ultra high strength steels in the automotive industry demand requirements pose challenge for the tooling components producing those car body parts. New tooling solutions are needed to meet the requirements regarding tool wear, tribological surface condition, short time of manufacturing, the possibilities of flexible design changes and a cost effective production. New approaches also need to rethink solutions offered by the conventional toolmaking, leading to new processes and innovative manufacturing techniques. A possible and rather new solution is offered by the laser cladding process for active tool surfaces in the field of sheet metal forming. For a long time the welding process was rather avoided in toolmaking techniques. New methods like the laser welding process have increased the quality properties of cladded tool surfaces, so that an application in production engineering is now possible. In a first step welding optics and nozzles are redesigned to improve the cladding quality. Current research is focusing on the development of coating systems for tool components especially needed to process austenitic stainless steels and the hot forming of ultra high strength steels. To find and optimize the process window of such laser cladded coatings specific evaluation methods are needed to quantify the coatings properties for tooling applications. The quality attributes like the adhesive tensile strength and the hardness of the coatings are improved by applying the design of experiment method. Additionally a specific tribometric testing device is available to look at the particular wear mechanisms and make detailed evaluations and optimizations of coating systems. A special feature of the laser cladding process is the possibility to create three dimensional structures similar to other rapid prototyping methods. Such characteristics can be used for the manufacturing of surface near cooling channels especially needed in hot forming tools. Concepts and solutions to this approach are also content of this work.



---

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik .....	5
2.1	Werkzeugtechnik für die Blechumformung.....	5
2.1.1	Das tribologische System der Blechumformung .....	5
2.1.2	Aufbau und Bauweisen von Umformwerkzeugen .....	13
2.1.3	Werkzeugwerkstoffe und Beschichtungen zur Umformung hoch- und höchstfester Stähle.....	18
2.2	Laser in der Produktionstechnik.....	28
2.2.1	Grundlagen der Lasertechnologie .....	28
2.2.2	Wechselwirkung Laser – Werkstück .....	34
2.2.3	Leistungsdichten und Einwirkzeiten .....	36
2.2.4	Eingesetzte Lasertypen in der Fertigungstechnik .....	37
2.3	Überblick generativer Laserverfahren .....	38
2.3.1	Allgemeine generative Laserverfahren.....	39
2.4	Laserauftragschweißen.....	39
2.4.1	Prozessprinzip .....	39
2.4.2	Allgemeine Anwendungsgebiete .....	44
2.4.3	Laserauftragschweißen bei Werkzeugen für die Umformtechnik .....	45
3	Aufgabenstellung.....	47
4	Anlagentechnik.....	49
4.1	Allgemeine Anlagendaten .....	49
4.2	Programmierung.....	49
4.3	Laserquelle und Strahlführung .....	51
4.4	Pulverförderung .....	53
4.5	Bearbeitungsoptiken .....	56
4.6	Aktive Prozessregelung .....	61
4.7	Vorwärm- und WBH-Anlagen .....	61
5	Beispiele von LMD-Beschichtungen in der Umformtechnik.....	65
5.1	Beschichtungssysteme für die Umformung von austenitischen Edelstählen .....	65
5.2	Beschichtungssysteme für die Warmblechumformung.....	66
5.3	Oberflächennahe Kühlkanäle für Warmformwerkzeuge .....	71
6	Qualitätsmerkmale und Prüfmethode von LMD Schichten.....	75
6.1	Qualitätsmerkmale und Fehlerarten zur Beurteilung von LMD Schichten .....	75
6.1.1	Risse .....	75

---

6.1.2	Poren	78
6.1.3	Delamination und Haftfestigkeit der Beschichtung	79
6.1.4	Härte und Härteverläufe	81
6.2	Prüfmethoden	82
6.2.1	Farbeindringprüfung	82
6.2.2	Härtemessung	83
6.2.3	Metallografie – Schichtaufbau	85
6.2.4	Haftfestigkeitsversuch	86
6.2.5	Scherfestigkeitsversuch	89
6.2.6	Tribometerversuche	90
7	Parameteroptimierung von LMD Schichten	95
7.1	Evaluierung der LMD Prozessparameter	96
7.1.1	Beschreibung der getesteten Einstellparameter	97
7.1.2	Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der Schweißparameter	99
7.1.3	Entwicklung standardisierter Tests	99
7.2	Parameteroptimierung mittels DoE	103
7.2.1	Grundlegendes zur statistischen Versuchsplanung	103
7.2.2	Methodenplanung zur Optimierung der Qualitätsmerkmale Härte und Haftfestigkeit	107
8	Ergebnisse	111
8.1	Eisenbasierte Legierungen	111
8.2	Kupferbasislegierungen	121
8.3	Nickelbasislegierungen	132
9	Zusammenfassung und Ausblick	139
	Abkürzungsverzeichnis	141
	Formelverzeichnis	143
	Abbildungsverzeichnis	145
	Tabellenverzeichnis	153
	Literaturverzeichnis	155
	Anhang	165

---

# 1 Einleitung

Die integrative Produktionstechnik des 21. Jahrhunderts erfordert industrielle Produktionssysteme die sowohl flexibles, als auch dynamisches Ansprechverhalten aufweisen. Ein plakatives Beispiel stellt die Entwicklungen der Automobilindustrie in den vergangenen Jahrzehnten dar. Hatte zum Beispiel ein namhafter deutscher Automobilhersteller in den 1980ern sieben unterschiedliche Modelle im Programm sind es derzeit 28 Modelle und Derivate die im Handel erhältlich sind. Der menschliche Wunsch nach Individualität und stetiger Erneuerung fordert die Produktionstechnik und veranlasst sie zu Innovationen, Neuentwicklungen und der Vernetzung von Technologien in immer kürzer werdenden Zeitabständen.

Als das Team um Theodore H. Maiman 1960 im Hughes Research Laboratorium in Kalifornien zum ersten Mal das Licht eines Rubin Lasers entzündete vermochte noch niemand das enorme Potential dieser Erfindung und deren vielfältigen Einsatzmöglichkeiten zu erkennen. Maiman selbst soll einmal gesagt haben: *Der Laser ist eine Lösung, welche ihr Problem sucht* (Martin 2007). Nach zuerst zögerlicher Akzeptanz und geringem Wissen über Einsatzmöglichkeiten fand in den Folgejahren eine wahre Flut von Problemlösungen mittels dieser Neuerfindung statt. Mittlerweile ist ein Arbeiten ohne Laserlicht schier unmöglich geworden. Es findet seinen Einsatz sowohl in High-Tech Anlagen als auch in alltäglichen Gebrauchsgegenständen wieder. Medizin, Kommunikation, Daten-, Mess- und Produktionstechnik sind Disziplinen in denen der Laser nicht mehr wegzudenken ist. Im Bereich der Metallverarbeitung und Produktionstechnik lagen die Anfänge in den 1980ern. Schneiden, Fügen, Gravieren sind nur einige der Anwendungen in der Fertigungstechnik, welche mittels Laser einem monochromatischem, kohärentem und gerichtetem Lichtstrahl, durchgeführt werden. In diesem breiten Spektrum von Bearbeitungstechnologien kommt auch das Laserauftragschweißen zum Einsatz. Unter Laserauftragschweißen versteht man eine Technologie bei welcher partielle oder vollständige Beschichtungen eines metallischen Substrats mit einem metallischen oder keramischen Beschichtungswerkstoffes mittels Laserenergie aufgetragen werden. Mit der Entwicklung dieser und ähnlicher Verfahren wurde ein langersehnter Wunsch der flexiblen Kombination unterschiedlicher Fertigungstechniken wie dem Auftragen, Abtragen und Ändern von Stoffeigenschaften, wenn möglich in einer Fertigungseinheit, erfüllt. (Brecher 2011, S. 634)

Als Grund für das starke Interesse an diesem Verfahren macht Toyserkani et al. (2005, S. 14) folgende Vorteile geltend:

- Reduktion der Fertigungszeiten
- Verbesserung der thermischen Prozesskontrolle durch die sehr stark lokal begrenzte Energieeinbringung des Lasers
- Möglichkeit der (wiederholten) Reparatur von Bauteilen
- Herstellung eines Bauteils mit funktionellen Eigenschaften durch Verwendung von unterschiedlichen Werkstoffen
- Herstellung von komplexen Bauteilstrukturen

Mehrheitliches Einsatzgebiet des Laserauftragschweißen liegt heute im Bereich der Fertigung und Reparatur von Turbinenschaufeln (Toyserkani et al. 2005, S. 19). Aber auch Einsatzgebiete in der Medizintechnik zur Fertigung von Implantatstrukturen (Kumar et al. 2014), der Beschichtung von Verschleißschutzschichten an Bohrgestängen (Schoeller-Bleckmann Oilfield Equipment AG 2014), der Herstellung von Ventil- oder anderer Verschleißkomponenten von Pumpen bzw. Motoren und der Optimierung aktiver Werkzeugkomponenten für den Druckguss (Nowotny et al. 2010) sind nur einige der aktuellen Anwendungsgebiete in denen das Laserauftragschweißen unentbehrlich geworden ist. Die stetige Weiterentwicklung dieses Verfahrens und immer leistungsfähigere Laserquellen machen es auch attraktiv für Entwicklungen im Bereich der Fertigung von aktiven Werkzeulementen für die Umformtechnik.

Der Bereich der Umformung von Blechbauteilen hat sich, wenn auch nicht mit der rasanten Entwicklung der Lasertechnik vergleichbar, in den vergangenen Jahren laufend verändert. Wobei ein Faktor konstant geblieben ist. Stahl im konventionellen Automobilbau ist nach wie vor der meist eingesetzte Karosseriewerkstoff. Entwicklungen der vergangenen Jahre haben jedoch ein enormes Potential dieses Werkstoffes freigelegt. Wurden in den 80er Jahren hauptsächlich weichere Güten, sogenannte Mild-Steels verarbeitet, werden heute signifikante Gewichtseinsparungen bei gleichzeitig enorm gesteigener Sicherheitsperformance durch gezielten Einsatz von hoch- und höchstfesten Stahlwerkstoffen erzielt. Grundsätzlich stehen sich bei diesem Werkstoff die Eigenschaften Zugfestigkeit und Verformbarkeit entgegengesetzt gegenüber. Dies erklärt im Wesentlichen warum zum einen die Komplexität der Umformprozesse und zum anderen die Ansprüche an die Werkzeugkomponenten immer mehr zunimmt. Durch die Entwicklung der TRIP Stähle (TRansformation Induced Plasticity) wurde jedoch bereits ein großer Schritt in Richtung höchstfester Stähle mit 30% – 40% Restbruchdehnung gemacht. Aktuelle Entwicklungen der TWIP Stähle (Twinning Induced Plasticity) lassen noch bessere Materialeigenschaften erwarten. Angestrebt sind hier Zugfestigkeiten von ca. 1000MPa bei Bruchdehnungen von 50%. Diese Werkstoffe befinden sich zurzeit noch in der Entwicklungsphase, werden jedoch in naher Zukunft am Markt erwartet. Zur Herstellung ultrahochstfester Stähle mit 1600MPa Zugfestigkeit und mehr hat sich die Warmumformung bzw. das direkte Presshärten etabliert. Hierbei geschieht die Umformung im erwärmten und dadurch wesentlich duktileren Zustand des Bleches unter geringeren mechanischen Belastungen. Jedoch benötigen die Werkzeugkomponenten ausreichende thermische Wechselfestigkeit und Verschleißschutz gegen abrasiv wirkende Medien wie Zunder. Die schnelle Abkühlung der Platine im geschlossenen Werkzeug erfordert wiederum eine optimale Wärmeabfuhr.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich im Wesentlichen als Bindeglied zwischen der Umformtechnik und der angewandten Lasertechnik. Bei allen vorher genannten Funktionen kann das Laserauftragschweißen bei aktiven Werkzeugoberflächen Verbesserungsmöglichkeiten schaffen. Jedoch sind solche Verfahren erst punktuell in der Werkzeugtechnik eingesetzt worden, da im wesentlichen Prozess-Know-How fehlt und teilweise Veränderungen in den Werkzeugkonzepten notwendig sind. Ersteres liegt in der geringen Erfahrung von artfremden Werkstoffkombinationen wie z.B. Stahl/Bronze-, Stahl/Nickel- oder Stahl/Kobalt-Legierungen begründet. Teilweise werden

---

oftmals als nicht schweißbar bezeichnete Werkstoffe oder Werkstoffkombinationen verarbeitet und die Vielzahl von möglichen Einstellparametern erschweren zudem die Auswahl des „richtigen“ Prozesses. Aufgrund dieser vielzähligen Eingangsparameter ist daher die Entwicklung von Lösungswegen für die Überführung in die optimale Zielgröße zwingend notwendig. Beim Laserauftragschweißen wurden anfangs vor allem Trial-and-Error Methoden zur Machbarkeit bzw. Verbesserungen der Ergebnisse durchgeführt. Des Weiteren kommen immer mehr numerische Methoden zum Einsatz welche mittels empirischen Werkstoffmodellen oder exakteren Mikrostrukturmodellen arbeiten. Diese werden hauptsächlich zur Ermittlung der im Prozess entstehenden thermischen Spannungen und des daraus resultierenden Bauteilverzugs bzw. Abschätzung zur Rissbildung eingesetzt. Die notwendigen Werkstoffdaten und Randbedingungen sind jedoch nur durch sehr zeit- und kostenintensive Untersuchungen ermittelbar. Aus diesem Grund werden diese Methoden hauptsächlich zur Verbesserung von schon bewährten Prozessen erfolgreich eingesetzt.

Der Fokus dieser Arbeit liegt hauptsächlich in der Entwicklung von phänomenologischen Modellen durch die Anwendung von statistischen Methoden oder sogenannte Design-of-Experiment (DoE) Ansätzen. Diese können zur signifikanten Verbesserung von Beschichtungsprozessen genutzt werden. Ziel ist es bei einer Beschichtungskonfiguration im vertretbaren Aufwand die wesentlichen Einflussfaktoren zu ermitteln und durch geeignete Veränderung dieser, eine Zielgrößenoptimierung durchzuführen. Diese Zielgrößen sind in diesem Fall Eigenschaften der Beschichtung welche im Speziellen auch für den Einsatz in einem Umformwerkzeug notwendig und wichtig sind. Dadurch kann eine sehr effiziente und anwendungsorientierte Prozessoptimierung durchgeführt werden. Das Aufzeigen dieser Potentiale von mittels Laserauftragschweißen hergestellten Beschichtungen soll als weiterer Impuls für den industriellen Einsatz dieser Technologie dienen.



---

## 2 Stand der Technik

Mit den sich laufend veränderten Umformprozessen geht auch eine stetige Weiterentwicklung der Werkzeugtechnik einher. Ermöglicht wurde dies zum einen durch die Weiterentwicklung von schon lange entwickelten Verfahren, wie z.B. die Überführung der konventionellen Zerspanung in den HSC Bereich um gehärtete Werkzeugstähle zu bearbeiten. Zudem wurden galvanische und andere physikalische bzw. chemische Beschichtungsverfahren wie das PVD oder CVD signifikant verbessert und weiterentwickelt. Zum anderen kommen auch Neuentwicklungen in den vergangenen Jahrzehnten hinzu, die den Werkzeugbau und dessen Lösungsansätze maßgebend beeinflusst haben. Hierzu seien insbesondere Fertigungsverfahren, wie das EDM und insbesondere die Lasertechnik erwähnt.

Vor allem die Beschichtungstechnik hat einen maßgebenden Einfluss auf die Entwicklung der Werkzeugtechnik. Die DIN 8580 definiert die fünfte Hauptgruppe das Beschichten als Verfahren für das *Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus formlosen Stoff*. Dabei bilden Schicht und Substrat einen Verbundkörper aus unterschiedlichen Stoffen bei welchem laut Tönshoff und Denkena (2014) die Beschichtung die Funktion des Schutzes vor chemischer, korrosiver und tribologischer Belastung übernimmt und das Substrat die Tragfunktion. In dieser Kombination der Eigenschaften von Schicht und Substrat wird das große Interesse der Beschichtungstechnik begründet.

Im Folgenden soll der gegenwärtige Stand der Forschung im Bereich der Blechumformung bzw. die Entwicklung des Laserauftragschweißens näher betrachtet werden

### 2.1 Werkzeugtechnik für die Blechumformung

#### 2.1.1 Das tribologische System der Blechumformung

Als Tribologie wird die Wissenschaft bzw. Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung zueinander bezeichnet. Diese beinhaltet das Gesamtgebiet von Verschleiß, Reibung und Schmierung einschließlich der Grenzflächenwechselwirkungen zwischen Festkörpern, sowie auch zwischen Festkörpern und flüssigen oder gasförmigen Fluiden. (Gesellschaft für Tribologie 2002)

Dabei versucht die Tribologie in der Schaffung eines vereinfachten Modells auf Grundlage eines realen technischen Prozesses die wichtigen Zusammenhänge der wesentlichen Systemparameter darzustellen. Abbildung 1 zeigt den Aufbau eines allgemeinen tribologischen Systems.

Auch die Wechselwirkungen der Grenzflächen von Werkzeug und Blechwerkstück bilden ein tribologisches System welchem eine hohe Aufmerksamkeit beigemessen wird. Im Wesentlichen werden hierbei zwei maßgebliche Ansätze zur Prozessoptimierung verfolgt. Zum einen die Verbesserung der Reibeigenschaften, zum anderen die Reduzierung von Verschleiß.

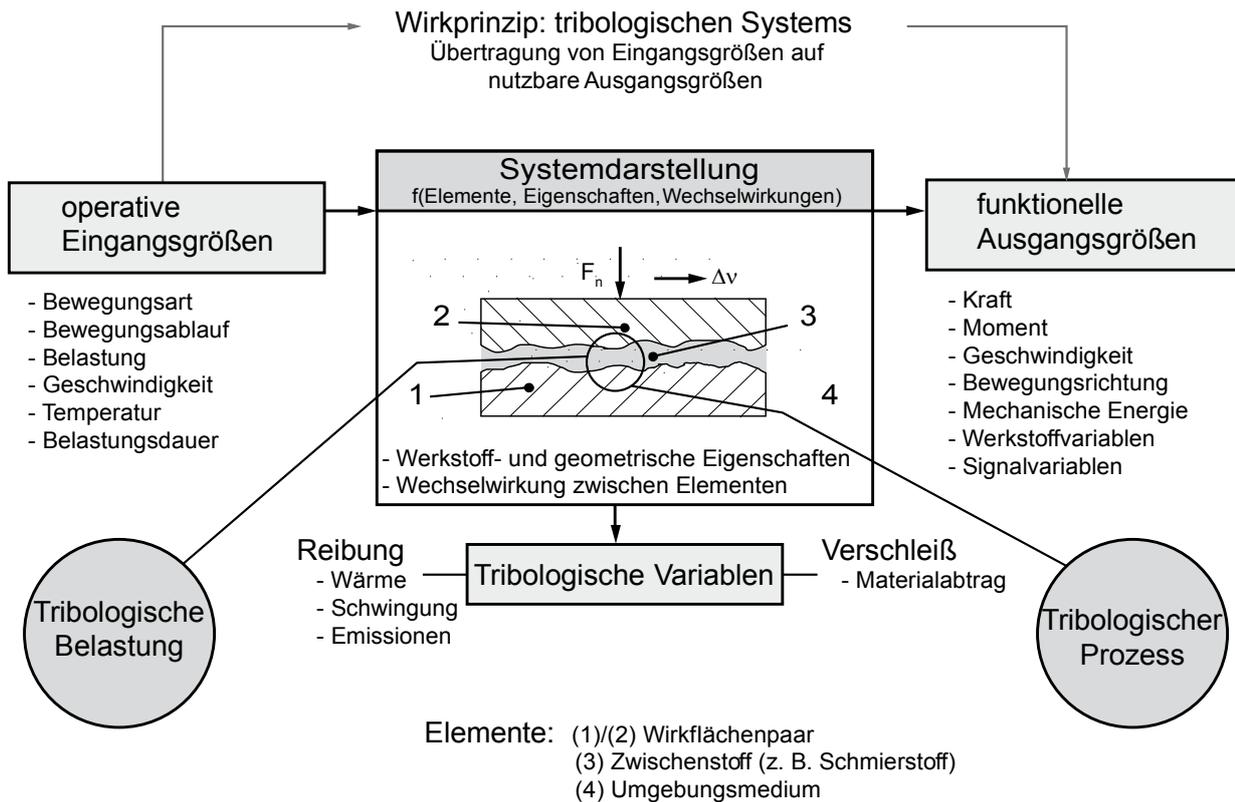


Abbildung 1: Systemanalytische Darstellung eines tribologischen Systems, Darstellung nach (Czichos und Habig 2010, S. 8ff)

### Reibungsoptimierung

Die Reibung spielt bei umformtechnischen Prozessen eine wichtige Rolle. In den meisten Fällen handelt es sich um Gleitreibung zwischen Halbzeug und Werkzeug. Die Zugabe von Flüssig- oder Festschmierstoffen oder sogar von speziellen Ziehfolien ist notwendig um die Bauteile in der gewünschten Qualität zu fertigen.

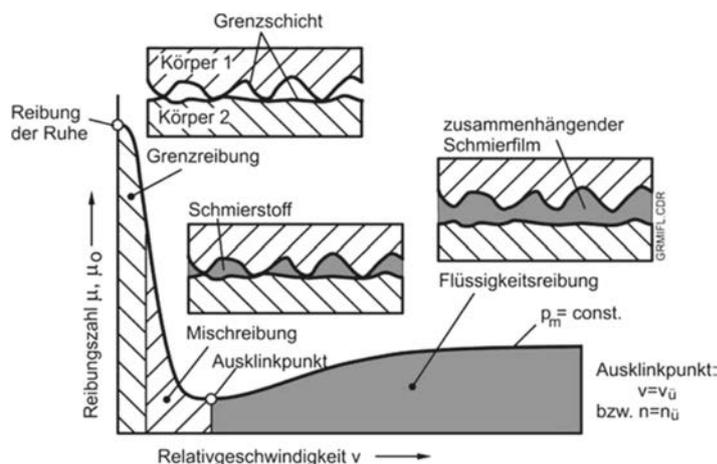


Abbildung 2 Stribeck Kurve in Abhängigkeit von Reibungszahl und Relativgeschwindigkeit (Birkhofer und Kümmerle 2012, S. 24)

Betrachtet man die bekannte Stribeck-Kurve wie in Abbildung 2 dargestellt, so befinden sich Umformprozesse üblicherweise im Bereich der Grenz- bzw. Mischreibung wobei zur Formulierung der Reibzustände unterschiedliche Formulierungen zum Einsatz kommen.

Der technische bekannteste Ansatz ist das Coulomb'sche Reibungsmodell mit der resultierenden Reibkraft  $F_R$ , der anliegenden Normalkraft  $F_N$  und dem Reibbeiwert  $\mu$ :

$$|F_N| \cdot \mu = |F_R| \quad (2.1)$$

Übertragen auf die örtlich vorliegenden Spannungen kann das Gesetz auch folgendermaßen formuliert werden, wobei  $\sigma_N$  die Normalspannung und  $\tau_R$  die Reibschubspannung ist:

$$|\sigma_N| \cdot \mu = |\tau_R| \quad (2.2)$$

Das Coulomb'sche Reibungsmodell hat sich laut Doege und Behrens (2010, S. 239) bei kleinen Reibbeiwerten zwischen  $0,05 < \mu < 0,2$  und/oder kleinen Kontaktnormalspannungen, welche beim Tiefziehen von Blechen vorkommen, als hinreichend genau etabliert. Steigen Reibbeiwert  $\mu > 0,3$  sind weitere Reibgesetze zu betrachten. Erreicht die Reibschubspannung  $\tau_R$  die Schubfließgrenze  $k$  geht man häufig auf das Reibzahlmodell über. Nach dem Fließkriterium von Mises gilt für den einachsigen Spannungszustand mit der Fließspannung  $k_f = \sigma$ :

$$k = \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot k_f \quad (2.3)$$

Damit resultiert eine Reibschubspannung:

$$\tau_R = \mu \cdot k_f = \mu \cdot \sqrt{3} \cdot k \quad (2.4)$$

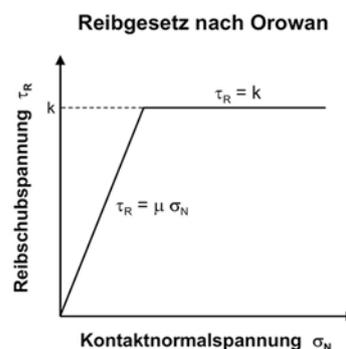


Abbildung 3 Darstellung Reibgesetz nach Orowan (Klocke und König 2006, S. 136)

Oftmals werden bei Umformprozessen mit hohen Kontaktnormalspannungen daher kombinierte Reibmodelle zur exakteren Beschreibung eingesetzt. In Abbildung 3 dargestellt ist ein Beispiel nach Orowan. Dieses Modell ist jedoch auch nur eine Annäherung an das reale Verhalten, ein unstetiger Übergang zwischen den beiden Modellen kann in der Praxis nicht festgestellt werden. Eine wichtige Erkenntnis dieses Modelles ist, dass die maximale Reibschubspannung nach oben begrenzt ist und im Wesentlichen proportional zur Fließspannung des umzuformenden Werkstoffes ist. Dies ist

wichtig bei der Auslegung von Umformwerkzeugen mit Beschichtungssystemen, da es bei kritischen Schubspannungen zum Versagen der Beschichtung kommen kann. Weitere Modelle die der Realität besser entsprechen werden hier jedoch nicht behandelt.

Viele Umformprozesse werden erst möglich, wenn die Reibung zwischen Blech und Werkzeug richtig eingestellt ist. Es kann jedoch nicht generell behauptet werden, dass bei geringsten Reibkräften, also z.B. optimaler Schmierung zwischen den Kontaktpartnern und/oder niedrigen Kontaktnormalspannungen, die Ergebnisse am besten werden. Oftmals werden bewusst Werkzeuge mit lokal unterschiedlichen Reib- und Kontaktbedingungen hergestellt. Folglich wird versucht in Zonen in denen eine geringe Relativbewegung stattfinden soll höhere und in Zonen in denen eine hohe Relativbewegung benötigt wird geringe Reibkräfte einzustellen. Dies kann durch folgende Maßnahmen erzeugt werden:

- Verändern der Oberflächentextur (polieren, aufrauen, sandstrahlen, etc...)
- Verändern von geometrischen Faktoren (Tuschieren, vergrößern bzw. verkleinern von Ziehradien, Bremssicken,...)
- Verwendung geeigneter Schmiermittel oder Trennmittel (Fluid- oder Festkörperschmierstoffe, Ziehfolien,...)

*Verschleißoptimierung*

Dieser Optimierungsansatz hat in der Umformtechnik einen sehr hohen Stellenwert. Aufgrund der hohen Produktionsstückzahlen wird eine möglichst lange Lebensdauer für die Werkzeuge angestrebt. Dennoch unterliegt jedem Umformprozess ein gewisser Verschleiß am Werkzeug. Ein wichtiger Wert in diesem Zusammenhang ist die Verschleißrate  $W$  welche durch den Quotienten von Verschleißbetrag zu Bezugsgröße definiert ist. Folglich ist der Verschleißwiderstand als reziproker Wert mit  $1/W$  definiert. Tabelle 1 zeigt die gebräuchlichsten Größen in diesem Zusammenhang.

Tabelle 1 Zusammenstellung der gebräuchlichsten Verschleißmessgrößen (Gesellschaft für Tribologie 2002, S. 36)

	Verschleißbetrag				Bezeichnung
	linear $W_l$ [m]	planimetrisch $W_q$ [m <sup>2</sup> ]	volumetrisch $W_v$ [m <sup>3</sup> ]	massenmäßig $W_m$ [kg]	
Bezugsgröße					
Beanspruchungsdauer $t$ [h]	$W_{l/t}$	$W_{q/t}$	$W_{v/t}$	$W_{m/t}$	Verschleiß- geschwindigkeit
Beanspruchungsweg $s$ [m]	$W_{l/s}$	$W_{q/s}$	$W_{v/s}$	$W_{m/s}$	Verschleiß- Weg-Verhältnis
Durchsatz $z$ [m <sup>3</sup> ]; [kg]; [Stück]	$W_{l/z}$	$W_{q/z}$	$W_{v/z}$	$W_{m/z}$	Verschleiß- Durchsatz- Verhältnis

Zu beachten ist, dass die Verschleißrate nur in wenigen Fällen einen linearen Verlauf hat. Je nach wirkendem Verschleißmechanismus und Anwendungsfall können sowohl degressive, als auch progressive Verläufe beobachtet werden. Bei einem Materialübergang vom Halbzeug auf das Werkzeug, wie sie bei adhäsiven Verschleißvorgängen beobachtet werden, kann sogar eine negative Verschleißrate auftreten. Diese ist jedoch meistens nur von temporärer Natur, da es nach solchen Kaltaufschweißungen bei weiterer Belastung häufig zu Materialausbrüchen auf dem Werkzeug kommt.

Typischerweise zeigt die Verschleißrate in umformtechnischen Prozessen einen nach oben progressiven Verlauf, sie ist bei neuen Werkzeugen oder überarbeiteten Werkzeugflächen gering und steigt mit zunehmender Schädigung der Wirkflächen immer mehr an. Daraus resultiert eine immer schlechter werdende Bauteilqualität hinsichtlich Geometrie, Oberflächenrauigkeit, Gratbildung, etc... Bei zu großen Abweichungen von den Qualitätsmerkmalen ist folglich eine Überarbeitung oder ein Austausch des Werkzeugs notwendig. In Abbildung 4 sind der Verlauf unterschiedlicher Verschleißmechanismen bis zum Erreichen der Unbrauchbarkeit dargestellt.

Verschleiß verursacht aber nicht nur Primärkosten wie Herstell- oder Instandhaltungskosten von Werkzeugen, er äußert sich ebenfalls in nicht unwesentlichen Sekundärkosten verursacht durch z.B. Stillstandszeiten, Qualitäts- und weiteren Aufwendungen. Im Wesentlichen werden in der Umformtechnik vier unterschiedliche Verschleißmechanismen beobachtet, wobei nicht gesagt werden kann, dass bei einem Umformprozess ausschließlich eine Art auftritt. Vielfach ist es eine Kombination bzw. Superposition mehrerer Mechanismen, jedoch ist in den meisten Anwendungsfällen eine Art des Verschleißes vorherrschend. (Gesellschaft für Tribologie 2002, S. 12–13)

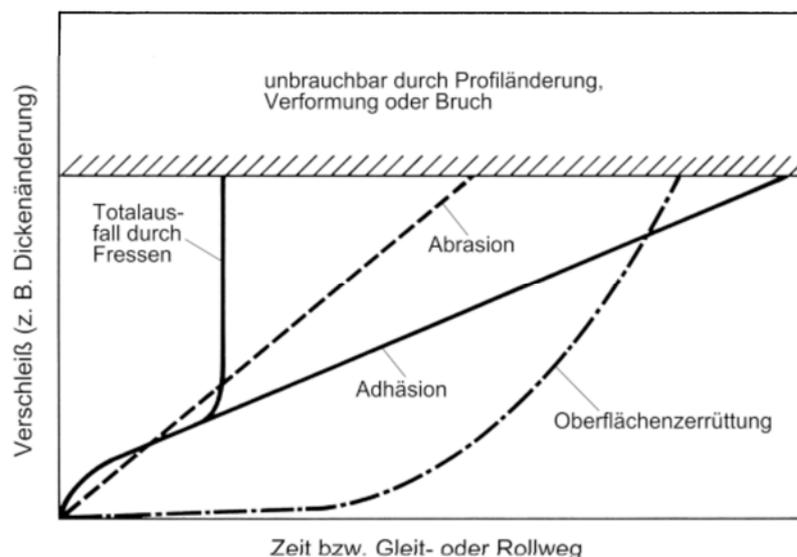


Abbildung 4 Schematische Darstellung von Verschleißverläufen bei unterschiedlichen Mechanismen (Sommer et al. 2014, S. 29)

### 2.1.1.1 Verschleiß durch Adhäsion

Ein sehr häufig und unangenehmes Erscheinungsbild in der Umformtechnik sind Verschleißformen, welche durch Adhäsion zwischen zwei in Kontakt stehenden Körpern verursacht werden. Der Grund einer entstehenden Adhäsion zwischen Körpern sind laut Czichos und Habig (2010, S. 29) atomare Wechselwirkungskräfte und chemische Bindungen, die auch bei der Kohäsion, den inneren Kräften, welchen den Körperzusammenhalt gewährleisten, auftreten. Adhäsion beginnt meistens mit lokaler plastischer Verformung des Werkstücks oder Werkzeuges, welche zu einem „Verschweißen“ der Kontaktflächen führt. Bei der in der Umformung stets auftretenden Relativbewegung zwischen diesen Kontaktpartnern kommt es schließlich zum Abscheren dieser Bereiche und es entsteht Schaden sowohl am Bauteil als auch am Werkzeug. Dieser Mechanismus kann innerhalb weniger Zyklen zum Versagen des Umformprozesses oder im schlimmsten Fall zur Zerstörung der Werkzeugoberfläche führen. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel einer Oberfläche mit dieser Verschleißursache und deren Schädigungsmechanismus. Als Gegenmaßnahmen werden geeignete Werkzeugwerkstoffe, Schmierstoffe und Trennmittel empfohlen. Ein hoher Karbidanteil und eine optimale Arbeitshärte des Werkzeugwerkstoffs sind ebenfalls zu empfehlen. (Doege und Behrens 2010, S. 413)

Des Weiteren können auch Beschichtungssysteme wie zum Beispiel PVD/CVD und Beschichtungen die mittels Laserauftragschweißen erzeugt werden einen positiven Einfluss auf die Vermeidung von Adhäsionsverhalten haben. Wichtig ist hierbei die Wahl des richtigen Beschichtungswerkstoffes um die atomaren Bindungskräfte so gering als möglich zu halten.

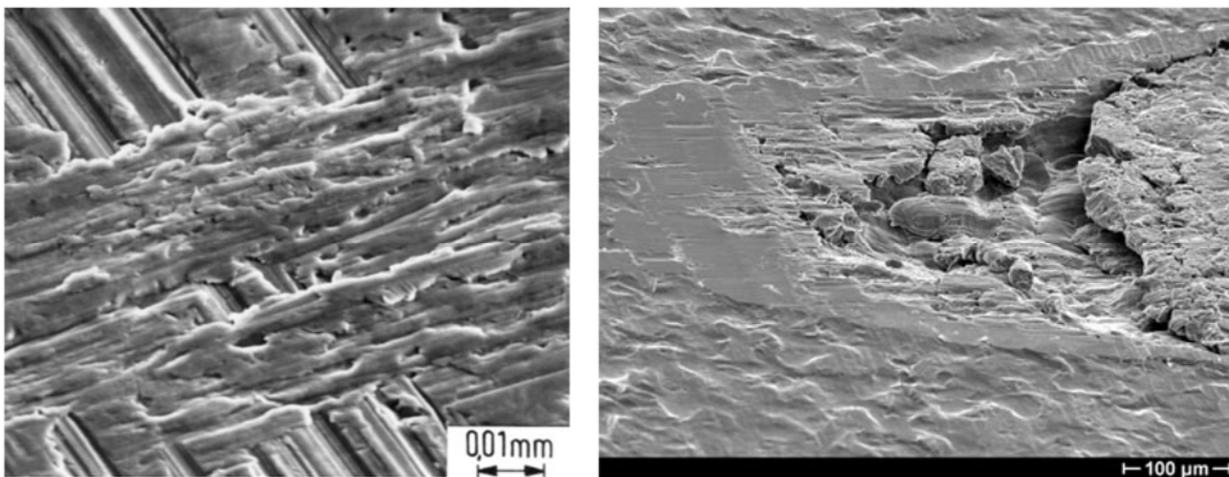


Abbildung 5 Adhäsiver Verschleiß - Werkstoffübertragung auf einen gehärteten Werkstoff (links) Schubrisse auf einer ZStE 300 Probe verursacht durch eine gehärtete 100Cr6 Scheibe (rechts) (Sommer et al. 2014, S. 17)

### 2.1.1.2 Verschleiß durch Abrasion

Die gemeinläufig am meisten bekannte Verschleißart ist die Abrasion. Sie tritt häufig bei vielen technischen Tribosystemen auf. Das Wirkprinzip bei der Abrasion basiert auf zwei Kontaktpartnern mit unterschiedlicher Härte und/oder auf harten Partikeln, welche sich während der Relativbewegung zwischen den beiden Körpern befinden und Furchen auf den Körperoberflächen hinterlassen. Je nach Werkstoff treten bei laufender Beanspruchung entweder Mikroverformung, Mikrozerspanung oder Mikroausbrüche an der Oberfläche der Körper auf, wie in Abbildung 6 dargestellt. Dadurch wird ein stetiger Materialabtrag generiert, welcher werkzeugseitig irgendwann eine kritische Größe erreicht und einen fehlerhaften Prozess erzeugt.

Maßnahmen zur Reduzierung der Verschleißrate sind vor allem in der Umformtechnik wünschenswert, da durch die hohen Stückzahlen die Werkzeugkosten bzw. Wartungs- und Reparaturkosten deutlich gesenkt werden können. Möglichkeiten bestehen in der Verminderung der Normalkräfte durch z.B. geometrische Anpassungen in kritischen Stellen, die Auswahl geeigneter Schmierstoffe, die Vermeidung von Hartstoffpartikeln, wie zum Beispiel Zunder im Tribosystem, und durch Erhöhung der Härte des Werkzeugs. Wird die letztere Maßnahme verfolgt kann zum Beispiel durch Zugabe von Karbiden (Wolframkarbid, Vanadiumkarbid oder Titankarbid) im Werkzeugwerkstoff eine signifikante Reduzierung der Verschleißrate erzeugt werden. (Sommer et al. 2014, S. 390–392)

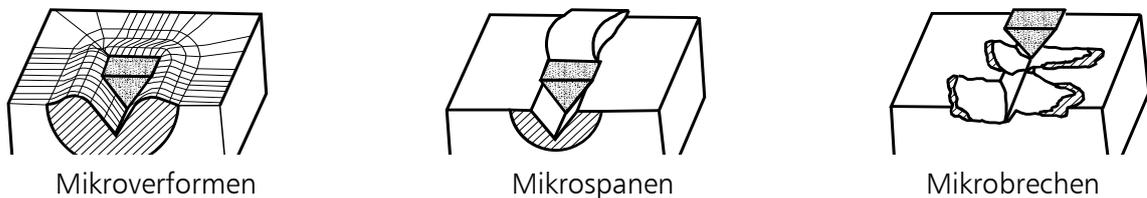


Abbildung 6 Unterschiedliche Auswirkungen von Abrasion (Zum Gahr 1998)

### 2.1.1.3 Tribochemischer Verschleiß

Unter dem tribochemischen Verschleiß, häufig auch als Tribooxidation bezeichnet, versteht man hauptsächlich chemische Reaktionen des Werkzeugkörpers mit seinem Reibpartner bzw. mit der Umgebung (Schmierstoff, Atmosphäre). Die Reaktionsprodukte sind häufig Oxide deren Bildung durch hohe Temperaturen begünstigt wird. Ein Beispiel zur Bildung einer Oxidschicht ist in Abbildung 7 dargestellt. Durch die Bildung von solchen Schichten wird oftmals eine Verringerung

von Adhäsion beobachtet, da die Oxide an der Oberfläche anhaften. Andererseits haben die härteren oxidischen Verschleißpartikel oftmals eine sehr hohe Abrasionswirkung. (Sommer et al. 2014, S. 22)

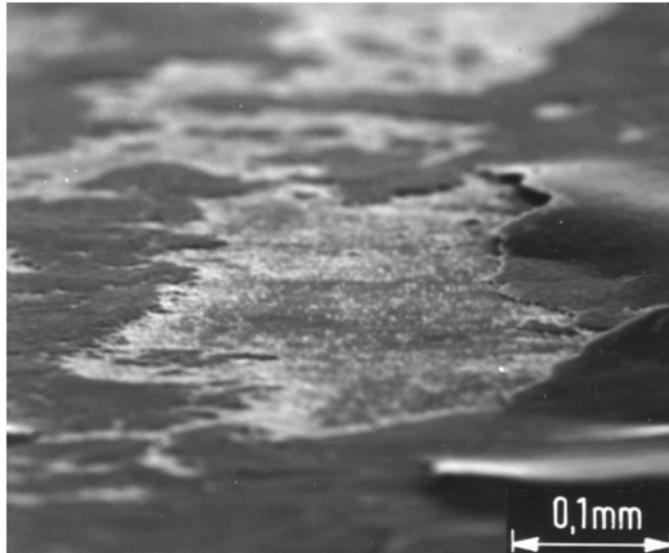


Abbildung 7 Tribochemischer Verschleiß - Oxidationsprodukte auf der Gleitfläche des Probenkörpers aus Mn-legiertem Einsatzstahl (Sommer et al. 2014, S. 113)

Der tribochemische Verschleiß kann durch eine reduzierte Umgebungsatmosphäre und korrosionsbeständige Werkzeugwerkstoffe deutlich verringert werden. In der Beschichtungstechnik werden hierfür oftmals warmfeste und oxidationsbeständige Nickelbasislegierungen eingesetzt. Organische Schmiermittel, welche ebenfalls einen Oxidationsschutz haben, sind aufgrund der hohen Temperaturen nicht verwendbar.

#### 2.1.1.4 Oberflächenzerrüttung (Delamination)

Unter Oberflächenzerrüttung versteht man eine Verschleißform, die infolge zyklischer Belastung am Verschleißkörper zur Bildung kleiner Risse ausgehend von der Oberfläche bis zur vollständigen Ablösung von plättchenförmigen Partikeln führt. Die Risseinleitung erfolgt durch die kumulierte Folge von plastischen Verformungen, die bis zum Materialversagen führt. Bei mehrachsigen Spannungszuständen, wie sie durch die Überlagerung von Druck- und Schubspannung entstehen, liegt das Spannungsmaximum bekanntlich nahe unter der Oberfläche. Dies begünstigt das weitere Risswachstum entlang der Gleitrichtung und führt zum vollständigen Ablösen von Partikeln. In Abbildung 8 ist ein Beispiel dieses Verschleißmechanismus dargestellt. Positiv der Oberflächenzerrüttung entgegenwirken kann laut Sommer et al. (2014, S. 21) das Einbringen von Druckeigenspannungen, homogene Gefüge und steigende Härte des Werkstoffes bei ausreichender Zähigkeit für den Prozess.

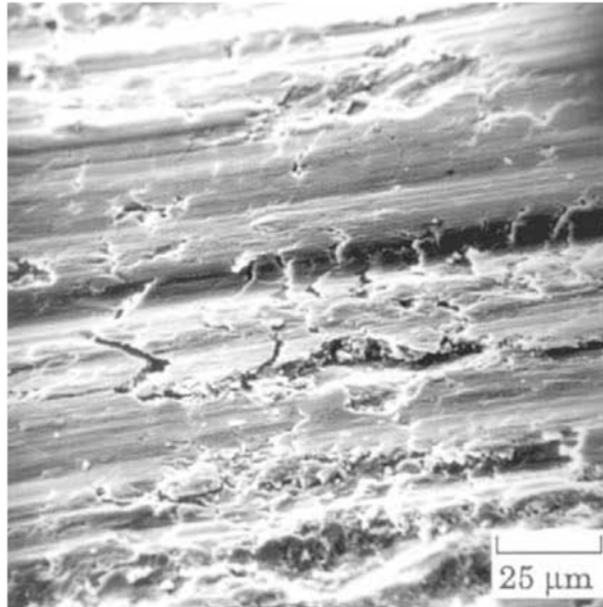


Abbildung 8 Beispiel von Oberflächenzerrüttung an Stahlkörper verursacht durch Gleitverschleiß (Czichos und Habig 2010, S. 642)

### 2.1.2 Aufbau und Bauweisen von Umformwerkzeugen

Grundsätzlich werden für die Blechumformung formgebende Werkzeugflächen, auch Wirkfläche genannt, benötigt. Hauptsächlich findet eine solche Umformung in einer einachsig translatorisch ausgelegten Umformmaschine bzw. Presse statt. Im Gegensatz zu Pressen für das Spritzgießen, welche meist horizontal verfahren, weisen Umformpressen in der Regel eine vertikale Bewegungsrichtung auf, weswegen man werkzeugtechnisch bei einem geteilten Formwerkzeug auch von Ober- bzw. Unterwerkzeug spricht. Zusätzlich zu den meist zwei Formhälften kommen oftmals zusätzlich beweglich gelagerte Werkzeugelemente zum Einsatz, die für den Umformprozess zwingend notwendig sind. Je nach Anwendungsfall sind hier die Pressen ein-, zwei- oder dreifachwirkend ausgeführt um die erforderliche Kinematik und Kraft auf das dementsprechende Werkzeugelement zu übertragen. Beispiele für solche Elemente sind der Blechhalter bzw. Scherwer. Abbildung 9 zeigt den Aufbau eines klassischen Umformwerkzeuges, mit dem Oberwerkzeug bestehend aus Stempel und Niederhalter und dem Unterwerkzeug bestehend aus dem Ziehring für variable Ziehtiefen. Formplatinen werden mit einer konturierten Matrize gefertigt, welche die Negativform des Bauteils aufweist. Diese zeichnet sich durch eine definierte Ziehtiefe aus, sodass bei Erreichen des unteren Totpunktes ein Formschluss zwischen Ober- und Unterwerkzeug mit dem eingelegten Bauteil herrscht.

Bei der Auswahl des Werkzeugkonzeptes hinsichtlich Bauform und Werkstoff sind laut Balbach und Hankele (1993, S. 599–600) vor allem die Randbedingungen wie die geplante Fertigungsstückzahl, der zu verarbeitende Werkstückwerkstoff, die geforderte Oberflächenqualität und der Schwierigkeitsgrad des Bauteils hinsichtlich seiner Umformung zu berücksichtigen.

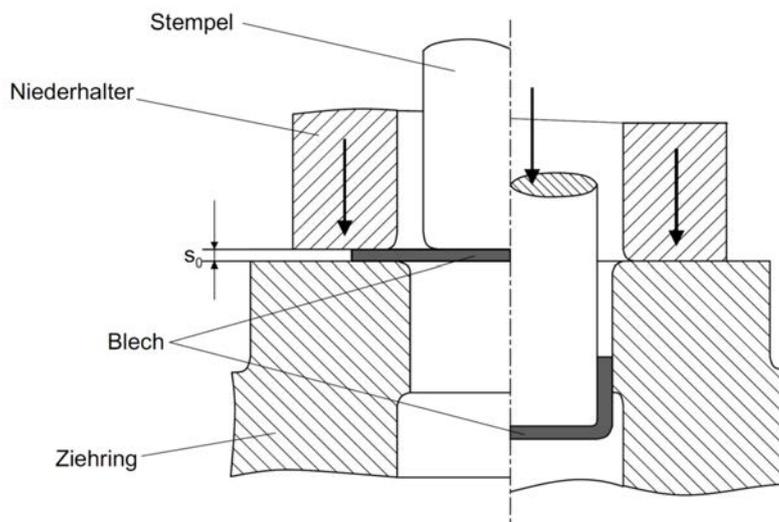


Abbildung 9 Werkzeugaufbau zum Ziehen einer Napfgeometrie (Klocke und König 2006, S. 324)

Betrachtet man den klassischen Umformprozess des Tiefziehens so kann gesagt werden, dass die Belastung des Werkzeuges in der Praxis sehr unterschiedlich verteilt ist. So gibt es Bereiche mit Grenzreibung und keiner bis sehr geringer Gleitbewegung, wie zum Beispiel zwischen Stempel und Blech bei einem Napfwerkzeug. Im Gegensatz dazu Bereiche mit sehr hoher Kontaktnormalspannung und hoher Gleitbewegung in der Zone der Mischreibung. Beispielhaft hierfür ist der Kontakt zwischen dem Ziehradius der Matrize und dem Blech. Im Bereich des Blechhalters treten ebenfalls Gleitreibung mit sehr wechselhaften Beanspruchungen auf. Üblicherweise werden die Zonen mit starker Belastung zur Auswahl des geeigneten Werkzeugwerkstoffes herangezogen. Hierbei wird in erster Linie auf die technischen Werkstoffeigenschaften, wie Reibpaarung und Verschleißbeständigkeit, Augenmerk gelegt. Nicht zu vernachlässigen sind jedoch weitere Entscheidungsparameter wie Werkstoffverfügbarkeit, minimale/maximale Halbzeugabmessungen und Werkstoffkosten, die im täglichen Ablauf des Werkzeugbaus stets mitberücksichtigt werden müssen.

Je nach Größe und mechanischen Eigenschaften des umzuformenden Materials werden solche Tiefziehwerkzeuge in Monoblock- bzw. Segmentbauweise gefertigt, wie in Abbildung 10 dargestellt. Erstere wird bei größeren Formteilen meist aus einem Gusswerkstoff mit geringem Aufmaß bereits konturnah hergestellt und anschließend gefräst.

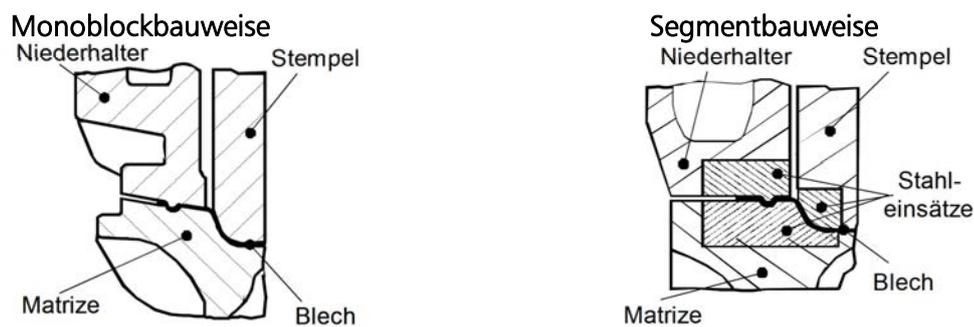


Abbildung 10 Vergleich Bauweise Tiefziehwerkzeug – Monoblock- versus Segmentbauweise (Doege und Behrens 2010, S. 329)

Die Bauarten für Hohlformwerkzeuge können je nach Größe und Einsatzgebiet wie folgt eingeteilt werden:

### 2.1.2.1 Monoblockbauweise

In der Monoblockbauweise haben sich Werkzeuge in Guss- bzw. Plattenbauweise durchgesetzt. Die Verwendung von gegossenen Formwerkzeugen aus Grauguss ist vor allem bei großen Formwerkzeugen für den Karosseriebau Stand der Technik. Eingesetzt werden hier laut Oehler und Kaiser (2001, S. 622–624) Gusseisenlegierungen mit Lamellengraphit GJL-150 bis GJL-350 oder die Varianten GJS mit Kugelgraphit. Der Vorteil von gegossenen Werkzeugen liegt vor allem in der endkonturnahen Fertigung, die das Zerspanungsvolumen weitgehend reduzieren. Die Herstellkosten sind daher im Gegensatz zur Variante der Plattenbauweise deutlich geringer. Zudem hat sich eine günstige Schmierfilmbildung auf der Werkzeugoberfläche als Vorteil erwiesen. Kritische Bereiche können zudem mittels Flamm-, Induktions- oder Laserhärten behandelt werden. Tabelle 2 zeigt die Darstellung von häufig eingesetzten Gusslegierungen. Grauguss hat eine gute Druckfestigkeit, weist jedoch Schwächen hinsichtlich seiner Zugfestigkeit bzw. auch der Werkstoffzähigkeit auf. Zwar ist diese Eigenschaft bei der GJS-Variante deutlich besser, jedoch ist dies vor allem bei der Bearbeitung und Umformung von AHS- bzw. UHS-Stählen zu berücksichtigen.

Durch die Einführung von standardisierten Normteil- und Halbzeug-Katalogen hat sich der Aufbau von Werkzeugen aus teilweise standardisierten Stahlplatten in der sogenannten Plattenbauweise etabliert. Der Vorteil hier liegt vor allem in der kurzen Durchlaufzeit bei der Fertigung, da die meisten Normteile und -platten ab Lager verfügbar sind. Für kleinere und mittlere Werkzeugabmessungen unter einem Meter Werkzeuglänge ist diese Aufbauart auch wirtschaftlich sehr interessant. Als Grund- und Rahmenplatten werden üblicherweise allgemeine Baustähle wie z.B. 1.0570 oder unlegierte Werkzeugstähle wie dem 1.1730 eingesetzt. Funktionswerkzeugflächen werden üblicherweise als Kalt- bzw. Warmarbeitsstahl ausgeführt. Da die Größe der lieferbaren Werkzeugstähle limitiert ist werden die Formhälften oftmals mehrteilig ausgeführt. Dies hat nicht nur Vorteile in der Fertigung sondern auch in der Werkzeugwartung, da oftmals nur einzelne Werkzeugteile nachgearbeitet bzw. erneuert werden müssen. Das Zerspanungsvolumen ist

allerdings bei dieser Bauweise deutlich höher und muss dementsprechend in der Fertigungsphase berücksichtigt werden.

Tabelle 2 Eigenschaften von häufig eingesetzten Graugusslegierungen; Darstellung nach Berns und Theisen (2006, S. 136)

Bez.	Zugfestigkeit	0,2% Dehngrenze	Bruchdehnung	Schlagzähigkeit bei RT	Kerbschlagzähigkeit bei RT	E-Modul	Dichte	Wärmeleitfähigkeit bei RT	Graphitform	Matrixgefüge
	[MPa]		[%]	[J]	[J]	[Gpa]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[W/(m K)]		
GJL-150*	150 - 250	98 - 165**	0,3 - 0,8	4	—	78 - 103	7,1	53***	lamellar	F / P
GJL-250*	250 - 350	165 - 228**	0,3 - 0,8	5	—	103 - 118	7,2	49***	lamellar	P / F
GJL-350*	350 - 450	228 - 285**	0,3 - 0,8	—	—	123 - 143	7,3	46***	lamellar	P
GJS-400	370 - 400	250	15 - 30	98 - 196	10 - 19	160 - 180	6,9	38,5	sphärolitisch	F
GJS-600	550 - 600	380	3 - 8	39 - 78	3,5 - 10	170 - 180	7	32,9	sphärolitisch	P / F
GJS-800	800	500	2 - 4	9 - 29	—	170 - 180	7,1	32	sphärolitisch	P

\* Getrennt gegossene Proben mit Ø30mm  
 \*\* 0,1% Dehngrenze  
 \*\*\* bei 100°C

F... Ferrit  
 P... Perlit

Bez.	Zugfestigkeit	0,2% Dehngrenze	Bruchdehnung	Schlagzähigkeit bei RT	Kerbschlagzähigkeit bei RT	E-Modul	Dichte	Wärmeleitfähigkeit bei RT	Graphitform	Matrixgefüge
	[MPa]		[%]	[J]	[J]	[Gpa]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[W/(m K)]		
GJL-150*	150 - 250	98 - 165**	0,3 - 0,8	4	—	78 - 103	7,1	53***	lamellar	F / P
GJL-250*	250 - 350	165 - 228**	0,3 - 0,8	5	—	103 - 118	7,2	49***	lamellar	P / F
GJL-350*	350 - 450	228 - 285**	0,3 - 0,8	—	—	123 - 143	7,3	46***	lamellar	P
GJS-400	370 - 400	250	15 - 30	98 - 196	10 - 19	160 - 180	6,9	38,5	sphärolitisch	F
GJS-600	550 - 600	380	3 - 8	39 - 78	3,5 - 10	170 - 180	7	32,9	sphärolitisch	P / F
GJS-800	800	500	2 - 4	9 - 29	—	170 - 180	7,1	32	sphärolitisch	P

\* Getrennt gegossene Proben mit Ø30mm  
 \*\* 0,1% Dehngrenze  
 \*\*\* bei 100°C

F... Ferrit  
 P... Perlit

### 2.1.2.2 Segmentbauweise

Genügen die verfügbaren gewöhnlichen Werkzeugmaterialien nicht den Anforderungen des Umformprozesses, wird auf spezielle Werkzeugwerkstoffe zurückgegriffen, um den hohen Kräften bzw. der Verschleißneigung entgegen zu halten. Vor allem bei der Umformung von hochfesten Blechwerkstoffen (über 650MPa Zugfestigkeit) sind laut Doege und Behrens (2010, S. 330) nur Formwerkzeugeinsätze ausreichend verschleißfest. Grund dafür sind die hohen

KontaktNormalspannungen, die vor allem im Bereich der Ziehradien zeitlich und lokal veränderlich auftreten. Diese können im Extremfall über den zulässigen Festigkeitswerten des Werkzeugwerkstoffes liegen und zu dessen Versagen führen. Da diese Werkzeugwerkstoffe in ihrer Herstellung sehr aufwendig und nur in kleineren Abmessungen herstellbar sind, werden Werkzeugeinsätze gefertigt, welche zu den zwei oben genannten Werkzeugbauweisen verbunden werden. Bei der Verwendung von Formeinsätzen gilt der Grundsatz, dass das Volumen des Einsatzes wesentlich kleiner als das Volumen des Grundblocks sein sollte. Die Vorteile einer solchen Konstruktion sind laut Neugebauer (2007, S. 163–164) die Austauschbarkeit, die Möglichkeit von Geometrieänderungen und die der Wärmebehandlung und Beschichtung dieser Einsätze. Bei allen Kalt- bzw. Warmarbeitsstählen ist eine Wärmebehandlung (Vergüten) notwendig um die gewünschte Härte bzw. Verschleißfestigkeit zu erreichen. Bei der Fertigung erfolgt die Schrumpferspannung im weichen Ausgangszustand mit einem entsprechenden Aufmaß, welches den Verzug durch die WBH und die Schlichtzugabe beinhaltet. Im harten Zustand werden die Werkzeugteile mittels HSC Fräsen und Schleifen auf das gewünschte Fertigmaß bearbeitet.

### 2.1.2.3 Spezielle Anforderungen bei Warmformwerkzeugen

Werkzeuge für das direkte Presshärten müssen neben den klassischen Umformwirkflächen noch eine andere wichtige Funktion erfüllen. Um die geforderten Abkühlraten von mindestens 27 [K/s] laut Merklein et al. (2006) zu erreichen, muss das Werkzeug möglichst homogen bei Raumtemperatur oder etwas höher temperiert sein um Wärmetransport von Bauteil über die Werkzeugflächen in das Kühlmedium sicherzustellen. Ein Beispiel eines solchen gekühlten Werkzeugs mit tiefenlochgebohrten Kühlkanälen ist in Abbildung 11 dargestellt. Überschlägt man die Kühlleistung mit den Parametern  $c_{p\_mittel} \approx 600 [J/kg K]$ , einer Abkühlung von 800°C auf 100°C und einer Zykluszeit von 20s ergibt sich eine Kühlleistung von ca. 21 [kW/kg\_Wkstk]. Bei größeren Bauteilen bzw. bei mehrfach fallenden Werkzeugen kann schnell die Größenordnung von 100kW notwendiger Kühlleistung erreicht werden. Dieser gesamte Wärmestrom muss über die Aktivflächen transportiert und über das Kühlmedium abgeführt werden. Hinzu kommt die Belastung des Werkzeugwerkstoffes durch die hohe zyklisch-thermische Belastung an den Oberflächen. Zwar ist die geforderte Festigkeit des Werkzeugwerkstoffes deutlich geringer im Vergleich zur Kaltumformung von UHS-Stählen, da die Fließspannung durch die hohe Temperatur deutlich herabgesetzt ist, jedoch besteht laut Pelcastre et al. (2013) ein erhöhtes Potential für Werkzeugverschleiß aufgrund von Adhäsion. Auch abrasiver Verschleiß kann beobachtet werden, vor allem dort wo harte Oxidationsprodukte wie Zunder im Umformprozess beobachtet werden können. (Ghiotti et al. 2013)

Presshärtable Stähle werden oftmals mit einer Beschichtung versehen. Die am häufigsten eingesetzte Beschichtung ist eine Al-Si-Legierung. Diese hat zum einen die Aufgabe während des Erwärmungsprozesses eine Entkohlung der Randzone zu vermeiden und stellt zum anderen einen Korrosionsschutz für die gefertigten Bauteile dar. Während der Umformung kann es ebenfalls zu einem Materialtransfer der Blechbeschichtung auf die Werkzeugwirkfläche kommen. Dieses „Anfressen“ führt zu einer schlechteren Bauteilqualität und einem höheren Wartungsaufwand der

Umformwerkzeuge. Durch geeignete Oberflächenbehandlung kann dieser Effekt jedoch reduziert werden. (Pelcastre et al. 2014)

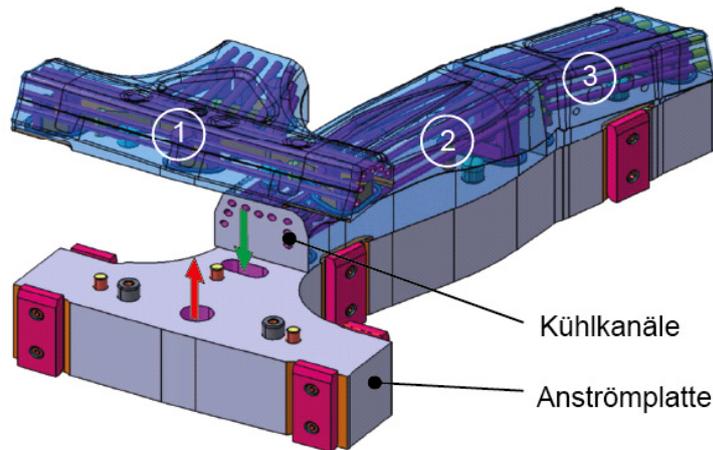


Abbildung 11 Darstellung eines gekühlten Unterwerkzeugs (Stempel) in Segmentbauweise (Weiß 2013, S. 12)

### 2.1.3 Werkzeugwerkstoffe und Beschichtungen zur Umformung hoch- und höchstfester Stähle

Die Fertigung von Umformbauteilen mit höchstfesten Eigenschaften ist hinsichtlich der eingesetzten Werkzeugwerkstoffe in jedem Fall zu berücksichtigen. Abbildung 12 zeigt hier einen Überblick von Blechwerkstoffen welche im Fahrzeugbau eingesetzt werden. Man spricht im Allgemeinen von höchstfesten Stahllegierungen wenn die Streckgrenze von 550MPa überschritten wird. Dies sind im Wesentlichen Duplex-, Komplexphasen-, TRIP- und Martensitstähle. Als mögliche Werkzeuglösung stehen neben der Segmentbauweise wesentlich mehr Werkzeugwerkstoffe mit höheren mechanischen Kennwerten, sowohl hinsichtlich Festigkeit als auch Härte, zur Verfügung.

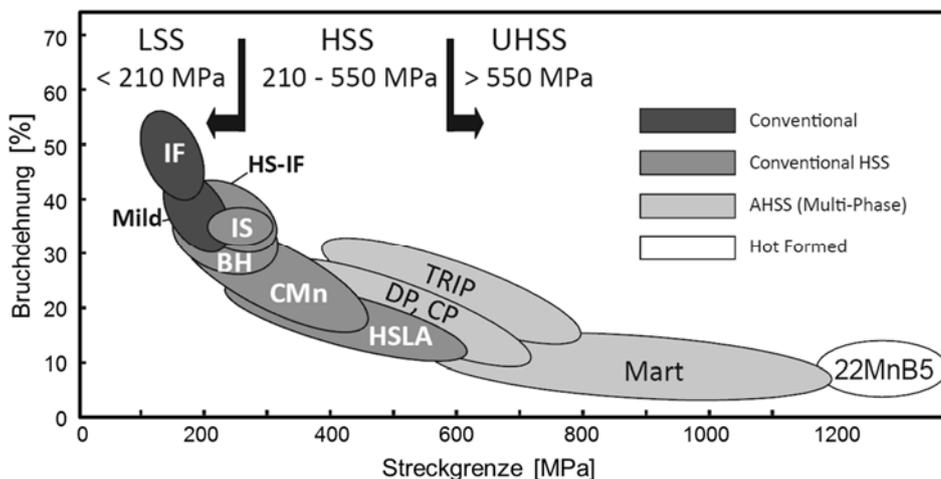


Abbildung 12 Einteilung von Blechwerkstoffen hinsichtlich ihrer maximalen Dehnung und Streckgrenze Darstellung nach World Steel Association (2001, S. 66)

### 2.1.3.1 Kalt- und Warmarbeitsstähle

Zur Auswahl stehen hier je nach Anwendungsfall unter anderem Kalt- bzw. Warmarbeitsstähle. In Tabelle 3 - Tabelle 5 sind die in der Umformtechnik am häufigsten eingesetzten Werkstoffe hinsichtlich ihrer Bezeichnung, Zusammensetzung, Behandlungsart, Eigenschaften und Anwendungsgebiete dargestellt.

Tabelle 3 Übersicht der am häufigsten verwendeten Kalt- und Warmarbeitsstählen; Darstellung nach (Schuler AG 1996, S. 496–498)

Werkzeugwerkstoffe I / Kaltarbeitsstahl / Aktivteile															
Werkstoffnr.	DIN	AISI	JIS	Analyse in %											
nach DIN	BRD	USA	Japan	C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Mo	Ni	V	W	Ti
1.2363	X100CrMoV51	A2	SKD11	1,00	0,30	0,55	0,030	0,030	–	5,00	1,10	–	0,20	–	–
1.2369	81M0CrV4216			0,81	0,25	0,35	–	–	–	4,00	4,20	–	1,00	–	–
1.2379	X155CrVMo121	D2	SKD11	1,55	0,30	0,35	0,030	0,030	–	12,00	0,70	–	1,00	–	–
1.2709	X3NiCoMoTi1895			0,03	0,10	0,15	0,010	0,010	9,25	0,25	5,00	18,0	–	–	–
1.2713	1. NiCrMo 55NiCrMoV6	6F2	SKT4	0,55	0,30	0,60	0,030	0,030	–	0,70	0,30	1,70	0,10	–	–
1.2714	57NiCrMoV7		SKT4	0,58	0,30	0,70	0,030	0,030	–	1,00	0,50	1,70	0,10	–	–
1.2767	X45NiCrMo4	6F7		0,45	0,25	0,30	0,030	0,030	–	1,35	0,25	4,00	–	–	–
1.3207	HSS S10-4-3-10	T42	SKH57												
1.3343	S-6-5-2	M2	SKH51	0,90	0,45	0,40	0,030	0,030	–	4,15	5,00	–	1,85	6,35	–
1.3344	S-6-10-2	M3/2		1,20	0,45	0,40	0,030	0,030	–	4,15	5,00	–	3,00	6,35	–

Werkzeugwerkstoffe I / Warm-Halbwarmarbeitsstahl / Aktivteile															
Werkstoffnr.	DIN	ANSI	JIS	Analyse in %											
nach DIN	BRD	USA	Japan	C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Mo	Ni	V	W	Ti
1.2713	1. NiCrMo 55NiCrMoV6	6F2	SKT4	0,55	0,30	0,60	0,030	0,030	–	0,70	0,30	1,70	0,10	–	–
1.2714	57NiCrMoV7		SKT4	0,58	0,30	0,70	0,030	0,030	–	1,00	0,50	1,70	0,10	–	–
1.2343	2. CrNiMoV X32CrMoV51	H11	SKD6	0,38	1,00	0,40	0,030	0,030	–	5,30	1,10	–	0,40	–	–
1.2344	X40CrMoV51	H13	SKD61	0,40	1,00	0,40	0,030	0,030	–	5,30	1,40	–	1,00	–	–
1.2365	X32CrMoV33	H10		0,32	0,30	0,30	0,030	0,030	–	0,30	2,80	–	–	–	–
1.2367	X40CrMoV53		SKD7	0,30	0,20	0,30	0,030	0,030	–	2,40	–	–	–	4,30	–
1.2606	3. WCv X40CrMoW51		SKD62												
1.2622	X60WCrCoV93		SKH51												

Tabelle 4 Wärmebehandlung von Kalt- und Warmarbeitsstählen; Darstellung nach (Schuler AG 1996, S. 496–498)

Werkzeugwerkstoffe II / Kaltarbeitsstahl / Aktivteile							
Nr.	Wärmebehandlung (°C)				Härte HRC	Kühlung	Verwendung
	DIN	Glühen	Härten	Härtemittel			
1.2363	800-840	930-970	Ö,WB 400	180-400	60 ±1		Schneid-/Stanzwerkzeuge
1.2369	800-840	1070-1100	Ö,WB 450-550	550	61 ±1		Stempel, Schneid-/Stanzwerkzeug
1.2379	840-860	1040-1080	Ö,L,WB 400	180-250	60 ±1		Stempel, Matrizen
1.2709	840	480	L	–	55		Armierungsring
1.2713	650-700	830-870	Ö	300-650	45 ±1	P,Ö,(W)	Schrumpf/Zwischenring und
1.2714	650-700	860-900	L	300-650	45 ±1	P,Ö,(W)	Druckstück (53±1 HRC, 1 150 N/mm2)
1.2767	610-630	840-870	W,Ö,L	160-250	54 ±1		
1.3343	1100-900	790-820	Ö,L,WB 550	540-560	62 ±1		Stempel, Matrize, Pressbüchse und
1.3344	1100-900	770-820	Ö,L,WB 550	550-570	62 ±1		Gegenstempel, Dorn

Werkzeugwerkstoffe II / Warm-Halbwarmarbeitsstahl / Aktivteile							
Nr.	Wärmebehandlung (°C)				Härte HRC	Kühlung	Verwendung
	DIN	Glühen	Härten	Härtemittel			
1.2713	650-700	830-870	Ö	300-650	42 +2	P,Ö,(W)	Schrumpf-/Zwischenring und
1.2714	650-700	860-900	L	300-650	42 +2	P,Ö,(W)	Druckstück (52+2 HRC, 1 150 N/mm2)
1.2343	750-800	1000-1040	L,Ö,WB 500-550	550-650	50 +2	W,P,Ö	Matrize, Schrumpfring (45±1 HRC)
1.2344	750-800	1020-1060	L,Ö,WB 500-550	550-650	50 +2	P,Ö	Dorne und Gegenstempel
1.2365	750-800	1020-1060	Ö,WB 500-550	500-670	50 +2	(W),L,P,Ö	Matrize, Stempel und
1.2367	750-800	1060-1100	L,Ö,WB 500-550	600-700	54 +2	(W),L,P,Ö	Gegenstempel
1.2606	750-790	1020-1050	Ö,L,WB 500-550	550-650		W,L,P,Ö	
1.2622	760-800	1150-1200	Ö,WB 500-550	500-650	56 +2	L,Ö	Schneidwerkzeug

WB = Wasserbad; L = Luft; P = Preßluft; Ö = Öl; W = Wasser

Tabelle 5 Eigenschaften von Kalt- und Warmarbeitsstählen; Darstellung nach (Schuler AG 1996, S. 496–498)

Werkzeugwerkstoffe III / Kaltarbeitsstahl / Aktivteile					
Nr. DIN	Eigenschaften				Anmerkungen
	V	Z	B	S	
1.2363	7	6	8	7	
1.2369	7/8	5			
1.2379	8	4	4	4	12 % Cr-Stahl
1.2709	5	9	5	7	Sonderstahl
1.2713	2	10	6	8	
1.2714					
1.2767	4	10	6	8	
	9	2	4	5	
1.3343	9	4	4	5	
1.3344	10	3	3	4	

Werkzeugwerkstoffe III / Warm-Halbwarmarbeitsstahl / Aktivteile					
Nr. DIN	Eigenschaften				Anmerkungen
	V	Z	B	S	
1.2713	2	10	6	8	44 HRC1 400 - 1 480 N/mm <sup>2</sup> 52 HRC 1 800 - 1 900 N/mm <sup>2</sup>
1.2714					
1.2343	5	8			50 HRC1 700 - 1 800 N/mm <sup>2</sup>
1.2344	5	8	8	8	Panzerung Capilla 521 wenn erosive Bearbeitung
1.2365	4	8	8	8	Panzerung Capilla 5200 wenn spanende Bearbeitung 50 HRC 1700-1800 N/mm <sup>2</sup>
1.2367	5	7	8	8	54 HRC1 925 - 2 050 N/mm <sup>2</sup>
1.2606					
1.2622					56 HRC 2 050 - 2 200 N/mm <sup>2</sup>

V=Verschleißwiderstand; Z=Zähigkeit; B=Bearbeitbarkeit; S=Schleifbarkeit  
 Bewertungsskala 1 (unzureichend)...10 (ausgezeichnet)

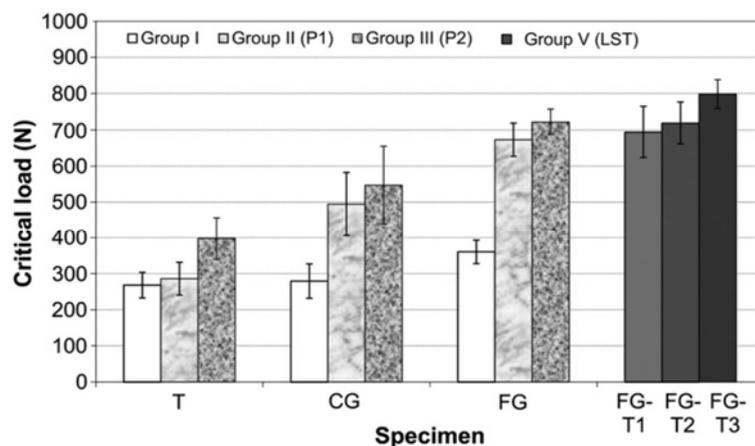
### 2.1.3.2 Werkzeugwerkstoffe für spezielle Anwendungen

An dieser Stelle sei auch der Einsatz von Pulvermetallurgischen (PM) Werkzeugstählen, die durch heißisostatisches Pressen (HIP) hergestellt werden, erwähnt. Groche und Christiany (2013) zeigten in Untersuchungen die etwa um den Faktor zehn höheren Standzeiten von PM-Stählen im Vergleich zum Einsatz von Kaltarbeitsstahl bei der Verarbeitung von DP980 Halbzeugen. Erklärt wird dies laut Gåård et al. (2009) unter anderem durch das feinere und gleichmäßig verteilte Hartstoffgefüge, welches geringere Adhäsionsneigung besitzt. Auch ist der Einsatz von Hartmetalleinsätzen in Extremfällen durchaus eine Möglichkeit um die geforderten Standzeiten zu erreichen. Dieser Werkstoff wird häufig bei Stanzoperationen zur Herstellung der Schneidelemente verwendet.

Für die Umformung von austenitischen Edelstählen werden häufig Aluminiummehrstoffbronzen als Werkzeugwerkflächen verwendet. Diese haben laut Oehler und Kaiser (2001, S. 656) sehr niedrige Reibungswerte welche die Oberflächen des Ziehteils außerordentlich schonen sowie Falten, Riefen und Kratzer am Bauteil vermeiden. Diese Tiefziehbronzen werden häufig bei Herstellern von weißer Ware eingesetzt. Die gebräuchlichsten Legierungen sind von der AMPCO METAL SA unter den Produktnamen AMPCO 22, 25, 26 verfügbar.

### 2.1.3.3 Einfluss der Oberflächentopologie

Jedoch ist nicht nur der Parameter Werkzeugwerkstoff für das Umformergebnis entscheidend sondern noch einige andere Parameter auf welche im Folgenden eingegangen wird. So hat zum Beispiel die Oberflächenrauheit bzw. -topografie eine Auswirkung auf den Reibwert und Verschleiß. Abbildung 13 zeigt die kritische Last bezüglich Kaltverschweißen von Kaltarbeitsstahl. Generell kann gesagt werden, dass durch reduzieren Oberflächenrauheit mittels Schleifen und Polieren der Verschleißwiderstand signifikant zunimmt.



Legende:

T=gedrehte Oberfläche  $R_a=3,42\mu\text{m}$ ; CG=grob geschliffen  $R_a=0,8\mu\text{m}$ ; FG=fein geschliffen  $R_a=0,18\mu\text{m}$ ;

Group II poliert mit  $20\mu\text{m}$  Partikeln; Group III poliert mit  $10\mu\text{m}$  Partikeln;

Group V poliert mit  $10\mu\text{m}$  Partikeln plus Oberflächentexturierung mittels Nd:YAG Laser

Abbildung 13 Kaltverschweißneigung von 1.2379 (900HV1) in Abhängigkeit von unterschiedlichen Oberflächenstrukturen - (Podgornik und Jerina 2012)

### 2.1.3.4 Oberflächenschichten

Reichen die Maßnahmen von Vergüten und Polieren nicht aus gibt es weitere Möglichkeiten die Verschleißigenschaften der Werkzeugoberflächen zu steigern. Abbildung 14 zeigt die Herstellmöglichkeiten von Oberflächenschichten zur Verbesserung der tribologischen Verhältnisse bei Umformoperationen. Hier wird im Wesentlichen zwischen der Herstellung von Reaktionsschichten bzw. von Auftragschichten unterschieden von denen die gebräuchlichsten hier näher erläutert werden. Das bekannteste Verfahren in der ersteren Gruppe ist das Nitrieren von Werkzeugstählen. Dieses Verfahren kann in unterschiedlichen Varianten angewendet werden. Das Gasnitrieren wird bei einer Ofentemperatur von ca. 450 – 550 °C und der Zufuhr von Ammoniak durchgeführt. Der freiwerdende Stickstoff diffundiert in den Stahlwerkstoff und bildet harte Eisenitride. Die entstehende Schicht hat laut Böge et al. (2014, S. M37-M38) eine Härte von 1.000 – 1.400 HV<sub>0,05</sub> und eine Schichttiefe von 50 – 150 µm. Das Verfahren ist im Vergleich zu anderen Beschichtungsverfahren sehr wirtschaftlich und effektiv. Ein Nachteil von diesem Verfahren liegt im erhöhten Aufwand von nachträglichen Veränderungen bzw. Reparaturen am Werkzeug.

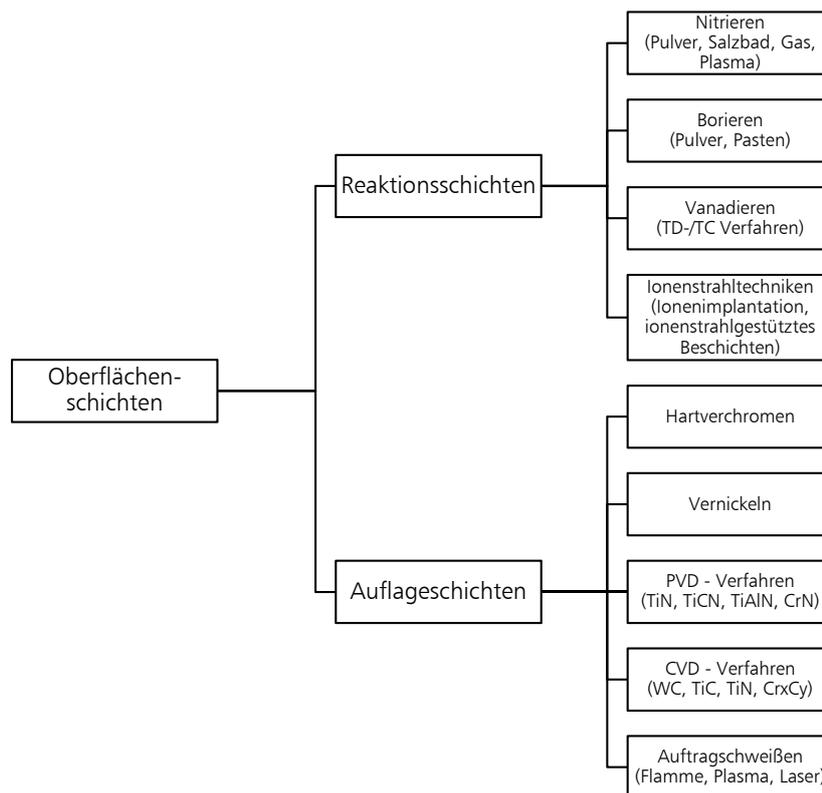


Abbildung 14 Verschleißschutzschichten und Beschichtungsverfahren für die Umformtechnik (Westheide et al. 1993, S. 670)

Hartverchromen ist ein galvanisches Beschichtungsverfahren bei dem in einem elektrolytischen Chrombad eine Hartchromschicht auf die Werkstückoberfläche abgeschieden ist. Die Beschichtungstemperatur liegt verfahrensbedingt bei ca. 60 °C. Aufgrund der Abscheidungsbedingungen tritt laut Westheide et al. (1993, S. 680) ein mehr oder weniger ausgebildetes

Rissnetzwerk auf. Zudem sind auf mögliche Fehler wie Wasserstoffversprödung, teilweises Abplatzen der Beschichtung aufgrund des Eierschaleneffekts und ungleichmäßige Beschichtungsdicken im Bereich scharfer Kanten zu achten. Die Beschichtung wird üblicherweise in einer Dicke von 5-10  $\mu\text{m}$  aufgetragen und besitzt eine Härte von 1000 – 1800 HV0,1.

Als weitere Dünnschicht-Beschichtungsverfahren werden PVD (physikalische Abscheidung aus der Gasphase) bzw. CVD (chemische Abscheidung aus der Gasphase) häufig eingesetzt um die tribologischen Eigenschaften von Werkzeugoberflächen zu verbessern. Letzteres Verfahren benötigt, um den Beschichtungswerkstoff chemisch in eine gasförmige Phase überzuführen, höhere Temperaturen welche laut Weißbach (2014, S. E79) bei plasmaunterstütztem CVD zwischen 300-600 °C liegen. Diese hohen Temperaturen sind jedoch nur bei Substratwerkstoffen möglich, die sich bei solchen Temperaturen in ihrem Gefüge stabil erweisen. Die Kathodenverdampfung bzw. -zerstäubung beim PVD Verfahren erfolgt zwischen 200-500 °C und daher deutlich niedriger. Jedoch ist im Vergleich zum CVD Verfahren eine Vakuumkammer und ein Substrathalter der sich bewegt bzw. rotiert notwendig um einen möglichst homogenen Schichtaufbau zu erzeugen. In Abbildung 15 ist das PVD Prozessschema dargestellt. Laut Hofmann und Spindler (2014, S. 107–108) sind folgende Elementarschritte notwendig:

- Überführung des Metalls in die Gasphase (Ausbildung der Transportform)
- Transport zum Substrat
- Schichtbildungsprozess (Kondensation, Adsorption, Keimbildung, Schichtwachstum)

Es sind mehrere PVD Varianten mit unterschiedlichen Methoden zur Überführung des Schichtwerkstoffes in die Gasphase entwickelt worden. Hierzu zählen das Aufdampfen (thermisches Bedampfen), Aufstäuben (Sputtern, Kathodenzerstäubung) und Ionenplattieren.

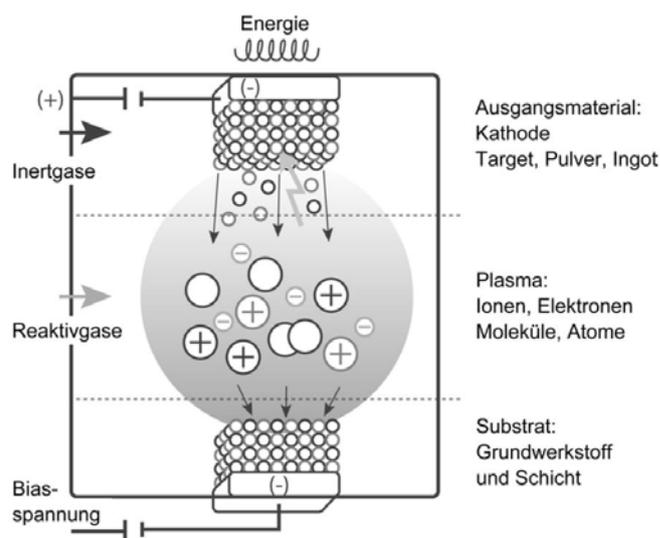


Abbildung 15 Schematische Darstellung PVD Prozess (Bobzin et al. 2010, S. 89)

Gängige PVD Schichten sind laut Bobzin et al. (2010, S. 87–88) TiC, TiCN, TiN, die seit einigen Jahrzehnten verarbeitet werden. DLC-Schichten (Diamond Like Carbon) zeigen ebenfalls sehr gute tribologische Eigenschaften, wie auch sehr harte Beschichtungen auf Basis von AlCrN.

Um einen homogenen Härteanstieg vom Substrat in Richtung Beschichtungsoberfläche zu erzeugen ist auch eine Verfahrenskombination von Nitrieren und PVD-Beschichten üblich. Hierdurch ergibt sich eine verbesserte Stützwirkung des Substrates auf die Schicht und reduziert den sogenannten Eierschaleneffekt. Dieser Vorteil wird durch die dargestellten Ergebnisse eines Ritztest an PVD beschichteten Proben in Abbildung 16 verdeutlicht. Bei der kombinierten Oberflächenbeschichtung (Nitrieren und PVD Beschichten) ist die kritische Last deutlich höher als bei rein PVD beschichteten Proben.

Auch die Oberflächenrauigkeit hat einen signifikanten Einfluss auf den Verschleiß des Werkzeugs. So wurde an mehreren Stellen gezeigt, dass eine Reduktion der Rauigkeit durch Polieren der Werkzeugflächen stets zu reduzierter Verschleißneigung hinsichtlich Adhäsion neigt. Beispielhaft ist in Abbildung 17 gezeigt wie durch nachträgliches Polieren die kritische Last hinsichtlich Materialübertragung eines 1.4301 (350HV) auf einen VANADIS 4 Kaltarbeitsstahl (62 HRC) durch Reduktion der Rauheit signifikant ansteigt. Des Weiteren zeigt sich hier der vorteilige Einsatz von DLC Schichten bei Edelstahl, welcher aufgrund der hohen chemischen Inertheit geringe Adhäsionsneigung zeigt.

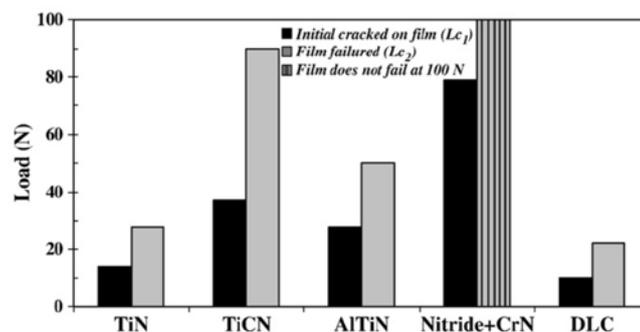


Abbildung 16 Ritztest Ergebnisse bei unterschiedlichen Beschichtungsvarianten auf Kaltarbeitsstahl 1.2379 gehärtet auf  $60 \pm 2$ HRC (Sresomroeng et al. 2010)

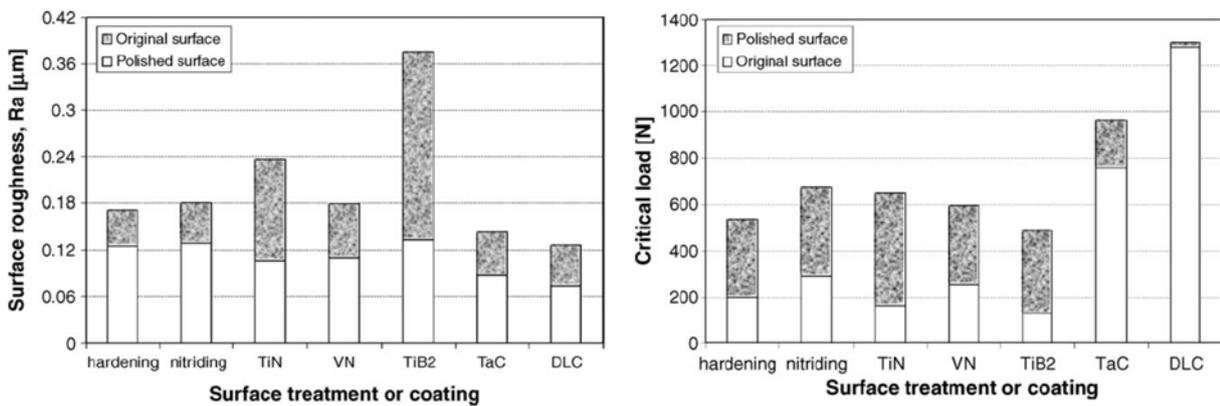


Abbildung 17 Unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten bei durchgeführten Polierverfahren nach Beschichtung (links) und deren Auswirkungen auf die kritische Last hinsichtlich Materialübergang (kaltverschweißen) von dem Werkstoff 1.4301 auf den jeweiligen Kaltarbeitsstahl (Podgornik et al. 2006)



Abbildung 18 Werkzeugverschleiß nach Presshärten von 150 Stk. AlSi beschichteten 22MnB5 Blechen (Kondratiuk und Kuhn 2011)

Jedoch haben Dünnschichtbeschichtungen nicht immer nur Vorteile um den Verschleißwiderstand zu erhöhen. Speziell in der Warmumformung zeigen sie Nachteile aufgrund schlechter Wärmeleitfähigkeit und unterschiedlicher Wärmeausdehnung. Bei Versuchen von Kondratiuk und Kuhn (2011) zeigten sich diese Schichteigenschaften beim Presshärten von AlSi beschichteten

22MnB5 sehr deutlich, wie in Abbildung 18 zu sehen ist. In dieser Versuchsreihe hat sich die unbeschichtete Variante als vorteilhaft erwiesen.

Im Gegensatz zu den Dünnschichtbeschichtungen gibt es auch andere Beschichtungsprozesse im Bereich des Auftragschweißens. Dazu zählen das Gas-Pulver-, WIG-, MSG-Schweißen, das Plasma-Pulver-Auftragschweißen bzw. Laserauftragschweißen. Die beiden letzteren haben sich für Umformwerkzeuge als technisch relevante Beschichtungsverfahren herausgestellt. Die Vorteile dieses Verfahren sind laut Fahrenwaldt et al. (2014, S. 209):

- Möglichkeit des Aufbringens relativ dicker Schichten
- Schichten geeignet auch für extreme Schlag- und Stoßbeanspruchungen
- Geringe Anfälligkeit gegenüber punkt- und linienförmigen Belastungen
- Hohe Abschmelzleistung
- Flächenmäßig große wie örtlich begrenzte Schichten können auftraggeschweißt werden
- Auch große Bauteile können auftraggeschweißt werden
- Einfache Gerätetechnik
- Schichten mit großer Variationsbreite der Eigenschaften können erzielt werden
- Fast alle metallischen Grundwerkstoffe können beschichtet werden.

In Tabelle 6 werden Auftragschweißverfahren qualitativ den Dünnschichttechnologien CVD/PVD gegenübergestellt. Im Weiteren wird auf das Laserauftragschweißen noch detaillierter eingegangen.

Tabelle 6 Vergleich unterschiedlicher Beschichtungsverfahren (Toyserkani et al. 2005, S. 49)

<i>Verfahren</i>	<i>Laserauftrag-schweißen</i>	<i>Lichtbogen-schweißen WIG / MSG</i>	<i>Thermisches Spritzen / PTA</i>	<i>CVD</i>	<i>PVD</i>
<i>Haftfestigkeit</i>	Hoch	Hoch	Moderat	Niedrig	Niedrig
<i>Aufmischung</i>	Hoch	Hoch	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden
<i>Beschichtungs-material</i>	Metalle, Keramiken	Metalle	Metalle, Keramiken	Metalle, Keramiken	Metalle, Keramiken
<i>Beschichtungsdicke</i>	50 µm bis 2 mm	1 mm bis mehrere mm	50 µm bis mehrere mm	0,05 µm bis 20 µm	0,05 µm bis 10 µm
<i>Wiederholbarkeit</i>	Mittel bis Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch
<i>Wärmeeinflusszone</i>	Niedrig	Hoch	Hoch	Sehr niedrig	Sehr niedrig
<i>Automatisierbarkeit</i>	Mittel bis Hoch	Niedrig	Mittel	Mittel bis Hoch	Mittel bis Hoch
<i>Kosten</i>	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Hoch

## 2.2 Laser in der Produktionstechnik

Durch die starke Entwicklung der Lasertechnik in den vergangenen Jahren wird der Einsatz dieser Technologie in der Lasermaterialbearbeitung immer vielfältiger. In Tabelle 7 wird eine Übersicht von unterschiedlichen Verfahrensarten gegeben.

Tabelle 7 Übersicht der Arbeitsverfahren der Lasermaterialbearbeitung (Bliedtner et al. 2013, S. 17)

<b>Materialeigenschaftsändernde Verfahren</b>	Härten, Markieren und Beschriften, Umschmelzen, Gaslegieren, Verglasen, Oberflächenbehandlung, Umformen / Biegen
<b>Trennende Verfahren</b>	Bohren, Perforieren, Schneiden, Abtragen, Strukturieren, Ritzen, Skribent, Gravieren, Reinigen, Trimmen, Abgleichen, Abisolieren, Warmzerspannung
<b>Fügende Verfahren</b>	Schweißen, Löten
<b>Auftragende und generierende Verfahren</b>	Metallpulver- und Drahtbeschichten, Legieren mit Draht oder Pulver, Dünnbeschichten, Lasersintern, Stereolithografie, LOM Verfahren

Trotz der nach wie vor hohen Investitionskosten hat die Lasermaterialbearbeitung ihre Vorteile und macht sie für viele Fertigungsverfahren unabhkömmlich (2013, S. 16):

- Hohe Energiedichte
- „Berührungslose“ Bearbeitung bzw. kein Werkzeugverschleiß
- Variable Strahleigenschaften (z.B. Pulsform, Intensitätsverteilung)
- Geringe Wärmeeinflusszone
- Geringe Wärmebelastung (minimaler Verzug)
- Geringe Trägheitskräfte da das Werkzeug Laser nahezu „masselos“ ist
- Breite Palette an Werkstoffen bearbeitbar
- Große Flexibilität
- Automatisierbar

### 2.2.1 Grundlagen der Lasertechnologie

#### 2.2.1.1 Physikalische Eigenschaften der Laserstrahlung

Hinter dem Begriff LASER steht eine Abkürzung welche „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ oder in deutscher Übersetzung „Licht angeregter, Strahlung emittierender Resonator“ bedeutet. Im Laufe der Vergangenheit hatte es mehrfach unterschiedliche Beschreibungsansätze und physikalische Modelle für das Licht gegeben. Dazu zählen Modelle die sowohl auf einen Teilchencharakter, als auch Formulierungen die auf einen Wellencharakter hinwiesen. Anfang des 20. Jahrhunderts war es Max Planck der mit dem Aufstellen der Quantentheorie den Ansatz verfolgte, dass elektromagnetische Wellen, zu welchen auch die Lichtwellen zählen, nur in fest definierten Mengen, sogenannten Quanten, abgestrahlt werden können. Albert Einstein führte nur wenig später den Begriff Lichtquant, welches heute auch häufig als Photon bezeichnet wird, ein. Er war auch der Erste welcher den theoretischen Ansatz der stimulierten Emission beschrieb. Zur Beschreibung der induzierten bzw. stimulierten Emission welche zur Erzeugung von Laserstrahlung

notwendig ist bedarf es quantentheoretischer Ansätze oder den sogenannten Welle-Teilchen-Dualismus. Nach dem Bohr'schen Atommodell besitzt ein Atom um den mit Protonen und Neutronen besetzten Atomkern mehrere Elektronenschalen in denen die Elektronen um den Kern kreisen. Dabei beschreiben die unterschiedlichen Bahnabstände auch diskrete Energiezustände. Die Elektronen neigen dazu möglichst tiefe Energiezustände anzunehmen – also innere Schalen zu besetzen. Wird ein Elektron wie in Abbildung 19 dargestellt von einem inneren Energieband auf ein höheres gehoben (z.B. von  $E_1$  auf  $E_2$ ), so ist ein Impuls bzw. eine Energiezufuhr notwendig. Dieser Zustand ist jedoch instabil, sodass nach einer mittleren Verweildauer das Elektron wieder in das tiefer liegende Energieband zurück fällt. Dabei emittiert es spontan ein Photon mit einer definierten Energie und Frequenz nach der Gleichung :

$$E_2 - E_1 = h\nu \tag{2.5}$$

$h$  Planck'sches Wirkungsquantum,  $\nu$  Frequenz

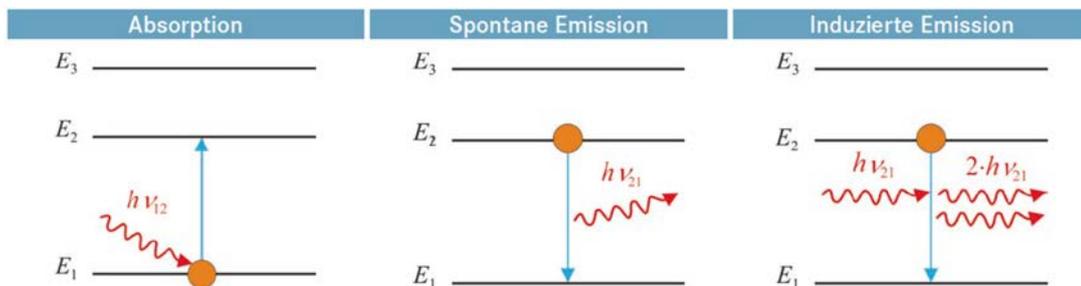


Abbildung 19 Prinzipdarstellung von Absorption und Emission (Bliedtner et al. 2013, S. 22)

Emission kann aber nicht nur spontan erfolgen sondern auch induziert durch einen äußeren Strahlimpuls. Voraussetzung ist wiederum die obige Bedingung. Dabei weisen das einfallende und ausgesandte Photon folgende Besonderheiten auf (Ebenda):

- gleiche Frequenz
- gleiche Phasenlage
- gleiche Ausbreitungsrichtung
- gleiche Polarisationsrichtung

Dies ist die Grundlage der Laserstrahlung deren wesentliche Charakteristika sie von anderen elektromagnetischen Strahlungsarten unterscheidet. Laserstrahlen sind monochromatisch, kohärent und gleich gerichtet. Dies ist unbedingt notwendig um die hohen Energiedichten und präzisen Strahlführungen realisieren zu können.

### 2.2.1.2 Der Resonator und die Strahlparameter

Zur Erzeugung von Laserstrahlung ist ein sogenannter Resonator notwendig. Dessen Aufbau ist im einfachsten Fall wie in Abbildung 20 dargestellt und erfolgt unabhängig vom aktiven Lasermedium immer nach dem gleichen physikalischen Prinzip. Als aktive Medien, welche durch Energiezufuhr

angeregt werden, können Gase, Festkörper und Halbleiter herangezogen werden. Man spricht hier auch vom Pumpen des Lasers. Dieses erfolgt je nach Art des Lasers entweder durch optisches Pumpen, durch Stoßanregung, Stromfluss in einem pn-Übergang oder durch chemisches Pumpen. Durch die Anordnung von zwei Spiegeln an den Enden des aktiven Mediums, von denen einer vollständig reflektierend und der andere teildurchlässig ist, kann eine Erhöhung des Strahlungsfeldes erfolgen. Bei der Erzeugung von Laserstrahlung ist es wichtig einen wesentlich höheren Anteil von stimulierter Emission als von spontaner Emission zu erhalten. Um diese wesentliche Laserbedingung zu erfüllen ist die Erzeugung einer sogenannten Besetzungsinversion notwendig. Dies bedeutet vereinfacht, dass sich eine größere Anzahl Elektronen auf dem höheren Energieniveau befinden als im energetisch niedrigeren. Eine weitere Voraussetzung zur Erzeugung eines Lasers ist die Erfüllung der Anschlagbedingung welche besagt, dass der optische Gewinn größer oder gleich der Summe aller Verluste und des ausgekoppelten Anteils sein muss. Die bei der Anregung stets entstehende Verlustenergie in Form von Wärme muss kontinuierlich abgeführt werden um eine möglichst konstant niedrige Temperatur des Resonators zu gewährleisten. Eine hohe Resonator-Temperatur wirkt der Besetzungsinversion entgegen und erhöht die Instabilität des Lasers.

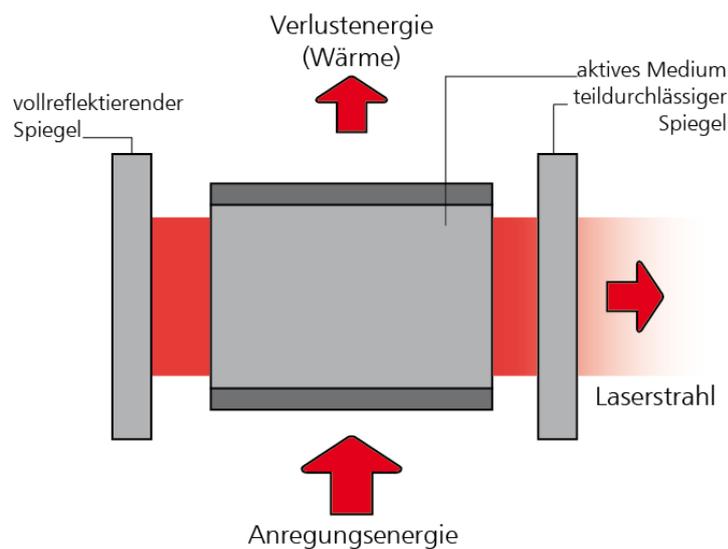


Abbildung 20 Grundlegender Aufbau eines Resonators, Darstellung nach Buchfink und Leibinger-Kammüller (2006, S. 34)

Der Anteil des Laserstrahls, der durch den teildurchlässigen Resonatorspiegel ausgekoppelt wird, ist nutzbar und dient der technischen Anwendung. Da das Licht den Resonator mehrfach durchläuft entsteht eine stehende Welle, welche durch eine charakteristische räumliche Verteilung der Feldstärke gekennzeichnet ist. Man spricht hier auch von Eigenschwingungen bzw. Moden des Resonators. Die senkrecht zur Laserachse stehenden Eigenschwingungen bezeichnet man auch als Transversale-Elektro-Magnetische (TEM) Moden (s. Abbildung 21). Diese werden hauptsächlich durch Beugung an den begrenzenden Resonatorflächen bestimmt und verändern die Charakteristik des ausgekoppelten Laserstrahls. Der Grundmode TEM<sub>00</sub>-Mode hat eine gaußförmige

Intensitätsverteilung und wird in der Lasermaterialbearbeitung sehr häufig eingesetzt. In diesem Bereich technisch relevant sind jedoch auch die TEM<sub>10</sub> geläufig auch unter der Bezeichnung Ring- oder Doughnut-Strahlprofil und TEM<sub>01</sub> Moden.

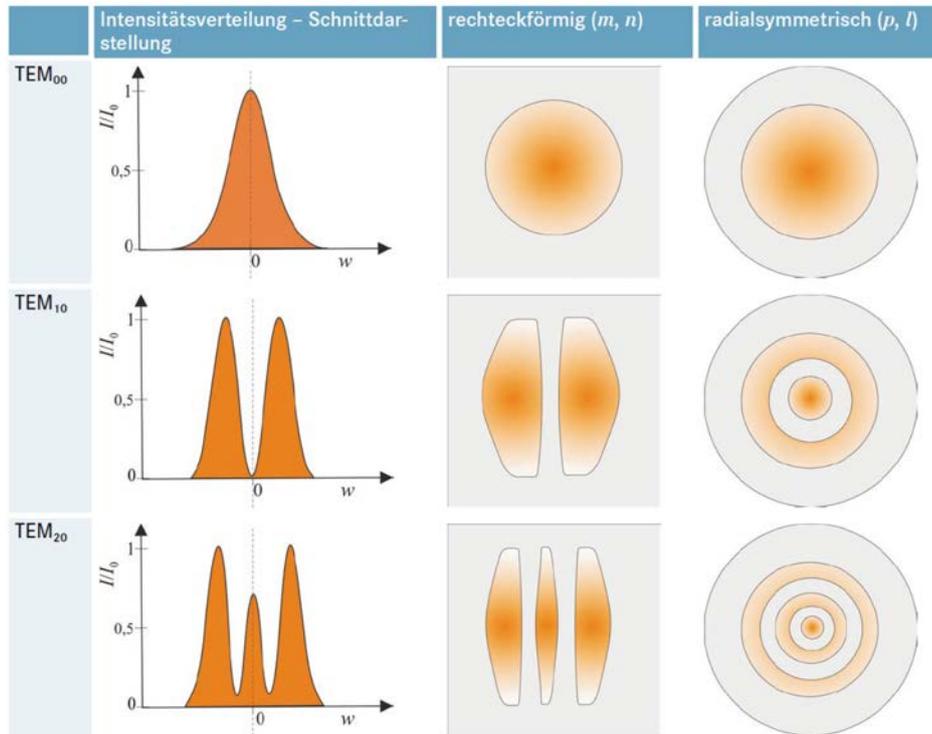


Abbildung 21 Intensitätsverteilung transversaler Moden für eine Rechteckgeometrie mit den Ordnungszahlen m,n für eine Kreisgeometrie mit den Ordnungszahlen p,l (Bliedtner et al. 2013, S. 34)

Die im folgenden Abschnitt erläuterten Eigenschaften der Strahlung sind im Wesentlichen aus den Normen EN ISO 11145, EN ISO 11146:1 und EN ISO 11146:2 zusammengefasst

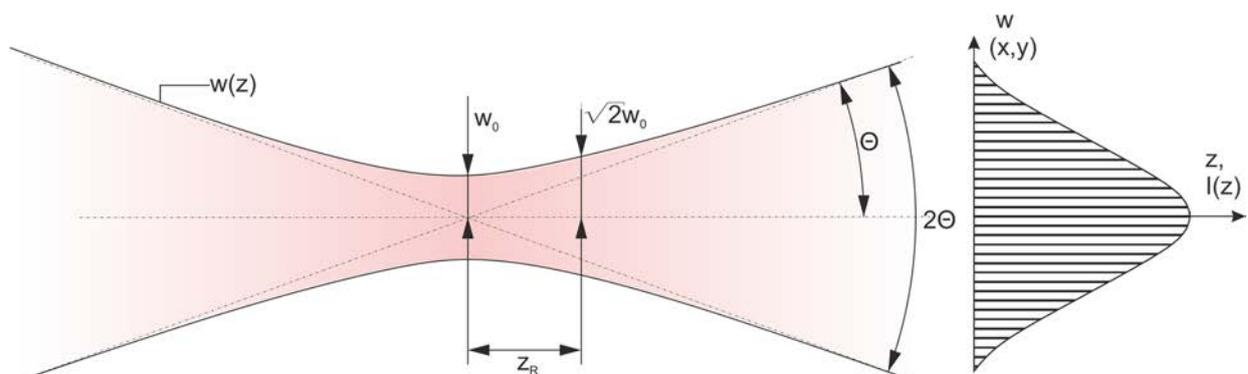


Abbildung 22 Eigenschaften der Strahltaile, Darstellung nach Buchfink und Leibinger-Kammüller (2006, S. 44)

Eine wichtige Eigenschaft des Laserstrahls ist der Verlauf seiner Strahltaille. Dieser bestimmt im Wesentlichen auch über seine möglichen Einsatzgebiete in der Materialverarbeitung. Ein ideal parallel verlaufender Strahl ist aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften wie der Wellenlänge nicht möglich. Geometrischen Toleranzen und thermische Effekte im Aufbau des Resonators vergrößern zudem die Divergenz ausgehend von seiner Strahltaille wie in Abbildung 22 dargestellt.

Die Fernfelddivergenz  $\theta_0$  [rad] (Halbwinkel) für einen idealen Gaußstrahl ( $M^2 = 1, k = 1$ ) ist folgend definiert, wobei  $\lambda$  [m] die Wellenlänge des Strahles und  $w_0$  [m] den Strahltaillen-Radius darstellen

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} \quad (2.6)$$

Das Strahlparameterprodukt für einen idealen Gaußstrahls  $SPP_G$  [rad m] ergibt sich somit

$$SPP_G = \frac{\lambda}{\pi} \quad (2.7)$$

Betrachtet man einen realen Rohstrahl mit gaußscher Intensitätsverteilung so wird die Fernfelddivergenz  $\theta$  [m rad] durch den Faktor der dimensionslosen Strahlgüte  $k$  [1] ergänzt. Es gilt stets  $\theta > \theta_0$

$$\theta = \frac{\lambda}{k \cdot \pi \cdot w_0} \quad (2.8)$$

Das Strahlparameterprodukt  $SPP$  [m rad] des realen Strahls ist definiert als

$$SPP = w_0 \cdot \theta \quad (2.9)$$

Zur Beurteilung und als Vergleichswert der Strahleigenschaften wird die Strahlgüte als Quotient der Strahlparameterprodukte ideal und real berechnet und wie in Gleichung (2.10) angegeben. Die Werte sind in jedem Fall  $k < 1$ . Der Wert  $k = 1$  würde einem idealen Gaußstrahl entsprechen.

$$k = \frac{SPP_G}{SPP} \quad (2.10)$$

Häufiger wird heute zur Vergleichbarkeit der Strahlqualität die Beugungsmaßzahl ermittelt und angegeben. Diese ist als Umkehrfunktion der Strahlgüte definiert, wobei  $M^2 > 1$  gilt. Technisch erreichbar sind heute laut Bliedtner et al. (2013, S. 101) Beugungsmaßzahlen von ca. 1,05 bei Festkörperlaser und 1,1 bei CO<sub>2</sub> Lasern. Werte  $M^2 < 2$  werden als quasi grundmodig betrachtet. Laser mit geringer Beugungsmaßzahl lassen sich zu sehr kleinen Durchmessern fokussieren, was eine hohe Energie- bzw. Leistungsdichte bedeutet.

$$M^2 = \frac{1}{k} \quad (2.11)$$

Ist der Strahltaillenradius der Laserquelle bekannt so kann die halbe Rayleigh-Länge  $z_R$  [mm] ermittelt werden bzw. auch umgekehrt. Der Zusammenhang ist in der Gleichung (2.12) angegeben.

Die Rayleighlänge ist ein Maß der Schärfentiefe des Strahles. Sie ist per Definition der halbe Abstand ausgehend von der Strahltaile bei der sich die Strahlquerschnittsfläche verdoppelt.

$$z_R = \frac{k \cdot \pi \cdot w_0^2}{\lambda} \quad (2.12)$$

Die Ermittlung der Beugungsmaßzahl erfolgt laut Eichler und Eichler (2010, S. 246) durch Messung des Strahldurchmessers an mindestens zehn Stellen, wobei fünf Messungen innerhalb der Rayleighlänge und fünf Messungen in einer Entfernung größer als der doppelten Rayleighlänge ausgehend von der Strahltaile durchzuführen sind.

### 2.2.1.3 Polarisation des Laserlichts

Lichtwellen besitzen eine zugehörige Schwingungsrichtung bzw. Polarisation. Unpolarisierte Lichtwellen schwingen zufällig verteilt in unterschiedlichen Richtungen. Bei polarisiertem Licht ist die Schwingungsrichtung der einzelnen Lichtwellen gleich ausgerichtet. Die für die Lasermaterialbearbeitung relevanten Polarisationsarten sind lineare und zirkulare Polarisierung. Während linear polarisierte Laserlichtwellen ihre Schwingungsrichtung in einer Ebene besitzen, haben zirkular polarisierte Wellen die Form einer Spirale. Laut Buchfink und Leibinger-Kammüller (2006, S. 100f) werden durch linear polarisiertes Laserlicht bei verschiedenen Bearbeitungsrichtungen unterschiedliche Bearbeitungsergebnisse erzielt. Deutlich erkennbar wird dieser Effekt z.B. beim Laserschneiden bei dem deutlich bessere Ergebnisse hinsichtlich maximaler Schneidgeschwindigkeit und Qualität bei Übereinstimmung von Polarisationsrichtung und Schnittrichtung erzielt werden als bei normaler Ausrichtung. Für unidirektionale Bearbeitung hat sich aus diesem Grund zirkular polarisiertes Laserlicht als vorteilhaft erwiesen. Häufig wird deshalb in der Strahlführung linear polarisiertes in zirkular polarisiertes Laserlicht umgewandelt. Dies geschieht in der Regel durch sogenannte Phasenschieber oder  $\lambda/4$  Verzögerungsspiegel. Dies sind mehrfach beschichtete Spiegel mit unterschiedlichen Reflexionseigenschaften. Hierbei wird ein Teil der Lichtwellen normal reflektiert und der andere zeitverzögert um  $\pi/2$  phasenverschoben. Durch Überlagerung dieser reflektierten Teilwellen entsteht eine spiralförmige zirkular polarisierte Lichtwelle. Dies ist für die Materialbearbeitung ein besonders wichtiger Polarisationszustand. (Hügel und Graf 2009, S. 13)

### 2.2.1.4 Strahlführung

Je nach Lasertyp sind unterschiedliche Strahlführungsarten vom Resonator bis zur Bearbeitungsoptik möglich. Beim CO<sub>2</sub> Laser ist eine Strahlführung über ein Faserkabel aufgrund der Wellenlänge nicht möglich. Hier erfolgt die Strahlführung und -formung über Spiegel, die meist aus sauerstofffreiem Kupfer bestehen. Zur Verbesserung der Reflexionseigenschaften, bzw. um einen höheren mechanischen Widerstand gegen Verkratzen zu erzielen, können die optischen Komponenten mit unterschiedlichen Beschichtungen versehen werden. Speziell für die Wellenlänge von  $10,6 \mu\text{m}$ , gibt es auch transmittierende Materialien, die für optische Elemente wie z.B. Linsen verwendet werden können. Häufig werden Linsen aus Zinkselenid (ZnSe) verbaut. Komponenten aus diesem Material

müssen allerdings sehr sorgsam gehandhabt werden, da sie nach der EU-Verordnung (EG) 1272/2008 (CLP) als giftig und umweltgefährlich klassifiziert sind. (Hügel und Graf 2009, S. 82f)

Festkörperlaser mit einer Wellenlänge bis zu  $1,06 \mu\text{m}$  können in eine Faser zur Strahlführung eingekoppelt werden. Diese flexiblen Lichtleiter haben in der Materialverarbeitung Vorteile gegenüber der klassischen Strahlführungsbauweise mit Spiegeln. Sie können flexibel verlegt und zum Prozess geführt werden, somit entfällt die räumliche Umlenkung mittels Spiegel. Die Lichtleitung ist nahezu verlustfrei (technisch bis 100 m), das Strahlparameterprodukt wird nicht negativ beeinflusst und des Weiteren ist ein gleichbleibender Durchmesser des Laserstrahls bis zur Bearbeitungsoptik möglich. Insgesamt ist dadurch ein deutlich geringerer maschinentechnischer Aufwand für eine 3D Bearbeitung zu betreiben. (Hügel und Graf 2009, S. 97)

Im Wesentlichen stehen mit der Stufenindexfaser und der Gradientenindexfaser zwei Arten von optischen Lichtfasern zur Verfügung. Die erste Fasertyp ist gekennzeichnet durch eine sprunghafte Änderung der Brechzahl zwischen Faserkern und Fasermantel. Dadurch kommt es bei der Durchleitung des Laserstrahls an der Hülle des Faserkerns zur Totalreflexion. Die Intensitätsverteilung ist über die komplette Faserfläche gleichmäßig verteilt, sie wird auch „Top-Hat“-Verteilung genannt. Bei der zweiten Fasertyp ist der Brechzahlindex von Fasermitte hin zum Fasermantel stetig verlaufend. Hierdurch wird eine gaußähnliche Intensitätsverteilung beibehalten. Um eine Beschädigung der Faser zu vermeiden sind diese im Mantel durch Kevlar verstärkten Kunststoff und wiederum einen flexiblen Metallschlauch verstärkt. Übliche Faserdurchmesser liegen zwischen  $150 \mu\text{m}$  und  $1500 \mu\text{m}$ . (Bliedtner et al. 2013, S. 148)

### 2.2.2 Wechselwirkung Laser – Werkstück

In der Materialbearbeitung ist die Lasertechnologie deshalb interessant, da es mit dem Zusammentreffen von Laserstrahl und Werkstoff zur Wechselwirkung kommt. Je nach Stoff, Oberflächenzustand und Wellenlänge werden unterschiedliche Anteile der Laserstrahlung absorbiert, reflektiert und transmittiert. Das Prinzip ist in Abbildung 23 dargestellt.

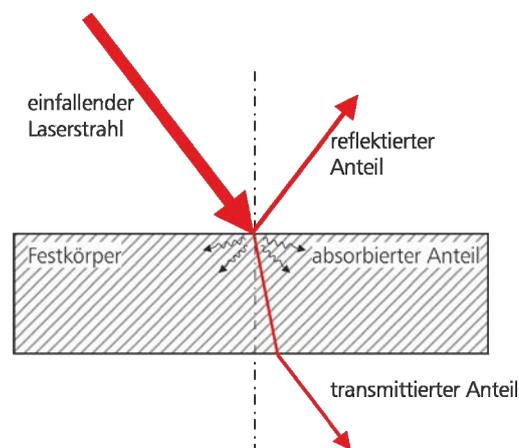


Abbildung 23 Wechselwirkungsprinzip zwischen Laserstrahl und Festkörper

Durch diese Gegebenheit kann auch die Energiebilanz aufgestellt werden, welche besagt, dass die Laserleistung  $P_L$  die Summe von absorbiertes Leistung  $P_A$ , reflektierter Leistung  $P_R$  und transmittierter Leistung  $P_T$  ist:

$$P_L = P_A + P_R + P_T \quad (2.13)$$

Zusätzlich kommen noch Einflussfaktoren wie z.B. mögliche Plasmabildung bei hohen Leistungsdichten, endotherme/exotherme Leistungsanteile aufgrund chemischer Reaktionen, Wärmeverluste u.a. die bei signifikanten Auftreten ebenfalls in der Energiebilanz berücksichtigt werden müssen. In diesem Zusammenhang lassen sich auch die Definitionen von Absorptionsgrad A, Reflexionsgrad R und Transmissionsgrad T ableiten.

$$1 = \frac{P_A}{P_L} + \frac{P_R}{P_L} + \frac{P_T}{P_L} = A + R + T \quad (2.14)$$

Bei der Lasermaterialbearbeitung von metallischen Werkstoffen liegt die Absorptionslänge oder optische Eindringtiefe laut Hügel und Graf (2009, S. 120) in der Größenordnung von einem bis maximal 100 nm daher kann die Transmission vernachlässigt werden ( $T \cong 0$ ). Dies gilt jedoch nicht für die Reflektion, deren Betrag folglich den nicht absorbierten Anteil ausmacht. Der Absorptionsgrad hängt im Wesentlichen von der eingesetzten Wellenlänge, der optischen Konstanten des Werkstoffes, der geometrischen Beschaffenheit der Oberfläche (z.B. Rauigkeit), des chemischen Oberflächenzustandes (z.B. Oxidschichten) und der Oberflächentemperatur ab. Diese Eigenschaften haben zueinander ebenfalls bestehende Wechselwirkungen (Poprawe 2005, S. 29).

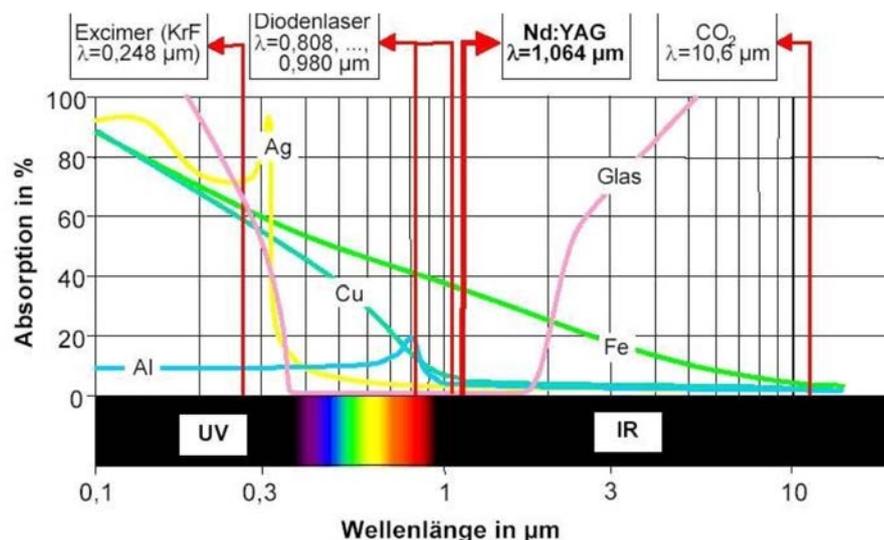


Abbildung 24 Absorptionsgrad unterschiedlicher Lasertypen und Werkstoffe (Fahrenwaldt et al. 2014, S. 91)

Zur Bestimmung der optischen Konstanten des Werkstoffes bei gegebener Wellenlänge werden Absorptionsversuche an Probenkörpern mit polierter Oberfläche bei Raumtemperatur durchgeführt. Abbildung 24 zeigt den Absorptionsgrad unterschiedlicher Werkstoffe bei verschiedenen Wellenlängen. Deutlich sichtbar ist hier, dass bei einer Wellenlänge von 10,6 μm kaum Absorption

bei Aluminium und Kupfer stattfindet, nur geringe bei Eisen und eine Transmission oder Strahlführung durch eine Glasfaser aufgrund der vollständigen Absorbierung der Lichtwellen nicht möglich ist.

Das Absorptionsverhalten eines Werkstoffes ist jedoch sehr stark von der Intensität der Laserstrahlung abhängig. Ab einer gewissen Leistungsdichte nimmt der Absorptionsgrad wesentlich höhere Werte an als durch die obere Darstellung zu erwarten ist. Man spricht hier von einer anormalen oder progressiven Absorption. Bei Erreichen dieser Schwelle kann ein sprunghafter Anstieg der Absorption beobachtet werden. Dieser Effekt wird bei unterschiedlichen Bearbeitungstechniken wie Schneiden und Schweißen genutzt. (Bliedtner et al. 2013, S. 116)

Für technische Anwendungen ist es wichtig das Verhalten der Energieeinkopplung optimal auszunutzen und diese Effekte richtig einzusetzen. Sowohl Werkstücktemperatur als auch Oberflächenrauigkeiten beeinflussen ebenfalls die Absorption. So kann z.B. durch Aufrauen einer technischen Oberfläche eines Stahlkörpers durch Quarzsandstrahlen die Energieaufnahme deutlich gesteigert werden. Bei einer Wellenlänge von  $10,6 \mu\text{m}$  des  $\text{CO}_2$  Lasers kann so die Absorption der Oberfläche eines Werkzeugstahls von ca. 5 % (poliert) auf knapp 50 % (sandgestrahlt) zunehmen. Begründet wird dies durch mehrfache diffuse Reflektionen innerhalb von Vertiefungen an der Oberfläche. Je kürzer die eingesetzte Wellenlänge ist, desto kleiner sind die Effekte von diesen Maßnahmen, da aufgrund der optischen Konstanten bereits ein höherer Energieanteil in den Werkstoff eingekoppelt wird.

### 2.2.3 Leistungsdichten und Einwirkzeiten

Je nach Bearbeitungsverfahren stehen heute unterschiedliche Lasertypen zur Verfügung. Neben Wellenlänge, Strahlparameter und Strahlführung sind die Intensität und die Einwirkdauer des Lasers eine wesentliche Eigenschaft für Einsatzmöglichkeiten. Abbildung 25 zeigt eine Gegenüberstellung von diesen zwei Parametern und deren Bearbeitungsverfahren. Bei der Bearbeitung von metallischen Werkstoffen sind also die Funktionen Erwärmen, Schmelzen, Verdampfen bis hin zum direkten Sublimieren des Werkstoffes bei Einsatz von Ultrakurzpulslasern möglich.

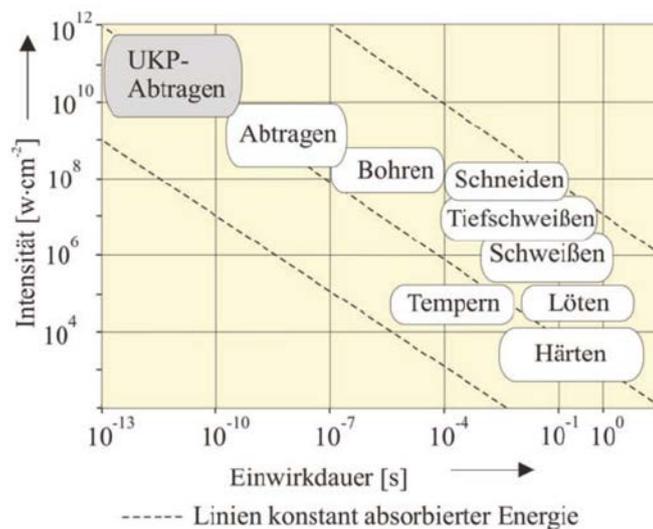


Abbildung 25 Laserintensität und Einwirkdauer für ausgewählte Bearbeitungsverfahren (Bliedtner et al. 2013, S. 112)

Entsprechend der Bearbeitung müssen Leistungsdichte und Bestrahlungszeit aufeinander abgestimmt sein. Lange Bestrahlungszeiten bei geringer Leistungsdichte bedeuten gleichzeitig eine Erwärmung von großen Materialvolumen aufgrund von Wärmeleitung. Im Gegensatz dazu verringern eine hohe Leistungsdichte und kurze Bestrahlungszeit die Verluste durch Wärmeleitung.

Durch die Leistungszuführung und die Einwirkdauer ergibt sich auch die davon abhängige Wärmewirkung im Werkstück. Wichtig für das Prozessverständnis ist die Kenntnis der Temperatur in Abhängigkeit von Ort und Zeit  $T(x, y, z, t)$  im bearbeiteten Werkstück. Die Berechnung der Temperaturverteilung ist abhängig von der Strahlintensität und -geometrie, Werkstückabmessungen und -eigenschaften und der Relativbewegung zwischen Strahl und Werkstück. Durch diese Parameter und Randbedingungen lassen sich die Geometrieverläufe der Isothermen berechnen. Diese geben Auskunft über die Größe und Geometrie des Schmelzbades und der Ausprägung der Wärmeeinflusszone.

### 2.2.4 Eingesetzte Lasertypen in der Fertigungstechnik

Zur industriellen Materialbearbeitung stehen heute unterschiedliche Lasertypen zur Verfügung. War vor einigen Jahren der  $\text{CO}_2$  Laser das Arbeitstier für industrielle Anwendungen ist ein vermehrter Einsatz unterschiedlicher Festkörperlaser für erweiterte Anwendungsgebiete deutlich erkennbar. Für manche Applikationen sind moderne Festkörperlaser bereits ein Ersatz für den bislang wirtschaftlich geltenden  $\text{CO}_2$  Laser. Für Oberflächenbehandlungen wie Gravieren, Strukturieren, Reinigen und Polieren sind ebenso gepulste Lasertypen verfügbar. In Tabelle 8 sind unterschiedliche Industrielaser gegenübergestellt.

Im Wesentlichen sind Wellenlänge, Ausgangsleistung, Pulslänge bzw. cw-Betrieb, Strahlparameter wie die Beugungsmaßzahl, und die Möglichkeiten der Strahlführung Entscheidungskriterien für Applikationen mit geeigneten Laserquellen.

Tabelle 8 Kennwerte typischer Industrielaser zur Materialbearbeitung  
Darstellung nach Nath (2013, S. 72)

Parameter	CO2 Laser	Nd:YAG Laser	Diodenlaser	Faserlaser	Excimerlaser	Ultrakurzpuls laser
Wellenlänge	10,06 $\mu\text{m}$	1,06 $\mu\text{m}$	0,8-0,98 $\mu\text{m}$	1,07 $\mu\text{m}$	125-351 nm	TSL: 0,7-1 $\mu\text{m}$ FL: 1,03-1,08 $\mu\text{m}$
Wirkungsgrad	5-20 %	LP: 1-3 % DP: 10-20 %	30-60 %	10-30 %	1-4 %	TSL: <1 % FL: >5%
Betriebsart	cw & gepulst	cw & gepulst	cw & gepulst	cw & gepulst	gepulst	
Ausgangsleistung in cw	bis 20 kW	bis 16 kW	bis 4 kW cw	bis 10 kW	$\emptyset$ 300 W	TSL: $\emptyset$ 1-5 W (36-100 fs) FL: $\emptyset$ 1-830 W (100-640 fs)
Pulsenergie / Dauer in Güteschaltung	1-10 J/ 100 ns-10 $\mu\text{s}$ ~J/100 ns	Bis 120 J/ 1-20 ms 1,2 J/~3 ns	pro Diode ~ $\mu\text{J}$ /100 ns	Bis 15 J/ 0,2-20 ms ~mJ/ 40-500 ns	Bis 1 J/ 20-30 ns	TSL: 15 nJ-290 $\mu\text{J}$ /36-100 fs FL: 30 nJ/100 fs
Max. Leistungsspitze	10 MW	50 MW	40 MW	10 MW	10-100 MW	100 kW-10 MW
Beugungsmaßzahl M <sup>2</sup> [mm mrad]	3-5	0,4-20	10-100	0,3-4		
Leitung durch Lichtfaser	Nein	Ja	Ja	Ja		Ja
Wartungsintervalle	2000 Std.	200 Std Lampen- lebensdauer	100000 Std Lampen- lebensdauer	100000 Std Dioden- lebensdauer	10 <sup>8-9</sup> Pulse	TSL: hoher FL: geringer Wartungsaufw.
Kosten (\$/W)	35-120	100-120	60-90	100	1000	TSL: 100-150k FL: 30-50k

TSL: Ti Saphir Laser, FL Faserlaser, LP Lampengepumpt, DP Diodengepumpt

## 2.3 Überblick generativer Laserverfahren

Der Begriff *generative Fertigungsverfahren* wird oftmals auch als additive Fertigung, Rapid Manufacturing oder Rapid Prototyping bezeichnet. Hauptmerkmal dieser Verfahren ist das Zusammenfügen (generieren, addieren) von Volumenelementen zu einer Form. Die verarbeiteten Werkstoffe sind vielfältig: Kunststoffe, Keramiken, Metalle, Papier, bis hin zu biologischem Zellmaterial. Ebenso die Einsatzgebiete: Bauteile, Werkzeuge, Modelle, Repliken, Skulpturen, Textilien und transplantierbare Gewebe (Berger et al. 2013, S. 3). Erste Ansätze für das Rapid Prototyping gab es in den 1980er Jahren als die erste Patentschrift für den 3D-Druck veröffentlicht wurde. Damals wurde mit der Stereolithografie eines der ersten 3D-Druckverfahren entwickelt. (Fastermann 2012, S. 8)

Betrachtet man die generativen Verfahren durch das Laserstrahlschmelzen von Metallen so kann zwischen Pulverbett-basierten und Pulverstrahl-basierten Fertigungsverfahren unterschieden werden. Unter der ersten Variante versteht man Verfahren des klassischen Rapid-Prototyping oder 3D-Drucks wie z.B. Selective Laser Melting, Laser Cusing, Direktes Laserformen, Direkt Metal Laser Sintering. Alle diese Verfahren beruhen auf demselben Prinzip mit nur leicht unterschiedlichen Verfahrensvarianten. Unter den Pulverstrahl-basierten Verfahren befindet sich das Laserauftragschweißen.

### 2.3.1 Allgemeine generative Laserverfahren

Galt der klassische 3D Druck von metallischen Bauteilen vor einiger Zeit als reines additives Verfahren ohne hohe mechanische Kennwerte, sind heute mit diesen Verfahren auch schon Werkzeugteile mit hoher Härte und Festigkeit möglich. Beispielhaft erwähnt sind hier die Arbeiten von Jansen (2014), Müller et al. (2012) und Ebd. (2014). Interessant ist diese Technologie vor allem für den Aufbau von konturnah liegenden Kühlkanälen zur optimalen Temperierung von Spritzguss- und Warmformwerkzeugen. Verarbeitet werden hierbei bereits Warmarbeitsstähle mit Härten von über 50HRC.

Derzeit sind sowohl die Aufbauraten [kg/h] und Bauraumgrößen, als auch das Wissen über Prozessführung, Oberflächenqualitäten und thermischen Spannungen beschränkt, sodass es noch zu keinem flächendeckenden Einsatz dieser Technologie kommt. Es ist allerdings zu erwarten, dass aufgrund der immer größer werdenden Leistungsfähigkeit und Weiterentwicklung der Anlagen immer mehr Anwendungsmöglichkeiten für den Werkzeugbau entstehen.

Nicht gebunden an die Bauraumgröße sind Verfahren mit Pulverstrahl, bei denen der aufgetragene Werkstoff direkt zum Schmelzbad zugeführt wird. Dieses Verfahren ist auch bekannt unter dem Begriff Laserauftragschweißen.

## 2.4 Laserauftragschweißen

Unter dem Verfahren Laserauftragschweißen sind in der Literatur unterschiedliche Begriffe zu finden: LMD (Laser Metal Deposition), DMD (Direct Metal Deposition), SLC (Selective Laser Melting), SLM (Selctive Laser Melting), DLC (Direct Laser Cladding), LRM (Laser Rapid Manufacturing), LPA (Laser-Pulver-Auftragschweißen). Die vielen Bezeichnungen bestätigen auch die Entwicklung dieses Verfahrens aus unterschiedlichen Richtungen. Je nach Einsatzgebiet wird es in der DIN 8580 unter den Hauptgruppen Urformen (Generieren von Körpern), oder Beschichten (Aufschweißen von metallischen Schichten) geführt.

In weiterer Folge werden in dieser Arbeit die Begriffe Laserauftragschweißen oder LMD für dieses Verfahren verwendet.

### 2.4.1 Prozessprinzip

Die für das Laserauftragschweißen benötigten Komponenten sind: Substrat (Werkstück), Laserstrahl, Zuführung des Schweißzusatzes, Schutzgasabdeckung und eine Maschinenkinematik zum Bewegen der Optik, wie in Abbildung 26 dargestellt. Die durch die Laserstrahlung eingekoppelte Energie erzeugt ein Schmelzbad in dem der Grundwerkstoff und der zugeführte Schweißzusatz aufgeschmolzen und miteinander gefügt wird. Bei diesem Vorgang entsteht neben der aufgetragenen Schicht eine vom Substrat bis in die Beschichtung reichende Mischzone, die jedoch verhältnismäßig gering ist. Das Laserauftragschweißen lässt sich laut DIN8580 nicht

eindeutig zuordnen, da je nach Anwendungsgebiet eher ein Beschichtungsvorgang oder eine Rapid Manufacturing Technologie zum Einsatz kommt.

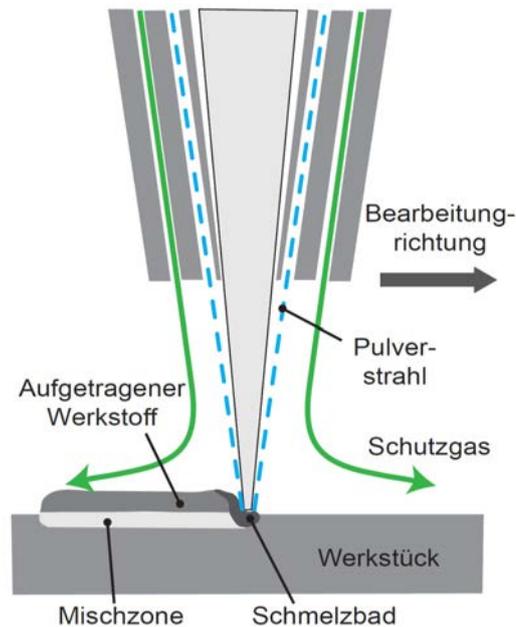


Abbildung 26 Funktionsprinzip Laserauftragschweißen

Das Laserauftragschweißen zeichnet sich laut Weisheit et al. (2013, S. 222) durch folgende Eigenschaften aus:

- Präzise generierte Geometrien mit Breiten und Dicken mit einer Untergrenze bis zu  $100\ \mu\text{m}$
- Flexibles Verfahren für 3D-Applikationen
- Minimale Oxidation im Schweißgut - auch für empfindliche Werkstoffe wie Titan geeignet
- Dicke einer einzelnen Lage zwischen  $0,1\text{-}2\ \text{mm}$ , dickere Schichten durch mehrlagigen Aufbau
- Minimierter Wärmeeintrag resultiert in einer geringen Wärmeeinflusszone und geringen Verzug des Bauteils
- Viele Metalle und Werkstoffkombinationen schweißbar
- Geringe Vermischung zwischen Substrat und Zusatzwerkstoff
- Automatisierbar

Das Laserauftragschweißen liegt deutlich im Bereich des Wärmeleitungsschweißens, um die Aufmischung mit dem Grundwerkstoff möglichst gering zu halten, wie in Abbildung 27 dargestellt. Plasmabildung ist nicht erwünscht und verschlechtert im Allgemeinen das Beschichtungsergebnis. Die benötigten absorbierten Intensitäten liegen bei ca.  $10^5\ \text{[W/cm}^2\text{]}$  oder sogar etwas darunter und die erforderlichen Einwirkdauern in der Größenordnung  $0,01\text{ - }1\ \text{s}$  um eine ausreichende Anbindung zu erreichen. Es ist darauf zu achten, dass die maximal erzielten Schmelzbadtemperaturen unter dem Siedepunkt der Legierung liegen, um Porenbildung weitgehend zu vermeiden.

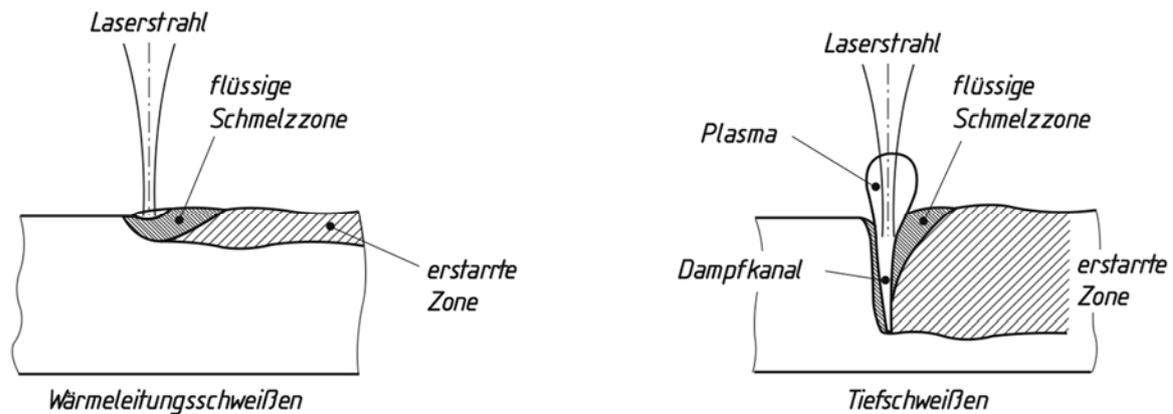


Abbildung 27 Wärmeleitungsschweißen versus Tiefschweißen (Fahrenwaldt et al. 2014, S. 92)

Eingesetzte Lasersysteme sind der klassische CO<sub>2</sub>, Nd:YAG-Laser, neuere Anlagen werden mit Disk-, Dioden-, oder Faserlasern im Single- oder Multimode ausgestattet. Die standardmäßig eingesetzten Laserleistungen liegen derzeit bei 2 – 6 kW, für spezielle Anwendungsgebiete werden Lasersysteme mit über 10 kW Spitzenleistung eingesetzt. Üblicherweise wird der Laserstrahl über die bewegte Schweißoptik in den Prozess eingekoppelt. Es gibt jedoch laut Klocke et al. (2012) auch Verfahrensvarianten die mit Scanneroptik und einer separat bewegten Schweißgutzuführung arbeiten. Diesem Verfahren wird eine noch höhere Flexibilität bzw. die Möglichkeit zum Bearbeiten komplexerer 3D-Geometrien zugeschrieben.

Der Schweißzusatz kann in unterschiedlichen Arten zugeführt werden. Abbildung 28 zeigt einen Überblick. Die am häufigsten eingesetzten Varianten sind die Drahtzuführung bzw. die Pulverzuführung. Der Vorteil der Pulverzuführung liegt einerseits an der großen Verfügbarkeit von „schwierig“ zu verarbeitenden Werkstoffen und andererseits an der Fähigkeit 3D-Bauteile aus unterschiedlichen Richtungen und Lagen zu beschichten. Ein Nachteil ergibt sich allerdings durch den nicht vollständigen Nutzungsgrad des Pulvers. Durch eine optimale Einstellung von Strömungsprofil, -geschwindigkeit und Fokussierung wird zwar ein Großteil des Pulvers im Schmelzbad absorbiert und aufgetragen, aufgrund von Turbulenzen und Partikelstößen wird jedoch der restliche Anteil dem Schweißprozess nicht zugeführt und geht verloren. Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom Pulverwirkungsgrad. Je nach Beschichtungsparametern und Düsenkonfiguration liegt der Pulverwirkungsgrad laut Partes (2009), Oliveira et al. (2005) und Dias da Silva et al. (2012) in der Regel zwischen 20 % und 50 %. Bei optimalen Verhältnissen kann er über 70 % liegen. Der Abstand zwischen Düsenunterkante und Werkstoff liegt in der Größenordnung von 8 bis 14 mm. (Lin 2000) Unterschiedliche Düsenarten werden im Kapitel Anlagentechnik noch genauer vorgestellt.

Die Pulverpartikelgrößen betragen üblicherweise zwischen 45  $\mu\text{m}$  und 150  $\mu\text{m}$ . Bei speziellen Mikro-LMD Prozessen werden Pulverpartikel  $>5 \mu\text{m}$  verarbeitet. (Kaieler et al. 2012). Die Herstellung der Pulverwerkstoffe erfolgt meist durch den Prozess der Gasverdüsung, bei welchem die Partikel ihre sphärische Geometrie bekommen. Diese Geometrie der Partikel ist für den Pulvertransport optimal, da sowohl die Rieselfähigkeit am besten ausgeprägt und daher die Verstopfungsgefahr gering ist.

Bei einigen Zusatzwerkstoffen, wie zum Beispiel bei speziellen Karbiden kommen auch Mahl- bzw. Brechverfahren zum Einsatz um diese auf die gewünschten Korngrößen herzustellen. Nachgelagerte Siebvorgänge dienen dazu um eine gewünschte Korngrößenfraktion einzustellen.

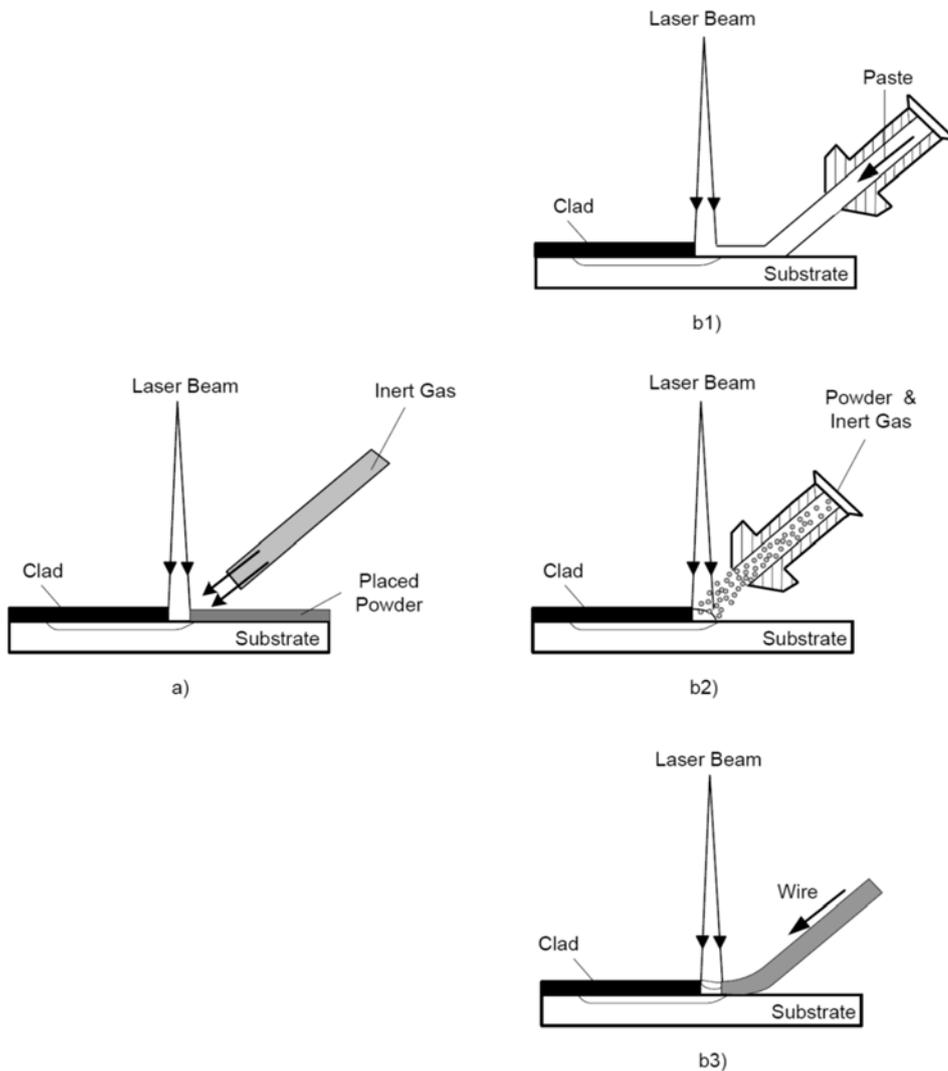


Abbildung 28 Unterschiedliche Arten der Zuführung von Schweißzusätzen  
(Toyserkani et al. 2005, S. 36)

Der Schweißprozess findet unter Schutzgasatmosphäre statt, welche üblicherweise aus einem Gemisch von Helium und Argon besteht. Wichtig ist bei der Auslegung von Schweißdüsen eine möglichst vollständige Abdeckung des Schweißbades mit Schutzgas. Unnötige Turbulenzen sind zu vermeiden um den Sauerstoffeintrag in die Schmelze möglichst gering zu halten. Zu beachten ist, dass Helium und Argon, obwohl beide inerte Edelgase sind, unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen. So ist bei Argon die Dichte um den Faktor zehn höher und es gibt auch deutliche Unterschiede hinsichtlich Neigung zur Plasmabildung und der Wärmeleitfähigkeit. So wird Plasmabildung bei Helium aufgrund der höheren Ionisierungsspannung ( $\text{He} - 24,5 \text{ eV}$  /  $\text{Ar} - 15,7 \text{ eV}$ ) mehr unterdrückt. Die radiale Wärmeleitung ist bei Helium um das achtfache höher

als bei Argon, was die geometrische Ausbildung des Schmelzbades und der Schweißbraupe beeinflusst. (Schulze 2010, S. 356) Übliche Mischungsverhältnisse liegen je nach Anwendungsgebiet zwischen 30:70 bzw. 70:30 (He:Ar).

Durch die Integration von Laser- und Schweißkomponenten in eine CNC-Anlage oder einem Roboter können unterschiedliche Schweißstrategien durchgeführt werden. Ein Parameter betrifft die Bahnstrategie zur Erzeugung von flächigen Beschichtungen. Dies können entweder durch meanderförmiges Abzeilen von Linien oder durch ein spiralförmiges Abfahren der Fläche erzeugt werden. Der Linienabstand bzw. die Spurüberdeckung sind hierbei ein wesentliches Merkmal. Manchmal werden mehrere Flächen (Layer) übereinander geschweißt. Dies ist notwendig um eine geforderte Mindestdicke zu erreichen, kann aber auch bei der Kombination von Schichtsystemen mit Pufferlage und Beschichtungswerkstoff notwendig sein. In solchen Fällen ist das Verfahren kein klassisches Beschichtungsverfahren mehr, sondern gliedert sich eher bei den additiven Fertigungsverfahren zum Aufbau von 3D Strukturen ein. Beispielhaft seien hier die Untersuchungen von Witzel et al. (2011a) und (2011b) erwähnt.

Anlagentechnisch ist besonders die Entwicklung von kombinierten Laser- und Fräsanlagen interessant, da hier bezüglich dem LMD Verfahren ein weiterer Schritt in Richtung Rapid Manufacturing gemacht werden kann. Da das Laserauftragschweißen relativ große geometrische Toleranzen verursacht muss üblicherweise die LMD Beschichtung in einem zweiten Arbeitsgang durch Drehen, Fräsen, Schleifen oder EDM auf die Endgeometrie bearbeitet werden. Erste Ansätze wurden durch Jeng und Lin (2001) bzw. Nowotny et al. (2010) gezeigt. Ein weiterer Vorteil hier ist, dass durch abwechselndes Auftragen und Abfräsen komplexere und präzisere 3D Körper erzeugt werden können. Mittlerweile gibt es mit DMG Mori, Hermle und Mazak einige Maschinenhersteller die solche Kombinationsmaschinen anbieten. Durch den schnellen Wechsel zwischen Auftragen und Zerspanen sind somit kürzere Durchlaufzeiten möglich. (Kroh 2015)

Speziell beim Verarbeiten von hochfesten Schweißzusätzen spielen die thermisch induzierten Eigenspannungen eine wesentliche Rolle. Sie äußern sich bei Überschreiten der mechanischen Kennwerte durch Rissbildung in der geschweißten Schicht. Diesbezüglich wurden beispielsweise bereits unterschiedliche Ansätze zur analytischen bzw. experimentellen Bestimmung dieser Eigenspannungen und Maßnahmen zur Reduzierung derselben durch Oliveira et al. (2006), Ocelík et al. (2009), Chen et al. (2012) oder Suárez et al. (2010) gezeigt. Auch wenn eine Rissbildung nicht unmittelbar auftritt, kann durch induzierte Eigenspannungen die Dauerfestigkeit LMD-beschichteter Probenkörper stark reduziert sein. (Köhler et al. 2012) Grundsätzlich können schwierig zu verarbeitende Zusätze nur durch ausreichendes Vorwärmen des Substrates rissfrei aufgetragen werden. Für weitere Reduzierung der Eigenspannungen wurden bei Untersuchungen mit im Laserprozess integrierter induktiver Vor- bzw. Nachwärmung eine Reduzierung der Schweiß eigenspannungen nachgewiesen. (Brückner et al. 2006, Brückner et al. 2012, Jonnalagadda et al. 2011) Diese zusätzlichen Maßnahmen können helfen besonders kritisch zu verarbeitende Beschichtungswerkstoffe erfolgreich zu verarbeiten.

### 2.4.2 Allgemeine Anwendungsgebiete

Der Prozess des Laserauftragschweißens wird nicht nur in unterschiedlichen Industriezweigen eingesetzt, sondern wird dieser laut Dubourg und Archambeault (2008) auch für unterschiedlichste Anwendungsgebiete eingesetzt. Die genannten Beispiele stellen einen Auszug an Anwendungsmöglichkeiten dar. Ein wichtiger Bereich stellt die Beschichtung von Bohrköpfen und Bohrstangen für die Gewinnung von Erdölprodukten dar. Hauptaugenmerk hier sind Korrosions- und Verschleißbeständigkeit. Zum Einsatz kommen sowohl Beschichtungen auf Kobalt- und Nickelbasis bzw. auch Mischungen von Wolframkarbiden und Matrixlegierungen. (Groth et al. 2002, Tuominen et al. 2015)

Interessant ist die Technologie ebenfalls für das Beschichten bzw. Reparieren von Turbinenschaufeln im Bereich hydraulischer und thermischer Turbomaschinen. Hierbei werden nicht nur Turbinenschaufeln mit verschleißfesten Beschichtungen beaufschlagt, sondern auch deren Schaufelenden durch den generativen Prozess geometrisch repariert. Hierbei tritt das Verfahren nicht als klassische Beschichtungstechnologie, sondern als Rapid Manufacturing Technologie auf. Beschichtungswerkstoffe sind in diesem Fall Nickel- und Kobaltbasislegierungen für den Anlagen und Kraftwerksbau, bis hin zu Titanlegierungen welche häufig im Bereich Aerospace zum Einsatz kommen. (Kim et al. 2012, Valsecchi et al. 2012, Sexton et al. 2002)

Ein weiteres Einsatzgebiet stellt die Beschichtung von Werkzeugen dar. Die Motivation hierbei ist zum einen hauptsächlich die Verbesserung von Verschleiß- oder Reibeigenschaften der aktiven Werkzeugflächen, zum anderen sind durch das generative Verfahren nachträgliche geometrische Änderungen von Formwerkzeugen möglich und bieten dadurch ein deutlich kostengünstigeres Änderungsverfahren dar, als eine Neuanfertigung oder großflächige Werkzeugänderung. Die Beschichtung kann hier entweder vollflächig oder partiell auf den Werkzeugwirkflächen erfolgen. Ein Nacharbeiten der Beschichtungsfläche durch Drehen, Fräsen, Schleifen, Erodieren oder Polieren ist in der Regel unumgänglich. Aus diesem Grund wird mit Übermaß beschichtet um nach der Endbearbeitung die Sollmaße zu erreichen. Die zu beschichtende Substrate sind in der Regel die vorher erwähnten Gusseisenlegierungen, unlegierte Werkzeugstähle, Einsatz-, Kaltarbeits- und Warmarbeitsstähle. Als Beschichtungswerkstoffe können Eisen-, Kupfer-, Kobalt- oder Nickelbasislegierungen zum Einsatz kommen. Interessant ist dieses Verfahren auch zur Herstellung von funktional gradierten Beschichtungssystemen für spezielle Einsatzgebiete welche folgende Ziele verfolgen:

*Dünne Verschleißschichten auf Werkstoffen mit guter Wärmeleitfähigkeit.* Fertigungsprozesse bei denen Wärmeleitung eine wichtige Rolle spielt um beispielsweise die Zykluszeit zu reduzieren. Dabei benötigen Druckguss-, Schmiede-, und Warmformprozesse vielfach verschleißfeste Aktivflächen die meist aus Werkstoffen mit schlechterer Wärmeleitfähigkeit bestehen. Hier bieten sich nun mehrlagige Kombination von mindestens zwei unterschiedlichen Werkstoffen an. Als Beispiel sei hier eine verschleißfeste Hartphasenbeschichtungen bestehend aus einer Kobalt- oder Nickelbasislegierung auf einem Kupferbasssubstrat mit hoher Wärmeleitfähigkeit genannt, wie durch Dehm und Bamberger (2002) gezeigt.

*Aufbringen von Beschichtungen mit Hartstoffpartikeln zur Steigerung des Verschleißwiderstandes.* Eine Möglichkeit Verschleiß zu minimieren ist das Einbringen von Karbid-Partikel in die metallische Matrix des Beschichtungswerkstoffes. Die hierbei erzeugten Verschleißschutzschichten haben ein sehr großes Potential bei Anwendungen mit extremen tribologischen Anforderungen. Wie durch Amado et al. (2012), Paul et al. (2007), Zhenda et al. (1996), Przybyłowicz und Kusiński (2001), Emamian et al. (2010) in zahlreichen Untersuchungen gezeigt, wurden bereits unterschiedlichste Ansätze verfolgt. Sehr vielversprechend ist der Einsatz von Wolframkarbiden (WC) eingebunden in einer Kobalt- oder Nickelmatrix. Diese Karbide können unterschiedliche Formen und Größen haben. Üblich sind entweder gebrochene kantige oder sphärische WC-Partikel. Die Karbidpartikelgröße kann dabei die Größenordnung von 50nm bis hin zu 100µm haben. Im Weiteren besteht die Möglichkeit durch das Einschmelzen von Titankarbid (TiC) oder keramischen Partikeln, beispielsweise Yttriumoxid ( $Y_2O_3$ ), Siliziumkarbid (SiC) oder Aluminiumoxid ( $Al_2O_3$ ), den Verschleißwiderstand zu steigern. Trotzdem die Machbarkeit schon vielfach nachgewiesen wurde bestehen beim Einsatz in der Werkzeugtechnik noch einige Hürden, wie zum Beispiel Fragestellungen zur Rissbildung bei Wechselbeanspruchung oder die Bearbeitbarkeit der generierten Oberflächen durch konventionelle Fertigungsprozesse.

*Reduzierung des Reibbeiwertes durch das Erzeugen von speziellen LMD-Schichtsystemen.* Zhang et al. (2008) zeigte beispielsweise durch das Einschmelzen von Bornitrid Partikeln (hBN) in eine Nickelmatrix, dass die Reibeigenschaften bei hohen Temperaturen von 600 – 800°C signifikant verbessert und gleichzeitig der Verschleiß stark reduziert wird. Bei solchen Einsatzbedingungen kann nur mehr mit temperaturbeständigen Trockenschmierstoffen gearbeitet werden. Smurov (2008) zeigte durch einen Werkstoffverbund von einem verschleißfesten Stellite (Kobaltbasis) und einer WC verstärkten Bronze CuSn sehr gute Resultate hinsichtlich Trockenschmierungseffekte.

### 2.4.3 Laserauftragschweißen bei Werkzeugen für die Umformtechnik

Im Bereich von Massiv- und Blechumformprozessen hat es bereits einige Untersuchungen hinsichtlich Werkzeugbeschichtungen zur Verschleißminimierung, sowohl für die Warm-, als auch die Kaltumformung gegeben. So zeigten Behrens et al. (2014) die Möglichkeit durch Einsatz von LMD Beschichtungen auf Schmiedewerkzeugen eine Verbesserung des Verschleißbildes. Erreicht wird dies mit dem Zulegen von Nanopartikeln wie z.B. Yttriumoxid-, Titankarbid und Wolframkarbid in eine 1.2367 Warmarbeitsstahllegierung. Vor allem beim Einsatz von WC-Nanopartikeln wurde bestätigt, dass sowohl Reibungs- als auch Verschleißverhalten sichtbar verbessert werden. Die realen Einsatzbedingungen wurden im Schmiedeumformprozess erzeugt.

Auch Klocke et al. (2014) zeigt wie durch Laserlegieren bzw. Laserauftragschweißen Tiefziehwerkzeuge technisch verbessert werden können. Als erster Schritt wird durch eine FEM-Analyse die Geometrie des Werkzeuges leicht optimiert um homogenere Kontaktdrücke in den stark beanspruchten Werkzeugbereichen zu erhalten. Diese Bereiche werden dann beispielsweise durch Laserauftragschweißen verstärkt. Die Herstellung von solchen Werkzeugteilen erfolgt hier bereits in einer Hybrid-Fertigungszelle zum Auftragschweißen und Fräsen.

Speziell für die Umformung von nichtrostenden Edeltählen sind besondere Werkzeugoberflächen gefragt. Oftmals wird hier mit sogenannten Ziehbronzen gearbeitet um möglichst geringe Reibwerte und eine hohe Oberflächenqualität der Ziehteile zu erreichen. Der Einsatz eines solchen Prototypenwerkzeuges am Institut für Werkzeugtechnik und Spanlose Produktion wurde durch Schmidt et al. (2010) gezeigt. Hier wurden die Werkzeugwirkflächen partiell mit CU85, einer Kupferaluminiumbronze beschichtet und ähnliche Eigenschaften im Vergleich zum gegossenen Vollmaterial erreicht.

---

### 3 Aufgabenstellung

Ausgehend vom dargestellten Stand der Forschung und der Versuchsumgebung am Institut Tools & Forming liegt der Fokus dieser Arbeit in der Entwicklung von Beschichtungssystemen mittels Laserauftragschweißen speziell für die Werkzeugtechnologie im Bereich der Blechumformung. Interessant ist das Verfahren vor allem bei Werkzeugen für die Umformung von höherfesten bzw. höchstfesten Stählen im sowohl kalten als auch warmen Zustand. Die Erfahrung hat gezeigt, dass dieses Beschichtungsverfahren von vielen Einflussgrößen abhängig sind und eine schnelle Übertragung direkt auf Werkzeugkomponenten nicht immer möglich ist. In der Werkzeugtechnik ist das fehlerfreie Aufbringen von Beschichtungen zwingend notwendig um die geforderten Standzeiten zu erreichen. Verschleißfestigkeit und Härte sind nur eine wichtige Komponente von Beschichtungen, ausreichende Dauerfestigkeit bei den vielen Lastwechseln ist ebenso wichtig. Vor allem beim Aufschweißen von hoch-, und warmfesten Legierungen ist die Gefahr von Fehlern in der Beschichtung sehr groß. Es müssen daher umfangreiche Vorversuche durchgeführt werden um eine funktionierende Schweißstrategie zu entwickeln. Hierbei ist es wichtig die erzeugte Beschichtung auf einem Substrat als Gesamtsystem zu bewerten. Erschwerend kommt hinzu, dass die Werkstoffe von aufgebracht Beschichtung und Substrat oft artfremd sind und Lösungsansätze welche in der klassischen Fügetechnik entwickelt wurden nur bedingt angewendet werden können. Die Analyse mittels numerischer Methoden bietet heute sehr gute Möglichkeiten um ein besseres Prozessverständnis zu bekommen. Die gewonnene Erkenntnis hilft in jedem Fall bei der Optimierung der Parameter. Jedoch ist die Ermittlung der Werkstoff-, Prozess- und Umgebungskennwerte, welche für die Simulation benötigt werden, sehr zeit- und kostenintensiv. Bei der Vielzahl von Kombinationen und Einsatzgebieten ist der flächendeckende Einsatz daher derzeit noch nicht denkbar.

Eine Möglichkeit um hier das gewünschte Ziel mit möglichst geringem Aufwand zu erreichen bieten phänomenologische Ansätze, d.h. dem Beobachten und Bewerten von Versuchen bzw. deren Ergebnissen. Durch die Kombination solcher Ansätze mit statistischen Methoden besteht die Möglichkeit innerhalb kurzer Zeit eine Machbarkeitsanalyse bzw. Prozessoptimierung für LMD-Beschichtungen durchzuführen. Die Aufgabenstellung dieser Arbeit ist also die Entwicklung eines Standardmodells zur Validierung und Optimierung des LMD-Prozesses. Dazu sind folgende Schritte notwendig:

- Auswahl/Entwicklung geeigneter Bewertungsmethoden für LMD-Beschichtungen
- Standardisieren des Versuchsaufbaus (Probengeometrien, Versuchsabläufe, etc...)
- Implementierung der statistischen Versuchsplanung zur Parameteroptimierung
- Auswertung und Interpretation der Ergebnisse
- Übertragung auf Werkzeuggeometrien

Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit dem geeigneten Einsatz von Bewertungsmethoden. Viele dieser Methoden, wie z.B. Rissprüfung, Härtemessung, geometrische Messung des Schichtaufbaus sind heute verfügbar und relativ einfach durchzuführen. Jedoch gibt

es bis dato nur wenige Ansätze zur Beurteilung der Haftfestigkeit von LMD-Schichten zu deren Substrat. Des Weiteren sind Messungen zur Beurteilung des Verschleißwiderstandes, speziell bei Blechumformprozessen, mit gegenwärtigen Standard-Tribometern nicht sehr repräsentativ. Auch hier sollen bessere Testmethoden gefunden werden.

Ein hilfreiches Instrument zur Bewertung des Zusammenhangs zwischen Eingabe- und Ausgabewerten mit einer vertretbaren Anzahl von Versuchen ist die statistische Versuchsplanung. Diese soll helfen die einflussreichsten Eingangsparameter zu lokalisieren und deren Auswirkung auf das Beschichtungsergebnis zu beschreiben. Hierzu ist es wichtig mit einem standardisierten Versuchsaufbau zu arbeiten um möglichst präzise und wiederholbare Ergebnisse zu erhalten.

Nicht zuletzt sollen die gewonnen Erkenntnisse von Beschichtungsprozessen an Realwerkzeugen angewendet und getestet werden.

---

## 4 Anlagentechnik

### 4.1 Allgemeine Anlagendaten

Die vorliegenden Versuche wurden auf einer Laserzelle Trumaform DMD 505 der Firma Trumpf durchgeführt. Hierbei handelt es sich um eine Portalmaschine mit 3 Translationsachsen X-Y-Z und 2 Rotationsachsen B-C zum Schwenken der Bearbeitungsoptik wie in Abbildung 29 dargestellt. Eine weitere Rotationsachse A kann optional verwendet werden um rotationssymmetrische Werkstücke bearbeiten zu können. Die Anlage ist grundsätzlich als flexible Laserzelle konzipiert, um sowohl 3D-Schneid- als auch Schweißarbeiten durchführen zu können. Sie verfügt über eine CO<sub>2</sub>-Laserquelle mit 3,2kW Nennleistung und einer Pulverfördereinheit um Metallpulver als Zusatz dem Schweißbad hinzuzufügen. Hinzu kommt die Möglichkeit den ganzen Prozess mit mehreren Schutzgasparametern möglichst in einer inerten Atmosphäre zu gestalten. Die Größe des Schweißbades kann mit CCD-Kameras erfasst werden und für einen konstanten Schweißprozess in einem geschlossenen Regelkreis die Laserleistung angepasst werden. Eine Zusammenstellung der Anlagendaten befindet sich im Anhang.



Abbildung 29 Laserzelle zum Auftragsschweißen am Institut für Werkzeugtechnik und Spanlose Produktion

### 4.2 Programmierung

Die Anlage ist mit einer SINUMERIK Steuerung ausgerüstet und wird im NC-Code programmiert. Die Programme dazu können entweder über CAM Systeme erstellt werden oder es besteht auch die Möglichkeit parametrisierte Programme für einfache Schweißgeometrien der Standardproben

manuell zu erstellen. Bei der Erstellung von komplexen 3D Beschichtungsprogrammen sind hierbei folgende Eigenschaften der Programmiersoftware wichtig:

- Analyse der Anlagenkinematik hinsichtlich konstantem Vorschub im Bearbeitungspunkt
- Kontrolle auf Erreichen der Achsendschalter
- Analyse von un stetigen Bewegungsabläufen (speziell bei kleinen Radien und Kanten)
- Kontrolle auf Kollision zwischen Werkstück und Maschine

Durch Früherkennung von Fehlern können bereits in der Programmierphase Gegenmaßnahmen getroffen werden. Ein Abbruch während des Schweißprozesses kann zur Beschädigung bzw. zu einem fehlerhaften Werkstück führen.

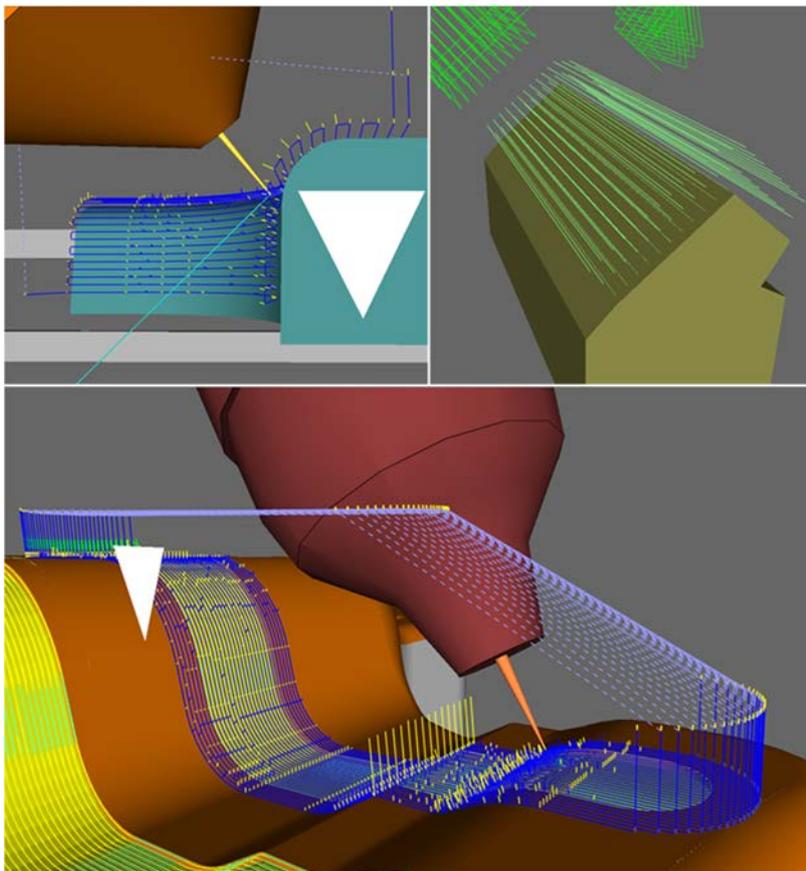


Abbildung 30 Programmierung eines Beispielwerkstück in TruTops Cell mit dreilagiger Beschichtung von 2 Flächen

Die verwendete Versuchsanlage wird mit dem System TruTops Cell der Firma Trumpf programmiert. Werkstücke können als STEP-Datei importiert werden. Sämtliche Schweiß- und Geometrieparameter werden im CAM festgelegt und programmiert. Abbildung 30 zeigt das Beispiel einer Programmierung eines 3D Bauteils. Definiert werden unter anderem Bahnrichtung, Anstellwinkel der Schweißoptik, Bahnabstand zwischen den einzelnen Schweißlinien, sowie der Abstand zwischen den einzelnen Lagen.

### 4.3 Laserquelle und Strahlführung

Die Anlage verfügt über einen CO<sub>2</sub> Laser mit einer Nennleistung von 3,2 kW. Der Resonator ist wie in Abbildung 31 dargestellt in doppelt-quadratischer-Faltung ausgeführt. Dies ermöglicht große Resonatorlängen bei kompakter Bauform. Zudem ist das laseraktive Medium durch eine mittels Turbine erzeugten Zirkulation und großen Wärmetauscherflächen sehr gut gekühlt was den Anteil der spontanen Emission drastisch reduziert und somit einen höheren Laserwirkungsgrad ermöglicht. Somit ist auch die Erzeugung eines Rohstrahls mit geringer Divergenz und einer relativ geringen Beugungsmaßzahl von ca. 1,8 möglich.

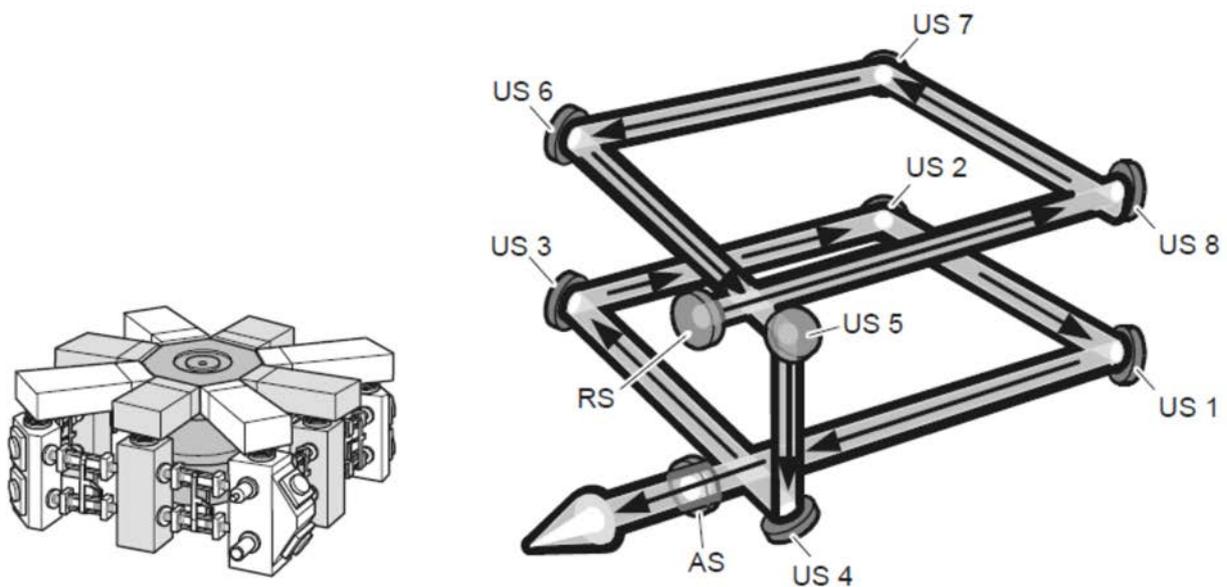


Abbildung 31 Laserresonator doppelt quadratisch gefaltet (US Umlenkspiegel, RS Rückkoppelspiegel, AS Auskoppelspiegel)  
Trumpf Lasertechnik (2006, S. 3–4)

Der Rohstrahl verlässt den Resonator mit einem gauß'schen TEM<sub>00</sub> Mode und einem Rohstrahldurchmesser von ca. 15mm. Der Strahl wird durch mehrere Kupferspiegel in einem Strahlrohr mehrmals umgelenkt bzw. auch zirkular polarisiert und geformt und in der letzten Umlenkeposition mittels eines parabolischen CU-Spiegels mit einer fixen Brennweite zwischen 250 und 300 mm fokussiert. Abbildung 32 zeigt die Vermessung der Laserkaustik nach der Fokussierung in unterschiedlichen Abständen zur Strahltaile (Brennpunkt). Die Anlage verfügt des Weiteren über einen adaptiven Spiegel welcher mittels unterschiedlichem Wasserdruck unterschiedliche Krümmungen der Spiegeloberfläche erzeugt. Hierdurch kann die Fokuslage im Bereich von  $\pm 20$  mm verschoben werden. Größere Verschiebungen sind zwar technisch möglich, verursachen jedoch signifikante Verzerrungen in der Strahlkaustik hinsichtlich Kreisgeometrie und Energieverteilung und machen im praktischen Einsatz daher keinen Sinn. Abbildung 33 zeigt den adaptiven Spiegel im demontierten Zustand bzw. den angelaufenen Bereich in dem der Laserrohstrahl reflektiert wird. Der Strahlengang ist in Richtung Bearbeitungsoptik einseitig geöffnet

und wird permanent mit gefilterter Druckluft im Anfangsbereich beaufschlagt. Durch dieses permanente „Spülen“ wird ein Eindringen von Staub- und Schmutzpartikeln in den Strahlengang weitestgehend vermieden. Eine Reinigung der Spiegeloberflächen ist in definierten Wartungsintervallen jedoch notwendig.

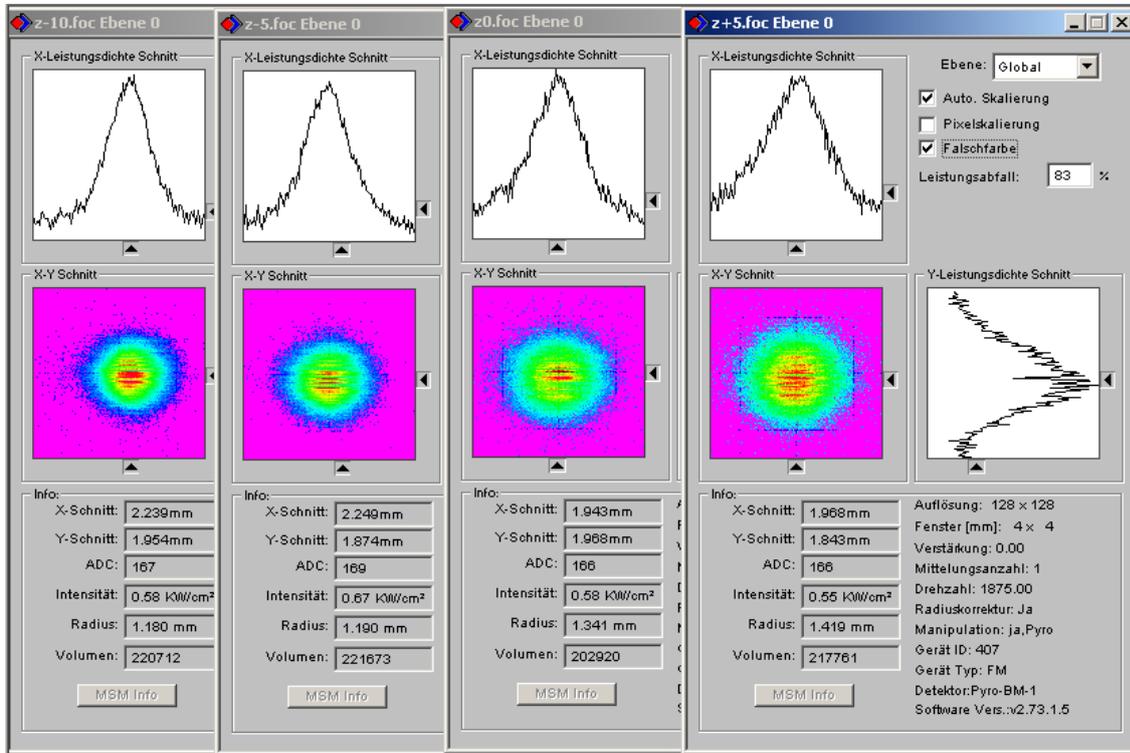


Abbildung 32 Vermessung der Laserkaustik in unterschiedlichen Fokusslagen



Abbildung 33 Adaptiver Cu - Umlenkspiegel zur Verschiebung des Brennpunktes (links)  
Modenschuss – zur Darstellung der Leistungsverteilung TEM<sub>00</sub> (rechts)

Die Anlage kann mit Fokussierspiegeln unterschiedlicher Brennweite bestückt werden. Üblicherweise liegt beim Laserauftragschweißen mit einer CO<sub>2</sub> Laseranlage der Brennpunkt

innerhalb der Schweißoptik und defokussiert in Richtung Arbeitspunkt auf den geforderten Durchmesser bzw. der geforderten Energiedichte.

Die Leistung des Laserstrahls kann entweder als fixer Wert festgelegt, oder über den Schmelzbad Regelkreis vorgegeben werden. Der Wert wird in der Anlagensteuerung in Prozent der Nennleistung angegeben. Üblicherweise werden Schweißprozesse mit CO<sub>2</sub> Lasern im cw-Modus durchgeführt. Es kann jedoch bei manchen Werkstoffen bzw. deren Kombinationen sinnvoll sein im Pulsbetrieb zu arbeiten. Die minimale Pulsbreite liegt bei der Versuchsanlage bei 10  $\mu$ s, ein im Vergleich zu Festkörperlasern relativ großer Wert. In der Anlagensteuerung wird der Pulsbetrieb durch die Abtastrate in Hertz definiert.

#### 4.4 Pulverförderung

Um dem Schweißprozess das notwendige Auftragsmaterial zuzuführen kommt eine gravitationsbasierte Pulverfördereinheit zum Einsatz. Das Prinzip ist in Abbildung 35 dargestellt. In einem hermetisch abgeschlossenen Behälter fließen Pulverpartikel durch die Schwerkraft angetrieben in einen unten angeordneten Trichter. Eine darunter angeordnete Welle mit definiert eingearbeiteten Volumen rotiert mit einer vorgegebenen Drehzahl und befördert einen so definierten Partikel Massestrom in ein weiteres Reservoir wo ein Trägergas zugemischt wird und die Metallpartikel für den Transport durch Schlauchleitungen beschleunigt werden. Als Transportgas dient ein Gemisch aus Argon und Helium. Um ein Verstopfen der langen Transportleitungen zu vermeiden ist auf ausreichende Strömungsgeschwindigkeiten zu achten.



Abbildung 34 Pulverfördereinheit Außenansicht (links) – Füllkammer (rechts)

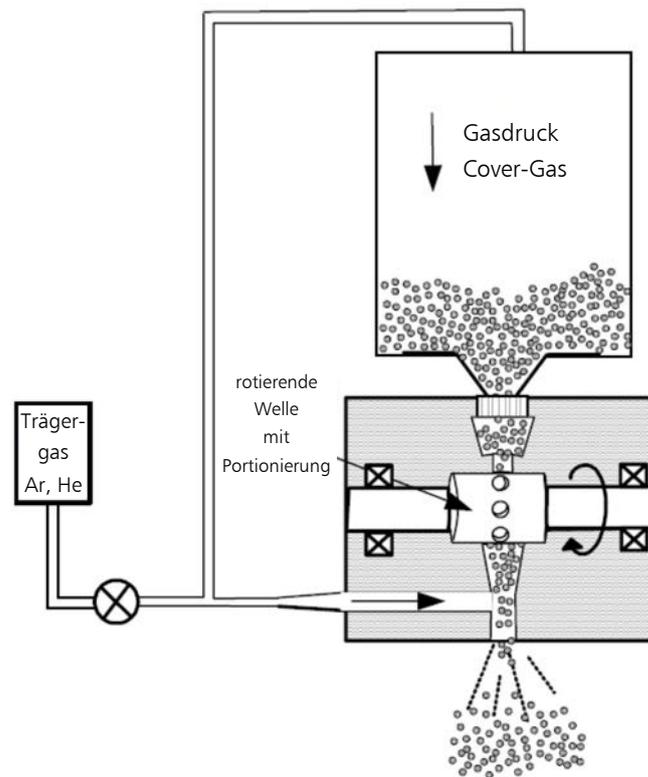


Abbildung 35 Schematische Darstellung des eingesetzten Pulverförderers  
Darstellung nach Toyserkani et al. (2005, S. 79)

Dies bringt jedoch auch Nachteile mit sich. Eine hohe Strömungsgeschwindigkeit der Partikel bedeutet auch eine hohe kinetische Energie mit welcher die Pulverpartikel auf das Schmelzbad auftreffen. Diese kann zu einem unruhigen Schweißprozess führen, sodass nicht geschmolzene Partikel aus der Schmelze wieder heraus geschleudert werden. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen belegen die Tatsache, dass eine möglichst niedrige Partikelgeschwindigkeit einen höheren Pulverwirkungsgrad verursacht bzw. zu besseren Schweißergebnissen führt. Aus diesem Grund wurde ein Zyklonabscheider, wie in Abbildung 36 dargestellt, entwickelt um einen Anteil des Trägergases zu entnehmen um so die Partikelgeschwindigkeit zu senken.

Der Einbau des Zyklonabscheiders erfolgt im letzten Leitungsabschnitt kurz vor der Schweißoptik. Dieser Abschnitt kann in der Regel so gestaltet werden, dass ein Verstopfen nicht mehr möglich ist. Die Regulierung des Zyklonabscheiders erfolgt mittels Drosselventil und einer statischen Differenzdruckmessung zwischen Umgebungsdruck und Leitungsdruck. Abbildung 37 zeigt das Ergebnis einer Geschwindigkeitsmessung der Partikel mittels Hochgeschwindigkeitskamera am Düsenaustritt einer Einstrahldüse (Off-axis). Die Geschwindigkeiten wurden mit unterschiedlichen Pulverförderraten von 5; 7,5; 10 g/min ermittelt. Ein Differenzdruck von 500 mbar wird erreicht mit vollständig geschlossenem Drosselventil (quasi ohne Gasabscheidung), der Differenzdruck von 150 mbar stellt den niedrigsten noch möglichen und stabilen Wert ohne Gefahr des Verstopfens dar. Bemerkenswert ist, dass durch diese Maßnahme die Partikelgeschwindigkeit um mehr als die

Hälfte gesenkt werden kann, was in vielen Fällen zu deutlich besseren Beschichtungsergebnissen führt. Beachtet werden muss jedoch auch das Strömungsverhalten in horizontaler Lage der Schweißoptik. Hier muss die Strömungsgeschwindigkeit ausreichend hoch gewählt werden, um die vorhandenen Gravitationseffekte möglichst gering zu halten und einen axialen Versatz des Pulverfokus zum Schmelzbad möglichst zu vermeiden.



Abbildung 36 Zyklonabscheider mit Drosselventil zur Differenzdruckregelung

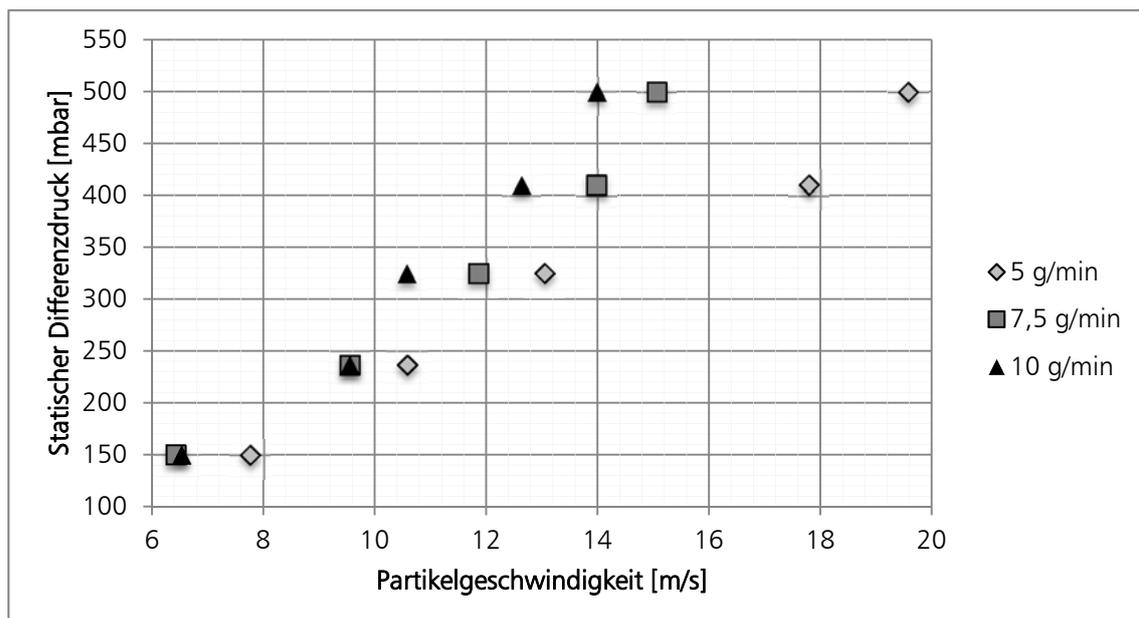


Abbildung 37 Partikelgeschwindigkeit in Abhängigkeit des statischen Differenzdrucks und unterschiedlichen Pulverfördereraten

Eine weitere wichtige Funktion der Pulverförderanlage ist die gleichmäßige Aufteilung des Pulverstromes in mehrere Teilströme. Dies ist sowohl bei der Verwendung von Ringspaltdüsen wie auch Vier- oder Mehrstrahldüsen notwendig. Eine inhomogene Verteilung kann sehr leicht entstehen und wirkt sich signifikant auf das Schweißergebnis aus. Grund dafür kann eine teilweise Verstopfung eines Teilkanals oder eine inadäquate Geometrie bzw. Bearbeitung der

Teilungskammer sein. Es hat sich im Laufe der Arbeit herausgestellt, dass die Montage des Pulversplitters am Schwenkarm der Schweißoptik kritisch angesehen werden kann, da Gravitationseffekte bei Horizontallage der Teilkammer ebenfalls zu inhomogenen Verteilungen führen können. Aus diesen Erfahrungen heraus wurde an der Versuchsanlage ein eigens entwickelter Pulversplitter entwickelt und gefertigt, wie in Abbildung 38 dargestellt. Die Aufteilung des Hauptstromes in vier gleichmäßige Teilströme erfolgt durch Überlagerung von vier Kegelschnitten, ausgeführt in sehr hoher Genauigkeit und Oberflächenrauigkeit  $< Ra\ 0,5\ \mu m$ . Die Montage erfolgt oberhalb des Schwenkarmes in vertikaler Position um Gravitationseffekte möglichst auszuschließen.

Nach der Aufteilung in einzelne Teilströme wird das Pulver-Trägergasgemisch der Schweißdüse zugeführt und dort in diversen Kammern verteilt bzw. in Kanälen bis zum Schweißbad zugeführt. Zusammenfassend können folgende Eigenschaften des Pulverfördersystems als wesentlich betrachtet werden:

- Gleichmäßige einstellbare Pulverfördermenge
- Gleichmäßige einstellbare Fließraten des Trägergases
- Komplette Abschirmung von oxidativer Atmosphäre im gesamten System
- Einstellung möglichst kleiner Strömungsgeschwindigkeiten
- Vermeidung von Verstopfung der Förderkanäle
- Möglichst homogene Aufteilung in mehrere Teilströme

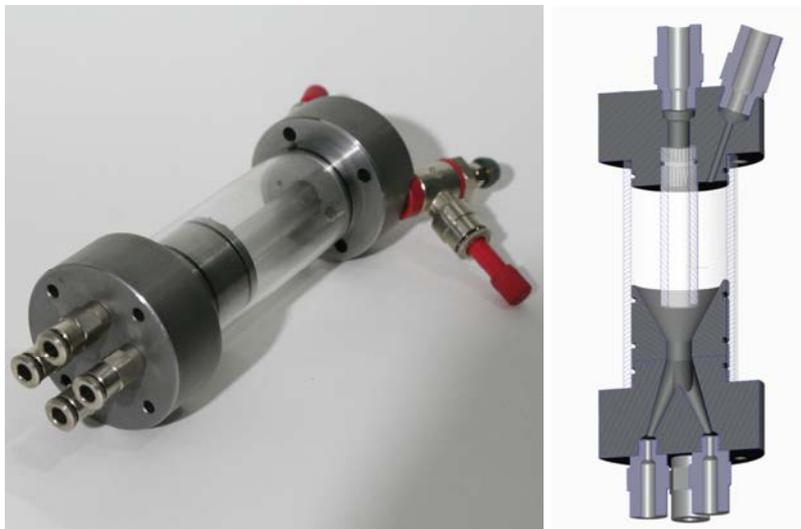


Abbildung 38 Pulversplitter zum Aufteilen eines Massestroms in möglichst vier gleiche Teilströme

## 4.5 Bearbeitungsoptiken

Die Funktion der Zusammenführung von Laserstrahl und Schweißzusatz welche ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf das Schweißergebnis hat, wird mit der Bearbeitungsoptik erfüllt. Für unterschiedliche Einsatzgebiete sind unterschiedliche Typen von Optiken verfügbar, wie in

Abbildung 39 dargestellt. Die Auswahl der Bearbeitungsoptiken erfolgt nach Anwendungsfall, Bearbeitungsmethode und Bauteilgeometrie. Auch hier sind je nach Lasertyp und Strahlführung unterschiedliche Funktionen zu gewährleisten:

- Präzise Strahlbildung des Trägergas-Pulvergemisches
- Präzise Ausrichtung des Pulverfokus zum Laserstrahl
- Gute Schutzgasabdeckung
- Möglichst schlanke Bauform zwecks Zugänglichkeit bei komplexen Geometrien
- Wärmeabfuhr im Düsenbereich mittels Wasserkühlung



Abbildung 39    Verschiedene Bearbeitungsoptiken für die Versuchsanlage  
 Vierstrahldüse, Ringspaltdüse und Einstrahldüse (vorne, v.l.n.r.)  
 Mittelteil zur Abtrennung des Strahlengangs und Schneiddüse (hinten, v.l.n.r.)

Die Justierung des Pulverfokus coaxial zum Laserstrahl ist sehr wichtig für die Schweißqualität. In der Praxis haben sich marktübliche Lösungen als sehr aufwendig beim Ausrichten der Optik erwiesen. Oftmals muss die Optik dafür mehrfach aus- und wieder eingebaut werden. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit für die Anlage eine Lösung mittels Festkörpergelenken geschaffen, wie in Abbildung 40 dargestellt. Hierbei handelt es sich um Rotationsgelenke in Starrkörpern, welche eine minimale Winkelverstellung von  $\pm 0,2^\circ$  aufgrund elastischer Deformierung zulassen. Dies ist völlig ausreichend um im Bearbeitungspunkt die Lage Pulverfokus zentrisch zum Laserstrahl einzurichten.

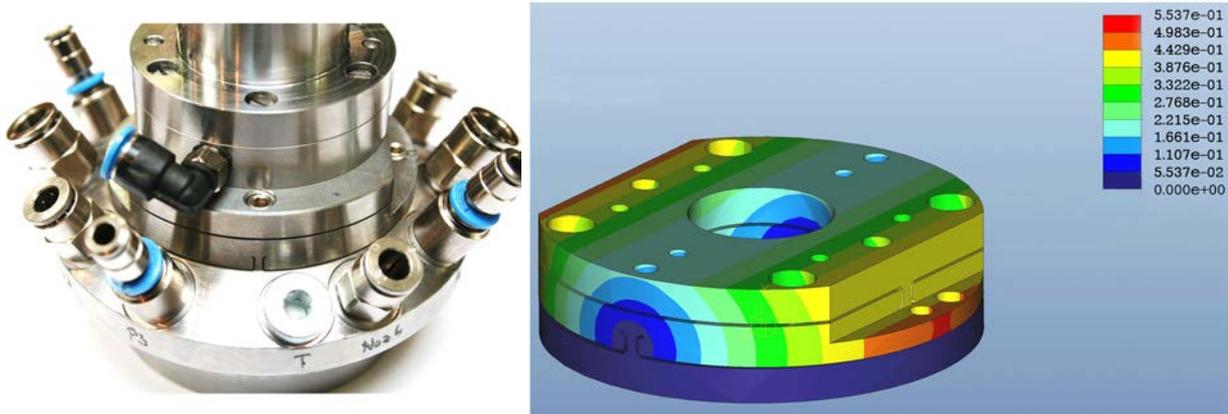


Abbildung 40 Laseroptik mit Festkörpergelenken zur koaxialen Justierung des Pulverstrahls  
Integration der zwei Gelenke in die Optik (links) –  
FEM-Auslegung des Gelenks / Darstellung der Verschiebungen bei maximaler Auslenkung  
in mm (rechts)

Beim CO<sub>2</sub> Laser wird zwischen offenem Strahlengang, d.h. Fokussierung des Strahls über einen Spiegel, bzw. geschlossenem Strahlengang, d.h. Fokussierung des Laserstrahls über eine Linse aus ZnSe, unterschieden. Da es bei Schweißprozessen häufig zu Spritzern kommt hat der offene Strahlengang Vorteile, da eine Linse zu schnell verschmutzen bzw. zerstört werden könnte. Hinzu kommen die hoch toxischen Eigenschaften der Linsematerialien, die ein nennenswertes Risiko für die Anlagenbediener darstellen. Die Versuchsanlage ist mit einem offenen Strahlengang ausgeführt, der Bereich der Schweißoptik ist in Abbildung 41 dargestellt. Dies bedeutet, dass es zu einer möglichst vollständigen Abtrennung der Strahlengangatmosphäre mit der aus atmosphärischer Druckluft bestehenden Sperrluftströmung und der Schutzgasatmosphäre bestehend aus Argon und Helium im vorderen Düsenbereich kommen muss. Dies erfolgt etwas unterhalb des Cross-Jets, der in der Optik aufsteigende Partikel seitlich ausbläst um die Optiken vor Partikel- und Kondensatverschmutzung zu schützen. Zur Abtrennung wird hier ein Gaspolster aus Argon eingeblasen (Balance Gas) um ein Vorströmen von Luft in den vorderen Düsenbereich zu verhindern. Wichtig ist hier die Realisierung von Strömungsbarrieren bei gleichzeitiger Gewährleistung der Durchlässigkeit des Laserstrahls. Die Zuführung des Schutzgasgemisches aus Argon und Helium ist im unteren Düsenabschnitt ebenfalls zu gewährleisten. Da es beim Schweißvorgang zu erheblicher Wärmebildung in Schweißbadnähe kommt und ein nennenswerter Anteil des Laserstrahls diffus reflektiert wird, ist eine Wasserkühlung der Schweißoptik zwingend notwendig. Durch eine effektive und möglichst homogene Kühlung der vordersten Düsenkomponenten wird auch deren Lebensdauer erheblich verlängert. Allerdings muss eine absolute Dichtigkeit der wasserführenden Kanäle in der Schweißdüse gewährleistet werden, die in der Fertigung und Handhabung der Düse einen signifikanten Aufwand bedeuten.

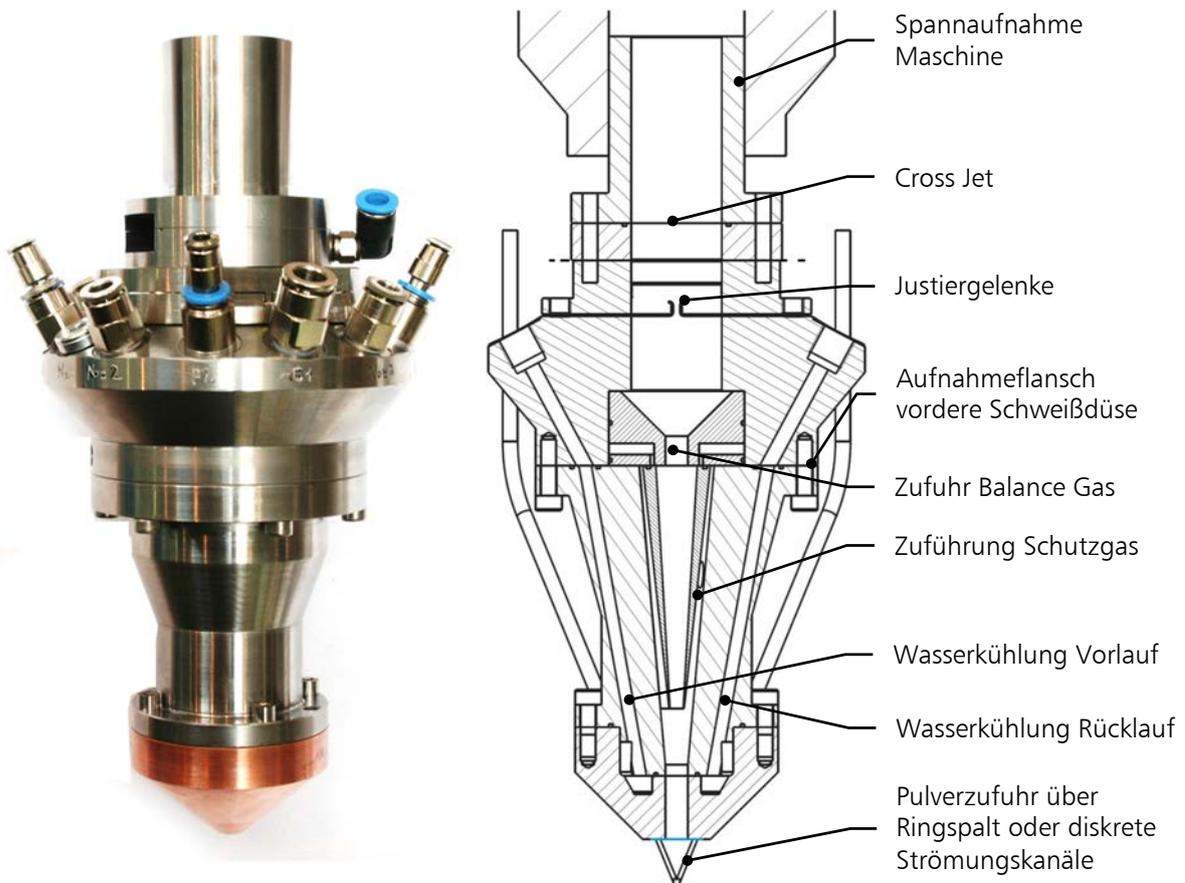


Abbildung 41 Schweißoptik mit wassergekühlter Ringspaldüse, Pulver- und Schutzgaszufuhr

Mögliche Varianten der Pulverzufuhr sind Stand der Technik und werden anwendungsspezifisch eingesetzt. Zur Auswahl steht eine Vierstrahldüse mit vier diskreten Strömungskanälen, deren axiale Verlängerungen sich im Schmelzbad schneiden. Die Düse ist sehr gut geeignet für hohe Auftragsraten und besitzt die besten Eigenschaften in vertikaler Schweißlage, da kaum Gravitationseinflüsse vorhanden sind. Der Arbeitsabstand zwischen Düsenunterkante und Substrat beträgt 12mm. Die Ringspaldüse, deren Geometrie sich durch Innen- und Außenkonus ergibt, kann einen sehr präzisen Pulverfokus bilden und ist sehr gut zum Aufbauen von feinen Strukturen geeignet. Da die Materialpartikel im Konus nur bedingt geführt sind, ergibt sich eine größere Länge der freien Partikelströmung, was zu einer Abweichung des Pulverfokus zum Laserstrahl in vertikalen Schweißlagen führen kann. Der Arbeitsabstand beträgt bei der in der Versuchsanlage eingesetzten Variante ebenfalls 12mm. Eine Gegenüberstellung beider Düsenarten ist in Abbildung 42 dargestellt.

Die Einstrahldüse wird für spezielle Anwendungsfälle eingesetzt. Die Zuführung des Schweißzusatzes erfolgt hier ähnlich wie bei der Zuführung eines Schweißdrahtes schräg von einer Seite. Vorteile im Einsatz zeigen sich bei Schweißaufgaben mit rotierenden Werkstücken, bzw. beim Auftragen auf Kanten. Mit dieser Düsengeometrie ist keine volle 3D Bearbeitung möglich.

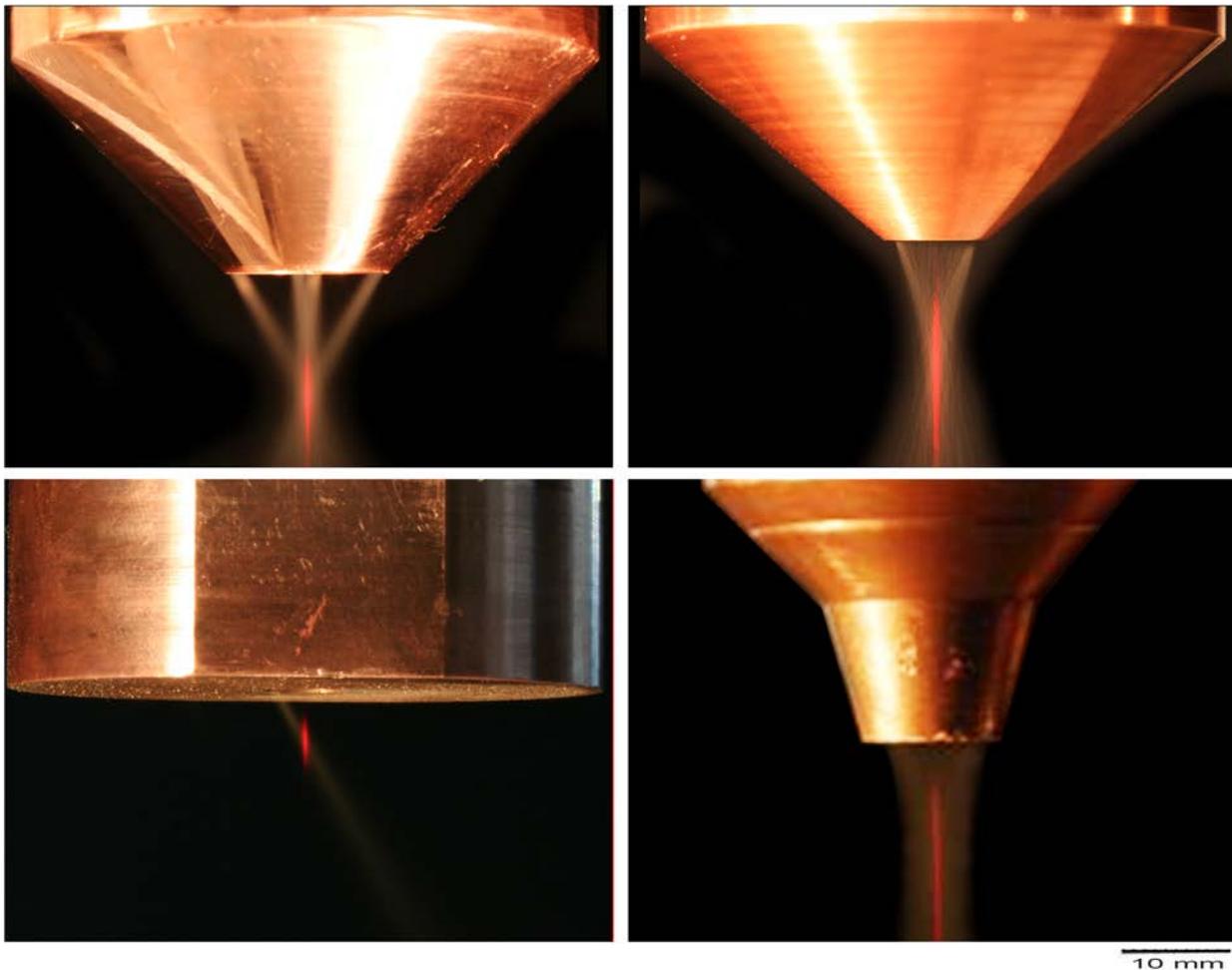


Abbildung 42 Gegenüberstellung Vierstrahldüse (li. o.) – Ringspaltdüse (re. o.)  
Einstrahldüse (li. u.) – Ringspaltdüse Maschinenhersteller (re.u.)

Die im Laufe dieser Arbeit entwickelten Düsen haben deutliche Vorteile gegenüber der Lösung des Herstellers. In Tabelle 9 sind die Werte hinsichtlich Gasverbrauch, Auftragsrate und Pulverwirkungsgrad gegenüber gestellt.

Tabelle 9 Gegenüberstellung Ringspaltdüse (Original) und Vierstrahldüse (Eigenentwicklung)

	Einheit	Originaldüse (re.u.)	Vierstrahldüse (li.o.)	Veränderung
Gasverbrauch Argon	slpm	75	26	-65 %
Gasverbrauch Helium	slpm	22	12	-45 %
Max. Höhe der Schweißblage	mm	1,5	2,0	+33 %
Pulverwirkungsgrad	%	23	76	+53 %

## 4.6 Aktive Prozessregelung

Die Versuchsanlage ist mit einem geschlossenen Regelkreis zur Laserleistungsanpassung ausgestattet. Hierbei wird wie in Abbildung 43 dargestellt die Schweißbadgröße mittels drei rotationssymmetrisch angeordneten CCD-Kameras erfasst und ausgewertet. Der Grund für den Einsatz von mehreren Kameras ergibt sich aufgrund der oft komplexen Bauteilgeometrien und der daraus resultierenden optischen Verdeckung zwischen Kamera und Schweißbad. Zumindest eine der drei Optiken hat immer einen freien Blick auf das Schmelzbad. Der Regelkreis ist insofern sinnvoll, da es im Randzonenbereich meist zu Überhitzungen und daher zur Vergrößerung des Schmelzbades kommen kann. Das gleiche gilt für Kanten und Eckenbereiche von zu beschichtenden Werkstücken. Hier kann durch geregelte Reduzierung der Laserleistung ein homogener Materialauftrag erfolgen. Zu beachten ist jedoch, dass der Regelkreis auch wesentlicher Störgrößen ausgesetzt ist, welche das Ergebnis negativ beeinflussen. So können Reflektionen der Laserstrahlung und des Schmelzbades aufgrund unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit ebenfalls unregelmäßige Beschichtungsergebnisse erzeugen. Bei der Beschichtung von Standardproben und einfachen Geometrien hat sich ein offener Regelkreis ohne Feedback der CCD Kamera als sinnvollere Variante herausgestellt.

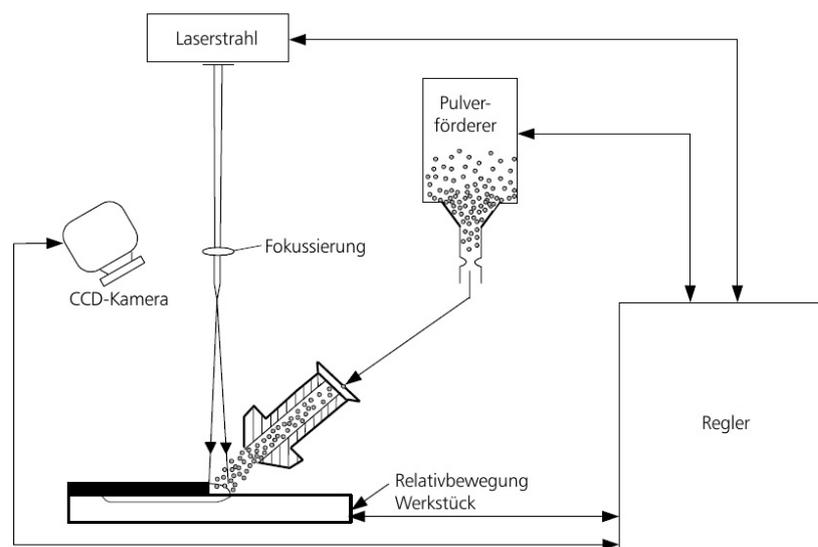


Abbildung 43 Schema des Regelkreises zur Anpassung der Laserleistung

## 4.7 Vorwärm- und WBH-Anlagen

Für einige Schweißprozesse ist Vorwärmen bzw. eine vor- oder nachgelagerte Wärmebehandlung zwingend notwendig. Hierfür stehen bei der Versuchsanlage unterschiedliche Einrichtungen zur Verfügung. Eine externe Vorwärmung von großen Bauteilen erfolgt in einem Kammerofen mit einem Nutzraum von 1600x1000x500 mm und einer maximalen Ofentemperatur von 1200 °C. Durch einen programmierbaren Ofenregler können individuelle Temperatur-Zeit Kurven gefahren

werden. Zusätzlich verfügt der Kammerofen über eine Schutzgasflutung um Zunderbildung zu minimieren. Die häufigsten Einsatzgebiete liegen im Bereich der Bauteilvorwärmung zwischen 200 – 500 °C bzw. Spannungsarmglühen nach dem Schweißen von 400 - 700 °C. Wenn eine aktive Vorwärmung des Werkstücks im Maschinenraum nicht möglich ist, muss auf die Kühlrate während des Werkstücktransfers und der Rüstzeit mitberücksichtigt werden um die gewünschte Temperatur des Bauteils am Beginn des Schweißprozesses zu erzielen. Diese Verluste können durch erhöhtes Vorwärmen und durch die Verwendung von Isolationsdecken kompensiert bzw. reduziert werden.

Für eine aktive Vorwärmung und Temperierung in der Anlage wurde eine geregelte Heizplatte zur Auflage von ebenen Werkstücken aufgebaut (siehe Abbildung 44). Die Wärme wird durch ein Widerstandsheizelement erzeugt, welches durch einen Regler diskret geschaltet wird. Die Temperaturmessung erfolgt mittels Thermoelement. Die Auflageplatte besteht aus Kupfer um eine möglichst schnelle und gleichmäßige Wärmeübertragung auf das Werkstück zu realisieren. Standardprobenkörper können auf die Platte angeschraubt werden wodurch sich eine nochmals verbesserte Wärmeübertragung auf das Werkstück ergibt.

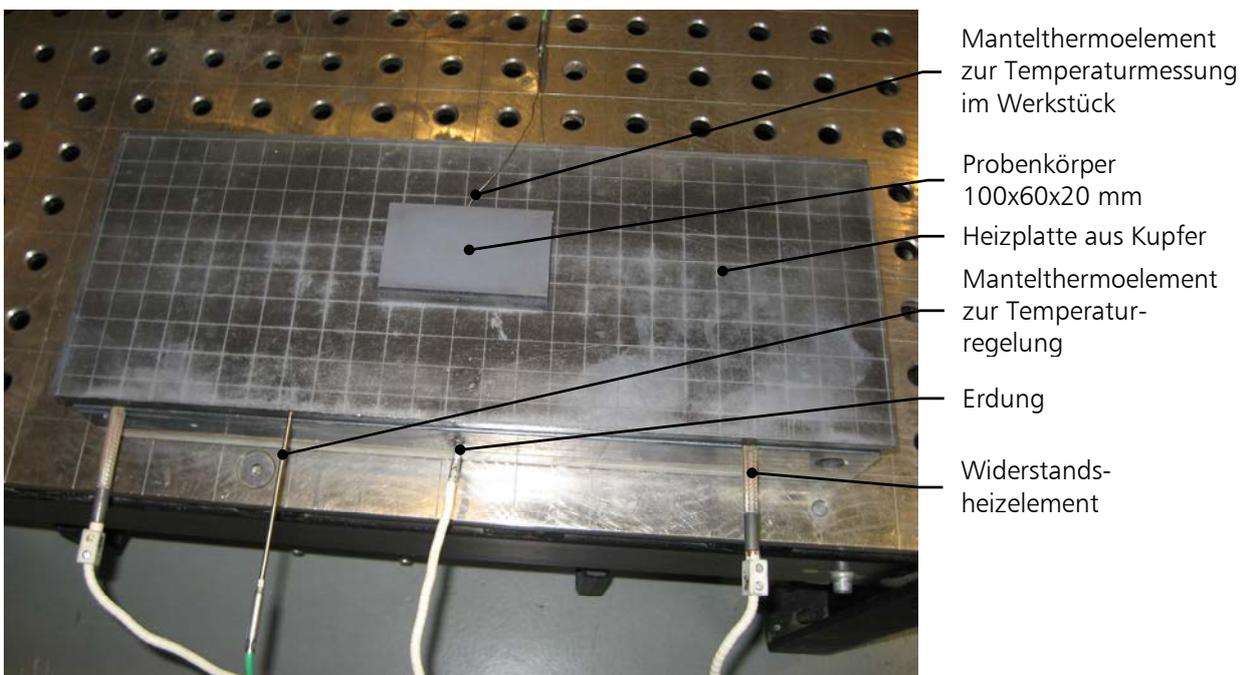


Abbildung 44 Kupfer-Wärmplatte

Die Heizplatte kann bis zu Vorwärmtemperaturen von 450 °C betrieben werden. Die Aufheizzeiten für Standardprobenkörper auf unterschiedliche Zieltemperaturen wurden durch Temperaturmessung mit Mantelthermoelementen in Probenkörper ermittelt. Abbildung 45 zeigt die Temperatur-Zeit-Verläufe einer 100x60x20 Standardprobe von Raumtemperatur auf unterschiedliche Vorwärmniveaus bei verschiedenen Regeltemperaturen der Heizplatte ohne Abdecken der Werkstücke mit Isolationsdecken. Es zeigt sich, dass die Regeltemperatur der Heizplatte im Werkstück nicht vollständig erreicht wird, was auf konvektive Wärmeverluste der Heizplatte und dem verminderten Wärmeübergangskoeffizienten zwischen der Kupferplatte und

dem aufliegenden Werkstück zurückzuführen ist. Die Differenz beträgt bei einer Regeltemperatur der Platte von 450 °C etwa 60 °C bzw. bei einer Regeltemperatur von 250 °C etwa 25 °C. Werden die Werkstücke aufgeschraubt ergeben sich höhere Aufheizraten. Dasselbe gilt beim Abdecken der Proben mit Isolationsdecken. Die genauen Vorwärmparameter unterschiedlicher Probengeometrien sind jeweils durch Versuche zu ermitteln. Im Allgemeinen ist es vorteilhaft mit der Heizplatte zu arbeiten, da nicht nur eine Wärmezufuhr auf das Werkstück erfolgt, sondern während des Schweißprozesses in der Regel auch eine Wärmeabfuhr in die Kupferplatte stattfinden kann. Somit kann die Temperatur des Werkstücks auch während des Schweißprozesses thermisch homogenisiert und geregelt werden.

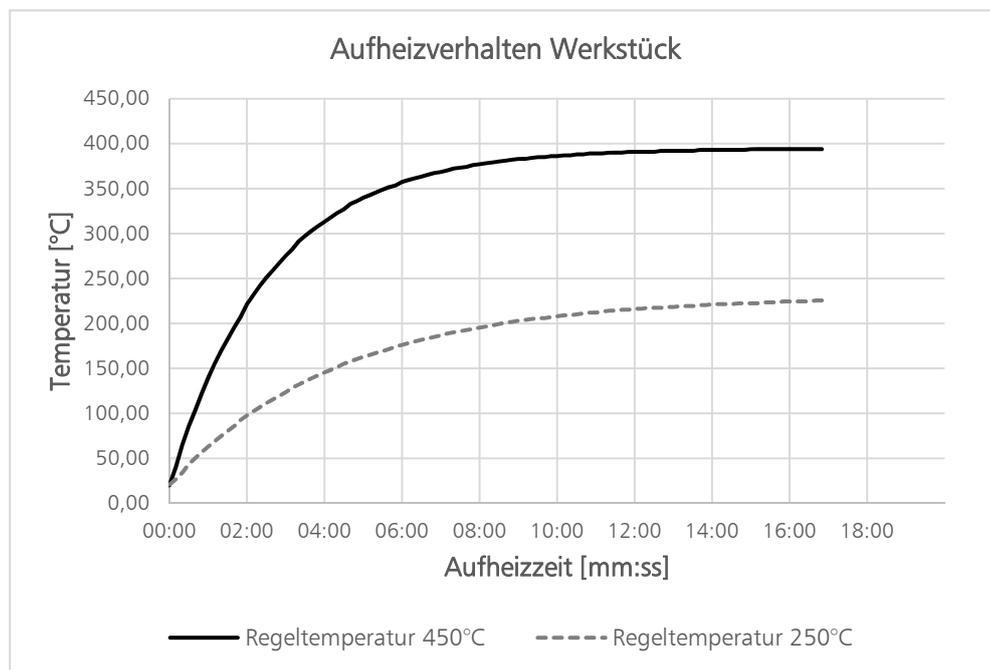


Abbildung 45 Aufheizverhalten einer C45 Flachprobe (100x60x20mm) bei unterschiedlichen Regeltemperaturen ohne Isolationsdecken



---

## 5 Beispiele von LMD-Beschichtungen in der Umformtechnik

Der Einsatz von LMD Schichten auf Werkzeugen für die Blechumformung ist bereits seit einigen Jahren Stand der Technik und wird von einigen Anwendern kommerziell angeboten. Die Anwendungsgebiete sind sowohl das Generieren von verschleißbeständigen Schichten, als auch die Realisierung von kurzfristig durchgeführten Designänderungen und Werkzeugreparaturen infolge Verschleiß. Im Folgenden werden Beispiele bzw. Entwicklungen für zwei unterschiedliche Anwendungsgebiete aus der Blechumformung dargestellt.

### 5.1 Beschichtungssysteme für die Umformung von austenitischen Edelstählen

Das Tiefziehen von nichtrostenden Edelstählen erfordert spezielle Werkzeugwerkstoffe. Oftmals werden spezielle Tiefziehbronzen wie Ampco22® oder Ampco25® für die Aktivflächen als Werkzeugwerkstoffe eingesetzt. Der Vorteil dieser Werkzeugwerkstoffe ist ein sehr geringer Reibungskoeffizient und ein sehr guter Adhäsionswiderstand gegenüber dem Halbzeugwerkstoff. Gerade austenitische Edelstähle neigen sehr stark zum Kaltverschweißen mit herkömmlichen Kaltarbeitsstählen. Dies hinterlässt sowohl am tiefgezogenen Bauteil, als auch an der Werkzeugoberfläche sehr ausgeprägte Ziehriefen. Eine schlechte Bauteilqualität und geringe Werkzeugstandzeiten sind die Folge. Beim Einsatz von Kupfer-Aluminium Bronzen sind diese Ziehspuren nur sehr gering ausgeprägt. Aufgrund ihrer geringen Härte zeigt sich jedoch bei diesen Werkzeugwerkstoffen ausgeprägter abrasiver Verschleiß. Die eingesetzten Werkzeuge müssen daher in definierten Wartungsintervallen nachgearbeitet werden. Es besteht auch die Möglichkeit diese Werkstoffe mittels Laserauftragschweißen zu verarbeiten. Der Vorteil hier ist wiederum die Möglichkeit die Schicht partiell an den benötigten Wirkflächen aufzutragen.

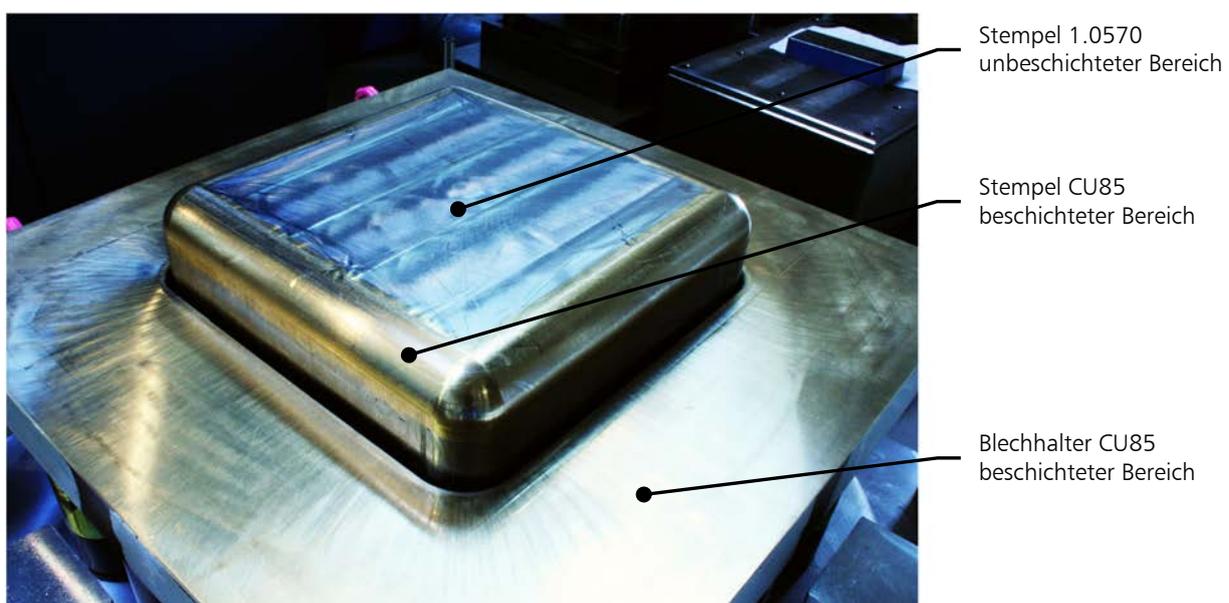


Abbildung 46 Temperierbares Versuchswerkzeug mit partieller CU85 Beschichtung

Abbildung 46 zeigt das Beispiel eines partiell beschichteten temperierbaren Versuchswerkzeuges mit CU85 auf 1.0570. Die ersten Erfahrungen mit der Beschichtung verliefen sehr positiv. Die Beschichtung eines Werkzeugsegmentes aus 1.2312 mit CU85 führte allerdings zur massiven Rissbildung. Aus diesem Grund wurden Haftfestigkeits- und Härteanalysen durchgeführt. Der Werkstoff 1.2311 erweist sich in dieser Werkstoffkombination als deutlich bessere Wahl.

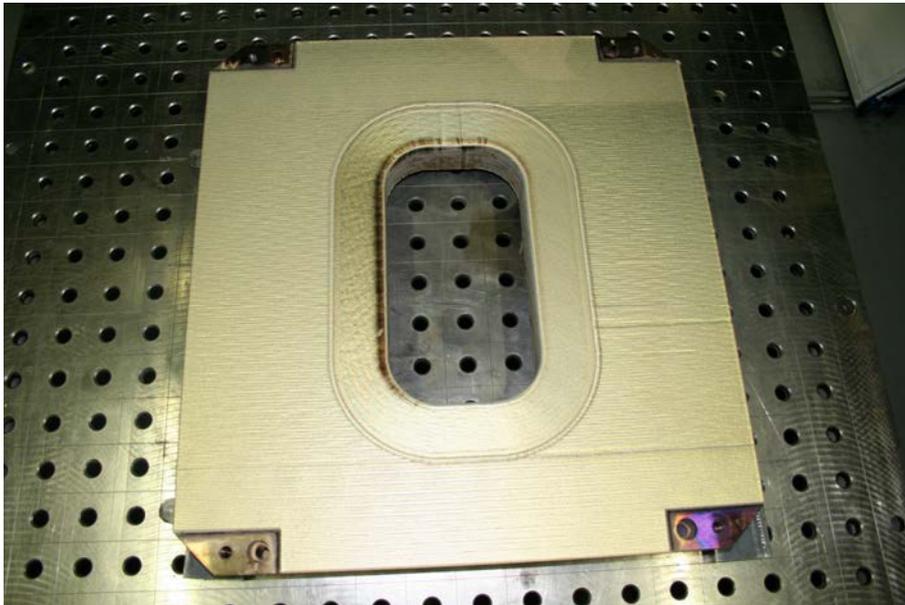


Abbildung 47 LMD beschichteter Blechhalter für die Umformung von 1.4301 / CU85 auf 1.2311

Abbildung 47 zeigt einen mit CU85 beschichteten Blechhalter aus 1.2311 vor der Endbearbeitung. Beschichtet wurde hier mit haftfestigkeitsoptimierten Schweißparametern.

## 5.2 Beschichtungssysteme für die Warmblechumformung

Das Presshärten von borlegierten Stählen hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Zum einen soll das Leichtbaupotenzial von Stahlwerkstoffen mit dem Hintergrund der Reduktion der mittleren CO<sub>2</sub> Emissionen immer weiter ausgeschöpft werden, zum anderen soll auch die Sicherheit im Crashfall gesteigert werden. Als Konsequenz daraus, hat sich dieses Verfahren als eines der wichtigsten zur Fertigung von crashrelevanten Strukturbauteilen etabliert. Bisher kommt nahezu ausschließlich der borlegierte Vergütungsstahl 22MnB5 zum Einsatz. Die Festigkeit dieses Werkstoffes liegt nach der entsprechenden Wärmebehandlung bei ca. 1600MPa, die Bruchdehnung (A<sub>80</sub>) nicht über 6%. Aktuelle Untersuchungen an dem martensitischen nichtrostenden Stahl 1.4034 zeigen, dass nach adäquater Prozessführung mittels Warmumformung, Zugfestigkeiten von über 1800 MPa und eine Bruchdehnung (A<sub>80</sub>) von ca. 14% erreicht werden können. Allerdings sind hinsichtlich der Werkzeugtechnik beim Presshärten von martensitisch, nichtrostenden Edelstählen noch viele Aufgaben zu lösen, da gängige Halbzeugbeschichtungen wie Zinklegierungen, Aluminium Silizium, X-Tec und Gamma Protect

nicht zum Einsatz kommen. Diese helfen bei der konventionellen Warmumformung nicht nur die Korrosionsbeständigkeit zu erhöhen, sondern auch Zunderbildung am Blech und Fressen zwischen Blech und Werkzeugoberfläche zu reduzieren.



Abbildung 48 Warmformversuche von 1.4034 mit einem vergüteten 1.2379 Werkzeugstahl  
extreme Aufschweißungen nach einem Hub (links)  
geformtes Bauteil mit deutlichen Ziehspuren (rechts)

Bei der Verwendung von konventionellen unbeschichteten Werkzeugstählen kommt es bei der Umformung von martensitisch, nichtrostenden Edeltählen zu starken Verschleißerscheinungen, sowohl am Werkzeug, als auch am Blechwerkstoff, wie in Abbildung 48 dargestellt. Die Versuche wurden an einem Standardwerkzeug mit Kreuzgeometrie bzw. einer U-Profil Geometrie durchgeführt. Der Verschleiß entsteht zunächst an der Blechoberfläche und lagert sich anschließend werkzeugseitig ab. Bei der Warmumformung dieser Stähle kommt es vermehrt zu adhäsiven Verschleiß und Zunderbildung an Umgebungsluft als bei herkömmlichen unbeschichteten Mangan-Bor-Stählen. Verantwortlich dafür scheint vor allem die um etwa 200°C höhere Austenitisierungstemperatur zu sein. Warmformversuche mit einer CU85 LMD-beschichteten Werkzeugfläche, welche üblicherweise bei der Kaltumformung von nichtrostenden Edeltählen zum Einsatz kommt, zeigt zwar keine adhäsiven Verschleißeffekte, allerdings massiven abrasiven Verschleiß aufgrund der geringen Härte (siehe Abbildung 49).

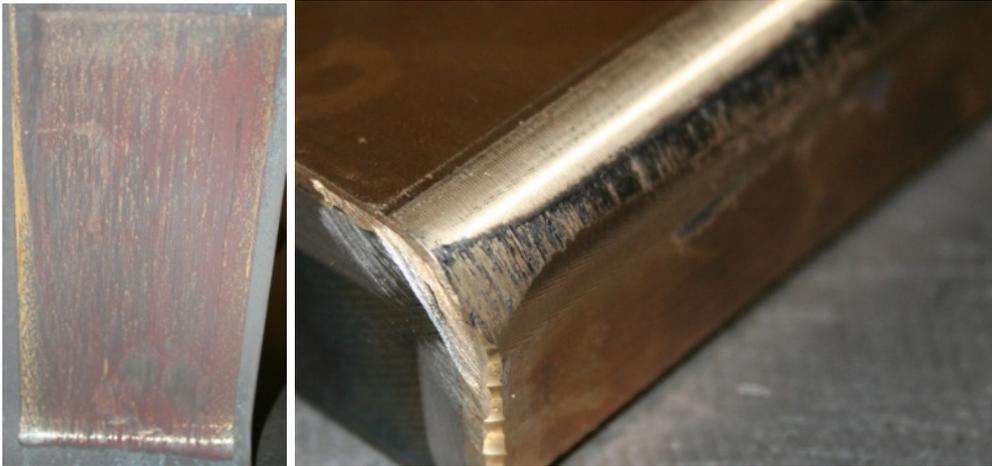


Abbildung 49 Warmformversuche von 1.4034 mit CU85 beschichteten Werkzeugelement  
geformtes Bauteil mit Materialablagerungen (links)  
starker abrasiver Verschleiß am Werkzeug (rechts)

Um den Verschleiß zu reduzieren wurden Beschichtungsversuche mit sphärischen Wolframkarbiden durchgeführt. Diese können in eine metallische Matrix eingeschmolzen werden. Wolframkarbide haben aufgrund ihrer hohen Härte nicht nur einen guten Verschleißwiderstand gegen Abrasion sondern auch gegen Adhäsion. Die Verarbeitung ist ebenfalls mittels Laserauftragschweißen möglich. Üblicherweise werden die Wolframkarbide mit einem metallischen Matrixmaterial in unterschiedlichen Verhältnissen gemischt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass diese rein in ein metallisches Matrixsubstrat eingeschmolzen werden können. Zunächst hat sich CU85 als Matrixwerkstoff angeboten. Abbildung 50 zeigt einen Schichtaufbau mit dem Grundwerkstoff 1.1730, einer zweilagigen CU85 Beschichtung und eingeschmolzenen Wolframkarbiden. Die Schicht ist nach dem letzten Beschichtungsvorgang nur mehr mittels Schleifen mit Diamantwerkzeugen, Erodieren oder speziellen HSC Fräsmaschinen bearbeitbar. Für diesen letzten Bearbeitungsgang sollte die Bearbeitungszugabe zum Fertigmaß nur mehr wenige hundertstel bis zehntel Millimeter betragen um die Fertigungszeiten möglichst kurz zu halten.

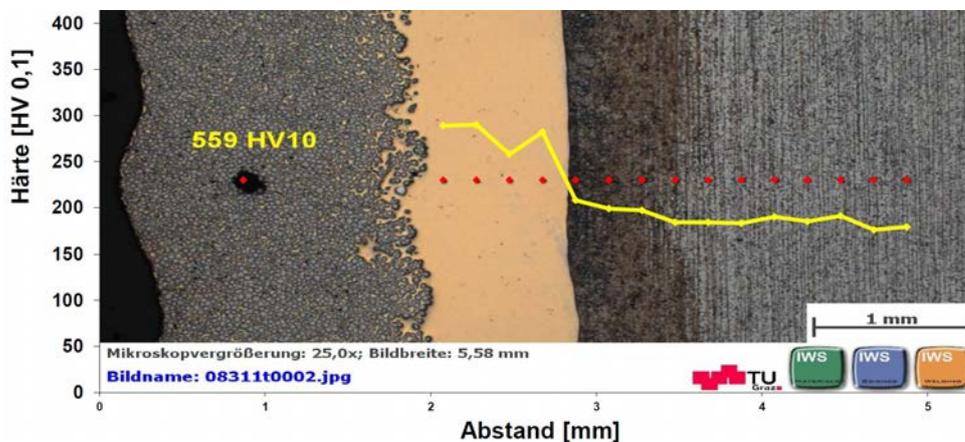


Abbildung 50 Schicht- und Härteverlauf im Querschnitt CU85 mit WoKa auf 1.1730

Zur Funktionsüberprüfung der vorgestellten Werkzeugbeschichtung wurden wiederum Umformversuche auf dem segmentierten U-Profil-Werkzeug durchgeführt. Diese zeigten nach einigen warmgeformten Bauteilen weder adhäsiven, noch abrasiven Verschleiß am beschichteten Werkzeugsegment. Auch die Bauteile hatten nur geringfügige Spuren von der Umformung, wie in Abbildung 51 dargestellt. Zur Überprüfung der Standzeit dieser Beschichtungen müssen Langzeitverschleißuntersuchungen, entweder an einem geeigneten Verschleißprüfstand, oder an einem seriennahen Versuchswerkzeug durchgeführt werden.



Abbildung 51 100% Wolframkarbide in einer Cu85 Matrix auf Toolox 33  
Pressgehärtete U-Profil-Teile (links)  
Werkzeugsegment mit Wolframkarbiden (rechts) – kein Verschleiß erkennbar

Betrachtet man Werkzeuge für die klassische Warmumformung, so tritt Verschleiß nur an bestimmten Zonen der Wirkflächen auf. Vor allem in Bereichen hoher Kontaktnormalspannung und Relativbewegung kann Verschleiß innerhalb weniger Zyklen sichtbar auftreten. Beispiel ist der Ziehradius eines Warmformwerkzeuges, wie in Abbildung 52 dargestellt. Ein Verschleißschutz müsste also nur in diesen speziellen Zonen partiell aufgebracht werden.

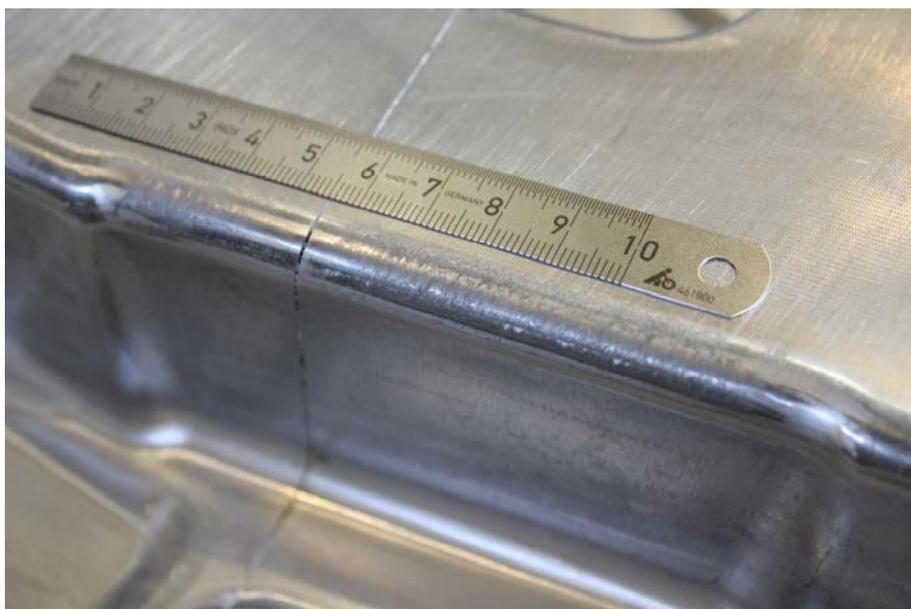


Abbildung 52 Warmformwerkzeug aus Cr7V mit ausgeprägter Verschleißzone am Ziehradius

Für weitere Versuche mit Wolframkarbiden wurde daher ein alternativer Matrixwerkstoff mit guter Warmfestigkeit und etwas höheren Härte als CU85 gewählt. Als Substratmaterial kommt ein vergüteter Warmarbeitsstahl 1.2343 mit einer Härte von etwa 54HRC zur Verwendung. Auf Basis einer haftfestigkeitsoptimierten Beschichtungstechnologie von Ni25 auf 1.2343 werden in einer weiteren Lage sphärische Wolframkarbide in den Nickelbasiswerkstoff eingeschmolzen wie in Abbildung 53 dargestellt. Um eine möglichst geringe Bearbeitungszugabe zu realisieren wird das Werkzeugsegment nach der Ni25 Beschichtung auf 0,2 mm Untermaß bearbeitet und danach mit der Wolframkarbidlage beschichtet. Diese realisiert eine Dickenzunahme von ca. 0,4 – 0,6 mm um letztendlich eine Bearbeitungszugabe von ca. 0,1 – 0,5 mm auf das Fertigmaß zu realisieren. Eine wirtschaftliche Bearbeitungsmethode mittels Zerspanung ist Gegenstand aktueller Untersuchungen. Ein Beispiel eines beschichteten Probekörpers ist in Abbildung 54 zu sehen.

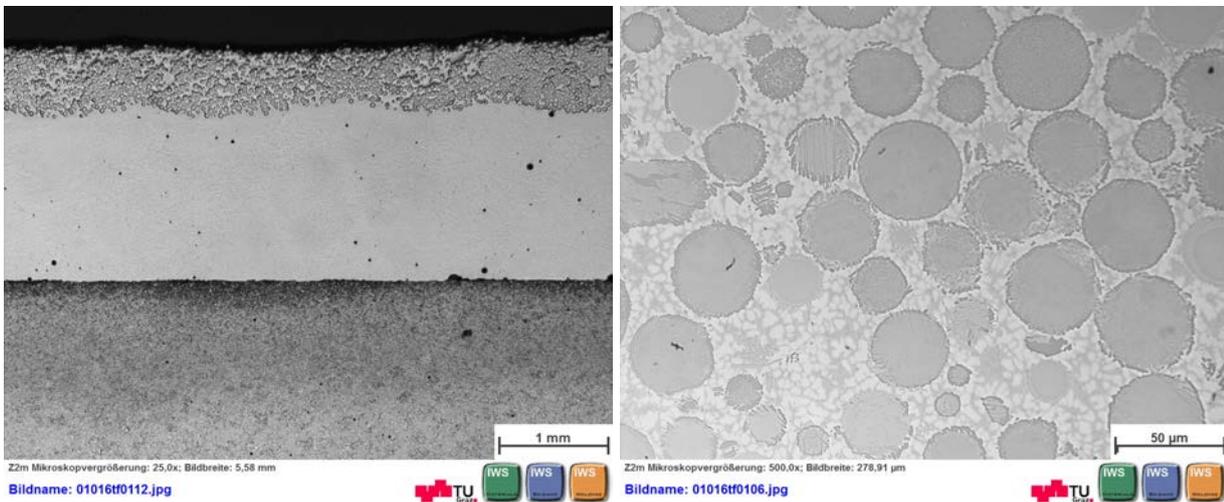


Abbildung 53 Schichtaufbau 1.2343 (Substrat) – Ni25 Beschichtung mit Wolframkarbiden (links)  
Detailbild der eingeschmolzenen sphärischen Wolframkarbidpartikeln (rechts)



Abbildung 54 Beschichtetes Musterbauteil 1.2343/Ni25/Wolframkarbide vor der Endbearbeitung

### 5.3 Oberflächennahe Kühlkanäle für Warmformwerkzeuge

Die oberflächennahe Kühlung von Werkzeugen ist ein wesentlicher Schritt zur Leistungssteigerung im Bereich der Warmumformung in Richtung hoher Abkühlgeschwindigkeiten und kurzer Taktzeiten. Neben einer guten Wärmeleitfähigkeit und Wärmeübergangskoeffizienten ist der Abstand zwischen der Werkzeugoberfläche und dem Kühlkanal direkt proportional zur möglichen Kühlleistung eines Warmformwerkzeuges. Aktuell sind hinsichtlich der Fertigung von Kühlkanälen vor allem zwei Technologien industriell verbreitet. Relativ einfach in der Herstellung und robust im Einsatz des Warmformprozesses sind tiefenloch gebohrte Kühlkanäle. Nachteil hierbei ist jedoch der oftmals fertigungsbedingte relativ große Abstand zur Werkzeugwirkfläche. Besonders bei gekrümmten Werkzeugflächen wirkt sich dieser Effekt aus. Zwangsläufig muss bei solchen Werkzeugen in Segmentbauweise, also der Unterteilung der Gesamtgeometrie in mehrere aneinander liegende Teile, gefertigt werden um die maximalen Bohrungstiefen nicht zu überschreiten und einen möglichst geringen Abstand zur Oberfläche bei gekrümmten Wirkflächen einhalten zu können. Bei sehr komplexen Geometrien ist mit unzureichender Kühlung, sogenannten Hot-Spots, zu rechnen.

Eine weitere Fertigungsmöglichkeit besteht in der Schalenbauweise. Bei dieser wird der Werkzeugaufbau zweiteilig, in Grundkörper und darüber liegender Schale, realisiert. Die Kühlkanäle können mittels Fräsen in den Grundkörper eingearbeitet werden. Die Schale wird dichtend mit dem Grundkörper verschraubt. Vorteil hier sind eine sehr gute Kühlleistung und eine gleichmäßige Temperatur der Werkzeugoberflächen. Nachteilig sind das sehr aufwändige Bearbeitungsverfahren und die komplexe Abdichtung des Schalenelements.

Weitere Lösungsmöglichkeiten wurden mittels selektiven Lasersintern geschaffen, indem Werkzeugsegmente zumindest teilweise aus einem Warmarbeitsstahl mit integrierter Kühlkanalstruktur aufgebaut werden. Auf diese Art lassen sich komplexe Kavitäten herstellen die mittels konventioneller Fertigungstechnologie nicht realisierbar sind. Nachteil hier sind die derzeit noch hohen Fertigungskosten.

Mit der Technologie des Laserauftragschweißens lassen sich ebenfalls leichte 3D Strukturen aufbauen. In Ersten Versuchen zur Herstellung von oberflächennahen Kühlkanälen wurden von der Wirkflächenoberseite Kanäle gefräst und mittels eines geometrisch angepassten Einlegekörper verschlossen und verschweißt. Erste Ergebnisse zeigten zwar gute Erfolge bezüglich erzielter Kühlleistung, jedoch bestanden teilweise massive Probleme mit der Abdichtung der wasserführenden Strömungskanäle. Deshalb wurde nach weiteren Konzepten zum Verschließen der oberflächlich eingefrästen Kühlkanäle gesucht. Die Nachteile, die sich beim Überschweißen von gefrästen Kühlkanälen unter Verwendung von Einlegeblechen ergeben, können umgangen werden, wenn die Kühlkanäle ausschließlich durch die beim Laserauftragschweißen erzeugten Schweißraupen geschlossen werden. Die Idee besteht darin, zuerst jeweils eine Schweißnaht an den Kanten des Kanals unter einem bestimmten Winkel zu erzeugen. Eine anschließende Decklage verschließt den Kühlkanal auf der Oberseite. Abhängig von der Kanalbreite sind ein oder zwei Schweißlagen an jeder Kanalseite zum Verschließen erforderlich. Erste Versuche zeigten, dass die

verschleißbaren Kanalbreiten zwischen 6 und 12 mm betragen können. Abbildung 55 zeigt das Beispiel einer Versuchsmatrix zur Bestimmung der optimalen Kanalgeometrie.

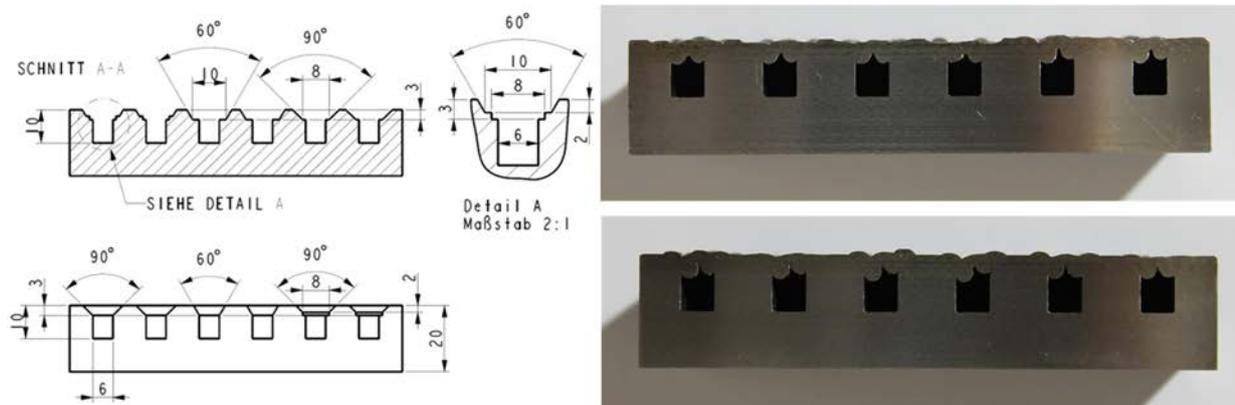


Abbildung 55 Querschnitt eines Versuchskörpers mit unterschiedlichen Kühlkanalgeometrien

Als Aufbaumaterial ist beispielsweise der Werkstoff 316L geeignet. Ist der Kanal mittels LMD-Prozess verschlossen muss der Körper mittels Fräsen auf Untermaß bearbeitet und für das Aufbringen der Deckschicht vorbereitet werden.

Für die Fertigung des gekühlten Modellwerkzeuges wurde die Kanalgeometrie mit einer 3x45°mm Fase ausgeführt. Als Grundform diente eine sandgestrahlte 100x60x20 mm Platte aus 1.1730, in die drei Kanäle eingefräst wurden. Diese Kanäle sind durch zwei Verteilerbohrungen verbunden. Abbildung 56 zeigt ein 3D-Modell der Grundform. Im ersten Schritt wurden die Kühlkanäle mit je einer Schweißblage pro Kanalseite und anschließender Decklage verschlossen. Jeweils eine weitere Lage pro Seite füllt den noch nicht zugeschweißten Teil der Fase auf. In weiterer Folge wurden die Kanäle bündig zur Werkzeugoberfläche überfräst und sandgestrahlt und das gesamte Modellwerkzeug mit einer 1,6 mm hohen Schicht 316L und darauf mit einer 1,2 mm hohen Schicht Cu85 überschweißt und anschließend auf Maß bearbeitet. Zu sehen ist ebenfalls das fertig überarbeitete Modellwerkzeug mit montierten Schlauchkupplungen.

Im Folgenden sind nun weitere Presshärteversuche zur Bestimmung der Zyklfestigkeit am ebenen Plattenwerkzeug notwendig. Es ist jedoch das Ziel, das Prinzip auf komplexere 3D Geometrien zu übertragen um mit diesem Fertigungsansatz in Bereichen, bei denen konventionelle Stand-der-Technik-Verfahren an ihre Leistungsgrenzen stoßen, eine nutzbare industrielle Lösung zu schaffen.



Abbildung 56 Ebene Versuchsplatte mit verschweißten oberflächennahen Kühlkanälen



---

## 6 Qualitätsmerkmale und Prüfmethoden von LMD Schichten

Zur Beurteilung von LMD Schweißergebnissen und Entwicklung von Beschichtungssystemen ist eine umfangreiche Evaluierung notwendig. Um die Bewertungsergebnisse für die statistische Versuchsplanung verwenden zu können wird im Folgenden zwischen diskret und stetig messbaren Qualitätsmerkmalen unterschieden. Erstere treten eindeutig auf und dienen als Grundlage zur ersten schnellen Beurteilung der Beschichtung. Diese sind häufig auch kritische Fehler wie z.B. Risse, Poren, Delamination, u.a., deren Auftreten, bzw. Nichtauftreten, eine eindeutige Entscheidungsgrundlage für eine n.i.O. oder i.O. Werkstückbeschichtung gibt. Die zweite Art ist häufig nur durch unterschiedliche Prüfmethoden erfassbar und misst Eigenschaften der Beschichtung wie z.B. Härte, Festigkeit, Verschleißwiderstand, u.a., deren Ergebnisse zur weiteren Optimierung der Schweißstrategie bzw. –parameter herangezogen werden können. Vielfach zeigt sich, dass die methodische Erfassung dieser Werte für eine erfolgreiche Entwicklung einer Beschichtungsstrategie notwendig ist und dadurch die mechanischen Kennwerte der Beschichtung wesentlich gesteigert werden können. Im Folgenden werden unterschiedliche Qualitätsmerkmale und Fehlerarten bzw. auch die Prüfmethoden zu deren Erfassung erläutert.

### 6.1 Qualitätsmerkmale und Fehlerarten zur Beurteilung von LMD Schichten

Da sich das Laserauftragschweißen hinsichtlich seines Prozesses und der verwendeten Werkstoffpaarungen sehr von der klassischen Schweißtechnik unterscheidet ist eine Bewertung nach deren Regeln nicht direkt übertragbar. Es gibt jedoch einige Erscheinungsformen von Fehlstellen die in der Schweißtechnik gleich auftreten. Diese sind in der EN ISO 6520-1 als Unregelmäßigkeiten deklariert. Von Fehlern spricht die Norm, wenn eine unzulässige Unregelmäßigkeit vorhanden ist.

#### 6.1.1 Risse

Risse sind laut Definition Unregelmäßigkeiten, welche örtlich durch Trennung im festen Zustand erzeugt werden. Beim Auftreten von Rissen muss hinsichtlich deren Lage, Größe, Art und Zeit der Entstehung unterschieden werden. Die Rissbildung ist stets spannungsinduziert und tritt in der Regel bei Abkühl- oder Aufwärmphasen ein. Bei LMD Schichten können Risse im Bereich der Grenzzone zwischen Substrat- und Beschichtungswerkstoff, oder leicht versetzt in der Wärmeeinflusszone oder im Beschichtungswerkstoff auftreten. Diese müssen nicht bis an die Oberfläche reichen und sind daher durch einfache visuelle Prüfverfahren nicht feststellbar. Anders verhält es sich bei durchgängigen Rissen, welche hauptsächlich normal zur Werkstückoberfläche verlaufen (Freyer 2007, S. 36). Diese können in der Regel leicht erkannt werden. Ihr Verlauf kann sowohl mehrheitlich parallel, quer oder auch zufällig verästelt zur Schweißrichtung verlaufen. Das Entstehen von Rissen ist immer mit dem Vorhandensein von Spannungen verbunden, die meist durch die vorhandenen großen Temperaturgradienten entstehen. Der größte Anteil dieser

Spannungen entstehen wohl durch das Aufbringen eines schmelzflüssigen Werkstoffes auf einen festen Körper welcher sich bei der Abkühlung stark zusammenzieht. Die Spannungen können aber auch durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten von Substrat- und Beschichtungswerkstoff oder wegen einer Gefügeumwandlung (z.B. Austenit in Martensit) entstehen (Brückner 2012, S. 20–21). Unterschieden werden Risse, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Schweißprozess auftreten.

#### *Rissbildung während der Erstarrung*

Die Entstehungsmechanismen solcher Risse sind ähnlich der in der Schweißtechnik bekannten Heißrisse. Die Hauptursache für die Entstehung von Heißrissen liegt laut Schulze (2010, S. 56) in Entmischungsvorgängen von Legierungsanteilen im Schweißbad. Dadurch können Eutektika mit niedrigeren Schmelzpunkten entstehen. Diese bleiben bis nach dem Erstarren des Schmelzbad in lokalen Bereichen flüssig. Die vorliegenden Eigen- und Schrumpfspannungen führen zu vollständig interkristallin verlaufenden Trennungen. Obwohl die Erstarrungsintervalle beim Laserschweißen sehr kurz und dadurch Entmischungsvorgänge erschwert sind, kann es vor allem bei stark unterschiedlichen Legierungsanteilen von Substrat und Beschichtungswerkstoff, sogenannten artfremden Werkstoffverbindungen, zur Bildung niedrig schmelzender Phasen kommen. Ein Beispiel eines solchen Fehlermechanismus im LMD Prozess ist in Abbildung 57 gezeigt.

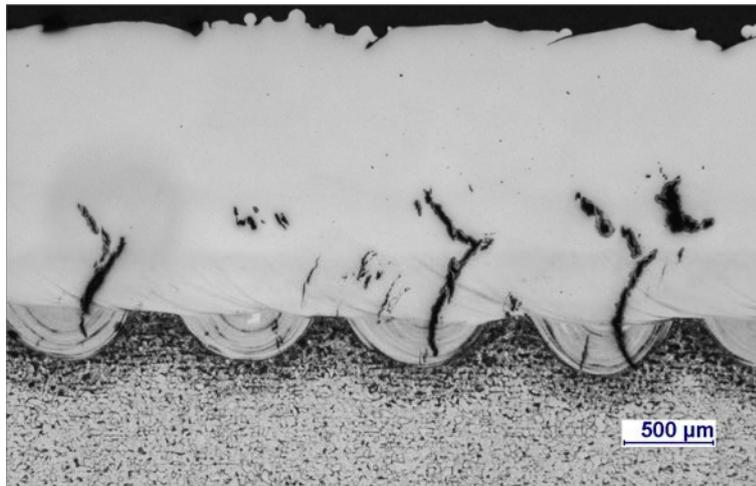


Abbildung 57 Rissbildung während der Erstarrung in einer LMD Probe (Substrat: 1.0570 / Beschichtungswerkstoff: MicroMelt H13)

#### *Rissbildung nach der Erstarrung*

Auch die Rissbildung nach der Erstarrung des Gefüges ist beim LMD Prozess ein häufig zu beobachtendes Phänomen. Ausgelöst werden sie ebenfalls durch die hohen thermisch induzierten Zugeigenspannungen. Diese sind vor allem von Faktoren wie Beschichtungsdicke, Schweißparameter und der Werkstoffkombination abhängig. Ebenfalls möglich ist die Entstehung von Kaltrissen, die durch Wasserstoffinduzierung bzw. große Härten des Schweißgefüges begünstigt wird. Sie gilt als die gefährlichste Rissform. Kaltrisse entstehen nach dem Erstarren häufig beim Abkühlen bis auf Raumtemperatur und unter Umständen nach zeitlicher Verzögerung bis zu

einigen Tagen (Schulze 2010, S. 278). Die Rissbildung nach Erstarrung ist bei der Herstellung von LMD-Schichten ein sehr häufiges Problem, da in der Regel Werkstoffe mit Schichthärten über 400HV verarbeitet werden. Zur Vermeidung können unterschiedliche Maßnahmen ergriffen werden. Trocknung des Schweißpulvers gehören genauso zu den Gegenmaßnahmen wie auch das Vorwärmen des Werkstücks. In vielen Fällen hilft es die Abkühlgeschwindigkeiten zu reduzieren. Dies geschieht ebenfalls durch erhöhte Vorwärmung, durch Reduzieren der Schweißgeschwindigkeit oder durch lokale induktive Vor- bzw. Nachwärmung der Beschichtung (Brückner 2012, S. 125ff). Abbildung 58 zeigt Kaltrisse einer hochfesten Nickelbasislegierung.

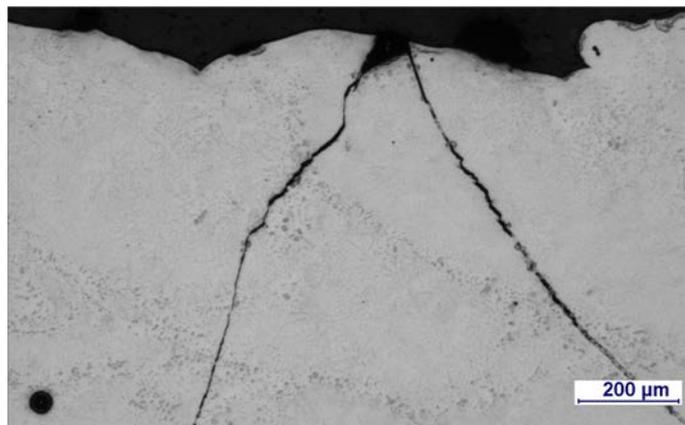


Abbildung 58 Spannung induzierte Rissbildung nach der Erstarrung einer Nickelbasislegierung mittels LMD-Prozess aufgetragen

Bei der Rissbildung von LMD Schichten handelt es sich um einen kritischen Fehler. Häufig werden die Risse erst nach spanender Bearbeitung der Werkstücke sichtbar, wie in Abbildung 59 gezeigt. In diesem Fall ist die Beseitigung der Risse kaum mehr möglich. Einmal entstandene Risse im Werkstück können durch Überschweißen nicht verschlossen werden. Es besteht nur die Möglichkeit den Riss bis zu seiner Wurzel durch Schleifen oder Fräsen herauszuarbeiten und nachfolgend mit Puffer- und Deckschicht wieder zu verschweißen. Der Aufwand ist jedoch nur bei einzeln auftretenden Rissen gerechtfertigt.

Der Einsatz von Werkzeugbeschichtungen mit Rissen führt innerhalb weniger Lastzyklen zu einem kritischen Versagen der Oberfläche. Die Neigung zur Rissbildung ist von vielen Faktoren abhängig und muss in der Entwicklung von Beschichtungssystemen unbedingt betrachtet werden. Dazu zählen:

- Werkstoffpaarung (Substrat/Beschichtung)
- zu hohe Abkühlgeschwindigkeiten beim Schweißprozess
- große Temperaturunterschiede im Werkstück
- Verwendung harter und spröder Beschichtungswerkstoffe



Abbildung 59 Rissbildung in beschichteten Werkzeugkomponenten  
Ziehring CU85 auf 1.2312 (links)  
Schmiedewerkzeug Stellite 21 auf 1.2714 (rechts)

Ebenso wichtig sind die erforderlichen Gegenmaßnahmen zur Rissvermeidung, welche sind:

- Geeignete Auswahl des Substratwerkstoffes
- Auswahl von Beschichtungswerkstoffen mit geringerer Rissneigung
- Arbeiten mit Pufferlagen zur Spannungs kompensierung
- Reduzieren der Schichthärte
- Reduzieren von Fehlstellen in der Beschichtung (Rissinitiation)
- Vorwärmen
- Langsamere Schweißvorschub

### 6.1.2 Poren

Als weitere Unregelmäßigkeiten gilt die Bildung von Hohlräumen in der LMD Beschichtung wie sie beispielsweise in Abbildung 59 gezeigt wird. Diese werden durch eingeschlossenes Gas gebildet und treten je nach Beschichtungswerkstoff und Parameter mehr oder weniger auf. Ist der Einschluss kugelförmig spricht die Norm von einer Pore, welche auch die häufigste Erscheinungsform ist.

Die Bildung von Poren wird entweder chemisch bedingt durch Verunreinigungen (z.B. Fette, Öle, etc.) im Beschichtungsbereich, durch Reaktionen von Gasen (z.B.  $O_2$ ,  $N_2$ ) mit Legierungselementen, oder prozessbedingt durch Verdampfung oder Gaseinschlüsse aufgrund von ungünstigen Schmelzbadströmungen hervorgerufen. Ersterer Grund kann nur durch saubere Oberflächenvorbereitung und optimale Schutzgasabdeckung vermindert werden. Die zweite Ursache von Porenbildung lässt sich durch geeignete Prozessparameter deutlich beeinflussen. Das Auftreten von Poren kann nicht völlig vermieden werden. Es ist jedoch möglich sowohl Anzahl bzw. Häufung und deren Größe weitestgehend zu reduzieren. Die Beurteilung erfolgt meist über metallografische Querschliffe bei denen sowohl maximale Größe als auch Anzahl und Flächenanteil

in der Beschichtung festgestellt werden kann. Poren sind als Fehlstelle oft Ausgangspunkt für Rissbildung und daher immer kritisch zu betrachten.

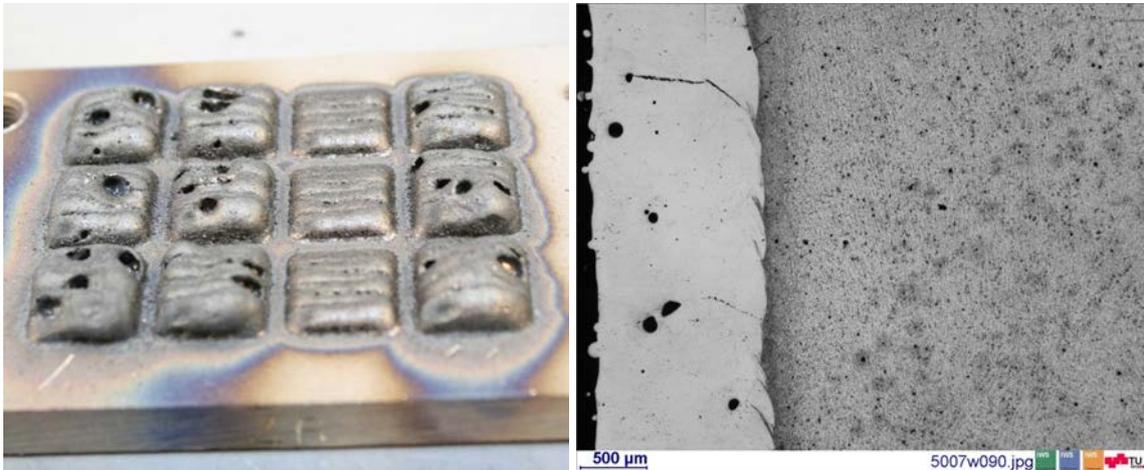


Abbildung 60 Extreme Porenbildung auf Versuchskörper bei unterschiedlichen Schweißparametern, Substrat: 1.1730 / Beschichtungswerkstoff: NT FeV12 (links); Sichtbare Porenbildung im Querschliff, Substrat: 1.0570 / Beschichtungswerkstoff: MicroMelt T15 (rechts)

Gegenmaßnahmen zur Porenbildung sind wie folgt:

- Vermeidung von ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ) im Bereich der Schutzgasatmosphäre (Ar, He)
- Einsatz porenvermindernder Legierungselemente
- Vorwärmen
- Reduzieren der Intensität (durch Defokussieren)
- Reduzieren der laserinduzierten Plasmabildung
- Verlängern der Schmelzbadzeit um Ausgasen zu ermöglichen
- Reduzieren der Streckenenergie

### 6.1.3 Delamination und Haftfestigkeit der Beschichtung

Wie bei allen möglichen Beschichtungsarten ist die Haftung der Schicht auf dem Substrat eine wesentliche Eigenschaft. Je höher der Ablösungswiderstand ist desto bessere Eigenschaften hat das Gesamtsystem der Beschichtung. Im Gegensatz dazu kann es schon während des Schweißprozesses oder unter geringer Krafteinwirkung zur partiellen oder vollständigen Ablösung der Schicht kommen wie in Abbildung 61 gezeigt wird. Die Haftfestigkeit ist von mehreren wesentlichen Wirkmechanismen bestimmt. In der Realität haben stets mehrere oder alle dieser Mechanismen einen Einfluss auf die Anbindungseigenschaften.

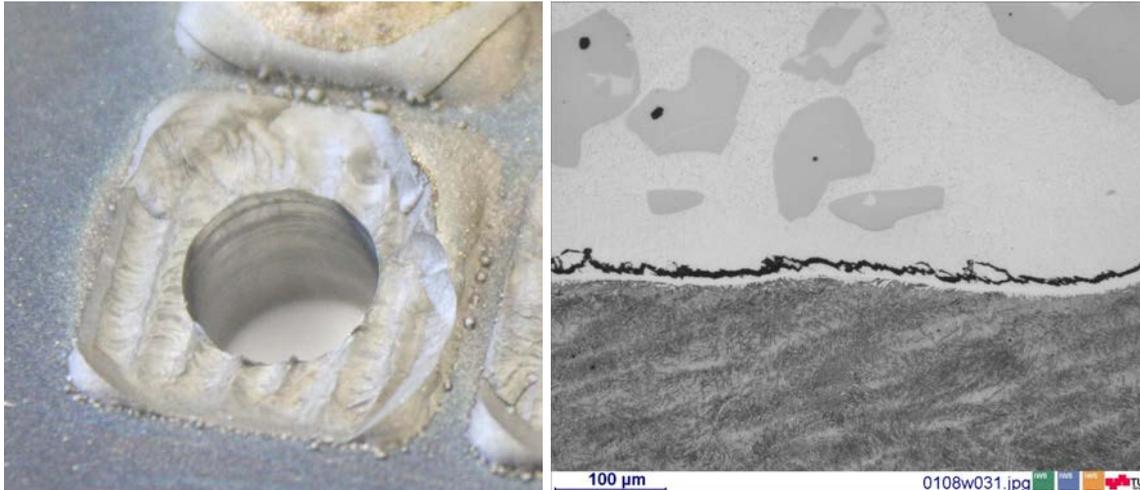


Abbildung 61 Fast vollständige Delamination einer Beschichtungsfläche auf Versuchskörper während der Zerspannung; Substrat: 1.1730 / Beschichtungswerkstoff: NT Ni60 (links); Sichtbare Delamination im Querschliff, Substrat: 1.2767 / Beschichtungswerkstoff: Sulzer Metco WOKA 51102 (rechts)

#### *Thermisch induzierte Eigenspannungen*

Die durch den Beschichtungsprozess thermisch induzierten Eigenspannungen haben wie bei den anderen vorher genannten Unregelmäßigkeiten einen signifikanten Einfluss auf die Bindung zwischen der Beschichtung und dem Grundwerkstoff und vermindern in jedem Fall die Haftfestigkeit. Übersteigen diese Spannungen die Zugfestigkeit im Bereich der Vermischungszone, kann dies bis zur teilweisen oder vollständigen Ablösung der LMD-Schicht kommen.

#### *Mechanische Eigenschaften der Aufmischungszone*

Je nach Werkstoffkombination und Beschichtungsaufbau fällt der Vermischungszone eine wesentliche Bedeutung zu. Kritisch zu sehen sind vor allem artfremde Verbindungen, welche in dieser Zone lokal niedrigere Festigkeiten ergeben und somit eine Schwachstelle in der Anbindung darstellen. Ein sprunghafter und hoher Härtesprung von Substrat auf Beschichtungswerkstoff kann ebenfalls negative Eigenschaften haben. Ein wesentlicher Anteil für die Haftfestigkeit spielt auch jener Energieanteil im LMD Prozess, der für das Aufschmelzen des Substrates zur Verfügung steht.

Wie von Ocelík et al. (2007) gezeigt ist hier eine richtige Abstimmung zwischen Laserleistung, Pulverförderrate und Vorschubgeschwindigkeit zu wählen. Eine zu hohe Aufbaurrate bei gleichbleibender Laserleistung reduziert den Energieanteil, der zur Vermischung von Substrat und Beschichtungswerkstoff zur Verfügung steht, auf ein kritisches Maß und vermindert dadurch die Haftfestigkeit.

#### *Mechanische Eigenschaften in der Wärmeeinflusszone*

Auch die Wärmeeinflusszone kann durch den LMD Prozess Schädigungen aufweisen. Verantwortlich hier sind ebenfalls durch den Wärmeintrag veränderte Gefüge bei denen es aufgrund des Belastungskollektives und der Eigenspannungen zu einem Totalversagen der Beschichtung kommen kann.

### Randzonen- bzw. Start/Stoppeffekte

Es wurde durch Brückner (2012, S. 95ff) und Ocelík et al. (2012) gezeigt, dass vor allem Zugspannungsmaxima im Randbereich von Beschichtungsfeldern, bzw. am Start-/Endpunkt der Schweißraupe entstehen. Diese Zonen sind häufig Ursprung von Rissbildung bzw. partieller oder vollständiger Delamination.

Als Gegenmaßnahmen zu Delamination bzw. Steigerung der Haftfestigkeit gelten:

- Geeignete Werkstoffpaarungen
- Geringere Härte des Beschichtungswerkstoff
- Richtiges Verhältnis Streckenenergie und Pulverzufuhr
- Richtige Vorwärmung
- Schweißen der Randzonen mit geringerer Auftragsrate
- Verwenden von Pufferlagen bzw. mehrlagig gradierte Beschichtungen

### 6.1.4 Härte und Härteverläufe

Ein weiteres Qualitätsmerkmal von LMD Beschichtungen ist die Härte bzw. der Härteverlauf von Substrat und Beschichtung. Die Härte ist laut Bleck (2007, S. 133) „ein Maß für den Widerstand einer bleibenden plastischen Verformung“. Des Weiteren kann aufgrund einer Härtemessung auch eine Aussage bezüglich Festigkeit getroffen werden. In der Regel ist Härte einer LMD Beschichtung höher als die des Substratwerkstoffes. Jedoch gibt es auch Beschichtungssysteme, die auf andere Eigenschaften, wie Wärmeleitung oder geringe Reibbeiwerte optimiert werden.

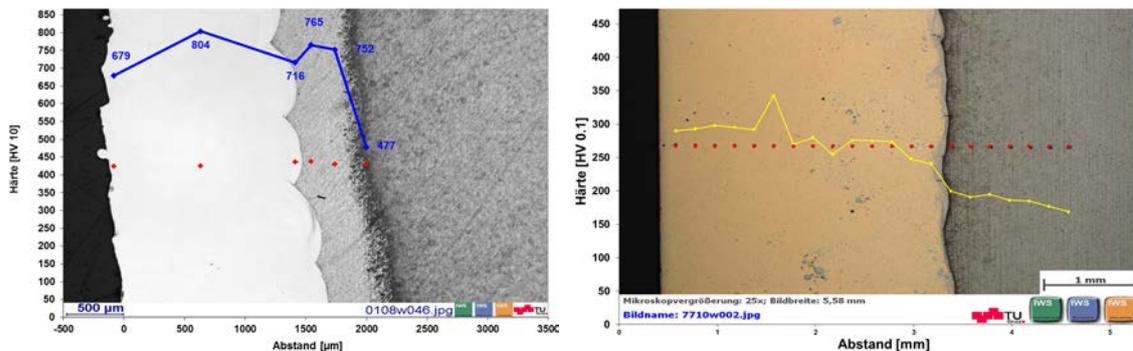


Abbildung 62 Härteverlauf unterschiedlicher Schichtsysteme

Substrat: 1.2767 / Beschichtungswerkstoff: CPM 1V max. Härte ca 800 HV<sub>10</sub> (links)

Substrat: 1.0570 / Beschichtungswerkstoff: CU85 max. Härte ca 350 HV<sub>0,1</sub> (rechts)

Hinsichtlich Verschleiß im tribologischen System der Umformung kann jedoch gesagt werden, dass höhere Materialhärten bessere Verschleißergebnisse liefern. Sehr harte Beschichtungswerkstoffe bergen jedoch die Gefahr zur vorher erwähnten Rissbildung, bzw. reduzierten Haftfestigkeit. So ist eine geringere Härte bei keiner Rissbildung und besseren Zähigkeit der Schicht meist die bessere Entscheidung. Erzielbare Schichthärten liegen sowohl für Eisen-, Kobalt- und Nickelbasis laut unterschiedlichen Publikationen wie Xu et al. (2006), Lin und Chen (2006), Zhang et al. (2008)

zwischen 500 – 750 HV. Vereinzelt sind auch Härten über 800 HV schweißbar, jedoch sind diese Schichten nur unter sehr hohem Aufwand prozesssicher zu verarbeiten.

Bei der Betrachtung der Härte ist auch deren Verlauf vom Substrat, Wärmeeinflusszone, Vermischungszone und Schicht ein wichtiges Merkmal. Zu große Härtesprünge sind ebenso zu vermeiden, wie auch eine verminderte Härte im Bereich der Wärmeeinflusszone bzw. Vermischungszone.

## 6.2 Prüfmethode

Bei der Entwicklung von Beschichtungssystemen stehen auf Grundlage von definierten Eigenschafts- und Qualitätszielen unterschiedliche Prüfverfahren zur Verfügung. Hierbei handelt es sich sowohl um zerstörungsfreie, als auch zerstörende Prüfmethoden deren Einsatz zu Machbarkeitsversuchen, Definition des Prozessfensters oder auch zur Verbesserung einzelner Qualitätsmerkmale verwendet werden kann. Die Ergebniswerte können diskreter oder stetiger Natur sein. Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Verfahren kurz dargestellt. Neben einigen üblichen Standardverfahren, wurden im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls Sonderprüfverfahren entwickelt die speziell zur Evaluierung von LMD Schichten dienen.

### 6.2.1 Farbeindringprüfung

Die Farbeindringprüfung oder Rot/Weiß-Prüfung ist eine zerstörungsfreie Prüfmethode. Bei diesem Verfahren werden gefärbte (z.B. rote) Flüssigkeiten (Penetrieröle) mit sehr geringer Oberflächenspannung auf die beschichtete Werkstückoberfläche aufgetragen. Aufgrund der Kapillarkwirkung dringt die Flüssigkeit in Risse und Poren mit einer Spaltbreite größer  $0,25\mu\text{m}$  ein. Nach Abwaschen und Reinigen der Werkstückoberfläche wird ein saugfähiges Kontrastmittel, der sogenannte Entwickler, aufgesprüht. Dieser zieht die in Risse und Poren eingedrungenen Penetrieröle an die Oberfläche und macht sie sichtbar. Voraussetzung hierfür ist, dass der Fehler zur Oberfläche hin offen sein muss, damit die Flüssigkeit eindringen kann. Ebenfalls ist darauf zu achten, dass die Werkstückoberfläche vor der Prüfung frei von Fetten, Ölen, Zunder und anderen Oxiden sein muss um ein gültiges Ergebnis zu liefern (Fahrenwaldt et al. 2014, S. 566). Das Verfahren ist bei allen LMD Beschichtungen möglich.

Untersuchte Qualitätsmerkmale sind das Aufspüren von Rissen, Poren und Porennester unterschiedlicher Größe sofern die Fehlstellen nach außen offen sind.

Das Prüfverfahren liefert ein diskretes Resultat über das Vorhandensein von Rissen bzw. Poren. Indiziert das Verfahren eine oder mehrere Fehlstellen müssen die Parameter der Beschichtung verworfen werden da das Ergebnis außerhalb des Prozessfensters liegt. Durch die Risshäufigkeit bzw. das Muster können unter gewissen Umständen Schlüsse auf den Weg zu einem möglichen Prozessfenster getroffen werden. Ein Beispiel für unterschiedliche Rissmuster bei LMD Schichten ist in Abbildung 63 dargestellt.

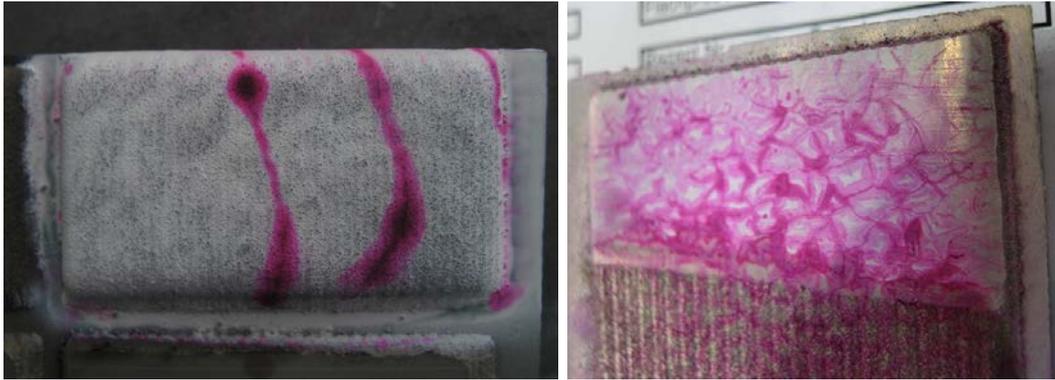


Abbildung 63 Farbeindringprüfung an LMD Probenkörper  
 Probe LPW1V auf 1.1730 (rechts) zwei längsverlaufende Risse sind deutlich zu erkennen  
 Probe CPM10V auf 1.2379 (links) dichtes Rissnetzwerk

## 6.2.2 Härtemessung

Als Härte wird der Widerstand gegen das Eindringen eines härteren Körpers in einen Werkstoff bezeichnet. Die Härtemessung gibt Aufschluss über den aktuellen Zustand eines Werkstücks hinsichtlich Verformung, Wärmebehandlung, Verschleißwiderstand und Festigkeit. Bei metallischen Werkstoffen gibt es drei klassische Härteprüfverfahren nach Brinell, Rockwell und Vickers (Kanani 2007, S. 111). Im weiteren wird auf die Vickershärte eingegangen.

Das Härtemessverfahren nach Vickers ist in der DIN EN ISO 6507-1:2005 definiert. Bei diesem Verfahren wird eine quadratische Diamantpyramide mit einem Öffnungswinkel von  $136^\circ$  als Eindringkörper verwendet wie in Abbildung 64 dargestellt. Dieser wird unter einer definierten Prüflast stoßfrei und normal auf die Oberfläche eingedrückt und kurz gehalten. Der hinterbliebene Abdruck stellt ebenfalls ein Quadrat mit zwei sichtbaren Diagonalen ( $d_1$ ,  $d_2$ ) dar.

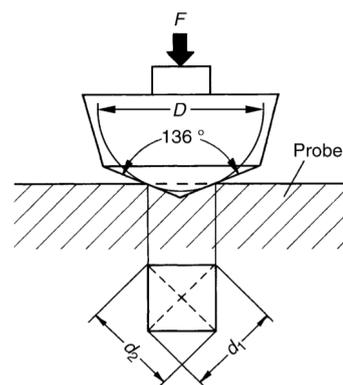


Abbildung 64 Prinzip der Vickershärteprüfung (Macherauch und Zoch 2014, S. 72)

Die Härte ist eine dimensionslose Größe die sich durch den Quotienten aus Druckkraft  $F$  und der Fläche  $A$  des Eindrucks berechnet. Im Fall von der Geometrie von Vickers berechnet sie sich wie in Gleichung (5.1) angegeben.

$$HV = \frac{1}{g} \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \approx 01891 \frac{F}{d^2} \quad (6.1)$$

Da es aufgrund von Oberflächen- und Gefügebeschaffenheit des Prüflings in der Regel zu keinem idealen quadratischen Eindruck mit zwei gleich langen Diagonalen kommt, wird  $d$  folgendermaßen definiert:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (6.2)$$

Zu beachten ist, dass bei einer Längendifferenz zwischen  $d_1$  und  $d_2$  größer 5% die Messung ungültig ist. Des Weiteren müssen Mindestabstände zwischen einzelnen Messpunkten, bzw. zum Probenrand, sowie Mindestdicken von Prüflingen eingehalten werden. Diese Werte sind in Abhängigkeit zur Prüflast der entsprechenden Norm zu entnehmen.

Die Angabe der Prüflast erfolgt in der Regel in einer Gewichtskraft. Möglich sind Werte von HV 0,01 bis HV 100, die im Werkzeugbau üblichen Prüflasten sind 0,05 / 0,1 / 0,5 / 1 / 5 / 10 kg Gewichtskraft. Ist die Dimension des Eindrucks in der Größenordnung der Kristalle oder sehr kleiner Zonen so spricht man von der Bestimmung der Mikrohärtigkeit (Kanani 2007, S. 111).

So wie bei allen Messverfahren unterliegt dieses auch gewissen Wiederholgenauigkeiten welche nach Norm im einstelligen Prozentbereich des Messwertes liegen. Ebenfalls ist bei der Durchführung auf Sauberkeit zu achten, da Schmutzpartikel am Diamanten oder Werkstück das Messergebnis beeinträchtigen können.

Die Auswertung des Verfahrens geschieht entweder manuell durch Vermessung unter einem Lichtmikroskop oder vollautomatisch in einem Messsystem. Zur Auswertung der LMD Schichthärten stehen unter anderem ein Krautkrämer Härteprüfgerät mit einem HV5 Prüfkopf zur Verfügung (siehe Abbildung 65).



Abbildung 65 GE Krautkrämer TIV105 Härteprüfgerät

### 6.2.3 Metallografie – Schichtaufbau

Für die Analyse von LMD - Schichtaufbauten ist die Anfertigung von Querschliffen von sehr hoher Wichtigkeit. Üblicherweise werden Testwerkstücke mittels Trennscheibe zugeschnitten und in einem Polymer eingebettet. Diese Probenkörper werden anschließend plangeschliffen und hochglanzpoliert. Zur Probenfertigung gibt es spezielle Maschinen wie in Abbildung 66 dargestellt.



Abbildung 66 Maschinen zur Probenaufbereitung  
Schneidmaschine (links), Schleif- und Poliermaschine (rechts)

Zur weiteren Untersuchung können die Proben speziell geätzt werden damit unter speziellen Lichtbedingungen im Mikroskop die Gefügestruktur, wie beispielsweise in Abbildung 67 dargestellt, sichtbar wird. Dabei können sowohl Aussagen über geometrische Parameter wie Schichtdicke, Vermischungszone und Wärmeeinflusszone im Grundwerkstoff getroffen, als auch Fehler wie Risse und Poren identifiziert werden. Häufig werden Querschliffproben ebenfalls zur Messung des Härteverlaufs ausgehend vom Grundwerkstoff bis in die Beschichtung herangezogen.

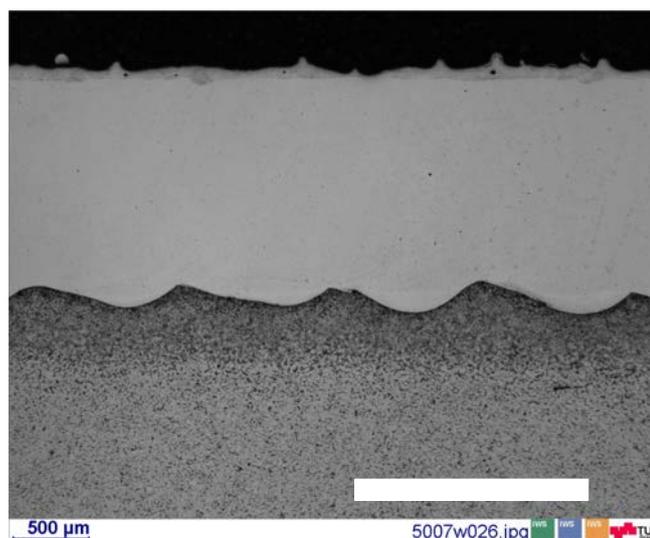


Abbildung 67 Beispiel eines Querschliffes einer LMD Probe  
unten Substrat – oben Beschichtungswerkstoff

Zu beachten ist jedoch auch, dass diese Bewertungsmethode Fehlermöglichkeiten besitzt, da sie nur einen Bereich des Werkstücks darstellt. So sind beispielsweise Fehler nicht sichtbar, wenn sich nicht bis an die Oberfläche des Querschliffes reichen.

#### 6.2.4 Haftfestigkeitsversuch

Eine außerordentlich wichtige Kenngröße einer Beschichtung ist deren Haftungseigenschaft auf dem Substrat. Dies betrifft beim LMD-Prozess sowohl die Haftfestigkeit von artähnlichen, als auch die Verbindung von artfremden Werkstoffverbindungen. Zur ersteren zählen Beschichtungswerkstoffe auf Eisenbasis, zur zweiten zählen Kobalt-, Nickel- oder Kupferbasisbeschichtungen aufgetragen auf eine Stahllegierung. Durch die Ermittlung dieses Kennwertes und dessen Einfluss auf das Gesamtsystem der Beschichtung, wird nicht nur ein mechanischer Kennwert der Übergangszone zwischen Substrat und Beschichtung ermittelt, sondern kann auch eine Aussage über die mechanische Belastbarkeit des LMD Schichtsystems getroffen werden. Aufgrund der unterschiedlichen Legierungsbestandteile und Prozessparameter ist ein allgemein gültiges Vorgehen zur Steigerung der Haftfestigkeit nicht möglich. Daher empfiehlt es sich, Einflussgrößen mithilfe eines phänomenologischen Modells zu ermitteln. Einflussfaktoren für die Haftfestigkeit einer LMD Beschichtung sind:

- Substrat (Werkstoff, Zustand, Vorbehandlung, etc.)
- Beschichtungswerkstoff
- Vorbehandlung (Sandstrahlen, Vorwärmen, etc.)
- Schweißparameter (Vorschub, Laserleistung, Spotdurchmesser, Pulverförderrate, etc.)

Grundsätzlich wird bei LMD-Beschichtungen von Werkzeugteilen für die Umformtechnik eine maximale Haftfestigkeit angestrebt. Aufgrund dieser Anforderung wurde im Lauf dieser Arbeit ein Prüfstand zur quantitativen Ermittlung dieser Eigenschaft entwickelt. Im Bereich der Beschichtungstechnik gibt je nach Werkstoff und Dicke der Beschichtung unterschiedliche Haftfestigkeitsprüfverfahren. Der hier entwickelte Test wurde in Anlehnung an den Ollard Test, welcher von (Kanani 2007, S. 18–19) beschrieben wird, adaptiert.

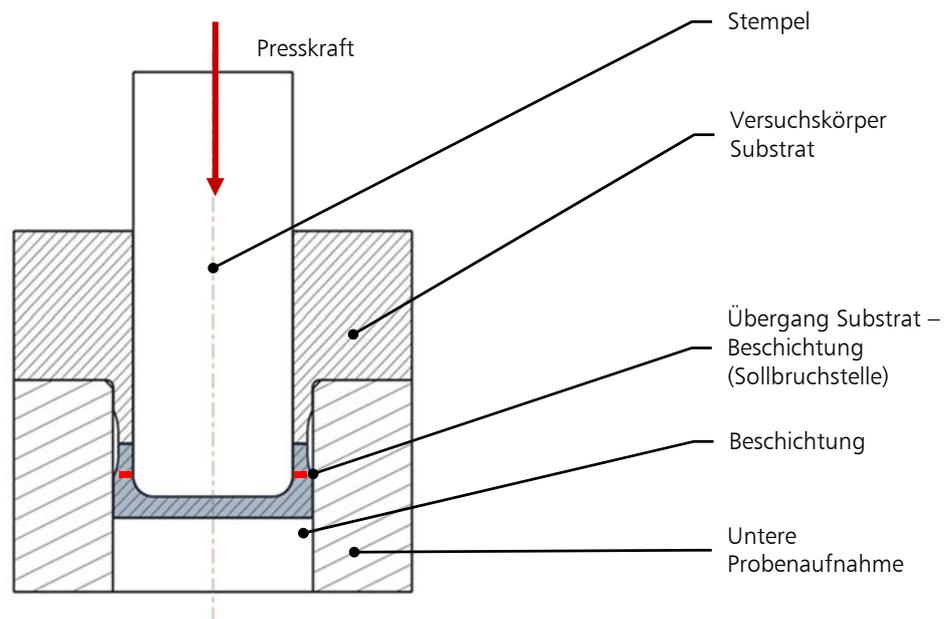


Abbildung 68 Detail Zugprüfversuch zur Ermittlung der Haftfestigkeit von LMD Schichten

Das Versuchsprinzip ist in Abbildung 68 dargestellt. Für den Versuch wird eine geschweißte Probe mittels Hartfräsen für den Zugversuch vorbereitet. Im Bereich der Übergangszone zwischen Substrat und Beschichtung wird der Probenquerschnitt verkleinert, um wie bei der gewöhnlichen Zugprobe, eine Sollbruchstelle zu gewährleisten. Die Übergänge sind möglichst stetig ausgeführt um möglichst einachsige Zugspannungen im Bereich der Bruchstelle zu erzeugen. Je nach Beschichtungswerkstoff und minimaler Beschichtungsdicke kommen drei unterschiedliche Probengeometrien zum Einsatz. Diese sind für Mindestbeschichtungsdicken nach Überfräsen von 1,5mm / 2,0mm / 3,0mm ausgelegt. Eine detaillierte Darstellung findet sich im Anhang. Aufgrund dieser geometrischen Einschränkungen können auch mehrachsige Spannungen entstehen, jedoch ist in jedem Fall ein quantitativer Vergleich der Haftfestigkeit bei gleicher Geometrie möglich. Um eine wirtschaftliche Bearbeitung zu gewährleisten werden standardisierte Probekörper mit 12 Versuchsfeldern vorgefertigt und in die untere Aufnahme eingelegt. Die erforderliche Zugkraft wird beim vorliegenden Versuchstand mit einem von oben drückenden Stempel auf den Probekörper übertragen und stetig bis zum Bruch gesteigert. Die auf den Stempel aufgebrachte Kraft wird direkt am Stempelkopf mittels Kraftmessdose gemessen. Um Reibungsverluste zu minimieren ist dieser mittels Kugelkäfig im Oberwerkzeug gelagert. Während des Versuchs wird der Kraft-Wegverlauf aufgezeichnet und die maximale Kraft vor dem Bruch ausgewertet. Der Gesamtaufbau des Prüfstandes ist in Abbildung 69 dargestellt.

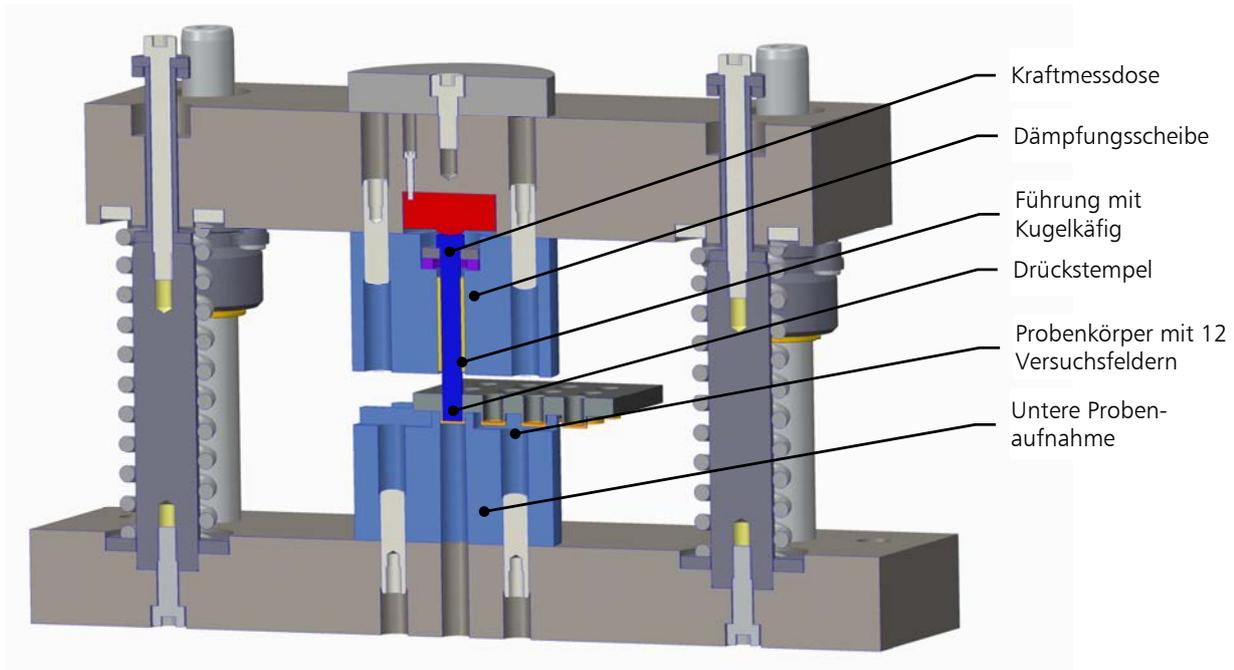


Abbildung 69 Querschnitt des Haftfestigkeitsprüfstand

Das gezogene Profil entspricht dem eines Hohlzylinders, daraus ergibt sich für den Flächenquerschnitt des Prüfkörpers  $A_{PK1}$ :

$$A_{PK1} = \left( \frac{d_a^2 - d_i^2}{4} \right) \cdot \pi \quad (6.3)$$

Hierbei entspricht  $d_a$  dem äußeren Durchmesser und  $d_i$  dem inneren. Mit bekannter Fläche und maximaler Stempelkraft lässt sich auch die Zug-Haftfestigkeit der Beschichtung folgendermaßen abschätzen:

$$\sigma_H = \frac{F_{max}}{A_{PK1}} \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (6.4)$$

Nicht berücksichtigt werden Reibungsverluste durch Körperkontakte zwischen Stempel und Probekörper, bzw. Stempel und Kugelkäfig. Die Auswertung der Messdaten des Prüfverfahrens gibt Aufschluss über die Werkstoffpaarung (Beschichtung/Substrat) und die verwendeten Schweißparameter. In der Regel werden die Ergebnisse untereinander vergleichend interpretiert und damit eine Parameteroptimierung durchgeführt. Der Versuchskörper ist in Abbildung 70 abgebildet. Hierbei ist vor dem Zugversuch der Bereich des reduzierten Querschnittes deutlich erkennbar. Liegt die Bruchzone wie dargestellt in diesem Bereich ist der Versuch gültig.

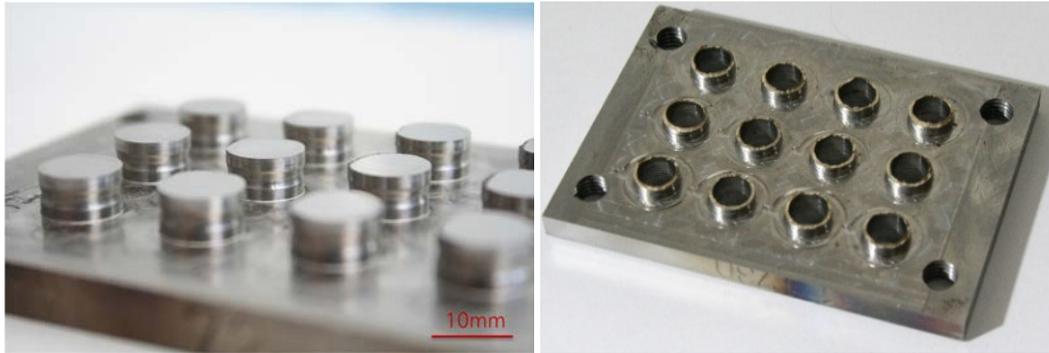


Abbildung 70 Versuchskörper vor und nach Zugversuch

In manchen Fällen ist zu beobachten, dass eine thermische Schädigung des Substratwerkstoffes zu einem Bruch außerhalb der Sollbruchzone, im Bereich größerer Querschnittflächen führt. Liegt dies vor, kann keine gültige Auswertung durchgeführt werden. Das gleiche gilt bei schon durch Risse oder Poren vorgeschädigte Beschichtungen. Allerdings ist hier der erfolgreiche Einsatz einer solchen Beschichtungstechnologie zu hinterfragen.

Wichtig bei der Vorbereitung der Probenkörper ist die Einhaltung der geometrischen Toleranzen um die Streuung der Messergebnisse möglichst gering zu halten. In der Praxis hat sich der Versuchstand als zuverlässige und exakte Methode zur Technologieoptimierung bewährt.

### 6.2.5 Scherfestigkeitsversuch

Analog zum vorigen Versuchsaufbau gibt es die Möglichkeit am selben Versuchstand einen Scherfestigkeitsversuch durchzuführen. Bei diesem wird ein beschichteter Prüfkörper in die Vorrichtung eingespannt und der Übergangsbereich bis zum Materialversagen auf Scherung beansprucht. Das Prinzip und der Aufbau sind in Abbildung 71 und Abbildung 72 dargestellt. Auch hier sind die Querschnittsfläche  $A_{PK2}$  und Scherfestigkeit  $\tau_H$  wie folgt definiert:

$$A_{PK2} = \left(\frac{d^2}{4}\right) \cdot \pi \quad (6.5)$$

$$\tau_H = \frac{F_{max}}{A_{PK2}} \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (6.6)$$

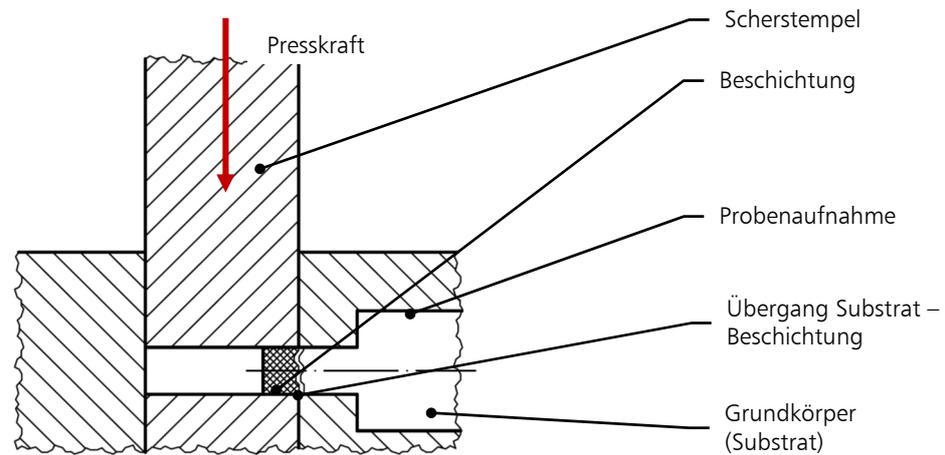


Abbildung 71 Detail Prüfkörper zur Ermittlung der Scherfestigkeit

Der Scherfestigkeitsversuch ist als Ergänzung zu sehen und dient zur Absicherung der Haftfestigkeitsversuche. Sowohl der Fertigungsaufwand, als auch der Versuchsaufwand sind höher als beim Zugversuch. Aufgrund der geometrischen Ausbildung der Trennbruchfläche können ebenfalls Rückschlüsse auf die Beschichtungseigenschaften wie z.B. der Duktilität getroffen werden.

Bei der Fertigung des Prüflings ist auf die Positionierung des Übergangsbereiches zu achten um keine verfälschten Ergebnisse zu erhalten. Ebenfalls ist auf die feste Einspannung während des Scherversuches zu achten.

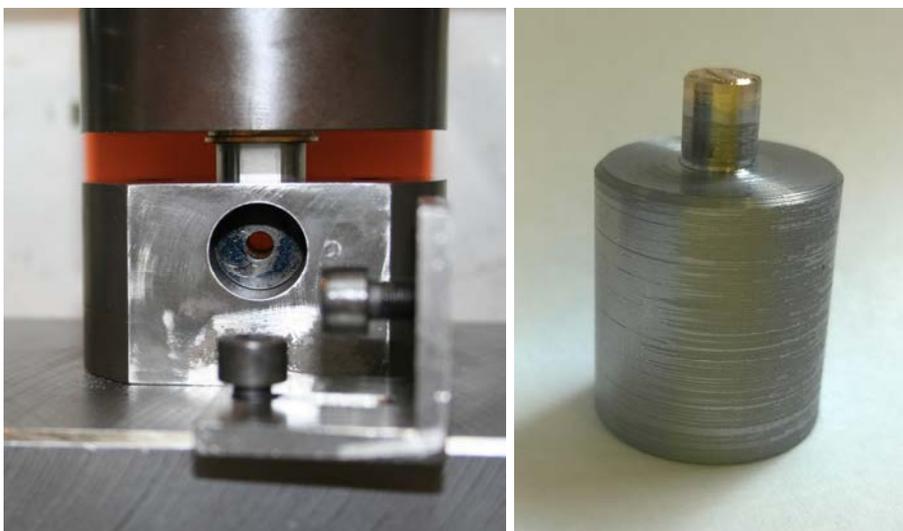


Abbildung 72 Detail Prüfstand für Scherfestigkeit (links)  
Probenkörper für Scherfestigkeit (rechts)

## 6.2.6 Tribometerversuche

Die Bewertung von LMD Schichten hat für einen erfolgreichen Einsatz im Bereich der Umformtechnik auch in tribologischer Hinsicht zu erfolgen. Reibung und Verschleiß sind laut

Czichos und Habig (2010, S. 4–6) komplexe Vorgänge welche einen dissipativen, nichtlinearen und dynamisch-stochastischen Charakter haben. In erster Linie sind die Optimierungsziele wie Lebensdauererlängerung, Wartungsreduzierung und Belastungssteigerung von Interesse. Da die tribologische Bewertung an realen Umformwerkzeugen teuer und in manchen Fällen schwierig ist wurde ein Tribometerprüfstand entwickelt, bei welchem mit einem vereinfachten Modell vergleichbare Aussagen hinsichtlich Verschleiß zwischen LMD-Schichten, Werkzeugwerkstoffen und anderen Beschichtungstechnologien getroffen werden kann. Der klassische Pin-On-Disk Versuch ist für umformtechnische Vorgänge kein geeignetes Ersatzmodell, da der Pin immer wiederkehrend die gleiche Stelle am Gegenkörper berührt und nicht wie beim Umformen nur einmaliger Kontakt stattfindet. Beim vorliegenden Versuch werden durch meanderförmiges Abfahren eines Pins auf einem Blech möglichst realitätsnahe Bedingungen erzeugt.

Für die Verschleißuntersuchungen wird ein Versuchsblech auf einer Basisplatte aufgespannt und mit den gleichen Vorgaben wie bei der Umformung beölt. Auf der Gegenseite wird in einem Spannumodul der Testpin mittels Spannzange gespannt. Bei diesem kann über ein Federmodul die gewünschte Kontaktnormalkraft  $F_N$  eingestellt werden. Der Test findet auf einem CNC Bearbeitungszentrum statt. Durch definiertes Zustellen in Z-Richtung kann die Kontaktnormalkraft verändert werden. Ebenfalls sind Vorschubgeschwindigkeit und Bewegungsmuster frei wählbar. Der Pin kann durch eine innere Wasserkühlung auf konstanter Temperatur gehalten werden. Die einzelnen Komponenten des Tribomoduls sind in Abbildung 73 bezeichnet, der reale Tribometer und die Kontaktschichten am Versuchsblech in Abbildung 74 zu sehen.

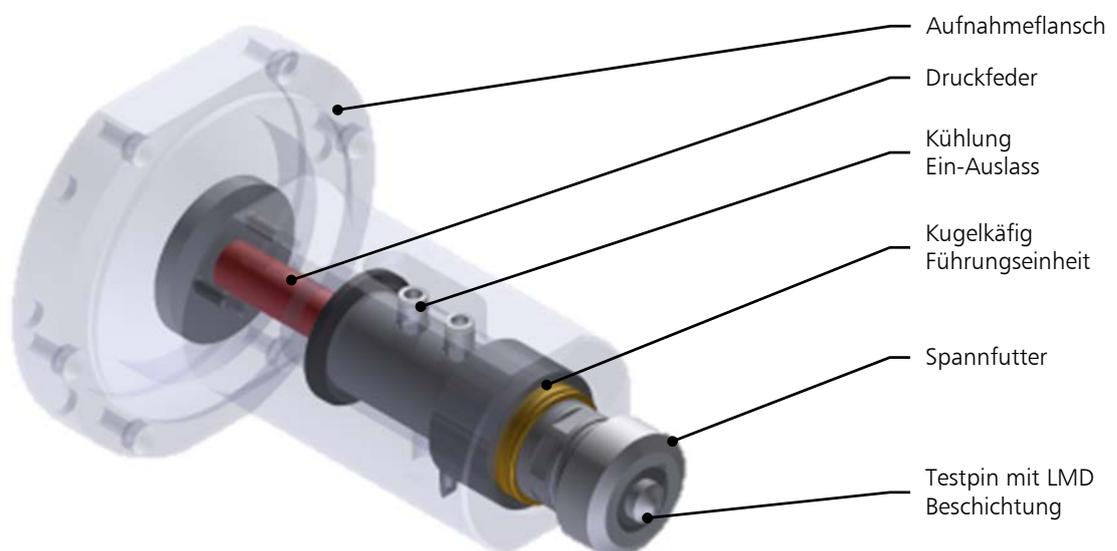


Abbildung 73 Tribomodul für Bearbeitungszentrum

Die erforderliche Anpresskraft errechnet sich aus der gewünschten Flächenpressung  $p_{FL}$  der Kontaktfläche  $A$  wie folgt:

$$F_N = p_{FL} \cdot A \quad (6.7)$$

Üblicherweise ist die Kontaktfläche kreisförmig mit einem Durchmesser von 5mm. Übliche Flächenpressungen liegen zwischen 20 und 50 MPa. Durch die Verkleinerung des Kontaktflächendurchmessers und stärkeren Federn lassen sich Flächenpressungen bis 500 MPa erzielen.



Abbildung 74    Eingespannter Versuchskörper im Tribomodul (links)  
Blechwerkstoff nach Test (rechts)

Die Versuchsauswertung erfolgt mittels Messung des Volumenabtrages pro Beanspruchungsweg ( $W_{V/S}$ ), entweder per Rasterelektronenmikroskop oder durch konfokale optische Vermessung. Je nach Verschleiß und Versuchsdauer ist eine quantitative Erfassung nicht immer möglich. Beim Testen von unterschiedlichen Werkstoffen und Beschichtungen kann jedoch meist eine qualitative Aussage hinsichtlich des tribologischen Verhaltens gemacht werden. Durch die Tribometerversuche wird nicht nur der Verschleiß aufgrund von Volumenabtrag sichtbar, sondern auch andere Effekte wie beispielsweise adhäsive Stoffübergänge zwischen Blechwerkstoff auf den Pinkörper. Die Abbildungen Abbildung 75 und Abbildung 76 zeigen das Beispiel eines Tribometerversuches mit einem CU85 beschichteten Pin welcher mittels sphärischen Wolframkarbiden verstärkt wurde. Als Flächenpressung wurden 50MPa gewählt. Der Pin zeigt nach Versuchsdurchführung einen deutlichen Volumenabtrag. Im Vergleich dazu schneidet ein rein CU85 beschichteter Pin ohne Wolframkarbide besser ab.

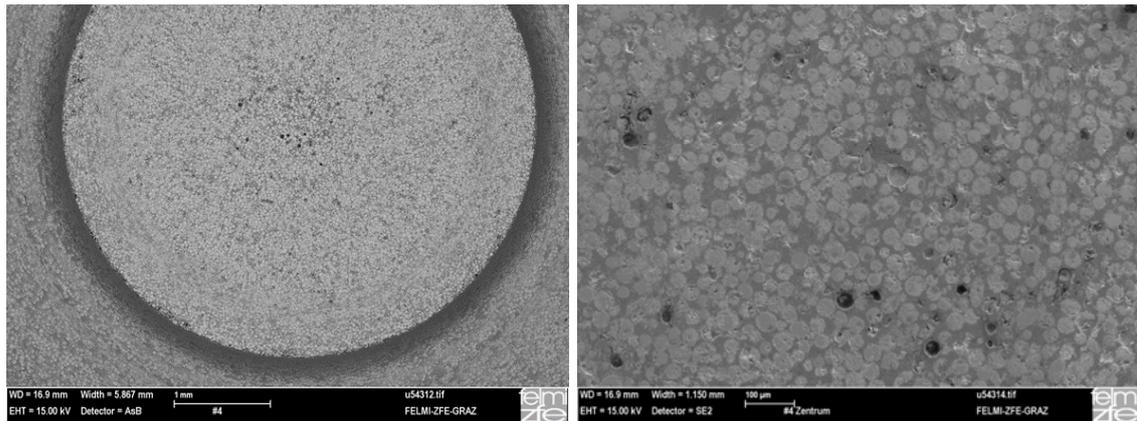


Abbildung 75 Pin mit LMD Beschichtung CU85 mit Wolframkarbiden – vor Triboversuche

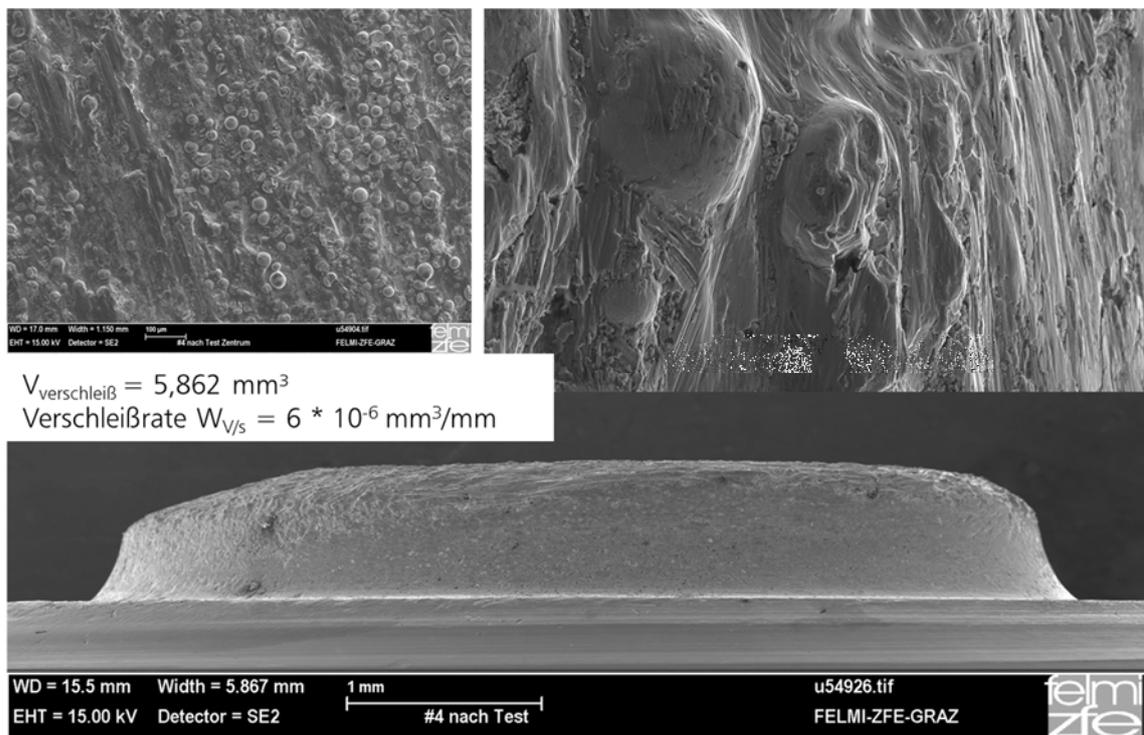


Abbildung 76 Pin mit LMD Beschichtung CU85 mit Wolframkarbiden getestet auf 1.4301 Blech nach Triboversuch



---

## 7 Parameteroptimierung von LMD Schichten

Unter einer LMD Beschichtung wird im Allgemeinen das Gesamtsystem von Substrat, Beschichtungswerkstoff und eventuell eingearbeitete Pufferwerkstoffe oder Hartstoffpartikel betrachtet. Für deren Einsatz am Werkzeug sind Qualitätskriterien zu definieren. Die in dieser Arbeit betrachteten Eigenschaften sind Fehler oder Defekte, die Härte der Beschichtung, die Haftfestigkeit und die tribologischen Verschleißigenschaften der Schicht mit seinem Kontaktpartner bei ausgewählten Anwendungsfällen.

Der Schweißparameterbereich, in dem ein stabiler Beschichtungsprozess mit den geforderten Qualitätsmerkmalen stattfindet, wird als Prozessfenster bezeichnet (Hügel und Graf 2009, S. 262–263). Bei Überschreiten der Grenzen eines stabilen Prozessfensters muss mit Qualitätsmängeln gerechnet werden. Um im industriellen Einsatz stabile Ergebnisse zu erzielen ist zudem ein ausreichender Sicherheitsabstand empfehlenswert um natürliche Schwankungsbreiten abzusichern.

Gerade beim Laserauftragschweißen ist eine sehr große Anzahl von möglichen Einstellparametern für das erzielte Beschichtungsergebnis verantwortlich. Daher ist es von hoher Wichtigkeit nach einigen Erstversuchen, Entscheidungen zu treffen, welche Parameter konstant definiert und welche stufenweise ausgetestet werden. Hierbei spielt zunächst die Erfahrung über das LMD Verfahren eine wichtige Rolle. Ein geschulter Blick kann helfen nach ersten Beschichtungsversuchen eine erste Eingrenzung des Parametersatzes durchzuführen. Bei vielen Beschichtungssystemen liegt danach jedoch noch ein erhebliches Verbesserungspotential hinsichtlich der Qualitätsmerkmale vor. Im Prinzip wird eine Suche nach dem Optimum innerhalb des Prozessfensters angestrebt um maximale Qualitätseigenschaften zu erhalten. Dieser Bereich muss nicht zwangsweise in der gedachten Mitte des Prozessfensters liegen.

Üblicherweise liegen beim LMD Verfahren nach Festlegung von einigen fixierten Parametern, noch drei bis sieben stufenweise variierbare Parameter vor, die einen Einfluss auf das Ergebnis haben können. Testet man all diese Kombinationen in einem vollfaktoriellen Versuchsplan kommt man schnell zu einer sehr hohen Anzahl von Versuchen. Beispielsweise ergibt sich bei sieben Parametern auf zwei Stufen getestet, eine Versuchsmatrix von  $2^7=128$  Versuchen, ohne Wiederholungen. Dieser Aufwand ist bei den meist sehr unterschiedlichen Anwendungsfällen nicht gerechtfertigt. Deshalb ist es von Vorteil durch geeignetes Parameterscreening die Stellschrauben mit den größten Effekten zu ermitteln. Ein geeignetes Werkzeug stellt hier die statistische Versuchsplanung (DoE) dar. Mithilfe dieses Instrumentes ist es möglich mit wenigen Versuchen die einflussreichsten Faktoren zu lokalisieren. Im Anschluss darauf kann eine gezielte Durchführung einer verkleinerten Versuchsmatrix mit den identifizierten Faktoren helfen das gewünschte Optimum zu erreichen. Die meist zwei bis drei verbleibenden Faktoren ergeben bei zweistufigem Verstellen nur mehr  $2^2$  oder  $2^3$  Versuche ohne Wiederholungen. Durch diese Methode sind rasche Parameteroptimierungen mit verhältnismäßig wenig betriebenen Aufwand möglich.

## 7.1 Evaluierung der LMD Prozessparameter

Beim LMD-Schweißprozess gibt es eine Vielzahl von Einflussfaktoren die das Beschichtungsergebnis beeinflussen können. Diese sind in Abbildung 77 dargestellt. Viele dieser Faktoren definieren sich aufgrund der Versuchskonfiguration, wie beispielsweise Substrat und Beschichtungswerkstoff. Bei vielen Faktoren liegen sehr gute Erfahrungswerte vor wie beispielsweise bei der Flächenvorbehandlung durch Sandstrahlen oder Gasflussparameter. Die Auswirkung einiger Prozessparameter muss jedoch von Fall zu Fall untersucht werden um optimale Ergebnisse zu erreichen.

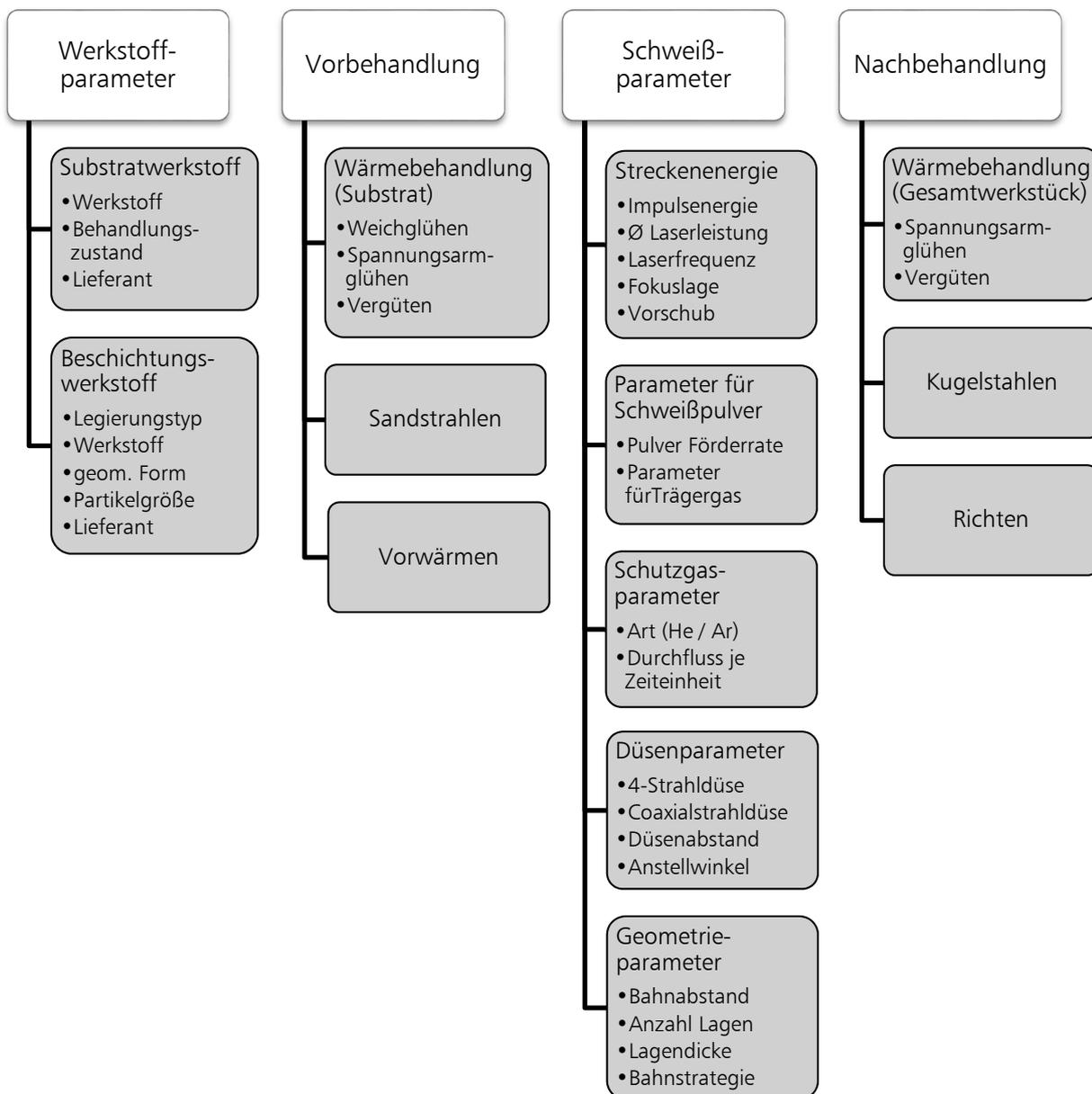


Abbildung 77 Einfließende Prozessparameter beim Laserauftragschweißen

### 7.1.1 Beschreibung der getesteten Einstellparameter

Im Laufe der Arbeit wurden unterschiedlichste Einstellungen der Parameter getestet und evaluiert. Bei vielen wurde aufgrund der gewonnenen Erfahrung und technisch üblichen Praxis die Festlegung auf einen Wert getroffen. Beispiel ist die Art und Weise der Probenvorbereitung durch Sandstrahlen der Substratoberfläche vor dem Beschichtungsprozess. Des Weiteren haben sich die Gasflussparameter in den bewährten Größenordnungen bestätigt und wurden nicht nennenswert verändert. Auch wurde der optimale Düsenabstand (Stand off) einmalig vermessen und als fixer Wert bestimmt. Betrachtet man jedoch die vorher beschriebenen Qualitätsmerkmale einer LMD Schicht, so gibt es viele weitere signifikante Einflussfaktoren. Die wesentlichen wurden in unterschiedlichen Versuchsplänen getestet um ein optimiertes Beschichtungsergebnis zu erhalten und werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

#### **Werkstoffkombination Substrat/Beschichtung**

Die Werkstoffkombination zwischen Substrat und Beschichtung ist wohl der Faktor mit dem größten Einfluss. So wurde in vielen Versuchen beobachtet, dass es auf die jeweilige Werkstoffkombination ankommt und nicht Pauschalaussagen über einen besser oder schlechter zu verarbeitenden Substrat- oder Beschichtungswerkstoff getroffen werden können. Die Werkstoffwahl wird sehr stark aus den technischen Anforderungen des gewünschten Produktes definiert. Oftmals sind jedoch auch fixe Vorgaben zu prüfen. Im Anhang finden sich eine Zusammenstellung der in dieser Arbeit getesteten Substrat- und Beschichtungswerkstoffe.

#### **Vorwärmen des Substrates**

Der bereits aus der klassischen Schweißtechnik bekannte Einflussfaktor Vorwärmen spielt beim Laserauftragschweißen ebenfalls eine wichtige Rolle. Durch Vorwärmen reduzieren sich im Allgemeinen die thermisch induzierten Eigenspannungen, sodass das Risiko von Spannungsrissen reduziert werden kann. Auf der anderen Seite kann es durch das Vorwärmen zur thermischen Schädigung des Substrates kommen und die Übergangszone negativ schädigen. Der Einfluss ist im Einzelfall abzuklären.

#### **Laserleistung**

Bei der für die Beschichtung eingestellten Laserleistung handelt es sich um einen gemittelten Wert über die einzelnen Laserpulse. Dieser Wert wird aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel so groß wie möglich gesetzt um größtmögliche Auftragsraten zu erreichen. In manchen Fällen muss aufgrund des hohen Energieeintrages die Leistung herabgesetzt werden. Dies ist vor allem beim Laserschweißen in der Nähe von Ecken und Kanten des Werkstückes oder bei sehr leistungsempfindlichen Beschichtungswerkstoffen der Fall. Die maximale Laserleistung der Versuchsanlage beträgt 3,2 kW.

#### **Fokusverschiebung / Änderung der Leistungsdichte**

Die Fokusslage kann durch einen adaptiven Spiegel verändert werden und die Größe des Strahldurchmessers definieren. Letztendlich wird dadurch die gemittelte Leistungsdichte oder

Intensität festgelegt welche bei der CO<sub>2</sub> Laseranlage in der Größenordnung von 25 – 150 kW/cm<sup>2</sup> liegt.

### **Pulsfrequenz**

Bei der vorliegenden Anlage besteht die Möglichkeit die Pulsfrequenz zwischen 100 Hz – 100 kHz zu wählen, wobei der obere Wert als cw-Mode angesehen werden kann. Die Pulsfrequenz kann die Schmelzbadströmung und damit das Beschichtungsergebnis beeinflussen.

### **Bahnvorschub**

Der Bahnvorschub ist ein Regelparameter. Er hängt im direkten Zusammenhang mit Größen wie Streckenenergie, Auftragshöhe und Abkühlgeschwindigkeit. Je nach Applikation sind dadurch die getesteten Qualitätsmerkmale wesentlich zu beeinflussen, sodass dieser Parameter in den meisten Versuchsplänen variiert wird. Übliche Vorschubgeschwindigkeiten liegen zwischen 100 – 1000 mm/min.

### **Pulverförderrate**

Die Zuführung der Menge des Beschichtungswerkstoffes pro Zeiteinheit wird über die Pulverförderrate bestimmt. Auch sie bestimmt wesentliche Eigenschaften wie die Größe der Vermischungszone, der Schweißlinienbreite und –höhe bzw. das Aspektverhältnis. Typische Werte an der Versuchsanlage liegen zwischen 4 – 12 g/min. Da an der Anlage der eigentliche Regelparameter die Drehzahl der Förderwelle ist, muss zu Beginn eine genaue Vermessung bei jedem Schweißpulver durchgeführt werden.

### **Bahnabstand zwischen Schweißlinien**

Der Beschichtungsprozess beim LMD-Verfahren erfolgt durch das meanderförmige Abzeilen von einzelnen Linien. Dadurch ergibt sich die für dieses Verfahren typische wellige Oberflächentopografie. Des Weiteren sind auch andere wesentliche Merkmale wie die Höhe der einzelnen Beschichtungslagen durch den Bahnabstand bestimmt. Zur Festlegung dieses Parameters wird zunächst die Breite einer einzelnen Schweißlinie bestimmt. In der Regel wird mit einem Bahnüberlappungsgrad der einzelnen Schweißraupen zwischen 30 % - 70 % gearbeitet aus der sich der Bahnabstand berechnet. Dieser Wert muss ebenfalls in den meisten Anwendungsfällen optimiert werden.

### **Anzahl der Schweißlagen**

Durch die Anzahl der Schweißlagen ergibt sich eine resultierende Beschichtungsdicke. Diese kann jedoch abhängig vom Beschichtungswerkstoff nur ein gewisses Maß erreichen. Wird dieser Wert überschritten kann es zu Spannungsrissen oder Delamination der Beschichtung führen. Die erzielbare Beschichtungsdicke muss bei der Auslegung des gesamten Beschichtungssystems und der Bauteilkonstruktion mit berücksichtigt werden. Übliche Werte betragen zwischen 0,5 mm und 4 mm. Daraus ergibt sich auch die notwendige Anzahl der Schweißlagen.

### 7.1.2 Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der Schweißparameter

Ausgehend von den vorher beschriebenen Einstellparametern ergeben sich einige Abhängigkeiten die bei der Erstellung von Versuchsplänen berücksichtigt werden müssen. Durch die kombinierte Betrachtung von einzelnen Parametern ist eine bessere Betrachtung des Einfluss-/Ursachen-Zusammenhangs möglich. Ocelík et al. (2007) haben bereits die gegenseitige Abhängigkeit von Laserleistung, Bahnvorschub und Pulverfördertrate auf die geometrischen Eigenschaften des Querschnitts einer einzelnen Schweißlinie dargestellt. Aus diesem Grund werden auch folgende Einstellparameter zu weiteren Schweißparametern zusammengefasst. Diese dienen in der vorliegenden Arbeit nicht für exakte numerische Betrachtungen, sondern vielmehr um das phänomenologische Modell des Beschichtungssystems besser zu verstehen.

#### Sreckenenergie

Die Streckenergie ist definiert durch den eingebrachten Energieanteil pro Wegeinheit. Sowohl beim klassischen Lichtbogenschweißen, als auch beim Laserschweißen kann nicht davon ausgegangen werden, dass die gesamte aufgewendete Energie ins Schmelzbad eingetragen wird. Beim Laser sind es vor allem Reflektionsverluste die berücksichtigt werden müssen. So kann die Streckenergie aus der absorbierten Leistung und dem Vorschub definiert werden:

$$E_S = \frac{P_{abs}}{v} \quad \left[ \frac{Ws}{m} \right] = \left[ \frac{J}{m} \right] \quad (7.1)$$

#### Pulver-Weg-Rate

Die Pulver-Weg-Rate hat einen entscheidenden Einfluss auf die geometrische Ausbildung des Schweißlinienquerschnittes. Sie bestimmt die Höhe, Breite und Querschnittsfläche  $A_C$  auf der einen Seite, aber auch die Größe der Vermischungszone  $A_B$  wird beeinflusst. Die Ursache liegt in der absorbierten Energieverteilung zwischen Substrat und Beschichtungswerkstoff. Wird die Pulver-Weg-Rate erhöht wird der Energieanteil für das Aufschmelzen vom Schweißzusatz ebenfalls erhöht und der Energieanteil für das Aufschmelzen des Substrates verringert. Die Berechnung erfolgt aus der Pulverfördertrate und dem Vorschub wie folgt:

$$F_{Ps} = \frac{F_P}{v} \quad \left[ \frac{g}{mm} \right] \quad (7.2)$$

### 7.1.3 Entwicklung standardisierter Tests

Zur schnellen Generierung von Versuchsplänen für spezifische Beschichtungssysteme ist eine Standardisierung von Vorteil. Als erster Schritt wurde ein Standard-Probenkörper mit den Abmessungen 98x65x10mm festgelegt mit welchem die unterschiedlichsten Schweißversuche durchgeführt werden können. Das hat nicht nur den Vorteil mit Makroprogrammen relativ schnell unterschiedliche Schweißparameter testen zu können, sondern es wird auch die nachfolgende Bearbeitung und Analyse durch gleiche oder ähnliche Versuchsabfolgen beschleunigt. Die Flachprobe steht sowohl für erste Linienversuche, als auch für Flächenversuche und den Haftfestigkeitsversuchen zur Verfügung. Sie kann mit vier Schrauben auf der Spannbasis oder der

Heizplatte fixiert werden. Dieselben Schraubenbohrungen dienen ebenfalls zur Aufnahme bei der anschließenden Weiterbearbeitung, wie zum Beispiel Fräsen.

### 7.1.3.1 Linienversuch

Wird eine neue zu beschichtende Werkstoffkombination getestet, ist es sinnvoll Erstversuche durch Schweißen einzelner Linien durchzuführen. Auf einem Flachprobenkörper können 16 Linienversuche mit unterschiedlich variierten Einstellparametern durchgeführt werden (s. Abbildung 78).



Abbildung 78 Standardisierte Linienprobe für 16 unterschiedliche Schweißparameter zur Evaluierung

Getestet werden in der Regel Einstellungen wie Pulverförderrate, Laserleistung, Fokusslage und Vorschubgeschwindigkeit. Durch Parametervariation werden unterschiedliche Querschnittsprofile wie beispielsweise in Abbildung 79 dargestellt erzeugt, welche unter dem Mikroskop vermessen und ausgewertet werden können. Hierbei wird die Breite  $b$  und Höhe  $h_1$  der Raupengeometrie gemessen. Daraus kann das Aspektverhältnis der Liniennaht wie folgt berechnet werden:

$$A_N = \frac{h_1}{b} \quad (7.3)$$

Üblicherweise liegt dieses abhängig von der Werkstoffkombination zwischen 20 % und 60 %. Des Weiteren können auch der Benetzungs- oder Kontaktwinkel  $\theta$  sowie die Einbrandtiefe  $h_2$  und die Größe der Vermischungsfläche  $A_B$  ermittelt werden. Sind alle Werte bekannt kann der Vermischungsgrad  $D_C$  ermittelt werden.

$$D_C = \frac{A_B}{A_B + A_C} \quad (7.4)$$

Grundsätzlich sollte der Vermischungsgrad der Beschichtung so gering wie möglich ausfallen, was aber das Risiko einer schlechten Anhaftung birgt. Laut Hofman et al. (2011) sind Werte zwischen 2 % - 10 % tolerierbar.

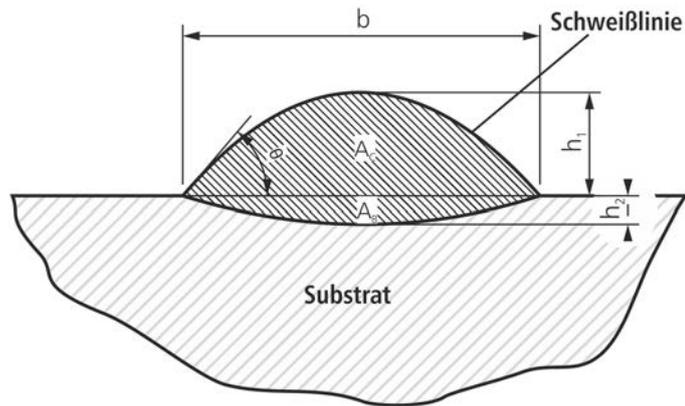


Abbildung 79 Geometriegrößen des Querschnitts einer Linienraupe

Die ersten Querschliffe dienen ebenfalls dazu um Poren oder andere Fehler zu detektieren. Nach Auswertung der geometrischen Größen kann eine Berechnung des Bahnabstandes für Flächenversuche erfolgen.

### 7.1.3.2 4-Flächenversuch

Zunächst sind zur Parameterverifizierung Flächenversuche notwendig. Auf der Standardprobe werden 4 Flächen angeordnet. Mittels variablen CNC Programm sind auch hier die Einstellparameter jeder einzelnen Fläche individuell editierbar. Wird in mehreren Lagen aufgeschweißt wird die darunterliegende nicht vollständig überdeckt, sodass eine bessere Analyse der Technologie erfolgen kann (s. Abbildung 80).



Abbildung 80 Flächenversuche auf Standardprobenkörper mit unterschiedlichen Parametern (Ferro55 auf 1.7131 zwei Lagen)

Durch geeignete Variation kann mit diesem Versuch die Suche nach dem Prozessfenster sehr stark eingengt werden. Die Proben werden mittels Farbeindringprüfung auf Risse und Poren getestet. Hergestellte Querschliffe zeigen die geometrischen Größen des Profils und eventuelle Fehler wie

Poren oder Anbindungsdefekte. Die Querschliffe eignen sich ebenfalls sehr gut um einen Härteverlauf von Substrat und Beschichtungswerkstoff zu erstellen.

### 7.1.3.3 12-Flächenversuch

Zum Test der Beschichtungshaftfestigkeit bzw. Härte als Qualitätsmerkmale wird der gleiche Probenkörper mit 12 Beschichtungsflächen beschichtet (s. Abbildung 81). Die Härte wird an der Oberseite der 12 Flächenproben ermittelt. Da diese Fläche bereits in der zweiten bis vierten Schweißlage liegt wird die Härte als substratunabhängig angenommen, da es hier zu keiner Vermischung mit dem Substratwerkstoff kommt. Nicht so verhält es sich beim Haftfestigkeitsversuch. Hier wird speziell der Übergangsbereich zwischen Substrat und Beschichtung getestet.

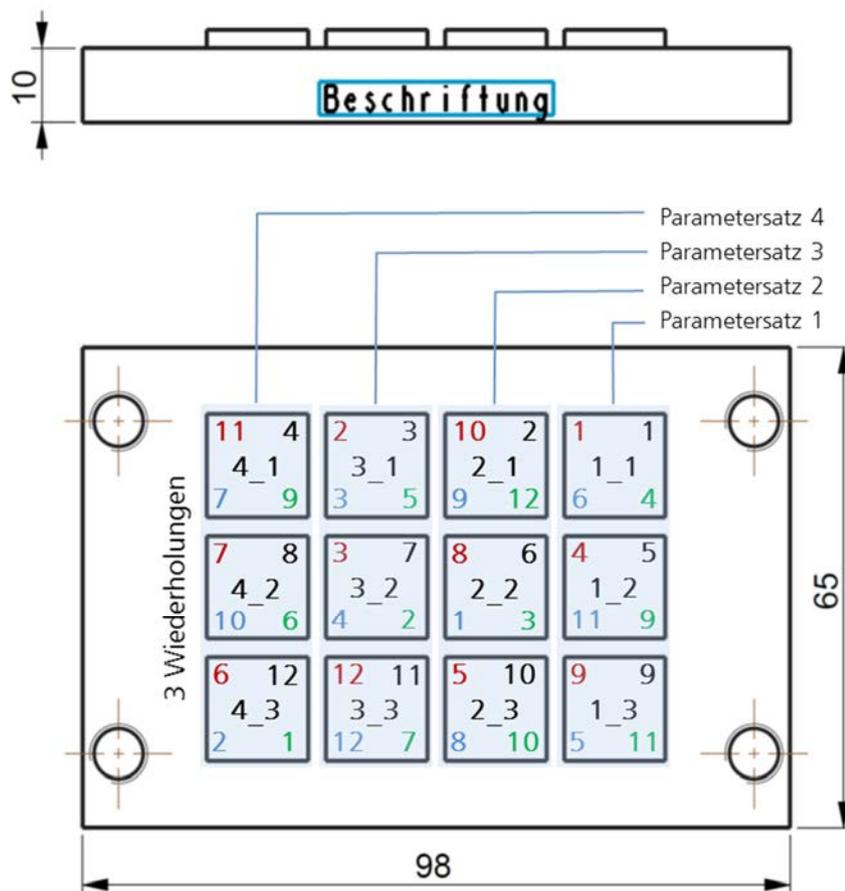


Abbildung 81 12 Versuchsflächen auf standardisierter Probe – 4 Parametersätze à 3 Wiederholungen

Pro Probe werden vier Parametersätze mit je drei Wiederholungen beschichtet. In der Mitte der Fläche ist der Flächenindex sichtbar. In den Eckenpositionen der einzelnen Beschichtungsflächen stehen farbig unterschiedlich markiert mehrere zufällige Schweißreihenfolgen im CNC Programm zur Verfügung. Dies ist wichtig um einen für die statistische Versuchsplanung randomisierten

Versuchsablauf zu gewährleisten. Je nach Werkstoffkombination sind nicht beliebig große Beschichtungshöhen zu erreichen, weshalb drei unterschiedliche Versionen mit minimalen Schichtdicken von 3,0/2,5/1,0 mm definiert wurden. Die Detailzeichnungen hierfür sind im Anhang ersichtlich. Die Probe wird nach dem LMD Prozess mittels fräsen beidseitig zur Endgeometrie fertig bearbeitet.

## 7.2 Parameteroptimierung mittels DoE

### 7.2.1 Grundlegendes zur statistischen Versuchsplanung

Bei der Analyse von Beschichtungssystemen gibt es grundsätzlich zwei Methoden diese zu bewerten. Mittels numerischer Methoden kann ein analytisches Modell erstellt und ausgewertet werden. Mit Hilfe von diesem Verfahren können Systeme am genauesten beschrieben und verstanden werden. Voraussetzung hierfür ist, dass in einem komplexen System alle Faktoren erkannt und die Eingangsdaten vorhanden sind. Oftmals sind genau diese Daten nicht vorhanden, oder können nur mit erheblichen Aufwand ermittelt werden. Die zweite Möglichkeit besteht in der Erstellung eines phänomenologischen Modells, das zwar die physikalischen Zusammenhänge nicht erklären kann, jedoch auch eine beschreibende Gleichung zur Quantifizierung des Einflusses von Faktoren auf ein Qualitätsmerkmal liefert. Mit dieser Methode wird in der statistischen Versuchsplanung (DoE) gearbeitet. Ziel dieser ist es, Haupt- und Wechselwirkungseffekte zu erkennen und deren Auswirkung auf ein Qualitätsmerkmal zu beschreiben. In der Regel wird mit einem linearen Beschreibungsmodell gearbeitet, welches laut Siebertz et al. (2010, S. 21–24) im praktischen Einsatz erstaunlich leistungsfähig und wie folgt begründet wird:

1. Die Strategie der DoE ist es die Wirkung vieler Faktoren möglichst einfach zu beschreiben und nicht wie andere Methoden, die wenige Faktoren und deren Einfluss möglichst komplex formulieren. In der Regel ist die maximal zulässige Anzahl von Modellkonstanten beschränkt durch die in der Praxis mögliche Anzahl von Versuchsläufen. Deshalb sind einfache Modelle effektiver in der Anwendung.
2. Das lineare Beschreibungsmodell besitzt nicht die Exaktheit eines nichtlinearen Modells, jedoch ist bei kleinen Stufenabständen das Ergebnis ausreichend gut.
3. Wechselwirkungseffekte spielen bei vielen technischen Systemen eine große Rolle und sind daher dominanter als das nichtlineare Effektverhalten einzustufen.
4. Das lineare Modell eignet sich sehr gut um das Systemverhalten anschaulich darzustellen.

Das lineare Beschreibungsmodell mit beliebig vielen Faktoren und Haupt- bzw. Zweifachwechselwirkungseffekten kann wie folgt beschrieben werden, wobei  $y$  das Qualitätsmerkmal,  $x$  die Eingangsgrößen,  $c$  die Modellkonstanten und  $\varepsilon$  die Abweichung darstellt:

$$y = c_0 + \sum_{i=1}^{n_f} c_i x_i + \sum_{i=1}^{n_f-1} \sum_{j=i+1}^{n_f} c_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (7.5)$$

Soll durch vorliegende Ergebnisse eines Versuchsplanes eine Vorhersage eines Qualitätsmerkmals  $\hat{y}$  getroffen werden kann dies am Beispiel eines Versuchsplanes mit drei Faktoren (A,B,C) wie folgt beschrieben werden:

$$\hat{y} = \bar{y} + \frac{E_A}{2} x_1 + \frac{E_B}{2} x_2 + \frac{E_C}{2} x_3 + \frac{E_{AB}}{2} x_1 x_2 + \frac{E_{AC}}{2} x_1 x_3 + \frac{E_{BC}}{2} x_2 x_3 \quad (7.6)$$

$\bar{y}$  stellt hier den Gesamtmittelwert aller Messungen dar, E die Effekte. Diese müssen durch 2 dividiert werden, da üblicherweise die Faktoren die normierten Werte -1 und +1 durchlaufen was einer Stufenbreite von 2 entspricht. Die Konstanten haben die physikalische Einheit des Qualitätsmerkmals.

Durch steigende Zahl der untersuchten Faktoren nimmt die Anzahl der Modellkonstanten ebenfalls zu. Sollen dabei alle Wechselwirkungseffekte berücksichtigt werden, ist ein vollfaktorieller Versuchsplan durchzuführen. Dies kann die Anzahl der durchzuführenden Versuche schnell in eine Dimension erhöhen, die in der Praxis nicht realisierbar ist. Aus diesem Grund wird in der Praxis das Modell aufgrund von Annahmen vereinfacht. Durch Vermengung, einem systematischen Überlagern von wesentlichen Effekten und unwesentlichen Wechselwirkungseffekten kann eine Reduzierung der zu bestimmenden Modellkonstanten und der notwendigen Versuchsanzahl erzielt werden. In der Regel sind Zweifachwechselwirkungen technisch relevant, Drei- und Mehrfachwechselwirkungen jedoch bereits deutlich weniger wahrscheinlich. Aus diesem Grund können deren Effekte oft als vernachlässigbar betrachtet werden.

Eine praktikable Methode ist mit teilfaktoriellen Versuchsplänen erstes Screenings der Faktoren bzw. Parameter durchzuführen und im Anschluss die Auflösung der Pläne stufenweise zu erhöhen. Teilfaktorielle Versuchspläne mit Auflösung III, IV und V werden am häufigsten eingesetzt und sind in Tabelle 10 dargestellt. Bei Plänen mit geringer Auflösung kommt es zur rechnerischen Vermengungen zwischen Haupt- und Wechselwirkungseffekten. Das heißt, dass ein auftretender Effekt entweder einem Hauptfaktor oder einer Wechselwirkung von zwei Faktoren zugrunde liegt, eine mathematische Zuordnung jedoch nicht möglich ist. Je höher die Auflösung gewählt wird umso weniger treten Vermengungen unter Mehrfachwechselwirkungen in den mathematischen Termen auf. Hierdurch wird jedoch eine höhere Anzahl von Versuchen benötigt. Eine Zusammenstellung von unterschiedlichen Zweistufen-Versuchspläne und deren Zusammenhang zwischen Anzahl der Faktoren und der benötigten Anzahl von Versuchen ist in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 10 Gegenüberstellung Teilfaktorieller Versuchspläne in den Auflösungsstufen III, IV und V

Auflösung III	Haupteffekte weisen keine Aliasstruktur zu anderen Haupteffekten, jedoch eine Aliasstruktur zu Zweifachwechselwirkungen auf.	Zweifachwechselwirkungen und höhere werden vernachlässigt
Auflösung IV	Haupteffekte weisen keine Aliasstruktur anderen Haupteffekten oder Zweifachwechselwirkungen auf, einige Zweifachwechselwirkungen weisen jedoch eine Aliasstruktur zu anderen Zweifachwechselwirkungen auf, und Haupteffekte weisen eine Aliasstruktur mit Dreifachwechselwirkungen auf.	Dreifachwechselwirkungen und höhere werden vernachlässigt
Auflösung V	Haupteffekte oder Zweifachwechselwirkungen weisen keine Aliasstruktur zu anderen Haupteffekten oder Zweifachwechselwirkungen auf, Zweifachwechselwirkungen weisen jedoch eine Aliasstruktur zu Dreifachwechselwirkungen auf, und Haupteffekte weisen eine Aliasstruktur mit Vierfachwechselwirkungen auf.	Dreifachwechselwirkungen und höhere werden vernachlässigt

Das Risiko bei Versuchsplänen mit der Auflösung III eine fehlerhafte Betrachtung zu machen ist bei vielen technischen Anwendungen zwar gegeben, trotzdem macht die Anwendung solcher Pläne durchaus Sinn. In der Regel bietet sich diese Methode sehr gut für ein erstes Parameterscreening an. In weiterer Folge sollte zur Verifizierung der Effekte auf Versuchspläne mit der Auflösung IV oder V zurückgegriffen werden um eine Verifizierung durchzuführen. Um den Versuchsaufwand hierbei vertretbar zu gestalten werden Faktoren aus dem ersten Versuchsdurchlauf mit einem mutmaßlich geringen Effekt auf das geforderte Qualitätsmerkmal nicht mehr variiert sondern als konstant festgelegt. Die Wahrscheinlichkeit, dass es bei einem Versuchsplan tatsächlich Drei- oder Mehrfachwechselwirkungen im beobachteten System vorhanden sind ist sehr klein. Deshalb kann bei einer Versuchswiederholung und einem Plan der Auflösung V mit einer hohen Sicherheit ein Effekt bestätigt oder verworfen werden. Ist eine noch höhere Konfidenz erforderlich, bzw. lassen sich Effekte nicht ausreichend sicher beschreiben, kann durch Wiederholung mittels eines vollfaktoriellen  $2^k$  Versuchsplanes eine weitere statistische Absicherung durchgeführt werden. Auch beim Übergang zum vollständigen Versuchsplan wird in der Regel die Anzahl der variierten Faktoren reduziert um eine vertretbare Anzahl von Gesamtversuchen zu haben.

Tabelle 11 Anzahl der Versuche in Abhängigkeit vom Versuchsplan und Anzahl der Faktoren (2-stufig) Darstellung nach Gundlach (2004, S. 75)

Anzahl der Faktoren	2	3	4	5	6	7	8	9
Versuchspläne								
Vollständige $2^k$ -Faktoren- versuchspläne	4	8	16	32	64	128	256	512
$2^{k-p}$ -Teilfaktorenversuchspläne Auflösung III	-	4	-	8	8	8	-	16
$2^{k-p}$ -Teilfaktorenversuchspläne Auflösung IV	-	-	8	-	16	16	16	32
$2^{k-p}$ -Teilfaktorenversuchspläne Auflösung V	-	-	-	16	-	-	64	-
$2^{k-p}$ -Teilfaktorenversuchspläne Auflösung VI	-	-	-	-	32	-	-	128
Plackett-Burman-Versuchspläne Auflösung III	3	4	5	6	7	8	9	10
Box-Behnken-Versuchspläne	-	15	27	46	54	62	-	-

Bei der Anwendung der statistischen Versuchsplanung sind folgende Grundregeln zu beachten (Scheffler 1997, Gundlach 2004, Siebertz et al. 2010):

- *Replikation* der einzelnen Versuchspunkte um Streuung und Fehler besser erfassen zu können. Grundsätzlich sind Mittelwerte sicherer als Einzelwerte. Es ist wichtig das die Wiederholungen nicht hintereinander gereiht durchgeführt werden sondern innerhalb des gesamten Versuchsablaufes zufällig angeordnet geschieht um beispielsweise zeitliche Effekte zu vermeiden.
- *Randomisieren* der Versuchsreihenfolge um bekannte und unbekannte Fehler aufgrund von temporär vorhandenen Störgrößen oder zeitlichen Trends zu minimieren.
- *Blockbildung* der Versuchsreihenfolge um bekannte und unbekannte Fehler aufgrund von Störgrößen wie beispielsweise Chargenschwankungen oder Trends zu minimieren. Der Ablauf der Versuchsblöcke erfolgt gereiht, innerhalb eines Blockes wird die Reihenfolge randomisiert festgelegt.
- *Symmetrie* der Versuchspunkte bedeutet den gleichen Abstand zwischen den Faktoren festzulegen um die Auswertung einfach zu gestalten und Ergebnisse besser interpretieren zu können.
- *Orthogonalität* des Versuchsplanes um einen ausgewogenen Versuchsablauf zu gewährleisten. Jede Faktorstufenkombination soll in jeder Spalte gleich häufig vorkommen.

Die Auswertung der Versuchspläne erfolgt üblicherweise in der Darstellung und Interpretation von Haupt- und Wechselwirkungseffekt-Diagrammen. Von starken Effekten spricht man, wenn es durch Verstellen des Faktors zwischen Tief- und Hoch-Wert zu großen gemessenen Wertunterschieden des Qualitätsmerkmals kommt. Hingegen kann es auch vorkommen, dass Effekte kaum messbar oder nur sehr schwach ausgeprägt als Funktion eines Faktors auftreten können. Eine Gegenüberstellung ist in Abbildung 82 dargestellt.



Abbildung 82 Haupteffektdiagramm  
starker Effekt bei Faktorvariation A (links) – schwacher Effekt bei Faktorvariation B (rechts)

Technisch häufig relevant sind ebenfalls Zweifachwechselwirkungen. Diese werden in Wechselwirkungsdiagrammen dargestellt und interpretiert wie in Abbildung 83 dargestellt. Sind Wechselwirkungen ausgeprägt vorhanden, so überkreuzen sich die Effektgeraden und haben eine stark unterschiedliche Steigung oder Steigungen mit unterschiedlichem Vorzeichen. Liegt keine Überschneidung vor oder sind nur geringe Steigungsunterschiede ersichtlich liegt keine oder eine nur sehr schwache Wechselwirkung vor.

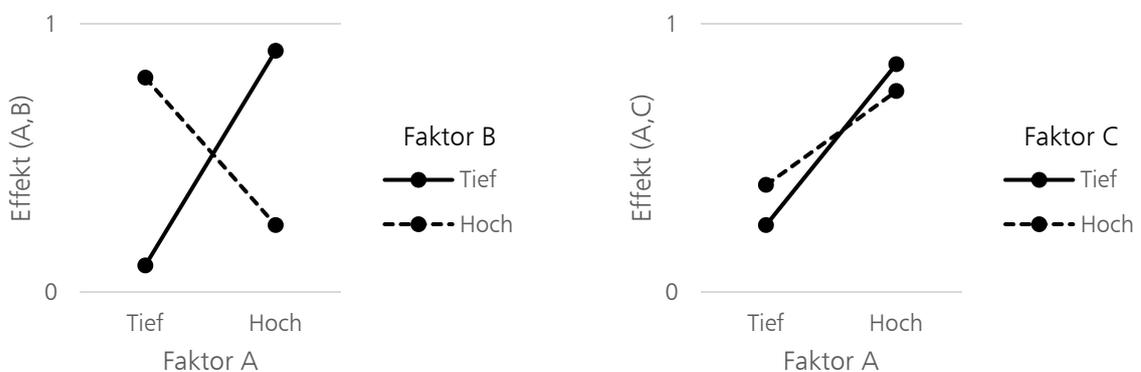


Abbildung 83 Wechselwirkungsdiagramm  
stark ausgeprägte Wechselwirkung (links) – sehr schwache Wechselwirkung (rechts)

### 7.2.2 Methodenplanung zur Optimierung der Qualitätsmerkmale Härte und Haftfestigkeit

Bei der Entwicklung von LMD-Schichtsystemen wird wie vorher beschrieben durch standardisierte Versuche eine erste Parameteranalyse durchgeführt. Diese basiert auf den ersten Linien- und Flächenversuchen. Auch die Prozesserfahrung hilft den Faktorraum sinnvoll abstecken zu können. Da die Effekte in der Regel über ein lineares Gleichungssystem ausgewertet werden ist vor allem der Abstand zwischen Hoch- und Tief-Wert möglichst richtig zu wählen oder abzuschätzen. Wird ein

zu großer Abstand gewählt können nicht lineare Zusammenhänge das Ergebnis verfälschen. Bei zu geringem Abstand ist ein Erkennen eines Effekts aufgrund der natürlichen Streuung schwierig. Letztlich gibt es dennoch eine Vielzahl an Parametern, bei welchen die Auswirkungen auf einen Effekt nicht bekannt sind. Für ein erstes Faktor Screening zur Optimierung der Qualitätsmerkmale Härte der Beschichtung und Haftfestigkeit kann ein Versuchsplan der Auflösung III gewählt werden (siehe Tabelle 12). Mit diesem können sieben Parameter auf zwei Stufen in acht Versuchen getestet werden. Dieser Ablauf wird mit drei Wiederholungen ausgeführt, sodass zwei 12-Flächenproben mit den definierten Parametersätzen beschichtet werden. In der Analyse wird je nach Versuchsplan ein Konfidenzniveau von 90% für Faktorscreenings, bzw. 95% für detaillierte Versuchsreihen angenommen um einen wahren Effekt außerhalb der natürlichen Streubreite nachzuweisen. Alle Versuche eines Probenkörpers (12 Werte) werden einem Block zugeordnet um eventuelle Streuungen der Antwortvariablen zu beschreiben und nicht den einzelnen Faktoren zuzuweisen. Da in der Auswertung Zweifachwechselwirkungen mit Haupteffekten vermengt sind kann durch sorgfältige Zuordnung der Parameter in den Versuchsplan mögliche Modellfehler reduziert werden. Durch die Auswertung der Ergebnisswerte können die wesentlich effektbeeinflussenden Parameter erkannt werden. Jedoch hat sich in der Praxis gezeigt, dass eine weitere Versuchsreihe notwendig ist um eine sicherere Aussage zu generieren.

Tabelle 12 Screening-Versuchsplan mit der Auflösung III / 7 Faktoren auf 2 Stufen in 8 Versuchen

A	B	C	D	E	F	G	y
-	-	-	+	+	+	-	y1
+	-	-	-	-	+	+	y2
-	+	-	-	+	-	+	y3
+	+	-	+	-	-	-	y4
-	-	+	+	-	-	+	y5
+	-	+	-	+	-	-	y6
-	+	+	-	-	+	-	y7
+	+	+	+	+	+	+	y8

Können zwei Parameter fixiert werden, da ihr erwarteter Einfluss auf das Qualitätsmerkmal als nicht signifikant erwartet wird oder werden von vornherein nur fünf Parameter untersucht, bietet sich ein teilfaktorieller Plan mit der Auflösung V an. Fünf Faktoren werden auf zwei Stufen in 16 Versuchen getestet (siehe Tabelle 13). Bei der gleichen Anzahl von drei Wiederholungen werden hierfür vier 12-Flächenproben benötigt. Die Auswertung ist hier bereits von hoher Qualität da Haupteffekte von Zweifachwechselwirkungen mathematisch getrennt bewertet werden. Je nach Streubreite des Qualitätsmerkmals liegen mehr oder weniger Effekteinflüsse innerhalb des Konfidenzintervalls.

Tabelle 13 Teilfaktorieller Versuchsplan mit der Auflösung V / 5 Faktoren auf 2 Stufen in 16 Versuchen

A	B	C	D	E	y
-	-	-	-	+	y1
+	-	-	-	-	y2
-	+	-	-	-	y3
+	+	-	-	+	y4
-	-	+	-	-	y5
+	-	+	-	+	y6
-	+	+	-	+	y7
+	+	+	-	-	y8
-	-	-	+	-	y9
+	-	-	+	+	y10
-	+	-	+	+	y11
+	+	-	+	-	y12
-	-	+	+	+	y13
+	-	+	+	-	y14
-	+	+	+	-	y15
+	+	+	+	+	y16

Werden nur vier Faktoren auf zwei Stufen getestet bietet sich alternativ dazu ein Versuchsplan der Auflösung IV wie in Tabelle 14 dargestellt mit acht Versuchen oder zwei 12-Flächenproben an. Dieser hat folgende Struktur.

Tabelle 14 Versuchsplan mit der Auflösung IV / 4 Faktoren auf 2 Stufen in 8 Versuchen

A	B	C	D	y
-	-	-	-	y1
+	-	-	+	y2
-	+	-	+	y3
+	+	-	-	y4
-	-	+	+	y5
+	-	+	-	y6
-	+	+	-	y7
+	+	+	+	y8

Kann eine weitere Faktorreduzierung auf drei durchgeführt werden, ist eine weitere statistische Absicherung mittels vollfaktoriellem Versuchsplan möglich. Dieser ergibt auf zwei Stufen acht Versuchsläufe. Bei drei Wiederholungen werden zwei 12-Flächenproben benötigt. Der Versuchsplan trennt vollständig Haupt- und alle Wechselwirkungseffekte untereinander (siehe Tabelle 15).

Tabelle 15 Vollfaktorieller  $2^3$  Versuchsplan / 3 Faktoren auf 2 Stufen in 8 Versuchen

A	B	C	y
-	-	-	y1
+	-	-	y2
-	+	-	y3
+	+	-	y4
-	-	+	y5
+	-	+	y6
-	+	+	y7
+	+	+	y8

Die Entscheidung welche zweistufig variierten Parameter (Faktoren) bei der jeweiligen Verfeinerungsstufe eliminiert werden kann zwei Entscheidungsgrundlagen haben. Entweder der Effekt eines Faktors liegt unterhalb des Signifikanzniveaus von 5%, das heißt innerhalb der Streuung, oder der Effekt liegt oberhalb des Signifikanzniveaus zeigt aber keinen wesentlichen Einfluss auf das Qualitätsmerkmal. Die Entscheidung bei welchen Wert ein ausgeschiedener Faktor fixiert wird, liegt letztendlich beim Operator selbst der in der Regel auf Erfahrungswerte zurückgreift. Bei vielen Faktoren haben sich jedoch klassische Erfahrungswerte als negativ für das gewünschte Qualitätsziel herausgestellt, sodass eine genaue Betrachtung immer sinnvoll erscheint bzw. ein frühzeitiges Ausscheiden von variierten Parametern das Endergebnis verschlechtert. Die Bewertungsmethode mittels DoE erfordert bei vollständigem Durchlauf nur wenige 12-Flächenproben und ist im Gesamtaufwand durchaus vertretbar um ein mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit geltendes Einfluss- / Auswirkungsmodell zu erhalten.

---

## 8 Ergebnisse

Durch unterschiedliche Anwendungsfälle motiviert wurden viele Beschichtungssysteme auf deren mechanische Kennwerte und teilweise unter Einsatzbedingungen geprüft. Zum besseren Verständnis befindet sich im Anhang eine Zusammenstellung aller hier dargestellten Substrat- und Beschichtungslegierungen. Die Ergebnisse sind je nach Werkstoffbasis der Beschichtung sortiert dargestellt.

Im Rahmen der Versuche wurden unterschiedliche Faktoren oder Prozessparameter variiert. Diese sind in Tabelle 16 dargestellt. Die Auswertung der Daten mittels Excel und Minitab erlauben keine Darstellung von Indizes weshalb auch die jeweilige Parallelschreibweise dargestellt ist.

Tabelle 16 Parameterbezeichnung - Schreibweisen

Parameter	Excel (Minitab) Schreibweise	Einheit	Beschreibung
v	v	[mm/min]	Bahnvorschub
T <sub>VW</sub>	T_VW	[°C]	Vorwärmtemperatur
O <sub>L</sub>	O_L	[%]	Bahnüberlappungsgrad
A <sub>N</sub>	A_N	[%]	Aspektverhältnis
F <sub>P</sub>	F_P	[g/min]	Pulverförderrate
Δf <sub>B</sub>	Δf_B	[mm]	Fokusverschiebung
P <sub>L</sub>	P_L	[W]	Laserleistung
f <sub>L</sub>	f_L	[Hz]	Laserfrequenz

### 8.1 Eisenbasierte Legierungen

Für das Laserauftragschweißen stehen unterschiedliche Beschichtungslegierungen auf Eisenbasis zur Auswahl. Liegt keine Verschleißapplikation vor sondern werden große Aufbauvolumen generiert kommt gerne die korrosionsbeständige Legierung 316L zum Einsatz. Im Bereich von Werkzeugstählen mit höherer Härte stehen beispielsweise die Beschichtungswerkstoffe Ferro55, CPM1V, FeCrV1 oder FeCrV15 zur Verfügung. Teilweise sind Legierungen mit einem hohen Kohlenstoffanteil mittels LMD sehr schwer zu verarbeiten und neigen sehr stark zur Rissbildung. Einige Eisenbasiswerkstoffe mit einer Schichthärte von 54 – 58 HRC lassen sich jedoch gut für Werkzeugapplikationen im Bereich der Umformtechnik verarbeiten.

#### Ferro55 auf 1.1730 und 1.7131

Die Beschichtung Ferro55 ist eine Eisenbasislegierung die eine Kombination aus hoher Härte und guter Zähigkeit darstellt. Zudem ist diese Legierung auch für Warmarbeitsprozesse bis 550 °C geeignet. Getestet wurde die Beschichtung auf unterschiedlichen Substraten. Unter anderem auf dem unlegierten Werkzeugstahl 1.1730 und dem Einsatzstahl 1.7131. In der praktischen

Anwendung wird diese Beschichtung hauptsächlich partiell als Verschleißschutzfläche aufgetragen. Das Beispiel eines beschichteten Probekörpers ist in Abbildung 84 dargestellt

Ausgehend von den ersten Linienversuchen wurden Parametersätze mit einem Aspektverhältnis zwischen Höhe und Breite der Schweißnaht zwischen 25 % und 35 % ausgewählt. Erste Flächenversuche wurden mit einem Bahnabstandsfaktor von ca. 50 % durchgeführt. Sämtliche Ergebnisse waren ohne Risse und Poren.



Abbildung 84 Ferro55 auf 1.1730 Vierflächen Vorversuch mit Parametervariation

Auf Grund dessen wurde eine Versuchsmatrix mit fünf zweistufig variierten Parametern in 16 Versuchen abgeleitet (siehe Tabelle 17). Variiert wurden die Faktoren Bahnvorschub, Bahnüberdeckungsgrad, Pulverförderrate, Vorwärmtemperatur und Pulsfrequenz des Lasers. Festgelegt wurden die Parameter Laserleistung und Fokusverschiebung.

Tabelle 17 Versuchsmatrix Ferro55 auf 1.1730 bzw. 1.7131, 5 Faktoren auf 2 Stufen in 16 Versuchen, Auflösung V

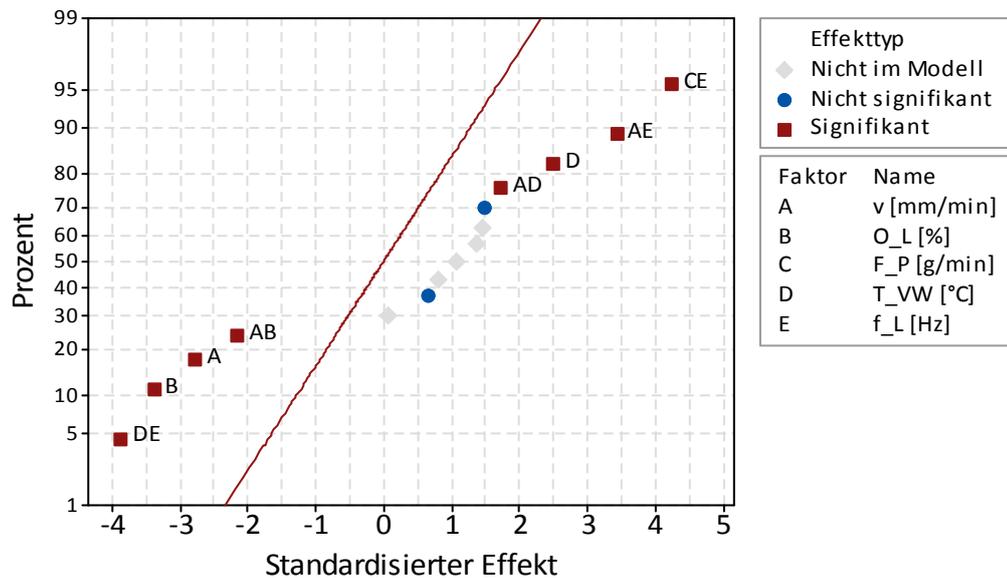
Faktoren	A	B	C	D	E	Fest	Fest
Bezeichnung	v [mm/min]	O <sub>L</sub> [%]	F <sub>P</sub> [g/min]	T <sub>VW</sub> [°C]	f <sub>L</sub> [Hz]	P <sub>L</sub> [W]	Δf <sub>B</sub> [mm]
Tief	450	40	8	20	100	3200	5
Hoch	600	60	10,5	250	5000		

### Auswertung des Qualitätsmerkmals Härte

Für die Auswertungen der Härte wurden neun Wiederholungen, für die Haftfestigkeit drei Wiederholungen durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt mittels der Statistikanalysesoftware Minitab. Für die Verbindung Ferro55/1.1730 wird die gesamte Auswertung dargestellt, für alle weiteren Untersuchungen nur die Ergebnisse der Effektdiagramme.

Die Daten des Qualitätsmerkmals Härte werden zunächst auf deren Normalverteilung getestet. Bei extremen Messwerten wird ein Test auf Ausreißer durchgeführt, welcher als Entscheidungsgrundlage für die Elimination eines solchen herangezogen wird. Sind die Daten bereinigt kann die Analyse des faktoriellen Versuchsplanes durchgeführt werden.

### Wahrscheinlichkeitsnetz (Normal) für standardisierte Effekte (Antwort ist Härte [HV5]; $\alpha = 0,10$ )



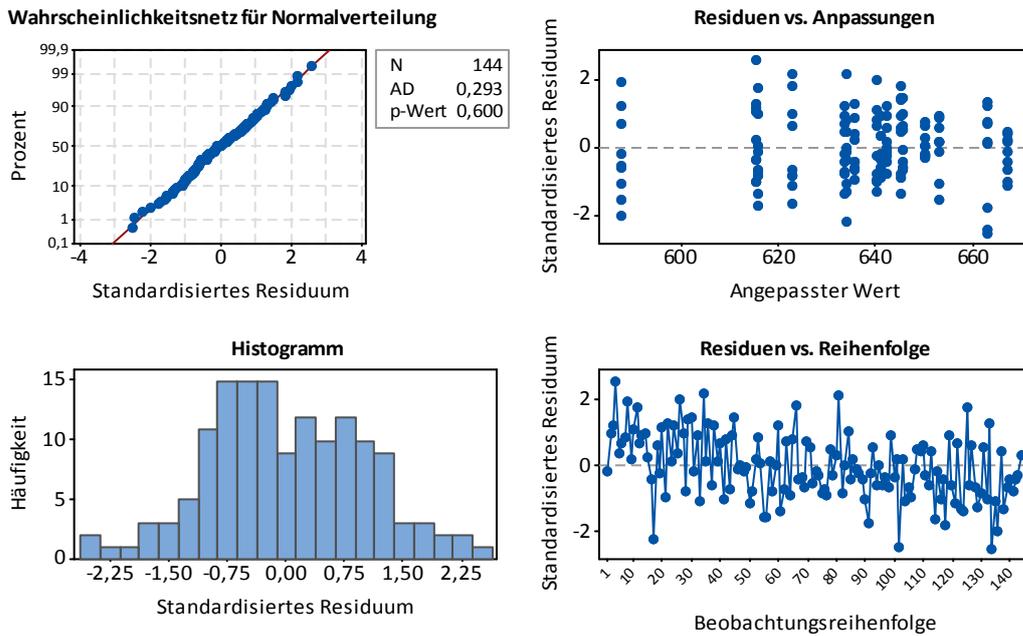
Arbeitsblatt: Ferro55\_1730\_5Fakt\_16Vers\_Härte

Abbildung 85 Effektdiagramm auf die Härte von Ferro55 auf 1.1730

Zunächst erfolgt eine Modellanpassung in dem alle Terme von Haupt-, Zwei- und Mehrfachwechselwirkungen unter dem Signifikanzniveau aus dem Modell ausgeschlossen werden. Haupteffekte die zwar selbst außerhalb des Konfidenzintervalls liegen, jedoch deren Wechselwirkungen signifikant sind dürfen nicht ausgeschlossen werden. Abbildung 85 zeigt das Effektdiagramm mit den signifikanten, nicht signifikanten und nicht im Modell enthaltenen Termen.

Des Weiteren müssen die Modellvoraussetzungen überprüft werden. Die Residuen müssen einer Normalverteilung unterliegen, sie müssen zufällig über die Zeit verteilt sein und eine konstante Varianz für alle angepassten Werte haben. Betrachtet man Abbildung 86 sind alle Voraussetzungen erfüllt.

### Residuendiagramme für Härte [HV5]



Arbeitsblatt: Ferro55\_1730\_5Fakt\_16Vers\_Härte

Abbildung 86 Residuendiagramme für Härte von Ferro55 auf 1.1730

Die signifikanten Hauptfaktoren für das Qualitätsmerkmal Härte sind, wie in Abbildung 87 dargestellt, Vorschub, Bahnüberlappung und Vorwärmtemperatur. Für die Faktoren Pulverförderrate und Laserfrequenz besteht eine signifikante Wechselwirkung (siehe Abbildung 88). Die Härte kann insbesondere durch langsameren Vorschub kleinerem Bahnüberlappungsgrad und höherer Vorwärmtemperatur gesteigert werden. Des Weiteren sind vor allem die Wechselwirkung Laserfrequenz und Pulverförderrate bzw. Laserfrequenz und Vorwärmtemperatur besonders auffällig.

### Haupteffektediagramm für Härte [HV5]

Angepasste Mittelwerte

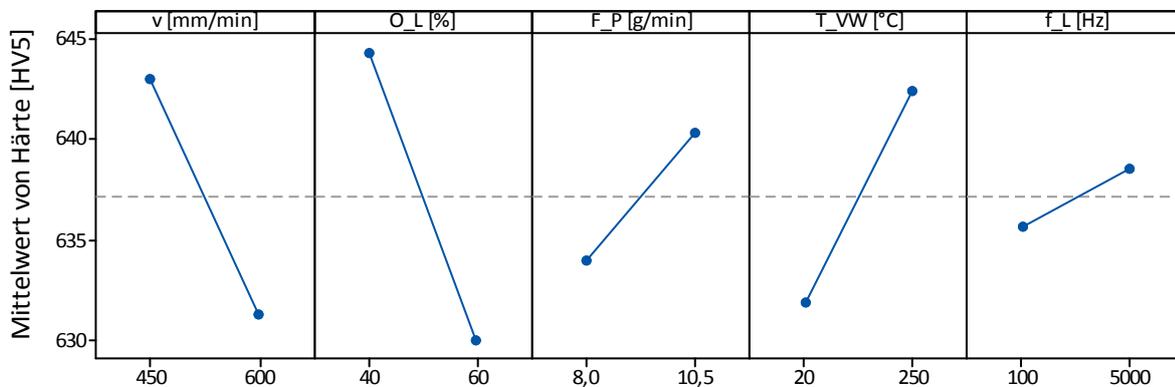
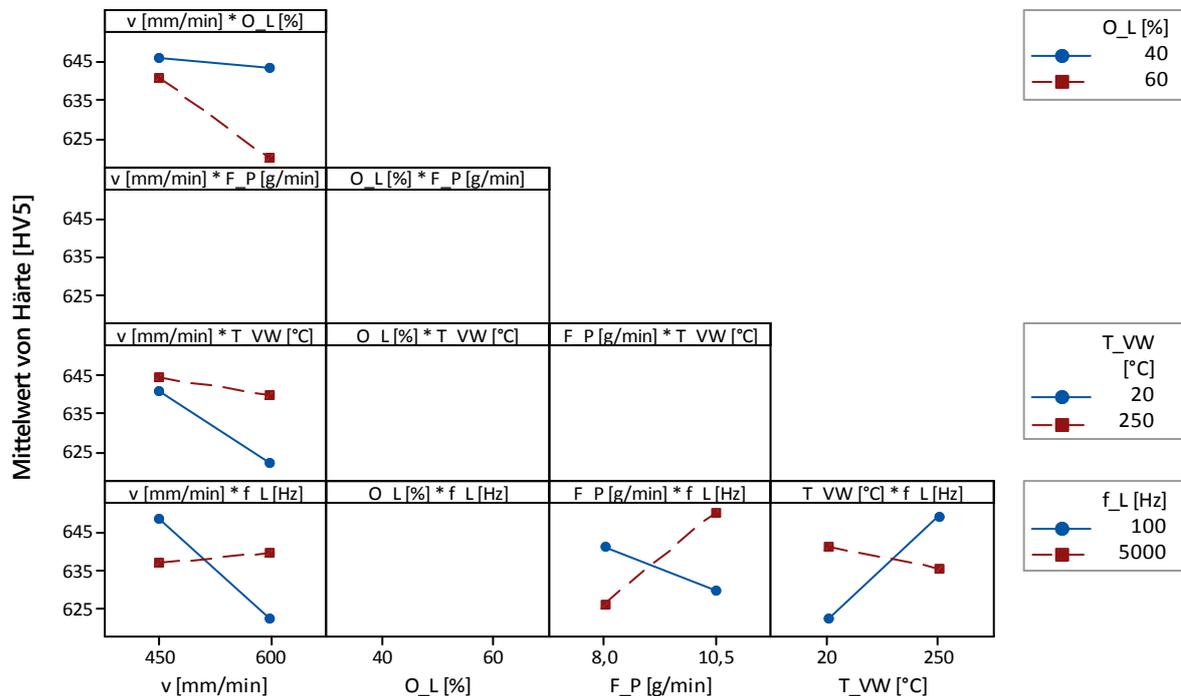


Abbildung 87 Haupteffektediagramm für Härte von Ferro55 auf 1.1730

### Wechselwirkungsdiagramm für Härte [HV5] Angepasste Mittelwerte



Arbeitsblatt: Ferro55\_1730\_5Fakt\_16Vers\_Härte

Abbildung 88 Wechselwirkungsdiagramm für Härte von Ferro55 auf 1.1730

Mit einem Konfidenzintervall von 90 % kann daher die folgende Regressionsgleichung aufgestellt werden.

$$\begin{aligned} \text{Härte [HV5]} = & 667,0 + 0,066 \cdot v + 2,46 \cdot O_L - 4,99 \cdot F_P - 0,104 T_{VW} - 0,04359 f_L - 0,00606 \cdot v \cdot O_L \\ & + 0,000427 \cdot v \cdot T_{VW} + 0,000040 \cdot v \cdot f_L + 0,002948 \cdot F_P \cdot f_L - 0,000029 T_{VW} * f_L \end{aligned}$$

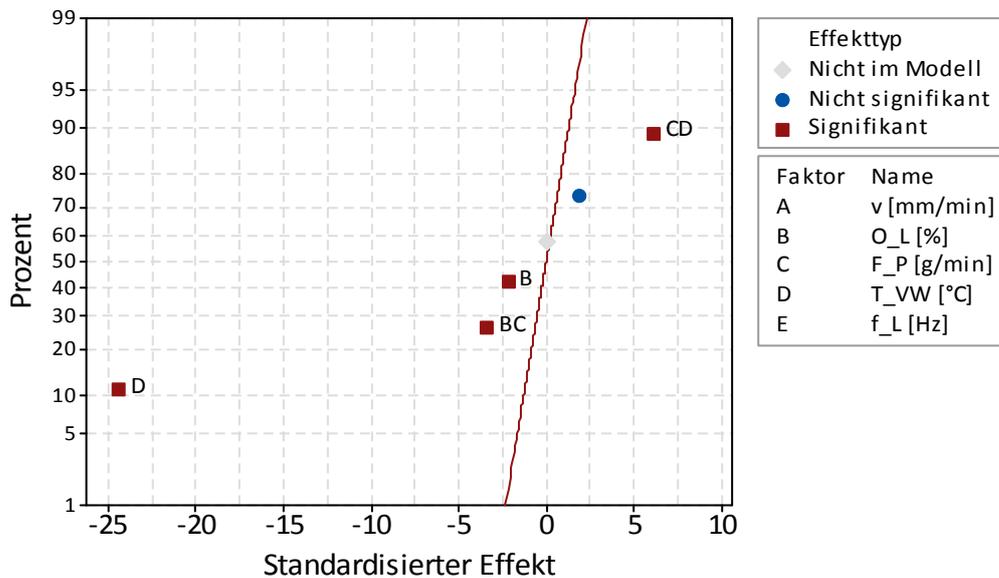
Betrachtet man das Optimierungspotential, so kann die Härte durch optimierte Parametereinstellung im Vergleich zum schlechtesten Parametersatz um gut 10 % gesteigert werden. Dies kann bei Verschleißanwendungen bereits eine deutliche Verbesserung bedeuten.

#### Auswertung des Qualitätsmerkmals Haftfestigkeit

Da bei dem vorliegenden Haftfestigkeitsversuch kein reiner eindimensionaler Spannungszustand vorliegt wird keine Spannung als Festigkeitswert, sondern der Wert der absoluten maximalen Zugkraft quantitativ verglichen. Die Zugkraft korreliert jedoch proportional zur Haftfestigkeit. Für den idealen eindimensionalen Spannungszustand ist im Anhang eine Gegenüberstellung von Haftfestigkeit und maximaler Zugkraft in Tabelle 23 dargestellt.

Durch Rückwärtselimination der Faktoren mit einem Signifikanzniveau von 5 % bleiben 2 Haupt- und 2 Wechselwirkungen signifikant. Der Anteil der Variabilität dieses Modells ist mit  $R^2=95,31\%$  sehr hoch, damit lassen sich über 90 % der Variation über die ermittelten Haupt- und Wechselwirkungen erklären (siehe Abbildung 89).

### Wahrscheinlichkeitsnetz (Normal) für standardisierte Effekte (Antwort ist Zugkraft [N]; $\alpha = 0,05$ )



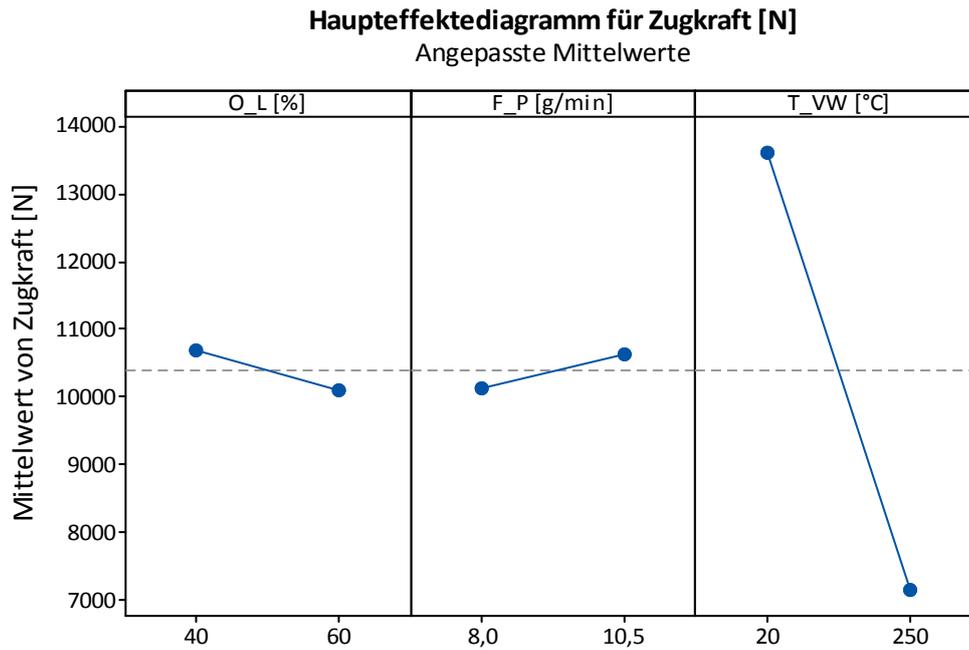
Arbeitsblatt: Ferro55\_1730\_5Fakt\_16Vers\_Haftfestigkeit

Abbildung 89 Effekte Diagramm – Beurteilung Zugkraft von Ferro55 auf 1.1730

Wie in Abbildung 90 ersichtlich stellen Bahnüberlappung und Pulverförderrate eher kleine Effekte auf die Haftfestigkeit dar. Es ist jedoch ein sehr großer Einfluss der Vorwärmtemperatur sichtbar. Signifikante Zweifach-Wechselwirkungen sind nicht zu beobachten (siehe Abbildung 91). Dies spiegelt sich auch bei der ermittelten Regressionsgleichung für das Qualitätsmerkmal wieder.

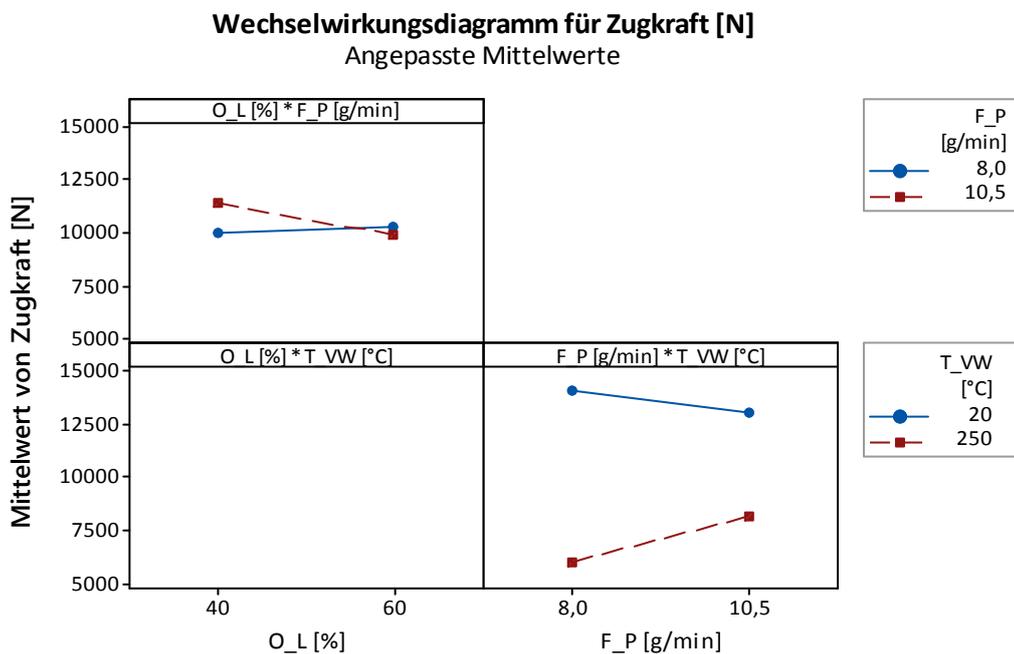
$$\text{Zugkraft}[N] = 4195 + 303,4 \cdot O_L + 1236 \cdot F_P - 80,36 \cdot T_{VW} - 35,9 \cdot O_L \cdot F_P + 5,652 \cdot F_P \cdot T_{VW}$$

Bei einer Vorwärmung des Substrates 1.1730 scheint es zu einer Schädigung des Übergangsbereichs zu kommen, welche einen Abfall der Zugkraft von knapp 50 % bedeutet. Obwohl Vorwärmung in vielen Fällen der Schweißtechnik unumgänglich ist, wirkt sie sich in diesem Fall negativ aus. Durch die gemeinsame Optimierung der Faktoren Bahnüberlappung und Pulverförderrate sind immerhin noch 15 % Verbesserungspotential der Haftfestigkeit zwischen schlechtester und bester Einstellung realisierbar.



Arbeitsblatt: Ferro55\_1730\_5Fakt\_16Vers\_Haftfestigkeit

Abbildung 90 Haupteffektdiagramm – Beurteilung Zugkraft von Ferro55 auf 1.1730



Arbeitsblatt: Ferro55\_1730\_5Fakt\_16Vers\_Haftfestigkeit

Abbildung 91 Wechselwirkungsdiagramm – Beurteilung Zugkraft von Ferro55 auf 1.1730

Der gleiche Versuchsplan wurde ebenfalls auf dem Einsatzstahl 1.7131 als Substrat durchgeführt. Diese Kombination ist für Umformwerkzeuge für die Kaltumformung vorteilhaft. Bei der

Untersuchung liegen mehrere Haupt- und Wechselwirkungen über dem Signifikanzniveau wie in Abbildung 92 ersichtlich ist.

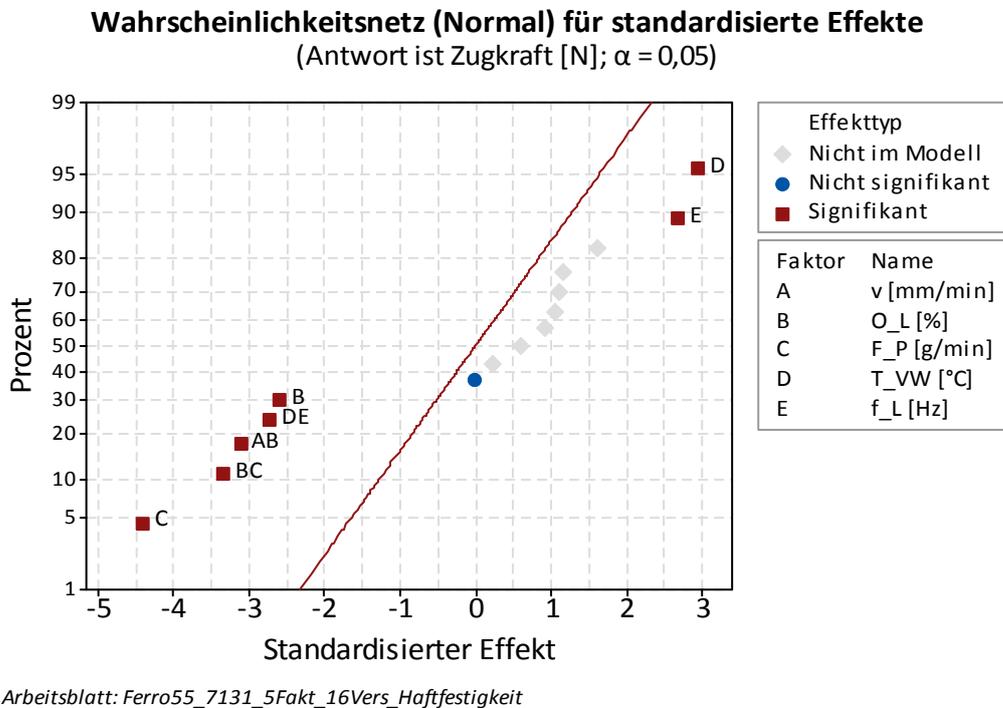


Abbildung 92 Effektediagramm – Zugkraft von Ferro55 auf 1.7131

Betrachtet man in Abbildung 93 das Haupteffektediagramm für die Zugkraft so ergibt sich eine interessante Darstellung gegenüber dem Substrat 1.1730. Bei 1.7131 wirkt sich die Vorwärmung nicht negativ sondern positiv auf die Haftfestigkeit aus. Stärkster Einfluss scheint durch die Pulverfördererrate gegeben. Aufgrund dessen wird ebenfalls eine Betrachtung der Pulver-Weg-Rate durchgeführt. Positiven Einfluss auf die Zugkraft hat auch ein geringerer Bahnüberlappungsgrad.

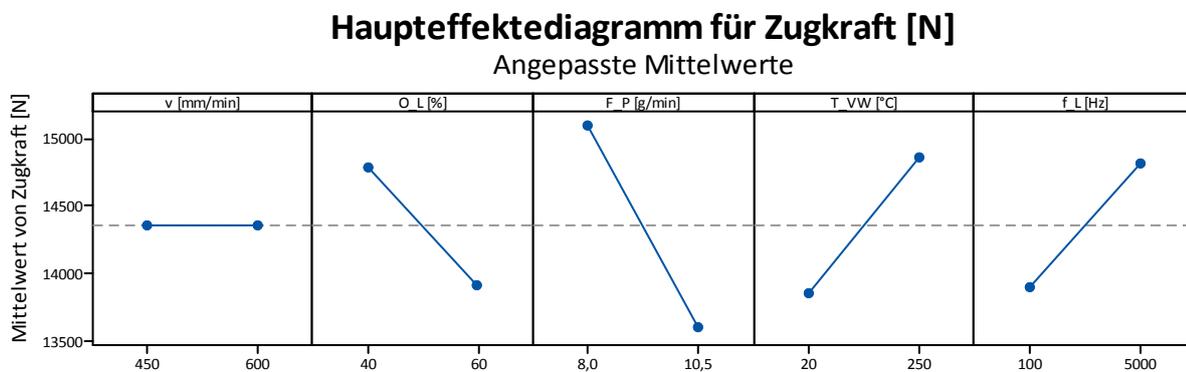
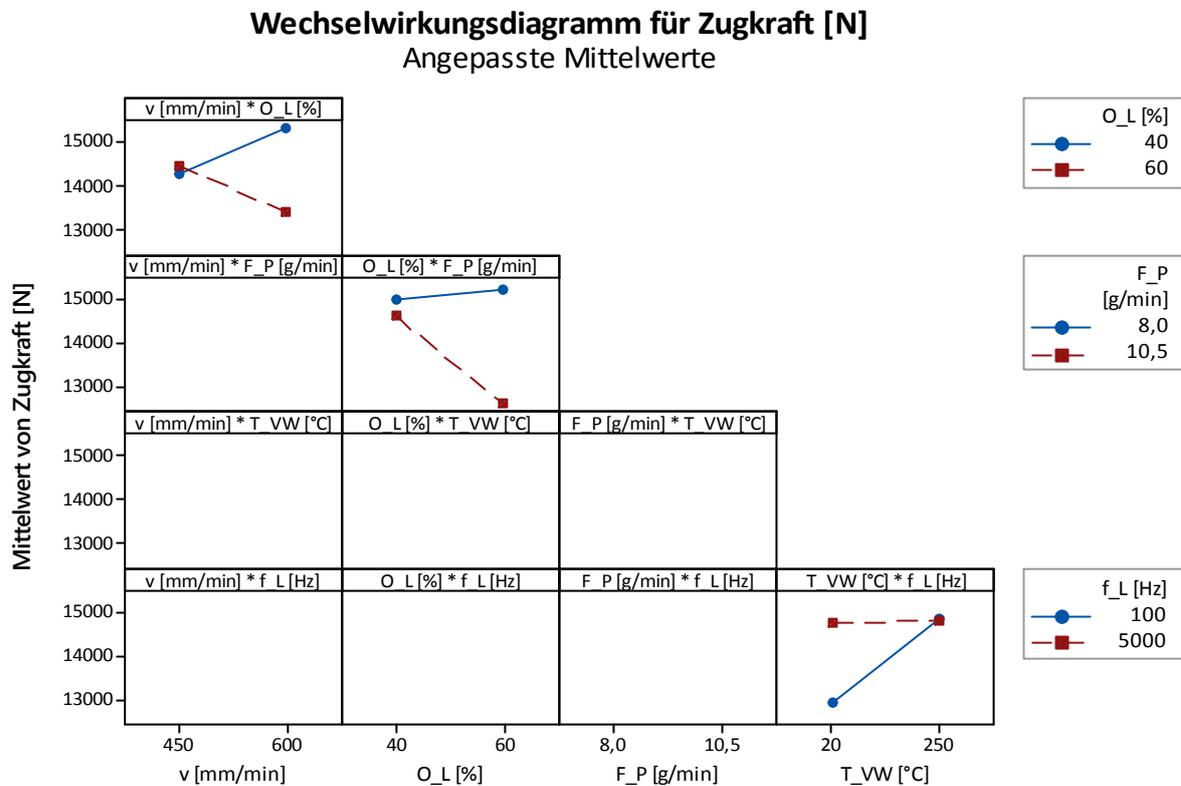


Abbildung 93 Haupteffektediagramm – Zugkraft von Ferro55 auf 1.7131

Einen kleinen Wechselwirkungseffekt scheint es zwischen Vorschub und Bahnüberlappungsgrad zu geben, wobei die Parametereinstellung hoher Vorschub und geringe Bahnüberlappung die besten Haftungswerte zeigen (siehe Abbildung 94).



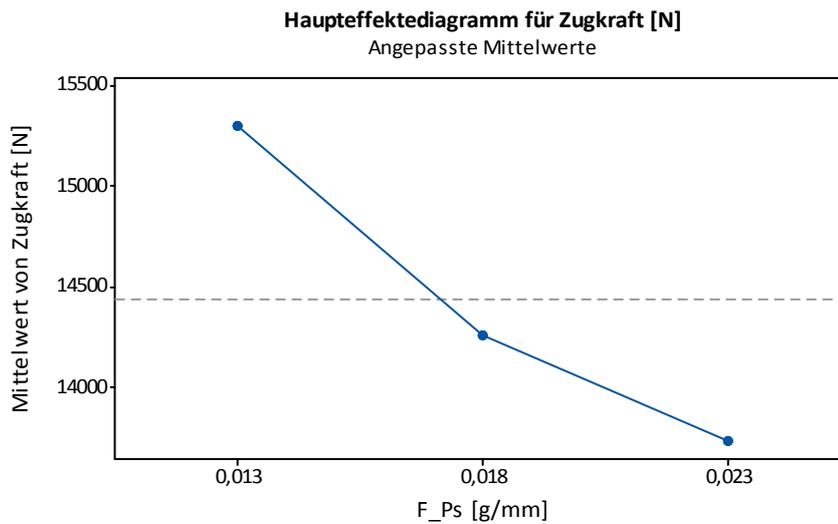
Arbeitsblatt: Ferro55\_7131\_5Fakt\_16Vers\_Haftfestigkeit

Abbildung 94 Wechselwirkungsdiagramm Zugkraft von Ferro55 auf 1.7131

Bei Übertragung des Modells auf die Pulver-Weg-Rate ergibt sich folgende Darstellung in Abbildung 95. Für das Beschichtungssystem Ferro55 und 1.7131 scheint es vorteilhaft zu sein mit einer geringeren Pulver-Weg-Rate zu arbeiten. Hierbei kommt es zu einer größeren Durchmischungszone zwischen Substrat und Beschichtung. Bei dem Substrat 1.1730 ist dieser Effekt umgekehrt.

Die Streckenenergie ist aufgrund der konstanten Laserleistung direkt proportional zum Vorschub. Eine Effektabhängigkeit von der Streckenenergie scheint nicht ausgeprägt vorhanden zu sein.

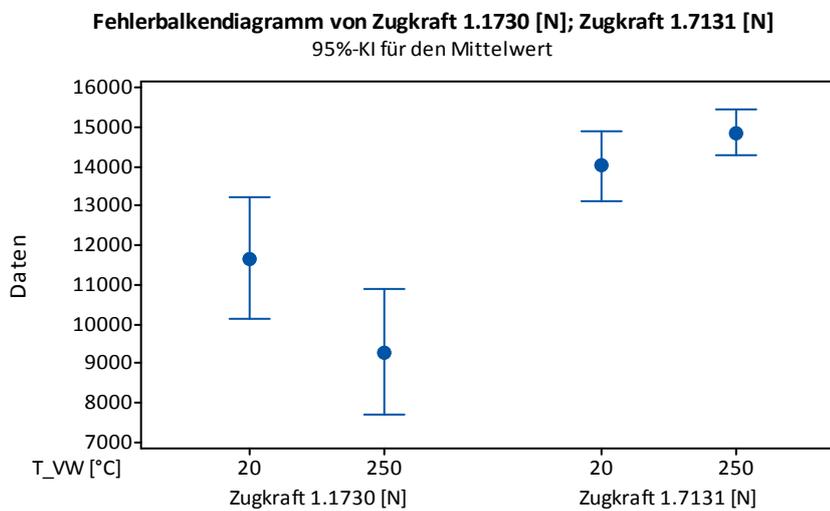
Zur Maximierung der Haftfestigkeit sollten die Parameter  $v=450$  [mm/min],  $O_L=60$  %,  $F_P=8$  [g/min] und  $T_{VW}=250$  °C gearbeitet werden. Das Verbesserungspotential der maximalen Zugkraft vom schlechtesten Parametersatz zum besten beträgt knapp 53 %, von geschätzten 10600 N auf 16300 N. Das Konfidenzintervall beträgt bei dieser Betrachtung 95 %. Ein Einfluss der oben genannten Faktoren ist daher sehr wahrscheinlich.



Arbeitsblatt: Ferro55\_7131\_3Fakt\_16Vers\_Haftfestigkeit\_PulverWegRate

Abbildung 95 Haupteffekt der errechneten Pulver-Weg-Rate auf die Zugkraft [N], Ferro55 auf 1.7131

Das Beschichtungssystem 1.1730 ist aufgrund seiner Empfindlichkeit gegenüber Vorwärmen für den Einsatz für technische Applikationen zu hinterfragen. Im Vergleich der Zugkraft zwischen den Werkstoffen 1.7131 und 1.1730 in Abbildung 96 dargestellt wird dieser Unterschied sehr deutlich. In der Werkstoffkombination mit Ferro55 scheint der Einsatzstahl 1.7131 die bessere Wahl zu sein.



Zum Berechnen der Intervalle wurden die individuellen Standardabweichungen verwendet.  
Arbeitsblatt: Vergleich\_1.7131 und 1.1730

Abbildung 96 Vergleich der Mittelwerte des Qualitätsmerkmals Zugkraft von Ferro55 auf 1.1730/1.7131 in Abhängigkeit der Vorwärmtemperatur

## 8.2 Kupferbasislegierungen

Schichtsysteme auf Kupferbasis sind vor allem für die Kaltumformung interessant. Aufgrund ihres geringen Reibwertes werden sie häufig in Ziehwerkzeugen für die Umformung von nichtrostendem Edelstahl eingesetzt. Aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung kommt es zu keinen adhäsiven Verschleißmechanismen. Die Härte und die Festigkeit dieser Werkstoffe ist allerdings geringer als bei üblichen Werkzeugstählen, sodass im Betrieb Abrasivverschleiß auftritt, welcher durch regelmäßige Nachbearbeitung der Werkzeugoberflächen kompensiert wird. Die Werkstoffkosten bei Kupfer-Aluminium Bronzen sind hoch. Daher sind bei großvolumigen Werkzeugen LMD-Beschichtungen sehr interessant. Erste Untersuchungen zu diesem Beschichtungssystem hat es bereits durch Schmidt et al. (2010) gegeben. In dieser Arbeit wurde bereits ein Einfluss der Laserparameter auf die Härte nachgewiesen. Auch die Haftfestigkeit der Bronzen auf unterschiedlichen Substraten ist für den technischen Einsatz sehr wichtig um entsprechende Standzeiten zu realisieren.

### CU85 auf 1.1730, 1.2312 und 1.2311

Getestet wurde der Beschichtungswerkstoff CU85 auf drei unterschiedlichen Substraten hinsichtlich Härte und Haftfestigkeit. Tabelle 18 zeigt den teilfaktoriellen Versuchsplan von vier Faktoren auf zwei Stufen in acht Versuchen. Variiert wird hier das Aspektverhältnis eines Querschnitts einer Schweißlinie, welches im Wesentlichen von Pulverförderrate, Vorschub und Fokusverschiebung abhängt. Die zwei letzteren Parameter werden im Versuchsplan ebenfalls variiert, sodass der Vorschub zum Erreichen eines gewünschten Aspektverhältnisses in Linienversuchen ermittelt wurde. Die Vermessung der geometrischen Eigenschaften der Schweißlinien erfolgt unter dem Lichtmikroskop wie in Abbildung 97 dargestellt.

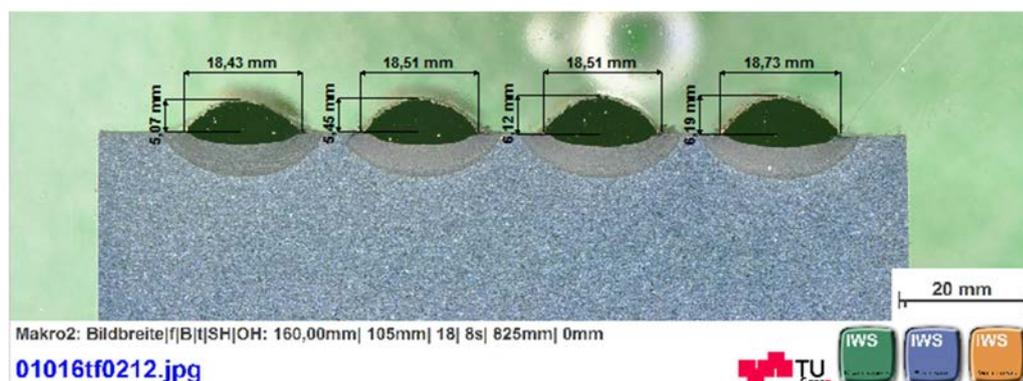


Abbildung 97 Querschliff – Geometrische Größen der Schweißlinien von CU85

Das Verstellen der Fokusslage von +5 auf -10 mm bedeutet etwa eine um 54 % höhere Leistungsdichte aufgrund der Verkleinerung des Strahldurchmessers im Schmelzbad. Variiert wurde ebenfalls die Vorwärmtemperatur. Festgelegt sind die Parameter Laserleistung, Pulsfrequenz und Spurüberdeckung (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18 Versuchsmatrix CU85 auf 1.1730/1.2311/1.2312, 4 Faktoren auf 2 Stufen in 8 Versuchen  
Auflösung IV

Faktoren	A	C	D	E	Fest	Fest	Fest
Bezeichnung	$A_N$ [%]	$F_P$ [g/min]	$T_{vW}$ [°C]	$\Delta f_B$ [mm]	PL [W]	$f_L$ [Hz]	$O_L$ [%]
Tief	35	8	20	-10	3200	5000	50
Hoch	50	10,5	250	+5			

Ausgewertet wurden mit dem Beschichtungswerkstoff die Substrate 1.1730, 1.2311 und 1.2312. Ersterer eignet sich für einfache Werkzeugsegmente welche partiell beschichtet werden. Die beiden anderen Substrate 1.2311 und 1.2312 befinden sich in der Kategorie der Kaltarbeitsstähle. Diese werden meist im vergüteten Zustand geliefert und fertig bearbeitet. Dadurch entfallen zwischengelagerte Wärmebehandlungsschritte. Insbesondere die Untersuchung des Stahls 1.2312 war von Interesse, da bei einem beschichteten Versuchswerkzeug Rissbildung und Delamination auffällig in Erscheinung getreten sind. Dies ist bei der Verarbeitung von CU85 nur selten zu beobachten. Dennoch ist es möglich in einem definierten Prozessfenster CU85 auf 1.2312 rissfrei aufzutragen (siehe Abbildung 98).

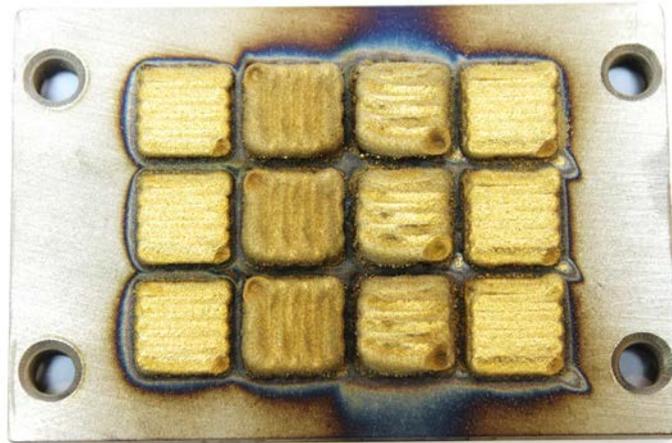
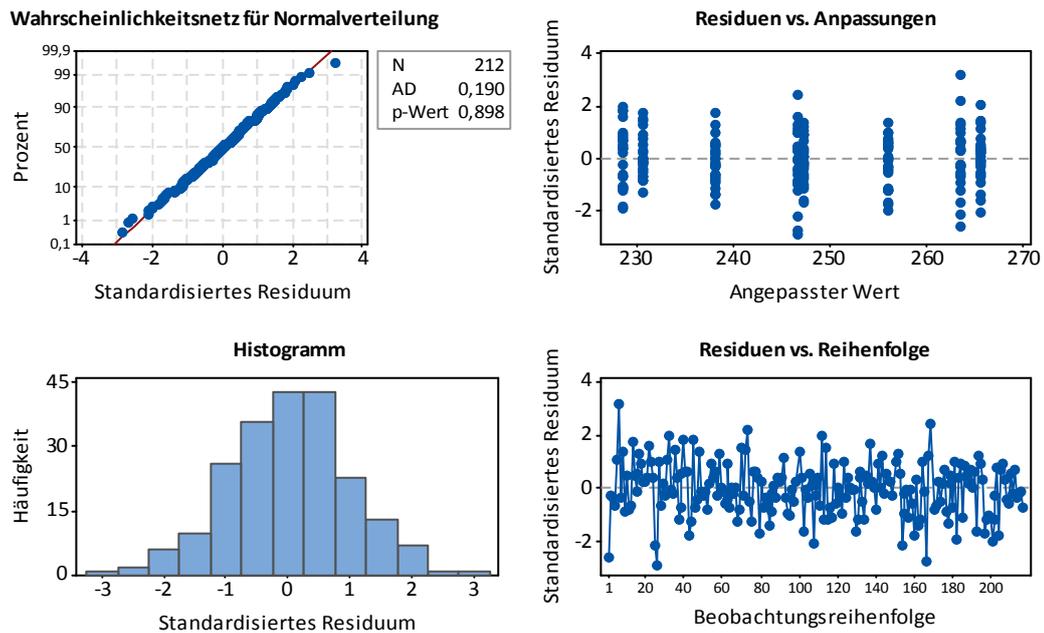


Abbildung 98 12-Flächenkörper mit CU85 Testparametern auf 1.2312

### Auswertung des Qualitätsmerkmals Härte

Die Härte der Oberfläche wurde substratunabhängig ausgewertet. Die Residuendiagramme (siehe Abbildung 99) zeigen keine Auffälligkeiten hinsichtlich unzureichender Normalverteilung, Anpassung und Beobachtungsreihenfolge. Die Variabilität der Antwortvariablen liegt bei  $R^2 > 60\%$ .

### Residuendiagramme für Härte [HV5]

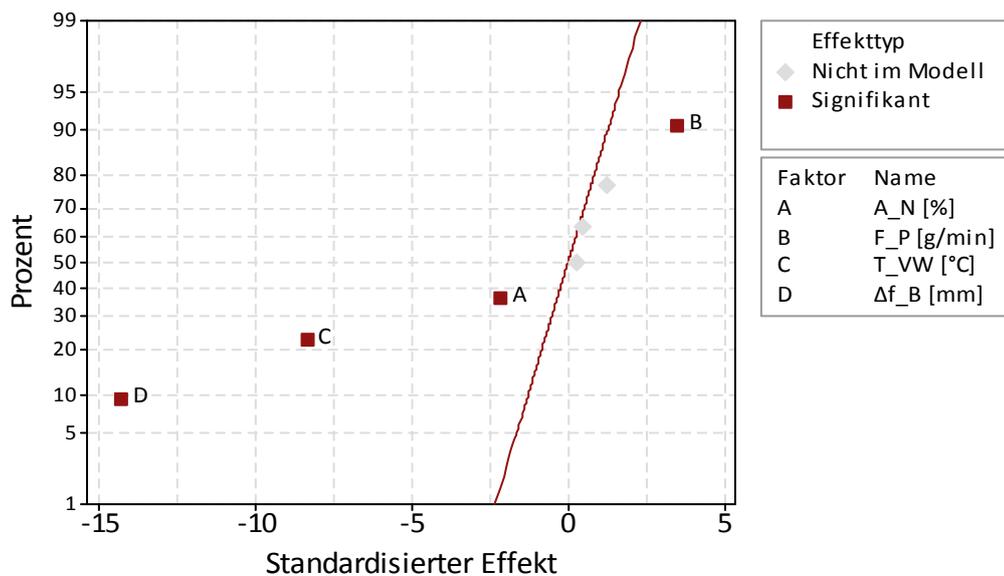


Arbeitsblatt: CU85\_div\_4Fakt\_2St\_8Vers\_Härte

Abbildung 99 Residuendiagramme von 211 Härtemessungen bei unterschiedlichen Faktorkombinationen, CU85

Alle Hauptfaktoren liegen über dem Signifikanzniveau. Zweifachwechselwirkungen scheinen nicht vorhanden zu sein wie in Abbildung 100 dargestellt.

### Wahrscheinlichkeitsnetz (Normal) für standardisierte Effekte (Antwort ist Härte [HV5]; $\alpha = 0,05$ )



Arbeitsblatt: CU85\_div\_4Fakt\_2St\_8Vers\_Härte

Abbildung 100 Effektdiagramm auf die Härte von CU85

Wie in den vorangegangenen Studien und in Abbildung 101 ersichtlich, scheint die Fokusverschiebung und somit die Veränderung der Leistungsdichte den größten Einfluss auf die Härte zu haben. Negativ auf die Härte wirken sich eine hohe Vorwärmtemperatur, ein großes Aspektverhältnis und eine geringe Pulverförderrate aus.

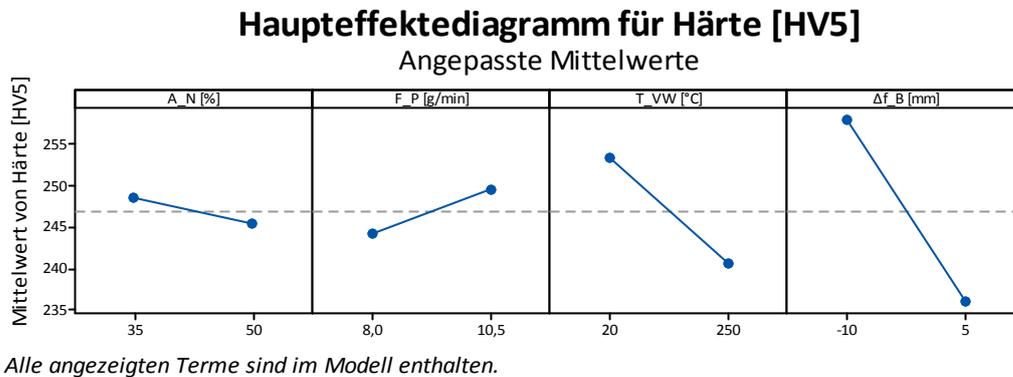


Abbildung 101 Haupteffektdiagramm für Härte von Cu85

Das prognostizierte Verbesserungspotential der Härte liegt vom schlechtesten Parametersatz auf den besten bei ca. 20 %, was einer Steigerung von ca. 40 HV-Punkten bedeutet.

### Auswertung des Qualitätsmerkmals Haftfestigkeit

Die Haftfestigkeit von CU85 wurde auf drei unterschiedlichen Substraten getestet. Im Vergleich 1.1730 und 1.2311, zeigt der letztere Werkzeugstahl etwas bessere Haftfestigkeitswerte. Alle Faktoren zeigen im Direktvergleich der Haupteffekte und Wechselwirkungen (siehe Abbildung 102 bis Abbildung 105) gleiche Tendenzen, sind jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt. So hat beispielsweise das Vorwärmen auf 250 °C bei 1.1730 einen nicht signifikanten Einfluss, bei 1.2311 jedoch einen sehr hohen positiven Einfluss auf die maximale Zugkraft. Im Gegensatz dazu beeinflusst die Verschiebung der Fokuslage die Zugkraft bei 1.1730 mehr als im Vergleich zu 1.2311.

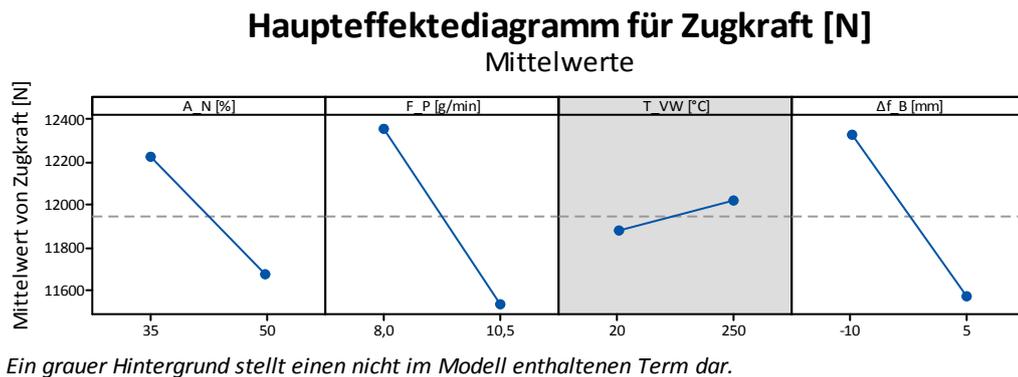
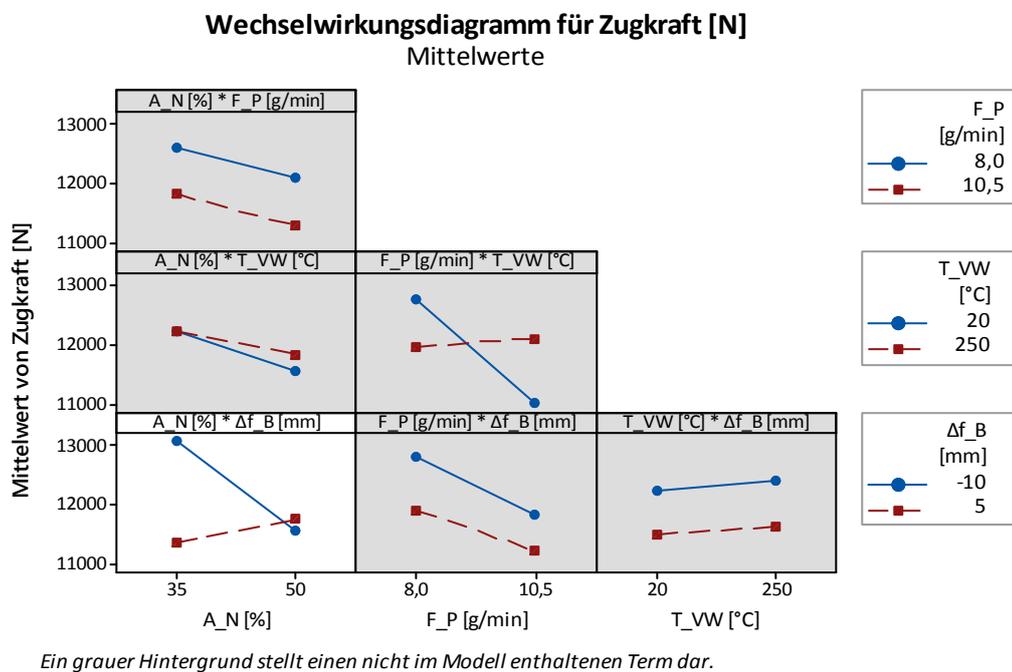


Abbildung 102 Haupteffektdiagramm für Haftfestigkeit von Cu85 auf 1.1730



Arbeitsblatt: CU85\_1.1730\_4Fakt\_2St\_8Vers\_Haftfestigkeit

Abbildung 103 Wechselwirkungsdiagramm für Haftfestigkeit von Cu85 auf 1.1730

Betrachtet man das gesamte Optimierungspotential der Haftfestigkeit zwischen dem schlechtesten und besten Parametersatz so ergibt sich bei 1.1730 eine prognostizierte Steigerung von 23% und 26% bei 1.2311. Das Konfidenzintervall beträgt bei allen Prognosemodellen 95%. Möchte man eine gleichzeitige Optimierung bzw. Maximierung der Qualitätsmerkmale Haftfestigkeit und Zugkraft erzielen so ist bei den zwei gegenläufigen Effekten Pulverfördertrate und Vorwärmtemperatur ein Kompromiss bzw. eine Abschätzung der Wichtigkeit einzelner Qualitätsmerkmale zu finden. Bei mehrlagigen Beschichtung besteht die Möglichkeit eine sukzessive Anpassung der Beschichtungsparameter auf das gewünschte Qualitätsmerkmal hin durchzuführen. Hier können beispielsweise die Parameter in der ersten Beschichtungslage optimiert auf die Haftfestigkeit

eingestellt werden und ab der zweiten Lage die Parameter auf eine gesteigerte Härte hin optimiert werden.

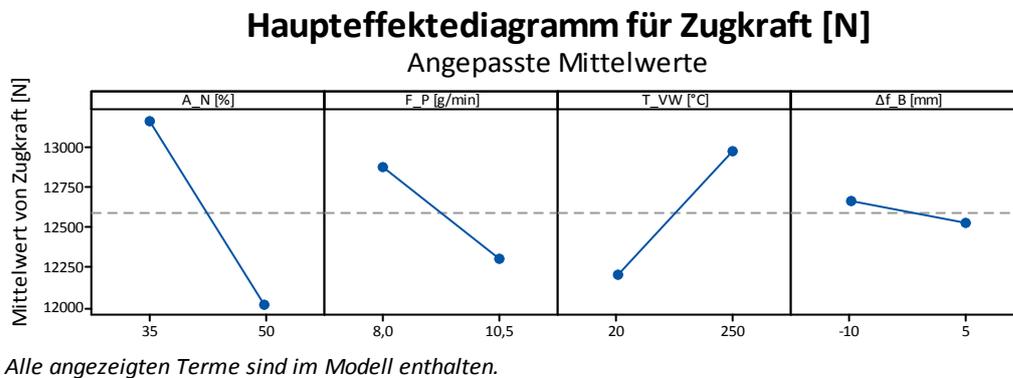
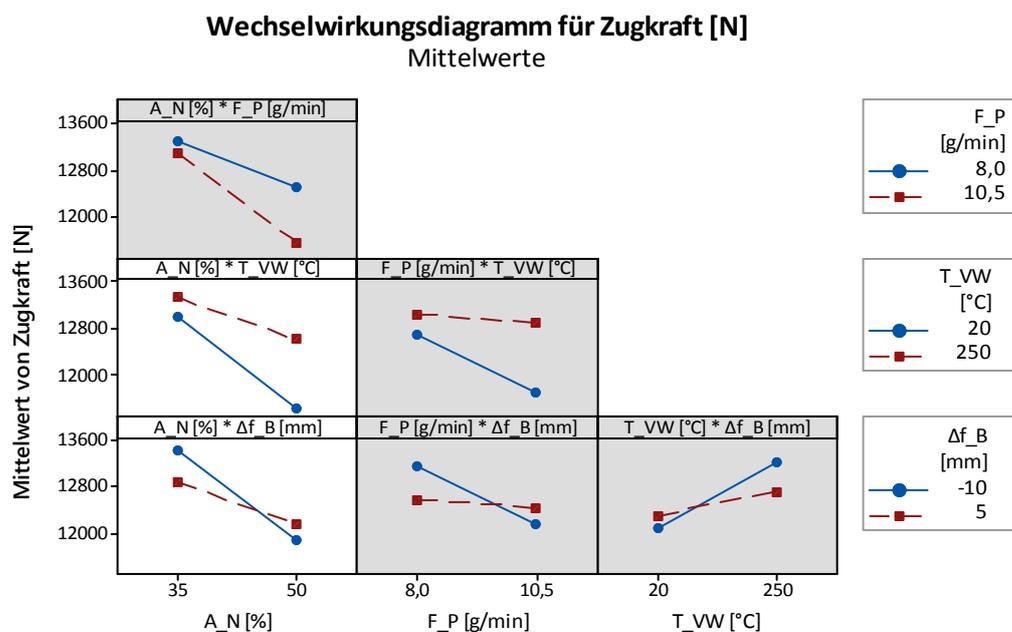


Abbildung 104 Haupteffektdiagramm für Haftfestigkeit von Cu85 auf 1.2311



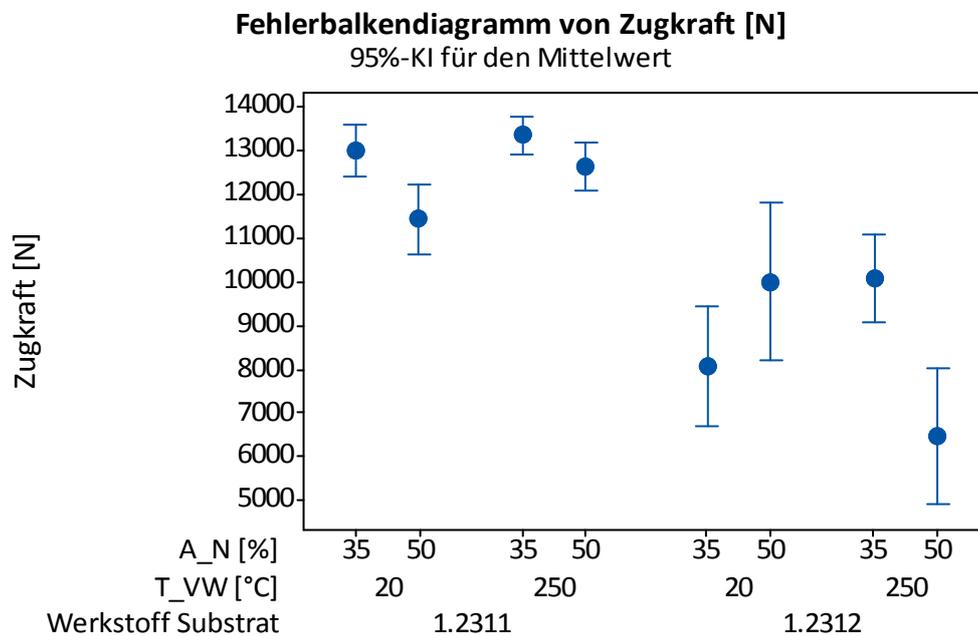
Arbeitsblatt: CU85\_1.2311\_4Fakt\_2St\_8Vers\_Haftfestigkeit

Abbildung 105 Wechselwirkungsdiagramm für Haftfestigkeit von Cu85 auf 1.2311

Eine Auswertung der Haftfestigkeit für das Substrat 1.2312 ist nicht möglich, da die Bruchfläche oftmals außerhalb des reduzierten Querschnittes im Grundmaterial verläuft (siehe Abbildung 106). Lediglich ein Parametersatz (3. von links –  $A_N=50[\%]$  /  $F_P=8$  [g/min] /  $T_{VW}=20$  [°C] /  $v=220$  [mm/min] /  $P_L=3200$  [W] /  $f_L=5000$  [Hz]) zeigt einen Bruch im Übergangsbereich. An diesem Beispiel ist ebenfalls gut ersichtlich, dass trotz zufälliger Schweißreihenfolge das Bruchverhalten innerhalb eines Parametersatzes und den drei Wiederholungen sehr gut reproduzierbar ist.



Abbildung 106 Ungültiger Haftfestigkeitsversuch CU85 auf 1.2312 – Bruch außerhalb des Prüfquerschnitts (links)  
Gültiger Haftfestigkeitsversuch CU85 auf 1.2311 – Bruch innerhalb des Prüfquerschnitts (rechts)



Zum Berechnen der Intervalle wurden die individuellen Standardabweichungen verwendet.  
Arbeitsblatt: CU85\_1.2311\_1.2312\_5Fakt\_2St\_16Vers\_Haftfestigkeit

Abbildung 107 Vergleich der maximalen Zugkraft von CU85 auf 1.2311 und 1.2312

Die im Vergleich dazu mit dem gleichen Parametersatz geschweißten Felder zeigten auf dem ähnlichen Werkzeugstahl 1.2311 ein gültiges und auswertbares Ergebnis. Vergleicht man die maximalen Zugkräfte trotz des unterschiedlichen Bruchverhaltens zwischen 1.2311 und 1.2312 so wird in Abbildung 107 deutlich, dass die Haftfestigkeit bei 1.2311 signifikant höher ist. Aufgrund des geringfügig höheren Schwefelanteils in der Legierung von 1.2312, welcher Vorteile für die Zerspanung des Werkstoffes bringt, scheint es zur massiven thermischen Schädigung des Substrates beim Laserauftragschweißen zu kommen. Somit wäre auch die Rissbildung und teilweise Delamination am getesteten Umformwerkzeug nach nur wenigen Zyklen erklärbar. Es ist daher eine

klare Empfehlung in Richtung 1.2311 als Substrat auszusprechen und der Werkzeugstahl 1.2312 zu verwerfen.

### Auswertung des Qualitätsmerkmals Verschleiß

Mittels Tribometerversuche wurde das Beschichtungssystem CU85 mit anderen PVD Beschichtungen und dem Kaltarbeitsstahl 1.2379 als Referenzwerkstoff untersucht und verglichen. Als Kontaktpartner wurde der austenitische Edelstahl 1.4301 verwendet. Die Prozessparameter wurden wie folgt gewählt:

Testmaterial	1.4301 s=1,5 mm
Pin Kontaktflächen	Ø5 mm
Vorschubgeschwindigkeit	100 mm/s
Flächenpressung	20 MPa
Weg pro Pin	360 000 mm
Schmierstoff	PL61 – ca. 2 g/m <sup>2</sup> - Aufbringen durch Aufwalzen

Getestet wurden vier Testkörper, zwei PVD Dünnschichtbeschichtungen, eine CU85 Beschichtung und der Kaltarbeitsstahl 1.2379 unbeschichtet. Die genauen Angaben sind in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19 Tribometerversuch vier unterschiedliche Werkstoffe auf 1.4301  
\* Herstellerangaben

Pin Nr.	Material	Mikrohärte HV 0,05	Reibwert trocken (Stahl)	Farbe
1	CrN + a-C:H:W	1000 / 1500*	0,1-0,2*	anthrazit
4	AlCrN-Basis	3200*	0,35*	hellgrau
5	Cu85	320	0,15*	bronze
10	1.2379	650	0,40*	silber - grau

Mittels Streifenziehversuch wurde der reale Reibwert CU85/1.4301 mit Schmierstoff ermittelt. Dieser liegt bei den zwei getesteten Backenkräften von 5 kN und 10 kN zwischen  $\mu_R=0,05$  und  $\mu_R=0,03$ .

Bei allen Proben war die zurückgelegte Weglänge zu kurz um ein Verschleißvolumen mit ausreichender Genauigkeit zu ermitteln. Jedoch konnten bei den Proben unterschiedliche Beobachtungen gemacht werden. Abbildung 108 zeigt die vier getesteten Proben vor und nach dem Triboversuch. Bei der CrN + a-C:H:W Beschichtung ist nach dem Versuch ein vollständiger Schichtabtrag festzustellen. Diese Beschichtung findet bei vielen technischen Anwendungen aufgrund ihres geringen Reibbeiwertes ihren Einsatz. Jedoch scheint die Haftfestigkeit für die gewählte Applikation nicht ausreichend zu sein. Möglich ist ebenfalls, dass die durch die Reibung entstehende Wärme die Schicht schädigt.

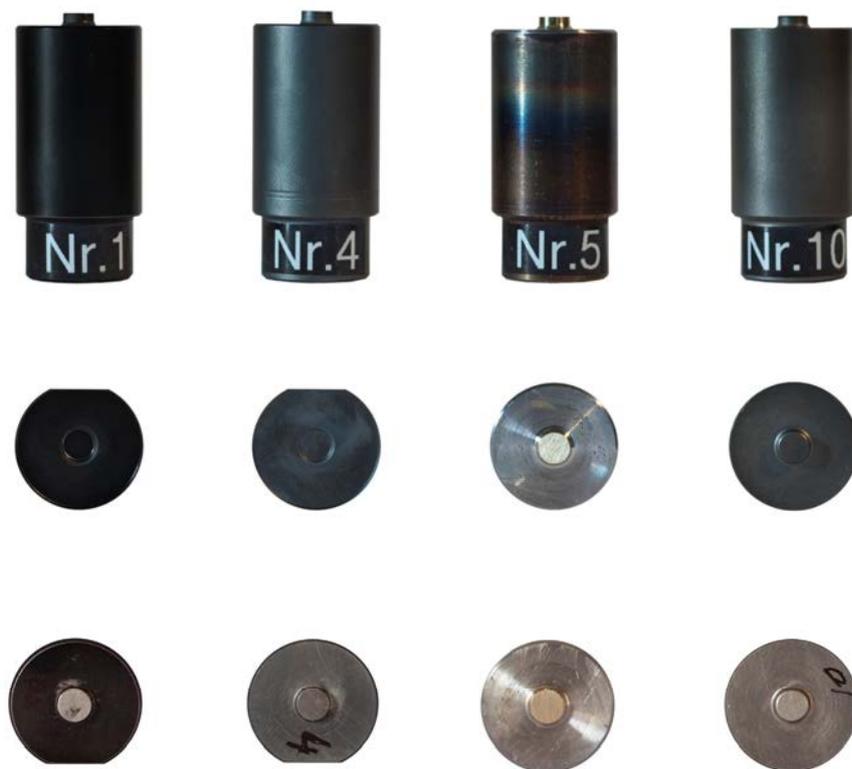


Abbildung 108 Vier Tribometerproben mit unterschiedlichen Beschichtungen vor dem Versuch (oben) – nach dem Versuch (unten)

Die PVD Beschichtung auf AlCrN-Basis zeigt zwar keinen Abtrag, jedoch sind nach den Triboversuchen in den REM-Aufnahmen deutlich Kaltaufschweißungen zu erkennen (siehe Abbildung 109).

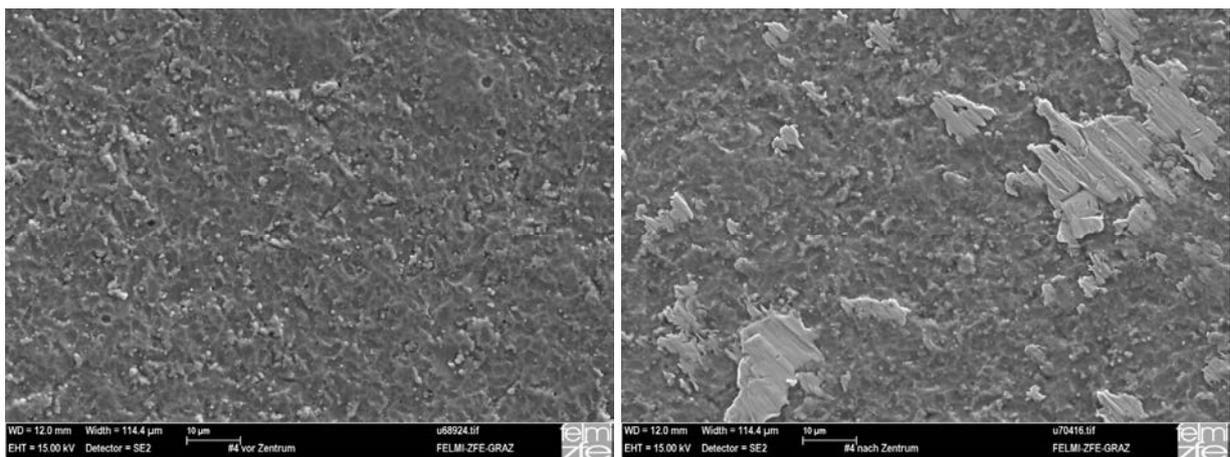


Abbildung 109 Pin Nr. 4 (AlCrN) – REM Aufnahme des Zentrums vor (links) und nach (rechts) dem Triboversuch

Die mit CU85 beschichtete Probe zeigt ebenfalls keinen signifikanten Volumenabtrag. Es ist jedoch eine leichte Zunahme der Riefenbildung in Belastungsrichtung auf den REM-Aufnahmen zu

erkennen wie in Abbildung 110 dargestellt. Nicht vorhanden ist jegliche Form von adhäsiven Verschleiß. Dies ist ein Hauptgrund warum diese Ziehbronzen vortrefflich zur Umformung von austenitischen Edelstählen eingesetzt werden. Der oftmals etwas erhöhte Verschleiß aufgrund der geringen Werkstoffhärte wird dadurch in Kauf genommen.

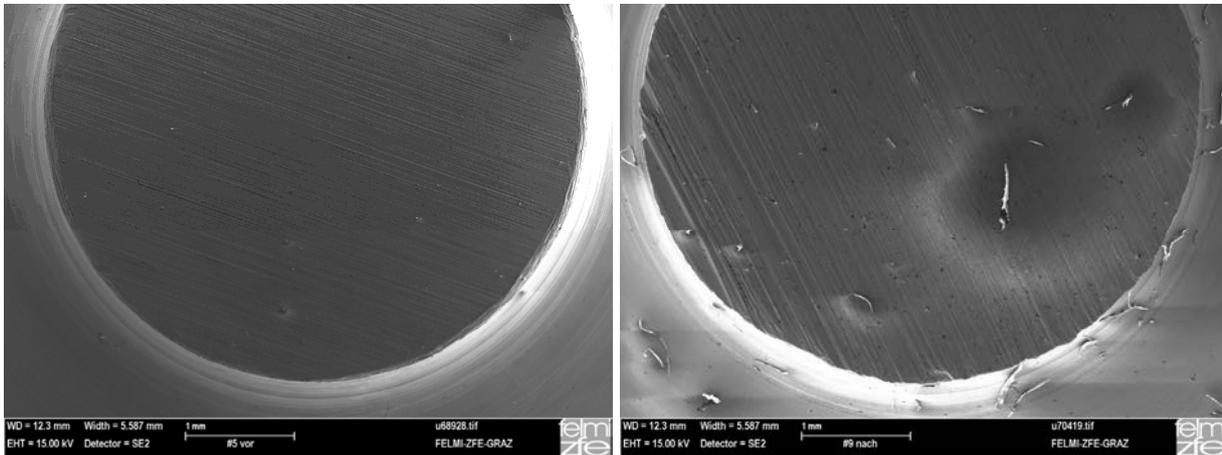


Abbildung 110 Pin Nr. 5 (CU85) – REM Aufnahme vor (links) und nach (rechts) dem Triboversuch

Auch beim Einsatz von 1.2379 sind beim durchgeführten Belastungsweg deutliche Kaltaufschweißungen aufgrund des adhäsiven Werkstoffverhaltens erkennbar (siehe Abbildung 111).

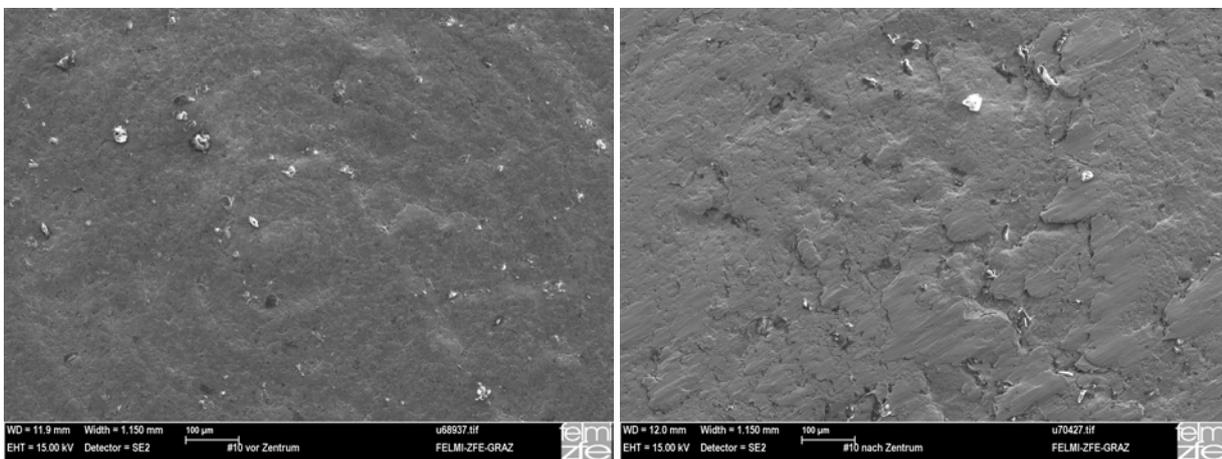


Abbildung 111 Pin Nr. 10 (1.2379 unbeschichtet) – REM Aufnahme vor (links) und nach (rechts) dem Triboversuch

Bei der Werkstoffpaarung CU85/1.4301 ist die Oberflächenbeeinträchtigung auf dem Blech ebenfalls am geringsten. Abbildung 112 zeigt eine Gegenüberstellung zweier Versuchsbleche, welche mit den gleichen Parametern aber zwei unterschiedlichen Versuchskörpern (Pin) belastet wurden. Die Werkstoffkombination CU85/1.4301 zeigt die geringsten Verschleißspuren. Die Kombination 1.2379/1.4301 führt zu massiver Riefenbildung aufgrund von Kaltaufschweißungen. Ähnliche Effekte mit Kaltarbeitsstählen wurden bereits durch Karlsson et al. (2012) beobachtet. Die

Bleche der letzteren Werkstoffkombination sind nach dem Abspinnen von der Versuchsbasis aufgrund der lokalen plastischen Deformation gekrümmt. Die beiden anderen PVD Beschichtungen führen zu ähnlichen Ergebnissen wie der getestete Kaltarbeitsstahl. Lediglich das Verschleißbild am Blech war im direkten Vergleich zu 1.2379 etwas besser, jedoch nach wie vor deutlich schlechter als die CU85 Beschichtung.

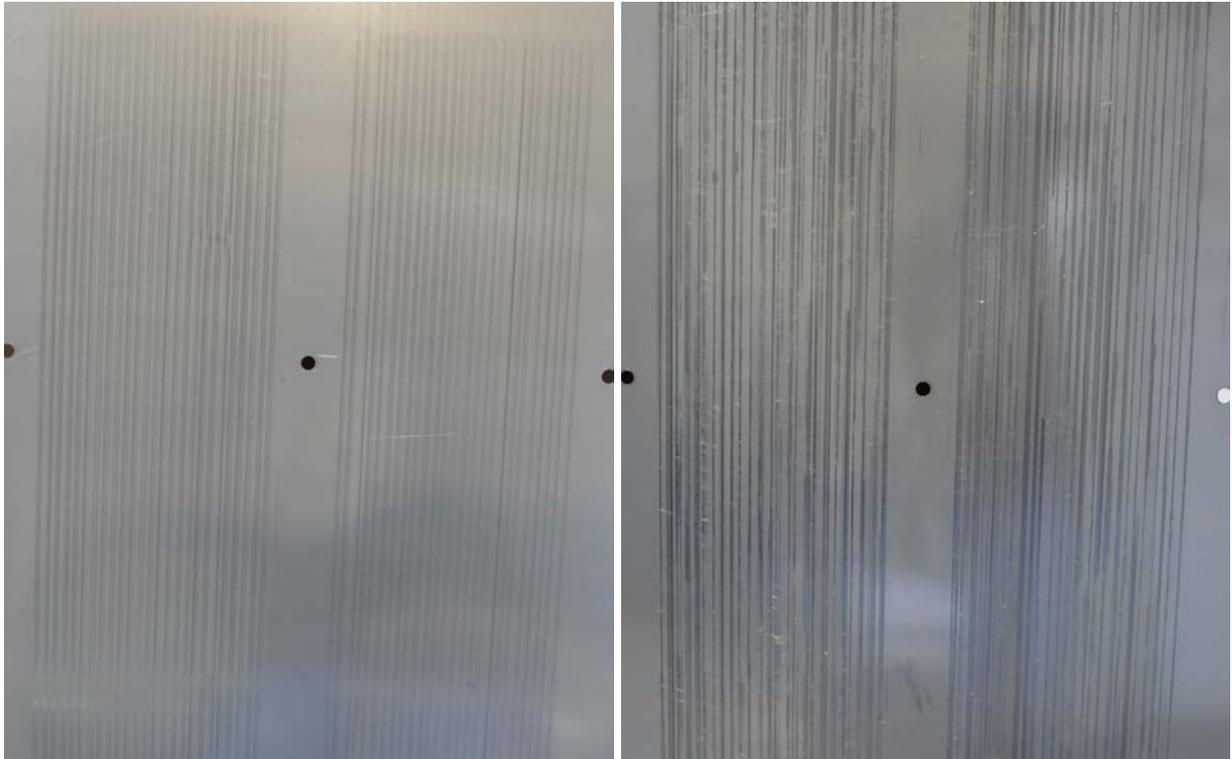


Abbildung 112 Gegenüberstellung Triboversuch – Verschleißbild auf Blech  
CU85 (Pin)/1.4301 (Blech) – links; 1.2379 (Pin)/1.4301 (Blech) - rechts

### 8.3 Nickelbasislegierungen

Beschichtungen auf Nickelbasis werden bei Anwendungen mit hohen Temperaturen und hohem Verschleißverhalten bevorzugt eingesetzt. Zudem haben sie hervorragende Korrosionsbeständigkeit auch bei höheren Einsatztemperaturen. Da in der Warmumformung Oberflächentemperaturen am Werkzeug von über 600 °C bei hoher mechanischer Belastung auftreten können, ist der Einsatz solcher Schichtsysteme interessant. Getestet wurden unterschiedliche Ni-B-Si Legierungen auf unterschiedlichen Substraten. Wobei der Auftrag auf den vergüteten Warmarbeitsstahl 1.2343 von besonderem Interesse ist.

#### Ni25 auf 1.1730, 1.7131 und 1.2343

Der Werkstoff Ni25 besitzt aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung sehr gute Schweißeigenschaften. Die Legierung ist sehr tolerant gegenüber einem großen Einstellbereich der Schweißparameter. Poren werden nur vereinzelt beobachtet. Rissbildung ist nur unter sehr kritischen Parametereinstellungen zu beobachten. Vorteilhaft scheint sich die Vorwärmung des Substrates zu erweisen. Bei  $T_{vw} \geq 250$  °C ist in allen getesteten Parametereinstellungen keine Rissbildung mehr zu beobachten. Für ein Parameterscreening wurde der teilfaktorielle Versuchsplan mit der Auflösung V gewählt wie in Tabelle 20 dargestellt.

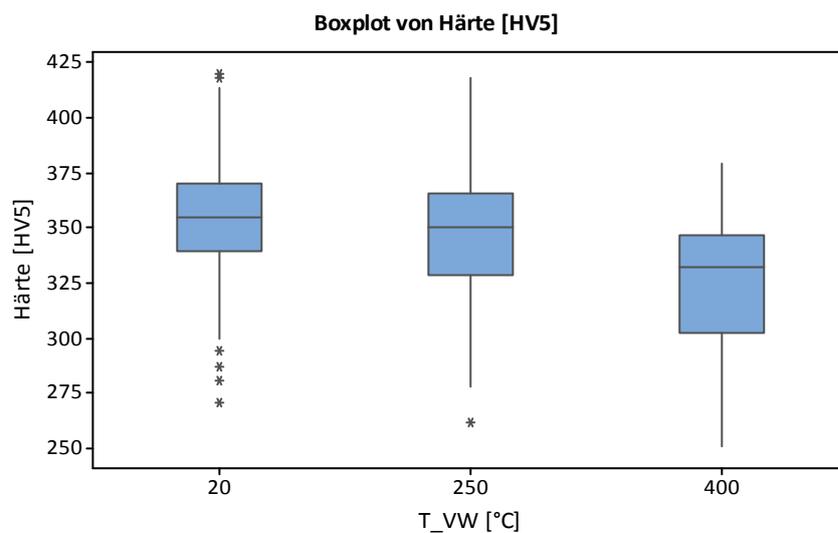
Tabelle 20 Versuchsmatrix Ni25 auf 1.1730/1.7131/1.2343, 5 Faktoren auf 2 Stufen in 16 Versuchen  
Auflösung V

Faktoren	A	B	C	D	E	Fest	Fest
Bezeichnung	v [mm/min]	O <sub>L</sub> [%]	F <sub>P</sub> [g/min]	T <sub>vw</sub> [°C]	Δf <sub>B</sub> [mm]	P <sub>L</sub> [W]	f <sub>L</sub> [Hz]
Tief	400	40	7,5	20 (250*)	-5	3200	5000
Hoch	600	60	9,25	250 (400*)	+5		

\* Werte für 1.2343

#### Auswertung des Qualitätsmerkmals Härte

Die Optimierung der Härte mittels Varianzanalyse scheint bei Ni25 und der gewählten Versuchsmatrix nicht möglich zu sein. Trotz der Auswertung von 453 Messwerten beträgt der R<sup>2</sup>-Wert des Modells lediglich 27 %. Das heißt, dass nur gut ein Viertel der Effekte anhand dieses Modells erklärt werden können und gut 70 % innerhalb der natürlichen Streubreite liegen. Der Beschichtungswerkstoff ist daher eher unempfindlich gegenüber den Einstellparametern hinsichtlich des Qualitätsmerkmals Härte. Betrachtet man die Auswertungen anhand einzelner Einstellparameter, sind jedoch leichte Tendenzen zu erkennen. Abbildung 113 zeigt den Einfluss der Vorwärmtemperatur auf die Härte der Beschichtung. Hier ist ein leichter Abfall von ca. 20HV Punkten bei hohen Verarbeitungstemperaturen zu erkennen. Bei allen anderen 4 Einstellparametern sind über die Mittelwerte keine Effekte zu erkennen.

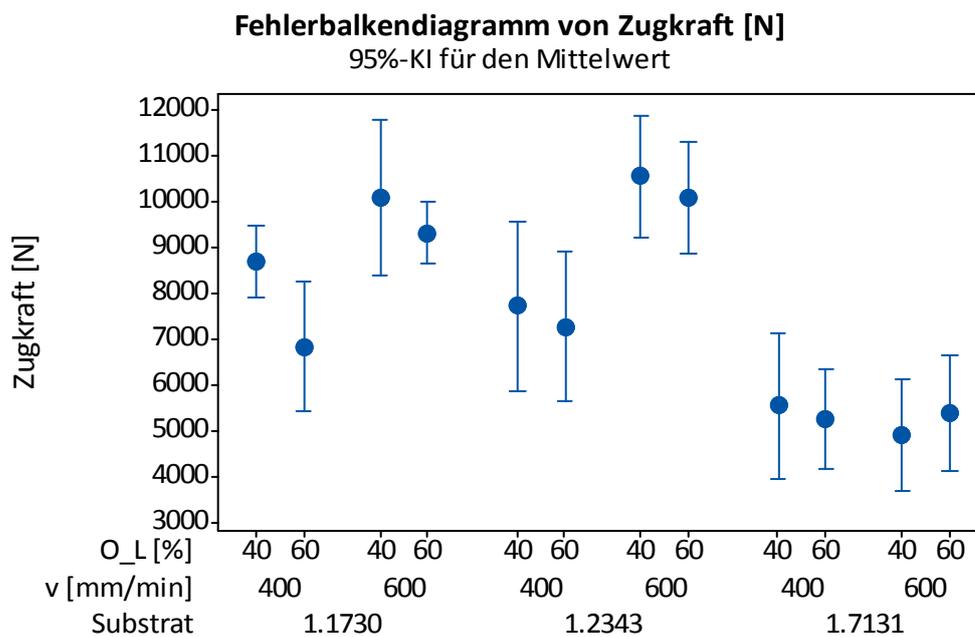


Arbeitsblatt: Ni25\_div\_5Fakt\_2St\_16Vers\_Härte\_gesamt

Abbildung 113 Auswertung Härte in Abhängigkeit der Vorwärmtemperatur für Ni25 aus insgesamt 453 Messungen

### Auswertung des Qualitätsmerkmals Zugfestigkeit

Ebenfalls sehr unterschiedlich ausgeprägt ist die Haftfestigkeit auf den drei getesteten Substraten, wie in Abbildung 114 dargestellt. Vergleicht man die Mittelwerte der erzielten Zugkräfte beim Haftfestigkeitsversuch so ist vor allem bei den Substraten 1.1730 und 1.2343 ein großer Effekt bei der gewählten Vorschubgeschwindigkeit erkennbar. Interessanterweise scheint der Einsatzstahl 1.7131 für den Nickelbasiswerkstoff nicht gut geeignet zu sein da die erreichbaren maximalen Zugkräfte im Vergleich zu den anderen Substraten nur bei gut 50 % liegen. Der Einsatzstahl wird daher für weitere Versuche verworfen. Bei allen durchgeführten Versuchen zeigt sich allgemein ein Risiko zur Rissbildung wenn ohne Vorwärmung geschweißt wurde. Eine Vorwärmung von mindestens 250 °C scheint daher auch für geringe Schichtdicken erforderlich zu sein um mit ausreichender Sicherheit im Prozessfenster des Beschichtungssystems zu liegen. Bei dem Warmarbeitsstahl 1.2343 wurden Vorwärmtemperaturen bis 400 °C getestet. Signifikanten Einfluss auf die Haftfestigkeit scheinen ebenfalls Vorschubgeschwindigkeit und der Bahnüberlappungsgrad zu haben.



Zum Berechnen der Intervalle wurden die individuellen Standardabweichungen verwendet.  
Arbeitsblatt: Ni25\_div\_5Fakt\_2St\_16Vers\_Haftfestigkeit\_gesamt

Abbildung 114 Vergleich der maximalen Zugkraft zwischen den Substraten 1.1730/1.2343/1.7131 und den zwei Einstellparametern v und O<sub>L</sub> aus 144 Versuchen

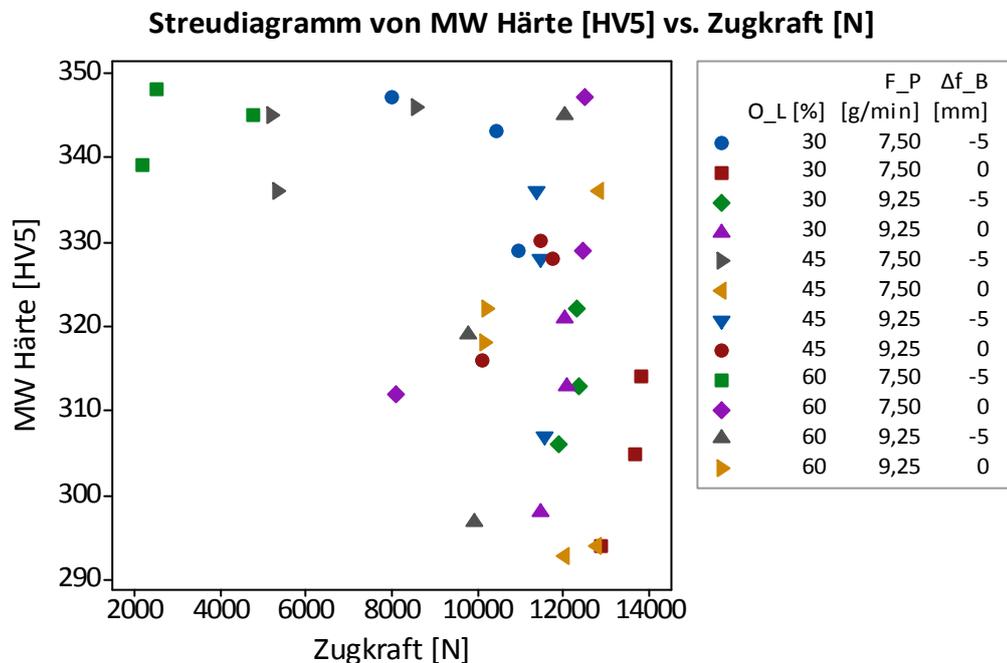
Die Variabilität der Antwortvariablen beträgt bei der Werkstoffkombination 1.1730/Ni25 R<sup>2</sup>=54 % und bei der Kombination 1.2343/Ni25 R<sup>2</sup>=77 %. Das Modell hat bei diesem Beschichtungswerkstoff eine geringere Aussagekraft als bei anderen Beschichtungswerkstoffen. Aufgrund dessen wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan mit der Kombination 1.2343/Ni25 mit drei Faktoren durchgeführt (siehe Tabelle 21). Als konstant festgelegt wurden die Parameter T<sub>vw</sub>=400 °C und v=600 mm/min, da diese im teilfaktoriellen Versuchsplan eindeutig bessere Ergebnisse und keine Wechselwirkungseffekte mit anderen Parametern zeigten. In drei Stufen variiert wurde der Bahnüberlappungsgrad, zweistufig die Pulverförderrate und die Fokusverschiebung.

Tabelle 21 Vollfaktorielle Versuchsmatrix Ni25 auf 1.2343, 3 Faktoren auf 2 oder 3 Stufen in 12 Versuchen

Faktoren	Fest	A	B	Fest	C	Fest	Fest
Bezeichnung	v [mm/min]	O <sub>L</sub> [%]	F <sub>P</sub> [g/min]	T <sub>vw</sub> [°C]	Δf <sub>B</sub> [mm]	P <sub>L</sub> [W]	f <sub>L</sub> [Hz]
Tief		30	7,5		-5		
Mittel	600	45		400		3200	5000
Hoch		60	9,25		+0		

Die Auswertung der Härte liefert auch bei diesem Versuchsdurchlauf für eine Varianzanalyse keine ausreichende Aussagekraft (R<sup>2</sup>=40 %). Betrachtet man jedoch die Gegenüberstellung von Zugkraft

und Härte, wie in Abbildung 115 dargestellt, besteht offenbar ein Zusammenhang dieser beiden Qualitätsmerkmale. So liefert eine hohe gemessene Härte sehr niedrige Haftfestigkeitswerte und umgekehrt niedrige Härtewerte durchwegs gute Haftfestigkeitswerte.

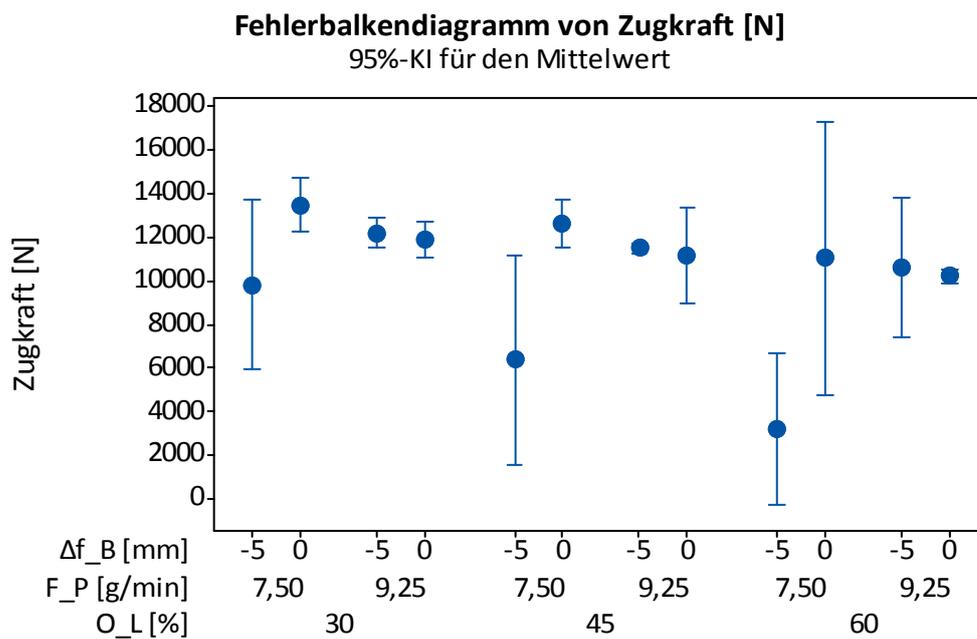


Arbeitsblatt: Ni25\_1.2343\_3Fakt\_vollfakt\_Härte\_vs\_Zugkraft

Abbildung 115 Matrixplot Zugkraft [N] vs. Mittelwert von Härte [HV5] aus drei Messungen bei unterschiedlichen Parametern

Bei der Entscheidung für die Beschichtungsparameter muss daher eine Abwägung erfolgen, welches Qualitätsmerkmal bei einem bestimmten Anwendungsfall wichtiger ist. Wird die Beschichtung in beanspruchten Bereichen für Umformwerkzeuge verwendet, ist eine klare Entscheidung zur Maximierung der Haftfestigkeit zu treffen, auch wenn dies auf Kosten der Beschichtungshärte geht. Die Gefahr, welche durch das spontane Auftreten von Rissen und Delamination der Beschichtung ausgeht ist ungleich größer als kontinuierlich erhöht auftretender Werkzeugverschleiß. Wird in mehreren Lagen beschichtet besteht jedoch wiederum die Möglichkeit in der ersten Lage eher haftfestigkeitsoptimierte Parameter und in der obersten Lage härteoptimierte Beschichtungsparameter zu verwenden.

Die Auswertung der Haftfestigkeit liefert mittels Varianzanalyse eine gute Aussage. Der Anteil der Variabilität der Antwortvariablen liegt bei  $R^2=87\%$ . Betrachtet man zunächst die Mittelwerte der einzelnen Parameter wie in Abbildung 116 gezeigt, so zeigt ein geringer Bahnüberlappungsgrad von 30 %, sowie eine Pulverfördertrate von 7,5 g/min und eine Fokusverschiebung von 0 mm die besten Resultate. Auffällig schwach scheint die Faktorkombination mit  $F_P=7,5$  [g/min]  $\Delta f_B=-5$  [mm] bei allen Überlappungsgraden.

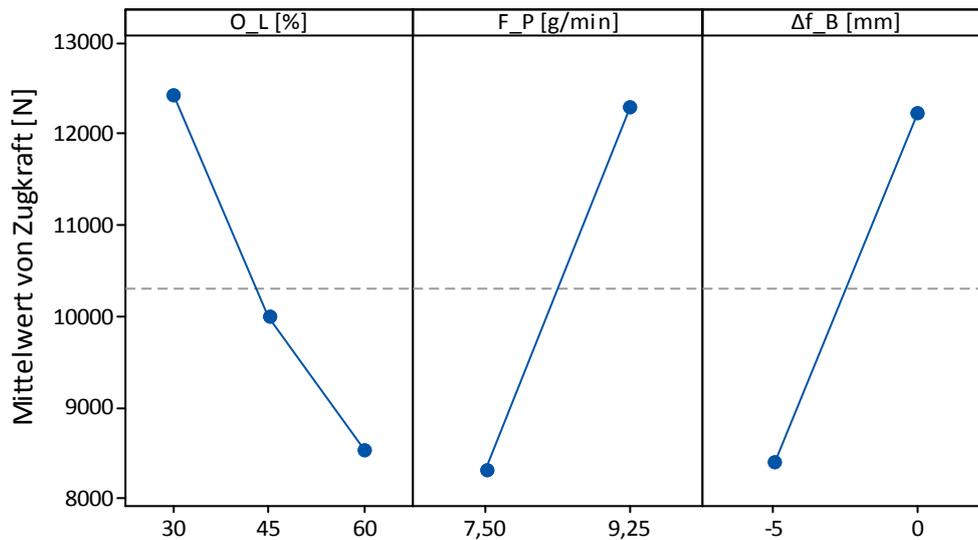


Zum Berechnen der Intervalle wurden die individuellen Standardabweichungen verwendet.  
Arbeitsblatt: Ni25\_1.2343\_3Fakt\_vollfakt\_Haftfestigkeit\_Block

Abbildung 116 Mittelwerte von Zugkraft Ni25 auf 1.2343 in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameter

Haupteffekt- und Wechselwirkungsdiagramme sind in Abbildung 117 und Abbildung 118 dargestellt. Die Haftfestigkeitsauswertung scheint bei sehr dünn geschweißten Lagen bessere Ergebnisse zu liefern. Für eine geforderte Beschichtungsdicke sind dafür mehrere Lagen aufzutragen. Für ein maximales Ergebnis des Qualitätsmerkmals Haftfestigkeit sind ein hoher Vorschub und ein geringer Bahnüberlappungsgrad in jedem Fall vorteilhaft. Mit den Faktoren Pulverfördererrate und Fokusverschiebung bestehen leichte Wechselwirkungseffekte. Die Entscheidung hier ist individuell zu treffen. Bemerkenswert ist jedoch, dass zwischen dem schlechtesten und besten Parametersatz die Haftfestigkeit um den Faktor vier auseinander liegt.

**Haupteffektdiagramm für Zugkraft [N]**  
Angepasste Mittelwerte

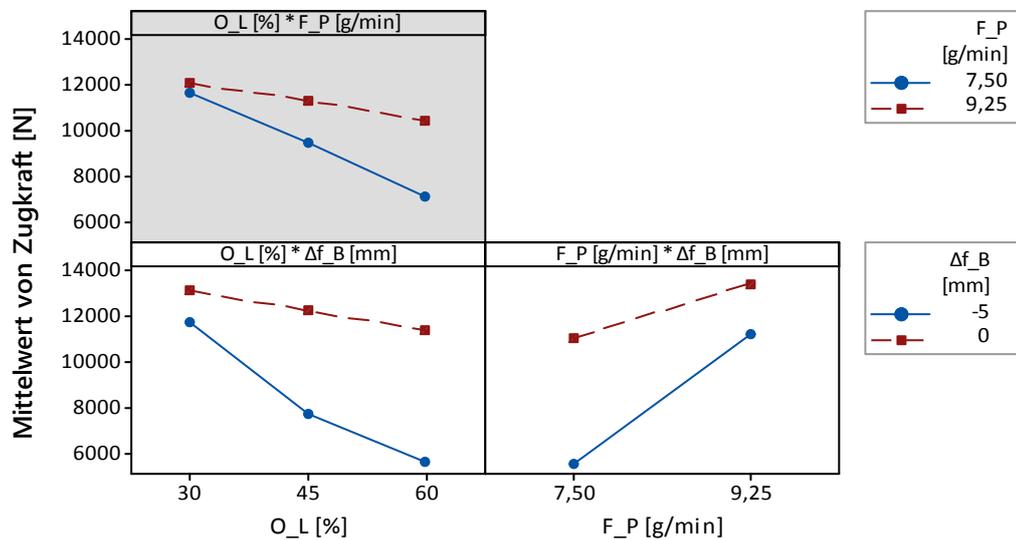


Alle angezeigten Terme sind im Modell enthalten.

Arbeitsblatt: Ni25\_1.2343\_3Fakt\_vollfakt\_Haftfestigkeit\_Block

Abbildung 117 Haupteffektdiagramm für Haftfestigkeit von Ni25 auf 1.2343

**Wechselwirkungsdiagramm für Zugkraft [N]**  
Mittelwerte



Ein grauer Hintergrund stellt einen nicht im Modell enthaltenen Term dar.

Arbeitsblatt: Ni25\_1.2343\_3Fakt\_vollfakt\_Haftfestigkeit\_Block

Abbildung 118 Wechselwirkungsdiagramm für Haftfestigkeit von Ni25 auf 1.2343, die Wechselwirkung  $O_L \times F_P$  liegt unterhalb des Signifikanzniveaus von 5 %



---

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Weg zur Optimierung von Schichten welche mittels Laserauftragschweißen erzeugt werden dargestellt. Der LMD Prozess wird seit einigen Jahren industriell eingesetzt, jedoch werden derzeit nur Schichtsysteme und Werkstoffkombinationen verarbeitet die mehr oder weniger durch Trial-and-Error Methoden entwickelt und getestet wurden. Herkömmliche Beurteilungsmethoden wie Rissprüfung, Härtemessung und die Bewertung von Querschliffen reichen oft nicht aus, um den hohen mechanischen Anforderungen immer gerecht zu werden. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit neue standardisierte Prüfmethode zur Evaluierung und Optimierung von LMD Schichten entwickelt. Ein sehr hilfreiches Werkzeug stellt die Haftfestigkeitsmessung der Beschichtung auf dem Substratmaterial dar. Durch diese kann mit relativ geringen Aufwand ein Beschichtungssystem bzw. eine Werkstoffkombination quantitativ bewertet werden. Die Ergebnisse können erstens zur grundlegenden Entscheidung dienen ob eine Werkstoffpaarung überhaupt sinnvoll verarbeitet werden kann. Zweitens können sie zur Verbesserungen der Beschichtungsparameter mittels statistischer Versuchsplanung verwendet werden. Dadurch lassen sich viele neue Substrat-Beschichtungs-Kombinationen schnell und effektiv beurteilen und verbessern. Das Optimierungspotential der Haftfestigkeit innerhalb eines stabilen Prozessfensters lag in jedem Fall der bisher durchgeführten Versuche im zwei- bis dreistelligen Prozentbereich, was eine enormes Verbesserungspotential solcher Schichtsysteme in sich birgt. Eine optimierte Haftfestigkeit bedeutet eine höhere Belastungsfähigkeit, bzw. eine höhere Lebensdauer der beschichteten Werkstücke. Gerade beim Einsatz in Umformwerkzeugen ist dies von hoher Wichtigkeit. Auch die Härte der Schicht kann mittels DoE optimiert und gesteigert werden, auch wenn die Effekte nicht so eindeutig berechenbar sind wie bei der Haftfestigkeit, ergibt sich vielfach ein signifikantes Verbesserungspotential. Wenn sich die Schweißparameter für eine hohe Haftfestigkeit und eine hohe Härte entgegengesetzt auswirken, so muss ein Kompromiss oder eine Gewichtung für die gewünschte Zielgröße durchgeführt werden. In den meisten Fällen sollte die Entscheidung zur Festlegung der Beschichtungsparameter für eine höhere Haftfestigkeit und dafür eine geringere Härte getroffen werden. Wird jedoch in mehreren Lagen geschweißt, kann man durch eine sorgfältige Veränderung der Einstellparameter versuchen, beide Qualitätsmerkmale in den jeweiligen Beschichtungszonen zu verbessern.

Im Anwendungsgebiet der Umformtechnik ist die tribologische Bewertung von Werkzeugoberflächen von großer Wichtigkeit. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls ein Triboversuch entwickelt um ein beanspruchungsgerechtes und möglichst realitätsnahes Ersatzmodell abzubilden. Mit Hilfe von diesem Versuch lassen sich LMD-Schichten für Kaltumformprozesse im Vergleich zu anderen Beschichtungsarten und Werkstoffen direkt vergleichen und bewerten. Vorteil hier ist, dass mit dem gleichen Halbzeug (Blech) als Kontaktpartner gearbeitet wird wie im realen Tiefziehprozess. Ebenfalls können die gleichen eingesetzten Schmierstoffe verwendet werden. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen bilden ebenfalls eine Entscheidungsgrundlage ob ein spezifischer Einsatz einer Laserbeschichtungen Sinn macht.

Der LMD Prozess wird bereits in unterschiedlichen Applikationsgebieten für die Umformung von Blechwerkstoffen eingesetzt. Beispielsweise wurde die Anwendung einer Kupfer-Aluminium-Bronze-Beschichtung zum Tiefziehen von austenitischen Edeltählen umgesetzt. Des Weiteren gibt es noch einige andere Einsatzgebiete in der Kaltumformung. Vor allem wo kurzfristige Geometrieänderungen oder lokale Reparaturen von Werkzeugen durchgeführt werden müssen zeigt das Verfahren seine Stärken.

Interessant ist der Einsatz von verschleißfesten, karbidisch verstärkten Schichtsystem für die Warmblechumformung. Vor allem bei der Verarbeitung von unbeschichteten Mangan-Bor-Stählen tritt während der Erwärmung und der Zeit des Bauteiltransfers Zunderbildung auf, die auf die Umformwerkzeuge stark abrasiv wirkt. Untersuchungen haben gezeigt, dass diese hoch belasteten Werkzeugzonen mittels Laserauftragschweißen mit einer Wolframkarbidschicht partiell beschichtet werden können. Durch eine mehrphasige Beschichtungsstrategie mit Zwischenbearbeitungsschritten, lässt sich diese Schicht mit einem möglichst endmaßnahen Übermaß aufbringen. Im Einsatz zeigen diese verstärkten Bereiche deutlich geringeren Werkzeugverschleiß. Langzeituntersuchungen zur Bewertung der genauen Verschleißrate und der Zyklenfestigkeit sind derzeit noch Gegenstand von weiteren Untersuchungen. Bei den gefertigten Versuchswerkzeugen hat sich ebenfalls gezeigt, dass der letzte Bearbeitungsschritt zum Fertigmaß eine große Herausforderung an die Zerspanungstechnik darstellt. Schleifen und Funkenerosion wurden bereits erfolgreich getestet. Erste erfolgreiche Fräsversuche von Hartmetall sind in den letzten Jahren bereits mehrfach öffentlich vorgestellt worden. Bei der partiellen Beschichtung von Warmformwerkzeugen mit Wolframkarbiden sind noch Versuche mit speziellen Fräswerkzeugen durchzuführen um eventuell noch kürzere Bearbeitungszeiten und niedrigere Fertigungskosten zu erzielen.

Das entwickelte Bewertungsmodell für laserauftraggeschweißte Beschichtungen bietet sich ebenfalls an um Technologiedatenbanken zu erstellen um einen breiteren industriellen Einsatz zu ermöglichen. Durch die Auswertung der Versuchsdaten lassen sich ohne großen Aufwand Empfehlungen für den Anwender ableiten und dokumentieren. Ebenfalls ist die Haftfestigkeit zur Bewertung einer LMD-Schicht als neue Kenngröße unbedingt mit zu betrachten.

Ein Blick auf die derzeitige Entwicklung der additiven Fertigungsverfahren zeigt das enorme Potential dieser Verfahren. Viele Entwicklungsschritte sind noch ausständig um ein besseres und vollständiges Verständnis für diese Prozesse zu bekommen. Auch das Laserauftragschweißen wird sich vermutlich noch wesentlich weiter entwickeln und viele neue Anwendungsgebiete erschließen.

---

## Abkürzungsverzeichnis

AHSS	Advanced High Strength Steel
CVD	Chemical Vapour Deposition
cw	Continuous Wave
DLC	Direct Laser Cladding
DLC	Diamond-like Carbon (amorphe Kohlenstoffschichten)
DMD	Direct Metal Deposition
EDM	Electro Discharge Machining
HSC	High speed cutting
i.O.	In Ordnung
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LMB	Lasermaterialbearbeitung
LMD	Laser Metal Deposition
LPA	Laser-Pulver-Auftragschweißen
LRM	Laser Rapid Manufacturing
MSG	Metall-Schutzgas-Schweißen
n.i.O	Nicht in Ordnung
PM	Pulvermetallurgie
PPA	Plasma-Pulver-Auftragschweißen
PTA	Plasma-Transferred-Arc
PVD	Physical Vapour Deposition
pw	Pulse Wave
REM	Rasterelektronenmikroskop
SLC	Selective Laser Melting
TEM-Moden	Transversalen-Elektro-Magnetischen Moden
UHSS	Ultra High Strength Steel
UKP	Ultra Kurzpuls
WBH	Wärmebehandlung
WIG	Wolfram-Inert-Gas-Schweißen

---

## Stahl Kurzbezeichnungen

BH	Bake hardenable
CMn	Carbon Manganese
CP	Complex phase
DP	Dual phase
HSLA	High Strength, low alloy
IF, HS-IF	Interstitial Free
IS	Isotropic
Mart	Martensitic
TRIP	Transformation induced plasticity

---

## Formelverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
Größen der Lasertechnik bzw. des Laserauftragschweißens		
$\lambda$	[m]	Wellenlänge
$\varepsilon$	[–]	Abweichung
$\theta_0$	[rad]	Fernfelddivergenz
$A_B$	[mm <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche der Vermischungszone
$A_C$	[mm <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche einer einzelnen Schweißraupe
$A_N$	[%]	Aspektverhältnis
$D_C$	[%]	Vermischungsgrad
$E_S$	$\left[\frac{J}{m}\right]$	Streckenenergie
$F_P$	$\left[\frac{g}{min}\right]$	Pulverförderrate
$F_{Ps}$	$\left[\frac{g}{mm}\right]$	Pulver-Weg-Rate
$M^2$	[–]	Beugungsmaßzahl
$O_L$	[%]	Bahnüberlappungsgrad
$P_L$	[W]	Laserleistung
$P_{abs}$	[W]	Absorbierte Laserleistung
$S_L$	[%]	Bahnabstandsfaktor
$T_{VW}$	[°C]	Vorwärmtemperatur
$b$	[mm]	Schweißlinienbreite
$c_{ij}$	[–]	Modellkonstanten
$d_L$	[mm]	Bahnmittenabstand zwischen Schweißlinien
$\Delta f_B$	[mm]	Fokusverschiebung

---

Symbol	Einheit	Beschreibung
$f_L$	[Hz]	Tastfrequenz Laser
$h_1$	[mm]	Schweißlinienhöhe
$h_2$	[mm]	Einbrandtiefe in Substrat
$s_{Coating}$	[mm]	Dicke der gesamten LMD Beschichtung
$s_{Layer}$	[mm]	Dicke einer LMD Beschichtungslage
$v$	$\left[\frac{mm}{min}\right]$	Vorschubgeschwindigkeit
$w_0$	[m]	Strahltaillen-Radius
$x_i$	[-]	Eingangsgröße
$y$	[-]	Qualitätsmerkmal
$z_R$	[m]	Halbe Rayleigh-Länge

Größen der Umformtechnik

$F_N$	[N]	Normalkraft
$F_R$	[N]	Reibkraft
$k_f$	[MPa]	Fließspannung
$k$	[MPa]	Schubfließgrenze
$\mu_R$	[-]	Reibbeiwert
$\tau_R$	[MPa]	Reibschubspannung

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Systemanalytische Darstellung eines tribologischen Systems, Darstellung nach (Czichos und Habig 2010, S. 8ff).....	6
Abbildung 2	Stribeck Kurve in Abhängigkeit von Reibungszahl und Relativgeschwindigkeit (Birkhofer und Kümmerle 2012, S. 24) .....	6
Abbildung 3	Darstellung Reibgesetz nach Orowan (Klocke und König 2006, S. 136) .....	7
Abbildung 4	Schematische Darstellung von Verschleißverläufen bei unterschiedlichen Mechanismen (Sommer et al. 2014, S. 29).....	9
Abbildung 5	Adhäsiver Verschleiß - Werkstoffübertragung auf einen gehärteten Werkstoff (links) Schubrisse auf einer ZStE 300 Probe verursacht durch eine gehärtete 100Cr6 Scheibe (rechts) (Sommer et al. 2014, S. 17).....	10
Abbildung 6	Unterschiedliche Auswirkungen von Abrasion (Zum Gahr 1998).....	11
Abbildung 7	Tribochemischer Verschleiß - Oxidationsprodukte auf der Gleitfläche des Probenkörpers aus Mn-legiertem Einsatzstahl (Sommer et al. 2014, S. 113) ...	12
Abbildung 8	Beispiel von Oberflächenzerrüttung an Stahlkörper verursacht durch Gleitverschleiß (Czichos und Habig 2010, S. 642).....	13
Abbildung 9	Werkzeugaufbau zum Ziehen einer Napfgeometrie (Klocke und König 2006, S. 324) .....	14
Abbildung 10	Vergleich Bauweise Tiefziehwerkzeug – Monoblock- versus Segmentbauweise (Doege und Behrens 2010, S. 329).....	15
Abbildung 11	Darstellung eines gekühlten Unterwerkzeugs (Stempel) in Segmentbauweise (Weiß 2013, S. 12).....	18
Abbildung 12	Einteilung von Blechwerkstoffen hinsichtlich ihrer maximalen Dehnung und Streckgrenze Darstellung nach World Steel Association (2001, S. 66) .....	18
Abbildung 13	Kaltverschweißneigung von 1.2379 (900HV1) in Abhängigkeit von unterschiedlichen Oberflächenstrukturen - (Podgornik und Jerina 2012).....	22
Abbildung 14	Verschleißschutzschichten und Beschichtungsverfahren für die Umformtechnik (Westheide et al. 1993, S. 670).....	23
Abbildung 15	Schematische Darstellung PVD Prozess (Bobzin et al. 2010, S. 89).....	24
Abbildung 16	Ritztest Ergebnisse bei unterschiedlichen Beschichtungsvarianten auf Kaltarbeitsstahl 1.2379 gehärtet auf $60 \pm 2$ HRC (Sresomroeng et al. 2010).....	25
Abbildung 17	Unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten bei durchgeführten Polierverfahren nach Beschichtung (links) und deren Auswirkungen auf die kritische Last	

---

	hinsichtlich Materialübergang (kaltverschweißen) von dem Werkstoff 1.4301 auf den jeweiligen Kaltarbeitsstahl (Podgornik et al. 2006).....	26
Abbildung 18	Werkzeugverschleiß nach Presshärten von 150 Stk. AISi beschichteten 22MnB5 Blechen (Kondratiuk und Kuhn 2011) .....	26
Abbildung 19	Prinzipdarstellung von Absorption und Emission (Bliedtner et al. 2013, S. 22).	29
Abbildung 20	Grundlegender Aufbau eines Resonators, Darstellung nach Buchfink und Leibinger-Kammüller (2006, S. 34).....	30
Abbildung 21	Intensitätsverteilung transversaler Moden für eine Rechteckgeometrie mit den Ordnungszahlen m,n für eine Kreisgeometrie mit den Ordnungszahlen p,l (Bliedtner et al. 2013, S. 34) .....	31
Abbildung 22	Eigenschaften der Strahltaile, Darstellung nach Buchfink und Leibinger-Kammüller (2006, S. 44).....	31
Abbildung 23	Wechselwirkungsprinzip zwischen Laserstrahl und Festkörper .....	34
Abbildung 24	Absorptionsgrad unterschiedlicher Lasertypen und Werkstoffe (Fahrenwaldt et al. 2014, S. 91).....	35
Abbildung 25	Laserintensität und Einwirkungsdauer für ausgewählte Bearbeitungsverfahren (Bliedtner et al. 2013, S. 112) .....	37
Abbildung 26	Funktionsprinzip Laserauftragschweißen .....	40
Abbildung 27	Wärmeleitungsschweißen versus Tiefschweißen (Fahrenwaldt et al. 2014, S. 92) .....	41
Abbildung 28	Unterschiedliche Arten der Zuführung von Schweißzusätzen (Toyserkani et al. 2005, S. 36) .....	42
Abbildung 29	Laserzelle zum Auftragschweißen am Institut für Werkzeugtechnik und Spanlose Produktion .....	49
Abbildung 30	Programmierung eines Beispielwerkstück in TruTops Cell mit dreilagiger Beschichtung von 2 Flächen.....	50
Abbildung 31	Laserresonator doppelt quadratisch gefaltet (US Umlenkspiegel, RS Rückkoppelspiegel, AS Auskoppelspiegel) Trumpf Lasertechnik (2006, S. 3–4).	51
Abbildung 32	Vermessung der Laserkaustik in unterschiedlichen Fokusalagen.....	52
Abbildung 33	Adaptiver Cu - Umlenkspiegel zur Verschiebung des Brennpunktes (links) Modenschuss – zur Darstellung der Leistungsverteilung TEM <sub>00</sub> (rechts).....	52
Abbildung 34	Pulverfördereinheit Außenansicht (links) – Füllkammer (rechts).....	53
Abbildung 35	Schematische Darstellung des eingesetzten Pulverförderers Darstellung nach Toyserkani et al. (2005, S. 79).....	54

---

---

Abbildung 36	Zyklonabscheider mit Drosselventil zur Differenzdruckregelung .....	55
Abbildung 37	Partikelgeschwindigkeit in Abhängigkeit des statischen Differenzdrucks und unterschiedlichen Pulverförderraten .....	55
Abbildung 38	Pulversplitter zum Aufteilen eines Massestroms in möglichst vier gleiche Teilströme.....	56
Abbildung 39	Verschiedene Bearbeitungsoptiken für die Versuchsanlage Vierstrahldüse, Ringspaldüse und Einstrahldüse (vorne, v.l.n.r.) Mittelteil zur Abtrennung des Strahlengangs und Schneiddüse (hinten, v.l.n.r.).....	57
Abbildung 40	Laseroptik mit Festkörpergelenken zur koaxialen Justierung des Pulverstrahls Integration der zwei Gelenke in die Optik (links) – FEM-Auslegung des Gelenks / Darstellung der Verschiebungen bei maximaler Auslenkung in mm (rechts) ....	58
Abbildung 41	Schweißoptik mit wassergekühlter Ringspaldüse, Pulver- und Schutzgaszufuhr .....	59
Abbildung 42	Gegenüberstellung Vierstrahldüse (li. o.) – Ringspaldüse (re. o.) Einstrahldüse (li. u.) – Ringspaldüse Maschinenhersteller (re.u.).....	60
Abbildung 43	Schema des Regelkreises zur Anpassung der Laserleistung.....	61
Abbildung 44	Kupfer-Wärmplatte .....	62
Abbildung 45	Aufheizverhalten einer C45 Flachprobe (100x60x20mm) bei unterschiedlichen Regeltemperaturen ohne Isolationsdecken .....	63
Abbildung 46	Temperierbares Versuchswerkzeug mit partieller CU85 Beschichtung.....	65
Abbildung 47	LMD beschichteter Blechhalter für die Umformung von 1.4301 / CU85 auf 1.2311 .....	66
Abbildung 48	Warmformversuche von 1.4034 mit einem vergüteten 1.2379 Werkzeugstahl extreme Aufschweißungen nach einem Hub (links) geformtes Bauteil mit deutlichen Ziehspuren (rechts).....	67
Abbildung 49	Warmformversuche von 1.4034 mit CU85 beschichteten Werkzeugelement geformtes Bauteil mit Materialablagerungen (links) starker abrasiver Verschleiß am Werkzeug (rechts) .....	68
Abbildung 50	Schicht- und Härteverlauf im Querschnitt CU85 mit WoKa auf 1.1730 .....	68
Abbildung 51	100% Wolframkarbide in einer Cu85 Matrix auf Toolox 33 Pressgehärtete U-Profil-Teile (links) Werkzeugsegment mit Wolframkarbiden (rechts) – kein Verschleiß erkennbar.....	69
Abbildung 52	Warmformwerkzeug aus Cr7V mit ausgeprägter Verschleißzone am Ziehradius.....	69

---

---

Abbildung 53	Schichtaufbau 1.2343 (Substrat) – Ni25 Beschichtung mit Wolframkarbiden (links) Detailbild der eingeschmolzenen sphärischen Wolframkarbidpartikeln (rechts).....	70
Abbildung 54	Beschichtetes Musterbauteil 1.2343/Ni25/Wolframkarbide vor der Endbearbeitung.....	70
Abbildung 55	Querschnitt eines Versuchskörpers mit unterschiedlichen Kühlkanalgeometrien.....	72
Abbildung 56	Ebene Versuchsplatte mit verschweißten oberflächennahen Kühlkanälen .....	73
Abbildung 57	Rissbildung während der Erstarrung in einer LMD Probe (Substrat: 1.0570 / Beschichtungswerkstoff: MicroMelt H13).....	76
Abbildung 58	Spannungsinduzierte Rissbildung nach der Erstarrung einer Nickelbasislegierung mittels LMD-Prozess aufgetragen.....	77
Abbildung 59	Rissbildung in beschichteten Werkzeugkomponenten Ziehring CU85 auf 1.2312 (links) Schmiedewerkzeug Stellite 21 auf 1.2714 (rechts) .....	78
Abbildung 60	Extreme Porenbildung auf Versuchskörper bei unterschiedlichen Schweißparametern, Substrat: 1.1730 / Beschichtungswerkstoff: NT FeV12 (links); Sichtbare Porenbildung im Querschliff, Substrat: 1.0570 / Beschichtungswerkstoff: MicroMelt T15 (rechts) .....	79
Abbildung 61	Fast vollständige Delamination einer Beschichtungsfläche auf Versuchskörper während der Zerspanung; Substrat: 1.1730 / Beschichtungswerkstoff: NT Ni60 (links); Sichtbare Delamination im Querschliff, Substrat: 1.2767 / Beschichtungswerkstoff: Sulzer Metco WOKA 51102 (rechts).....	80
Abbildung 62	Härteverlauf unterschiedlicher Schichtsysteme Substrat: 1.2767 / Beschichtungswerkstoff: CPM 1V max. Härte ca 800 HV <sub>10</sub> (links) Substrat: 1.0570 / Beschichtungswerkstoff: CU85 max. Härte ca 350 HV <sub>0,1</sub> (rechts).....	81
Abbildung 63	Farbeindringprüfung an LMD Probenkörper Probe LPW1V auf 1.1730 (rechts) zwei längsverlaufende Risse sind deutlich zu erkennen Probe CPM10V auf 1.2379 (links) dichtes Rissnetzwerk.....	83
Abbildung 64	Prinzip der Vickershärteprüfung (Macherauch und Zoch 2014, S. 72) .....	83
Abbildung 65	GE Krautkrämer TIV105 Härteprüfgerät .....	84
Abbildung 66	Maschinen zur Probenaufbereitung Schneidmaschine (links), Schleif- und Poliermaschine (rechts) .....	85
Abbildung 67	Beispiel eines Querschliffes einer LMD Probe unten Substrat – oben Beschichtungswerkstoff .....	85
Abbildung 68	Detail Zugprüfversuch zur Ermittlung der Haftfestigkeit von LMD Schichten .....	87

---

---

Abbildung 69	Querschnitt des Haftfestigkeitsprüfstand .....	88
Abbildung 70	Versuchskörper vor und nach Zugversuch.....	89
Abbildung 71	Detail Prüfkörper zur Ermittlung der Scherfestigkeit.....	90
Abbildung 72	Detail Prüfstand für Scherfestigkeit (links) Probenkörper für Scherfestigkeit (rechts) .....	90
Abbildung 73	Tribomodul für Bearbeitungszentrum.....	91
Abbildung 74	Eingespannter Versuchskörper im Tribomodul (links) Blechwerkstoff nach Test (rechts) .....	92
Abbildung 75	Pin mit LMD Beschichtung CU85 mit Wolframkarbiden – vor Triboversuche....	93
Abbildung 76	Pin mit LMD Beschichtung CU85 mit Wolframkarbiden getestet auf 1.4301 Blech nach Triboversuch.....	93
Abbildung 77	Einfließende Prozessparameter beim Laserauftragschweißen .....	96
Abbildung 78	Standardisierte Linienprobe für 16 unterschiedliche Schweißparameter zur Evaluierung.....	100
Abbildung 79	Geometriegrößen des Querschnitts einer Linienraupe .....	101
Abbildung 80	Flächenversuche auf Standardprobenkörper mit unterschiedlichen Parametern (Ferro55 auf 1.7131 zwei Lagen) .....	101
Abbildung 81	12 Versuchsflächen auf standardisierter Probe – 4 Parametersätze à 3 Wiederholungen .....	102
Abbildung 82	Haupteffektdiagramm starker Effekt bei Faktorvariation A (links) – schwacher Effekt bei Faktorvariation B (rechts) .....	107
Abbildung 83	Wechselwirkungsdiagramm stark ausgeprägte Wechselwirkung (links) – sehr schwache Wechselwirkung (rechts) .....	107
Abbildung 84	Ferro55 auf 1.1730 Vierflächen Vorversuch mit Parametervariation .....	112
Abbildung 85	Effektdiagramm auf die Härte von Ferro55 auf 1.1730.....	113
Abbildung 86	Residuendiagramme für Härte von Ferro55 auf 1.1730 .....	114
Abbildung 87	Haupteffektdiagramm für Härte von Ferro55 auf 1.1730.....	114
Abbildung 88	Wechselwirkungsdiagramm für Härte von Ferro55 auf 1.1730 .....	115
Abbildung 89	Effekte Diagramm – Beurteilung Zugkraft von Ferro55 auf 1.1730 .....	116
Abbildung 90	Haupteffektdiagramm – Beurteilung Zugkraft von Ferro55 auf 1.1730 .....	117
Abbildung 91	Wechselwirkungsdiagramm – Beurteilung Zugkraft von Ferro55 auf 1.1730.	117
Abbildung 92	Effektdiagramm – Zugkraft von Ferro55 auf 1.7131 .....	118

---

---

Abbildung 93	Haupteffektdiagramm – Zugkraft von Ferro55 auf 1.7131 .....	118
Abbildung 94	Wechselwirkungsdiagramm Zugkraft von Ferro55 auf 1.7131 .....	119
Abbildung 95	Haupteffekt der errechneten Pulver-Weg-Rate auf die Zugkraft [N], Ferro55 auf 1.7131 .....	120
Abbildung 96	Vergleich der Mittelwerte des Qualitätsmerkmals Zugkraft von Ferro55 auf 1.1730/1.7131 in Abhängigkeit der Vorwärmtemperatur .....	120
Abbildung 97	Querschliff – Geometrische Größen der Schweißlinien von CU85 .....	121
Abbildung 98	12-Flächenkörper mit CU85 Testparametern auf 1.2312 .....	122
Abbildung 99	Residuendiagramme von 211 Härtemessungen bei unterschiedlichen Faktorkombinationen, CU85 .....	123
Abbildung 100	Effektdiagramm auf die Härte von CU85.....	123
Abbildung 101	Haupteffektediagramm für Härte von Cu85 .....	124
Abbildung 102	Haupteffektediagramm für Haftfestigkeit von Cu85 auf 1.1730 .....	125
Abbildung 103	Wechselwirkungsdiagramm für Haftfestigkeit von Cu85 auf 1.1730 .....	125
Abbildung 104	Haupteffektediagramm für Haftfestigkeit von Cu85 auf 1.2311 .....	126
Abbildung 105	Wechselwirkungsdiagramm für Haftfestigkeit von Cu85 auf 1.2311 .....	126
Abbildung 106	Ungültiger Haftfestigkeitsversuch CU85 auf 1.2312 – Bruch außerhalb des Prüfquerschnitts (links) Gültiger Haftfestigkeitsversuch CU85 auf 1.2311 – Bruch innerhalb des Prüfquerschnitts (rechts).....	127
Abbildung 107	Vergleich der maximalen Zugkraft von CU85 auf 1.2311 und 1.2312 .....	127
Abbildung 108	Vier Tribometerproben mit unterschiedlichen Beschichtungen vor dem Versuch (oben) – nach dem Versuch (unten) .....	129
Abbildung 109	Pin Nr. 4 (AlCrN) – REM Aufnahme des Zentrums vor (links) und nach (rechts) dem Triboversuch .....	129
Abbildung 110	Pin Nr. 5 (CU85) – REM Aufnahme vor (links) und nach (rechts) dem Triboversuch .....	130
Abbildung 111	Pin Nr. 10 (1.2379 unbeschichtet) – REM Aufnahme vor (links) und nach (rechts) dem Triboversuch .....	130
Abbildung 112	Gegenüberstellung Triboversuch – Verschleißbild auf Blech CU85 (Pin)/1.4301 (Blech) – links; 1.2379 (Pin)/1.4301 (Blech) - rechts.....	131
Abbildung 113	Auswertung Härte in Abhängigkeit der Vorwärmtemperatur für Ni25 aus insgesamt 453 Messungen .....	133

---

Abbildung 114	Vergleich der maximalen Zugkraft zwischen den Substraten 1.1730/1.2343/1.7131 und den zwei Einstellparametern $v$ und $O_L$ aus 144 Versuchen	134
Abbildung 115	Matrixplot Zugkraft [N] vs. Mittelwert von Härte [HV5] aus drei Messungen bei unterschiedlichen Parametern .....	135
Abbildung 116	Mittelwerte von Zugkraft Ni25 auf 1.2343 in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameter .....	136
Abbildung 117	Haupteffektdiagramm für Haftfestigkeit von Ni25 auf 1.2343 .....	137
Abbildung 118	Wechselwirkungsdiagramm für Haftfestigkeit von Ni25 auf 1.2343, die Wechselwirkung $O_L \times F_P$ liegt unterhalb des Signifikanzniveaus von 5 %.....	137
Abbildung 119	Standardisierte Probengeometrie für Haftfestigkeitsversuche .....	166
Abbildung 120	Detail Probenquerschnitt ab 3,0mm Beschichtungsstärke .....	167
Abbildung 121	Detail Probenquerschnitt ab 2,5mm Beschichtungsstärke .....	168
Abbildung 122	Detail Probenquerschnitt ab 1,0mm Beschichtungsstärke .....	169
Abbildung 123	Probenkörper für Schertest für beliebige Beschichtungsdicken .....	170
Abbildung 124	Pin Testkörper für Triboversuch .....	171

---

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Zusammenstellung der gebräuchlichsten Verschleißmessgrößen .....	8
Tabelle 2	Eigenschaften von häufig eingesetzten Graugusslegierungen; Darstellung nach Berns und Theisen (2006, S. 136) .....	16
Tabelle 3	Übersicht der am häufigsten verwendeten Kalt- und Warmarbeitsstählen; Darstellung nach (Schuler AG 1996, S. 496–498) .....	19
Tabelle 4	Wärmebehandlung von Kalt- und Warmarbeitsstählen; Darstellung nach (Schuler AG 1996, S. 496–498) .....	20
Tabelle 5	Eigenschaften von Kalt- und Warmarbeitsstählen; Darstellung nach (Schuler AG 1996, S. 496–498) .....	21
Tabelle 6	Vergleich unterschiedlicher Beschichtungsverfahren (Toyserkani et al. 2005, S. 49) .....	27
Tabelle 7	Übersicht der Arbeitsverfahren der Lasermaterialbearbeitung (Bliedtner et al. 2013, S. 17) .....	28
Tabelle 8	Kennwerte typischer Industrielaser zur Materialbearbeitung Darstellung nach Nath (2013, S. 72) .....	38
Tabelle 9	Gegenüberstellung Ringspaltdüse (Original) und Vierstrahldüse (Eigenentwicklung) .....	60
Tabelle 10	Gegenüberstellung Teilfaktorieller Versuchspläne in den Auflösungsstufen III, IV und V .....	105
Tabelle 11	Anzahl der Versuche in Abhängigkeit vom Versuchsplan und Anzahl der Faktoren (2-stufig) Darstellung nach Gundlach (2004, S. 75) .....	106
Tabelle 12	Screening-Versuchsplan mit der Auflösung III / 7 Faktoren auf 2 Stufen in 8 Versuchen .....	108
Tabelle 13	Teilfaktorieller Versuchsplan mit der Auflösung V / 5 Faktoren auf 2 Stufen in 16 Versuchen .....	109
Tabelle 14	Versuchsplan mit der Auflösung IV / 4 Faktoren auf 2 Stufen in 8 Versuchen ..	109
Tabelle 15	Vollfaktorieller 2 <sup>3</sup> Versuchsplan / 3 Faktoren auf 2 Stufen in 8 Versuchen .....	110
Tabelle 16	Parameterbezeichnung - Schreibweisen .....	111
Tabelle 17	Versuchsmatrix Ferro55 auf 1.1730 bzw. 1.7131, 5 Faktoren auf 2 Stufen in 16 Versuchen, Auflösung V .....	112
Tabelle 18	Versuchsmatrix CU85 auf 1.1730/1.2311/1.2312, 4 Faktoren auf 2 Stufen in 8 Versuchen Auflösung IV .....	122

---

Tabelle 19	Tribometerversuch vier unterschiedliche Werkstoffe auf 1.4301 * Herstellerangaben.....	128
Tabelle 20	Versuchsmatrix Ni25 auf 1.1730/1.7131/1.2343, 5 Faktoren auf 2 Stufen in 16 Versuchen Auflösung V.....	132
Tabelle 21	Vollfaktorielle Versuchsmatrix Ni25 auf 1.2343, 3 Faktoren auf 2 oder 3 Stufen in 12 Versuchen.....	134
Tabelle 22	Datenblatt Versuchsanlage.....	165
Tabelle 23	Gegenüberstellung maximale Zugkraft und Haftfestigkeit bei eindimensionalen Spannungszustand .....	172

---

## Literaturverzeichnis

**EN ISO 11146:1, 2005:** Laser und Laseranlagen - Prüfverfahren für Laserstrahlmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen Teil 1: Stigmatische und einfach astigmatische Strahlen.

**EN ISO 11146:2, 2005:** Laser und Laseranlagen - Prüfverfahren für Laserstrahlmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen Teil 2: Allgemein astigmatische Strahlen.

**EN ISO 6520-1, 2007:** Schweißen und verwandte Prozesse – Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen - Teil 1: Schmelzschweißen.

**EN ISO 11145, 2008:** Optik und Photonik - Laser und Laseranlagen - Begriffe und Formelzeichen.

**DIN 8580, 2003-09:** Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.

**DIN 8580, 2003-09:** Fertigungsverfahren.

**DIN EN ISO 6507-1:2005, 2006-03:** Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren.

**Amado, J. M.; Montero, J.; Tobar, M. J.; Yáñez, A. (2012):** Ni-based Metal Matrix Composite Functionally Graded Coatings. In: *Laser Assisted Net shape Engineering 7 (LANE 2012)* 39 (0), S. 362–367. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.049.

**Balbach, R.; Hankele, K. (1993):** Werkzeuge für die Umformtechnik. In: Kurt Lange (Hg.): *Sonderverfahren, Prozeßsimulation, Werkzeugtechnik, Produktion*. 2., völlig Neubearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer (Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft / hrsg. von Kurt Lange ; Bd. 4), S. 599–668.

**Behrens, Bernd-Arno; Yilgiran, Timur; Ocylok, Sorn; Weisheit, Andreas; Kelbassa, Ingomar (2014):** Deposition welding of hot forging dies using nanoparticle reinforced weld metal. In: *Production Engineering* 8 (5), S. 645–658. DOI: 10.1007/s11740-014-0562-y.

**Berger, Uwe; Hartmann, Andreas; Schmid, Dietmar (2013):** Additive Fertigungsverfahren. Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. 1. Aufl. Haan-Grutten: Verl. Europa-Lehrmittel (Bibliothek des technischen Wissens).

**Berns, Hans; Theisen, Werner (2006):** Eisenwerkstoffe. Stahl und Gusseisen ; mit 45 Tabellen. 3., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Berlin u.a.: Springer.

**Birkhofer, Herbert; Kümmerle, Timo (2012):** Feststoffgeschmierte Wälzlager. Einsatz, Grundlagen und Auslegung. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-16797-3>.

**Bleck, Wolfgang (2007):** Werkstoffprüfung in Studium und Praxis. 14., überarb. Aufl. Aachen.

---

**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.

**Bobzin, Kirsten; Bagcivan, Nazlim; Ewering, Mara; Goebbels, Nico Andreas; Weiß, Raphael; Warnke, Carsten (2010):** Entwicklung neuer PVD-Beschichtungen. In: Hubertus Murrenhoff (Hg.): Umweltverträgliche Tribosysteme. Die Vision einer umweltfreundlichen Werkzeugmaschine. Berlin u.a.: Springer, S. 83–136.

**Böge, Wolfgang; Borutzki, Ulrich; Kampf, Marcus (2014):** Spanlose Fertigung. In: Alfred Böge und Wolfgang Böge (Hg.): Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik. 22., überarb. u. erw. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. M1-M58.

**Brecher, Christian (2011):** Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter [http://download.springer.com/static/pdf/262/bok%253A978-3-642-20693-1.pdf?auth66=1408632215\\_bb57c3ef3a697e0c8935423195c031a0&ext=.pdf](http://download.springer.com/static/pdf/262/bok%253A978-3-642-20693-1.pdf?auth66=1408632215_bb57c3ef3a697e0c8935423195c031a0&ext=.pdf), zuletzt geprüft am 19.08.2014.

**Brückner, F.; Lepski, D.; Beyer, E. (2006):** Finite element studies of stress evolution in induction assisted laser cladding. In: SPIE Proceedings (Hg.): XVI International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers, Bd. 6346. Gmunden, Austria, 04.09.2006 (6346), S. 63461D. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1117/12.738143>.

**Brückner, Frank (2012):** Modellrechnungen zum Einfluss der Prozessführung beim induktiv unterstützten Laser-Pulver-Auftragschweißen auf die Entstehung von thermischen Spannungen, Rissen und Verzug. Techn. Univ.--Dresden, 2011. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

**Brückner, Frank; Nowotny, Steffen; Leyens, Christoph (2012):** Innovations in laser cladding and direct metal deposition. In: SPIE Proceedings (Hg.): High Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications, Bd. 8239. High Power Laser Materials Processing. San Francisco, USA, 21.01.2012 (8239), S. 823904–823904-6. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1117/12.906706>.

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

**Chen, Jianyin; Wang, Sheng-Hui; Xue, Lijue (2012):** On the development of microstructures and residual stresses during laser cladding and post-heat treatments. In: *J Mater Sci* 47 (2), S. 779-792. DOI: 10.1007/s10853-011-5854-4.

**Czichos, Horst; Habig, Karl-Heinz (2010):** Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9660-5>.

---

**Dehm, G.; Bamberger, M. (2002):** Laser cladding of Co-based hardfacing on Cu substrate. In: *Journal of Materials Science* 37 (24), S. 5345-5353. DOI: 10.1023/A:1021041527980.

**Dias da Silva, Marcel; Partes, Knut; Seefeld, Thomas; Vollertsen, Frank (2012):** Comparison of coaxial and off-axis nozzle configurations in one step process laser cladding on aluminum substrate. In: *Journal of Materials Processing Technology* 212 (11), S. 2514–2519. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.06.011.

**Doege, Eckart; Behrens, Bernd-Arno (2010):** Handbuch Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen. 2., bearb. Aufl. Berlin u.a.: Springer (VDI).

**Dubourg, L.; Archambeault, J. (2008):** Technological and scientific landscape of laser cladding process in 2007. In: *Surface and Coatings Technology* 202 (24), S. 5863–5869. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2008.06.122.

**Eichler, Jürgen; Eichler, Hans-Joachim (2010):** Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen. 7., aktualisierte Aufl. Berlin u.a.: Springer.

**Emamian, Ali; Corbin, Stephen F.; Khajepour, Amir (2010):** Effect of laser cladding process parameters on clad quality and in-situ formed microstructure of Fe–TiC composite coatings. In: *Surface and Coatings Technology* 205 (7), S. 2007–2015. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.087.

**Fahrenwaldt, Hans J.; Schuler, Volkmar; Twrdek, Jürgen (2014):** Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. 5., vollst. überarb. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-03141-1>.

**Fastermann, Petra (2012):** 3D-Druck/Rapid Prototyping. Eine Zukunftstechnologie - kompakt erklärt. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (X.media.press). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29225-5>.

**Freyer, Carsten (2007):** Schichtweises drahtbasiertes Laserauftragschweißen und Fräsen zum Aufbau metallischer Bauteile. Techn. Hochsch., Diss.--Aachen, 2006. Aachen: Shaker (Berichte aus der Produktionstechnik, 2007,4).

**Gåård, A.; Krakhmalev, P.; Bergström, J. (2009):** Influence of tool steel microstructure on origin of galling initiation and wear mechanisms under dry sliding against a carbon steel sheet. In: *17th International Conference on Wear of Materials* 267 (1–4), S. 387–393. DOI: 10.1016/j.wear.2008.11.013.

**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](http://gft-ev.de/wp-content/uploads/2014/07/2002_AB_7_Tribologie.pdf).

**Ghiotti, A.; Sgarabotto, F.; Bruschi, S. (2013):** A novel approach to wear testing in hot stamping of high strength boron steel sheets. In: *Wear of Materials* 2013 302 (1–2), S. 1319–1326. DOI: 10.1016/j.wear.2012.12.051.

---

**Groche, P.; Christiany, M. (2013):** Evaluation of the potential of tool materials for the cold forming of advanced high strength steels. In: *Wear of Materials 2013* 302 (1–2), S. 1279–1285. DOI: 10.1016/j.wear.2013.01.001.

**Groth, A.; Walz, C.; Naegeler, S. (Hg.) (2002):** New innovations in diode laser cladding. ICALEO 2002 - 21st International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, October 14, 2002 - October 17, 2002. Scottsdale, AZ, United states: Laser Institute of America (ICALEO 2002 - 21st International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, Congress Proceedings).

**Gundlach, Carsten (2004):** Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung. [Systemanalyse, Versuchsstrategie, Versuchsdurchführung, Versuchsauswertung]. Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2004. Kassel: Kassel Univ. Press.

**Hofman, J. T.; Lange, D. F. de; Pathiraj, B.; Meijer, J. (2011):** FEM modeling and experimental verification for dilution control in laser cladding. In: *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2), S. 187–196. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.09.007.

**Hofmann, Hansgeorg; Spindler, Jürgen (2014):** Verfahren in der Beschichtungs- und Oberflächentechnik. 3., überarb. Aufl. München: Hanser. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.3139/9783446441835>.

**Hügel, Helmut; Graf, Thomas (2009):** Laser in der Fertigung. Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren. 2., neu bearb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Studium).

**Jansen, Stefan (2014):** Generative Fertigung von konturnah temperierten Werkzeugen mittels Selective Laser Melting. Techn. Hochsch., Diss.--Aachen, 2014. 1. Aufl. Aachen: Apprimus Verl.

**Jeng, Jeng-Ywan; Lin, Ming-Ching (2001):** Mold fabrication and modification using hybrid processes of selective laser cladding and milling. In: *Journal of Materials Processing Technology* 110 (1), S. 98–103. DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00850-5.

**Jonnalagadda, Aravind; Scharek, Siegfried; Bratt, Craig; Albert, David; Weitzer, Tobias (2011):** Induction assisted laser cladding for high deposition rates. In: 30th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2011, October 23, 2011 - October 27, 2011. Orlando, FL, United states: Laser Institute of America (30th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2011), S. 283–294.

**Kaierle, Stefan; Barroi, Alexander; Noelke, Christian; Hermsdorf, Joerg; Overmeyer, Ludger; Haferkamp, Heinz (2012):** Review on Laser Deposition Welding: From Micro to Macro. In: *Laser Assisted Net shape Engineering 7 (LANE 2012)* 39 (0), S. 336–345. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.046.

**Kanani, Nasser (2007):** Moderne Mess- und Prüfverfahren für metallische und andere anorganische Überzüge. Mit 23 Tabellen. Renningen: expert-Verl.

**Karlsson, Patrik; Gåård, Anders; Krakhmalev, Pavel; Bergström, Jens (2012):** Galling resistance and wear mechanisms for cold-work tool steels in lubricated sliding against high strength stainless

---

steel sheets. In: *Tribology in Manufacturing Processes* 286–287, S. 92–97. DOI: 10.1016/j.wear.2011.04.002.

**Kim, Hyung-Ick; Park, Hong-Sun; Koo, Jae-Mean; Seok, Chang-Sung; Yang, Sung-Ho; Kim, Moon-Young (2012):** Evaluation of welding characteristics for manual overlay and laser cladding materials in gas turbine blades. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 26 (7), S. 2015–2018. DOI: 10.1007/s12206-012-0505-5.

**Klocke, Fritz; Brecher, Christian; Wegener, Maximilian; Heinen, Daniel; Fischer, Bettina; Do-Khac, Dennis (2012):** Scanner-based Laser Cladding. In: *Laser Assisted Net shape Engineering 7 (LANE 2012)* 39 (0), S. 346–353. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.047.

**Klocke, Fritz; Heinen, Daniel; Schongen, Fabian; Arntz, Kristian; Liu, Yuan; Backer, Vladimir; Feldhaus, Bjorn (Hg.) (2014):** Wear protection of deep drawing tools by systematic optimization of highly stressed surfaces. WGP Congress 2012, June 27, 2012 - June 28, 2012. Berlin, Germany: Trans Tech Publications (Advanced Materials Research, 907).

**Klocke, Fritz; König, Wilfried (2006):** Fertigungsverfahren 4. Umformen. 5., neu bearbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-39533-1>.

**Köhler, Henry; Partes, Knut; Kornmeier, Joana Rebelo; Vollertsen, Frank (2012):** Residual Stresses in Steel Specimens Induced by Laser Cladding and their Effect on Fatigue Strength. In: *Laser Assisted Net shape Engineering 7 (LANE 2012)* 39 (0), S. 354–361. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.048.

**Kondratiuk, Jens; Kuhn, Patrick (2011):** Tribological investigation on friction and wear behaviour of coatings for hot sheet metal forming. In: *Wear* 270 (11–12), S. 839–849. DOI: 10.1016/j.wear.2011.02.011.

**Kroh, Rüdiger (2015):** Das Beste aus zwei Welten. In: *Maschinenmarkt*, 09.03.2015 (11), S. 18–21.

**Kumar, A.; Roy, S. Kumar; Berger, H.; Majumdar, J. Dutta (2014):** Laser surface cladding of Ti-6Al-4V on AISI 316L stainless steel for bio-implant application. In: *Lasers in Engineering* 28 (1-2), S. 11–33.

**Lin, Jehnming (2000):** Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding. In: *Journal of Materials Processing Technology* 105 (1–2), S. 17–23. DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00584-7.

**Lin, W. C.; Chen, C. (2006):** Characteristics of thin surface layers of cobalt-based alloys deposited by laser cladding. In: *Surface and Coatings Technology* 200 (14–15), S. 4557–4563. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.03.033.

**Macherauch, Eckard; Zoch, Hans-Werner (2014):** Praktikum in Werkstoffkunde. 95 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik. 12., überarb u. erw. Aufl. 2014.

---

Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-05038-2>.

**Martin, Douglas (2007):** Theodore Maiman, 79, Dies; Demonstrated First Laser. In: *The New York Times* 2007, 11.05.2007 (Online Ausgabe). Online verfügbar unter [http://www.nytimes.com/2007/05/11/obituaries/11maiman.html?ex=1336536000&en=47aa5c1bba1664f&ei=5090&partner=rssuserland&emc=rss&\\_r=0](http://www.nytimes.com/2007/05/11/obituaries/11maiman.html?ex=1336536000&en=47aa5c1bba1664f&ei=5090&partner=rssuserland&emc=rss&_r=0), zuletzt geprüft am 19.08.2014.

**Merklein, M.; Lechler, J.; Geiger, M. (2006):** Characterisation of the flow properties of the quenchenable ultra high strength steel 22MnB5. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55 (1), S. 229–232. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60404-1.

**Mueller, B.; Gebauer, M.; Polster, S.; Neugebauer, R.; Malek, R.; Kotzian, M.; Hund, R. (2014):** Ressource-effizient hot sheet metal forming by innovative die cooling with laser beam melted tooling components. In: 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Physical Prototyping. VR@P 2013, October 1, 2013 - October 5, 2013. Leiria, Portugal: Taylor & Francis - Balkema (High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping - Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research and Rapid Prototyping, VR@P 2013), S. 321–326.

**Müller, Bernhard; Gebauer, Mathias; Neugebauer, Reimund (2012):** Laser beam melted tooling with added value enters sheet metal forming. In: Direct Digital Manufacturing Conference. Online verfügbar unter <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-199379.html>.

**Nath, A. K. (2013):** High Power Lasers in Material Processing Applications. An Overview of Recent Developments. In: Jyotsna Dutta Majumdar und Indranil Manna (Hg.): *Laser-Assisted Fabrication of Materials*. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer Series in Materials Science, 161).

**Nowotny, Steffen; Muenster, Robert; Scharek, Siegfried; Beyer, Eckhard (2010):** Integrated laser cell for combined laser cladding and milling. In: *Assembly Automation* 30 (1), S. 36–38. DOI: 10.1108/01445151011016046.

**Ocelík, V.; Bosgra, J.; Hosson, J. Th M. de (2009):** In-situ strain observation in high power laser cladding. In: *Surface and Coatings Technology* 203 (20–21), S. 3189–3196. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.03.050.

**Ocelík, V.; Eekma, M.; Hemmati, I.; Hosson, J. Th M. de (2012):** Elimination of Start/Stop defects in laser cladding. In: *Surface and Coatings Technology* 206 (8–9), S. 2403–2409. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.10.040.

**Ocelík, V.; Oliveira, U. de; Boer, M. de; Hosson, J. Th M. de (2007):** Thick Co-based coating on cast iron by side laser cladding: Analysis of processing conditions and coating properties. In: *Surface and Coatings Technology* 201 (12), S. 5875–5883. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.10.044.

**Oehler, Gerhard; Kaiser, Fritz (2001):** Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge. Mit 42 Tabellen und 66 Berechnungsbeispielen. 8. Aufl. Berlin u.a.: Springer (Klassiker der Technik).

---

**Oliveira, U. de; Ocelík, V.; Hosson, J. Th M. de (2005):** Analysis of coaxial laser cladding processing conditions. In: *Surface and Coatings Technology* 197 (2–3), S. 127–136. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.06.029.

**Oliveira, U. de; Ocelík, V.; Hosson, J. Th M. de (2006):** Residual stress analysis in Co-based laser clad layers by laboratory X-rays and synchrotron diffraction techniques. In: *Surface and Coatings Technology* 201 (3–4), S. 533–542. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.12.011.

**Partes, Knut (2009):** Analytical model of the catchment efficiency in high speed laser cladding. In: *Surface and Coatings Technology* 204 (3), S. 366–371. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.07.041.

**Paul, C. P.; Alemohammad, H.; Toyserkani, E.; Khajepour, A.; Corbin, S. (2007):** Cladding of WC–12 Co on low carbon steel using a pulsed Nd:YAG laser. In: *Materials Science and Engineering: A* 464 (1–2), S. 170–176. DOI: 10.1016/j.msea.2007.01.132.

**Pelcastre, L.; Hardell, J.; Prakash, B. (2013):** Galling mechanisms during interaction of tool steel and Al–Si coated ultra-high strength steel at elevated temperature. In: *Tribology International* 67 (0), S. 263–271. DOI: 10.1016/j.triboint.2013.08.007.

**Pelcastre, Leonardo; Hardell, Jens; Courbon, Cédric; Prakash, Braham (2014):** Tribological behaviour of Al-Si-coated ultra-high-strength steel during interaction with tool steel at elevated temperatures: Influence of tool steel surface topography parameters on galling. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. DOI: 10.1177/0954405414535920.

**Podgornik, B.; Hogmark, S.; Sandberg, O. (2006):** Proper coating selection for improved galling performance of forming tool steel. In: *Papers presented at the 11th Nordic Symposium on Tribology, NORDTRIB 2004 11th Nordic Symposium on Tribology, NORDTRIB 2004* 261 (1), S. 15–21. DOI: 10.1016/j.wear.2005.09.005.

**Podgornik, B.; Jerina, J. (2012):** Surface topography effect on galling resistance of coated and uncoated tool steel. In: *Surface and Coatings Technology* 206 (11–12), S. 2792–2800. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.11.041.

**Poprawe, Reinhart (2005):** Lasertechnik für die Fertigung. Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur ; mit 26 Tabellen. Berlin: Springer (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://www.mylibrary.com?id=62162>.

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

**Scheffler, Eberhard (1997):** Statistische Versuchsplanung und -auswertung. Eine Einführung für Praktiker ; 186 Tabellen. 3., neu bearb. und erw. Aufl. von "Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung". Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie.

---

**Schmidt, M.; Kolleck, R.; Grimm, A.; Veit, R.; Bartkowiak, K. (2010):** Direct laser deposition of Cu alloy on forming tool surfaces - Process window and mechanical properties. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (1), S. 211–214. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.071.

Schoeller-Bleckmann Oilfield Equipment AG (Hg.) (2014): High Precision MWD/LWD Components. Online verfügbar unter <http://www.sbo.at/schoellerbleckmann/cms.php?pageName=mwdlwd>, zuletzt geprüft am 20.08.2014.

Schuler AG (1996): Handbuch der Umformtechnik. Berlin u.a.: Springer.

**Schulze, Günter (2010):** Die Metallurgie des Schweißens. Eisenwerkstoffe - Nichteisenmetallische Werkstoffe. 4., neu bearbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-03183-0>.

**Sexton, L.; Lavin, S.; Byrne, G.; Kennedy, A. (2002):** Laser cladding of aerospace materials. In: *Journal of Materials Processing Technology* 122 (1), S. 63–68. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)01121-9.

**Siebertz, Karl; van Bebber, David; Hochkirchen, Thomas (2010):** Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-05493-8>.

**Smurov, Igor (2008):** Laser cladding and laser assisted direct manufacturing. In: *3 Rencontres Internationales de la Projection Thermique 3-RIPT 2007 3 Rencontres Internationales de la Projection Thermique* 202 (18), S. 4496–4502. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2008.04.033.

**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>.

**Sresomroeng, B.; Premanond, V.; Kaewtatip, P.; Khantachawana, A.; Koga, N.; Watanabe, S. (2010):** Anti-adhesion performance of various nitride and DLC films against high strength steel in metal forming operation. In: *Proceedings of Diamond 2009, The 20th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes and Nitrides, Part 2* 19 (7–9), S. 833–836. DOI: 10.1016/j.diamond.2010.02.008.

**Suárez, A.; Amado, J. M.; Tobar, M. J.; Yáñez, A.; Fraga, E.; Peel, M. J. (2010):** Study of residual stresses generated inside laser clad plates using FEM and diffraction of synchrotron radiation. In: *Proceedings of the European Materials Research Society (E-MRS) Spring Meeting 2009 Symposium P* 204 (12–13), S. 1983–1988. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.11.037.

**Tönshoff, Hans Kurt; Denkena, Berend (2014):** Beschichten. S5.4. In: Karl-Heinrich Grote und Jörg Feldhusen (Hg.): *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. 24., aktualisierte Aufl. 2014. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. R105-R106.

**Toyserkani, Ehsan; Khajepour, Amir; Corbin, Stephen (2005):** Laser cladding. Boca Raton, Calif: CRC Press. Online verfügbar unter [http://sfx.ethz.ch/sfx\\_locator?sid=ALEPH:EBI01&genre=book&isbn=0849321727](http://sfx.ethz.ch/sfx_locator?sid=ALEPH:EBI01&genre=book&isbn=0849321727).

---

Trumpf Lasertechnik (2006): TLF Bedienungsanleitung.

Tuominen, J.; Nakki, J.; Pajukoski, H.; Miettinen, J.; Peltola, T.; Vuoristo, P. (2015): Wear and corrosion resistant laser coatings for hydraulic piston rods. In: *Journal of Laser Applications* 27 (2). DOI: 10.2351/1.4914503.

Valsecchi, B.; Previtali, B.; Gariboldi, E. (2012): Fibre laser cladding of turbine blade leading edges: The effect of specific energy on clad dilution. In: *International Journal of Structural Integrity* 3 (4), S. 377–395. DOI: 10.1108/17579861211281182.

Weisheit, A.; Gasser, A.; Backes, G.; Jambor, T.; Pirch, N.; Wissenbach, K. (2013): Direct Laser Cladding, Current Status and Future Scope of Application. In: Jyotsna Dutta Majumdar und Indranil Manna (Hg.): *Laser-Assisted Fabrication of Materials*. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer Series in Materials Science, 161), S. 221–240.

Weiß, Wolfgang (2013): Thermische Auslegung von Werkzeugen für Presshärteprozesse. Dissertation. Technische Universität Graz. Institut für Werkzeugtechnik und Spanlose Produktion.

Weißbach, Wolfgang (2014): Werkstofftechnik. In: Alfred Böge und Wolfgang Böge (Hg.): *Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. 22., überarb. u. erw. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. E1-E88.

Westheide, H.; Weist, Ch.; Dannenmann, E. (1993): Verschleißschutz durch Beschichtungen und Ionenstrahltechnik. In: Kurt Lange (Hg.): *Sonderverfahren, Prozeßsimulation, Werkzeugtechnik, Produktion*. 2., völlig Neubearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer (Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft / hrsg. von Kurt Lange ; Bd. 4), S. 669–701.

Witzel, Johannes; Schopphoven, Thomas; Gasser, Andres; Kelbassa, Ingomar (Hg.) (2011a): Development of a model for prediction of material properties of laser clad Inconel 718 as related to porosity in the bulk material. 30th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2011, October 23, 2011 - October 27, 2011. Orlando, FL, United States: Laser Institute of America (30th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2011).

Witzel, Johannes; Stannard, Salay; Gasser, Andres; Kelbassa, Ingomar (Hg.) (2011b): Characterization of micro/macrostructure of laser clad Inconel 718 with increased deposition rates as related to the mechanical properties. 30th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2011, October 23, 2011 - October 27, 2011. Orlando, FL, United States: Laser Institute of America (30th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2011).

World Steel Association (2001): ULSAB-AVC. Overview Report.

Xu, Guojian; Kutsuna, Muneharu; Liu, Zhongjie; Zhang, Hong (2006): Characteristics of Ni-based coating layer formed by laser and plasma cladding processes. In: *Materials Science and Engineering: A* 417 (1–2), S. 63–72. DOI: 10.1016/j.msea.2005.08.192.

---

**Zhang, Shitang; Zhou, Jiansong; Guo, Baogang; Zhou, Huidi; Pu, Yuping; Chen, Jianmin (2008):** Friction and wear behavior of laser cladding Ni/hBN self-lubricating composite coating. In: *Materials Science and Engineering: A* 491 (1–2), S. 47–54. DOI: 10.1016/j.msea.2007.12.015.

**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.

**Zum Gahr, K.-H. (1998):** Wear by hard particles. In: *Tribology International* 31 (10), S. 587–596. DOI: 10.1016/S0301-679X(98)00079-6.

## Anhang

### Maschinendaten:

Tabelle 22 Datenblatt Versuchsanlage

#### *Trumpf TrumaForm DMD 505*

##### **Anlagenkinematik**

Verfahrweg X-Achse	2000	mm
Verfahrweg Y-Achse	1000	mm
Verfahrweg Z-Achse	750	mm
Verfahrweg B-Achse	±80	°
Verfahrweg C-Achse	±190	°
Positionsgenauigkeit nach VDI/DGQ 3441 (1m)	±0,08 / ±0,005	mm/m / °
Maximale Achsgeschwindigkeit Linearachsen	30	m/min
Achsbeschleunigung Linearachsen	4	m/s <sup>2</sup>
Maximale Achsgeschwindigkeit B-Achse	120	°/s
Maximale Achsgeschwindigkeit C-Achse	180	°/s
Steuerung	Siemens SINUMERIK 840 D	

##### **CO<sub>2</sub>-Lasersystem TLF 3200**

Wellenlänge	10,6	μm
Maximale Ausgangsleistung	3200	W
Kontinuierlich einstellbarer Leistungsbereich	160-3200	W
Leistungskonstanz (bezogen auf Nennleistung)	±2	%
Strahldurchmesser am Auskoppelspiegel	15	mm
Divergenzwinkel θ (Halbwinkel)	1	m rad
Leistungsverteilung	TEM <sub>00</sub>	
Pulsfrequenz	100 – 100 000	Hz
Beugungsmaßzahl M <sup>2</sup> lt. Herstellerangaben	1,82	
Beugungsmaßzahl M <sup>2</sup> lt. Messung	1,90	

##### **Pulverförderung (Schweißzusatz)**

Maximale Anzahl von Pulverfördereinheiten	4	Stk.
Pulverspeichervolumen pro Einheit	500	cm <sup>3</sup>
Pulverförderrate	1-30	g/min
Mögliche Partikelgrößen	45-160	μm
Schutz-, und Trägergas	Argon, Helium	

##### **Bearbeitungsoptik**

Arbeitsabstand (Fokussierspiegel, Arbeitspunkt)	312	mm
Brennweite Fokussierspiegel	250 / 270 (Standard) / 300	mm
Möglicher Fokushift	±20	mm
Typ Beschichtungsdüse	1-Strahl-, 4-Strahl-, Koaxialdüse	

# Haftfestigkeitsversuch Geometrien

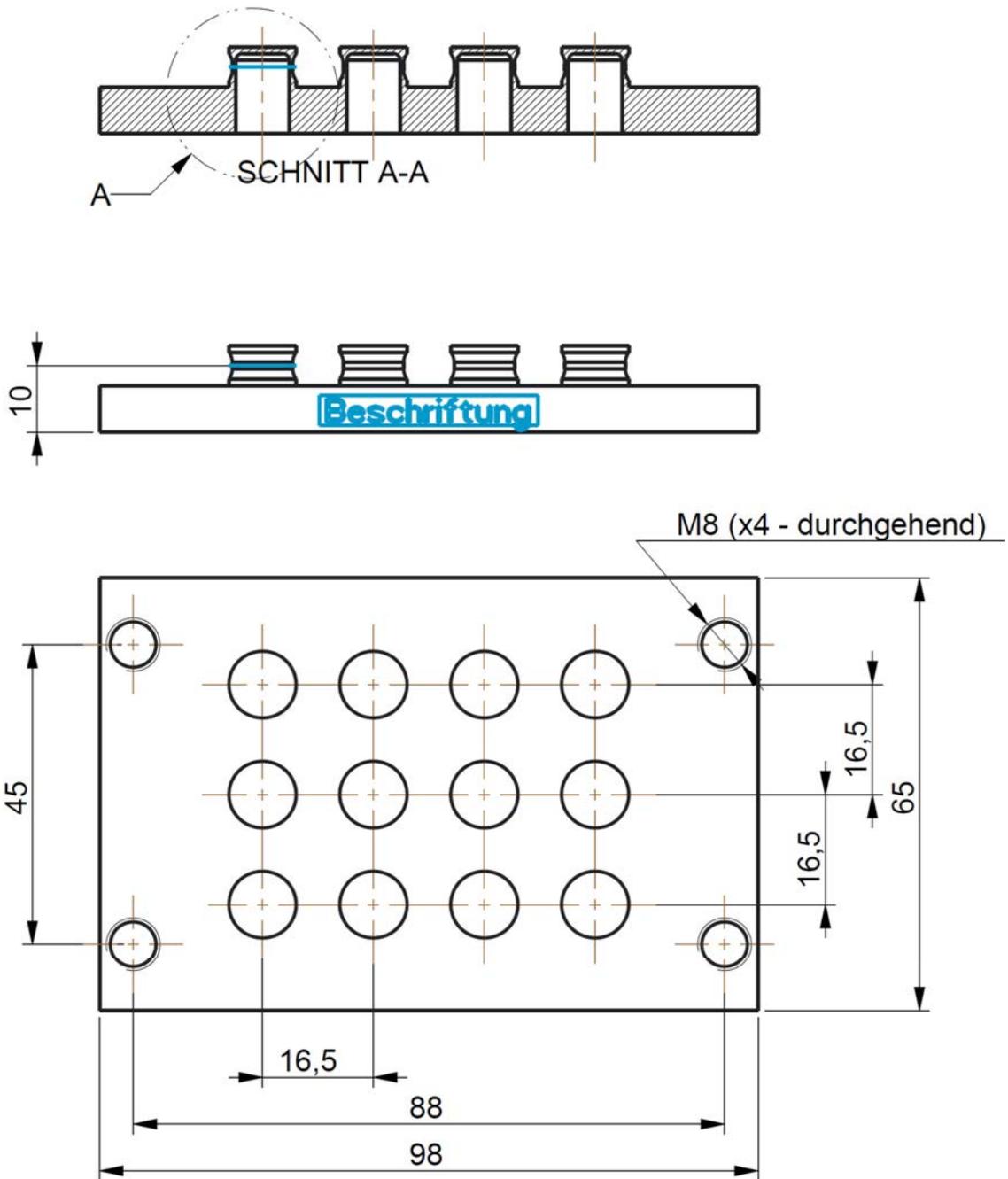


Abbildung 119 Standardisierte Probengeometrie für Haftfestigkeitsversuche

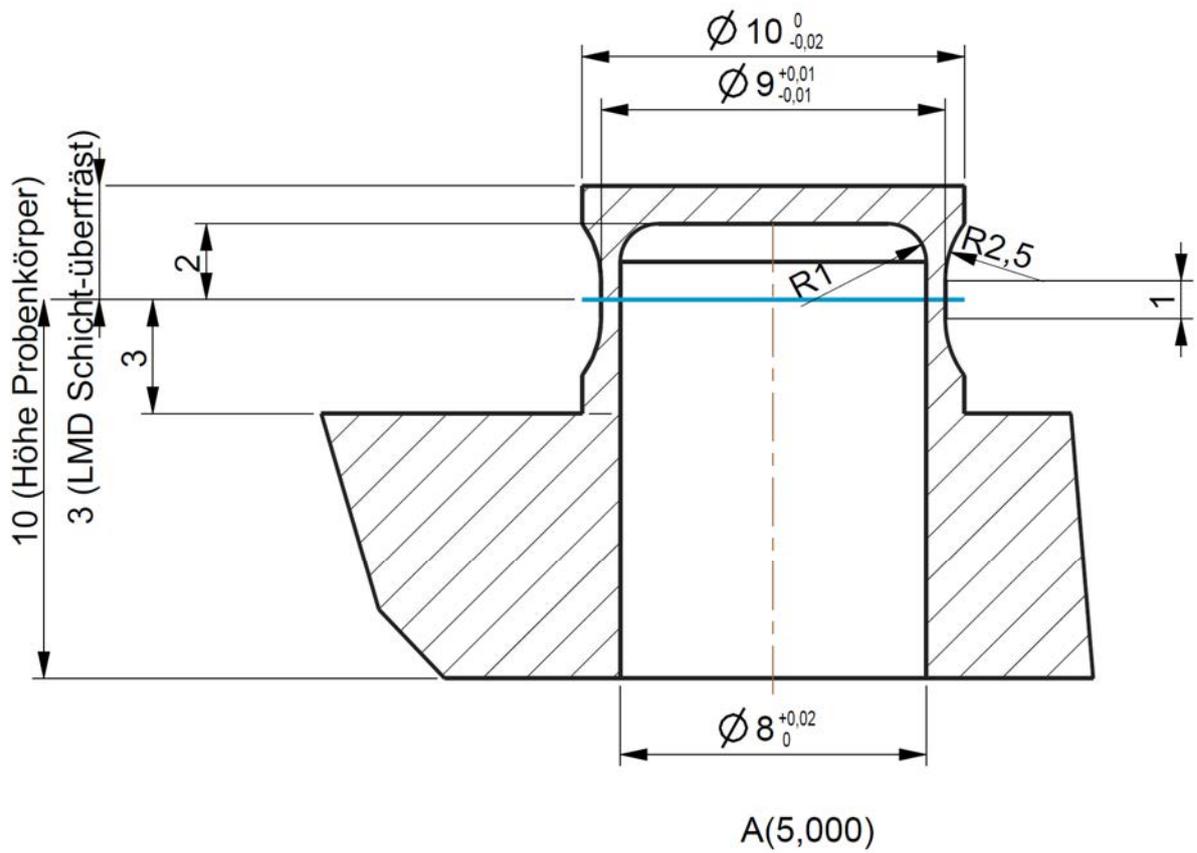


Abbildung 120 Detail Probenquerschnitt ab 3,0mm Beschichtungstärke

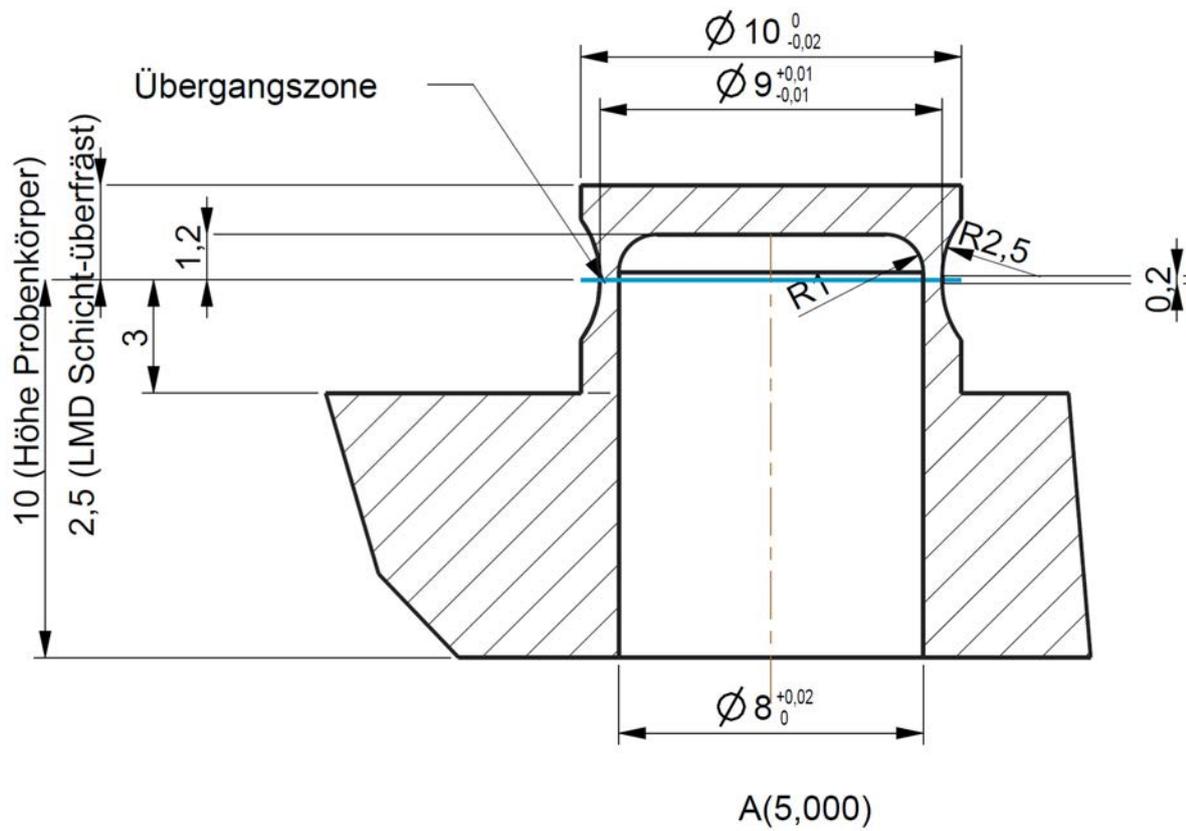


Abbildung 121 Detail Probenquerschnitt ab 2,5mm Beschichtungsstärke

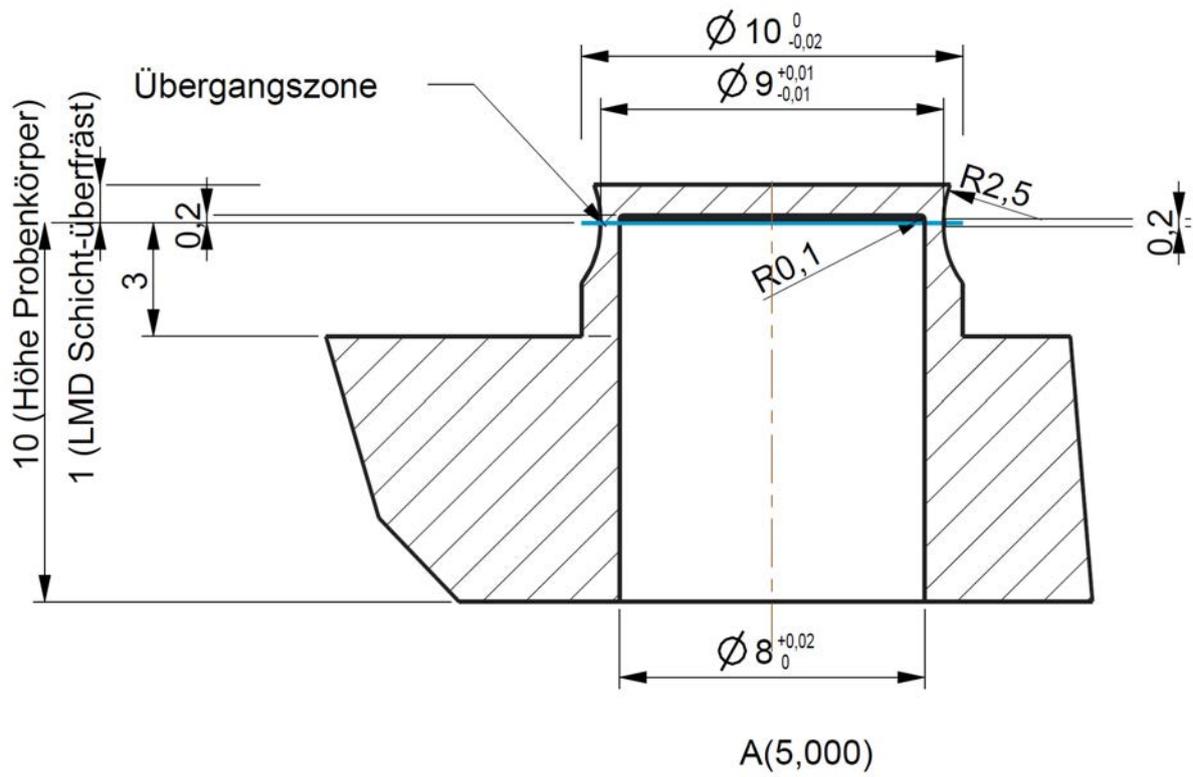


Abbildung 122 Detail Probenquerschnitt ab 1,0mm Beschichtungstärke

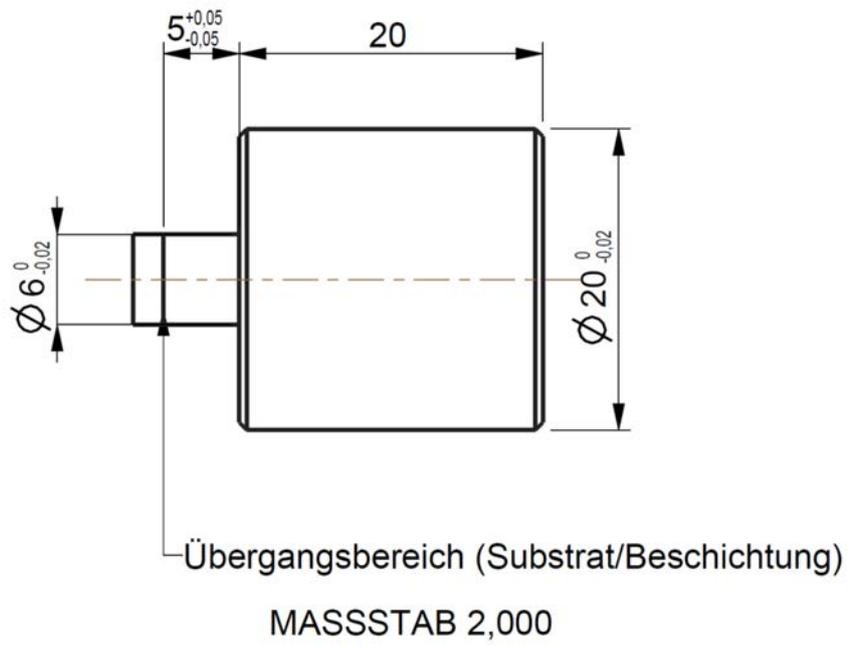


Abbildung 123 Probenkörper für Schertest für beliebige Beschichtungsdicken

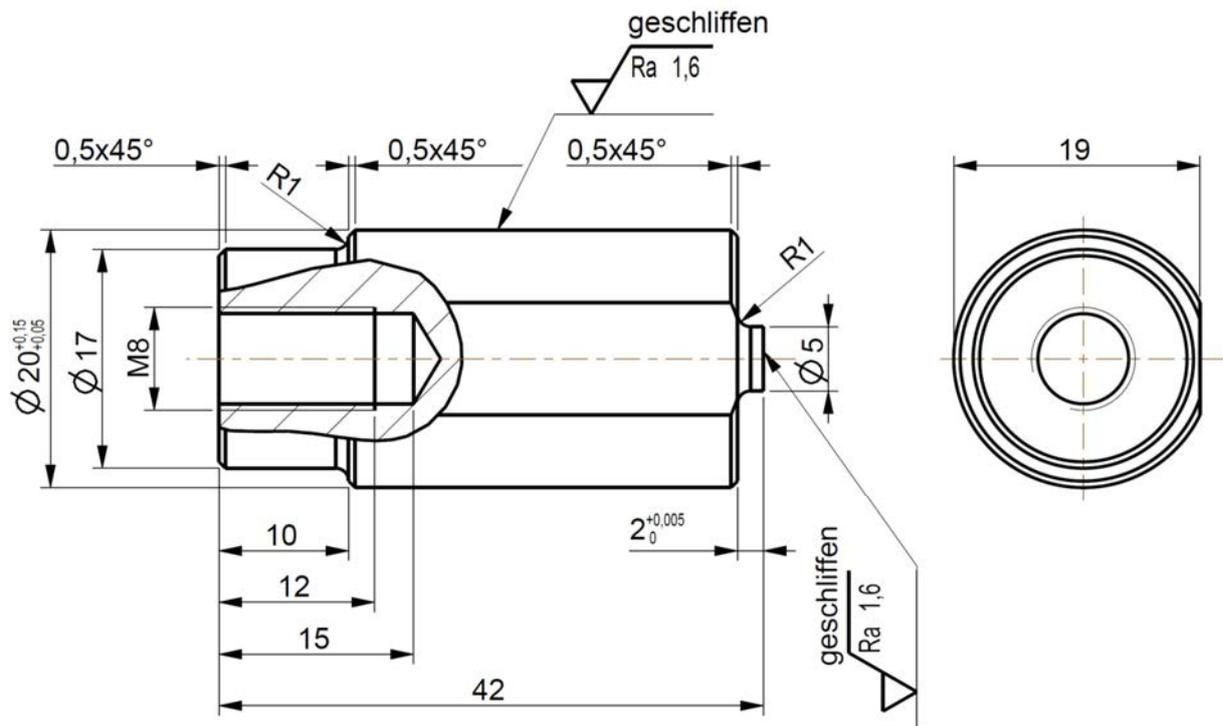


Abbildung 124 Pin Testkörper für Triboversuch

---

## Abschätzung der Haftfestigkeit anhand der maximalen Zugkräfte

Tabelle 23 Gegenüberstellung maximale Zugkraft und Haftfestigkeit bei eindimensionalen Spannungszustand

<i>Aussen Ø</i> <i>[mm]</i>	<i>Innen Ø</i> <i>[mm]</i>	<i>Querschnittsfläche</i> <i>[mm<sup>2</sup>]</i>	<i>Zugkraft</i> <i>[N]</i>	<i>Zugfestigkeit</i> <i>[N/mm<sup>2</sup>]</i>
9,00	8,00	13,352	4000	300
9,00	8,00	13,352	4500	337
9,00	8,00	13,352	5000	374
9,00	8,00	13,352	5500	412
9,00	8,00	13,352	6000	449
9,00	8,00	13,352	6500	487
9,00	8,00	13,352	7000	524
9,00	8,00	13,352	7500	562
9,00	8,00	13,352	8000	599
9,00	8,00	13,352	8500	637
9,00	8,00	13,352	9000	674
9,00	8,00	13,352	9500	712
9,00	8,00	13,352	10000	749
9,00	8,00	13,352	10500	786
9,00	8,00	13,352	11000	824
9,00	8,00	13,352	11500	861
9,00	8,00	13,352	12000	899
9,00	8,00	13,352	12500	936
9,00	8,00	13,352	13000	974
9,00	8,00	13,352	13500	1011
9,00	8,00	13,352	14000	1049
9,00	8,00	13,352	14500	1086
9,00	8,00	13,352	15000	1123
9,00	8,00	13,352	15500	1161
9,00	8,00	13,352	16000	1198

## Beschichtungswerkstoffe

<b>Eisenbasis</b>		<b>(Gewichts-%)</b>									
<b>Bezeichnung</b>	<b>Werkstoff</b>	<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>N</b>	<b>Cu</b>	<b>V</b>
NT-316L	AISI 316L, 1,4404	<0,03	17,0	12,0	2,5	Rest	<2,00	<0,75	<0,10	<0,75	
UTP-Ferro 55		0,50	7,00		2,50	Rest	0,50	0,40			
NT-FeV12		2,80	5,00		1,50	Rest	1,00	1,00			12,00
NT-FeCrV15		4,40	17,00		2,00	Rest	0,90	0,90	3,00		15,00
<b>Nickelbasis</b>											
<b>Bezeichnung</b>	<b>Werkstoff</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>C</b>	<b>Ti</b>	<b>Al</b>	<b>Fe</b>	<b>Nb</b>	<b>Si</b>	<b>B</b>
NT-Ni25		Rest			<0,50			<1,00		2,50	1,70
NT-Ni40		Rest	6,00		0,25			2,00		3,50	1,30
NT-Ni50		Rest	11,00		0,45			2,50		3,80	2,30
NT-NiBSi		Rest			0,03			0,40		3,00	3,00
<b>Kobaltbasis</b>											
<b>Bezeichnung</b>	<b>Werkstoff</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Co</b>	<b>C</b>	<b>Ti</b>	<b>Fe</b>	<b>W</b>	<b>Ta</b>	<b>B</b>	<b>Re</b>
Castolin 16008,04	Stellite 21	10,00	23,50	Rest	0,60	0,20		7,00	3,50		0,50
<b>Kupferbasis</b>											
<b>Bezeichnung</b>	<b>Werkstoff</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Co</b>	<b>C</b>	<b>Ti</b>	<b>Al</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Cu</b>	<b>Si</b>
NT-CU85		5,00			0,01		10,00	1,00			0,10
NT-CU90					0,01		10,00	1,00			0,10
<b>sonstige Pulver</b>											
<b>Bezeichnung</b>	<b>Basis</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Co</b>	<b>C</b>	<b>Ti</b>	<b>Al</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Cu</b>	<b>Si</b>
Sulzer-WOKA 50208	Wo				5,60-5,90						5,50-7,50

---